



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη Συστοιχιών Υπολογιστών (Beowulf Clusters) με τη
Χρήση Desktop Η/Υ, Graphics Processing Units (GPUs) και
Ελεύθερου Λογισμικού για Παράλληλη Επεξεργασία (Parallel
Computing) με Εφαρμογές στη Βιοϊατρική Τεχνολογία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Διβόλης

Επιβλέπων: Καθ. Δημήτριος Κουτσούρης

ΑΘΗΝΑ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη Συστοιχιών Υπολογιστών (Beowulf Clusters) με τη
Χρήση Desktop H/Y, Graphics Processing Units (GPUs) και
Ελεύθερου Λογισμικού για Παράλληλη Επεξεργασία (Parallel
Computing) με Εφαρμογές στη Βιοϊατρική Τεχνολογία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Διβόλης

Επιβλέπων: Καθ. Δημήτριος Κουτσούρης

ΑΘΗΝΑ 2021

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6/4/2021.

.....
Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αλέξανδρος Διβόλης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος
Μηχανικός και Μηχανικός
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

.....
(Υπογραφή)

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΔΙΒΟΛΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Διβόλης, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια συστοιχία είναι πρακτικά ένας υπερυπολογιστής, που θεωρητικά μπορεί να φτιάξει και να χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε. Πιο συγκεκριμένα η συστοιχία είναι ένας παράλληλος υπολογιστής φτιαγμένος από συνηθισμένα εμπορικά κομμάτια. Αυτή η προσέγγιση εκμεταλλεύεται την εκπληκτική απόδοση, που είναι τώρα διαθέσιμη στους εμπορικούς προσωπικούς υπολογιστές. Με πολλές μετρικές, συμπεριλαμβανομένης της υπολογιστικής ταχύτητας, του μεγέθους της κύριας μνήμης, του διαθέσιμου χώρου στο δίσκο και του εύρους ζώνης, ένας μόνο υπολογιστής του σήμερα είναι πιο ισχυρός από τους υπερυπολογιστές του παρελθόντος. Αξιοποιώντας τη δύναμη των δεκάδων χιλιάδων τέτοιων ισχυρών επεξεργαστικών στοιχείων τόσο χαμηλού κόστους, μπορεί κανείς να δημιουργήσει έναν ισχυρό υπερυπολογιστή.

Στην παρούσα εργασία επιδιώξαμε τη δημιουργία μιας συστοιχίας υπολογιστών από απλούς υπολογιστές, οι οποίοι μπορούν να βρεθούν με χαμηλό ή και μηδενικό κόστος και έτσι να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο θα μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων στη βιοϊατρική τεχνολογία. Η προσπάθειά μας έδειξε ότι κάτι τέτοιο είναι εφικτό και μάλιστα στις δοκιμές που κάναμε δείξαμε ότι η χρήση μιας συστοιχίας μπορεί να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο σημαντικά (>50x). Η απόδοση αυτή ήταν εξαιρετικά σημαντική αφού πολλά από τα προβλήματα της βιοϊατρικής τεχνολογίας είναι εξαιρετικά απαιτητικά σε υπολογιστική ισχύ και άρα κοστοβόρα αν πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει εμπορικά διαθέσιμα clusters για την επίλυσή τους.

Η λύση που εμείς προτείναμε αποτελεί έναν φθινό και αποτελεσματικό τρόπο για την επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων και μάλιστα που μπορεί να είναι διαθέσιμος σε έναν ακαδημαϊκό χώρο, διαθέσιμο προς όλους που έχουν αντίστοιχα προβλήματα. Το πρόβλημα, που επιλέξαμε να επιλύσουμε αφορούσε στο μετασχηματισμό Fourier σημάτων βολταμετρίας. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις του προβλήματος αυτού ήταν εξαιρετικά απαιτητικές αφού ένας επεξεργαστής για να καταφέρει να μετασχηματίσει πέντε σήματα χρειάστηκαν περίπου τέσσερις ώρες. Αντίστοιχα, με τη χρήση της συστοιχίας χρειάστηκαν 4.2 min για την ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, φάνηκε ότι τέτοιες προσπάθειες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την υποβοήθηση του ερευνητικού έργου και ειδικότερα σε εποχές, όπου οι πόροι είναι εξαιρετικά περιορισμένοι και ο ανταγωνισμός εξαιρετικά υψηλός.

Λέξεις κλειδιά: Beowulf cluster, συστοιχίες, βιοϊατρική τεχνολογία, open software

ABSTRACT

A cluster is practically a supercomputer that can be made and used theoretically by anyone. More specifically, a cluster is a parallel computer made of ordinary commercial hardware. This approach takes advantage of the amazing performance that is now available on commercial PCs. With many metrics, including computing speed, main memory size, disk space and bandwidth, a single computer today is more powerful than supercomputers of the past. By harnessing the power of tens of thousands of such powerful processors at such low cost, one can create a powerful supercomputer.

In the present work, we sought to create a cluster of computers from simple home-computers, which can be found at low or zero cost and thus to create a computing tool that can help solve computational problems in biomedical technology. Our effort has shown that this is feasible, and in our tests we have shown that using our cluster, we reduced computing time significantly ($>50\times$). This performance was extremely important as many of the problems of biomedical technology are extremely demanding in computing power and therefore costly if one had to use commercially available clusters to solve them.

The solution we have proposed is a cheap and effective way to solve computational problems, as well as we made available to an academic environment, available to anyone who has to deal with similar computational problems. The problem we chose to solve was the Fourier transform of voltammetry signals. The computational requirements of this problem were extremely demanding as it took about four hours for a processor to be able to transform five signals. On the other hand, using the cluster took 4.2 min to complete the computations. Therefore, such efforts have appeared to be extremely important in assisting research and, in particular, in times where resources are extremely scarce and competition is extremely high.

Keywords: Beowulf cluster, arrays, biomedical technology, open software

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, κ. Δημήτριο Διονύσιο Κουτσούρη, για την ευκαιρία που μου προσέφερε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον Δρ. Γεώργιο Λάμπρου, Ε.ΔΙ.Π, της Ιατρικής Σχολής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Α' Παιδιατρική Κλινική, Χωρέμειο Ερευνητικό Εργαστήριο, για το ενδιαφέρον του και τη συμβολή του στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς και για την παραχώρηση του εξοπλισμού του Χωρεμείου Ερευνητικού Εργαστηρίου, που ο ίδιος είχε συλλέξει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από τη καρδιά μου τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	XI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	XIII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XVII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XXI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	XXIII
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΜΕΡΟΣ Ι-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	5
1.1. Η Ιστορία των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Η/Υ).....	5
1.1.1 Η Απαρχή των Η/Υ	6
1.1.1.1 <i>Οι Βασικές Αρχές των Η/Υ</i>	6
1.1.1.2 <i>Η Σειρά των Μοντέλων Z</i>	7
1.1.1.3 <i>Η Μηχανή Πινάκων</i>	8
1.1.1.4 <i>Η Μηχανή του Leibnitz</i>	8
1.1.2 Η Πρώτη Γενιά των Η/Υ (1946-1958).....	9
1.1.2.1 <i>Mark I</i>	9
1.1.2.2 <i>ENIAC</i>	11
1.1.2.3 <i>EDVAC</i>	12
1.1.2.4 <i>NCR3000</i>	13
1.1.2.5 <i>Η Μηχανή Turing (1936)</i>	13
1.1.3 Λυχνίες.....	14
1.1.4 Τρανζίστορ (Transistor).....	15
1.1.5 Η Δεύτερη Γενιά Η/Υ (1958-1964).....	17
1.1.6 Η Τρίτη Γενιά Η/Υ (1964-1971).....	18
1.1.6.1 <i>IBM 1620 II0</i>	20
1.1.6.2 <i>Sinclair ZX81</i>	20
1.1.7 Η Τέταρτη Γενιά Η/Υ (1971-2010).....	21
1.1.8 Οι Μεγάλοι Υπολογιστές.....	24
1.1.9 Η Πέμπτη Γενιά Η/Υ, Τεχνητή Νοημοσύνη (2010-Σήμερα).....	26
2. PENTIUMS.....	29
2.1. Pentium 2 (Intel Pentium II).....	30
2.2. Pentium 3 (Intel Pentium III)	34
2.3. Pentium 4 (Intel Pentium IV)	40
2.4. Οικογένεια X86 Αρχιτεκτονικών Συνόλου Εντολών	42
2.5. Διοχέτευση (Pipeline)	42
2.6. P6 (1995).....	45
2.6.1. Cache Μνήμη.....	47
2.6.2. Branch Prediction (Πρόβλεψη Διακλάδωσης).....	50

2.6.3.	Speculative Execution (Υποθετική Εκτέλεση)	51
2.6.4.	Dynamic Scheduling	51
2.6.5.	Register Renaming και Data Dependency	51
2.6.6.	Reorder Buffer (ROB)	52
2.6.7.	Reservation Stations	53
2.6.8.	Memory Order Buffere (MOB)	53
2.6.9.	Dynamic Execution	54
2.7.	NetBurst	54
2.7.1.	Hyper Pipelined Technology	57
2.7.2.	Hyper Threading Technology (HTT)	59
2.7.3.	Quad Front-Side Bus	60
2.7.4.	Rapid Execution Engine	60
2.7.5.	Execution Trace Cache	61
2.7.6.	Replay System	61
2.7.7.	Εκδόσεις	62
2.8.	Intel Pentium IV	63
2.8.1.	Πυρήνες Pentium 4	65
2.8.2.	Wilamette	65
2.8.3.	Northwood	66
2.8.4.	Gallatin-Extreme Edition	67
2.8.5.	Prescott	68
2.8.6.	Cedar Mill	69
2.8.7.	Core	70
2.8.8.	Χαρακτηριστικά της Intel Core Μικροαρχιτεκτονικής	74
2.8.8.1.	<i>Intel Wide Dynamic Execution</i>	75
2.8.8.2.	<i>Intel Intelligent Power Capability</i>	76
2.8.8.3.	<i>Intel Advanced Smart Cache</i>	77
2.8.8.4.	<i>Intel Smart Memory Access</i>	77
2.8.8.5.	<i>Intel Advanced Digital Media Boost</i>	78
2.8.9.	Επεξεργαστές Αρχιτεκτονικής Core	79
2.8.10.	Intel Core 2	80
2.9.	5^η Υπολογιστών 2010-Τεχνητή Νοημοσύνη	82
3.	ΚΑΡΤΕΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ (GRAPHICS CARDS)	87
3.1.	Ιστορική Αναδρομή	88
3.1.1.	Δεκαετία 1970	88
3.1.2.	Δεκαετία 1980	89
3.1.3.	Δεκαετία 1990	90
3.1.4.	Δεκαετία 2000-2010	93
3.1.5.	2010 έως Σήμερα	95
3.2.	Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Καρτών Γραφικών	97
3.2.1.	Συμβατικές Θύρες PCI (Conventional PCI Slots)	97
3.2.2.	Accelerated Graphics Port (AGP)	98
3.2.3.	PCI Express (PCIe)	100
3.3.	Εταιρείες GPU	103
3.4.	Υπολογιστικές Λειτουργίες	103
3.5.	Μορφές GPU	104
3.5.1.	GPUs Γενικού Σκοπού (GPGPUs) και Επεξεργασία Ρεύματος Δεδομένων (STREAM Processing)	105
3.6.	CUDA	107
3.6.1.	Προγραμματιστικές Δυνατότητες	108
3.6.2.	Τρέχουσες και Μελλοντικές Χρήσεις της Αρχιτεκτονικής CUDA	109
3.6.3.	Πλεονεκτήματα	110
3.6.4.	Περιορισμοί	110

3.6.5. GPUs που Υποστηρίζουν CUDA.....	111
--	-----

4. COMPUTER CLUSTERS (ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ) ΚΑΙ ΤΟ PROJECT BEOWULF 113

4.1. Περιγραφή και Ανάπτυξη	113
4.2. Λειτουργικά Συστήματα	115
4.3. Χρήση των Beowulf Clusters.....	115
4.4. Τι Είναι ένα Cluster	117
4.5. Χτίζοντας και Χρησιμοποιώντας ένα Cluster.....	118
4.6. Επιλέγοντας ένα Cluster.....	118
4.7. Ετοιμασία και Ρύθμιση ενός Cluster	120
4.8. Ανάπτυξη νέων Εφαρμογών.....	121
4.9. Ρύθμιση των Clusters.....	121
4.9.1. Προκλήσεις Παροχής Λογισμικού-Δεν Υπάρχουν Ομοιογενή Clusters	122
4.9.2. Διαφοροποίηση κατά τις Λειτουργικές Γραμμές	124
4.9.3. Συνέπεια Λογισμικού του Συστήματος σε όλο το Cluster.....	125
4.9.4. Προκλήσεις και Βέλτιστες Πρακτικές Παροχής Υλικού.....	126
4.9.5. Διάταξη Κόμβων και Διαχείριση Καλωδίων.....	127
4.9.6. Διαφορετικοί Τύποι Διαχείρισης Εγκατάστασης	130
4.9.7. Τα Βασικά Βήματα.....	133
4.9.8. NPACI Rocks	135
4.9.9. Διαμόρφωση Βασισμένη στα Components.....	138
4.9.10. Graph Components	140
4.9.11. Ολοκλήρωση.....	142
4.9.12. Το OSCAR Toolkit.....	143
4.9.13. Πως Λειτουργούν οι Image-Based Installers.....	143
4.9.14. Bootsstrapping και Configuration	145
4.9.15. Άλλα Σημαντικά Toolkits	147
4.9.15.1. Score.....	147
4.9.15.2. LCFG.....	147
4.9.15.3. XCat.....	147
4.9.15.4. Chiba City Toolkit.....	148
4.9.16. Όταν τα Πράγματα Πηγαίνουν Λανθασμένα	148

ΜΕΡΟΣ ΙΙ-ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ 151

5. ΥΛΙΚΟ 153

5.1. Επεξεργαστές που Χρησιμοποιήθηκαν στην Παρούσα Διπλωματική	153
5.2. Εργαλεία.....	153
5.3. Λογισμικό	153

6. ΜΕΘΟΔΟΣ..... 155

ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 157

7. ΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ 159

7.1. Heron III Master.....	159
7.2. Heron III 01 & 02.....	163

8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ (BENCHMARKING) ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ 167

8.1. Διατύπωση του Προβλήματος.....	167
-------------------------------------	-----

8.1.1.	Στοιχεία Ηλεκτροχημείας.....	169
8.1.1.1.	<i>Οξειδωση</i>	170
8.1.1.2.	<i>Ηλεκτροκατάλυση</i>	170
8.1.1.3.	<i>Οξειδωτικές Ενώσεις</i>	171
8.1.2.	Βολταμετρία.....	172
8.1.2.1.	<i>Βολταμετρικές Τεχνικές</i>	173
8.1.2.2.	<i>Αμπερομετρία</i>	173
8.1.2.3.	<i>Κοκλική Βολταμετρία</i>	174
8.1.2.4.	<i>Fast Scan Cyclic Voltammetry (FSCV)</i>	175
8.1.2.5.	<i>Differential Pulse Voltammetry (DPV)</i>	175
8.1.3.	Άλλες Αναλυτικές Τεχνικές.....	176
8.1.4.	Ανάκτηση Δεδομένων.....	177
8.1.5.	Recording Sessions.....	177
8.1.6.	Ψηφιοποίηση Δεδομένων.....	178
8.1.7.	Ανάλυση Δεδομένων.....	181
8.1.8.	Μετασχηματισμός Fourier.....	181
8.1.8.1.	<i>Μετασχηματισμός Fourier Διακριτού Χρόνου (DTFT)</i>	181
8.1.8.2.	<i>Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)</i>	184
8.2.	Ο Υπολογισμός του Μετασχηματισμού Fourier με τη Χρήση της Συστοιχίας Υπολογιστών.....	187
ΜΕΡΟΣ IV-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....		197
9. Η ΧΡΗΣΗ ΜΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....		199
9.1.	Γιατί να Χρησιμοποιηθεί ένα Cluster.....	199
9.2.	Κατανοώντας τις Απαιτήσεις των Εφαρμογών.....	200
9.2.1.	Υπολογιστικές Απαιτήσεις.....	200
9.2.2.	Μνήμη.....	201
9.2.3.	Input/Output.....	202
9.2.4.	Άλλες Απαιτήσεις.....	202
9.2.5.	Παραλληλισμός.....	202
9.2.6.	Υπολογίζοντας τις Απαιτήσεις της Εφαρμογής.....	204
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		211
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		213
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		217
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΠΛΗΡΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ (H/W SPECIFICATIONS).....		219
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ-ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB.....		273
Κώδικας για τον Υπολογισμό του Μετασχηματισμού Fourier σε Βολταμετρικό Σήμα....		273
Η Αρχική Ρουτίνα (Μετασχηματισμός Fourier υψηλής υπολογιστικής απαίτησης).....		273
Η Ρουτίνα “proc1”.....		273
Η Ρουτίνα Μετασχηματισμού με Βρόγχο (Μετασχηματισμός Fourier χαμηλής υπολογιστικής απαίτησης).....		279

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα.	5
Εικόνα 2. Τα πέντε βασικά στοιχεία, που απαρτίζουν έναν υπολογιστή κατά von Neumann.	6
Εικόνα 3. Ο υπολογιστής Z3.	7
Εικόνα 4. Η στατιστική μηχανή του Χόλλεριθ.	8
Εικόνα 5. Η μηχανή του Leibnitz.	9
Εικόνα 6. Ο H/Y Mark I.	10
Εικόνα 7. Ο H/Y Mark I.	10
Εικόνα 8. Ο H/Y ENIAC.	11
Εικόνα 9. Ο H/Y EDVAC.	12
Εικόνα 10. Η λογιστική μηχανή NCR3000.	13
Εικόνα 11. Ο Alan Turing.	14
Εικόνα 12. Τάξεις των αυτομάτων.	15
Εικόνα 13. Το πρώτο τρανζίστορ (1947).	16
Εικόνα 14. Η συνδεσμολογία του πρώτου τρανζίστορ (1947).	16
Εικόνα 15. Ο H/Y IBM 1401.	17
Εικόνα 16. Ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα.	18
Εικόνα 17. Ο IBM 360.	19
Εικόνα 18. Ο IBM 1620 II.	20
Εικόνα 19. Ο Sinclair ZX-81.	21
Εικόνα 20. Ο H/Y 4004 της Intel.	22
Εικόνα 21. Ο H/Y 8008 (επάνω) και το εσωτερικό του (κάτω).	23
Εικόνα 22. Ο H/Y Cray Supercomputer.	24
Εικόνα 23. Desktop και Laptop της δεκαετίας του 1980.	25
Εικόνα 24. Desktop και Laptop της δεκαετίας του 1990.	25
Εικόνα 25. Συσκευές βασισμένες στην 4 ^η γενιά υπολογιστών.	27
Εικόνα 26. Ο επεξεργαστής Pentium 2.	31
Εικόνα 27. Ο επεξεργαστής Pentium 2 τοποθετημένος σε μητρική κάρτα.	32
Εικόνα 28. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 3.	35
Εικόνα 29. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Katmai.	36
Εικόνα 30. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Coppermine.	38
Εικόνα 31. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Tualatin.	39
Εικόνα 32. Η μικροαρχιτεκτονική των επεξεργαστών 6 ^{ης} γενιάς.	41
Εικόνα 33. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση.	43
Εικόνα 34. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση.	47
Εικόνα 35. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση.	48
Εικόνα 36. Η Πυραμίδα ιεράρχησης της μνήμης.	49
Εικόνα 37. Ο επεξεργαστής Pentium 4.	55

Εικόνα 38. Ο νόμος του Moore.....	56
Εικόνα 39. Οι τεχνολογίες διοχέτευσης των Pentium P6 και Pentium 4.....	58
Εικόνα 40. Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης των τεχνολογιών διοχέτευσης.....	58
Εικόνα 41. Η τεχνολογία Hyper Threading.....	60
Εικόνα 42. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 4.....	65
Εικόνα 43. Ο Pentium 4 τοποθετημένος σε μητρική.....	66
Εικόνα 44. Ο Pentium 4 και το συγκριτικό του μέγεθος.....	67
Εικόνα 45. Ο Pentium 4 Gallatin Extreme Edition.....	68
Εικόνα 46. Ο Pentium 4 Prescott.....	69
Εικόνα 47. Ο Pentium 4 Cedar Mill.....	70
Εικόνα 48. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 4 Core.....	71
Εικόνα 49. Η μικροαρχιτεκτονική του Intel Core.....	74
Εικόνα 50. Ο λογότυπος της Intel για τον επεξεργαστή Intel Core 2.....	80
Εικόνα 51. Τεχνητή νοημοσύνη.....	82
Εικόνα 52. Τεχνητή νοημοσύνη II.....	83
Εικόνα 53. Sunway TaihuLight-Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway.....	84
Εικόνα 54. Κατανομή των 500 δυνατώτερων υπερυπολογιστών ανά κράτος το έτος 2016.....	84
Εικόνα 55. Πλήθος ανθρώπων με πρόσβαση στο Ίντερνετ ανά έτος.....	85
Εικόνα 56. Η κονσόλα Atari.....	89
Εικόνα 57. Pixel shading.....	94
Εικόνα 58. PCI graphics card slots.....	97
Εικόνα 59. AGP graphics card slots.....	99
Εικόνα 60. PCIe slots (A: PCI Express ×4, B: PCI Express ×16, C: PCI Express ×1, D: PCI Express ×16, E: Legacy PCI (32-bit, 5V)).....	101
Εικόνα 61. Παράδειγμα τοπολογίας PCIe. Τα λευκά κουτιά συνένωσης αναπαριστούν τους διακόπτες ροής δεδομένων προς τις συσκευές ενώ τα γκρι από τις συσκευές.....	102
Εικόνα 62. Πίσω πλευρά ενός τυπικού συστήματος racking.....	128
Εικόνα 63. Cable Bundles: Tires καλωδίων σχηματίζουν μία καλά διαχειρίσιμη ομάδα 8 καλωδίων.....	129
Εικόνα 64. Βασικό αρχείο RedHat Kickstart. Το Anaconda, που είναι το RedHat installer, ερμηνεύει τα περιεχόμενα του αρχείου kickstart για να δημιουργήσει έναν κόμβο.....	137
Εικόνα 65. Γράφημα περιγραφής (Kickstart). Αυτό το γράφημα περιγράφει πλήρως όλες τις συσκευές ενός Rocks Cluster.....	139
Εικόνα 66. Description Graph Detail. Αυτό απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο οι δύο ενότητες «standalone.xml» και «base.xml» μοιράζονται τη βασική διαμόρφωση και επίσης διαφέρουν σε άλλες ιδιαιτερότητες.....	140
Εικόνα 67. Το module ssh.xml περιλαμβάνει τα πακέτα ssh και ρυθμίζει την υπηρεσία στην post ενότητα του Kickstart.....	141
Εικόνα 68. Το module "base.xml" ρυθμίζει τη βασική ενότητα του αρχείου Kickstart.....	141
Εικόνα 69. Ο υπολογιστής Heron_III_Master.....	159
Εικόνα 70. Ο υπολογιστής Heron_III_Master.....	160

Εικόνα 71. Ο υπολογιστής Heron_III_Master.....	160
Εικόνα 72. Ο υπολογιστής Heron_III_Master.....	161
Εικόνα 73. Ο υπολογιστής Heron_III_Master.....	161
Εικόνα 74. Ο υπολογιστής Heron_III_01 & III_02.....	163
Εικόνα 75. Το εσωτερικό του υπολογιστή Heron_III_01 & III_02.....	164
Εικόνα 76. Το εσωτερικό του υπολογιστή Heron_III_01 & III_02.....	164
Εικόνα 77. Ο πολωρογράφος του Heyrovsky.....	168
Εικόνα 78. Σύστημα τριών ηλεκτροδίων στη βολταμετρία. (1) Ηλεκτρόδιο εργασίας, (2) βοηθητικό ηλεκτρόδιο, (3) ηλεκτρόδιο αναφοράς.....	172
Εικόνα 79. Μοντέλο του βολταμετρικού ηλεκτροδίου και η αντίστοιχη οξειδοαναγωγική αντίδραση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου άνθρακα (από: Theodoridis & Lambrou (2019)) (30).	173
Εικόνα 80. Το δυναμικό εισόδου στην κυκλική βολταμετρία αυξάνει σαν ράμπα γραμμικά σε κυκλικές φάσεις.....	174
Εικόνα 81. Κυκλική βολταμετρία.....	175
Εικόνα 82. Αλλαγή της τάσεως εισόδου στην Διαφορική Βολταμετρία (από Theodoridis & Lambrou (2019)) (10, 30).	176
Εικόνα 83. Φωτογραφία μιας μέτρησης (μπλε γραφίδα).	179
Εικόνα 84. Η μέτρηση με την προσθήκη διάφανου millimeter.....	180
Εικόνα 85. Αναπαράσταση με Excel της παραπάνω μέτρησης μετά την ψηφιοποίηση.	180
Εικόνα 86. Γραφική παράσταση της συνάρτησης διακριτού χρόνου $x[n]=0.6^n$, για $0 \leq n \leq 9$	183
Εικόνα 87. Γραφική παράσταση του μέτρου $ X(e^{j\omega}) $ του DTFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$ της προηγούμενης εικόνας. Διακρίνεται ότι το μέτρο του DTFT είναι συνεχής συνάρτηση και περιοδική ως προς ω	184
Εικόνα 88. Γραφική παράσταση της γωνίας $\angle X(e^{j\omega})$ του DTFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$. Φαίνεται ότι η γωνία του DTFT είναι περιττή συνάρτηση του ω	184
Εικόνα 89. Γραφική παράσταση του μέτρου $ X[k] $ του DFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$. Διακρίνεται ότι το μέτρο του DFT είναι διακριτή συνάρτηση, σε αντίθεση με τον DTFT.	186
Εικόνα 90. Γραφική παράσταση της γωνίας $\angle X[k]$ του DFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$	187
Εικόνα 91. Γραφική παράσταση του χρόνου υπολογισμού του μετασχηματισμού Fourier με τη χρήση ενός επεξεργαστή, της συστοιχίας υπολογιστών και των GPUs.....	195
Εικόνα 92. Γραφική παράσταση του χρόνου υπολογισμού του ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων με τη χρήση ενός επεξεργαστή, της συστοιχίας υπολογιστών και των GPUs.....	195
Εικόνα 93. Sample decomposition ενός 3-D mesh. Το επάνω δεξί γωνιακό κουτί έχει τραβηχτεί για να δείξει ότι το πλέγμα έχει υποδιαιρεθεί κατά μήκος των αξόνων x, y και z.	206

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά της 6 ^{ης} γενιάς επεξεργαστών P6.	29
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά της 7 ^{ης} γενιάς επεξεργαστών x86.....	29
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά των Pentium 2.	30
Πίνακας 4. Παραλλαγές των Desktop επεξεργαστών Pentium 2.	33
Πίνακας 5. Παραλλαγές των Mobile επεξεργαστών Pentium 2.	34
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά των Pentium 3.	34
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Katmai των Pentium 3.....	36
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Coppermine των Pentium 3.....	37
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Coppermine T των Pentium 3.....	38
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Tualatin των Pentium 3.	39
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή Pentium 4.	40
Πίνακας 12. Σύνοψη των σταδίων και συχνοτήτων των επεξεργαστών.	45
Πίνακας 13. Τα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή P6.....	47
Πίνακας 14. Συγκριτικός πίνακας των ταχυτήτων της οικογένειας Pentium.	48
Πίνακας 15. Η λειτουργία των καταχωρητών.	52
Πίνακας 16. Η λειτουργία των καταχωρητών.	52
Πίνακας 17. Τα χαρακτηριστικά του Netburst.	56
Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά των NetBurst Pentium 4 επεξεργαστών.....	63
Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά των Pentium 4 επεξεργαστών.....	64
Πίνακας 20. Χαρακτηριστικά των Pentium 4 Core επεξεργαστών.	72
Πίνακας 21. Οι επεξεργαστές αρχιτεκτονικής Pentium 4 Core.....	80
Πίνακας 22. Τα χαρακτηριστικά των επεξεργαστών Pentium 4 Core 2.	81
Πίνακας 23. Τα χαρακτηριστικά των εκδόσεων PCI και AGP.	100
Πίνακας 24. Οι μητρικές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.	154
Πίνακας 25. Οι προδιαγραφές (configuration) του υπολογιστή Heron I 01.....	162
Πίνακας 26. Οι προδιαγραφές (configuration) του υπολογιστή Heron II 01.	165
Πίνακας 27. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε ένα επεξεργαστή.	189
Πίνακας 28. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές.....	190
Πίνακας 29. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές και 2xGPUs.....	191
Πίνακας 30. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε 1 (8 πυρήνες) επεξεργαστή.	192
Πίνακας 31. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές.....	193
Πίνακας 32. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε 2xGPUs.....	194

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

$t_f+t_d+t_e+t_w=T$, Εξίσωση 1 , όπου T ο συνολικός χρόνος.	43
$t_f=t_d=t_e=t_w=t$, Εξίσωση 2 , όπου t ο χρόνος.....	43
Performance=Frequency×Instructions Per Cycle (IPC), Εξίσωση 3	72
Power=Dynamic Capacitance×Voltage ² ×Frequency, Εξίσωση 4	73
Ειδικότερα, $E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln Q_r$ (Εξίσωση 5), όπου E είναι το δυναμικό του κυττάρου σε θερμοκρασία T , E_0 είναι το δυναμικό ηρεμίας του κυττάρου, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, z είναι ο αριθμός των moles ή των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται λόγω της αντίδρασης, F είναι η σταθερά Faraday και Q_r είναι ο λόγος της συγκέντρωσης των ουσιών που υφίστανται οξειδωση ($[S_{ox}]$) προς τη συγκέντρωση των ουσιών που υφίστανται αναγωγή ($[S_{red}]$).	170
Ειδικότερα, $\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q$ (Εξίσωση 6), όπου ΔG είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs, ΔG^0 είναι το δυναμικό του κυττάρου όταν $Q=1$, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T είναι η θερμοκρασία και $\ln Q$ είναι ο λόγος των προϊόντων επί των αντιδρώντων.	170
Ειδικότερα, $u = \frac{x}{t}$ (Εξίσωση 7), όπου u είναι η ταχύτητα του χαρτιού, x η απόσταση που διανύεται σε χρόνο t	178
Ειδικότερα, $T = \frac{x}{u}$ (Εξίσωση 8), όπου T είναι η περίοδος της δειγματοληψίας, x η απόσταση που διανύεται και u η ταχύτητα του χαρτιού.....	178
Ειδικότερα, $X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n}$ (Εξίσωση 9), όπου $x[n]$ είναι το σήμα διακριτού χρόνου και ω η συχνότητα.	181
Ειδικότερα, $x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega$ (Εξίσωση 10), όπου $X(e^{j\omega})$ είναι το Φουριεριανό μετασχημάτισμα και ω η συχνότητα.	182
Ειδικότερα, $X(e^{j\omega}) = X_R(e^{j\omega}) + jX_I(e^{j\omega})$ (Εξίσωση 11), όπου $X_R(e^{j\omega})$ το πραγματικό μέρος της συνάρτησης και $X_I(e^{j\omega})$ το φανταστικό μέρος της συνάρτησης, είτε σε πολική μορφή, ως $X(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega}) e^{j\angle X(e^{j\omega})}$, όπου $ X(e^{j\omega}) $ το μέτρο της μιγαδικής συνάρτησης και $\angle X(e^{j\omega})$ η γωνία της.	182
Ειδικότερα, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] < \infty$ (Εξίσωση 12), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου.	182
Ειδικότερα, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] ^2 < \infty$ (Εξίσωση 13), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου.....	183

Ειδικότερα,
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1$$
 (Εξίσωση 14), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου..... 185

Ειδικότερα,
$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1$$
 (Εξίσωση 15), όπου $x[n]$, $X(k)$ ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier του $x[n]$ 185

Ειδικότερα,
$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\omega n} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega n}$$
 (Εξίσωση 16),

όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου, $X(e^{j\omega})$ ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου του $x[n]$, και ω η συχνότητα..... 186

Ειδικότερα, $T = s + rn$ (Εξίσωση 17)..... 203

Ειδικότερα,
$$T = \frac{1}{p} N^3 f + 6 \left(s + r \frac{N^2}{p^3} \right)$$
 (Εξίσωση 18). 207

Ειδικότερα, $T \approx \frac{1}{p} N^3 f + 6s$ (Εξίσωση 19)..... 208

$$\frac{1}{p} N^3 f > 6s$$

Ειδικότερα,
$$p < \frac{N^3 f}{6s}$$
 (Εξίσωση 20)..... 208

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “*Ανάπτυξη Συστοιχιών Υπολογιστών (Beowulf Clusters) με τη Χρήση Desktop H/Y, Graphics Processing Units (GPUs) και Ελεύθερου Λογισμικού για Παράλληλη Επεξεργασία (Parallel Computing) με Εφαρμογές στη Βιοϊατρική Τεχνολογία*” εκπονήθηκε στο Χωρέμειο Ερευνητικό Εργαστήριο, της Α΄ Παιδιατρικής Κλινικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ).

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε ταυτόχρονα με τη διπλωματική εργασία με τίτλο “*Ανάπτυξη Συστοιχιών Υπολογιστών (Beowulf Clusters) με τη Χρήση Desktop H/Y Παλαιάς Τεχνολογίας και Ελεύθερου Λογισμικού για Παράλληλη Επεξεργασία (Parallel Computing) με Εφαρμογές στη Βιοϊατρική Τεχνολογία*” του συναδέλφου Ανδρέα Παρασκευά Καβαζίδη. Οι δύο αυτές διπλωματικές αποτελούσαν τμήμα του ίδιου project και αφορούσαν στην υλοποίηση δύο συστοιχιών με υπολογιστές διαφορετικών γενεών.

Η ιδέα για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας δόθηκε από τον κ. Γεώργιο Λάμπρου, ο οποίος μέσα από την παρουσίαση των θεμάτων των διπλωματικών εργασιών, μας έδωσε το ερέθισμα για την εκπόνηση της ανωτέρω διπλωματικής. Η ανάγκη για τη δημιουργία τέτοιων συστοιχιών, προήλθε από τις ανάγκες των ερευνητικών μελετών του ΧΕΕ, οι οποίες απαιτούσαν μεγάλη υπολογιστική ισχύ (ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων (Big Data) γονιδιακής έκφρασης, όπως π.χ. δεδομένων μικροσυστοιχιών, Next Generation Sequencing (NGS) κτλ. καθώς και προσομοίωσης πρωτεϊνικής διαμόρφωσης). Δεδομένων των αυξημένων αναγκών για υπολογιστική δύναμη και ταυτόχρονα της έλλειψης πόρων, η υλοποίηση ενός τέτοιου υπολογιστικού εργαλείου αποτελούσε σημαντικό βοήθημα στο ερευνητικό έργο του ΧΕΕ.

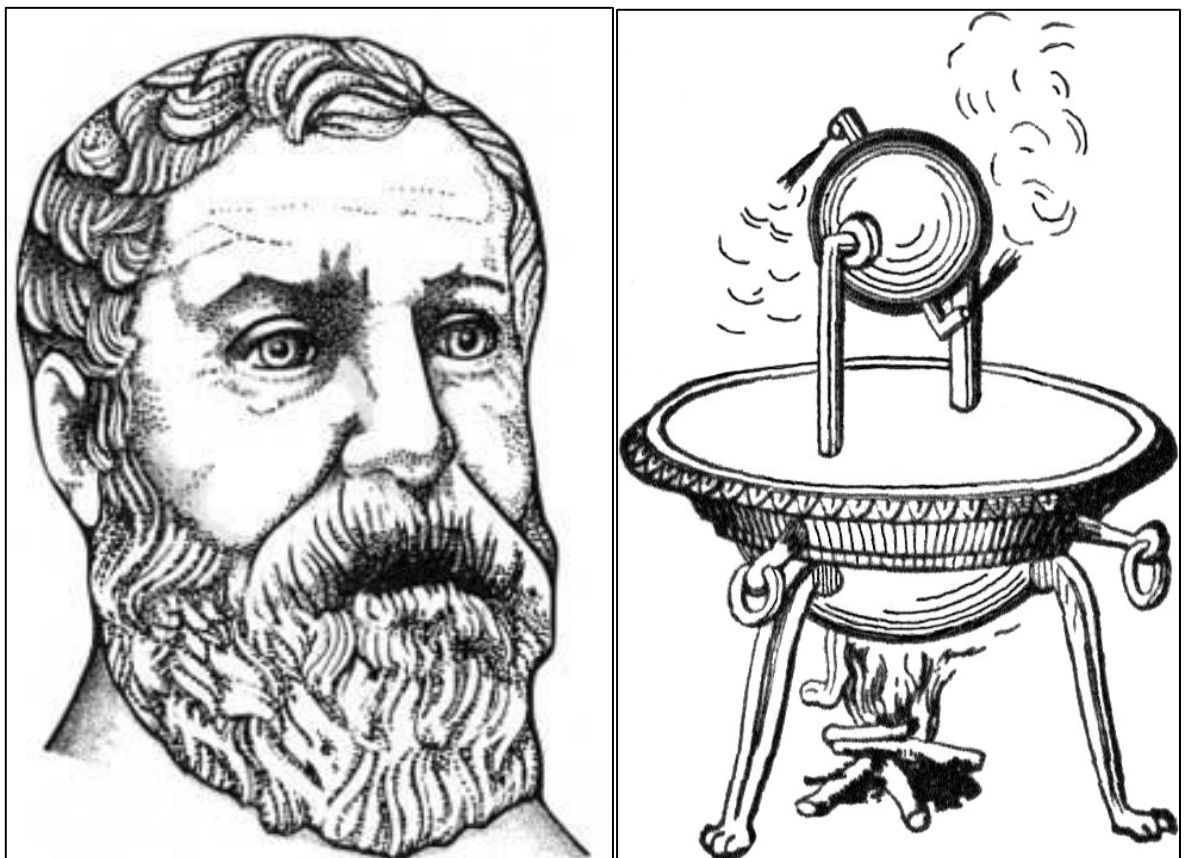
Ως εκ τούτου, στα πλαίσια αυτής της ανάγκης, κατασκευάστηκε ο «HPΩΝ». Μια υπολογιστική μονάδα, αποτελούμενη από υπολογιστές παλαιάς και νέας γενιάς, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας ενισχύοντας το ερευνητικό έργο. Ο «HPΩΝ» έχει εγκατασταθεί στο χώρο του ΧΕΕ και χρησιμοποιείται από το εργαστήριο του κ. Λάμπρου στα πλαίσια των ερευνών τους.

Αθήνα, Απρίλιος 2021

ΜΕΡΟΣ Ι-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο **Ήρων ο Αλεξανδρεύς** (300-230 π.Χ.) ήταν Έλληνας μηχανικός και γεωμέτρης. Έζησε στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου περίπου τον 1^ο π.Χ αιώνα. Η πιο διάσημη εφεύρεση του είναι η *αιολόσφαιρα* ή *ατμοστρόβιλος* (**Εικόνα 1**), η πρώτη ατμομηχανή στην ιστορία. Υπήρξε διδάσκαλος της περίφημης *Ανώτατης Τεχνικής Σχολής της Αλεξάνδρειας*, το πρώτο πολυτεχνείο που είχε ιδρυθεί στο Μουσείο για μηχανικούς. Λέγεται ότι ακολουθούσε την θεωρία των ατόμων και τη Μηχανική Σύνταξη του Φίλωνα. Ιδέες του Κτησιβίου ήταν βάση για κάποια από τα έργα του. Ήταν γνωστός και ως *Ήρων ο Κτησιβίου* (ως μαθητής, πιθανότατα, του μεγάλου μαθηματικού και εφευρέτη *Κτησιβίου*), και *Ήρων ο Μηχανικός*¹.



Εικόνα 1. Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα.

1.1. Η Ιστορία των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Η/Υ)

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του 20^{ου} αιώνα είναι αναμφισβήτητα η εμφάνιση και η τεράστια ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σήμερα υπάρχουν εκατομμύρια υπολογιστές σε όλο τον κόσμο παρόλο που δεν έχουν περάσει ούτε 50 χρόνια από την ημέρα που βγήκε στο εμπόριο ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής (1951).

¹ <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%81%CF%89%CE%BD>, προσβάστηκε 6 Απριλίου 2021.

Από την ημέρα αυτή έχει αναπτυχθεί μια τεράστια βιομηχανία υπολογιστών, η οποία μπορεί πλέον να συναγωνισθεί αυτή των αυτοκινήτων. Οι επιπτώσεις αυτού του φαινομένου στον οικονομικό, κοινωνικό και πολιτικό τομέα είναι σημαντικές και αποτελούν αντικείμενο πολλών ερευνών στις μέρες μας.

Πώς όμως ξεκίνησε αυτή η επανάσταση και πώς έφτασε σ' αυτό το τεράστιο σημείο ανάπτυξης; Η ιστορία των υπολογιστικών μηχανών μπορεί να χωριστεί σε τρεις μεγάλες περιόδους: αυτή των μηχανικών κατασκευών, αυτή των αυτόματων υπολογιστικών μηχανών και αυτή των ηλεκτρονικών υπολογιστών εγγεγραμμένου προγράμματος. Οι δύο πρώτες περιόδους αποτελούν κατά κάποιο τρόπο την «προϊστορία», ενώ η τρίτη αναφέρεται στην εξέλιξη των υπολογιστών όπως τους γνωρίζουμε σήμερα.

1.1.1 Η Απαρχή των Η/Υ

1.1.1.1 Οι Βασικές Αρχές των Η/Υ

Ο Τζων Φον Νόϊμαν (John von Neumann) σε ένα υπόμνημα-ορόσημο που δημοσιεύτηκε το 1945, έδωσε το περίγραμμα των βασικών στοιχείων ενός υπολογιστικού συστήματος (1-3). Ανέπτυξε τα πέντε βασικά συστατικά στοιχεία που απαρτίζουν έναν υπολογιστή, έτσι ώστε να είναι ταυτόχρονα αποτελεσματικός και γενικής χρήσης (**Εικόνα 2**):



Εικόνα 2. Τα πέντε βασικά στοιχεία, που απαρτίζουν έναν υπολογιστή κατά von Neumann.

1. Μονάδα Αριθμητικής Λογικής (ΜΑΛ) (Arithmetic Logic Unit (ALU))
2. Μονάδα Ελέγχου για Ρύθμιση Λειτουργιών (ΜΕΡΛ)
3. Μνήμη
4. Μονάδα Εισόδου Δεδομένων (ΜΕΔ)
5. Μονάδα Εξόδου Αποτελεσμάτων (ΜΕΑ)

Ανέφερε επίσης ότι ένα τέτοιο σύστημα θα έπρεπε (3):

1. Να χειρίζεται δυαδικούς αριθμούς
2. Να λειτουργεί ηλεκτρονικά και
3. Να εκτελεί τις λειτουργίες του μία-μία.

1.1.1.2 Η Σειρά των Μοντέλων Z

Ο Ζ1-έτσι ονόμασε ο Τσούζε τον πρώτο υπολογιστή του- αποτελούνταν από εντελώς μηχανικά μέρη και διέθετε πληκτρολόγιο για την εισαγωγή στοιχείων. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των στοιχείων δίνονταν με ηλεκτρικούς λαμπτήρες. Στο Ζ2, εκτός του ότι χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονόμοι στη θέση των μηχανικών τμημάτων, η τροφοδοσία των στοιχείων γινόταν με τη βοήθεια διάτρητου φιλμ 35mm. Ο Ζ3 προχώρησε παραπέρα, ήταν μια υπολογιστική μηχανή γενικής χρήσης, ελεγχόμενη από πρόγραμμα και βασισμένη στο δυαδικό σύστημα αντί του δεκαδικού. Ήταν εφοδιασμένος με αναγνώστη ταινιών, μία κονσόλα για το χειριστή και δύο ντουλάπια με 2600 διακόπτες. Ο Ζ4, το τελευταίο μοντέλο, βασίστηκε στις ίδιες αρχές με το Ζ3, αλλά ήταν ταχύτερος και ισχυρότερος (**Εικόνα 3**).

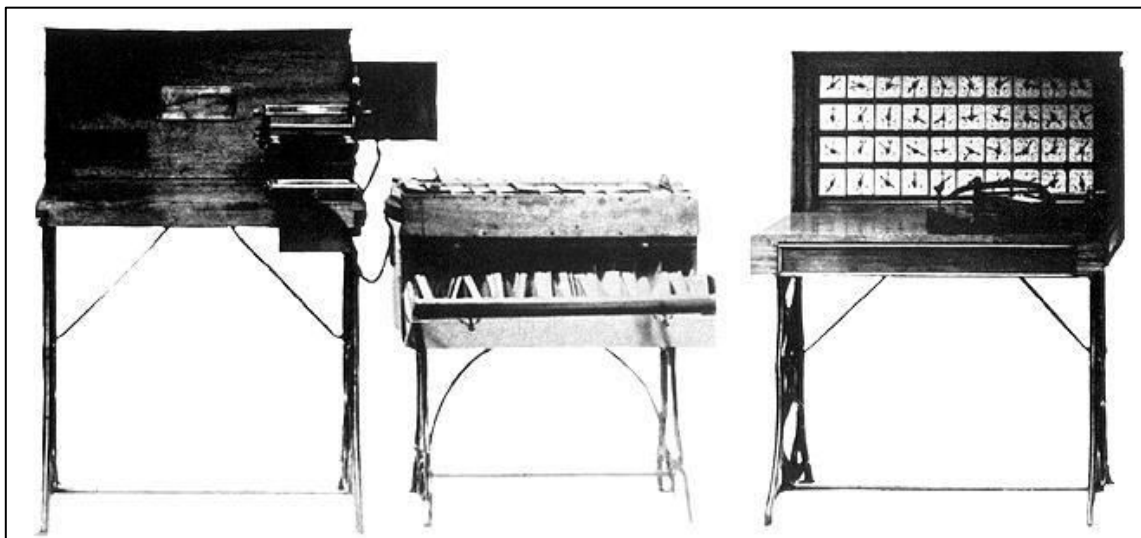


Εικόνα 3. Ο υπολογιστής Ζ3².

² <https://goo.gl/images/dE1iAo>

1.1.1.3 Η Μηχανή Πινάκων

Η στατιστική μηχανή του Χόλλεριθ (*Herman Hollerith*, 29 Φεβρουαρίου 1860 – 17 Νοεμβρίου 1929) χρησιμοποίησε διάτρητες κάρτες για να πινακοποιήσει τα αποτελέσματα της απογραφής των Η.Π.Α. του 1890 (**Εικόνα 4**). Κάθε καρτέλα είχε το μέγεθος χαρτονομισμάτων του ενός δολαρίου και διέθετε 12 σειρές των 20 οπών (συνεπώς υπήρχε δυνατότητα για 240 συνολικά τρύπες). Η μηχανή ταξινομούσε με βάση ένα προσδιορισμένο κώδικα τις καρτέλες, τις συνέκρινε μεταξύ τους, τις καταμετρούσε με τη βοήθεια δεικτών ρολογιού και τύπωνε το αποτέλεσμα σε μια μορφή που μπορούσε να διαβαστεί. Οι μηχανές του Χόλλεριθ ήταν οι πρώτες που επεξεργάζονταν πληροφορίες και αποτέλεσαν το σημείο αναφοράς για όλη τη σειρά των μηχανογραφικών υπολογιστών.

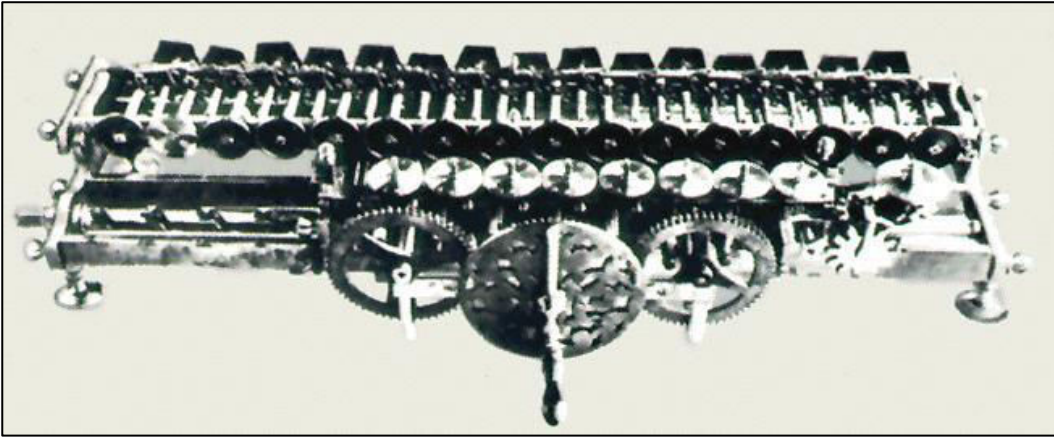


Εικόνα 4. Η στατιστική μηχανή του Χόλλεριθ³.

1.1.1.4 Η Μηχανή του Leibnitz

Η μηχανή του Λάιμπνιτς εκτελούσε και τις τέσσερις αριθμητικές πράξεις. Η πρόσθεση και η αφαίρεση γινόταν με τη βοήθεια αριθμημένων τροχών - όπως στην «*Pascaline*». Στην περίπτωση του πολλαπλασιασμού έμπαινε σε λειτουργία ένας επιπλέον τροχός, που καθόριζε τις επαναληπτικές προσθέσεις του πολλαπλασιασμού. Τέλος, όλο το σύστημα λειτουργούσε με τη βοήθεια μιας μανιβέλας (**Εικόνα 5**).

³ <https://www.noesis.edu.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82/%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/h-%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AE-%CF%80%CE%B9%CE%BD%CE%AC%CE%BA%CF%89%CE%BD/>, προσβάστηκε 6 Απριλίου 2021



Εικόνα 5. Η μηχανή του Leibnitz⁴.

1.1.2 Η Πρώτη Γενιά των Η/Υ (1946-1958)

Οι ανάγκες του πολέμου (στα μέσα του 20ου αιώνα) για πολύπλοκους υπολογισμούς σε προβλήματα βαλλιστικής, μεταφοράς, διοίκησης και άλλα, κάνουν πιο επιτακτική την ανάγκη κατασκευής μιας ικανής υπολογιστικής μηχανής. Ο πρώτος υπολογιστής, ο Z3 του Γερμανού καθηγητή *Kornad Zuse*, κατασκευάστηκε το 1941 και λειτουργούσε κάτω από την επίβλεψη ενός εξωτερικού προγράμματος σε διάτρητη χαρτοταινία. Διέθετε μια μνήμη των 64 λέξεων με την χρήση 2600 ροδέλων και οι πράξεις γινόταν στο δυαδικό σύστημα με κινητή υποδιαστολή. Η μηχανή αυτή καταστράφηκε στον βομβαρδισμό του Βερολίνου το 1944.

1.1.2.1 *Mark I*

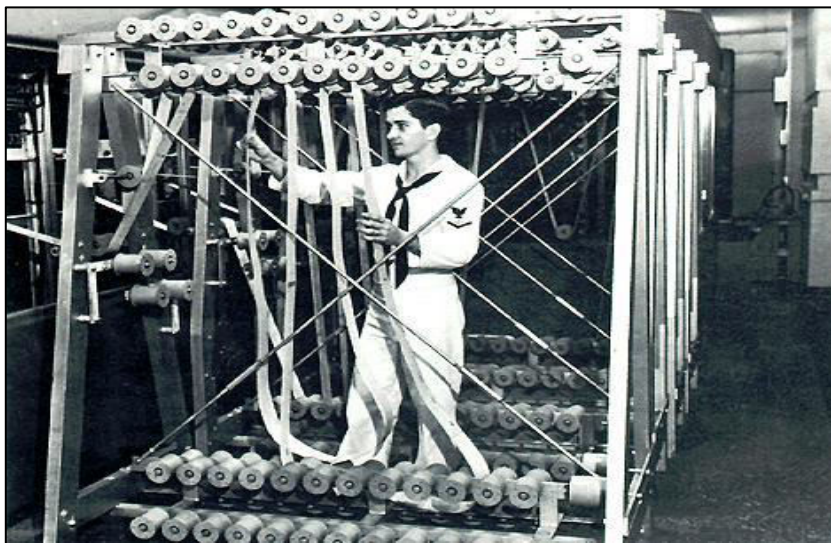
Την ίδια χρονιά από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού, στο Harvard, γεννιόταν ο *Mark I* (Εικόνα 6). Ο *Mark I* ήταν προϊόν συνεργασίας του φυσικού *Howard Aiken* και της IBM (4). Ο υπολογιστής αυτός αν και ήταν μια τερατώδης μηχανή, που έκανε φοβερό θόρυβο και χαλούσε πολύ συχνά, λειτούργησε μέχρι το 1959, ενώ σήμερα εκτίθεται στο πανεπιστήμιο του Harvard. Η εξωτερική όψη του *Mark I* ήταν εντυπωσιακή: είχε ύψος 2.5m και μήκος 16m (κάλυπτε δηλ. επιφάνεια 40m² !) και για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1000000 διαφορετικά εξαρτήματα, συνδεδεμένα μεταξύ τους με καλώδια μήκους 1300km. Ζύγιζε 5 τόνους και κάθε μέρα χρειαζόταν μερικούς τόνους πάγου για να ψυχθεί. Ο *Mark I* ήταν η πρώτη υπολογιστική μηχανή με *καταχωρητές*, η οποία ελεγχόταν από πρόγραμμα που δίνονταν με τη βοήθεια διάτρητης ταινίας. Τα δεδομένα κωδικοποιούνταν με τη μορφή δεκαδικών αριθμών σε διάτρητες κάρτες IBM. Ο

⁴ <https://virtualmusiccomposer.wordpress.com/2009/12/22/idea-of-computers-i-leibniz%E2%80%99s-dream/>, προσβάστηκε 6 Απριλίου 2021.

Mark I υλοποιήθηκε κατ' ουσία βάσει των σχεδίων του Μπάμπατς (*Charles Babbage*, 1791-1871) και στηρίχθηκε στην ηλεκτρομηχανική τεχνολογία της εποχής⁵. Ο Άικεν κατασκεύασε άλλα τρία μοντέλα αυτού του τύπου, τους *Mark II*, *Mark III*, *Mark VI*.



Εικόνα 6. Ο H/Y Mark I⁶.



Εικόνα 7. Ο H/Y Mark I⁷.

Το Δεκέμβριο του 1950 άρχισε να λειτουργεί στο MIT ο *Χουίρλγουιντ*, ο οποίος αργότερα μπήκε σε μαζική παραγωγή και αποτέλεσε τη βάση του δικτύου *SAGE*.

Το φθινόπωρο του 1951, η IBM προχώρησε στην κατασκευή των μεγάλων επιστημονικών υπολογιστών της σειράς 701 για στρατιωτικές χρήσεις. Λίγο αργότερα παρουσίασε τη

⁵ <https://www.computerhistory.org/babbage/engines/>

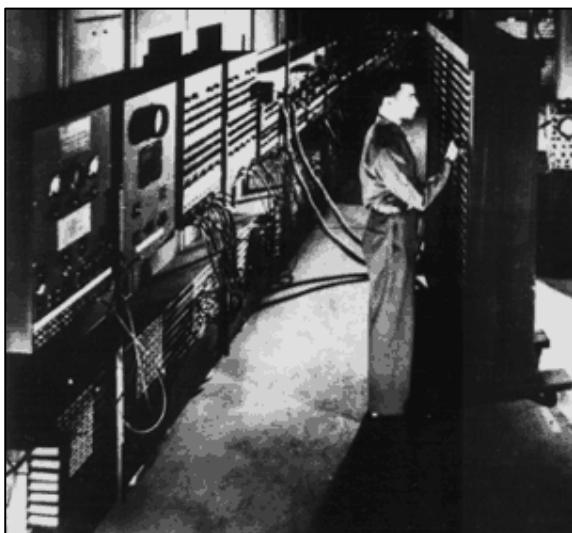
⁶ <https://harvardmagazine.com/2014/04/mark-i-rebooted>, προσβάστηκε 6 Απριλίου 2021.

⁷ <https://harvardmagazine.com/2014/04/mark-i-rebooted>, προσβάστηκε 6 Απριλίου 2021.

σειρά 702, προορισμένη για πολιτικές εφαρμογές διοίκησης. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται και ο IBM 650, το πρώτο εμπορικό μοντέλο της IBM που πούλησε 1500 κομμάτια σε 15 χρόνια. Αξιοσημείωτη είναι η εγκατάσταση του πρώτου υπολογιστή στην Ελλάδα. Η Εθνική Τράπεζα της Ελλάδας εγκαθιστά το 1959 έναν IBM 650 ενώ μέχρι το τέλος του 1963 είχαν εγκατασταθεί συνολικά 6 υπολογιστές.

1.1.2.2 ENIAC

Το πρώτο πρότυπο μηχανήματος που μπορεί να χαρακτηριστεί ως πραγματικός ηλεκτρονικός υπολογιστής ήταν ο γενικής χρήσης υπολογιστής ABC που δημιουργήθηκε από την ανάγκη λύσης μεγάλων συστημάτων εξισώσεων. Ο υπολογιστής αυτός χρησιμοποιούσε ηλεκτρονικές λυχνίες κενού ως βασικό στοιχείο και δυαδικό σύστημα. Ήταν επινόηση των *John Vincent Atanasoff* και *Clifford Berry*. Το επόμενο βήμα ήταν ο ENIAC (*Electronic Numerical Intergrator And Calculator*) (Εικόνα 8). Η μηχανή αποτελούνταν από 19.000 τριόδους λυχνίες, κατανάλωνε ενέργεια της τάξης των 200KW, καταλάμβανε ένα χώρο 270 τ.μ. και ζύγιζε 30 τόνους. Ήταν 2.000 φορές πιο γρήγορος από τον *Mark I* επιτυγχάνοντας 300 πολλαπλασιασμούς ανά δευτερόλεπτο. Ο ENIAC είχε ένα σοβαρό μειονέκτημα, κάθε φορά που επρόκειτο να εκτελεστεί ένα διαφορετικό πρόγραμμα, έπρεπε ένα μεγάλο μέρος του να «ξηλωθεί» και να επανασυνδεθεί κατάλληλα, μια και οι εντολές του δεν φυλάσσονταν εσωτερικά, αλλά επιτυγχάνονταν με μεταβολές σε εξωτερικές καλωδιώσεις.



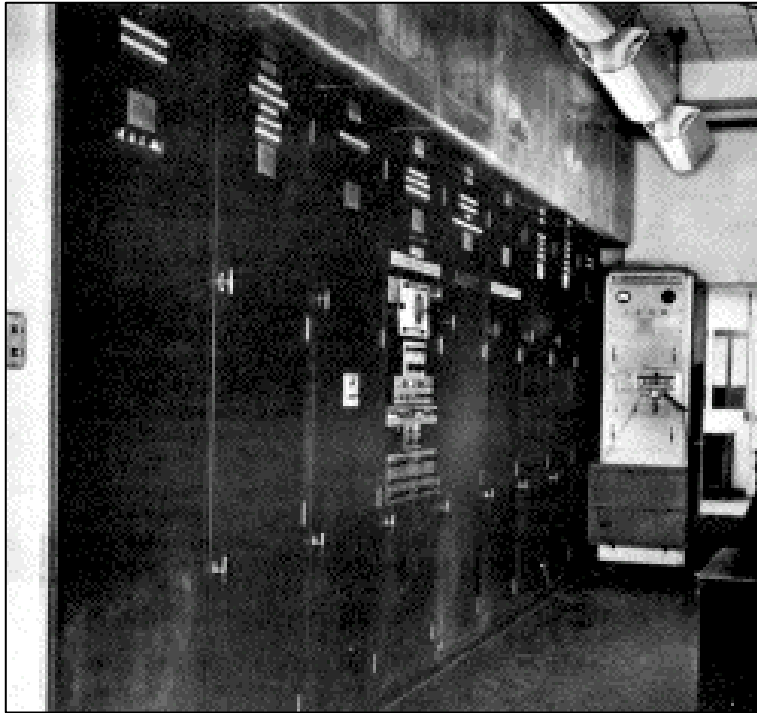
Εικόνα 8. Ο Η/Υ ENIAC⁸.

⁸ <http://www.computersciencelab.com/ComputerHistory/HistoryPt4.htm>

1.1.2.3 EDVAC

Ήταν φανερό ότι η εξέλιξη των μηχανών αυτών δεν ήταν σε καλό δρόμο και χρειαζόταν αναθεώρηση των βάσεων σχεδίασης για να γίνουν πιο ευέλικτες και γρήγορες. Αυτό το έκανε ο *John Von Neuman*, ο οποίος έθεσε τις βάσεις ενός νέου ηλεκτρονικού υπολογιστή, του EDVAC (**Εικόνα 9**), που ήταν οι εξής:

1. Θα χρησιμοποιηθεί μόνο η δυαδική αριθμητική.
2. Στην μνήμη θα αποθηκεύονται τα δεδομένα αλλά και το πρόγραμμα που θα εκτελεστεί.



Εικόνα 9. Ο Η/Υ EDVAC⁹.

Μετά τις δημοσιεύσεις του *Neuman*, πολλές ομάδες ερευνητών ξεκίνησαν έναν αγώνα δρόμου για την κατασκευή υπολογιστών βασισμένων στις παραπάνω αρχές. Αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών ήταν να κατασκευαστούν μερικά σημαντικά υπολογιστικά συστήματα όπως οι EDVAC, EDSAC, UNIVAC-1, 701 IBM, 102D, D-100, GE-210, GAMMA 3. Ο πιο σημαντικός από τους υπολογιστές αυτούς ήταν ο UNIVAC-1 (**UNIV**ersal **A**utomatic **C**omputer) ο οποίος μπορεί να χαρακτηριστεί σαν υπολογιστής σταθμός. Αυτό γιατί με την παραγωγή του στις αρχές της δεκαετίας του 50, σηματοδοτεί την εισαγωγή των υπολογιστών στην αγορά και κατ' επέκταση την εκκίνηση της ξέφρενης κούρσας που οδήγησε στην μεγάλη σημερινή ανάπτυξη των υπολογιστών. Επίσης, την περίοδο αυτή κατασκευάστηκε το πρώτο τρανζίστορ (1947), που αποτέλεσε τη βάση για τους υπολογιστές της δεύτερης γενιάς.

⁹<http://www.eingang.org/Lecture/edvac.html>

1.1.2.4 NCR3000

Η NCR (National Cash Register Company) παρουσίασε μια ιδιαίτερα αξιόλογη δραστηριότητα στο χώρο των μηχανών γραφείου, από το 1895 που ιδρύθηκε. Σήμερα, είναι ένας από τους γνωστότερους κατασκευαστές υπολογιστών (**Εικόνα 10**). Η ηλεκτρομηχανική λογιστική μηχανή NCR 3000 παρουσιάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του '40 και ακολουθούσε την τεχνολογία της εποχής της. Πολλά μηχανικά μέρη των λογιστικών μηχανών της προηγούμενης γενιάς είχαν πλέον αντικατασταθεί με ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες.



Εικόνα 10. Η λογιστική μηχανή NCR3000¹⁰.

1.1.2.5 Η Μηχανή Turing (1936)

Η μηχανή *Turing* (**Εικόνα 11**) αποτελεί το θεμέλιο της θεωρίας υπολογισμού και υπολογιστών. Ήταν μία εννοιολογική (θεωρητική) μηχανή, ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού που περιέγραφε έναν υπολογιστή. Παρά την απλότητα του μοντέλου, μία μηχανή Turing είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ώστε να προσομοιώσει την λογική οποιουδήποτε αλγορίθμου.

¹⁰<https://www.noesis.edu.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82%CE%B5%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B9%CE%BF/n-cr-3000/>

Όλοι οι σημερινοί υπολογιστές στηρίζονται στην έννοια αυτής της μηχανής για αυτό και θεωρείται από πολλούς ο πατέρας της θεωρία υπολογισμού και γενικά της επιστήμης υπολογιστών¹¹.



Εικόνα 11. Ο Alan Turing¹².

Η μηχανή αυτή λειτουργεί με μία απείρου μήκους ταινία μνήμης διαχωρισμένη σε κελιά μνήμης. Η μηχανή τοποθετεί την κεφαλή της πάνω από ένα κελί και διαβάζει το σύμβολο εκεί. Στη συνέχεια έχει την δυνατότητα να κινηθεί η κεφαλή δεξιά, αριστερά καθώς και να αλλάξει το σύμβολο που διαβάζει εκεί, να εκτελέσει μία εντολή ή και να σταματήσει¹³. Στην θεωρία αυτομάτων αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο και έδωσε το έναυσμα για την ανάπτυξη θεωριών επιλυσιμότητας, καθώς υπήρξε η γέφυρα των μαθηματικών με την έννοια του υπολογιστή όπως την γνωρίζουμε σήμερα¹⁴ (**Εικόνα 12**).

1.1.3 Λυχνίες

Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της γενιάς υπολογιστών είναι η χρήση λυχνιών κενού. Ακόμη υπήρχαν οι μνήμες μαγνητικού τυμπάνου και μαγνητικού πυρήνα, όπως επίσης και λυχνίες Williams. Για τον προγραμματισμό χρησιμοποιούνταν η γλώσσα μηχανής (machine language).

Ο χρόνος πρόσθεσης ήταν κάτω από 1msec και η δυνατότητα αποθήκευσης από 250-1000 λέξεις. Οι περισσότεροι λειτουργούσαν με βάση το δυαδικό σύστημα αρίθμησης, με εξαίρεση τους UNIVAC και Manchester Mark-1.

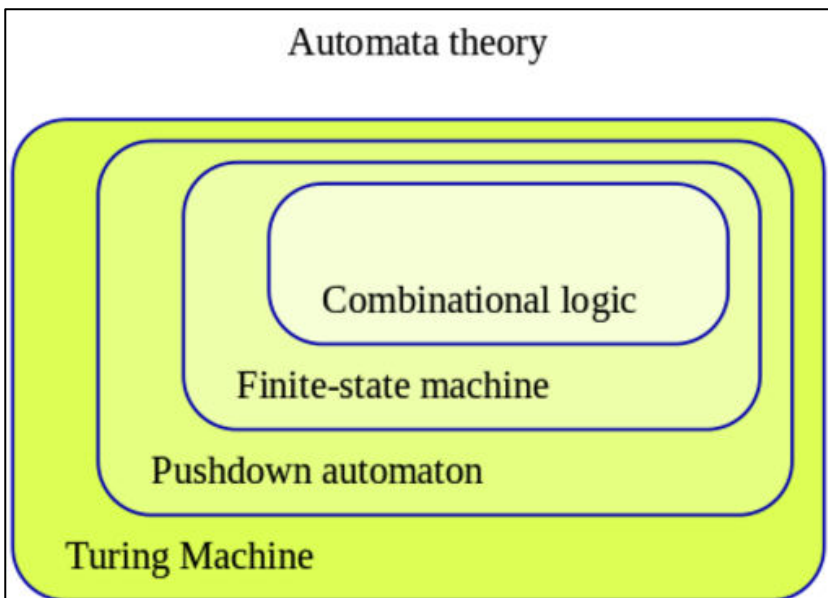
¹¹<http://www.computerhope.com/jargon/t/turnmach.htm>

¹²<http://cdn.mos.cms.futurecdn.net/daca50fd1567c1e9f28bb4e32cb6170d-970-80.jpg>

https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing

¹³https://en.wikipedia.org/wiki/Turing_machine

¹⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Automata_theory

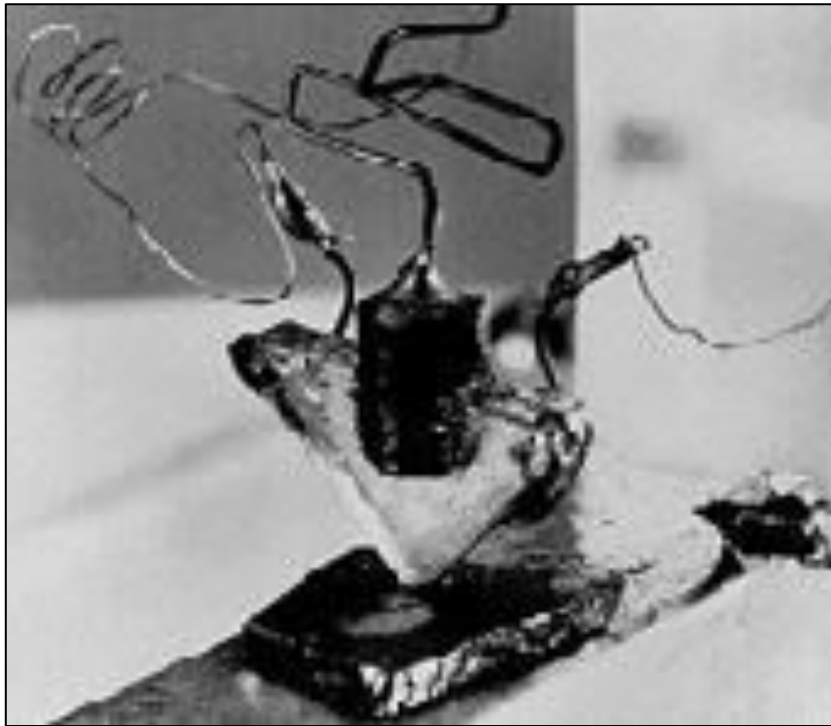


Εικόνα 12. Τάξεις των αυτομάτων¹⁵.

1.1.4 Τρανζίστορ (Transistor)

Το βασικό χαρακτηριστικό των υπολογιστών 2ης γενιάς ήταν η αντικατάσταση των δύσχρηστων λυχνιών από το τρανζίστορ (**Εικόνα 13**, **Εικόνα 14**). Τα πρώτα τρανζίστορ ήταν σημειακής επαφής: δύο σύρματα και μια σύνδεση της βάσης προσαρμόζονταν σε ένα κρύσταλλο γερμανίου, ο οποίος σφραγιζόταν με ειδικό περίβλημα. Το επόμενο βήμα, τα τρανζίστορ ζεύξης ήταν ένα είδος σάντουιτς με τρία στρώματα γερμανίου (*ημιαγωγός*), κλεισμένα σε μια μεταλλική θήκη ύψους 12,5 χιλιοστών. Τα τρία στρώματα καλούνται εκπομπός, βάση και συλλέκτης αντίστοιχα. Η λειτουργία του βασίζονταν στην κίνηση φορτίων μεταξύ των στρωμάτων του. Μετά από χρόνια αδιάκοπων βελτιώσεων παρουσιάστηκε το επίπεδο τρανζίστορ, ένα μικροσκοπικό εξάρτημα που χαράσσεται πάνω σε μια φέτα πυριτίου με μήκος μόλις 0.125 χιλιοστά, οι διαστάσεις του οποίου συνεχώς μικραίνουν από τότε. Με αυτή την τεχνολογία (του τρανζίστορ) δόθηκε ουσιαστικά η ώθηση για την περαιτέρω αλματώδη εξέλιξη της ηλεκτρονικής.

¹⁵<http://cdn.mos.cms.futurecdn.net/daca50fd1567c1e9f28bb4e32cb6170d-970-80.jpg>
https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing



Εικόνα 13. Το πρώτο τρανζίστορ (1947)¹⁶.



Εικόνα 14. Η συνδεσμολογία του πρώτου τρανζίστορ (1947)¹⁷.

¹⁶<http://www.josepino.com/diy/making-homemade-transistors>

¹⁷<http://www.josepino.com/diy/making-homemade-transistors>

1.1.5 Η Δεύτερη Γενιά Η/Υ (1958-1964)

Η δεύτερη γενιά των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών χαρακτηρίζεται από την αντικατάσταση των τριόδων λυχνιών από τα τρανζίστορ. Η εισαγωγή του *τρανζίστορ* προσφέρει μια σημαντική μείωση του όγκου των μηχανών με ταυτόχρονη ελάττωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και αύξηση της ταχύτητας των υπολογισμών. Οι πρώτες μηχανές της εποχής αυτής ήταν η σειρά 1401 της IBM και η μηχανή GAMMA 60 της Bull (**Εικόνα 15**).

Ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο της 2ης γενιάς είναι η εμφάνιση των πρώτων γλωσσών υψηλού επιπέδου, για την συγγραφή προγραμμάτων εφαρμογών, εξέλιξη καθοριστικής σημασίας για τη γρήγορη διάδοση των Η/Υ. Το 1957 παρουσιάζεται από τον *John Backus* ο πρώτος μεταγλωττιστής της *Fortran* (5), ενώ λίγο αργότερα η γλώσσα *Cobol* (6). Πρέπει να σημειωθεί, ότι παράλληλα με την ανάπτυξη των συστημάτων 2ης γενιάς εμφανίστηκε και μια νέα βιομηχανία που βασίστηκε στην ιδέα της ολοκλήρωσης *τρανζίστορς* και άλλων στοιχείων, σε κυκλώματα που θα μπορούσαν να τοποθετηθούν πάνω σε ένα μικτό τεμάχιο πυριτίου ή chip όπως και επικράτησε τελικά.



Εικόνα 15. Ο Η/Υ IBM 1401¹⁸.

Έτσι αν και κατά τη χρονική περίοδο της 2ης γενιάς σημειώθηκαν εμπορικές αποτυχίες, στην πραγματικότητα τέθηκαν οι τεχνικές βάσεις που επέτρεψαν την μετέπειτα, χωρίς προηγούμενο ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επίσης, λόγω της εισαγωγής του

¹⁸<https://histinf.blogs.upv.es/page/10/>

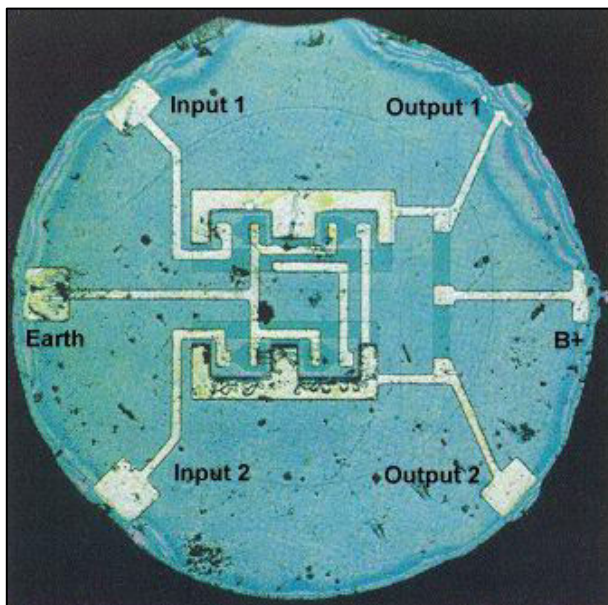
τρανζίστορ, οι δυνατότητες των υπολογιστών της γενιάς αυτής έφτασαν σε ταχύτητα τις 200.000 εντολές /δευτερόλεπτο και χωρητικότητα κεντρικής μνήμης 32.000 χαρακτήρες, που όμως αποτελούνταν από μαγνητικούς δακτυλίους.

1.1.6 Η Τρίτη Γενιά Η/Υ (1964-1971)

Η τρίτη γενιά των ηλεκτρονικών υπολογιστών χαρακτηρίζεται από τη μερική αντικατάσταση του τρανζίστορ και των άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. (Εικόνα 16). Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα συγκεντρώνουν μέσα σε μια μικρή επιφάνεια της τάξεως του 1 cm² πάρα πολλά ηλεκτρονικά στοιχεία (τρανζίστορ, διόδους κ.λπ.).

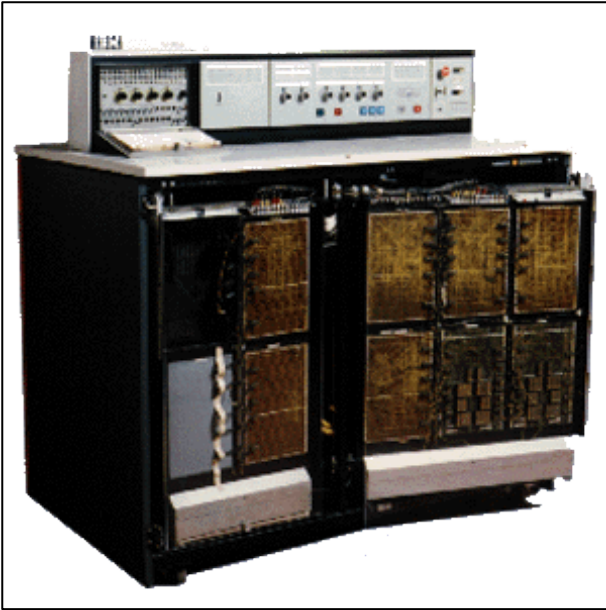
Η είσοδος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έδωσε νέες δυνατότητες στους κατασκευαστές, τέτοιες ώστε να χαρακτηριστεί σαν η επανάσταση στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η αρχή έγινε στις 7 Μαρτίου 1964 όταν η IBM παρουσίασε την σειρά 360 («υπολογιστής όλων των διευθύνσεων») (Εικόνα 17). Η παρουσίαση αυτή είχε δύο άμεσα αποτελέσματα:

1. Το ξεκίνημα μιας κούρσας μεταξύ των ανταγωνιστών για κάτι ανάλογο.
2. Τη συνειδητοποίηση του πραγματικού προβλήματος των υπολογιστών, του λογισμικού.



Εικόνα 16. Ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα¹⁹.

¹⁹<https://www.chiphistory.org/83-first-monolithic-silicon-ic-chip>



Εικόνα 17. Ο IBM 360²⁰.

Ο IBM 360 ήταν ο πρώτος υπολογιστής, ο οποίος διέθετε «*λειτουργικό σύστημα*», ένα πρόγραμμα επόπτη, που ήταν επιφορτισμένο με το συγχρονισμό των διαφόρων οργάνων και την εκτέλεση των προγραμμάτων των χρηστών. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του IBM 360 ήταν η εισαγωγή και χρήση των μαγνητικών δίσκων, γεγονός που χαρακτηρίζει επίσης την τρίτη γενιά των υπολογιστών. Την εποχή αυτή η *CDC* κατασκεύασε το μοντέλο 3600 και λίγο αργότερα το 6600 που ήταν ο ισχυρότερος υπολογιστής την περίοδο 60 - 75, ικανός να εκτελεί πολλά εκατομμύρια πράξεις το δευτερόλεπτο και χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε στρατιωτικές υπηρεσίες και την μετεωρολογία. Την περίοδο της τρίτης γενιάς εμφανίστηκαν και οι μίνι υπολογιστές σαν απάντηση στην ανάγκη για μικρότερους και φθηνότερους υπολογιστές, που ζητούσαν οι μικρότερες επιχειρήσεις. Την εποχή αυτή όμως παρουσιάζεται μεγάλη ανάπτυξη και στο *λογισμικό* (software). Αναπτύσσονται και βελτιώνονται οι γλώσσες υψηλού επιπέδου (Cobol, Algol, Fortran κλπ.) και ενσωματώνονται στα νέα λειτουργικά συστήματα. Επίσης αυτή την εποχή κάνει και την εμφάνιση σε πρακτική εφαρμογή η ιδέα του *καταμερισμού του χρόνου* (*timesharing*), που είχε αρχικά αναπτυχθεί στο MIT. Με την βοήθεια αυτής της τεχνικής δίδεται στον κάθε χρήστη η ψευδαίσθηση ότι ο υπολογιστής ασχολείται συνέχεια μαζί του ενώ στην πραγματικότητα του δίδεται μόνο ένα μικρό κλάσμα του συνολικού χρόνου, που όμως είναι αρκετό για τις δυνατότητες του υπολογιστή. Συμπερασματικά, οι μηχανές της τρίτης αυτής γενιάς έφτασαν τα πέντε εκατομμύρια εντολές το δευτερόλεπτο με κύριες μνήμες ημιαγωγών της τάξης των δύο εκατομμυρίων χαρακτήρων, ενώ έγινε αντιληπτή και η

²⁰http://www.it.uom.gr/project/mycomputer/history/3_4_gen.html

ανάγκη σοβαρής αντιμετώπισης της δημιουργίας προγραμμάτων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των πρώτων οίκων λογισμικού.

1.1.6.1 IBM 1620 II0

Ο IBM 1620 είναι ο πρώτος κεντρικός υπολογιστής (*Main-frame*) (**Εικόνα 18**) που εγκαταστάθηκε στη Βόρεια Ελλάδα και ο δεύτερος σε όλη την Ελλάδα. Εγκαταστάθηκε στη Φυσικομαθηματική Σχολή του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης το 1964. Στην αρχή χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της σχολής, όμως στη συνέχεια η χρήση του επεκτάθηκε και στις υπόλοιπες σχολές του Πανεπιστημίου. Ανήκει στη δεύτερη γενιά υπολογιστών. Για την είσοδο των στοιχείων του χρησιμοποιούνταν διάτρητα δελτία των 80 στηλών ή διάτρητες χαρτοταινίες. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιούνταν για την επεξεργασία των δεδομένων του ήταν η FORTRAN.

1.1.6.2 Sinclair ZX81

Ο *Sinclair ZX-81* είναι το δεύτερο μοντέλο που εισήγαγε η αγγλική εταιρεία Sinclair στην ευρωπαϊκή αγορά, στις αρχές της δεκαετίας του 1980 (**Εικόνα 19**). Είναι μια υπολογιστική μηχανή στο μέγεθος ενός βιβλίου με μνήμη 1K (1024 Bytes), βασισμένη στην τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών. Αποτέλεσε τη βάση για τις μικρές - φορητές αριθμομηχανές. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονταν σε μια οθόνη μιας γραμμής αριθμητικού κειμένου που λειτουργούσε με LCD. Η τροφοδοσία εξασφαλιζόταν από κοινές ηλεκτροχημικές μπαταρίες ραδιοφώνου.



Εικόνα 18. Ο IBM 1620 II²¹.

²¹<https://www.noesis.edu.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82%CE%B5%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B9%CE%BF/hy-ibm-1620-ii/>



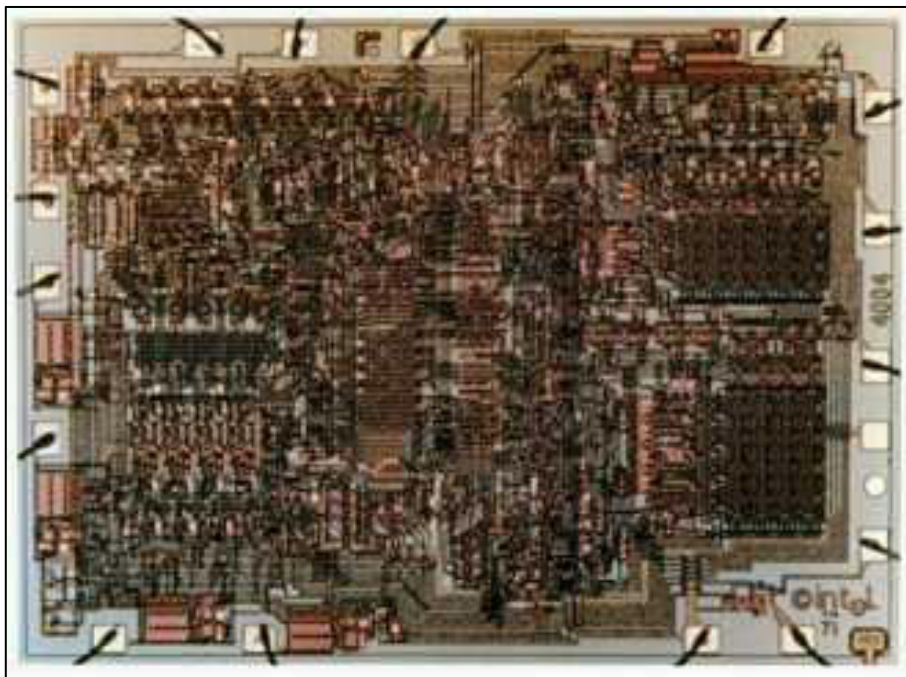
Εικόνα 19. Ο Sinclair ZX-81²².

1.1.7 Η Τέταρτη Γενιά Η/Υ (1971-2010)

Η γενιά αυτή χαρακτηρίζεται από πολλές και σημαντικές εξελίξεις. Κατ' αρχήν από την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων LSI (Large Scale Integration) και VLSI (Very Large Scale Integration), κυκλωμάτων δηλαδή που ενσωματώνουν χιλιάδες ηλεκτρονικά στοιχεία σε επιφάνειες της τάξης του 1cm^2 . Οι τεχνολογίες αυτές έχουν οδηγήσει σε μια άνευ προηγουμένου μείωση του όγκου και του κόστους και αύξηση της χωρητικότητας της μνήμης και της ταχύτητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτής της εποχής είναι η εισαγωγή της λεγόμενης παράλληλης επεξεργασίας που στην κυριολεξία "εκτοξεύει" την υπολογιστική ισχύ στα δισεκατομύρια πράξεις το δευτερόλεπτο. Αν και παλαιότερα η παράλληλη επεξεργασία αποτελούσε μονοπώλιο των υπερυπολογιστών, στις μέρες μας όλα σχεδόν τα μικρά συστήματα κάνουν χρήση παράλληλης επεξεργασίας, ανεβάζοντας κατακόρυφα την υπολογιστική τους ισχύ. Στις αρχές της περιόδου αυτής αναπτύσσεται στο κέντρο ερευνών της Xerox η ιδέα των γραφικών περιβαλλόντων χρήστη (GUIs-Graphical User Interface). Σύμφωνα με αυτά, η επικοινωνία ανθρώπου μηχανής γίνεται ιδιαίτερα φιλική, μια και οι εντολές προς τον υπολογιστή δίδονται μέσω χειρισμού εικονιδίων, παραθύρων κλπ. Περιβάλλοντα, που ως γνωστών, σήμερα χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Το πιο βασικό όμως χαρακτηριστικό της τέταρτης γενιάς είναι η τεράστια ανάπτυξη των μικροϋπολογιστών και ιδιαίτερα των προσωπικών υπολογιστών (PCs-*Personal Computers*). Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά την ιστορία των προσωπικών υπολογιστών.

²²http://retrocity.gr/ox_portfolio/our-sinclair-zx-81/

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην χρονική περίοδο της δεύτερης γενιάς των ηλεκτρονικών υπολογιστών άρχισε να υλοποιείται η ιδέα της ολοκλήρωσης τρανζίστορ και άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων σε κυκλώματα που θα μπορούσαν να χωρέσουν σε ένα μικρό τεμάχιο πυριτίου (chip). Η ιδέα αυτή αποδείχτηκε ιδιαίτερα επιτυχημένη, με αποτέλεσμα από το 1965 και μετά να παρατηρείται κάθε χρόνο διπλασιασμός των ηλεκτρονικών στοιχείων που μπορούσαν να χωρέσουν σε ένα chip (νόμος του Moore). Η πρόοδος αυτή γρήγορα οδήγησε στο εξάρτημα που μπορούμε να πούμε ότι άλλαξε πολλά πράγματα στον κόσμο: το μικροεπεξεργαστή (microprocessor), την καρδιά δηλαδή του υπολογιστή σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ένας πλήρης υπολογιστής μπορεί να κατασκευαστεί από ένα μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη και μερικά άλλα κυκλώματα υποστήριξης. Η ιστορία του μικροεπεξεργαστή φτάνει πίσω γύρω στο 1969, όταν οι μηχανικοί *Victor Poor* και *Harry Pyle* της εταιρίας *Datapoint* ανέπτυξαν ένα πρώτο μοντέλο. Η ανάπτυξη του μοντέλου αυτού, επινοήθηκε σαν εναλλακτική λύση στην κατασκευή υπολογιστών ειδικής χρήσης. Επειδή η *Datapoint* δεν κατασκεύαζε ηλεκτρονικά στοιχεία οι δύο μηχανικοί μετέφεραν το μοντέλο τους στην *IBM*. Έτσι γεννήθηκε ο πρώτος μικροεπεξεργαστής, ο ιστορικός 4004 της *Intel* (Εικόνα 20).

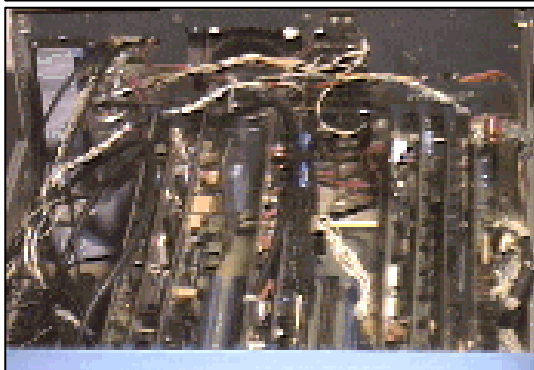
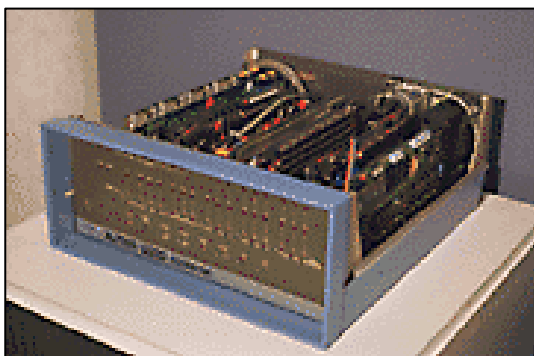


Εικόνα 20. Ο Η/Υ 4004 της Intel²³.

²³<https://www.extremetech.com/computing/105029-intel-4004-the-first-cpu-is-40-years-old-today>

Ο 4004 ήταν πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων, αλλά ακολούθησε ισχυρότερος 8008 το 1971 και ο 8080 το 1974 που από πολλούς θεωρείται σαν ο "προπομπός" των προσωπικών υπολογιστών. Οι πρώτοι υπολογιστές βασισμένοι σε μικροεπεξεργαστές, που καταγράφηκαν στην ιστορία, είναι ο *Sceibi-8H* και ο *Altair 8800* (Εικόνα 21). Οι υπολογιστές αυτοί μαζί με την ταυτόχρονη ανάπτυξη εκ μέρους των *Bill Gates* και *Paul Allen* ενός διερμηνευτή της γλώσσας *Basic* για τους μικροεπεξεργαστές της Intel, θεωρείται από πολλούς σαν «η ανάφλεξη της έκρηξης των προσωπικών υπολογιστών». Στην εποχή αυτή κάνουν τα πρώτα τους βήματα και τα λεγόμενα "πακέτα" εφαρμογών για τους προσωπικούς υπολογιστές. Ένα από τα πρώτα ιστορικά προϊόντα είναι το *VisiCalc* (1978) το οποίο ήταν ένα πακέτο λογιστικού φύλλου και συνόδευε τον προσωπικό υπολογιστή *Apple II*.

Με την άφιξη της δεκαετίας του '80, εμφανίστηκαν στην αγορά πολλά επιπλέον αξιόλογα μηχανήματα, η επιτυχία των οποίων ανάγκασε την IBM να εισβάλει στον χώρο παραγωγής προσωπικών υπολογιστών. Η είσοδος της IBM καθιέρωσε κάποια πρότυπα στο χώρο, γεγονός που οδήγησε στην τεράστια ανάπτυξη και εξέλιξη των προσωπικών υπολογιστών. Το 1984 γίνεται η είσοδος στην αγορά του *Apple Macintosh*, ο οποίος εισήγαγε, στο χαμηλού κόστους χώρο των προσωπικών υπολογιστών, τον πολύ φιλικό τρόπο επικοινωνίας ανθρώπου μηχανής με την χρήση εικονιδίων και παραθύρων διαλόγου.



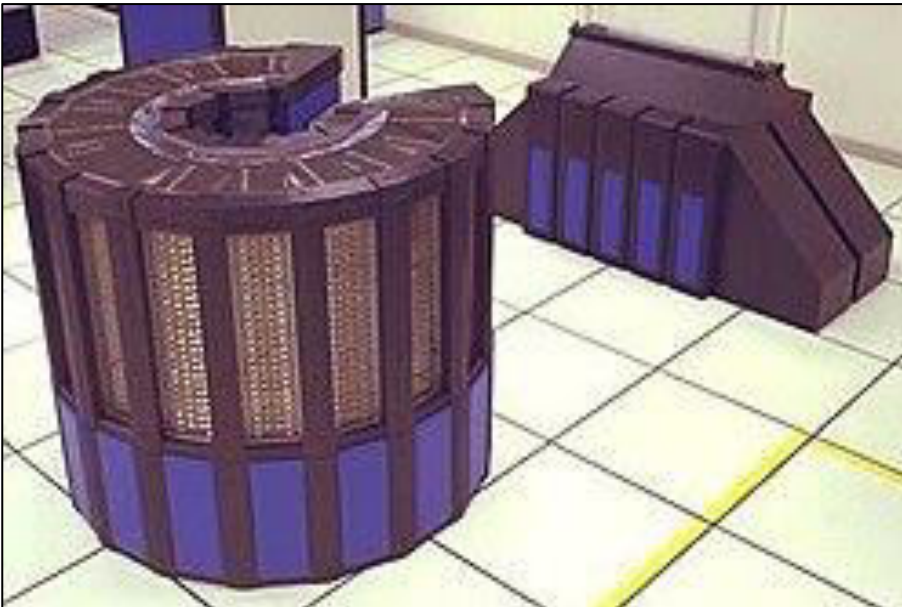
Εικόνα 21. Ο Η/Υ 8008 (επάνω) και το εσωτερικό του (κάτω)²⁴.

²⁴<https://www.extremetech.com/computing/105029-intel-4004-the-first-cpu-is-40-years-old-today>

1.1.8 Οι Μεγάλοι Υπολογιστές

Ο μεγάλος υπολογιστής κοινής χρήσης (mainframe computer) είναι ένα ισχυρότατο μηχάνημα για πολλούς χρήστες, σχεδιασμένο να χειρίζεται μεγάλες ποσότητες δεδομένων στην είσοδο, την έξοδο και με μεγάλη βοηθητική μνήμη. Χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση επιχειρηματικών εφαρμογών και για μεγάλες βάσεις δεδομένων που χρειάζονται συχνή πρόσβαση (**Εικόνα 22**).

Οι χρήστες επικοινωνούν με το μεγάλο υπολογιστή μέσω των τερματικών διατάξεων. Παλαιότερα, οι μεγάλοι υπολογιστές καταλάμβαναν ολόκληρα δωμάτια και τοποθετούνταν μέσα σε κλιματιζόμενα γυάλινα γραφεία για να διατηρούνται σε σταθερή θερμοκρασία. Σήμερα, ένας μεγάλος υπολογιστής μοιάζει με σειρά ντουλαπιών αρχειοθέτησης, εξακολουθεί όμως να έχει την ανάγκη κλιματισμού.



Εικόνα 22. Ο H/Y Cray Supercomputer²⁵.

Αν ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται και εξελίσσεται η συγκεκριμένη τεχνολογία, τίθεται σαν σημείο μετάβασης το 2010, διότι σηματοδοτεί την άνθηση των υπολογιστών 5^{ης} γενιάς που αφορούν τεράστιο υπολογιστικό όγκο και τεχνητή νοημοσύνη. Ο μεγαλύτερος παράγοντας εξέλιξης στον οποίο οφείλεται η μετάβαση στην γενιά αυτή, είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας υπολογιστών με πρωταγωνιστή την εταιρεία Intel. Αυτή με την ανάπτυξη του Intel 4004, στον οποίο υπήρχαν όλα τα στοιχεία υπολογιστή (CPU, μνήμη, ελεγκτές εισόδου/εξόδου) σε ένα μόνο chip. Υπολογιστές που καταλάμβαναν χώρο

²⁵<https://en.wikipedia.org/wiki/Cray>

ενός δωματίου το 1940 τώρα μπορούν να χωρέσουν στην παλάμη ενός χεριού (Εικόνα 23, Εικόνα 24).



Εικόνα 23. Desktop και Laptop της δεκαετίας του 1980.



Εικόνα 24. Desktop και Laptop της δεκαετίας του 1990.

Κατά αυτήν την περίοδο υπάρχει ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών τόσο για οικιακή χρήση, όσο και ως εργαλείο σε κάθε επιχείρηση, με εφαρμογές όπως η ψυχαγωγία, η εκπαίδευση, η επίλυση προβλημάτων αλλά και η αρχειοθέτηση και η χρήση εφαρμογών γραφείου. Σε αυτή την περίοδο ο υπολογιστής εισβάλλει κυριολεκτικά σε κάθε κομμάτι της ζωής του ανθρώπου, με μικροϋπολογιστές να τείνουν να χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε ηλεκτρονική εφαρμογή, μικρής (π.χ. ένα ηλεκτρονικό αυτόματο παιχνίδι, ένας υπολογιστής τσέπης, mp3 players, αυτόματη μηχανή καφέ, ηλεκτρονικές καρτες χρήματος, κινητά τηλέφωνα κ.α.) ή και μεγάλης κλίμακας (ρομποτ παραγωγής, συστήματα αυτομάτου ελέγχου πυραυλων, βιοϊατρικά εργαλεία, συστήματα ελέγχου ηλεκτροδότησης πόλεων κ.α.), εισάγοντας όρους όπως το ενσωματωμένο σύστημα και ο υπερυπολογιστής (super computer) (**Εικόνα 25**).

Το επόμενο βήμα λόγω αυτής της ραγδαίας εξέλιξης ήταν η δικτυοποίηση, κάνοντας την υπολογιστική ισχύ ενός συστήματος ακόμα μεγαλύτερη και μεταφέροντας τον κόσμο σε ένα φοβερό επίπεδο διαμοιρασμού της πληροφορίας αλλά και δυνατότητα μόρφωσης και επίλυσης προβλημάτων που χωρίς τους υπολογιστές αυτής της γενιάς θα ήταν αδύνατο. Η επιστήμη, η τεχνολογία, η υγεία και η μόρφωση παίρνουν σε άλλο επίπεδο, ενώ νέοι όροι όπως η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) και η επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality) αποτελούν αντικείμενο μελέτης αλλά και εφαρμογής. Δυνατοί υπολογιστές χειρός, δορυφορικά συστήματα, υπολογιστές πλοήγησης (GPS) αλλά και η έννοια του smartphone κάνουν την εμφάνισή τους, χωρίς η λίστα που σχετίζεται με εφαρμογές υπολογιστών να σταματά.

1.1.9 Η Πέμπτη Γενιά Η/Υ, Τεχνητή Νοημοσύνη (2010-Σήμερα)

Πλέον οι υπολογιστές έχουν περάσει σε ένα φοβερό επίπεδο υπολογιστικής ισχύος, ενώ παράλληλα οι επιστήμες που μπορεί να σχετίζονται με αυτούς αναπτύσσονται ραγδαία. Έννοιες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (7), η μηχανική μάθηση, τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (8) και η επαυξημένη πραγματικότητα αποτελούν ένα μόνο μέρος του εύρους της εξέλιξης που συνεπάγεται η ύπαρξη αυτής της γενιάς.

Η δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας τεράστιου όγκου δεδομένων σε συνδυασμό με αυτήν την μεγάλη υπολογιστική ισχύ, όχι μόνο έχει αλλάξει τον τρόπο ζωής στις εξελιγμένες χώρες, παρέχοντας ένα φοβερό εργαλείο στην τεχνολογία, την έρευνα και τις επιστήμες γενικότερα, αλλά έχει δώσει την δυνατότητα προσομοίωσης της ευφυίας σε τέτοιο βαθμό που τίθενται ερωτήματα περί συνείδησης, τόσο στα επιστημονικά φόρα, όσο

και στις ταινίες επιστημονικής φαντασίας, καλύπτοντας σενάρια που δεν φαίνονται πια και τόσο εξωπραγματικά.



Εικόνα 25. Συσκευές βασισμένες στην 4^η γενιά υπολογιστών.

Σήμερα χρησιμοποιούνται ήδη εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης γενικότερα, όπως αυτή της αναγνώρισης φωνής και μελωδίας, της πρόβλεψης αποτελεσμάτων αναζήτησης στο διαδίκτυο²⁶, της κρυπτογραφίας²⁷, της ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (big data analysis) και της όρασης υπολογιστών²⁸ (9).

Πλέον συζητούμε για υπερυπολογιστές χιλιάδων ή και εκατομμυρίων πυρήνων, για μεγέθη transistors που έχουν φτάσει σε επίπεδο που τα άτομα και τα μόρια είναι συγκρίσιμων

²⁶ <http://searchengineland.com/meet-rankbrain-google-search-results-234386>

²⁷ <http://arstechnica.com/information-technology/2016/10/google-ai-neural-network-cryptography/>

²⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_vision

μεγεθών (1nm), αλλά και για κβαντικούς υπολογιστές, μοριακή και νανοτεχνολογία. Η ουσία της γενιάς των υπολογιστών αυτών είναι η δημιουργία μηχανών που να μπορούν να επεξεργαστούν και να αποκριθούν στην φυσική γλώσσα, να αποκτήσουν γνώση μετά από στάδια εκπαίδευσης (ή και να επιλέξουν την γνώση που χρειάζονται), να οργανώσουν τον εαυτό τους και πολλά άλλα²⁹.

Αξίζει να σημειωθεί πως το 2013 η ανθρωπότητα έσπασε το φράγμα του ενός εκατομμυρίου υπολογιστικών πυρήνων σε υπερυπολογιστή³⁰, ενώ το 2016 ξεπέρασε τα 10 εκατομμύρια πυρήνες, με αντίστοιχο RMax στα 93.014 PFlop/s (PFlop/s= 10^{15} floating-point operations per second—πράξεις αριθμών κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο³¹).

Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως σήμερα περισσότερο από το 40% του ανθρώπινου πληθυσμού έχει σύνδεση στο Internet, με 3.5 δισεκατομμύρια χρήστες. Το 1995 το αντίστοιχο ποσοστό ήταν στο 1%, ενώ το πρώτο δισεκατομμύριο χρηστών επήλθε το 2005. Το δεύτερο δισεκατομμύριο το 2010, ενώ το τρίτο δισεκατομμύριο το 2014. Σήμερα το 48% των χρηστών αυτών βρίσκεται στην Ασία, το 22% στην Αμερική, το 19% στην Ευρώπη, το 10% στην Αφρική και το 1% στην Ωκεανία.

²⁹<http://btob.co.nz/features/five-generations-computers/>

³⁰<https://www.extremetech.com/extreme/146967-stanford-breaks-million-core-supercomputing-barrier2>

³¹<https://en.wikipedia.org/wiki/FLOPS>

2. PENTIUMS

Η σειρά επεξεργαστών Pentium που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική αυτή ήταν Pentium II, III, και IV. Οι πρώτοι 2 ακολουθούσαν την μικροαρχιτεκτονική γενιάς P6 (Πίνακας 1) ενώ ο Pentium IV την μικροαρχιτεκτονική γενιάς NetBurst (7^{ης} γενιάς) (Πίνακας 2). Παρακάτω εξηγούνται περαιτέρω οι γενιές αυτές.

ARCHITECTURE	P6
L1 CACHE	32 KB
L2 CACHE	128 KB to 512 KB 256 KB to 2048 KB (Xeon)
MODEL	Celeron Series
CREATED	November 1, 1995
TRANSISTORS	7.5M 350 nm
INSTRUCTIONS	MMX
EXTENSIONS	SSE
SOCKET(S)	Socket 370 Socket 479
PREDECESSOR	P5
SUCCESSOR	NetBurst

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά της 6^{ης} γενιάς επεξεργαστών P6.

ARCHITECTURE	NETBURST X86
L1 CACHE	8 KB to 16 KB per core
L2 CACHE	128 KB to 2048 KB 256 KB to 2048 KB (Xeon)
L3 CACHE	4 MB to 16 MB shared
MODEL	Celeron Series
CREATED	November 20, 2000
TRANSISTORS	42M 180 nm (B2, C1, D0, E0)
INSTRUCTIONS	MMX
EXTENSIONS	x86-64, Intel 64 SSE, SSE2, SSE3, SSSE3
SOCKET(S)	Socket 423 Socket 478 Socket 603 Socket 604 LGA 771 LGA 775
PREDECESSOR	P6
SUCCESSOR	Intel Core

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά της 7^{ης} γενιάς επεξεργαστών x86.

2.1. Pentium 2 (Intel Pentium II)

Ο επεξεργαστής που Intel Pentium II στηρίχθηκε στην έκτη γενιά μικροαρχιτεκτονικής της Intel P6 και βγήκε στην αγορά τον Μάιο του 1997³². Περιέχει 7.5 εκατομμύρια τρανζίστορ και αποτέλεσε μία βελτιωμένη έκδοση της αρχικής Pentium Pro (5.5 εκατομμύρια τρανζίστορ) όσον αφορά την γενιά P6. Παρόλα αυτά η L2 Cache ήταν υποδεέστερη έναντι αυτής του Pentium Pro. Στις αρχές του 1999 αντικαταστάθηκε από τον σχεδόν πανομοιότυπο Pentium III, στο οποίο κυρίως προστέθηκαν εντολές SSE στον επεξεργαστή³³ (Πίνακας 3).

Το 1998 η Intel διαχώρισε την οικογένεια Pentium II βγάζοντας στην αγορά τον την γραμμή επεξεργαστών Celeron, επεξεργαστής στηριγμένος στον Pentium II και κατευθυνόμενος σε θέσης εργασίας χαμηλών επιδόσεων, καθώς επίσης και την γραμμή επεξεργαστών Pentium II Xeon ο οποίος απευθυνόταν σε θέσεις εργασίας υψηλών επιδόσεων και σε servers.

INTEL PENTIUM II ARCHITECTURE P6	
ΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	1997 – 1999
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΡΟΛΟΓΙΟΥ	233 MHz – 450 MHz
FSB SPEEDS	66MHz – 100MHz
ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ	0.35 μm – 0.18 μm
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ	IA-32, MMX
ΜΙΚΡΟΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	P6
ΠΛΗΘΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ	1
SOCKETS	Slot 1 MMC-1 MMC-2 Mini-Cartridge PPGA-B615 (μPGA1)
ΠΡΟΚΑΤΟΧΟΣ	Pentium, Pentium Pro
ΔΙΑΔΟΧΟΣ	Pentium III
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ	Klamath Deschutes Tonga Dixon

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά των Pentium 2.

³²https://en.wikipedia.org/wiki/Pentium_II

³³https://en.wikipedia.org/wiki/Streaming_SIMD_Extensions

Ο Pentium II στηρίχθηκε όσον αφορά την μικροαρχιτεκτονική του κυρίως στον προκατόχο του Pentium Pro, με μερικές όμως σημαντικές βελτιώσεις. Αντίθετα από τους προκατόχους του, ο επεξεργαστής Pentium II ήταν συσκευασμένος σε μία μονάδα στηριγμένη σε τύπου slot σύνδεση³⁴ παρά σε σύνδεση υποδοχής CPU³⁵ (**Εικόνα 26**). Ο επεξεργαστής και τα εξαρτήματά του βρίσκονταν σε μία κάρτα (daughterboard³⁶) παρόμοια με μία τυπική κάρτα επέκτασης. Από την μία μεριά βρισκόταν μία ψύκτρα συνοδευόμενη συνήθως από ανεμιστηράκι.



Εικόνα 26. Ο επεξεργαστής Pentium 2³⁷.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η CPU να καταλαμβάνει περισσότερο χώρο, συμβιβασμός όμως ο οποίος επέτρεπε τον διαχωρισμό της δευτερεύουσας Cache μνήμης (L2) από τον επεξεργαστή, ενώ ταυτόχρονα βρισκόταν συνδεδεμένη με τον επεξεργαστή με τον κοντινό

³⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Slot_1

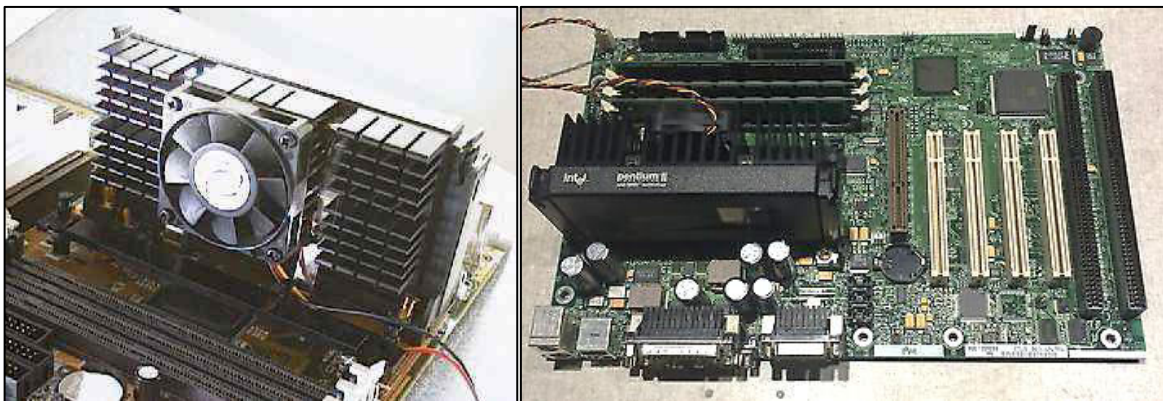
³⁵https://en.wikipedia.org/wiki/CPU_socket

³⁶<https://en.wikipedia.org/wiki/Daughterboard>

³⁷https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pentium_II.jpg

(γρήγορο) back-side bus³⁸. Η L2 Cache μνήμη λειτουργούσε στην μισή συχνότητα συγκριτικά με εκείνη του ρολογιού του επεξεργαστή, σε αντίθεση με τον προκάτοχο Pentium Pro όπου η L2 λειτουργούσε στην ίδια συχνότητα. Παρόλα αυτά έγινε αύξηση του μεγέθους της Cache από 256KB σε 512KB. Η απομάκρυνση της L2 χωρικά έδωσε την δυνατότητα επίλυσης θεμάτων χαμηλής επίδοσης του Pentium Pro, επιτρέποντας στην Intel να βάλει στην αγορά τον Pentium II σε λογικά επίπεδα τιμών. Ταυτόχρονα με αυτόν τον τρόπο κατάφερε η Intel να βγάλει διαφορετικές εκδόσεις με διαφορετικού τύπου L2 Cache, απευθυνόμενη σε πελάτες με διαφορετικές απαιτήσεις σε επιδόσεις και διαφορετικά κόστη.

Στο μοντέλο αυτό βελτιώθηκε η επίδοση σε εκτέλεση κώδικα 16-bit, τομέας στον οποίο υστερούσε ο Pentium Pro. Αυτό επιτεύχθηκε με την προσθήκη Segment Register Caches³⁹. Η πλειονότητα του λογισμικού της εποχής χρησιμοποιούσε ακόμη κώδικα 16-bit για διάφορους λόγους. Ο Pentium II είχε 32KB L1 Cache, διπλάσια από εκείνη του Pentium Pro, καθώς και βαθύτερους buffers εγγραφής, βελτιώνοντας έτσι κατά λίγο την επίδοση της L1. Ο Pentium II ήταν ο πρώτος επεξεργαστής P6 που υλοποιούσε το σύνολο εντολών Intel MMX integer SIMD, το οποίο είχε εισηχθεί στον Pentium MMX (**Εικόνα 27**).



Εικόνα 27. Ο επεξεργαστής Pentium 2 τοποθετημένος σε μητρική κάρτα⁴⁰.

Ο Pentium II απευθυνόταν σε ευρύτερου κοινού πωλήσεις από τον προκάτοχό του Pentium Pro. Ήταν φθηνότερος όσον αφορά το κόστος παραγωγής εξαιτίας της ξεχωριστής μα πιο αργής L2 Cache μνήμης. Η βελτιωμένη επίδοσή του σε 16-bit κώδικα και η υποστήριξή του σε MMX το καθιστούσε καλύτερη επιλογή για λειτουργικά

³⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Back-side_bus

³⁹ <http://www.rcollins.org/ddj/Aug98/Aug98.html>

⁴⁰ <http://www.karbosguide.com/images/u1877.jpg>

συστήματα που αφορούσαν σε κοινούς χρήστες, όπως τα Windows 9x, και για εφαρμογές multimedia. Σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη L1 Cache και την βελτιωμένη επίδοση σε κώδικα 16-bit, το αντίκτυπο της πιο αργής και φθηνής L2 cache απορροφήθηκε. Οι γενικές επιδόσεις του επεξεργαστή αυξήθηκαν ενώ παράλληλα τα κόστη μειώθηκαν.

Η παραλλαγή *Klamath* και μερικές από τις πρώιμες *Deschutes* του Pentium II χρησιμοποιούσαν ένα chip συνδυασμού ελεγκτή κρυφής μνήμης L2 / tag RAM (κύκλωμα αποθήκευσης του εαν/ποιες διευθύνσεις της μνήμης βρίσκονται αποθηκευμένες στην Cache) το οποίο επιτρέπει μόνο 512MB να αποθηκευτούν στην Cache⁴¹. Καθώς όμως θεωρητικά η RAM θα μπορούσε να αναβαθμιστεί σε μεγαλύτερη χωρητικότητα, αυτό θα προκαλούσε πολύ αργές επιδόσεις. Παρότι αυτός ο περιορισμός ήταν πρακτικά άσχετος με τον μέσο χρήστη (μη επαγγελματία, χρήστης στο σπίτι), μπορούσε να δημιουργήσει πρόβλημα σε χρήστες server. Πιθανώς η Intel έθεσε αυτόν τον περιορισμό επίτηδες ώστε να διαχωρίσει τον Pentium II από την γραμμή Pentium Pro, η οποία έχει μία πλήρως cacheable χωρητικότητα 4GB. Η ανακατασκευή του chip με κωδικό 82459AD σε μερικούς 333 MHz και όλους τους 350 MHz και γρηγορότερους Pentium II έλυσε αυτόν τον περιορισμό αποτρέποντας το «cachάρισμα» όλων των 4GB μνήμης.

Παρακάτω βλέπουμε τις διάφορες παραλλαγές επεξεργαστών Pentium II με τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία, τόσο σε desktop (**Πίνακας 4**) όσο και σε mobile συστήματα (**Πίνακας 5**).

PENTIUM II-DESKTOP					
Klamath		DESHUTES (80523)		Deschutes (Pentium II Overdrive)	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)	L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)	L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	512 KB, as external chips on the CPU module clocked at half the CPU frequency	L2 cache	512 KB, as external chips on the CPU module clocked at half the CPU frequency	L2 cache	512 KB external chip on CPU module running at 100% of CPU speed
Packaging MMX	Slot 1 module	Packaging MMX	Slot 1 module	Socket	Socket 8
Front-side bus	66 MHz, GTL+	Front-side bus	66, 100 MHz, GTL+	Supports MMX technology	
Vcore	2.8 V	VCore	2.0 V	Front-side bus	60 or 66 MHz, GTL+
Process	0.35 μm CMOS	Process	0.25 μm CMOS	VCore	3.1–3.3 V (Has on-board voltage regulator)
First release	May 7, 1997	First release	January 26, 1998	Fabrication	0.25 μm
				First release	1998

⁴¹<http://www.rcollins.org/ddj/Aug98/Aug98.html>

Clockrate	233, 266, 300 MHz	Clockrate	<u>66 MHz FSB :</u> 266, 300, 333 MHz <u>100 MHz FSB:</u> 350, 400, 450 MHz	The sSpec number SL2KE denotes a Pentium II Overdrive sold with an integrated heatsink/fan combination for Socket 8. [Note that the sSpec number SL2EA denotes a Pentium II Overdrive sold with an integrated heatsink but no fan for Slot 1.]
-----------	----------------------	-----------	--	--

Πίνακας 4. Παραλλαγές των Desktop επεξεργαστών Pentium 2.

PENTIUM II - MOBILE			
Tonga (80523) Mobile Pentium II		Dixon (80524) Mobile Pentium II PE (Performance Enganced)	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)	L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	512 KB, as external chips on the CPU module clocked at half the CPU frequency	L2 cache	256 KB, on-die, full speed
Packaging	MMC-1, MMC-2, Mini-Cartridge	Packaging	BGA1, MMC-1, MMC-2, μPGA1 PPGA-B615
MMX		MMX	
Front-side bus	66 MHz, GTL+	Front-side bus	66, 100 MHz, GTL+
Vcore	1.6 V	VCore	1.5, 1.55, 1.6, 2.0 V
Process	0.25 μm CMOS	Process	0.25; 0.18 (400 MHz) μm CMOS
First release	April 2, 1998	First release	January 25, 1999
Clockrate	233, 266, 300 MHz	Clockrate	266, 300, 333, 366, 400 MHz

Πίνακας 5. Παραλλαγές των Mobile επεξεργαστών Pentium 2.

2.2. Pentium 3 (Intel Pentium III)

Ο Pentium III (PIII, Pentium III) ήταν μια σειρά επεξεργαστών 32bit x86 της Intel στηριγμένη στην P6 μικροαρχιτεκτονική, με μικροεπεξεργαστές τόσο τύπου desktop όσο και mobile και βγήκε στην παραγωγή 26 Φεβρουαρίου 1999⁴² (**Πίνακας 6**). Οι πρώτοι επεξεργαστές της σειράς ήταν πολύ παρόμοιοι με τους τελευταίους της σειράς Pentium II. Οι πιο αξιοσημείωτες διαφορές αφορούσαν στην προσθήκη του συνόλου εντολών SSE⁴³ (προς επιτάχυνση των πράξεων κινητής υποδιαστολής καθώς και των παράλληλων υπολογισμών), καθώς και η προσθήκη ενός αμφιλεγόμενου σειριακού αριθμού ενσωματωμένου στο chip και τη διαδικασία παραγωγής.

INTEL PENTIUM III, ARCHITECTURE P6	
ΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	1999 – 2003
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΡΟΛΟΓΙΟΥ	450 MHz – 1.4 GHz
FSB SPEEDS	100MHz – 133MHz
ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΡΑΝΣΙΣΤΟΡ	0.25 μm – 0.18 μm
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ	IA-32, MMX, SSE
ΜΙΚΡΟΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	P6
ΠΛΗΘΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ	1
SOCKETS	Slot 1, Socket 370 Socket 479
ΠΡΟΚΑΤΟΧΟΣ	Pentium II
ΔΙΑΔΟΧΟΣ	Pentium 4, Xeon, Celeron, Pentium M
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ	Katmai, Coppermine, Coppermine T, Tualatin

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά των Pentium 3.

⁴²https://en.wikipedia.org/wiki/Pentium_III

⁴³https://en.wikipedia.org/wiki/Streaming_SIMD_Extensions

Όπως και κατά την παραγωγή του Pentium II, και ο Pentium III έβγαινε στην παραγωγή παράλληλα με εκδόσεις χαμηλών απαιτήσεων Celeron καθώς και με εκδόσεις υψηλών απαιτήσεων Xeon (για servers και θέσεις εργασίας υψηλών απαιτήσεων). Ο Pentium 3 τελικά αντικαταστάθηκε από τον Pentium 4, αλλά η παραλλαγή του Pentium 3 με όνομα Tualatin επίσης χρησιμοποιήθηκε ως βάση των επεξεργαστών Pentium M, οι οποίοι χρησιμοποίησαν πολλές ιδέες από την μικροαρχιτεκτονική P6. Ακολούθως η μικροαρχιτεκτονική των Pentium M ήταν αυτή που σχημάτισε το θεμέλιο της ενεργειακά αποδοτικής Core μικροαρχιτεκτονικής της Intel (επεξεργαστές Core 2, Pentium Dual-Core, Celeron (Core) και Xeon), και όχι η μικροαρχιτεκτονική Netburst των Pentium 4 (Εικόνα 28).



Εικόνα 28. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 3⁴⁴.

Οι παραλλαγές των Pentium III ήταν 4:

- **Katmai:** Πρόκειται για την πρώτη παραλλαγή του Pentium III (80525) και αποτελεί μία περαιτέρω ανάπτυξη του Deschutes Pentium II (Εικόνα 29). Ο Pentium III είχε αύξηση κατά 2 εκατομμύρια τρανζιστορς συγκριτικά με τον Pentium II. Προστέθηκαν μονάδες εκτέλεσης (execution units) καθώς και υποστήριξη εντολών SSE. Επήλθε ένας βελτιωμένος ελεγκτής της L1 κρυφής μνήμης (L1 Cache controller, ενώ η L2 cache έμεινε ως είχε). Το μοντέλο αυτό αρχικά βγήκε σε ταχύτητες 450 – 500 MHz τον Φεβρουάριο του 1999, ενώ η τελευταία του έκδοση έφτασε τα 600 MHz. Ο

⁴⁴https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Pentium_III_Processor_Logo.svg

Katmai αποτελούταν από 9.5 εκατομμύρια transistors, μη συμπεριλαμβανομένων εκείνων της 512KB L2 Cache, ενώ είχε διαστάσεις 12.3 mm x 10.4mm (128 mm²). Η πυκνότητα εκτύπωσης της Intel P856.5 ήταν 0.25μm CMOS με 5 επίπεδα αλληλοσύνδεσης αλουμινίου. Ο σχεδιασμός σύνδεσης ήταν παρόμοιος με εκείνον του Pentium II, τύπου κάρτας, αλλά με καινούργια σύνθεση SECC2, η οποία επέτρεπε την άμεση επαφή του CPU πυρήνα με την ψύκτρα (επιφάνεια παθητικής απαγωγής θερμότητας) (Πίνακας 7).

Katmai (80525)	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	512 KB, as external chips on the CPU module clocked at half the CPU frequency
Packaging	Slot 1 (SECC, SECC2)
MMX, SSE	
Front-side bus	100, 133 MHz
Vcore	2.0 V (600 MHz: 2.05V)
Process	0.25 μm CMOS
First release	Feb, 1999
Clockrate	<u>100 MHz FSB</u> : 450, 500, 550, 600 MHz <u>133 MHz FSB</u> : 533, 600 MHz

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Katmai των Pentium 3.



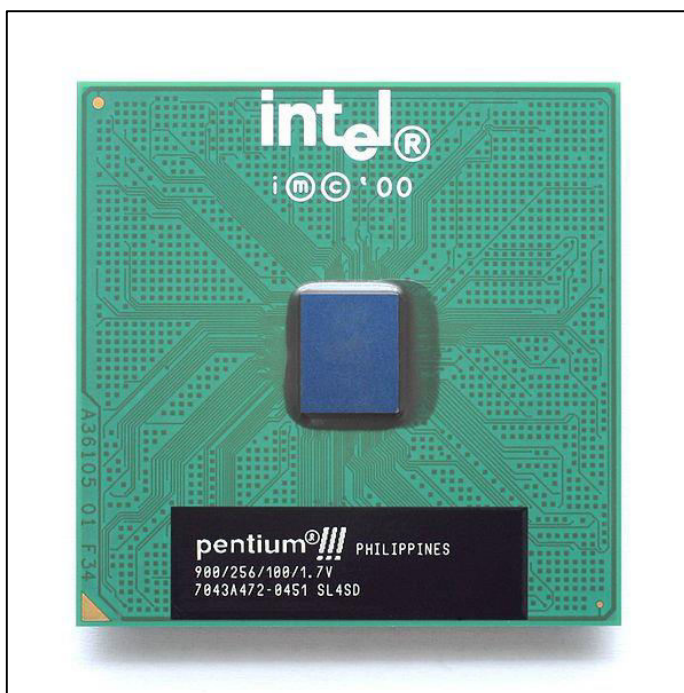
Εικόνα 29. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Katmai⁴⁵.

⁴⁵https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Pentium_III_Katmai.jpg

- Coppermine:** Με κωδικό 80526 βγήκε στην αγορά τον Οκτώβριο του 1999 σε συχνότητες 500, 533, 550, 600, 650, 667, 700 και 733 MHz (**Πίνακας 8**) (**Εικόνα 30**). Μέχρι τον Μάιο του 2000 η Ίντελ έβγαλε στην αγορά μοντέλα Coppermine που έφταναν το 1 GHz. Οι επεξεργαστές είχαν ταχύτητες FSB στα 100 και 133 MHz. Τα τελευταία μοντέλα Coppermine είχαν την κατάληξη “E” για να τονίσουν την νέα πυκνότητα εκτύπωσης στα 0.18 μm. Μία επιπλέον κατάληξη “B” προστέθηκε για να ξεχωρίσει τα μοντέλα τα οποία είχαν 133 MHz FSB (Front Side Bus). Αξίζει να σημειωθεί πως η παιχνιδομηχανή Microsoft Xbox που παρουσιάστηκε το 2001 στηρίχθηκε σε αυτόν τον επεξεργαστή. Σημαντικές βελτιώσεις που εισήχθησαν με τον Coppermine ήταν η εντός chip L2 Cache (την οποία η Intel ονόμασε Advanced Transfer Cache (ATC)) καθώς και καλύτερο pipeline. Η ATC λειτουργεί στην συχνότητα του επεξεργαστή και έχει χωρητικότητα 256 KB. Είναι set-associative 8 δρόμων και συνδέεται με τον επεξεργαστή μέσω ενός 256 bit bus. Η βελτιωμένη αυτή κρυφή μνήμη έδωσε έκανε καλύτερο τον επεξεργαστή έναντι του Katmai παρέχοντας μικρές καθυστερήσεις και μεγάλη επίδοση. Παράλληλα αφαιρέθηκαν κάποια σημαντικά pipeline stalls, με αποτέλεσμα σχετικές εφαρμογές να εκτελούνται έως και 30% γρηγορότερα. Ο Coppermine περιείχε έως και 29 εκατομμύρια transistors με πυκνότητα εκτύπωσης επεξεργαστή 0.18μm. Βρισκόταν ως ένα εξάρτημα που συνδεόταν με το υπόλοιπο σύστημα μέσω 370 pins FC-PGA σε θύρες Socket 370 ή SECC2. Επίσης πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις σχετικά με την απαγωγή θερμότητας.

Coppermine (80526)	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	256 KB, fullspeed
Packaging	Slot 1 (SECC2), Socket 370 (FC-PGA)
MMX, SSE	
Front-side bus	100, 133 MHz
Vcore	1.6 V, 1.65 V, 1.70 V, 1.75 V
Process	0.18 μm CMOS
First release	Oct, 1999
Clockrate	<u>100 MHz FSB</u> : 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 1000, 1100 MHz (E-Models)
	<u>133 MHz FSB</u> : 533, 600, 667, 733, 800, 866, 933, 1000, 1133 MHz (EB-Models)

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Coppermine των Pentium 3.



Εικόνα 30. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Coppermine⁴⁶.

- **Coppermine T:** Αυτή η παραλλαγή είναι ένα ενδιάμεσο βήμα μεταξύ Coppermine και Tualatin, με υποστήριξη για τη λογική συστήματος χαμηλής τάσης που υπάρχει στο τελευταίο, όμως με ισχύ πυρήνα μεταξύ των προηγουμένως ορισμένων χαρακτηριστικών, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σε παλαιότερα συστήματα. Μπορούσε να λειτουργεί τόσο σε system bus 1.25V AGTL όσο και σε κανονικό 1.5V AGTL+ (τάση σημάτων), δίνοντάς του την δυνατότητα να είναι συμβατός με την τελευταία γενιά Socket-370 που υποστήριζαν FC-PGA2, αλλά και με την παλαιότερη FC-PGA (**Πίνακας 9**).

Coppermine T	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	256 KB, fullspeed
Packaging	Socket 370 (FC-PGA, FC-PGA2)
MMX, SSE	
Front-side bus	133 MHz
Vcore	1.75 V
Process	0.18 μm CMOS
First release	Aug, 2000
Clockrate	133 MHz FSB: 800, 866, 933, 1000, 1133 MHz

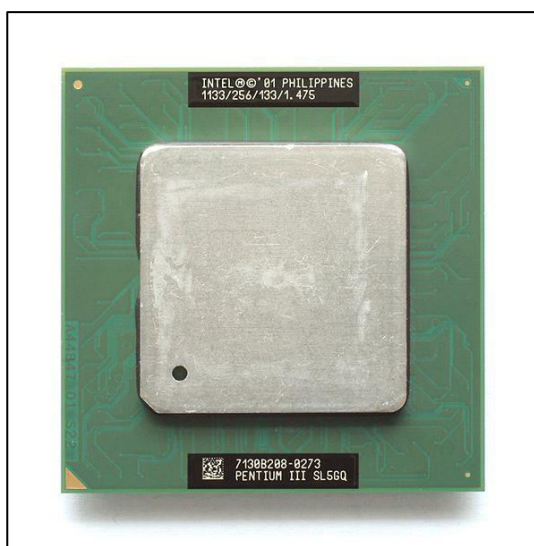
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Coppermine T των Pentium 3.

⁴⁶https://en.wikipedia.org/wiki/File:KL_Intel_Pentium_III_Coppermine.jpg

- **Tualatin (80530):** πρόκειται για έναν επεξεργαστή με πυκνότητα εκτύπωσης 0.13μm και βγήκε στην αγορά το 2001 έως το 2002 σε ταχύτητες 1.0, 1.13, 1.2, 1.26, 1.33 και 1.4 GHz (**Εικόνα 31**). Είχε πολύ καλές επιδόσεις με παραλλαγές που είχαν 512KB L2 Cache (Pentium III-S). Η Pentium III-S παραλλαγή προοριζόταν για servers όπου η κατανάλωση ενέργειας έπαιξε σημαντικό ρόλο. Αποτέλεσε το θεμέλιο του ιδιαίτερα γνωστού mobile επεξεργαστή Pentium III-M, που έγινε ο βασικός Mobile επεξεργαστής της Ίντελ για τα επόμενα 2 χρόνια. Ο επεξεργαστής αυτός παρείχε ιδιαίτερα καλή ισορροπία μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και επιδόσεων καθιστώντας τον σημαντικό στον χώρο των notebooks και της κατηγορίας “thin & light” (**Πίνακας 10**).

Tualatin (80530)	
L1 cache	16 + 16 KB (Data + Instructions)
L2 cache	256 KB or 512 KB, fullspeed
Packaging	Socket 370 (FC-PGA2)
MMX, SSE, Hardware Prefetch	
Front-side bus	133 MHz
Vcore	1.45, 1.475 V
Process	0.13 μm CMOS
First release	Apr, 2001
Clockrate	<u>Pentium III (256 KB L2-Cache):</u> 1000, 1133, 1200, 1333, 1400 MHz <u>Pentium III-S (512 KB L2-Cache):</u> 1133, 1266, 1400 MHz

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά της εκδοχής Tualatin των Pentium 3.



Εικόνα 31. Ο επεξεργαστής Pentium 3 Tualatin⁴⁷.

⁴⁷https://en.wikipedia.org/wiki/File:KL_Intel_Pentium_III_Tualatin.jpg

2.3. Pentium 4 (Intel Pentium IV)

Οι Pentium 4 ήταν μια σειρά μονοπύρηνων επεξεργαστών (Central Processing Units–CPUs) για επιτραπέζιους και φορητούς υπολογιστές καθώς και servers και πρωτοεμφανίστηκαν στην αγορά τον Νοέμβριο του 2000 από την εταιρεία Intel. Παρέμειναν στην αγορά μέχρι και τον Αύγουστο του 2008. Τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 11**).

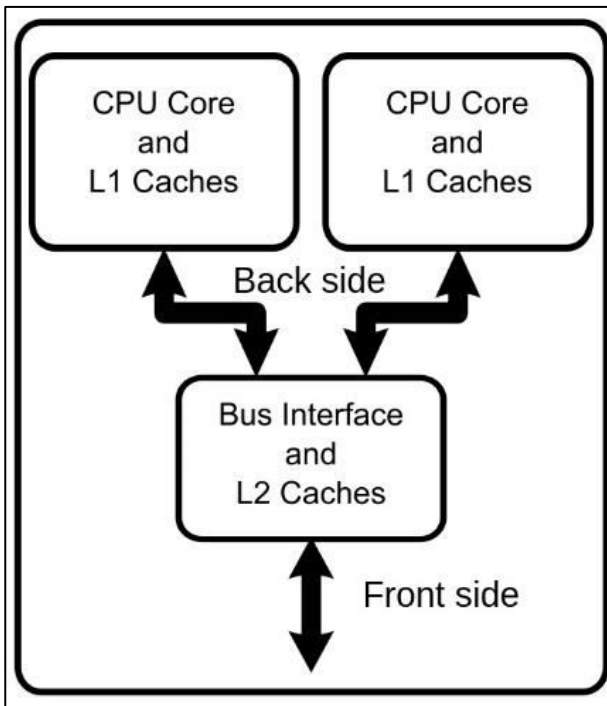
PENTIUM 4		
PRODUCED	2000 – 2008	
MAX CPU CLOCK RATE	1.3 GHZ – 3.8 GHZ	
FSB SPEEDS	400 MT/s to 1066 MT/s	
INSTRUCTION SET	X86 (i386), x86-64, MMX, SSE, SSE2, SSE3	
MICROARCHITECTURE	NetBurst	
TRANSISTORS	42M	180nm
	55M	130nm
	169M	130nm (P4EE)
	125M	90nm
	188M	65nm
SOCKETS	Socket	423
	Socket	478
	LGA 775	
PREDECESSOR	Pentium III	
SUCCESSOR	Pentium D	

Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή Pentium 4.

Η μικροαρχιτεκτονική που ακολουθούσαν ήταν έβδομης γενιάς x86 (32-bit) με την ονομασία *NetBurst*, η οποία ήταν η πρώτη αρχιτεκτονική μετά την μικροαρχιτεκτονική P6 των επεξεργαστών Pentium Pro του 1995 (6^{ης} γενιάς). Η νέα αυτή γενιά διέφερε από την P6 (Pentium II, III) στο ότι υποστήριζε ένα πολύ βαθύ εύρος εντολών σε συνδυασμό με πολύ υψηλές συχνότητες ρολογιού. Η Intel ισχυριζόταν μάλιστα ότι η 7^η γενιά θα επιτρέψει ταχύτητες μέχρι και 10 GHz σε μελλοντικούς επεξεργαστές. Παρόλα αυτά σοβαρά θέματα με την διάχυση θερμότητας (ειδικά με τον Prescott Pentium 4) περιόρισαν τις συχνότητες ρολογιού σε τιμές χαμηλότερες 3.8 GHz (**Εικόνα 32**).

Το 2004 το αρχικό 32-bit x86 σύνολο εντολών των Pentium 4 μικροεπεξεργαστών επεκτάθηκε από ένα 64-bit x86-64 σύνολο. Οι πρώτοι Pentium 4 πυρήνες με κωδικό όνομα *Willamette*, είχαν συχνότητα από 1.3 GHz έως 2 GHz. Παρουσιάστηκαν στην αγορά 20 Νοεμβρίου του 2000, και χρησιμοποιούσαν το σύστημα Socket 423.

Αξιοσημείωτο ήταν ότι με τους Pentium 4 παρουσιάστηκε και το 400 MT/s FSB (Front Side Bus).



Εικόνα 32. Η μικροαρχιτεκτονική των επεξεργαστών 6^{ης} γενιάς.

Στην πραγματικότητα λειτουργούσε στα 100 MHz, αλλά το FSB ήταν quad-pumped, το οποίο είχε τέσσερις φορές μεγαλύτερη ταχύτητα και έτσι έτρεξε τελικά στα 400 MHz. Στην ίδια κατηγορία οι επεξεργαστές AMD Athlon's είχαν ένα διπλό FSB, το οποίο έτρεχε στα 100 και 133 MHz (200 ή 266 MT/s).

Οι επεξεργαστές Pentium 4, εισήγαγαν το SSE2 και στα σύνολα εντολών SSE3, που βασίστηκαν στον Prescott Pentium 4s, για να επιταχύνουν τους υπολογισμούς, τις μεταφορές δεδομένων, την επεξεργασία μέσω, τα τρισδιάστατα γραφικά και τα παιχνίδια. Οι μεταγενέστερες εκδόσεις χαρακτήριζαν την τεχνολογία Hyper-Threading Technology (HTT), ένα χαρακτηριστικό που κάνει την εργασία σε μια φυσική CPU, σαν να είναι δύο λογικές CPU. Η Intel κυκλοφόρησε επίσης στην αγορά μια εκδοχή των επεξεργαστών Celeron χαμηλής απόδοσης που βασίζονται στη μικροαρχιτεκτονική NetBurst (συνχνά αναφέρεται ως Celeron 4) και σε ένα high-end παράγωγο, το Xeon, που προορίζεται για διακομιστές και σταθμούς εργασίας πολλαπλών επεξεργαστών. Το 2005, ο Pentium 4 συμπληρώθηκε από επεξεργαστές διπλού πυρήνα Pentium D και Pentium Extreme Edition.

2.4. Οικογένεια X86 Αρχιτεκτονικών Συνόλου Εντολών

Όλες αυτές οι μικροαρχιτεκτονικές είναι στηριγμένες στην οικογένεια του συνόλου εντολών της x86 αρχιτεκτονικής, η οποία στηρίχθηκε στον επεξεργαστή Intel 8086 και την παραλλαγή του 8088. Ο όρος x86 προήλθε από το ότι πολλοί υπολογιστές-διάδοχοι του 8086 είχαν την κατάληξη 86 στο μοντέλο τους (80186, 80286, 80386 και 80486⁴⁸).

Στην οικογένεια αυτή έγιναν πολλές προεκτάσεις και προσθήκες με τα χρόνια, σχεδόν πάντοτε όμως οι αρχιτεκτονικές που παράγονταν ήταν συμβατές με όλα τα προηγούμενα μοντέλα. Χρησιμοποιήθηκε από επεξεργαστές πολλών εταιρειών, όπως οι Intel, Cyrix, AMD, VIA κ.α. καθώς και από διάφορα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems), αλλά και από υπολογιστές γενικού σκοπού, χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα συμβατότητα με IBM PC.

Κατά το πέρας του έτους 2016 η πλειονότητα προσωπικών υπολογιστών και laptops στηρίζονταν στην αρχιτεκτονική x86, ενώ άλλες κατηγορίες, όπως εκείνη των smartphones και tablets στηρίζονται κατά κόρον σε αρχιτεκτονικές ARM⁴⁹.

2.5. Διοχέτευση (Pipeline)

Το Pipeline ή Διοχέτευση, αφορά στον *ψευδοπαράλληλισμό* που μπορεί να συμβεί κατά την εκτέλεση εντολών σε ένα υπολογιστικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα λόγω του ότι η εκάστοτε εντολή μπορεί να διαχωριστεί σε σαφή στάδια εκτέλεσης, όπως το **Fetch (F)** (άφιξη της εντολής στον επεξεργαστή), **Decode (D)** (αποκωδικοποίηση της εντολής), **Execute (E)** (εκτέλεση της εντολής), **Write Back (W)** (εγγραφή όπου χρειάζεται—καταχωρητές επεξεργαστή ή μνήμη), τα λογικά κυκλώματα τα οποία σχετίζονται με αυτά τα στάδια μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται από επόμενη εντολή, πριν η συνολική εκτέλεση της προηγούμενης ολοκληρωθεί⁵⁰.

Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό από τον αναγνώστη ας σκεφτούμε το παρακάτω παράδειγμα. Έστω μία γραμμή παραγωγής κατά την οποία συναρμολογείται, συσκευάζεται και αποθηκεύεται μία σειρά προϊόντων αποτελούμενα από τουβλάκια τύπου Lego.

⁴⁸<https://en.wikipedia.org/wiki/X86>

⁴⁹https://en.wikipedia.org/wiki/ARM_architecture

⁵⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Instruction_pipelining

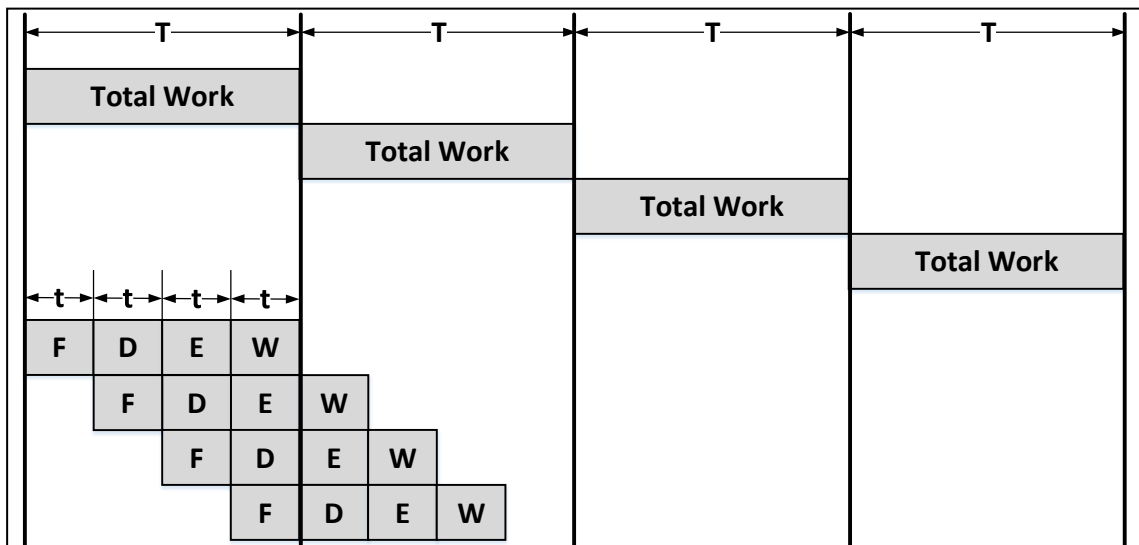
Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι έχουμε ένα μηχάνημα το οποίο δέχεται αρχικά την πρώτη ύλη, τα τουβλάκια και την πληροφορία συναρμολόγησης, στη συνέχεια συναρμολογεί το παιχνίδι, το συσκευάζει και τέλος ένα ρομποτικό σύστημα το αποθηκεύει και το τοποθετεί σε ένα σύστημα ραφιών σε εκάστοτε άδεια θέση. Ας υποθέσουμε ότι οι χρόνοι του κάθε σταδίου είναι:

$t_f+t_d+t_e+t_w=T$, **Εξίσωση 1**, όπου T ο συνολικός χρόνος.

Για να απλοποιήσουμε το πρόβλημα ας υποθέσουμε ότι τα μέρη αυτά είναι ίσα, δηλαδή:

$t_f=t_d=t_e=t_w=t$, **Εξίσωση 2**, όπου t ο χρόνος.

Αν το μηχάνημα το δούμε σαν ένα μαύρο κουτί το οποίο όσο εργάζεται δεν μπορεί να ξεκινήσει μία καινούργια διεργασία, τότε αν θέλουμε να παράγουμε 10 κομμάτια θα χρειαστούμε χρόνο $10T$. Αντιθέτως αν μπορούμε να τμηματίσουμε την εργασία σε 4 διακριτά μέρη που όταν απελευθερωθούν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ο χρόνος εκτέλεσης θα περιοριστεί στα $13t=3.25T$, δραματικά γρηγορότερα!



Εικόνα 33. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση.

Σε αντιστοιχία με την λειτουργία του επεξεργαστή παρατηρούμε ότι μία εντολή δεν αντιστοιχεί πλέον σε έναν κύκλο ρολογιού, μιας και πρέπει η εκάστοτε εντολή να σπάσει σε παραπάνω από ένα υπομέρη, με κέρδος όμως το μεγάλο throughput, τον ρυθμό εκτέλεσης δηλαδή (το πλήθος εντολών που εκτελούνται ταυτόχρονα στο σύστημα, καθώς βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια). Το αυξημένο throughput σημαίνει πως περισσότερες

εντολές εκτελούνται ανά κύκλο ρολογιού. Επιπροσθέτως με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται αποδοτικότερα το υλικό αφού ανεξάρτητες διεργασίες δεν χρειάζεται να περιμένουν το πέρας όλων των άλλων σταδίων της εντολής για να επαναλειτουργήσουν.

Το πλήθος των σταδίων ποικίλει από 4-5 στάδια στους Pentium, μέχρι και πάνω από 14 στάδια σε υπολογιστές υπερδιοχέτευσης (superpipeline), όπως ήταν ο Pentium Pro. Όσο μακρύτερο είναι το pipeline (άρα περισσότερων σταδίων), τόσο υψηλότερη συχνότητα ρολογιού μπορούμε να έχουμε. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη κατάτμηση των εντολών με αποτέλεσμα την ύπαρξη μικρότερων υποεντολών που μπορούν να εκτελεστούν γρηγορότερα⁵¹.

Πρέπει να σημειωθεί πως η εκτέλεση που παρουσιάζεται στο παράδειγμα είναι ιδανική, μιας και υπάρχουν διάφορες καθυστερήσεις. Τέτοιες είναι οι:

- **Data Flow Dependency:** καθυστερήσεις λόγω εξάρτησης δεδομένων, εντολές που περιμένουν δεδομένα από προηγούμενη εντολή. Αντίστοιχες λύσεις είναι τα bypasses (προώθηση δεδομένων απευθείας με το πέρας της εκτέλεσης μιας εντολής, πριν δηλαδή καταγραφεί σε θέση μνήμης, με χρήση ενδιάμεσων καταχωρητών) και η μετονομασία καταχωρητών (register renaming, αρχιτεκτονική P6)
- **Control Flow Dependencies:** καθυστερήσεις λόγω διακλάδωσης της ροής του κώδικα που θα εκτελεστεί (IF...THEN...ELSE). Αυτό επιλύεται με πρόβλεψη διακλάδωσης – Branch Prediction.
- **Άλλες:** τέτοιες μπορεί να οφείλονται σε Cache Misses (τα δεδομένα που χρειάζεται η εντολή δεν έχουν προφτάσει να έρθουν από την κύρια μνήμη (μακριά σε χρόνο προσπέλασης) στην Cache μνήμη (πλησιέστερα στον επεξεργαστή)), εκτέλεση εντολών υψηλής καθυστέρησης.

Ενδεικτικά βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα το πλήθος των σταδίων και τις συχνότητες ρολογιού ανά μοντέλο επεξεργαστή (**Πίνακας 12**).

⁵¹ <http://www.karbosguide.com/books/pcarchitecture/chapter30.htm>

Μοντέλο CPU	Πλήθος σταδίων pipeline	Μέγιστη συχνότητα ρολογιού
Pentium	5	300 MHz
Motorola G4	4	500 MHz
Motorola G4e	7	1000 MHz
Pentium II and III	12	1400 MHz
Athlon XP	10/15	2500 MHz
Athlon 64	12/17	>3000 MHz
Pentium 4	20	>3000 MHz
Pentium 4 „Prescott“	31	>5000 MHz

Πίνακας 12. Σύνοψη των σταδίων και συχνοτήτων των επεξεργαστών.

2.6. P6 (1995)

Η P6 μικροαρχιτεκτονική αποτελεί την 6^η γενιά των Intel x86 αρχιτεκτονικών και πρωτοϋλοποιήθηκε στον μικροεπεξεργαστή Pentium Pro, ο οποίος βγήκε στην αγορά το 1995. Αποτελεί την εξέλιξη της μικροαρχιτεκτονικής P5, έχοντας τις παρακάτω τεχνικές οι οποίες πρωτοχρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν (**Πίνακας 13**):

- **Υποθετική εκτέλεση (speculative execution)⁵²:** πρόκειται για μία τεχνική βελτιστοποίησης, κατά την οποία ένα υπολογιστικό σύστημα πραγματοποιεί κάποιες διεργασίες οι οποίες δεν χρειάζονται σίγουρα. Η κύρια ιδέα είναι να εκτελείται εργασία προτού να είναι γνωστό εάν θα χρειαστεί ή όχι, έτσι ώστε να αποτραπεί καθυστέρηση όταν αργότερα θα χρειαστεί. Αν η εργασία δεν χρειαστεί οποιαδήποτε αποτελέσματα αγνοούνται και οποιεσδήποτε αλλαγές επανέρχονται στην προηγούμενή τους κατάσταση. Η συγκεκριμένη λειτουργία χρησιμοποιούταν σε διάφορες περιοχές συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης διακλάδωσης (branch prediction)⁵³ σε επεξεργαστές με διοχέτευση (pipeline, εξηγείται παρακάτω).
- **Δυναμική Εκτέλεση (Dynamic Execution ή Out-Of-Order Execution)⁵⁴:** αφορά την χρήση κύκλων εντολών που διαφορετικά θα πήγαιναν χαμένοι (instruction cycle=κύκλος εντολής. fetch-decode-execute-write back)⁵⁵ είναι ο χρόνος εκτέλεσης μιας εντολής και όχι απαραίτητα ενός κύκλου επεξεργαστή, μιας και μια εντολή σε έναν επεξεργαστή με pipeline χρειάζεται περισσότερους από έναν κύκλους ρολογιού επεξεργαστή). Αποτελεί μία βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός επεξεργαστή καθώς έτσι εκτελούνται εντολές που βρίσκονται «κοντά» στον επεξεργαστή και όχι κατ' ανάγκην εντολές με την σειρά προγραμματισμού τους. Έτσι μπορεί να εκμεταλλευτεί

⁵²https://en.wikipedia.org/wiki/Speculative_execution

⁵³https://en.wikipedia.org/wiki/Branch_predictor

⁵⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Out-of-order_execution

⁵⁵http://www.c-jump.com/CIS77/CPU/InstrCycle/Z77_0010_instruction_cycle.htm

χρόνος αναμονής που απαιτείται π.χ. για την μεταφορά μιας εντολής από την κύρια μνήμη. Στην τεχνική αυτή δίνεται έμφαση στην ροή δεδομένων και όχι στην σειρά του προγράμματος, μιας και διάφορες εξαρτήσεις δεδομένων κωλύουν την σειρά αυτή (Εικόνα 34).

- **Υπερκλιμάκωση (Superscalar):** Πρόκειται για μία μορφή παραλληλισμού η οποία καλείται instruction-level parallelism (παραλληλισμός σε επίπεδο εντολής) εντός ενός επεξεργαστή (δεν πρέπει να συγχέεται με την παράλληλη επεξεργασία δύο επεξεργαστών ή πυρήνων. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερο throughput (το πλήθος των εντολών που εκτελούνται και ολοκληρώνονται ανά μονάδα χρόνου)⁵⁶.
- **Superscalar Level 2:** Ο επεξεργαστής Pentium είχε 2 διαύλους εκτέλεσης (execution pipes: U και V), συνεπώς ήταν superscalar level 2. Αντίστοιχα ο P6 μπορεί να ολοκληρώσει 3 εντολές ανά κύκλο ρολογιού, οπότε είναι superscalar level 3. Αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση που χρειαστεί καθυστέρηση (stall) αυτή θα είναι μεγαλύτερη.
- **Υπερδιοχέτευση (Superpipelining):** Σε αυτήν την μικροαρχιτεκτονική αυξήθηκαν τα στάδια του pipeline από 5 που ήταν στον Pentium σε 14 στον Pentium Pro, και τελικά διαμορφώθηκαν σε 10 στον Pentium 3 και σε 12 με 14 στάδια στον Pentium M.
- **PAE – Physical Address Extension⁵⁷:** αποτελεί ένα είδος διαχείρισης μνήμης η οποία ορίζει μία ιεραρχία πινάκων σελίδας τριών επιπέδων (δομή δεδομένων που χρησιμεύει στην αντιστοίχιση φυσικής με virtual μνήμης)⁵⁸, με στοιχεία πίνακα 64 bits έκαστο αντί για 32, επιτρέποντας έτσι την πρόσβαση μνήμης με φυσικές διευθύνσεις συνολικού μεγέθους μεγαλύτερου των 4GB (2^{32} bytes). Πιο συγκεκριμένα το address bus είναι 36bits επιτρέποντας την ύπαρξη μνήμης μεγέθους έως και 64GB.
- **Μετονομασία Καταχωρητών – Register Renaming⁵⁹:** Πρόκειται για μία τεχνική η οποία εξαλείφει τις λάθος εξαρτήσεις δεδομένων (false data dependencies), οι οποίες προκύπτουν από την επαναχρησιμοποίηση καταχωρητών από επόμενες εντολές, οι οποίες όμως δεν εξαρτώνται πραγματικά από τις προηγούμενες. (βλ. Register Renaming)
- **CMOV νέες εντολές:** εντολές μεταφοράς δεδομένων υπό συνθήκη (conditional move), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν πάρα πολύ σε βελτιστοποιήσεις κατά το compiling.
- **Άλλες νέες εντολές:** FCMOV, FCOMI/FCOMIP/FUCOMI/FUCOMIP, RDPMC,

⁵⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Superscalar_processor

⁵⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Physical_Address_Extension

⁵⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Page_table

⁵⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Register_renaming

UD2

- Νέες εντολές στον Pentium II: FXSAVE, FXRSTOR
- Νέες εντολές στον Pentium II: SSE

1	2	3	4	5	6	7	8
F	D	E	W				
F	D	E	W				
	F	D	E	W			
	F	D	E	W			
		F	D	E	W		
		F	D	E	W		
			F	D	E	W	
			F	D	stall	E	W

Εικόνα 34. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση.

ARCHITECTURE	P6
L1 CACHE	32 KB
L2 CACHE	128 KB to 512 KB 256 KB to 2048 KB (Xeon)
MODEL	Celeron Series
CREATED	November 1, 1995
TRANSISTORS	7.5M 350 nm
INSTRUCTIONS	MMX
EXTENSIONS	SSE
SOCKET(S)	Socket 8 Socket 370 Socket 479
PREDECESSOR	P5
SUCCESSOR	NetBurst

Πίνακας 13. Τα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή P6⁶⁰.

2.6.1. Cache Μνήμη

Κατά αυτήν την γενιά υπολογιστών προέκυψε εντονότερα η ανάγκη κλιμάκωσης και ιεράρχησης της μνήμης, μιας και οι απαιτήσεις σε αυτήν όλο και μεγάλωναν. Πιο συγκεκριμένα την περίοδο εκείνη είχε παρατηρηθεί πως η κατανάλωση της μνήμης διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το έτος 2000 οι απαιτήσεις

⁶⁰<http://www.ece.uvic.ca/~amiralib/courses/p6.pdf>

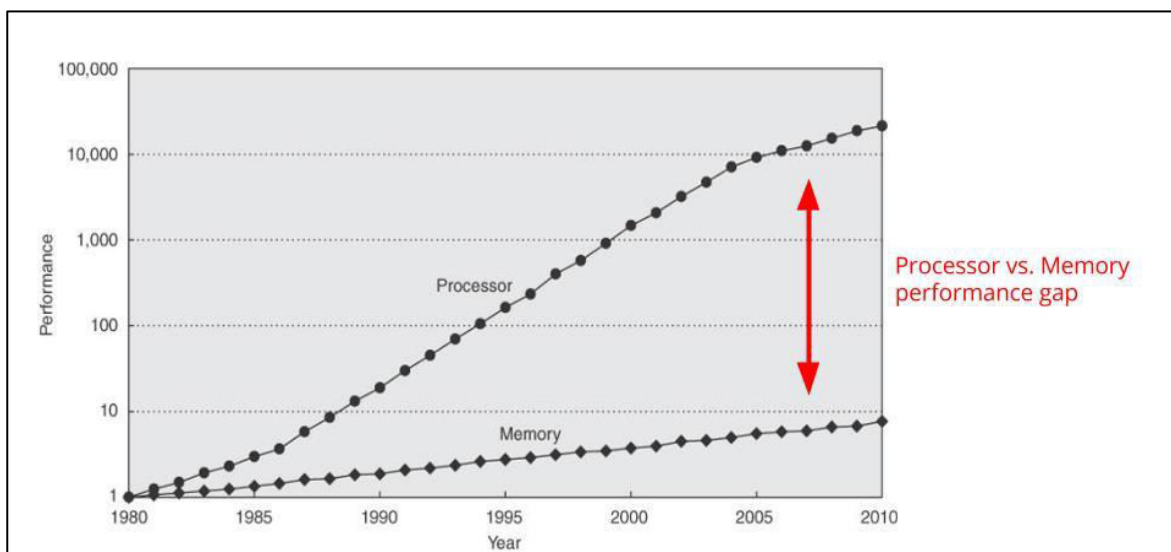
ήταν στα 64MB-128MB, το 2002 128MB-256MB, ενώ σήμερα φτάνει ξεπερνάει τα 16GB σε έναν προσωπικό υπολογιστή⁶¹.

Το πρόβλημα το οποίο είχε προκύψει ήταν ότι η εξέλιξη της ταχύτητας του επεξεργαστή είχε μεγαλύτερο ρυθμό από εκείνη της μνήμης και των αρτηριών ροής δεδομένων (buses). Ενδεικτικά παρακάτω βλέπουμε τις αντίστοιχες συχνότητες CPU/Bus (**Πίνακας 14**):

	486		Pentium	Pentium II	Pentium III	Pentium 4
CPU	25-66MHz		66-233MHz	200-450MHz	0.5-1.33GHz	1.4-2.4GHz
Bus	33MHz		66MHz	66-100MHz	133-200MHz	400MHz

Πίνακας 14. Συγκριτικός πίνακας των ταχυτήτων της οικογένειας Pentium.

Αντίστοιχα παρακάτω παρατηρούμε σε γράφημα την ταχύτητα ρολογιού επεξεργαστή και την ταχύτητα της αρτηρίας μνήμης (memory bus) κατά την εξέλιξή τους χρονικά (**Εικόνα 35**).



Εικόνα 35. Εκτέλεση της διοχέτευσης συγκριτικά με τη σειριακή εκτέλεση⁶².

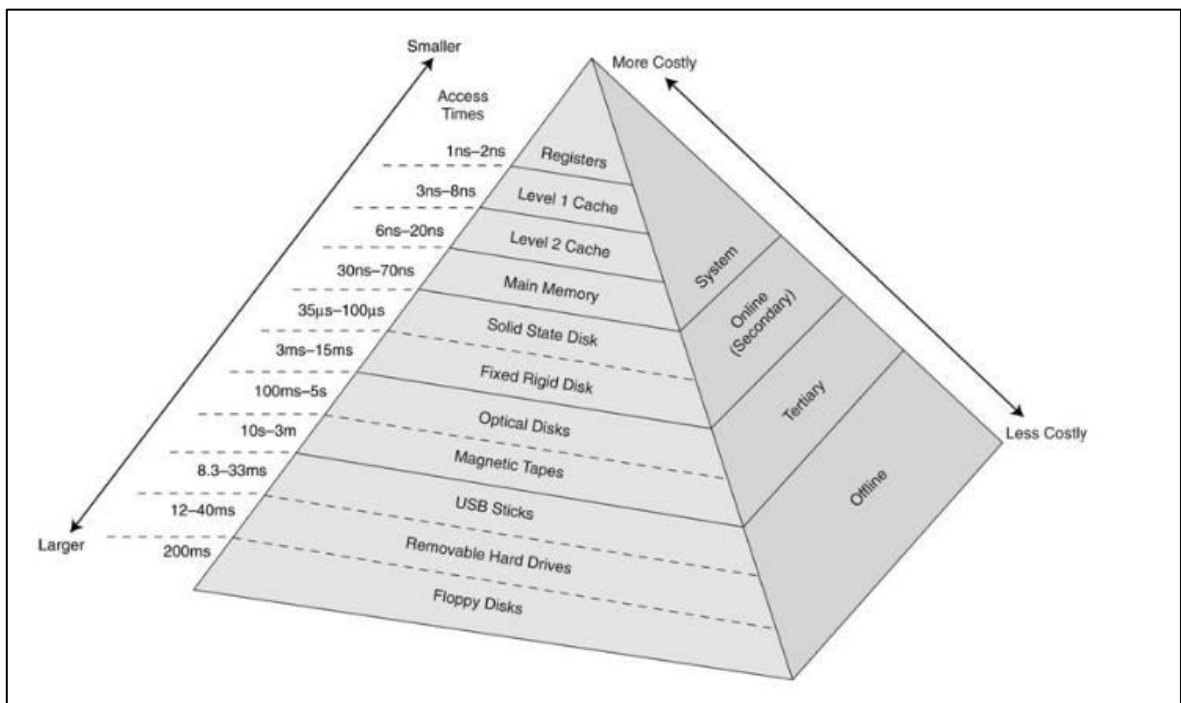
Αυτό το πρόβλημα συνέβαλλε στην εξέλιξη και ενσωμάτωση μίας μικρής (αναλογικά με την κύρια μνήμη ή τα μέσα μόνιμης αποθήκευσης, πχ σκληρός δίσκος) γρήγορης μνήμης μέσα στον επεξεργαστή, η οποία επιτρέπει την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων, κάνοντας την ανάκτηση δεδομένων γρηγότερη και πιο αποδοτική. Έτσι αποθηκεύονται

⁶¹ <http://www.encyclopedia.com/science-and-technology/computers-and-electrical-engineering/computers-and-computing/cache-memory>

⁶² <https://dave.cheney.net/2014/06/07/five-things-that-make-go-fast>

τα συχνώς χρησιμοποιούμενα δεδομένα σε μία μνήμη κοντά στον επεξεργαστή μεγιστοποιώντας έτσι την επίδοσή του.

Η ιεράρχηση της μνήμης διευρύνεται με τα χρόνια εξέλιξης και τμηματοποιείται σε πολλά επίπεδα, ξεκινώντας από τον καταχωρητή που είναι το πιο άμεσα προσπελάσιμο μέσον μνήμης στον επεξεργαστή και φτάνοντας μέχρι και εξωτερικά μέσα αποθήκευσης. Έτσι ακόμα και η Cache σήμερα τμηματοποιείται σε περισσότερα επίπεδα (L1, L2, L3 κλπ). Γενικότερα θα μπορούσαμε να δούμε την ιεραρχία της μνήμης ως μία πυραμίδα, με την κορυφή να δηλώνει την πιο κοντινή μνήμη στον επεξεργαστή και πιο γρήγορα προσπελάσιμη. Όσο πιο γρήγορο τόσο μικρότερη, μιας και το κόστος αυξάνεται.



Εικόνα 36. Η Πυραμίδα ιεράρχησης της μνήμης⁶³.

Η Cache λοιπόν εισήχθηκε στον P6, ως μία μικρή γρήγορη και κοντινή μνήμη στον επεξεργαστή, χωρίς να απαιτείται η τεράστια αύξηση του κόστους. Περιείχε ένα μικρό ποσοστό των δεδομένων της κύριας μνήμης, παρέχοντας όμως ένα υψηλό ποσοστό επιτυχούς εύρεσης των δεδομένων που χρειαζόταν ο επεξεργαστής την εκάστοτε στιγμή, μιας και άλλαζε δυναμικά. Αυτά στηρίχθηκαν δεδομένου ότι ο κώδικας εισέρχεται σειριακά και πολλές φορές επαναεκτελείται (loops, procedures), ενώ η πρόσβαση σε προηγούμενα δεδομένα είναι συχνή.

⁶³http://images.slideplayer.com/27/9203219/slides/slide_10.jpg

2.6.2. Branch Prediction (Πρόβλεψη Διακλάδωσης)

Ο κώδικας διακλαδίζεται συνεχώς με αποφάσεις συνθήκης, γεγονός το οποίο καθιστά την ροή του εκτελέσιμου κώδικα σχετική. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στην τεχνική pipeline, είναι πολύ σημαντικό να ξεκινά η εκτέλεση εντολών παρότι η εντολή απόφασης διακλάδωσης μπορεί να μην έχει ολοκληρωθεί ακόμα. Αν αυτό γίνει τυχαία τότε το ποσοστό επιτυχίας είναι πάρα πολύ κακό, με αποτέλεσμα να εκτελείται κώδικας και να απασχολούνται πόροι κάνοντας εργασία η οποία πολύ συχνά θα πρέπει να πεταχτεί.

Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό εισήχθηκε η έννοια του Branch Prediction κατά το οποίο γίνεται πρόβλεψη της διακλάδωσης με τρόπο ευφυή, ώστε η ανούσια εκτέλεση κώδικα να είναι σπάνια. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η συνθήκη τερματισμού ενός for-loop 100 επαναλήψεων. Εάν το σύστημά μας είναι αρκετά έξυπνο ώστε να προβλέψει ότι μάλλον ο κώδικας του loop θα ξανατρέξει, τότε το ποσοστό επιτυχίας θα είναι 99%, μιας και θα αποτύχει μόνο την τελευταία φορά, όπου θα προέβλεπε ότι το for-loop ξανατρέχει, ενώ στην ουσία θα είχε ολοκληρωθεί.

Στον P6 η υλοποίηση του Branch Prediction γίνεται με τους εξής τρόπους:

- Χρησιμοποίηση ιστορικού (ιδιωτικού ή παγκόσμιου) για την πρόβλεψη της κατεύθυνσης (τεχνικές simple Lee&Smith, advanced Yeh& Patt)
- Η διεύθυνση προορισμού λαμβάνεται από κάποιον πίνακα (γρηγρότερο) ή από κάποια εντολή (πιο αργό)
- Ο πίνακας ανανεώνεται αρχικά σύμφωνα με την πρόβλεψη και αργότερα σύμφωνα με την πραγματική εκτέλεση

Το κόστος κακής πρόβλεψης από την άλλη μεριά μπορεί να είναι μεγάλο, καθώς υπάρχει ένα βάθος εκτέλεσης εντολών, η χρησιμότητα του οποίου μπορεί να ποικίλει. Συνεπώς και το κόστος λάθος πρόβλεψης ποικίλει ανάλογα με το είδος του προβλέπτη (υψηλό κόστος στον Pentium Pro). Το ποσοστό σωστής πρόβλεψης στον P6 ήταν 92% με 95%, που αντιστοιχούσε σε μία λάθος πρόβλεψη ανά ~60 – 100 εντολές (θεωρώντας ότι κάποια διακλάδωση υφίσταται ανά 5 εντολές κατά μέσο όρο).

Η αρχιτεκτονική αυτή εφαρμόστηκε στα chips: Celeron, Pentium Pro, Pentium II Overdrive, Pentium II, Pentium II Xeon, Pentium III, Pentium III Xeon. Ήταν γνωστή ευρέως για την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, την εξαιρετική απόδοση πράξεων ακεραίων και το υψηλό IPC (Instructions Per Cycle – πλήθος εντολών που εκτελούνται

ανά κύκλο ρολογιού). Η γενιά αυτή είχε διάδοχο την NetBurst (P68) η οποία παρουσιάστηκε στον Pentium 4. Αυτή ακολουθούσε τελείως διαφορετικό σχεδιασμό στηριζόμενο σε πολύ μακριά pipelines που επέτρεπαν υψηλές συχνότητες ρολογιού με αποτέλεσμα την μείωση του IPC αλλά και την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

2.6.3. Speculative Execution (Υποθετική Εκτέλεση)

Πρόκειται για μία τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στον P6 και αφορά στην εκτέλεση εντολών από ένα προβλεπόμενο (αλλά και μη βέβαιο) μονοπάτι κώδικα⁶⁴. Η κύρια ιδέα είναι η πραγματοποίηση εργασίας εκ των προτέρων προτού καταστεί γνωστό εάν χρειάζεται, έτσι ώστε να αποφευχθεί η καθυστέρηση που θα προέκυπτε εάν εκτελούνταν αφότου γινόταν γνωστή η αναγκαιότητά της. Η τεχνική αυτή σχετίζεται άμεσα με την πρόβλεψη διακλάδωσης στον pipelined P6, αλλά και με την εκ των προτέρων μεταφορά δεδομένων σε κοντινότερου επιπέδου μνήμη.

2.6.4. Dynamic Scheduling

Αφορά στον χρονικό προγραμματισμό της ροής των εντολών κατά τον χρόνο εκτέλεσης (run time) από τον Hardware και όχι κατά τον χρόνο μεταγλώττισης (Compile time) από το Software.

Αυτό είχε ως πλεονέκτημα ότι μπορεί να λειτουργήσει κατά την δυναμική ροή δεδομένων προγραμματίζοντας ανάμεσα σε procedures, modules κλπ.. Επίσης μπορούν έτσι να προσπελαστούν δυναμικά μεταβαλλόμενες τιμές και να διαχειριστούν ποικίλες καθυστερήσεις.

Το μειονέκτημα ήταν ότι μπορεί να προγραμματίσει μέσα σε ένα περιορισμένο χρονικό παράθυρο και όντας γρήγορο δεν μπορεί να είναι πολύ «έξυπνο», δηλαδή δεν μπορεί να γίνει πάντα ο αποδοτικότερος δυνατός προγραμματισμός εντολών.

2.6.5. Register Renaming και Data Dependency

Για να γίνει κατανοητό το πώς λειτουργεί η μετονομασία καταχωρητών ας υποθέσουμε τον παρακάτω κώδικα (**Πίνακας 15**).

⁶⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Speculative_execution

	Εντολή	Καταχωρητής προορισμού	Καταχωρητής πηγής	Αληθινή Εξάρτηση	Αντι-Εξάρτηση	Output Εξάρτηση
1	load	R2	(R1) μνήμη	■ ¹	▲ ¹	● ¹
2	mov	R3	R2	■ ¹ , ■ ²	▲ ²	
3	mov	R1	a	■ ³	▲ ¹	
4	mov	R2	R3	■ ²	▲ ²	● ¹ , ● ²
6	add	R2	R1	■ ³		● ²

Πίνακας 15. Η λειτουργία των καταχωρητών.

Εδώ παρατηρούμε αρχικά τις αληθινές εξαρτήσεις (1>2, 2>4, 3>5), κατά τις οποίες για να εκτελεστεί μία επόμενη εντολή χρειάζεται δεδομένα που προκύπτουν από μία προηγούμενη.

Οι υπόλοιπες εξαρτήσεις δεν είναι πραγματικές, μιας και δεν σχετίζονται μεταξύ τους ουσιωδώς. Πιο συγκεκριμένα στις αντι-εξαρτήσεις παρατηρούμε εγγραφή καταχωρητή από επόμενη εντολή ενώ θα πρέπει να αναγνωστεί νωρίτερα από προηγούμενη εντολή. Αυτό θα μπορούσε εύκολα να επιλυθεί με μετονομασία καταχωρητών. Επίσης παρατηρούμε Output εξαρτήσεις κατά τις οποίες μια προηγούμενη και μια επόμενη εντολή γράφουν στον ίδιο καταχωρητή.

Ο σκοπός της μετονομασίας καταχωρητών είναι να επιλύσει τις μη πραγματικές εξαρτήσεις, όπως φαίνεται στον παρακάτω κώδικα (**Πίνακας 16**):

	Before	After	Mapping
1	load R2, (R1)	load r21, (r10)	[R2 -> r21]
2	mov R3, R2	mov r31, r21	[R3 -> r31]
3	mov R1, a	mov r11, a	[R1 -> r11]
4	mov R2, R3	mov r22, r31	[R2 -> r22]
6	add R2, R1	add r23, r11, r22	[R2 -> r23]

Πίνακας 16. Η λειτουργία των καταχωρητών.

Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται οι ψευδείς εξαρτήσεις και οι περιορισμοί σε πλήθος καταχωρητών. Η υποθετική εκτέλεση υποστηρίζεται, μιας και οι μετονομασμένοι καταχωρητές παραμένουν μέχρις ότου η υπόθεση εξακριβωθεί ότι είναι σωστή.

2.6.6. Reorder Buffer (ROB)

Πρόκειται για έναν μηχανισμό μετονομασίας και απόσυρσης των καταχωρητών. Υλοποιείται με την βοήθεια ενός πίνακα ο οποίος έχει τις εντολές in-order, με την σειρά δηλαδή που εμφανίζονται στον κώδικα⁶⁵. Στον πίνακα αυτό εισέρχονται οι εντολές και οι καταχωρητές μετονομάζονται αναλόγως. Όταν γίνει η ανάθεση των καταχωρητών η σειρά εκτέλεσης είναι αδιάφορη, ενώ μετά την εκτέλεση τα δεδομένα του πίνακα μαρκάρονται ως «ολοκληρωμένα» (έχουν εκτελεστεί). Ένα στοιχείο που έχει «ολοκληρωθεί» μπορεί να αποσυρθεί όταν όλες οι προηγούμενες εντολές έχουν αποσυρθεί (retired). Με την απόσυρση ενημερώνονται οι «πραγματικοί» καταχωρητές με τιμές και με αντίστοιχα ονόματα και η μνήμη ενημερώνεται.

Παρέχει ένα μεγάλο αριθμό φυσικών καταχωρητών για την μετονομασία καταχωρητών, με ένα register file μεγέθους 40. Πραγματοποιεί τις αλλαγές μόνο όταν επιλυθεί η υποθετική εκτέλεση, ενώ ταυτόχρονα εντοπίζει εξαιρέσεις (excerptions) και λανθασμένες προβλέψεις (mispredictions) και εκκινεί την επιδιόρθωση ώστε να επιστρέψει ο υπολογιστής στην σωστή κατάσταση και στην σωστή ροή εκτέλεσης. Συναυτά διατηρεί το πραγματικό σύνολο καταχωρητών (Real Register File – RRF).

2.6.7. Reservation Stations

Πρόκειται για ένα είδος δεξαμενής (pool) με όλες τις «όχι ακόμα εκτελεσμένες» εντολές. Σε αυτήν διατηρούνται τελεστές κατάστασης τύπου «έτοιμη/όχι-έτοιμη», ενώ σε κάθε κύκλο οι εκτελεσμένες εντολές θέτουν περισσότερους τελεστές ως «έτοιμους». Οι εντολές των οποίων όλοι οι τελεστές είναι «έτοιμοι» μπορούν «απελευθερωθούν» (dispatched) προς εκτέλεση. Η δομή «απελευθέρωσης» προς εκτέλεση επιλέγει ποιες από τις εντολές θα εκτελεστούν στην συνέχεια^{66,67}.

2.6.8. Memory Order Buffere (MOB)

Η κύρια ιδέα σε αυτό είναι η εκτός σειράς λειτουργία (out of order) μεταξύ λειτουργιών που σχετίζονται με την μνήμη. Το πρόβλημα σε αυτό είναι όταν υπάρχουν εξαρτήσεις μνήμης οι οποίες δεν μπορούν να επιλυθούν πλήρως στατικά (memory disambiguation), όπως για παράδειγμα όταν πρόκειται να καταχωρηθεί κάτι στην μνήμη, όπου η διεύθυνση

⁶⁵ <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse471/07sp/lectures/Lecture4.pdf>

⁶⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Reservation_station

⁶⁷ <http://www.icsa.informatics.ed.ac.uk/cgi-bin/hase/tomasulo.pl?reserv-t.html>

μνήμης προέρχεται από καταχωρητή που το περιεχόμενό του δεν έχει επιλυθεί ακόμα, όπως φαίνεται παρακάτω.

Store r1, a; load r2,b => γίνεται να προβεί στην load πριν το store

Store r1, [r3]; load r2,b => το load πρέπει να περιμένει μέχρι η r3 να είναι γνωστή

Στο παραπάνω παράδειγμα πρέπει αναγκαστικά η Load να περιμένει την store καθώς υπάρχει πιθανότητα η πρώτη εντολή να γράφει στην ίδια θέση όπου θέλει να διαβάσει η δεύτερη εντολή, δημιουργώντας ασυνέπεια.

Η δομή που υλοποιεί το MOB μοιάζει πολύ με εκείνη του ROB. Κάθε πρόσβαση προσδιορίζεται από ένα στοιχείο της MOB. Διευθύνσεις και δεδομένα (για τις εντολές store) ανανεώνονται όταν είναι γνωστά. Κάθε Load ελέγχεται έναντι όλων των προηγούμενων stores ως εξής:

- Αναμονή για εγγραφή από κάποια store στην ίδια διεύθυνση μέχρι τα δεδομένα να είναι έτοιμα
- Ένα τα σωστά δεδομένα είναι αποθηκευμένα απλά τα χρησιμοποιεί
- Αναμονή για εγγραφή από προηγούμενη store, εαν η διεύθυνση προορισμού δεν έχει επιλυθεί ακόμα
- Αν δεν υπάρχει εμπλοκή σχετικά με την διεύθυνση τότε πηγαίνει στην μνήμη

2.6.9. Dynamic Execution

Πρόκειται για έναν καινοτόμο συνδυασμό τριών επεξεργαστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται στον P6 και επιταχύνουν το λογισμικό:

- **Πολλαπλό Branch Prediction:** Αρχικά ο επεξεργαστής κοιτάει πολλαπλά βήματα μπροστά στο λογισμικό και προβλέπει ποιες διακλαδώσεις ή ομάδες εντολών είναι πιθανότερο να εκτελεστούν στην συνέχεια.
- **Ανάλυση Ροής Δεδομένων (data flow analysis):** ο επεξεργαστής P6 αναλύει ποιές εντολές είναι εξαρτημένες μεταξύ τους (true dependencies), ώστε να δημιουργηθεί ένας βελτιωμένος προγραμματισμός της σειράς εκτέλεσης των εντολών
- **Υποθετική εκτέλεση (speculative execution):** οι εντολές στη συνέχεια διεκπεραιώνονται σύμφωνα με αυτόν τον βελτιωμένο προγραμματισμό, χρησιμοποιώντας την superscalar επεξεργαστική ισχύ του chip αυξάνοντας την συνολική επίδοση του software.

2.7. NetBurst

Η μικροαρχιτεκτονική αυτή (ονομαζόμενη και P68 στην Intel) ήταν ο διάδοχος της P6 στην οικογένεια x86 της Intel. Ο πρώτος επεξεργαστής που χρησιμοποίησε αυτήν την αρχιτεκτονική ήταν ο Willamette-core Pentium 4 (Εικόνα 37), ο οποίος βγήκε στην αγορά τον Νοέμβριο του 2000 και αποτελούσε τον πρώτο Pentium 4. Όλοι οι επόμενοι Pentium 4 και Pentium D στηρίχθηκαν σε αυτήν την μικροαρχιτεκτονική. Στα μέσα του 2001 η Intel έβγαλε τον Foster core, ο οποίος επίσης στηριζόταν στην NetBurst, ενώ παράλληλα άλλαξε τους Xeon επεξεργαστές σύμφωνα με την νέα αρχιτεκτονική. Ο Celeron που βασίστηκε στον Pentium 4 χρησιμοποιούσε επίσης NetBurst μικροαρχιτεκτονική. Η μικροαρχιτεκτονική αυτή αντικαταστάθηκε από την Core μικροαρχιτεκτονική το 2006.

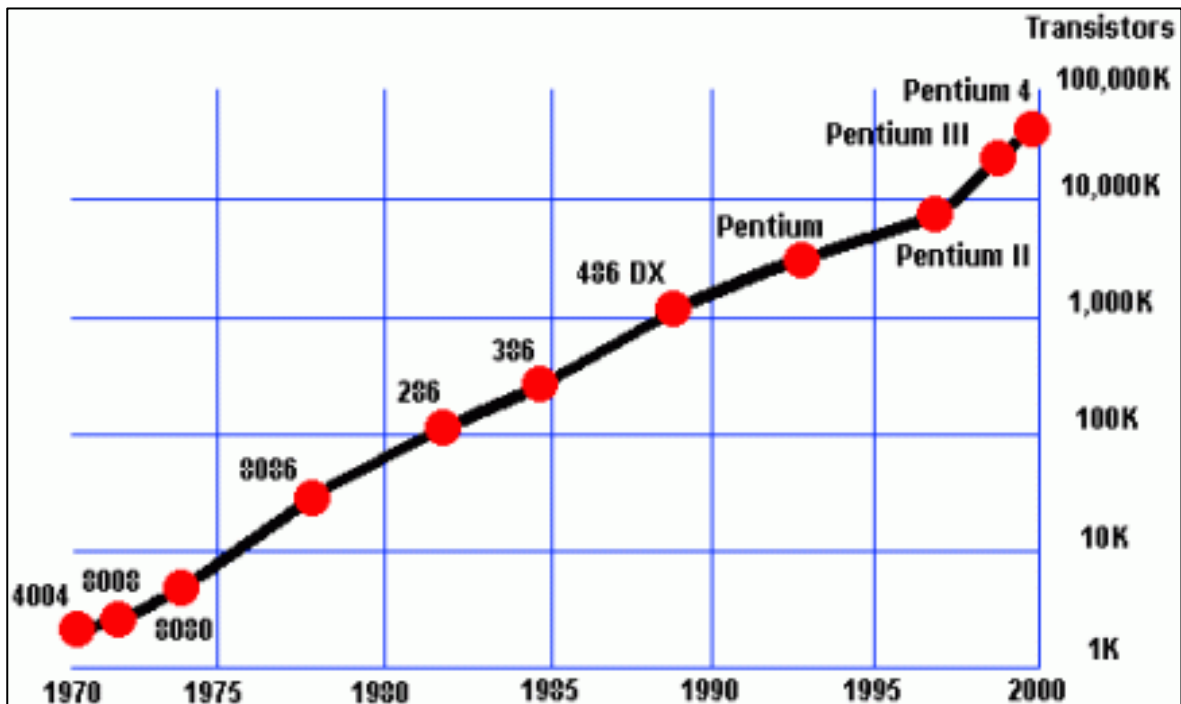


Εικόνα 37. Ο επεξεργαστής Pentium 4⁶⁸.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ο νόμος του *Moore* και πώς αυτός επιβεβαιώθηκε από την Intel⁶⁹. Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, ο οποίος ορίστηκε από τον *Gordon Moore* το 1965 (συνιδρυτής της Intel), το πλήθος των transistors ανά ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες. Ο *Moore* πρόβλεψε πως αυτή η τάση θα ισχύσει για τα επόμενα 10 έτη, όμως, όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, η Intel κατάφερε να ακολουθήσει τον νόμο αυτό για πολύ περισσότερο. Το 1978 ο 8086 έτρεχε στα 4.77MHz και είχε λιγότερα από 30,000 transistors. Με το τέλος της χιλιετίας ο Pentium 4 είχε 42 εκατομμύρια on-chip transistors και έτρεχε στα 1.5 GHz!

⁶⁸<http://i.nextmedia.com.au/news/intelp4netburst.jpg>

⁶⁹<https://www.pctechguide.com/cpu-architecture/moores-law-in-it-architecture>



Εικόνα 38. Ο νόμος του Moore⁷⁰.

ARCHITECTURE	NETBURST (P68)
L1 CACHE	8 KB to 16 KB per core
L2 CACHE	128 KB to 2048 KB
L3 CACHE	256 KB to 2048 KB (Xeon)
MODEL	4 MB to 16 MB shared
CREATED	Celeron Series
TRANSISTORS	November 20, 2000
INSTRUCTIONS	42M 180 nm (B2, C1, D0, E0)
EXTENSIONS	MMX
SOCKET(S)	x86-64, Intel 64 SSE, SSE2, SSE3, SSSE3
PREDECESSOR	Socket 423 Socket 478 Socket 603 Socket 604 LGA 771 LGA 775
SUCCESSOR	P6 Intel Core

Πίνακας 17. Τα χαρακτηριστικά του Netburst.

⁷⁰<https://www.pctechguide.com/cpu-architecture/moores-law-in-it-architecture>

Η γενιά αυτή είχε διάφορες βελτιώσεις που δεν υπήρχαν σε παλαιότερες εκδόσεις. Αναφορικά είναι τα:

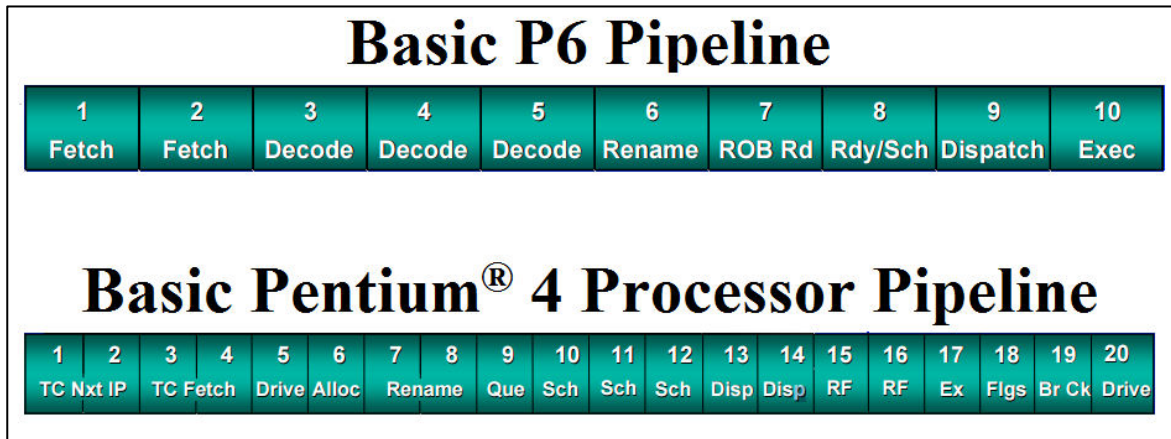
- Hyper Pipelined Technology,
- Hyper-Threading,
- Quad-Pumped Front-Side Bus
- Rapid Execution Engine,
- Replay System

2.7.1. Hyper Pipelined Technology

Το όνομα αυτό δόθηκε στο 20 σταδίων pipeline του Willamette core. Πρόκειται για μία σημαντική αύξηση στο πλήθος των επιπέδων συγκριτικά με τον Pentium III, το οποίο είχε μόνο 10 στάδια. Ο Prescott core έχει Pipeline 31 επιπέδων (μερικά επίπεδα απλά μεταφέρουν δεδομένα σε διάφορα μέρη του CPU). Παρόλο που ένα βαθύτερο (περισσότερων σταδίων) pipeline έχει μεγαλύτερο misprediction penalty (χρονική ποινή λανθασμένης πρόβλεψης), το μεγαλύτερο πλήθος σταδίων επιτρέπει στη CPU μεγαλύτερες ταχύτητες ρολογιού, οι οποίες υπερκάλυπταν κάθε απώλεια σε επίδοση λόγω λανθασμένης πρόβλεψης.

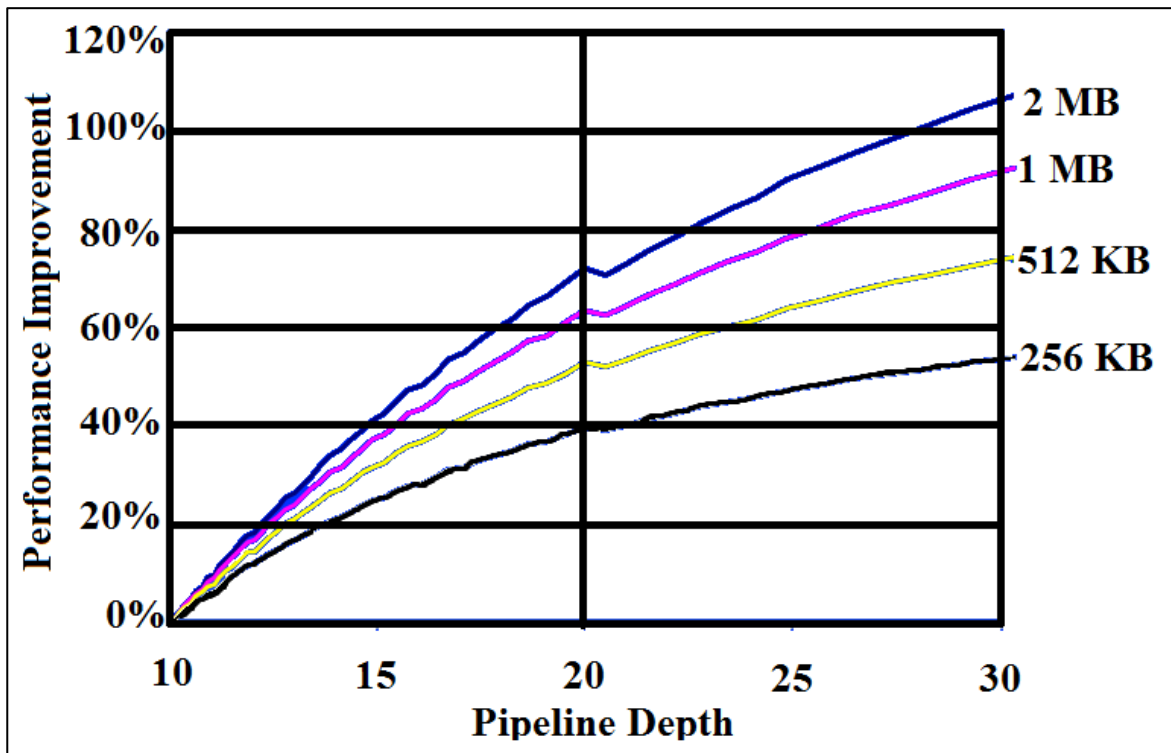
Μία έμμεση συνέπεια της αύξησης του βάθους pipeline είναι η μείωση του IPC (Instructions Per Cycle – εντολές που διευθετούνται ανά κύκλο ρολογιού). Ένα άλλο μειονέκτημα της ύπαρξης περισσότερων σταδίων είναι το μεγαλύτερο πλήθος πίσω βημάτων που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε περίπτωση λανθασμένης πρόβλεψης, αυξάνοντας το missprediction-penalty σε μονάδες χρόνου. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα η Intel ανέπτυξε την Rapid Execution Engine και επένδυσε πολλά στην τεχνολογία πρόβλεψης διακλάδωσης (branch prediction technology), η οποία σύμφωνα με την Intel μείωσε τα branch miss-predictions κατά 33% συγκριτικά με τον Pentium III⁷¹ (**Εικόνα 39**).

⁷¹[https://en.wikipedia.org/wiki/NetBurst_\(microarchitecture\)#Hyper_Pipelined_Technology](https://en.wikipedia.org/wiki/NetBurst_(microarchitecture)#Hyper_Pipelined_Technology)



Εικόνα 39. Οι τεχνολογίες διοχέτευσης των Pentium P6 και Pentium 4⁷².

Σύμφωνα με εκτέλεση κώδικα των συνηθισμένων εφαρμογών της εποχής (έτος 2000), μήκους όπως φαίνεται στην δεξιά στήλη, με την αύξηση του βάθους του pipeline από 10 στάδια έως και 30 έχουμε βελτίωση της επίδοσης μέχρι και πάνω από 100%, όπως ανακοίνωνε η Intel το 2002 (Εικόνα 40).



Εικόνα 40. Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης των τεχνολογιών διοχέτευσης⁷³.

⁷²<http://cseweb.ucsd.edu/classes/wi02/cse240/carmean.pdf>

⁷³<http://cseweb.ucsd.edu/classes/wi02/cse240/carmean.pdf>

2.7.2. Hyper Threading Technology (HTT)⁷⁴

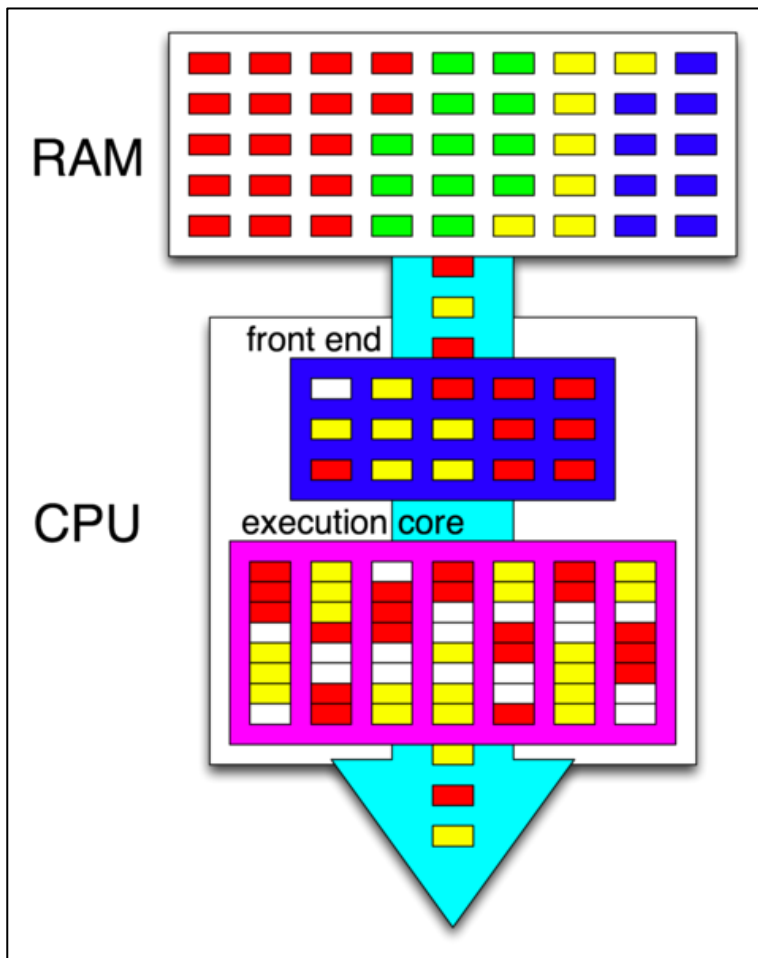
Το Hyper-Threading αφορά στο Simultaneous multithreading (SMT)⁷⁵ το οποίο ανέπτυξε η Intel στην αρχιτεκτονική αυτή ώστε να βελτιώσει το κομμάτι της παραλληλοποίησης των υπολογισμών, εκτελώντας tasks παραλλήλως χρονικά. Αυτό ήταν εφικτό μέσω hardware multithreading και επιτρέπει σε πολλαπλά ανεξάρτητα νήματα να εκτελούνται χρησιμοποιώντας καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους. Πρωτοεμφανίστηκε στους επεξεργαστές Xeon για servers τον Φεβρουάριο του 2002 και τον Νοέμβριο του ίδιου έτους στους Pentium 4 desktop CPUs.

Για κάθε επεξεργαστικό πυρήνα που υπάρχει φυσικά το λειτουργικό σύστημα διευθυνσιοδοτεί δύο εικονικούς (virtual ή logical) πυρήνες και διαμοιράζει τον φόρτο εργασίας μεταξύ των δύο όταν αυτό είναι εφικτό. Η κύρια λειτουργία του hyper-threading είναι η αύξηση του πλήθους των ανεξάρτητων εντολών μέσα στο pipeline. Εκμεταλλεύεται την superscalar αρχιτεκτονική στην οποία πολλαπλές εντολές εκτελούνται σε ξεχωριστά δεδομένα παραλλήλως. Κατά την HTT ένας φυσικός πυρήνας εμφανίζεται σαν δύο επεξεργαστές στο λειτουργικό σύστημα επιτρέποντας τον ταυτόχρονο προγραμματισμό (scheduling) δύο υπολογιστικών διαδικασιών ανά πυρήνα. Επιπροσθέτως δύο ή περισσότερες εντολές μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους πόρους, δεδομένου ότι εαν οι πόροι για μία εντολή δεν είναι διαθέσιμοι μία άλλη εντολή μπορεί να συνεχίσει εαν οι πόροι της είναι διαθέσιμοι.

Στην παρακάτω απεικόνιση υψηλού επιπέδου του HTT οι εντολές έρχονται από την μνήμη RAM (διαφορετικά χρώματα απεικονίζουν διαφορετικά προγράμματα), αποκωδικοποιούνται και επανοργανώνονται στο front-end (τα άσπρα κουτάκια συμβολίζουν τις pipeline bubbles ή stalls) και περνούν τον πυρήνα εκτέλεσης, ο οποίος είναι ικανός να εκτελεί εντολές από δύο διαφορετικά προγράμματα στον ίδιο κύκλο ρολογιού.

⁷⁴ <https://en.wikipedia.org/wiki/Hyper-threading>

⁷⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_multithreading



Εικόνα 41. Η τεχνολογία Hyper Threading⁷⁶.

2.7.3. Quad Front-Side Bus

Το Northwood και το Willamette είχαν ένα εξωτερικό Front-Side Bus ο οποίος έτρεχε στα 100MHz και είχε εύρος 64 Bits⁷⁷. Επειδή όμως ήταν τετραπλός (quad pumped) παρείχε ροή δεδομένων με την μνήμη με ρυθμό 3.2GB/s. Το chipset Intel Northwood i850 με διπλό κανάλι RD-RAM μπορούσε να παρέχει memory bandwidth 3.2GB/s. Ο Presler είχε έναν 800MHz front side bus εύρους 64bits, οπότε είχε την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων με ρυθμό 6.4GB/s με μνήμη 800MHz DDR2.

2.7.4. Rapid Execution Engine

Με αυτήν την τεχνολογία οι δύο ALUs (Arithmetic and Logical Units) στον πυρήνα της CPU είναι double-pumped (διπλής άντλησης), το οποίο σημαίνει ότι λειτουργούν στην διπλάσια συχνότητα συγκριτικά με το ρολόι (σε έναν κύκλο εκτελούν διπλή εργασία). Για

⁷⁶https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hyper-threaded_CPU.png

⁷⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Front-side_bus

παράδειγμα σε έναν 3.8 GHz επεξεργαστή οι δύο ALUs δουλεύουν με συχνότητα 7.6 GHz. Ο λόγος δημιουργίας αυτής της τεχνικής ήταν προς βελτίωση της χαμηλής IPC (Instructions per cycle). Επιπροσθέτως η τεχνική αυτή βελτιώνει αισθητά την απόδοση του επεξεργαστή σχετικά με τις πράξεις ακεραίων. Η Intel επίσης αντικατέστησε τον υψηλής ταχύτητας barrel shifter (ψηφιακό κύκλωμα που μπορεί μετατοπίσει μία λέξη δεδομένων χωρίς χρήση ακολουθιακής λογικής, αλλά με χρήση συνδυαστικής λογικής)⁷⁸ με μία μονάδα εκτέλεσης shift/rotate, η οποία λειτουργεί στην ίδια συχνότητα με εκείνη του πυρήνα της CPU. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω αυτού συγκεκριμένες εντολές είναι πολύ πιο αργές συγκριτικά με προηγούμενες εκδόσεις, κάνοντας πολύ δύσκολη την βελτιστοποίηση (optimization) CPU στοχευμένης εργασίας.

2.7.5. Execution Trace Cache

Μέσα στην L1 cache της CPU η Intel ενσωμάτωσε την Execution Trace Cache. Αυτή ως κύρια εργασία είχε την αποθήκευση των μικροεντολών (micro-operations), έτσι ώστε όταν εκτελείται μία καινούργια εντολή, αντί να μεταφέρεται η εντολή (fetching) και να αποκωδικοποιείται (decoding) ξανά, η CPU έχει άμεση πρόσβαση στις αποκωδικοποιημένες μικροεντολές από την ETCache και ως εκ τούτου εξοικονομείται αξιοσημείωτος χρόνος.

Επιπλέον οι μικροεντολές cachάρονται στο προβλεπόμενο μονοπάτι εκτέλεσης, το οποίο σημαίνει ότι όταν οι εντολές έρχονται στην CPU από την Cache βρίσκονται ήδη στην σωστή σειρά εκτέλεσης. Αργότερα η Intel εισήγαγε μια παρόμοια αλλά απλούστερη έννοια, την UOP Cache ή Microoperation Cache⁷⁹.

2.7.6. Replay System

Πρόκειται για ένα υποσύστημα που πρωτοεμφανίστηκε στον επεξεργαστή Intel Pentium 4. Η κύρια λειτουργία του είναι να «πιάνει» εντολές οι οποίες έχουν σταλεί λανθασμένα προς εκτέλεση από τον scheduler του επεξεργαστή. Οι εντολές «πιάνονται» από το replay system και επανεκτελούνται σε ένα loop μέχρι οι απαραίτητες συνθήκες για την ορθή τους εκτέλεση να ικανοποιηθούν.

Αυτό το σύστημα προέκυψε λόγω της δημιουργίας απαιτήσεων υψηλών συχνοτήτων και κατ' επέκταση ενός μεγάλου βάθους pipeline (31 σταδίων) προς βελτίωση της επίδοσης

⁷⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Barrel_shifter

⁷⁹https://en.wikipedia.org/wiki/CPU_cache#UOP-CACHE

των επεξεργαστών. Εξαιτίας αυτού υπήρχαν μέχρι και 6 στάδια μεταξύ του scheduler και των μονάδων εκτέλεσης του πυρήνα. Σε μία προσπάθεια διατήρηση αποδεκτών επιδόσεων οι μηχανικοί της Ίντελ έπρεπε να σχεδιάσουν έναν scheduler πολύ αποδοτικό⁸⁰.

Παρά τις βελτιώσεις αυτές η αρχιτεκτονική NetBurst δημιούργησε εμπόδια για τους μηχανικούς που προσπαθούσαν να κλιμακώσουν την επίδοση των επεξεργαστών αυτών. Με την συγκεκριμένη μικροαρχιτεκτονική η Ίντελ προσπάθησε να πετύχει ταχύτητες ρολογιού μέχρι και 10 GHz, αλλά λόγω της αντίστοιχα αυξανόμενης κατανάλωσης ενέργειας αναγκάστηκε να κρατήσει την ταχύτητα σε αποδεκτά όρια. Η Ίντελ έφτασε σε ένα όριο ταχύτητας στα 3.8 GHz τον Νοέμβριο του 2004, αλλά αντιμετώπισε πολλά προβλήματα προσπαθώντας να το πετύχει αυτό. Εγκατέλειψε την NetBurst αρχιτεκτονική το 2006 όταν τα προβλήματα θερμότητας έφτασαν σε απαγορευτικά επίπεδα, οπότε ανέπτυξε την μικροαρχιτεκτονική Core, η οποία εμπνεύστηκε από την P6 Core και τον Pentium Pro καθώς και από τον Tualatin Pentium III-S και τον Pentium M.

2.7.7. Εκδόσεις

Στη γενιά αυτής της μικροαρχιτεκτονικής παρήχθησαν πολλές εκδόσεις, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Από τον αρχικό πυρήνα Willamette προέκυψε ο επόμενος, ο Northwood, τον Ιανουάριο του 2002. Ο πυρήνας αυτός συνδύαζε την αυξημένου μεγέθους Cache, μία μικρότερη πυκνότητα εκτύπωσης στα 130nm, καθώς και την Hyper-Threading Technology (παρότι τα αρχικά μοντέλα με εξαίρεση το 3.06 GHz μοντέλο είχαν απενεργοποιημένη αυτήν την λειτουργία).

Το Φεβρουάριο του 2004 η Intel παρουσίασε τον Prescott Πυρήνα, μία πιο ριζοσπαστική έκδοση του NetBurst. Ο πυρήνας αυτός είχε πυκνότητα εκτύπωσης στα 90nm και περιελάμβανε αρκετές σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένης μίας ακόμα μεγαλύτερης μνήμης Cache (από τα 512 KB του Northwood, στα 1MB αλλά και 2MB στον Prescott), ένα ακόμα βαθύτερο Pipeline (31 στάδια αντί των 20), έναν ισχυρώς βελτιωμένο branch predictor, την χρήση για πρώτη φορά SSE3 εντολών και αργότερα την υλοποίηση του Intel 64, όνομα το οποίο παραπέμπει στην υλοποίηση της x86-64 bits έκδοσης η οποία είναι συμβατή με την μέχρι τότε x86 μικροαρχιτεκτονική. Δύο από τα μεγάλα θέματα αυτού του επεξεργαστή ήταν η κατανάλωση ενέργειας και η απαγωγή μεγάλων ποσών θερμότητας, κατατάσσοντας τον Prescott στους πιο «καυτούς» και

⁸⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Replay_system

«ενεργειακά πειναλέους» επεξεργαστές της Intel. Για τον λόγο αυτό ο Prescott περιορίστηκε στα 3.8 GHz, με μία mobile έκδοσή του στα 3.46 GHz.

Η Intel επίσης έβγαλε στην παραγωγή έναν διπύρηνιο επεξεργαστή βασισμένο στην μικροαρχιτεκτονική NetBurst, με το όνομα Pentium D. Ο πρώτος Pentium D είχε κωδικό όνομα Smithfield, ο οποίος στην πραγματικότητα ήταν 2 Prescott σε ένα die. Αργότερα παρήχθησε ο Presler, ο οποίος αποτελούνταν από 2 Cedar Mill πυρήνες σε δύο διαφορετικά dies (65nm πυκνότητα εκτύπωσης) (Πίνακας 18).

ΕΚΔΟΣΗ	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ	ΣΤΑΔΙΑ PIPELINE	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ
WILLAMETTE	Celeron, Pentium 4	20	180 nm	Νοε 2000
NORTHWOOD	Celeron, Pentium 4, Pentium 4 HT	20	130 nm	Ιαν 2002, Μαι 2003 (Hyper Threading)
GALLATIN	Pentium 4 HT Extreme Edition, Xeon	20	130 nm	Σεπ 2003 (Hyper Threading)
PRESCOTT	Celeron D, Pentium 4, Pentium 4 HT, Pentium 4 Extreme Edition	31	90 nm	Μαρ 2004, Φεβ 2004 (Hyper Threading), Prescott 2M Φεβ 2005
CEDAR MILL	Celeron D, Pentium 4	31	65 nm	Ιαν 2006
SMITHFIELD	Pentium D	31	90 nm	
PRESLER	Pentium D	31	65 nm	

Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά των NetBurst Pentium 4 επεξεργαστών.

2.8. Intel Pentium IV

Ο Pentium IV ήταν μία γραμμή μονοπύρηνων επεξεργαστών για desktops και laptops καθώς και για βασικού επιπέδου servers, που βγήκε στην παραγωγή τον Νοέμβριο του 2000 και πωλούνταν μέχρι και τον Αύγουστο του 2008. Πρόκειται για το κύριο προϊόν της μικροαρχιτεκτονικής NetBurst P68, της πρώτης με τόσο βαθύ pipeline (20-31 σταδίων) και τόσο υψηλών συχνοτήτων ρολογιού. Το 2004 μάλιστα βγήκε η πρώτη σειρά 64Bits Pentium 4 ως προέκταση των x86 (x86-64 σύνολο εντολών)⁸¹.

⁸¹https://en.wikipedia.org/wiki/Pentium_4

INTEL PENTIUM IV ARCHITECTURE NETBURST P68	
ΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	2000 – 2008
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΡΟΛΟΓΙΟΥ	1.3 GHz – 3.8 GHz
FSB SPEEDS	400 MT/s – 1066MT/s
TRANSISTORS	42M, 180 nm 55M, 130 nm 169M, 130 nm (P4EE) 125M, 90 nm 188M, 65 nm
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ	x86 (i386), x86-64, MMX, SSE, SSE2, SSE3
ΜΙΚΡΟΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΛΗΘΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ	NetBurst (P68) 1, 2
SOCKETS	Socket 423 Socket 478 LGA 775
ΠΡΟΚΑΤΟΧΟΣ	Pentium III
ΔΙΑΔΟΧΟΣ	Pentium D, Core
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ	Katmai, Coppermine, Coppermine T, Tualatin

Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά των Pentium 4 επεξεργαστών.

Οι πρώτοι Pentium 4 ονόματι Willamette είχαν συχνότητα ρολογιού 1.3 – 2 GHz. Βγήκαν στην αγορά τον Νοέμβριο του 2000 και χρησιμοποιούσαν σύστημα Socket 423. Αξίζει να σημειωθεί το ταχύτητας 400MT/s (Mega Transfers per second) Front Side Bus. Στην πραγματικότητα δούλευε στα 100MHz, όμως λόγω της quad pumped τεχνολογίας (4 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα από την συχνότητα ρολογιού) έφτανε την προαναφερθείσα ταχύτητα ροής δεδομένων. Σε αυτούς εισήχθη το SSE2 σύνολο εντολών.

Στην συνέχεια με τους Prescott Pentium 4 εισήχθησε το SSE3 σύνολο εντολών προς επιτάχυνση των υπολογισμών, των μεταφορών δεδομένων, της επεξεργασίας multimedia, 3D γραφικών και παιχνιδιών. Μεταγενέστερες εκδόσεις υποστήριζαν το προαναφερθέν Hyper-Threading Technology (HTT), που επέτρεπε σε έναν φυσικό επεξεργαστή να αντιμετωπίζεται και να εργάζεται σαν δύο εικονικούς (λογικούς) επεξεργαστές. Η Ίντελ επίσης προώθησε στην αγορά και τους χαμηλών επιδόσεων Celeron οι οποίοι στηρίζονταν στην NetBurst μικροαρχιτεκτονική (συχνά αναφερόμενους και ως Celeron 4) και τους υψηλών επιδόσεων Xeon που προορίζονταν σε servers πολλών επεξεργαστών και σε σταθμούς εργασίας. Το 2005 ο Pentium 4 συμπληρώθηκε από τον Pentium D και τον Pentium Extreme Edition dual-core.



Εικόνα 42. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 4⁸².

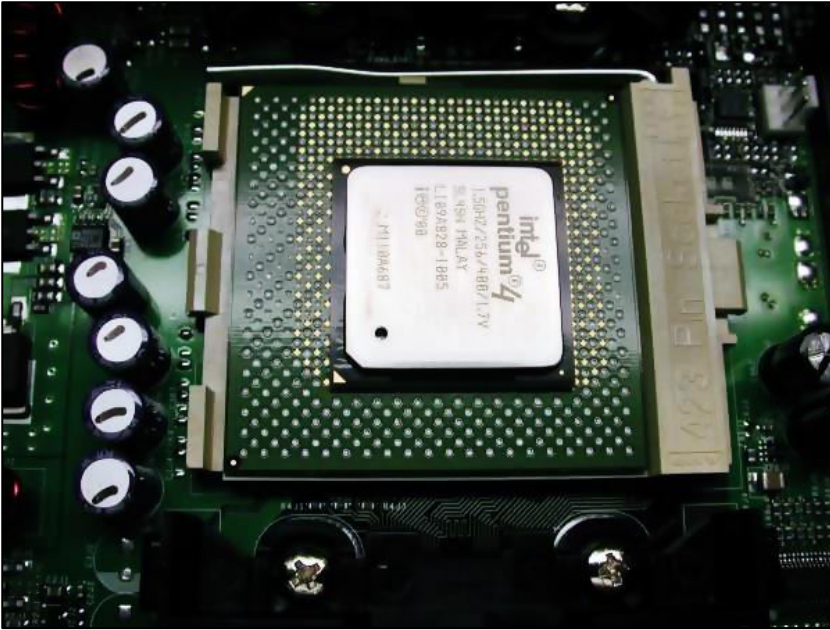
2.8.1. Πυρήνες Pentium 4

Οι επεξεργαστές αυτοί είχαν ένα ενσωματωμένο σύστημα διάχυσης θερμότητας (Integrated Heat Spreader – IHS), το οποίο εμποδίζει την πρόκληση ζημιάς στο die κατά τοποθέτηση/αφαίρεση κρέμας ψύξης (cooling solution).

2.8.2. Wilamette

Βγήκε στην αγορά τον Νοέμβριο του 2000 σε συχνότητες γύρω στο 1.5 GHz. Η πυκνότητα εκτύπωσής του ήταν στα 180nm και αρχικά χρησιμοποιούσε Socket 423 και αργότερα Socket 478. Θεωρείται ότι βγήκε στην αγορά κάπως πρώιμα για να καλύψει ένα κενό αγοράς που κατείχαν εταιρείες ανταγωνιστές, για αυτό και οι επιδόσεις του δεν ήταν και τόσο εντυπωσιακές, μιας και Pentium III υψηλών συχνοτήτων τον ξεπερνούσαν. Μειονεκτούσε στο ότι απαιτούσε RDRAM η οποία παρότι ήταν γρήγορη ήταν ιδιαίτερα ακριβή, χωρίς σημαντικές βελτιώσεις. Τον Απρίλιο του 2001 βγήκε στην αγορά ένας 1.7 GHz Pentium 4, για πρώτη φορά φανερά υπέρτερος από τον Pentium II. Τον Αύγουστο του 2001 η Intel έβγαλε 1.9 – 2.0 GHz Pentium 4 ενώ παράλληλα προώθησε το 845 chipset, το οποίο αντικαθιστούσε την ακριβή RDRAM από την κατά πολύ φθηνότερη PC133 SDRAM. Αυτό είχε την άμεση αύξηση της δημοτικότητας και των πωλήσεων των Pentium 4 (**Εικόνα 43**).

⁸²<http://www.hardwaresecrets.com/wp-content/uploads/pentium4.png>



Εικόνα 43. Ο Pentium 4 τοποθετημένος σε μητρική⁸³.

2.8.3. Northwood

Τον Ιανουάριο του 2002 η Intel έβγαλε στην αγορά τους επεξεργαστές αυτούς σε τέσσερις επιλογές ταχύτητας: 1.6, 1.8, 2, 2.2 GHz, αυξάνοντας τόσο την L2 cache από 256 σε 512 KB, όσο και την πυκνότητα εκτύπωσης τρανζίστορ, μειώνοντας το μέγεθός του σε 130 nm και αυξάνοντας το πλήθος αυτών σε 55 εκατομμύρια (από 42). Τον ίδιο μήνα βγήκε στην αγορά το 845 chipset που υποστήριζε DDR SDRAM, διπλάσιου bandwidth της PC133 SDRAM.

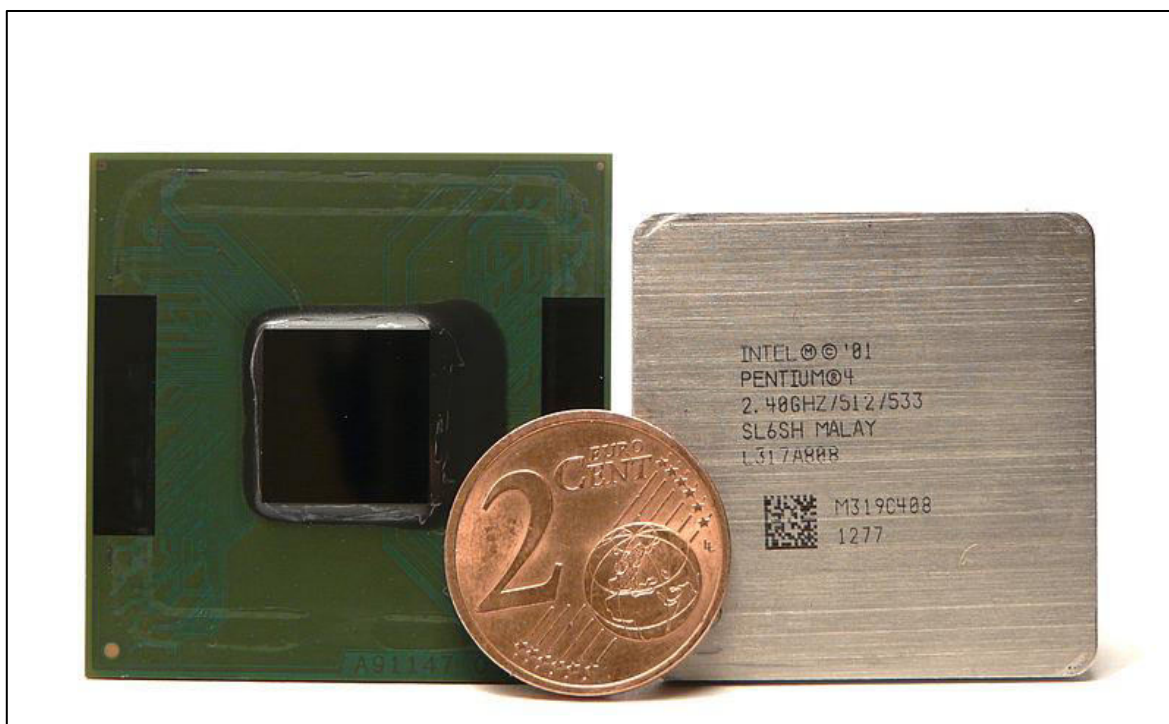
Τον Απρίλιο του 2002 βγήκε στην αγορά ο 2.4 GHz Pentium 4, στον οποίο υπήρχε αυξημένη ταχύτητα ροής δεδομένων στον FSB από 400MT/s σε 533MT/s (133 MHz συχνότητα ρολογιού bus), σταδιακά για τους 2.26, 2.4, 2.53, 2.66, 2.8 και 3.06 GHz που βγήκαν μέχρι το τέλος του έτους εκείνου.

Το 3.06 GHz Pentium 4 μοντέλο είχε ενεργοποιημένη την Hyper Threading Technology και αποτέλεσε την απαρχή των εικονικών επεξεργαστών (ή εικονικών πυρήνων), επιτρέποντας πολλαπλά νήματα εκτέλεσης να εκτελούνται ταυτόχρονα από τον ίδιο φυσικό επεξεργαστή. Έτσι χρησιμοποιούνταν περισσότερο οι πόροι του επεξεργαστή, που σε διαφορετική περίπτωση θα έμεναν αχρησιμοποίητοι. Ο αρχικός 3.06 GHz 533FSB

⁸³https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Pentium_4_1.5_GHz_Willamette_Socket_423.jpg

Pentium 4 Hyper-Threading enabled processor ήταν γνωστός και ως Pentium HT και βγήκε στην αγορά τον Νοέμβριο του 2002.

Τον Απρίλιο του 2003 βγήκε ο Pentium 4 HT με 800MT/s FSB (200 MHz physical clock), με συχνότητα ρολογιού επεξεργαστή 3 GHz, και HTT. Μέσα στο ίδιο έτος βγήκαν μοντέλα με συχνότητες 2.4, 2.6, 2.8 και 3.2 GHz, ενώ τον Φεβρουάριο του 2004 βγήκε η έκδοση Northwood στα 3.4 GHz (**Εικόνα 44**).



Εικόνα 44. Ο Pentium 4 και το συγκριτικό του μέγεθος⁸⁴.

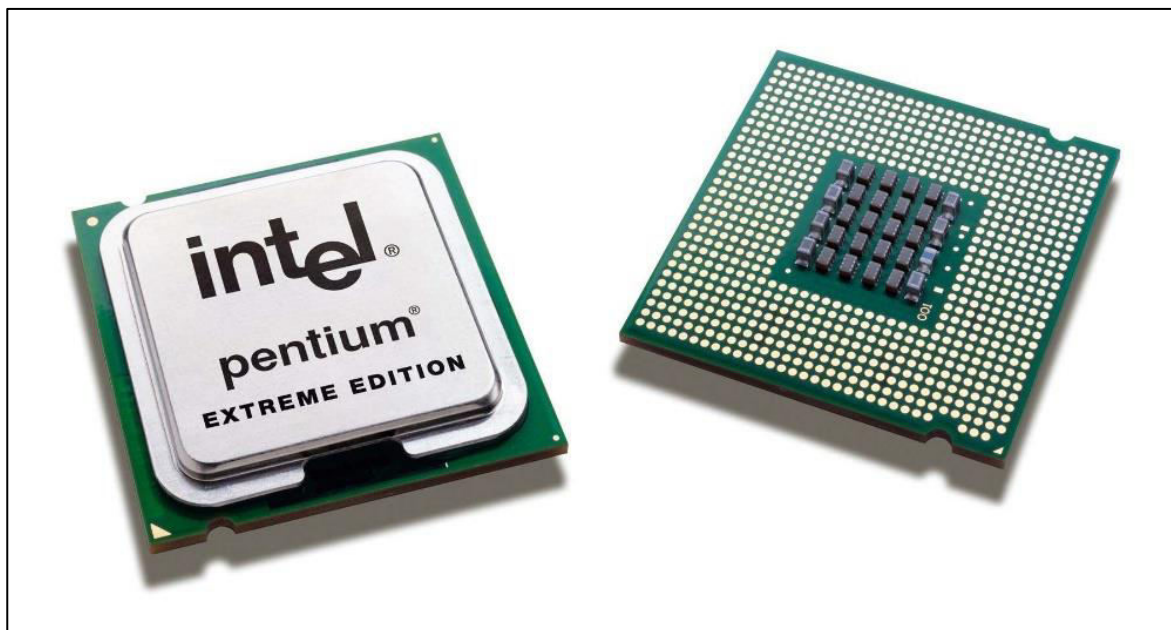
2.8.4. Gallatin-Extreme Edition

Τον Σεπτέμβριο του 2003 βγήκε στην αγορά ο Pentium 4 Extreme Edition. Ο σχεδιασμός ήταν σχεδόν ίδιος με τους προηγούμενους Pentium 4, αλλά είχε επιπλέον 2 MB L3 Cache, 800MT/s FSB. Το μοντέλο αυτό είχε αυξημένες επιδόσεις ικανοποιώντας ανάγκες gaming και εφαρμογών multimedia.

Τον Ιανουάριο του 2004 βγήκε μία έκδοση στα 3.4 GHz χρησιμοποιώντας αρχικά το Socket 478 και στην συνέχεια το Socket 775. Κατά το τέλος του έτους υπήρξε μία ελαφριά βελτίωση του μοντέλου λόγω της αύξησης της ταχύτητας του FSB στα 1066 MT/s και στα 3.46 GHz ρολόι επεξεργαστή. Στη συνέχεια βγήκε ο 3.73 GHz Extreme Edition, ο οποίος

⁸⁴https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pentium_4_Northwood_SL6SH.jpg

όμως δεν ήταν αποδοτικότερος από τον αντίστοιχο 3.46 GHz, με εξαίρεση την ικανότητα εκτέλεσης προγραμμάτων 64-bits (**Εικόνα 45**).



Εικόνα 45. Ο Pentium 4 Gallatin Extreme Edition⁸⁵.

2.8.5. Prescott

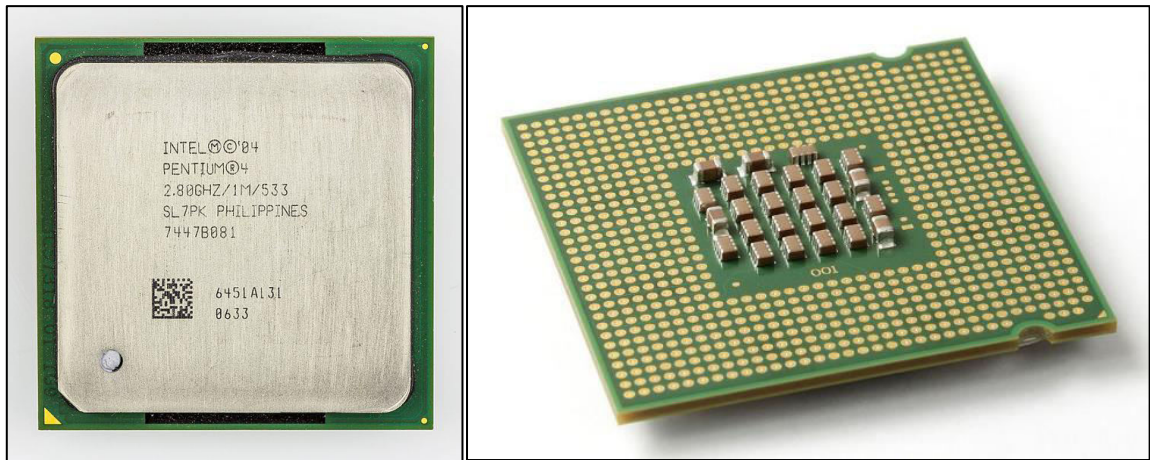
Βγήκε στην αγορά τον Φεβρουάριο του 2004, με πυκνότητα εκτύπωσης της τάξης των 90nm για πρώτη φορά. Παρόλα αυτά οι γενικές επιδόσεις δεν ήταν ξεκάθαρα βελτιωμένες. Κάποια προγράμματα επωφελούνταν από την διπλάσια cache και το SSE3 instruction set του Prescott, ενώ άλλα έτρεχαν χειρότερα λόγω του βαθύτερου pipeline. Η συχνότητα του επεξεργαστή ήταν ελαφρώς αυξημένη φτάνοντας στο αποκορύφωμα τα 3.8 GHz, αφού υπήρχε πρόβλημα κατανάλωσης ενέργειας και απαγωγής θερμότητας.

Το Prescott περιείχε 125 εκατομμύρια transistors και είχε επιφάνεια die 112 mm². Η Intel έβγαλε αρχικά δύο γραμμές Prescott: την E-series με 800MT/s FSB και Hyper Threading, η οποία ήταν αποδοτικότερη, και την A-series με 533MT/s FSB και απενεργοποιημένο το Hyper Threading.

Στις αρχές του 2005 βγήκε στην παραγωγή το Prescott 2M Extreme Edition, υποστηρίζοντας Intel 64, XD Bit, EIST (Enhanced Intel SpeedStep Technology), Tm2 ενώ είχε 2 MB L2 Cache. Παρόλα αυτά η μεγαλύτερη καθυστέρηση της L2, καθώς και το

⁸⁵http://i.nextmedia.com.au/Features/pentiumee_processor.jpg

διπλάσιο μέγεθος λέξης όταν χρησιμοποιούταν το mode Intel 64 ακύρωναν κάθε προτέρημα της νέας Cache. Τον Νοέμβριο του 2005 η Intel έβγαλε στην αγορά Prescott 2M επεξεργαστές με VT (Virtualization Technology).



Εικόνα 46. Ο Pentium 4 Prescott^{86,87}.

2.8.6. Cedar Mill

Η τελευταία έκδοση Pentium 4 ήταν η Cedar Mill και βγήκε στην αγορά τον Ιανουάριο του 2006. Αποτελούσε μία σμίκρυνση στο μέγεθος transistor στα 65 nm συγκριτικά με τους Prescott επεξεργαστές, χωρίς ιδιαίτερες διαφορές, παρέχοντας όμως αισθητά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Είχε ίδιο 31 σταδίων pipeline, 800MT/s FSB ταχύτητα ροής δεδομένων, Intel 64, Hyper Threading Technology, δίχως όμως Virtualization Technology. Είχε 2 MB L2 Cache και έβγανε σε συχνότητες 3 GHz με 3.6 GHz.

⁸⁶https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Pentium_4_2.80A-4014.jpg

⁸⁷https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_CPU_Pentium_4_640_Prescott_bottom.jpg



Εικόνα 47. Ο Pentium 4 Cedar Mill^{88,89}.

2.8.7. Core

Πρόκειται για την επόμενη γενιά μικροαρχιτεκτονικής της Intel μετά την NetBurst, η οποία βγήκε στην αγορά στις αρχές του 2006⁹⁰ (Εικόνα 48). Η γενιά αυτή αφορούσε επεξεργαστές που απευθύνονταν τόσο σε desktop όσο και σε mobile μηχανήματα, αλλά και σε servers, θέτοντας σε πρωταγωνιστικό ρόλο τους πολυπύρηνους επεξεργαστές. Πρόκειται για μία βελτίωση των παλαιότερων τεχνολογιών τόσο σε θέματα καθαρής επίδοσης (performance), όσο και σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας, μιας και τέθηκαν πλέον πρωτεύοντες όροι όπως performance-per-watt και energy efficiency. Αυτή η μικροαρχιτεκτονική επεκτείνει την φιλοσοφία του energy efficiency (ενεργειακή αποδοτικότητα) της Mobile μικροαρχιτεκτονικής που υπήρχε στους Intel Pentium M επεξεργαστές και την ενισχύει με πολλές καινούργιες καινοτομίες αλλά και με προεκτάσεις της NetBurst μικροαρχιτεκτονικής⁹¹. Επιπλέον δόθηκε μεγάλη έμφαση στην κλιμάκωση των διεργασιών πολυπύρηνων επεξεργαστών σε συνδυασμό πάντα με τις υψηλές επιδόσεις και την χαμηλή κατανάλωση.

⁸⁸ <https://89.img.avito.st/640x480/1302409889.jpg>

⁸⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_CPU_Pentium_4_640_Prescott_bottom.jpg

⁹⁰ [https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_Core_\(microarchitecture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_Core_(microarchitecture))

⁹¹ <http://bnrg.eecs.berkeley.edu/~randy/Courses/CS294.F07/IntelNewArchitecture.pdf>



Εικόνα 48. Ο λογότυπος της Intel για τον Pentium 4 Core⁹².

Πιο συγκεκριμένα η μικροαρχιτεκτονική αυτή εμπνεύστηκε από τον πολυπύρηνο επεξεργαστή Yonah, ο πρώτος πυκνότητας εκτύπωσης 65nm, ο οποίος θεωρείται επέκταση της P6 μικροαρχιτεκτονικής, παρότι αποτελούσε μέλος της Pentium M μικροαρχιτεκτονικής. Η Intel Core μικροαρχιτεκτονική ήρθε να αντικαταστήσει την NetBurst η οποία έδειχνε ανικανότητα να προσφέρει λύσεις στα θέματα κατανάλωσης και υπερβολικής παραγωγής θερμότητας, καθώς και στα όρια αύξησης της συχνότητας του ρολογιού, αλλά και λόγω του ανεπαρκούς έναντι των απαιτήσεων pipeline της. Η νέα αυτή μικροαρχιτεκτονική είχε τελείως διαφορετικό σχεδιασμό, προσφέροντας υψηλή αποδοτικότητα με ένα μικρού βάθους pipeline παρά με υψηλές συχνότητες ρολογιού. Η μικροαρχιτεκτονική Core ποτέ δεν έφτασε τις ταύτητες ρολογιού της NetBurst ακόμα και όταν έφτασε σε πυκνότητα εκτύπωσης (λιθογραφία) των 45 nm. Παρόλα αυτά μεταγενέστερες μικροαρχιτεκτονικές που στρίχθηκαν στην Core ξεπέρασαν τις συχνότητες της NetBurst, όπως για παράδειγμα η Devil's Canyon, κατά την οποία η βασική συχνότητα ήταν 4 GHz, ενώ η μέγιστη επιτυχής λειτουργικά κατά τα πειράματα ήταν η 4.4 GHz, με λιθογραφία στα 22 nm.

⁹²https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Core_2_Quad.png

ARCHITECTURE	INTEL CORE X86
L1 CACHE	64 KB per core
L2 CACHE	1 MB to 8MB unified
L3 CACHE	8 MB to 16 MB shared (Xeon)
MODEL	Celeron Series
CREATED	2006
TRANSISTORS	105M 65 nm (A1, M0)
INSTRUCTIONS	MMX
EXTENSIONS	x86-64, Intel 64 SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4
SOCKET(S)	Socket M (μPGA 478) Socket P (μPGA 478) Socket T (LGA 775) FCBGA (μBGA 479) FCBGA (μBGA 965)
PREDECESSOR	Enhanced Pentium M
SUCCESSOR	Penryn (tick) Nehalem (tock)

Πίνακας 20. Χαρακτηριστικά των Pentium 4 Core επεξεργαστών.

Οι πρώτοι επεξεργαστές της γενιάς είχαν τα ονόματα “Merom” (για mobile computing), “Conroe” (για Desktop Systems) και “Woodcrest” (για servers και workstations). Παρότι αυτοί οι τρεις επεξεργαστές ήταν πανομοιότυποι από αρχιτεκτονική σκοπιά, διέφεραν στο κύκλωμα στο οποίο εφαρμόζονταν (sockets), στις ταχύτητες bus, αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας. Οι συνηθισμένοι επεξεργαστές που βασίστηκαν στην αρχιτεκτονική αυτή ονομάζονταν στην αγορά Pentium Dual-Core ή Pentium, ενώ οι αντίστοιχοι χαμηλότερων επιδόσεων ονομάζονταν Celeron. Οι αντίστοιχοι server ή workstation επεξεργαστές ονομάστηκαν Xeon. Οι πρώτοι 64 bit desktop και mobile επεξεργαστές της Core μικροαρχιτεκτονικής ονομάστηκαν Core 2.

Αξίζει να σημειωθεί πως η κύρια ιδέα του Performance έχει να κάνει τόσο με την συχνότητα του ρολογιού του επεξεργαστή όσο και με τις ολοκληρωθείσες εντολές ανά κύκλο ρολογιού, το οποίο περιγράφεται ως:

$Performance = Frequency \times Instructions\ Per\ Cycle\ (IPC)$, **Εξίσωση 3.**

Ιδανικά για να αυξηθεί το performance πρέπει να αυξηθούν και οι δύο μεταβλητές της συναρτησης αυτής. Παρόλα αυτά η γενιά αυτή εστίασε περισσότερο στην αύξηση του IPC διατηρώντας σχεδόν σταθερό το Frequency συγκριτικά με την προηγούμενη γενιά.

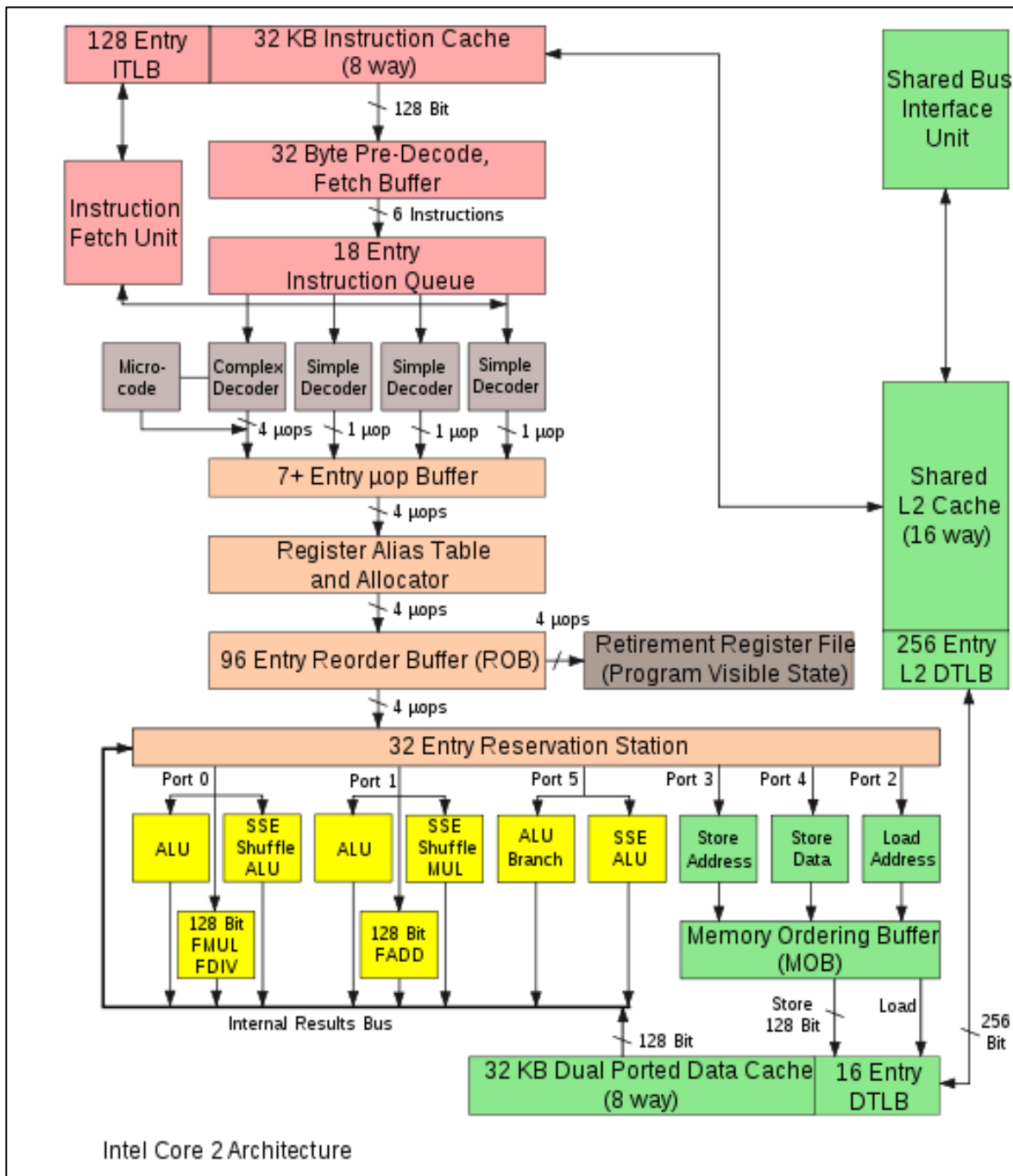
Επιπλέον η αύξηση των επιδόσεων μπορεί να επιτευχθεί με την μείωση των εντολών που χρειάζονται να πραγματοποιηθούν για να ολοκληρωθεί μία διεργασία. Η τεχνική Single Instruction Multiple Data (SIMD) είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για αυτόν ακριβώς τον λόγο. Πρωτοεφαρμόστηκε σε εντολές ακεραίων 64 bit το 1996 στον επεξεργαστή Intel Pentium με τεχνολογία MMX και στην συνέχεια εμφανίστηκε σε πράξεις floating point (κινητής υποδιαστολής) μονής ακρίβειας 128 bit SIMD, αλλά και σε Streaming SIMD Extensions (SSE) στον Pentium III καθώς και SSE2 και SSE3 σε επόμενες γενιές.

Μία άλλη καινοτόμα τεχνικής που εισήγαγε η Intel στην Core γενιά ήταν η microfusion. Αυτή συνδύαζε πολλές συνηθισμένες micro-operations (micro-ops, uops, εσωτερικές εντολές του επεξεργαστή) μέσα σε μία micro-op, οπότε έτσι μειωνόταν ο συνολικός αριθμός των μικροεντολών που χρειαζόταν να εκτελεστούν για μία συγκεκριμένη διεργασία.

Επιπροσθέτως στην προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας η Ίντελ άρχισε να λαμβάνει υπόψιν την ενέργεια που θα κατανάλωνε ένας επεξεργαστής για να ολοκληρώσει ένα συγκεκριμένο task. Εδώ η κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται με την δυναμική χωρητικότητα (η αναλογία του ηλεκτροστατικού φορτίου σε έναν αγωγό προς την διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών που απαιτείται για την διατήρηση του φορτίου) που απαιτείται για την διατήρηση της αποδοτικότητας της IPC, επί το τετράγωνο της τάσης που παρέχεται στα transistors και στους I/O Buffers επί την συχνότητα αλλαγής των transistors και των σημάτων. Ως συνάρτηση αυτό θα μπορούσε να εκφραστεί ως:

$Power = Dynamic\ Capacitance \times Voltage^2 \times Frequency$, **Εξίσωση 4.**

Λαμβάνοντας υπόψιν αυτή την συνάρτηση κατανάλωσης ισχύος σε συνδυασμό με την συνάρτηση επίδοσης (προηγούμενη) οι σχεδιαστές ισορρόπησαν προσεκτικά την IPC Efficiency με το Dynamic Capacitance σε συνδυασμό με την παρεχόμενη τάση και την συχνότητα, ώστε να βελτιστοποιήσουν κατά το δυνατόν τον συνδυασμό αυτών των βασικών στόχων στην μικροαρχιτεκτονική Core: Performance + Power Consumption, αυξάνοντας τον λόγο Performance Per Wat (**Εικόνα 49**).



Εικόνα 49. Η μικροαρχιτεκτονική του Intel Core⁹³.

2.8.8. Χαρακτηριστικά της Intel Core Μικροαρχιτεκτονικής

Το πρώτο χαρακτηριστικό αυτής της γενιάς είναι ότι επέστρεψε σε χαμηλότερες συχνότητες ρολογιού αλλά με βελτιωμένη χρήση των διαθέσιμων κύκλων ρολογιού και της κατανάλωσης ενέργειας συγκριτικά με την NetBurst μικροαρχιτεκτονική. Παρείχε πιο αποδοτικά στάδια decoding (αποκωδικοποίησης της εισερχόμενης στον επεξεργαστή

⁹³https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/Intel_Core2_arch.svg

εντολής), αποδοτικότερες μονάδες επεξεργασίας, caches, και buses, μειώνοντας την κατανάλωση των Core 2 επεξεργαστών και ταυτόχρονα αυξάνοντας την επεξεργαστική τους δύναμη.

Όπως και οι επεξεργαστές NetBurst οι Core επεξεργαστές υποστηρίζουν πολλαπλούς πυρήνες και hardware virtualization (Intel VT-x), καθώς και Intel 64 και SSSE3. Παρόλα αυτά οι Core επεξεργαστές δεν είχαν την Hyper Threading Technology που είχαν οι Pentium 4. Αυτό συμβαίνει διότι η Core Μικροαρχιτεκτονική αποτελεί απόγονο της P6 που χρησιμοποιούσαν οι επεξεργαστές Pentium Pro, Pentium II, Pentium III και Pentium M.

Το μέγεθος της L1 Cache μνήμης αυξήθηκε από 32 KB στους Pentium II/III (16 KB L1 Data + 16 KB L1 Instruction) σε 64 KB L1 Cache/Core (32 KB L1 Data + 32 KB L1 Instruction) στους Pentium M αλλά και στους Core/Core 2. Επίσης δεν υπάρχει L3 cache με εξαίρεση τα Xeon Core μοντέλα. Τόσο η L3 Cache, όσο και το Hyper Threading επανήλθε στην επόμενη μικροαρχιτεκτονική ονόματι Nehalem. Παρακάτω θα αναφερθούν κάποια από τα καινοτόμα χαρακτηριστικά αυτής της γενιάς.

2.8.8.1. Intel Wide Dynamic Execution

Πρόκειται για έναν συνδυασμό τεχνικών (data flow analysis, speculative execution, out-of-order execution και superscalar (=ανάλυση ροής δεδομένων, υποθετική εκτέλεση, εκτέλεση εκτός σειράς, υπερκλιμάκωση)), τα οποία είχαν πρωτοεισηχθεί στην μικροαρχιτεκτονική P6 της Ίντελ (βλ. και προαναφερθέντα). Στην γενιά NetBurst η Intel είχε δημιουργήσει την Advanced Dynamic Execution engine, μία υψηλού βάθους (σε αρμονία με το υψηλό βάθος pipeline της γενιάς), out-of-order μηχανή υποθετικής εκτέλεσης, σχεδιασμένη έτσι ώστε οι μονάδες εκτέλεσης του επεξεργαστή να συνεχίζουν αδιάκοπα να εκτελούν εντολές. Στην γενιά NetBurst υπήρχε επίσης ένας ενισχυμένος αλγόριθμος πρόβλεψης διακλάδωσης (branch prediction algorithm) για την μείωση των λάθος προβλέψεων (mispredictions).

Όλα αυτά τα προτερήματα ενισχύθηκαν από το Wide Dynamic Execution, το οποίο επέτρεπε το πέρασμα περισσότερων εντολών ανά κύκλο ρολογιού. Κάθε πυρήνας εκτέλεσης ήταν ευρύτερος επιτρέποντας σε κάθε πυρήνα να φέρνει, αποκωδικοποιεί, εκτελεί κι επιστρέφει έως και 4 πλήρεις εντολές ταυτοχρόνως (οι Mobile και NetBurst μικροαρχιτεκτονικές επέτρεπαν την διαχείριση το πολύ τριών εντολών κάθε φορά). Στην

τεχνολογία αυτή ενσωματώθηκαν ακριβέστεροι Branch predictors, βαθύτεροι Instruction buffers αλλά και άλλες τεχνικές που μείωσαν τον χρόνο εκτέλεσης.

Μία τέτοια τεχνική αυτής της τεχνολογίας ήταν και το macrofusion. Σε προηγούμενες γενιές κάθε εισερχόμενη εντολή αποκωδικοποιούταν και εκτελούνταν μεμονομένα. Με την τεχνική macrofusion δόθηκε η δυνατότητα να συνδυαστούν συσχετιζόμενες νοηματικά εντολές (όπως για παράδειγμα μία εντολή σύγκρισης με μία εντολή απόφασης διακλάδωσης υπό συνθήκη) σε μία εσωτερική εντολή, την micro-op, κατά το στάδιο decoding (αποκωδικοποίησης). Δύο εντολές μπορούν έτσι να εκτελεστούν ως μία micro-op μειώνοντας έτσι τον συνολικό όγκο εργασίας που πρέπει να κάνει ο επεξεργαστής και κατ' επέκταση αυξάνοντας το πλήθος των εντολών που μπορούν να έρθουν σε πέρας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (ή αντιστρόφως σκεπτόμενοι μειώνοντας τον χρόνο εκτέλεσης ενός συνόλου εντολών). Επίσης στην τεχνολογία αυτή της Core μικροαρχιτεκτονικής συμπεριλαμβάνεται και μία ενισχυμένη ALU (Αριθμητική και Λογική Μονάδα), η οποία υποστήριζε το macrofusion.

Στη γενιά αυτή επίσης ενισχύθηκε το Micro-Op Fusion, αυξάνοντας τις επιδόσεις και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, ιδέα η οποία πρωτοεισήχθη στους Pentium M επεξεργαστές. Στους επεξεργαστές της Core εποχής οι x86 εντολές ενός προγράμματος (macro-ops) αναλύονταν σε μικρότερα κομμάτια (επιμέρους εντολές), ονομαζόμενες ως micro-ops πριν σταλούν στο pipeline του επεξεργαστή προς επεξεργασία. Η τεχνική Micro-Op Fusion, όπως υπονοεί και το όνομά της, συγχώνευε micro-ops που έρχονταν από την ίδια macro-op, με σκοπό την μείωση των micro-ops που χρειαζόνταν συνολικά να εκτελεστούν μέχρι και κατά 10%, αυξάνοντας έτσι τις επιδόσεις του συστήματος.

2.8.8.2. Intel Intelligent Power Capability

Το χαρακτηριστικό αυτό αφορά σε ένα σύνολο δυνατοτήτων σχεδιασμένων να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Αυτό το χαρακτηριστικό διαχειρίζεται την κατά την κτέλεση κατανάλωση ισχύος όλων των πυρήνων του επεξεργαστή. Συμπεριλάμβανε μία προηγμένη δυνατότητα αντιστάθμισης ισχύος που επέτρεπε τον λογικό έλεγχο υποσυστημάτων μεμονομένων λογικών επεξεργαστών, ενεργοποιώντας τα μόνο εάν και όταν αυτά χρειαζόνταν. Επιπλέον πολλά buses και agrays χωρίζονται ώστε τα δεδομένα που απαιτούνται σε συγκεκριμένα modes λειτουργιών να μπορούν να τοποθετηθούν σε χαμηλής ενέργειας κατάσταση όταν δεν χρειάζονται. Έτσι επιτεύχθηκε η εξοικονόμηση ενέργειας με έξυπνο τρόπο, ώστε να συμβαίνει όταν

πραγματικά είναι εφικτό, χωρίς να προκύπτει αστάθεια ή μη απόκριση των προγραμμάτων που εκτελούνταν, τουλάχιστον σύμφωνα με την Intel.

2.8.8.3. Intel Advanced Smart Cache

Αυτή η τεχνολογία αφορά στην βελτιωμένη πολυπύρηνη Cache η οποία βελτιώνει την επίδοση και την αποδοτικότητα του συστήματος αυξάνοντας την πιθανότητα κάθε πυρήνας εκτέλεσης του διπύρηνου Core επεξεργαστή να βρει τα δεδομένα που χρειάζεται με την βοήθεια ενός cache υποσυστήματος. Για να το πετύχει αυτό η Intel έδωσε την δυνατότητα από κοινού χρήσης της L2 Cache μεταξύ των πυρήνων. Έτσι η απόδοση ενός παραλληλοποιήσιμου κώδικα αυξάνεται, αφού χρησιμοποιεί πρόσβαση στα ίδια δεδομένα, μειώνοντας έτσι τις χρονοβόρες προσβάσεις σε ανώτερα (πιο μακριά χρονικά) επίπεδα μνήμης και αυξάνοντας το Hit-Miss ratio (διαθεσιμότητα σε κοντινή μνήμη cache των απαιτούμενων δεδομένων).

2.8.8.4. Intel Smart Memory Access

Η τεχνική αυτή βελτίωσε την απόδοση του υπολογιστικού συστήματος βελτιστοποιώντας την χρήση του διαθέσιμου εύρους δεδομένων από το υποσύστημα μνήμης, “κρύβοντας” τις καθυστερήσεις λόγω πρόσβασης σε ανώτερα επίπεδα μνήμης (RAM). Ο στόχος αυτής της τεχνικής ήταν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που έρχονται από την κύρια μνήμη το γρηγορότερο δυνατό και τα δεδομένα να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά όταν χρειάζονται προς επεξεργασία.

Σε αυτήν την προσπάθεια εισήχθησε η δυνατότητα που ονομάστηκε memory disambiguation (αποσαφήνιση μνήμης), η οποία αύξησε την αποδοτικότητα της out-of-order επεξεργασίας, παρέχοντας την δυνατότητα στους πυρήνες επεξεργασίας να φορτώνουν δεδομένα σε cache υποθετικώς, προτού δηλαδή αυτά να χρειαστούν από τις ήδη αποθηκευμένες εντολές. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό αυτό θα πρέπει να σκεφτούμε πώς λειτουργούν οι out-of-order μικροεπεξεργαστές.

Σε φυσιολογικές συνθήκες όταν ένας 000 μικροεπεξεργαστής ανακατατάσσει τις εντολές, μπορεί να επαναπρογραμματίσει φορτώσεις (loads) πριν από αποθηκεύσεις (stores), αφού δεν γνωρίζει εάν υπάρχουν data location dependencies (εξαρτήσεις δεδομένων) που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα συνέπειας του εκτελέσιμου κώδικα. Παρόλα αυτά σε πολλές περιπτώσεις οι φορτώσεις δεν εξαρτώνται από προηγούμενες αποθηκεύσεις και πραγματικά μπορούν να πραγματοποιηθούν εκ των προτέρων, βελτιώνοντας έτσι την

αποδοτικότητα. Το πρόβλημα σε αυτό είναι η αναγνώριση τέτοιου είδους φορτώσεων έναντι εκείνων που πρέπει για λόγους συνέπεια να υποστούν καθυστέρηση.

Η τεχνική memory disambiguation χρησιμοποίησε ευφυείς αλγορίθμους προς αξιολόγηση εάν μία φόρτωση μπορεί να εκτελεστεί πριν από προηγούμενο κατά σειρά κώδικα store. Εάν λοιπόν προβλεφθεί ότι μπορεί να γίνει τότε οι εντολές φόρτωσης προγραμματίζονται (scheduled) πριν τις εντολές αποθήκευσης, επιτρέποντας την υψηλότερη δυνατή παραλληλοποίηση σε επίπεδο εντολής. Εάν η υποθετική φόρτωση καταλήξει να είναι ορθή τότε ο επεξεργαστής καταναλώνει λιγότερο χρόνο προς αναμονή του δεδομένου έχοντας σαν αποτέλεσμα την γρηγορότερη εκτέλεση και την αποδοτικότερη χρήση των πόρων επεξεργασίας. Εάν στην σπάνια περίπτωση προκύψει ότι η φόρτωση δεν έπρεπε να πραγματοποιηθεί τότε το σύστημα memory disambiguation εντοπίζει το conflict, επαναφορτώνει τα σωστά δεδομένα και επανετελεί την εντολή.

Επιπροσθέτως αυτού του συστήματος το Intel Smart Memory Access συμπεριλάμβανε και προηγμένους προφορτωτές (advanced prefetchers). Η δουλειά αυτών είναι η εκ των προτέρων μεταφορά των δεδομένων μνήμης προτού αυτά ζητηθούν, έτσι ώστε να τοποθετηθούν στην Cache Μνήμη και να είναι άμεσα προσβάσιμα όταν χρειαστούν. Έτσι αυξάνονται οι προσβάσεις στην Cache έναντι των προσβάσεων στην κύρια μνήμη, μειώνοντας έτσι καθυστερήσεις πρόσβασης δεδομένων και άρα αυξάνοντας τις επιδόσεις του συστήματος.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο prefetchers ανά L1 Cache μνήμη και δύο prefetchers ανά L2 Cache μνήμη, οι οποίοι ανιχνεύουν πολλαπλά μοτίβα πρόσβασης δεδομένων ταυτοχρόνως, επιτρέποντας την ορθή προφόρτωση.

Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων τεχνικών είχε σαν αποτέλεσμα το βελτιωμένο execution throughput μεγιστοποιώντας την χρήση του διαθέσιμου system-bus-bandwidth (εύρος ροής δεδομένων στις αρτηρίες δεδομένων) και “κρύβοντας” τις τυχούσες καθυστερήσεις.

2.8.8.5. Intel Advanced Digital Media Boost

Το χαρακτηριστικό αυτό βελτίωνε σημαντικά τις επιδόσεις του συστήματος όταν εκτελούνταν εντολές Streaming SIMD Extension (SSE). Οι εντολές 128-bit SIMD ακεραίων αριθμών αλλά και 128-bit SIMD κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας

μείωναν τον συνολικό χρόνο εκτέλεσης που χρειαζόταν ένα συγκεκριμένο task προγράμματος και ως εκ τούτου βελτίωναν την συνολική επίδοση. Αυτές οι εντολές επιτάχυναν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών επεξεργασίας video, ομιλίας, εικόνας αλλά και επεξεργασίας φωτογραφίας, κρυπτογραφίας, οικονομικών, engineering και επιστημονικών εφαρμογών. Οι SSE εντολές ενίσχυαν τις αρχιτεκτονικές της Ίντελ επιτρέποντας στους προγραμματιστές να αναπτύσσουν αλγορίθμους που αναμιγνύουν αριθμούς απλής ακρίβειας, κινητής υποδιαστολής αλλά και ακεραίου χρησιμοποιώντας και SSE αλλά και MMX εντολές.

Σε παλαιότερες γενιές επεξεργαστών, οι 128-bit SSE, SSE2, SSE3 εντολές εκτελούνταν με τον σταθερό ρυθμό της μίας πλήρης εντολής κάθε δύο κύκλους. Το χαρακτηριστικό Intel®Advanced Digital Media Boost επέτρεψε σε αυτές τις 128-bit εντολές να εκτελούνται πλήρως σε ρυθμό μίας κάθε κύκλο ρολογιού, αυξάνοντας έτσι το συνολικό IPC αυτής της γενιάς επεξεργαστών. Αυτή η τεχνική ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές multimedia (graphics, video, audio) αλλά και άλλες εφαρμογές με πλούσια data sets που χρησιμοποιούσαν SSE, SSE2, SSE3 εντολές.

2.8.9. Επεξεργαστές Αρχιτεκτονικής Core

Οι επεξεργαστές αυτής της αρχιτεκτονικής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν από το πλήθος των πυρήνων, το μέγεθος των Cache μνημών και το socket. Κάθε συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών έχει ένα μοναδικό κωδικό όνομα και κωδικό προϊόντος που χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες επωνυμίες. Για παράδειγμα το όνομα “Allendale” με κωδικό προϊόντος 80557 είχε δύο πυρήνες, 2 MB L2 Cache και desktop socket 775, αλλά στην αγορά λανσαρίστηκε ως Celeron, Pentium, Core 2 και Xeon, έχοντας ενεργοποιημένα διαφορετικά σύνολα χαρακτηριστικών κάθε φορά (παρότι πρόκειται για το ίδιο chip). Οι περισσότεροι mobile και desktop επεξεργαστές έβγαιναν σε δύο παραλλαγές που δέφεραν στο μέγεθος της L2 Cache, αλλά και συγκεκριμένα ποσά μνήμης L2 σε ένα προϊόν μπορούσαν επίσης να μειωθούν απενεργοποιώντας κάποια μέρη στο chip κατά τον χρόνο παραγωγής. Το Wolfdale-DP και όλοι οι τετραπύρηνοι επεξεργαστές, με εξαίρεση τον Dunnington QC παράγονταν σε πολυκυκλωματικά modules δύο πλακών εκτύπωσης (dies) (Πίνακας 21).

	Mobile		Desktop, UP Server		CL Server	DP server	MP server
Μονοπύρηνιο 65 nm	Merom-L 8053		Conroe-L 80557				
Μονοπύρηνιο 45 nm		Penryn-L 80585				Woldale-CL 80588	
Διπύρηνιο 65 nm	Merom-2M 80537	Merom 80537	Allendale 80557	Conroe 80557	Conroe-CL 80556	Woodcrest 80556	Tigerton-DC 80564
Διπύρηνιο 45 nm	Penryn-3M 80577	Penryn 80576	Wolfdale-3M 80571	Wolfdale 80570	Wolfdale-CL 80588	Wolfdale-DP 80573	
Τετραπύρηνιο 65 nm				Kentsfield 80562		Clovertown 80563	Tigerton 80565
Τετραπύρηνιο 45 nm		Penryn-QC 80581	Yorkfield-6M 80580	Yorkfield 80569	Yorkfield-CL 80584	Harpertown 80574	Dunnington QC 80583
Εξαπύρηνιο 45 nm							Dunnington 80582

Πίνακας 21. Οι επεξεργαστές αρχιτεκτονικής Pentium 4 Core.

2.8.10. Intel Core 2

Ο κύριος επεξεργαστής αυτής της γενιάς λανσαρίστηκε με το όνομα σειράς Core 2 (Εικόνα 50). Πρόκειται για επεξεργαστές ενός, δύο ή και τεσσάρων πυρήνων σχεδιασμένων σύμφωνα με την αρχιτεκτονική Core. Οι επεξεργαστές ενός ή δύο πυρήνων βρίσκονταν σε μία πλάκα εκτύπωσης (single die), ενώ οι τετραπύρηνιοι βρίσκονταν σε δύο, κάθε μία από τις οποίες περιείχε δύο πυρήνες, συσκευασμένες σε ένα πολυκυκλωματικό module. Η παρουσία των Core 2 επεξεργαστών υποβίβασε το brand Pentium στην μέση αγορά και επανένωσε τις γραμμές επεξεργαστών Laptop και Desktop για λόγους marketin, κάτω από το ίδιο όνομα προϊόντος, που πριν διαχωριζόταν σε Pentium 4, Pentium D και Pentium M brands⁹⁴.



Εικόνα 50. Ο λογότυπος της Intel για τον επεξεργαστή Intel Core 2⁹⁵.

⁹⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_Core_2

⁹⁵https://en.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Core2_Duo2009.svg

Η ονομασία (brand name) Core 2 εισήχθησε στην αγορά στις 27 Ιουλίου του 2006, περιλαμβάνοντας τις Solo (single-core), Duo (dual-core) και Quad (quad-core) εκδόσεις (μονοπύρηνος, διπύρηνος και τετραπύρηνος επεξεργαστής αντίστοιχα), ενώ το 2007 προέκυψαν οι Extreme εκδόσεις (dual- ή quad-core επεξεργαστές). Επίσης σχεδιάστηκαν εκδόσεις με στόχο τις εταιρικές χρήσεις που είχαν vPro τεχνολογία⁹⁶, συμπεριλαμβανμένων διπύρηνων και τετραπύρηνων επεξεργαστών (**Πίνακας 22**).

INTEL CORE 2 ARCHITECTURE CORE	
ΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	2006 – 2011
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΡΟΛΟΓΙΟΥ	1.06 GHz – 3.33 GHz
FSB SPEEDS	800 MT/s – 1600 MT/s
TRANSISTORS	65 nm to 45 nm
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ	x86, x86-64, SSE4.1 (45 nm επεξεργαστές)
ΜΙΚΡΟΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	Core
ΠΛΗΘΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ	1, 2 ή 4 (2x2)
SOCKETS	Socket T (LGA 775) Socket M (μPGA 478) Socket P (μPGA 478) Micro-FCBGA (μBGA 479) Micro-FCBGA (μBGA 965)
ΠΡΟΚΑΤΟΧΟΣ	Pentium D, Pentium M, Pentium 4
ΔΙΑΔΟΧΟΣ	Core i3, i5, i7
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ	Allendale, Conroe, Conroe-L, Merom-2M, Merom, Merom-L, Kentsfield, Wolfdale, Yorkfield, Penryn

Πίνακας 22. Τα χαρακτηριστικά των επεξεργαστών Pentium 4 Core 2.

⁹⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_vPro

2.9. 5^η Υπολογιστών 2010-Τεχνητή Νοημοσύνη

Πλέον οι υπολογιστές έχουν περάσει σε ένα φοβερό επίπεδο υπολογιστικής ισχύος, ενώ παράλληλα οι επιστήμες που μπορεί να σχετίζονται με αυτούς αναπτύσσονται ραγδαία. Έννοιες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη⁹⁷, η μηχανική μάθηση⁹⁸, τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα⁹⁹ και η επαυξημένη πραγματικότητα¹⁰⁰ αποτελούν ένα μόνο μέρος του εύρους της εξέλιξης που συνεπάγεται η ύπαρξη αυτής της γενιάς (Εικόνα 51, Εικόνα 52).



Εικόνα 51. Τεχνητή νοημοσύνη¹⁰¹.

Η δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας τεράστιου όγκου δεδομένων σε συνδυασμό με αυτήν την μεγάλη υπολογιστική ισχύ, όχι μόνο έχει αλλάξει τον τρόπο ζωής στις εξελιγμένες χώρες, παρέχοντας ένα φοβερό εργαλείο στην τεχνολογία, την έρευνα και τις επιστήμες γενικότερα, αλλά έχει δώσει την δυνατότητα προσομοίωσης της ευφυίας σε τέτοιο βαθμό που τίθενται ερωτήματα περί συνείδησης, τόσο στα επιστημονικά φόρα, όσο και στις ταινίες επιστημονικής φαντασίας, καλύπτοντας σενάρια που δεν φαίνονται πια και τόσο εξωπραγματικά.

Σήμερα χρησιμοποιούνται ήδη εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης γενικότερα, όπως αυτή της αναγνώρισης φωνής και μελωδίας, της πρόβλεψης αποτελεσμάτων αναζήτησης στο διαδίκτυο¹⁰², της κρυπτογραφίας¹⁰³, της ανάλυσης

⁹⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence

⁹⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning

⁹⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network

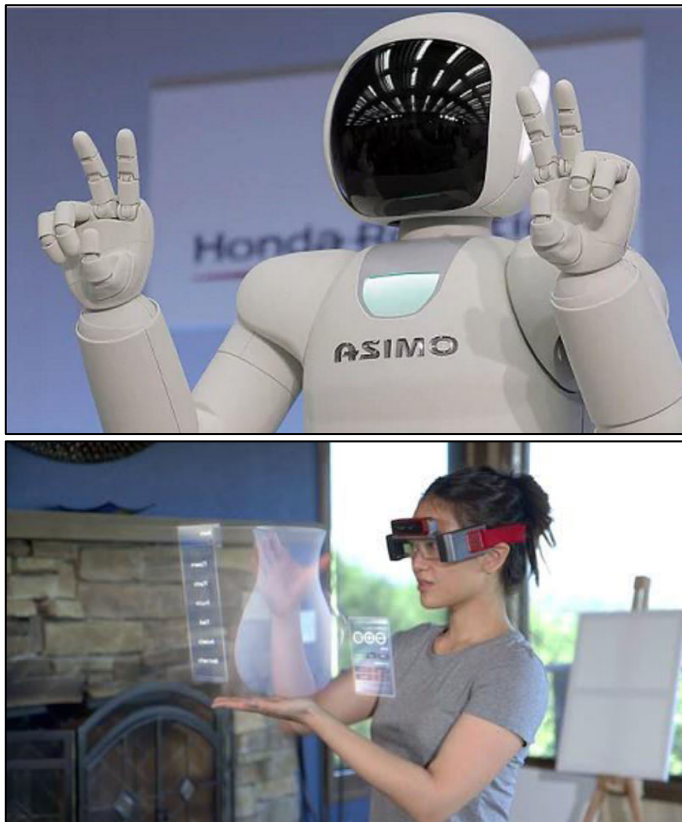
¹⁰⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality

¹⁰¹[http://www.techiwarehouse.com/engine/a7ad8fdd/Sixth-Generation-of-Computers-\(Artificial-Intelligence\)](http://www.techiwarehouse.com/engine/a7ad8fdd/Sixth-Generation-of-Computers-(Artificial-Intelligence))

¹⁰²<http://searchengineland.com/meet-rankbrain-google-search-results-234386>

¹⁰³<http://arstechnica.com/information-technology/2016/10/google-ai-neural-network-cryptography/>

μεγάλου όγκου δεδομένων (big data analysis) και της όρασης υπολογιστών¹⁰⁴. Πλέον συζητούμε για υπερυπολογιστές χιλιάδων ή και εκατομμυρίων πυρήνων, για μεγέθη transistors που έχουν φτάσει σε επίπεδο που τα άτομα και τα μόρια είναι συγκρίσιμων μεγεθών (1nm), αλλά και για κβαντικούς υπολογιστές, μοριακή και νανο τεχνολογία. Η ουσία της γενιάς των υπολογιστών αυτών είναι η δημιουργία μηχανών που να μπορούν να επεξεργαστούν και να αποκριθούν στην φυσική γλώσσα, να αποκτήσουν γνώση μετά από στάδια εκπαίδευσης (ή και να επιλέξουν την γνώση που χρειάζονται), να οργανώσουν τον εαυτό τους και πολλά άλλα¹⁰⁵.



Εικόνα 52. Τεχνητή νοημοσύνη II¹⁰⁶.

Αξίζει να σημειωθεί πως το 2013 η ανθρωπότητα έσπασε το φράγμα του ενός εκατομμυρίου υπολογιστικών πυρήνων σε υπερυπολογιστή¹⁰⁷, ενώ το 2016 ξεπέρασε τα 10 εκατομμύρια πυρήνες, με αντίστοιχο RMax στα 93.014 PFlop/s (Εικόνα 53)

¹⁰⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_vision

¹⁰⁵<http://btob.co.nz/features/five-generations-computers/>

¹⁰⁶[http://www.techiwarehouse.com/engine/a7ad8fdd/Sixth-Generation-of-Computers-\(Artificial-Intelligence\)](http://www.techiwarehouse.com/engine/a7ad8fdd/Sixth-Generation-of-Computers-(Artificial-Intelligence))

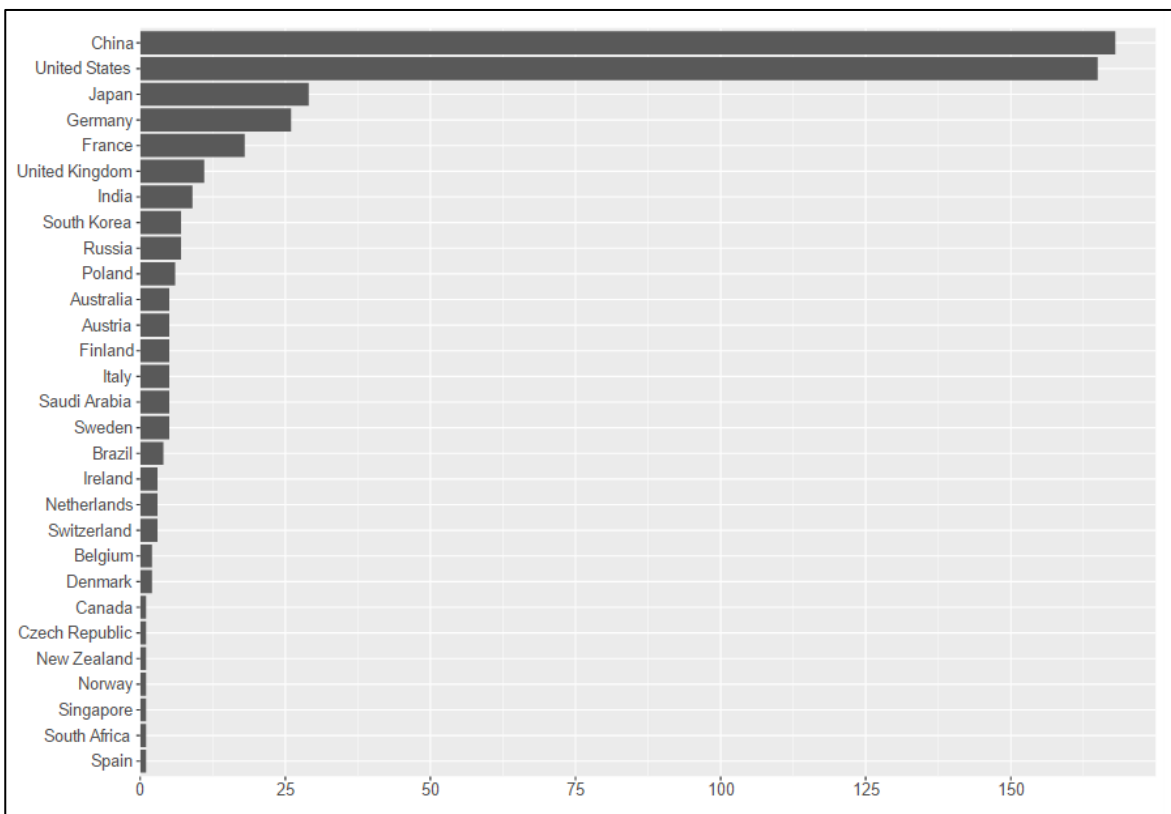
¹⁰⁷<https://www.extremetech.com/extreme/146967-stanford-breaks-million-core-supercomputing-barrier2>

(PFlop/s= 10^{15} floating-point operations per second – πράξεις αριθμών κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο)^{108,109}.



Εικόνα 53. Sunway TaihuLight-Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway¹¹⁰.

Η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αποτελούν με μεγάλη διαφορά τους πρωταγωνιστές στον χώρο των υπερυπολογιστών σήμερα (**Εικόνα 54**).



Εικόνα 54. Κατανομή των 500 δυνατότερων υπερυπολογιστών ανά κράτος το έτος 2016¹¹¹.

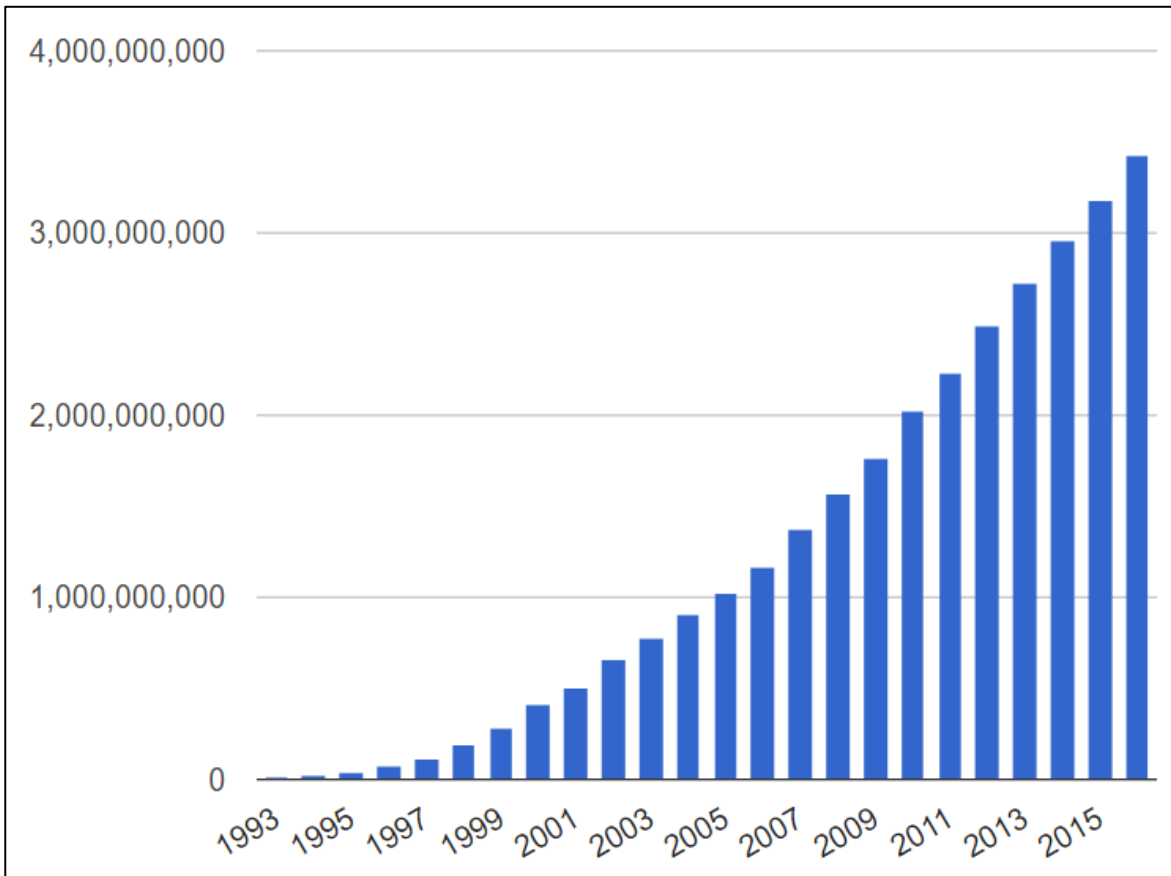
¹⁰⁸<https://en.wikipedia.org/wiki/FLOPS>

¹⁰⁹https://en.wikipedia.org/wiki/TOP500#Top_10_ranking

¹¹⁰<https://www.nextplatform.com/wp-content/uploads/2016/06/sunwayDetails.png>

¹¹¹https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/TOP500_Supercomputers_by_Country_June_2016.svg

Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως σήμερα περισσότερο από το 40% του ανθρώπινου πληθυσμού έχει σύνδεση στο Internet, με 3.5 δισεκατομμύρια χρήστες. Το 1995 το αντίστοιχο ποσοστό ήταν στο 1%, ενώ το πρώτο δισεκατομμύριο χρηστών επήλθε το 2005. Το δεύτερο δισεκατομμύριο το 2010, ενώ το τρίτο δισεκατομμύριο το 2014. Σήμερα το 48% των χρηστών αυτών βρίσκεται στην Ασία, το 22% στην Αμερική, το 19% στην Ευρώπη, το 10% στην Αφρική και το 1% στην Ωκεανία (**Εικόνα 55**).



Εικόνα 55. Πλήθος ανθρώπων με πρόσβαση στο Ίντερνετ ανά έτος¹¹².

¹¹²<http://www.internetlivestats.com/internet-users/>

3. ΚΑΡΤΕΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ (GRAPHICS CARDS)

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του συγκεκριμένου έργου είναι η επεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων από κάρτες γραφικών. Σε αριθμητικές πράξεις και σε ανάλυση δεδομένων (μεγάλου όγκου – big data) οι κάρτες γραφικών είναι ιδιαίτερα δυνατές επεξεργαστικές μονάδες, μιας και μπορούν να εκτελέσουν εξαιρετικά γρήγορα διεργασίες που είναι παραλληλοποιήσιμες, όπως για παράδειγμα οι πράξεις πινάκων (matrix processing). Στις γενιές των υπολογιστών που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίστηκαν οι κάρτες γραφικών συνδέονται σε θύρες παράλληλης αρτηρίας (parallel bus) και κατηγοριοποιούνται στις τρεις παρακάτω γενιές¹¹³.

Μία Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών (Graphics Processing Unit (GPU)) είναι ένα εξειδικευμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα πρωταρχικά σχεδιασμένο να χειρίζεται ταχύτατα και να μεταβάλλει την μνήμη, ώστε να επιταχύνει την δημιουργία εικόνων μέσα σε ένα frame buffer με σκοπό να προβάλει τα δεδομένα σε μία συσκευή οθόνης. Οι GPUs σήμερα χρησιμοποιούνται σε ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems), κινητά τηλέφωνα, προσωπικούς υπολογιστές, σταθμούς εργασίας και κονσόλες παιχνιδιών. Οι σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας γραφικών είναι πολύ αποδοτικές στην διαχείριση γραφικών υπολογιστών καθώς και στην επεξεργασία εικόνων, αλλά και στην επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων παράλληλα για σκοπούς επίλυσης μαθηματικών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα οι πράξεις μητρών μεγάλων διαστάσεων. Η δυνατότητα υψηλής παραλληλοποίησης της αρχιτεκτονικής τους κάνει τις κάρτες γραφικών πολύ αποδοτικότερες από τους γενικού σκοπού CPUs για αλγορίθμους που επεξεργάζονται μεγάλα blocks δεδομένων παράλληλα. Σε έναν προσωπικό υπολογιστή μία GPU μπορεί να βρίσκεται πάνω σε μια κάρτα video, ή ενσωματωμένη στη μητρική πλακέτα. Σε μερικούς επεξεργαστές βρίσκεται η GPU ενσωματωμένη μέσα στην ίδια την CPU.

Ο όρος GPU χρησιμοποιείται τουλάχιστον από την δεκαετία του 1980. Έγινε ευρέως γνωστός από την Nvidia το 1999, η οποία προώθησε το μοντέλο GeForce 256 ως την πρώτη GPU του κόσμου. Παρουσιάστηκε ως “επεξεργαστής ενός chip με ενσωματωμένο μετασχηματισμό, φωτισμό, ρύθμιση/αποκοπή τριγώνου και μηχανές rendering”¹¹⁴. Μία άλλη εταιρεία, η ATI Technologies, δημιούργησε τον όρο Visual Processing Unit – VPU (Οπτική μονάδα επεξεργασίας) με την παρουσίαση του μοντέλου Radeon 9700 το 2002.

¹¹³ https://en.wikipedia.org/wiki/Graphics_processing_unit

¹¹⁴ <https://www.nvidia.com/object/gpu.html>

3.1. Ιστορική Αναδρομή

3.1.1. Δεκαετία 1970

Τα συστήματα ηλεκτρονικών παιχνιδιών (Arcade System Boards) χρησιμοποιούν εξειδικευμένα chip γραφικών από το 1970. Στο πρωταρχικό hardware των video games η RAM για τους frame buffers ήταν ακριβή, συνεπώς τα video chips συνέθεταν τα δεδομένα μεταξύ τους και τα σκάναραν/πρόβαλλαν στην οθόνη του μηχανήματος.

Το μοντέλο Fujitsu MB14241 (τύπου video display controller–VDC) χρησιμοποιήθηκε σε διάφορα arcade games της Taito και της Midway για την επιτάχυνση του σχεδιασμού διδιάστατου χάρτη γραφικών (sprite), όπως το Gun Fight (1975), Sea Wolf (1976) και το Space Invaders (1978).

Το arcade system Namco Galaxian (1979) χρησιμοποιούσε εξειδικευμένο hardware γραφικών υποστηρίζοντας χρώματα RGB (Red-Green-Blue), πολύχρωμα sprites και tilemap backgrounds¹¹⁵. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε ευρέως κατά την χρυσή εποχή των arcade video games από εταιρείες ηλεκτρονικών παιχνιδιών όπως η Namco, Centuri, Gremlin, Irem, Midway, Nichibutsu, Sega και Taito.

Στην αγορά που αφορούσε την οικειακή χρήση το Atari 2600 του 1977 χρησιμοποιούσε έναν video display controller ο οποίος ονομαζόταν Television Interface Adaptor. Οι υπολογιστές των 8-bit της Atari είχαν τον ANTIC, έναν επεξεργαστή βίντεο ο οποίος ερμήνευε τις εντολές που περιέγραφαν μία λίστα εμφάνισης (“display list”), η οποία αφορούσε στον τρόπο με τον οποίο οι γραμμές σάρωσης χαρτογραφούνται σε συγκεκριμένους τρόπους bitmap ή χαρακτήρα και στο που αποθηκεύεται η μνήμη (έτσι δεν χρειαζόταν να υπάρχει συνεχής προσωρινή αποθήκευση πλαισίων (frame buffer)) (Εικόνα 56).

Οι υπορουτίνες του κώδικα μηχανής 6502 μπορούσαν να ενεργοποιηθούν στις γραμμές σάρωσης θέτοντας ένα bit ως ενεργό (on) σε μια οδηγία της λίστας προβολής. Ο ANTIC επίσης υποστήριζε ομαλή κάθετη και οριζόντια κύλιση (scrolling) ανεξάρτητα από την CPU.

¹¹⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Tile-based_video_game



Εικόνα 56. Η κονσόλα Atari¹¹⁶.

3.1.2. Δεκαετία 1980

Το NEC μ PD7220 ήταν μία από τις πρώτες εφαρμογές ενός ελεγκτή οθόνης γραφικών ως ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα ολοκλήρωσης μεγάλων κλιμάκων (LSI), επιτρέποντας τον σχεδιασμό καρτών γραφικών χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης, όπως αυτές της Number Nine Visual Technology. Έγινε μία από τις πιο γνωστές από τις γνωστές μονάδες επεξεργασίας γραφικών στη δεκαετία του 1980.

Τα παιχνίδια arcade Robotron 2084, Joust, Sinistar και Bubbles της William Electronics, τα οποία κυκλοφόρησαν το 1982, περιείχαν προσαρμοσμένα blitter chips για λειτουργίες σε 16-color bitmaps. Το 1985, το Commodore Amiga περιλάμβανε ένα τσιπ γραφικών προσαρμοσμένο, με μια μονάδα blitter επιταχύνοντας τον χειρισμό bitmap, την σχεδίαση γραμμών και τις λειτουργίες πλήρωσης περιοχής¹¹⁷. Επίσης περιλάμβανε έναν συνεπεξεργαστή (κοινώς αναφερόμενος και ως “The Copper”), με το δικό του πρωτόγονο σύνολο εντολών, ικανό να χειρίζεται καταχωρητές γραφικών στο hardware σε συγχρονισμό με την ροή των βίντεο δεδομένων (π.χ. για μεταβολές παλέτας χρωμάτων ανά σαρούμενη γραμμή, πολυπλεξία sprite και hardware windowing), ή την οδήγηση του blitter.

¹¹⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Tile-based_video_game

¹¹⁷<https://en.wikipedia.org/wiki/Blitter>

Το 1986, η Texas Instruments κυκλοφόρησε το TMS34010, τον πρώτο μικροεπεξεργαστή με δυνατότητες γραφικών on-chip. Μπορούσε να εκτελέσει κώδικα γενικού σκοπού, αλλά είχε σύνολο εντολών προσανατολισμένο στα γραφικά (graphic oriented). Το 1990-1992, αυτό το τσιπ θα γινόταν η βάση των καρτών επιταχυντή των Windows τύπου Texas Instruments Graphics Architecture ("TIGA").

Το 1987, το σύστημα γραφικών IBM 8514 βγήκε στην αγορά ως μία από τις πρώτες κάρτες γραφικών για τα συμβατά με τα IBM PC για την υλοποίηση 2D σταθερών λειτουργιών σε ηλεκτρονικό υλικό. Την ίδια χρονιά, η Sharp κυκλοφόρησε το X68000, το οποίο χρησιμοποίησε ένα προσαρμοσμένο chipset γραφικών που ήταν ισχυρό για έναν οικιακό υπολογιστή την εποχή εκείνη, με μια παλέτα 65.536 χρωμάτων και υποστήριξη υλικού για sprites, scrolling και πολλαπλά playfields, τελικά εξυπηρετώντας ως μηχανήμα ανάπτυξης λογισμικού για το CP System arcade board της Capcom. Η Fujitsu αργότερα ανταγωνίστηκε με τον υπολογιστή της FM Towns, που κυκλοφόρησε το 1989 με υποστήριξη πλήρους παλέτας 16.777.216 χρωμάτων.

Το 1988, παρουσιάστηκαν σε χώρους video gaming της εποχής (arcades) οι πρώτες αφιερωμένες πολυγωνικές τρισδιάστατες πλακέτες γραφικών στα συστήματα παιχνιδιών Namco System 21 και το Taito Air System.

Το 1987 η IBM παρουσίασε το γνωστό Computer Display Standard VGA (Video Graphics Array) με μέγιστη ανάλυση 640x480 pixels. Τον Νοέμβριο του 1988 η NEC Home Electronics ανακοίνωσε την δημιουργία του Video Electronics Standards Association (VESA) ώστε να αναπτύξει και να προωθήσει ένα Super VGA (SVGA) Computer Display Standard ως διάδοχο του δημιουργήματος της IBM. Να σημειωθεί πως με τον όρο Computer Display Standard εννοείται το σύνολο των χαρακτηριστικών: συνδυασμός της αναλογίας απεικόνισης (λόγος των δύο διαστάσεων της οθόνης), μέγεθος οθόνης, ανάλυση οθόνης, βάθος χρώματος και ρυθμός ανανέωσης καρέ. Τα χαρακτηριστικά αυτά σχετίζονται με συγκεκριμένες κάρτες επέκτασης, video connectors και Monitors. Το Super VGA επέτρεψε ανάλυση γραφικών μέχρι και 800x600 pixels, δηλαδή αύξηση κατά 36%.

3.1.3. Δεκαετία 1990

Το 1991 η εταιρεία S3 Graphics εισήγαγε το S3 86C911, το οποίο οι σχεδιαστές του το ονόμασαν έτσι επηρεασμένοι από το μοντέλο αυτοκινήτου Porsche 911, ως ένδειξη υψηλών επιδόσεων. Το μοντέλο αυτό δημιούργησε ένα πλήθος μιμητών: μέχρι το 1995

όλοι οι μεγάλοι δημιουργοί chip καρτών γραφικών είχαν προσθέσει 2D acceleration support στα ολοκληρωμένα του. Μέχρι τότε κάρτες γραφικών τύπου Windows Accelerators σταθερής λειτουργίας είχαν ξεπεράσει τους ακριβούς γενικού σκοπού συνεπεξεργαστές γραφικών όσον αφορά στην επίδοση των Windows, οπότε οι συνεπεξεργαστές αυτοί εξαλείφθηκαν από την αγορά.

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας αυτής συνέχισε να εξελίσσεται το 2D GUI (Graphical User Interface) Acceleration. Καθώς οι ικανότητες της βιομηχανίας βελτιώνονταν αυξανόταν και το επίπεδο ολοκλήρωσης στα Chips γραφικών. Επιπρόσθετα δημιουργήθηκαν διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (application programming interfaces—APIs)¹¹⁸ για μία πληθώρα λειτουργιών, όπως πχ το WinG graphics library της Microsoft για τα Windows 3.x, και το μετέπειτα interface DirectDraw για επιτάχυνση Hardware των δισδιάστατων παιχνιδιών σε Windows 95 και έπειτα.

Στην αρχή και τα μέσα της δεκαετίας του 1990 τρισδιάστατα γραφικά πραγματικού χρόνου γίνονταν αυξανόμενα συνήθη σε παιχνίδια Arcade, Computer και Κονσόλας, το οποίο οδήγησε σε μία αυξανόμενη ζήτηση για Hardware-Accelerated 3D graphics¹¹⁹. Πρότερα παραδείγματα μαζικής αγοράς Hardware τρισδιάστατων γραφικών μπορούν να βρεθούν σε παιχνιδομηχανές όπως Sega Model 1, Namco System 22 και Sega Model 2, καθώς και στην 5^η γενιά κονσολών video game, όπως Sega Saturn, Sony PlayStation και Nintendo 64. Τα συστήματα Arcade όπως το Sega Model 2 και το Namco Magic Edge Hornet Simulator το 1993 ήταν ικανά για hardware T & L (μετασχηματισμός, αποκοπή και φωτισμός) χρόνια πριν εμφανιστούν σε κάρτες γραφικών καταναλωτών. Ορισμένα συστήματα χρησιμοποίησαν DSPs (Digital Signal Processors) για να επιταχύνουν τους μετασχηματισμούς. Η Fujitsu, η οποία εργάστηκε στο σύστημα arcade Sega Model 2, άρχισε να ασχολείται με την ενσωμάτωση της T & L (μετασχηματισμός, αποκοπή και φωτισμός) σε μια ενιαία λύση Ολοκληρωμένου Κυκλώματος για χρήση σε οικιακούς υπολογιστές το 1995. Το Fujitsu Pinolite, ο πρώτος 3D επεξεργαστής γεωμετρίας για προσωπικούς υπολογιστές, κυκλοφόρησε το 1997. Η πρώτη GPU με T & L σε κονσόλες βιντεοπαιχνιδιών ήταν ο συνεπεξεργαστής της Nintendo 64, ο οποίος κυκλοφόρησε το 1996. Το 1997, η Mitsubishi κυκλοφόρησε το 3Dpro/2MP, μια πλήρως εξοπλισμένη GPU ικανή για μετασχηματισμό και φωτισμό, για σταθμούς εργασίας και υπολογιστές Windows NT. Ο όρος "GPU" δημιουργήθηκε από τη Sony αναφορικά με τη 32-bit Sony GPU

¹¹⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Application_programming_interface

¹¹⁹https://en.wikipedia.org/wiki/3D_acceleration

(σχεδιασμένη από την Toshiba) στην κονσόλα παιχνιδιών PlayStation, που κυκλοφόρησε το 1994.

Στον κόσμο των υπολογιστών μπορούν να αναφερθούν κάποιες αξιοσημείωτες αποτυχημένες προσπάθειες για chips 3D γραφικών χαμηλού κόστους: S3 ViRGE, ATI Rage, and Matrox Mystique. Τα chips αυτά ήταν ουσιαστικά 2D accelerators προηγούμενης γενιάς όπου είχαν προστεθεί λειτουργικότητες 3D. Αρκετά από αυτά ήταν συμβατά (σε επίπεδο συνδεσμολογίας – pin) με chips προηγούμενης γενιάς για ευκολία στην υλοποίηση και ελάχιστο κόστος. Αρχικά, τα τρισδιάστατα γραφικά επιδόσεων ήταν δυνατά μόνο με διακριτές πλακέτες αφιερωμένες στην επιτάχυνση των 3D λειτουργιών (και χωρίς πλήρη 2D GUI επιτάχυνση) όπως το PowerVR και το 3dfx Voodoo. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία κατασκευής συνέχισε να εξελίσσεται, το βίντεο, η επιτάχυνση 2D GUI και η λειτουργικότητα 3D ενσωματώθηκαν όλα σε ένα τσιπ. Τα chipset Verite της Rendition ήταν από τα πρώτα που το έκαναν αρκετά καλά ώστε να είναι αξιοσημείωτα. Το 1997, η Rendition πήγε ένα βήμα πιο μπροστά δημιουργώντας συνεργασία με τους Hercules και Fujitsu σε ένα project Thriller Conspiracy το οποίο συνδυάζει έναν επεξεργαστή γεωμετρίας Fujitsu FXG-1 Pinolite με έναν πυρήνα Vérité V2200 για να δημιουργήσει μια κάρτα γραφικών με πλήρες engine T&L χρόνια πριν από την GeForce της Nvidia 256. Αυτή η κάρτα, που σχεδιάστηκε για να μειώσει το φορτίο που έχει τοποθετηθεί στη CPU του συστήματος, δεν κατάφερε να βγει ποτέ στην αγορά.

Η OpenGL (Open Graphics Library) είναι API για διάφορες πλατφόρμες σχετικά με την απόδοση 2D και 3D vector Graphics. Χρησιμοποιείται συνήθως για την αλληλεπίδραση με την Κάρτα Γραφικών (GPU) ώστε να επιτύχει Hardware-accelerated rendering (=σύνθεση εικόνας). Πρωτοεμφανίστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 90 ως επαγγελματικό API γραφικών, όμως αρχικά υπέφερε από θέματα επίδοσης, τα οποία επέτρεψαν στο Glide API να μπει στο προσκήνιο και να γίνει μία κυρίαρχη δύναμη στους προσωπικούς υπολογιστές στα τέλη της δεκαετίας του 90. Παρόλα αυτά τα θέματα αυτά γρήγορα ξεπεράστηκαν και η Glide API παραμερίστηκε. Οι εφαρμογές λογισμικού της OpenGL ήταν συνηθισμένες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αν και η επίδραση της OpenGL οδήγησε τελικά σε ευρεία υποστήριξη από διάφορα hardware. Με την πάροδο του χρόνου, προέκυψε μια ισοτιμία μεταξύ των χαρακτηριστικών που προσφέρονται στο υλικό και εκείνων που προσφέρονται στην OpenGL. Το DirectX έγινε δημοφιλές στους προγραμματιστές παιχνιδιών των Windows κατά τα τέλη της δεκαετίας του '90. Σε αντίθεση με την OpenGL, η Microsoft επέμεινε στην παροχή αυστηρά ένα-προς-ένα υποστήριξης του

hardware. Η προσέγγιση αυτή έκανε αρχικά το DirectX λιγότερο δημοφιλές ως αυτόνομο API γραφικών, καθώς πολλές GPUs παρείχαν τα δικά τους ειδικά χαρακτηριστικά, τα οποία οι υπάρχουσες εφαρμογές OpenGL ήταν ήδη σε θέση να επωφεληθούν, αφήνοντας το DirectX συχνά μια γενιά πίσω¹²⁰.

Με την πάροδο του χρόνου, η Microsoft άρχισε να συνεργάζεται στενότερα με τους προγραμματιστές υλικού και άρχισε να στοχεύει τις εκδόσεις του DirectX να συμπίπτουν με αυτές του υποστηρικτικού υλικού γραφικών. Το Direct3D 5.0 ήταν η πρώτη έκδοση του αναπτυσσόμενου API που απέκτησε την ευρεία χρήση στην αγορά παιχνιδιών, και ανταγωνίστηκε άμεσα με πολλές βιβλιοθήκες γραφικών περισσότερο εξειδικευμένες στο hardware, ενώ η OpenGL ακολουθούσε ισχυρά. Το Direct3D 7.0 εισήγαγε υποστήριξη για μετασχηματισμό και φωτισμό επιτάχυνσης υλικού (T & L) για το Direct3D, ενώ η OpenGL είχε ήδη υλοποίηση αυτήν την δυνατότητα από την έναρξή της. Οι κάρτες 3D επιτάχυνσης εξελίχθηκαν πέρα από το να είναι απλά Rasterisers προσθέτοντας ένα ακόμα σημαντικό στάδιο του hardware στο 3D Rendering Pipeline. Να σημειωθεί ότι Rasterisation καλείται η λειτουργία της μετατροπής μιας εικόνας η οποία περιγράφεται σε μία διανυσματική μορφή γραφικών (σχήματα) σε εικόνα raster (μια σειρά από pixels, κουκίδες ή γραμμές, οι οποίες όταν εμφανίζονται μαζί δημιουργούν την εικόνα που παρουσιάστηκε μέσω σχημάτων). Η Nvidia GeForce 256 (γνωστή και ως NV10) ήταν η πρώτη κάρτα σε επίπεδο καταναλωτών που κυκλοφόρησε στην αγορά με hardware επιταχυνόμενη T&L, ενώ οι επαγγελματικές κάρτες 3D είχαν ήδη αυτή τη δυνατότητα. Ο μετασχηματισμός και ο φωτισμός μέσω hardware, και τα δύο ήδη υπάρχοντα χαρακτηριστικά της OpenGL, ήρθαν στο επίπεδο του καταναλωτικού υλικού στη δεκαετία του '90 και έθεσαν την βάση για τις μεταγενέστερες μονάδες pixel shader και vertex shader, οι οποίες ήταν πολύ πιο ευέλικτες και προγραμματιζόμενες.

3.1.4. Δεκαετία 2000-2010

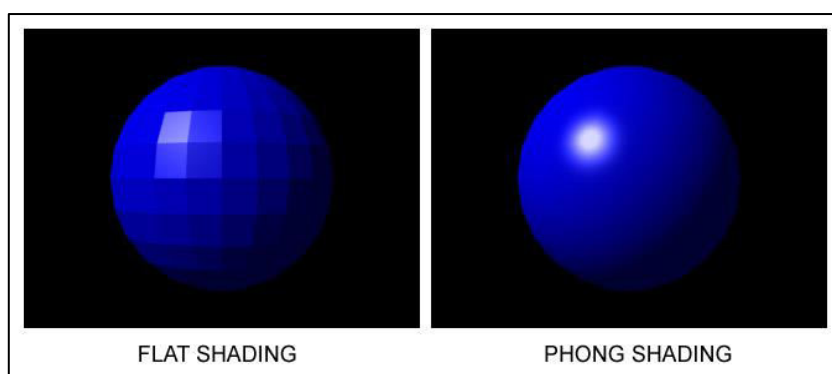
Η Nvidia ήταν η πρώτη που δημιούργησε ένα τσιπ ικανό για προγραμματιζόμενη σκίαση, το GeForce 3 (με κωδικό NV20). Κάθε εικονοστοιχείο θα μπορούσε τώρα να υποβληθεί σε επεξεργασία από ένα σύντομο "πρόγραμμα" που θα μπορούσε να περιλαμβάνει πρόσθετες υφές εικόνων ως εισόδους και κάθε γεωμετρική κορυφή θα μπορούσε επίσης να υποβληθεί σε επεξεργασία από ένα σύντομο πρόγραμμα προτού προβληθεί στην οθόνη (pixel shader και vertex shader αντίστοιχα^{121,122}). Χρησιμοποιήθηκε στην κονσόλα Xbox

¹²⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_OpenGL_and_Direct3D

¹²¹https://en.wikipedia.org/wiki/Shader#Vertex_shaders

και ανταγωνίστηκε με το PlayStation 2 (το οποίο χρησιμοποίησε ένα προσαρμοσμένο DSP φορέα για hardware accelerated vertex processing – επεξεργασία κορυφών επιταχυνόμενη από το υλικό). Οι πρώτες υλοποιήσεις μηχανισμών εκτέλεσης σκίασης (shader execution engines) που χρησιμοποιήθηκαν στο Xbox δεν ήταν γενικού σκοπού και δεν μπορούσαν να εκτελέσουν αυθαίρετο κώδικα εικονοστοιχείων. Οι κορυφές και τα εικονοστοιχεία επεξεργάζονταν από διαφορετικές μονάδες που είχαν τους δικούς τους πόρους με τους shaders εικονοστοιχείων να έχουν πολύ αυστηρότερους περιορισμούς (δεδομένου ότι εκτελούνται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες από ό, τι οι κορυφές). Οι μηχανές Pixel shading έμοιαζαν στην πραγματικότητα περισσότερο με ένα εξαιρετικά προσαρμόσιμο λειτουργικό μπλοκ και δεν έτρεχαν ουσιαστικά ένα πρόγραμμα. Πολλές από αυτές τις ανισότητες μεταξύ shading κορυφών και pixel δεν θα αντιμετωπιστούν παρά πολύ αργότερα με το Unified Shader Model.

Μέχρι τον Οκτώβριο του 2002, με την παραγωγή του ATI Radeon 9700 (γνωστού και ως R300), ο πρώτος επιταχυντής Direct3D 9.0, σε συνδυασμό με τους pixel και vertex shaders μπορούσαν να υλοποιήσουν επαναλαμβανόμενα μαθηματικά και πράξεις με μεγάλο μήκος αριθμούς κινητής υποδιαστολής οπότε γρήγορα γίνονταν τόσο ευέλικτοι όσο και οι CPU, αλλά όντας τάξεις μεγέθους γρηγορότεροι σε πράξεις πινάκων εικόνων (image-array operations). Το Pixel Shading συχνά χρησιμοποιείται για bump mapping, μια λειτουργία που προσθέτει υφή για να κάνει ένα αντικείμενο να φαίνεται λαμπερό, θαμπό, άγριο ή ακόμα στρογγυλό ή εξωθημένο (extruded) (**Εικόνα 57**).



Εικόνα 57. Pixel shading¹²³.

¹²² https://en.wikipedia.org/wiki/Shader#Pixel_shaders

¹²³ <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Phong-shading-sample.jpg>

Από την παραγωγή της σειράς GeForce 8 από την Nvidia και έπειτα οι νέες μονάδες επεξεργασίας GPU γενικής ροής έγιναν πιο γενικευμένες υπολογιστικές συσκευές. Σήμερα οι GPUs παράλληλης επεξεργασίας έχουν κερδίσει φοβερό έδαφος έναντι των CPUs πραγματοποιώντας τεράστιο όγκο πράξεων. Ένας υποτομέας έρευνας που ονομάζεται GPU Computing ή GPGPU (General Purpose Computing on GPU—Υπολογιστική Γενικού Σκοπού σε GPU) έχει διεισδύσει σε ένα τεράστιο εύρος επιστημονικών projects, με πιο σημαντικά την μηχανική μάθηση, την εξερεύνηση πετρελαίου, την επιστημονική επεξεργασία εικόνας, την γραμμική άλγεβρα, τη στατιστική, ακόμα και τον καθορισμό τιμών σε χρηματιστηριακό επίπεδο. Το GPGPU τότε ήταν ο πρόδρομος σε αυτό που ονομάζουμε τώρα Compute Shaders (π.χ. CUDA, OpenCL, DirectCompute) και ουσιαστικά καταγράστηκε το υλικό σε κάποιο βαθμό αντιμετωπίζοντας τα δεδομένα που μεταφέρονται στους αλγόριθμους ως χάρτες υφής (texture maps) και εκτελώντας αλγόριθμους σχεδιάζοντας ένα τρίγωνο ή τετράγωνο με έναν κατάλληλο pixel shader. Αυτό προφανώς συνεπάγεται κάποια κόστη λειτουργίας καθώς εμπλέκονται μονάδες όπως το Scan Converter οι οποίες δεν χρειάζονται πραγματικά (ούτε στην πραγματικότητα μας ενδιαφέρουν τα τρίγωνα, παρά μόνο για να προκαλέσουν την λειτουργία του pixel shader). Με την πάροδο των χρόνων η κατανάλωση ενέργειας από τις GPUs έχει αυξηθεί και για να διαχειριστούμε το πρόβλημα αυτό έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές.

Η πλατφόρμα CUDA της Nvidia, που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2007, ήταν το παλαιότερο ευρέως υιοθετημένο προγραμματιστικό μοντέλο για GPU computing. Πιο πρόσφατα το OpenCL έχει υποστηριχθεί ευρέως. Το OpenCL είναι ένα ανοικτό πρότυπο που ορίζεται από την Khronos Group, το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη κώδικα τόσο για τις GPU όσο και για τις CPU με έμφαση στη φορητότητα. Οι λύσεις OpenCL υποστηρίζονται από τις Intel, AMD, Nvidia και ARM και σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση της Evan's Data, η OpenCL είναι η πλατφόρμα ανάπτυξης GPGPU που χρησιμοποιείται ευρύτερα από τους προγραμματιστές τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ασία.

3.1.5. 2010 έως Σήμερα

Το 2010 η Nvidia ξεκίνησε μια συνεργασία με την Audi σχετικά με τα ταμπλό των αυτοκινήτων τους. Αυτές οι Tegra GPUs τροφοδοτούσαν τα ταμπλό των αυτοκινήτων, προσφέροντας αυξημένη λειτουργικότητα στα συστήματα πλοήγησης και ψυχαγωγίας των αυτοκινήτων. Οι προόδοι στην τεχνολογία GPU στα αυτοκίνητα βοήθησαν στην ώθηση της τεχνολογίας αυτο-οδήγησης (self-driving technology). Οι κάρτες της σειράς Radeon HD 6000 της AMD κυκλοφόρησαν το 2010 και το 2011 η AMD κυκλοφόρησε τις

διακριτές μονάδες GPU της σειράς 6000M που χρησιμοποιούνται σε κινητές συσκευές. Η γραμμή παραγωγής καρτών γραφικών της Nvidia με το όνομα Kepler κυκλοφόρησε το 2012 και χρησιμοποιήθηκε στην σειρά καρτών 600 και 700 της Nvidia. Ένα νέο χαρακτηριστικό αυτής της νέας μικροαρχιτεκτονικής GPU περιελάμβανε την ώθηση της απόδοσης της GPU, μια τεχνολογία που προσαρμόζει την ταχύτητα ρολογιού αυξάνοντας ή μειώνοντάς την ανάλογα με την άντληση ισχύος της. Η μικροαρχιτεκτονική Kepler κατασκευάστηκε με την μέθοδο των 28nm.

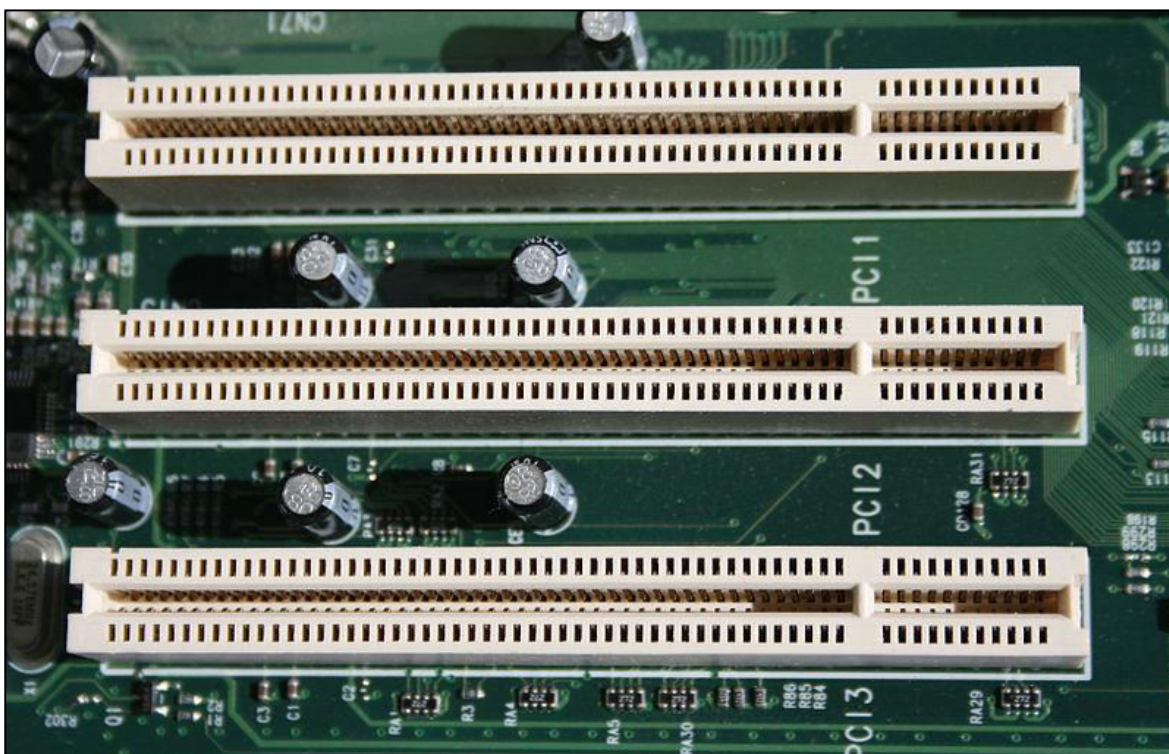
Το PS4 και το Xbox One κυκλοφόρησαν το 2013, και τα δύο χρησιμοποιούν GPU με βάση τα Radeon HD 7850 και 7790 της AMD. Η γραμμή Kepler των GPU της Nvidia ακολουθήθηκε από τη γραμμή Maxwell, η οποία κατασκευάστηκε με την ίδια διαδικασία. Τα chips των 28nm της Nvidia κατασκευάζονταν από την TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company). Συγκριτικά με την τεχνολογία των 40nm του παρελθόντος, η νέα αυτή κατασκευαστική διαδικασία επέτρεψε αύξηση της απόδοσης κατά 20% ενώ κατανάλωνε λιγότερη ενέργεια. Τα headsets εικονικής πραγματικότητας έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις συστήματος. Οι κατασκευαστές VR headsets συνέστησαν τα GTX 970 ή R9 290X ή καλύτερες κάρτες γραφικών από αυτές την χρονική περίοδο παραγωγής τους. Η Pascale είναι η επόμενη γενιά καρτών γραφικών της Nvidia και βγήκε στην αγορά το 2016. Η σειρά καρτών GeForce 10 υπάγεται σε αυτήν την γενιά καρτών γραφικών. Κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας 16nm διαδικασία παραγωγής η οποία βελτιώνει τις προηγούμενες μικροαρχιτεκτονικές. Η Nvidia κυκλοφόρησε μία μη-καταναλωτική κάρτα κάτω από τη νέα αρχιτεκτονική Volta, το Titan V. Οι αλλαγές από την Titan XP, την κάρτα high-end της Pascal, περιλαμβάνουν αύξηση του αριθμού πυρήνων CUDA, προσθήκη πυρήνων tensor και HBM2 (High Bandwidth Memory 2). Οι πυρήνες tensor είναι πυρήνες ειδικά σχεδιασμένοι για deep learning και έχουν χαραγμένη στο chip μνήμη υψηλού εύρους ζώνης, με λειτουργία στοίβας και σε χαμηλή συχνότητα ρολογιού, η οποία προσφέρει έναν εξαιρετικά ευρύ δίαυλο μνήμης (memory bus), ο οποίος είναι χρήσιμος για τον σκοπό του Titan V. Για να τονίσει ότι το Titan V δεν είναι μια κάρτα παιχνιδιών, η Nvidia αφαίρεσε το επίθημα "GeForce GTX" που προσθέτει στις κάρτες παιχνιδιών καταναλωτών. Μια νέα γενιά, οι GPUs RTX Turing αποκαλύφθηκαν στις 20 Αυγούστου 2018, οι οποίες προσθέτουν πυρήνες ανίχνευσης ακτίνων σε GPU, βελτιώνοντας την απόδοσή τους σε εφέ φωτισμού. Οι GPUs Polaris 11 και Polaris 10 από την AMD κατασκευάζονται με διαδικασία 14-νανομέτρων. Η είσοδός τους στην αγορά έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της απόδοσης ανά watt των καρτών βίντεο AMD. Η AMD κυκλοφόρησε επίσης τη σειρά Vega GPUs για την high end αγορά ως ανταγωνιστή των

υψηλής ποιότητας καρτών Pascal της Nvidia, η οποία διαθέτει επίσης HBM2 όπως το Titan V.

3.2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Καρτών Γραφικών

3.2.1. Συμβατικές Θύρες PCI (Conventional PCI Slots)

Συχνά αποκαλούμενη και ως PCI, πρόκειται για μία τοπική θύρα/αρτηρία (local computer bus) στην οποία μπορεί να συνδεθεί κάποιου είδους υλισμικό (hardware). Πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά από την Intel το 1992¹²⁴ (Εικόνα 58).



Εικόνα 58. PCI graphics card slots¹²⁵.

Τα αρχικά προέρχονται από τις λέξεις Peripheral Component Interconnect (Περιφερειακή Αλληλοσύνδεση Εξαρτημάτων) και είναι κομμάτι του PCI Local Bus. Το PCI Bus (αρτηρία) υποστηρίζει τις λειτουργίες που μπορούν να βρεθούν στις αρτηρίες συστήματος (system bus)¹²⁶ αλλά με μία τυποποιημένη μορφή, η οποία είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε μορφή που μπορεί να έχουν οι αρτηρίες του επεξεργαστή (processor bus). Συσκευές που είναι συνδεδεμένες σε μία PCI συνδέονται μέσω μιας αρτηρίας σε έναν ελεγκτή, τον bus master και τους αντιστοιχίζονται από αυτές διευθύνσεις, σύμφωνα με τον

¹²⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Conventional_PCI

¹²⁵https://en.wikipedia.org/wiki/File:PCI_Slots_Digon3.JPG

¹²⁶https://en.wikipedia.org/wiki/System_bus

χώρο διευθύνσεων του επεξεργαστή, ώστε να μπορούν να αναγνωρίζονται από αυτόν τα δεδομένα της συσκευής. Πρόκειται για μία παράλληλη αρτηρία 32 ή 64 bits συγχρονισμένη με το αντίστοιχο ρολόι αρτηρίας (bus clock). Αυτό σημαίνει ότι η ροή των δεδομένων από και προς την συσκευή γίνεται με τον ρυθμό που ορίζει αυτό το ρολόι.

Οι κάρτες που μπορούσαν να συνδεθούν στην συγκεκριμένη θύρα ήταν διαφόρων ειδών, όπως κάρτες δικτύου, κάρτες ήχου, modems, κυκλώματα επιπλέον θυρών (USB, σειριακών), κάρτες τηλεόρασης, κάρτες μέσω αποθήκευσης αλλά και κάρτες γραφικών.

Η πρώτη έκδοση PCI σε επιτραπέζιο υπολογιστή της αγοράς ήταν μήκους 32bits, χρησιμοποιούσε ρολόι αρτηρίας 33MHz, σε τάση 5V, ενώ στην έκδοση PCI 1.0 υποστηρίζονταν και κάρτες των 64bits. Η επόμενη έκδοση, PCI 2.0 εισήγαγε θύρες τάσης 3.3V, έχοντας μία φυσική διαφορά στην θύρα ώστε να αποτραπεί η κατά λάθος εισδοχή καρτών 5V. Η έκδοση PCI 2.1 εισήγαγε επιπλέον την επιλογή λειτουργίας σε συχνότητα 66MHz. Μία παραλλαγή της PCI, η PCI-X (eXtended) λειτουργούσε σε συχνότητες μέχρι τα 133MHz στην έκδοση PCI-X 1.0, ενώ μέχρι τα 533MHz στην έκδοση PCI-X2.0. Στους φορητούς υπολογιστές υπήρχε αντίστοιχα θύρα τύπου Mini PCI ή αλλιώς PCI 2.2.

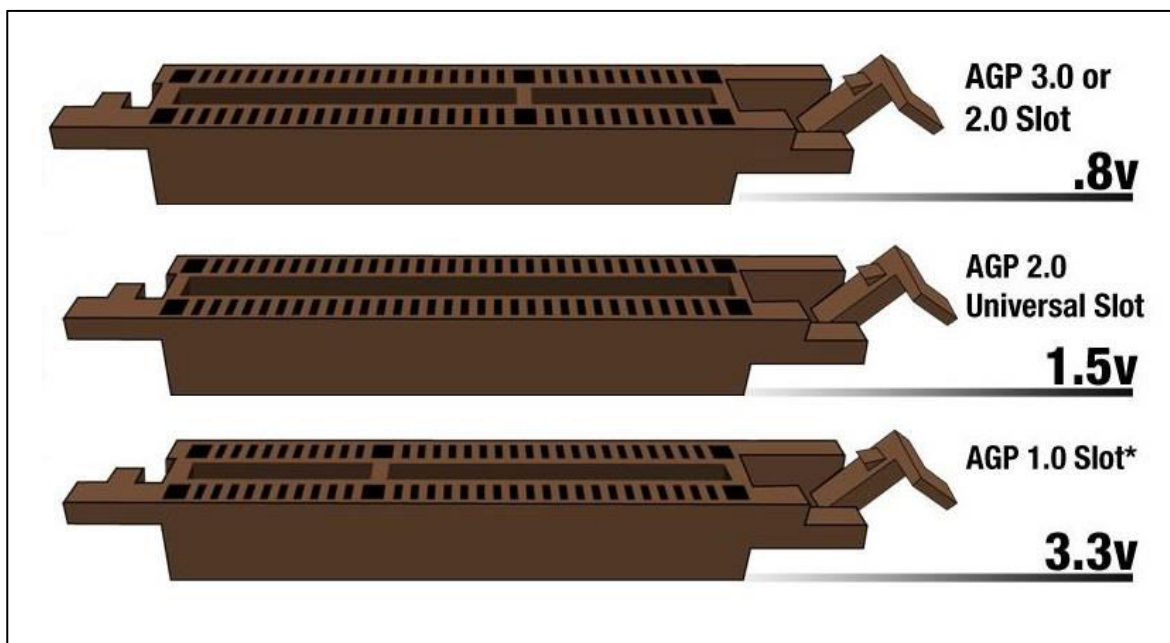
Πολλές φορές οι PCI λέγονται και Parallel PCI (παράλληλης μεταφοράς δεδομένων) ώστε να διαχωριστούν από τους απογόνους τύπου PCI Express που είναι σειριακής μεταφοράς δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στο διάστημα 1995 – 2005. Οι συμβατικές επιδόσεις τέτοιου υλικού είναι οι παρακάτω:

- 33.33Mhz ρολόι σύγχρονων μεταφορών
- 32bits πλάτος αρτηρίας (bus width)
- Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων 133Mbyte/sec για μήκος αρτηρίας 32bits ($33.33\text{MHz} \times 32\text{bits} / 8\text{bits/Byte} = 133 \text{ MB/s}$)
- 32bit ή 64bit χώρος διευθύνσεων μνήμης
- 32bit I/O χώρος θυρών (port space)
- 5 volt σήμα εισόδου

3.2.2. Accelerated Graphics Port (AGP)

Πρόκειται για μία θύρα υλισμικού μεταγενέστερη της PCI, η οποία πρωτοβγήκε στο εμπόριο το 1996 και χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον μέχρι το 2004 όπου πρωτοεμφανίστηκε

η PCI Express, και σταμάτησε να χρησιμοποιείται γύρω στο 2008, όταν η PCI Express κυρίευσε στον χώρο. Δημιουργήθηκε από την Intel¹²⁷ (Εικόνα 59).



Εικόνα 59. AGP graphics card slots¹²⁸.

Η θύρα αυτή δημιουργήθηκε ως ανάγκη εξέλιξης της PCI με κύριο στόχο την εξέλιξη των γραφικών στους υπολογιστές. Το κύριο προτέρημά της έναντι της PCI ήταν ότι υλοποιεί μία αφιερωμένη αρτηρία (bus) μεταφοράς δεδομένων μεταξύ AGP και επεξεργαστή, αντί της από κοινού χρήσης με άλλα μέσα της PCI bus. Αυτό είχε σαν επιπλέον αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερων συχνοτήτων ρολογιού στις κάρτες που συνδέονταν εκεί. Επιπλέον η AGP χρησιμοποιεί παράπλευρη διευθυνσιοδότηση, που σημαίνει ότι οι αρτηρίες διευθύνσεων και δεδομένων είναι ξεχωριστές, οπότε δεν χρειάζεται η ανάγνωση όλου του πακέτου δεδομένων για να εξορυχθεί η πληροφορία διευθύνσεως. Αυτό επιτυγχάνεται με την υλοποίηση μίας επιπλέον 8-bit παράπλευρης αρτηρίας διευθύνσεων, γεγονός το οποίο επιτρέπει στον ελγκτη γραφικών (graphics controller) να εξυπηρετεί νέα αιτήματα και εντολές της AGP ενώ ταυτόχρονα άλλα δεδομένα της AGP ρέουν από τις κύριες 32 γραμμές διευθύνσεων/δεδομένων (AD Lines). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα γενική βελτίωση της μεταφοράς δεδομένων¹²⁹.

¹²⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerated_Graphics_Port

¹²⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/File:PCI_Slots_Digon3.JPG

¹²⁹ <http://www.evga.com/support/faq/afmviewfaq.aspx?faqid=58491>

Επιπλέον η PCI για να φορτώσει δεδομένα γραφικών (texture) έπρεπε να τα αντιγράψει από την RAM του συστήματος στην μνήμη γραφικών της κάρτας, ενώ η AGP μπορεί να διαβάσει απευθείας δεδομένα από την RAM χρησιμοποιώντας τον πίνακα αντιστοίχισης διευθύνσεων γραφικών (GART)¹³⁰, ο οποίος αναδιανέμει την κύρια μνήμη αναλόγως την χρήση δεδομένων υφής, επιτρέποντας την άμεση επικοινωνία κάρτας – μνήμης. Την κάρτα αυτή την συναντάμε σε γενιά μεταγενέστερη της P5 και P6 αρχιτεκτονικής. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά των εκδόσεων PCI και AGP.

Έκδοση	Τάση Εισόδου (V)	Ρυθμός Ρολογιού (MHz)	Ταχύτητα	Μεταφορές/κύκλο ρολογιού	Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (MB/sec)
PCI	3.3/5	33	–	1	133
PCI 2.1	3.3/5	33/66	–	1	266
AGP 1.0	3.3	66	1x	1	266
AGP 1.0	3.3	66	2x	2	533
AGP 2.0	1.5	66	4x	4	1066
AGP 3.0	0.8	66	8x	8	2133
AGP 3.5	0.8	66	8x	8	2133

Πίνακας 23. Τα χαρακτηριστικά των εκδόσεων PCI και AGP.

3.2.3. PCI Express (PCIe)

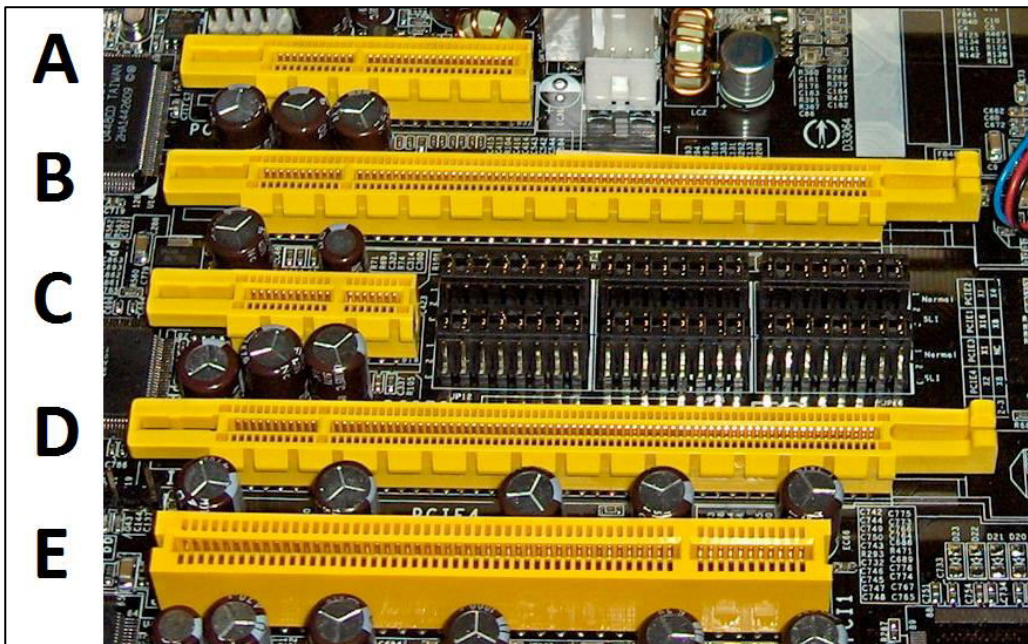
Η PCI Express ή PCIe (Peripheral Component Interconnect Express)¹³¹ είναι μίας υψηλής ταχύτητας τυποποίηση αρτηρίας επιπλέον υλισμικού, η οποία αποτελεί απόγονο των PCI και AGP. Έχει μία πληθώρα βελτιώσεων από τις παλαιότερες τυποποιήσεις, όπως η υψηλότερη ροή δεδομένων, μικρότερο πλήθος ακίδων σύνδεσης σε μικρότερο φυσικό μέγεθος, καλύτερη απόδοση στην κλιμάκωση υλισμικού που συνδέεται σε αρτηρίες (bus devices), μεγαλύτερη ακρίβεια στην εύρεση σφαλμάτων και αναφορά αυτών (Advanced Error Reporting-AER), καθώς και την δυνατότητα hot-plugging¹³², κατά την οποία μπορεί να γίνει προσθαφαίρεση υλισμικού χωρίς να χρειάζεται να σταματήσει η λειτουργία του συστήματος.

Πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά από τις εταιρείες Intel, Dell, HP, IBM το 2004 και έχει πλάτος 32bits. Κυρίευσε την αγορά στον χώρο το 2008 και χρησιμοποιείται κατά κόρον μέχρι σήμερα.

¹³⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Graphics_address_remapping_table

¹³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/PCI_Express

¹³² https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_swapping



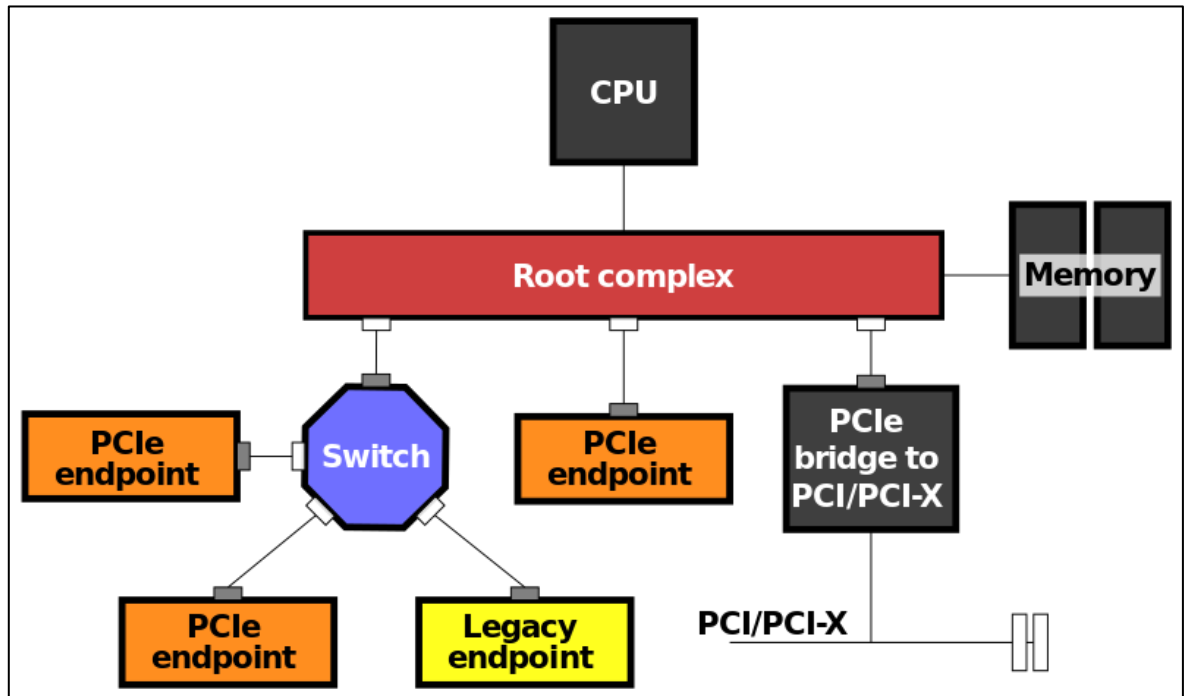
Εικόνα 60. PCIe slots (A: PCI Express ×4, B: PCI Express ×16, C: PCI Express ×1, D: PCI Express ×16, E: Legacy PCI (32-bit, 5V))¹³³.

Εννοιολογικά η PCI Express αποτελεί μία αντικατάσταση της παλιάς PCI από μία σειριακή θύρα υψηλής ταχύτητας. Μία κύρια διαφορά συγκριτικά με την παλιά PCI είναι η τοπολογία (παράδειγμα στο σχήμα). Η PCI χρησιμοποιεί μία αρχιτεκτονική κοινόχρηστης παράλληλης αρτηρίας (shared parallel bus), κατά την οποία ο PCI host και όλες οι συνδεδεμένες συσκευές μοιράζονται ένα κοινό σύνολο γραμμών διευσθύνσεων, δεδομένων και γραμμών ελέγχου. Αντιθέτως η PCIe βασίζεται σε μία τοπολογία point-to-point (σημείο προς σημείο) με διαφορετικούς σειριακούς συνδέσμους να ενώνουν κάθε συσκευή στον πολυπλέκτη ρίζας (root complex ή host). Ο Root Complex συνδέει τον επεξεργαστή και το υποσύστημα μνήμης στον διακόπτη διανομής δεδομένων προς τις συσκευές, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα¹³⁴.

Στην τοπολογία των παλαιών PCI, λόγω της από κοινού χρήσης του bus η μεταφορά των δεδομένων περιοριζόταν σε μία συσκευή την φορά και προς μία κατεύθυνση (από ή προς την συσκευή). Επίσης το σύστημα χρονοισμού των PCI περιοριζόταν στην πιο αργή συσκευή PCI που ήταν συνδεδεμένη στο bus. Αντιθέτως στην τοπολογία των PCIe επιτρέπεται η πλήρως διπλής κατεύθυνσης ροή δεδομένων μεταξύ οποιωνδήποτε συσκευών συνδεδεμένων σε PCIe, με κανέναν φυσικό περιορισμό σε ταυτόχρονη πρόσβαση πολλαπλών συσκευών (**Εικόνα 61**).

¹³³ https://en.wikipedia.org/wiki/PCI_Express#History_and_revisions

¹³⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Root_complex



Εικόνα 61. Παράδειγμα τοπολογίας PCIe. Τα λευκά κουτιά συνένωσης αναπαριστούν τους διακόπτες ροής δεδομένων προς τις συσκευές ενώ τα γκρι από τις συσκευές¹³⁵.

Στο πρωτόκολλο της PCIe η επικοινωνία γίνεται μέσω πακέτων. Τα πακέτα δεδομένων σχηματίζονται (ενοποίηση ενός συνόλου δεδομένων) ή αποσχηματίζονται (αποσχηματισμός δεδομένων έγκλειστων αρχικά σε ένα πακέτο) στο transaction layer (επίπεδο συναλλαγής) της PCIe θύρας, καθώς επίσης εκεί γίνεται και η διαχείριση της κυκλοφορίας των δεδομένων και η κατάσταση αυτής.

Ενδιαφέρον κομμάτι της τοπολογίας αυτής αποτελεί ότι είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν τόσο συσκευές μικρών πλατών όπου το υψηλό data throughput δεν είναι αναγκαίο, αλλά και συσκευές με πολύ σημαντική απόδοση (όπως κάρτες γραφικών ή κάρτες δικτύου πχ 10 Gigabit Ethernet), καθώς τα πλάτη κυμαίνονται στα x1, x4, x8, x12, x16, x32 και η αναγνώριση των ενεργών γραμμών επικοινωνίας γίνεται δυναμικά κατά την αρχικοποίηση της συσκευής (κάρτες μικρότερου πλάτους μπορούν να εισαχθούν σε θύρες μεγαλύτερου πλάτους).

3.3. Εταιρείες GPU

Πολλές εταιρείες έχουν παράγει GPU με διάφορες εμπορικές ονομασίες. Το 2009 η Intel, η Nvidia και η AMD/ ATI ήταν οι ηγέτες της συγκεκριμένης αγοράς, με μερίδια αγοράς

¹³⁵https://en.wikipedia.org/wiki/PCI_Express#History_and_revisions

49,4%, 27,8% και 20,6% αντίστοιχα. Ωστόσο αυτοί οι αριθμοί περιλαμβάνουν τις ενσωματωμένες λύσεις γραφικών της Intel ως GPU. Αν δεν υπολογίσουμε αυτές τότε η Nvidia και η AMD κατέχουν σχεδόν το 100% της αγοράς από το 2018. Τα αντίστοιχα μερίδιά τους είναι 66% και 33%. Επιπλέον η S3 Graphics και η Matrox παράγουν μονάδες GPU. Τα σύγχρονα smartphones χρησιμοποιούν επίσης κυρίως Adreno GPUs της Qualcomm, PowerVR GPUs από την Imagination Technologies και Mali GPUs από την ARM.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2012 κι έπειτα οι κάρτες γραφικών εξελίχθηκαν σε συστήματα υψηλής παραλληλοποίησης έχοντας πολλαπλούς πυρήνες και επιτρέποντας την πολύ αποδοτική διαχείριση τεράστιων block δεδομένων. Ο σχεδιασμός αυτός είναι αποδοτικότερο από εκείνον των γενικού σκοπού CPUs για αλγορίθμους και καταστάσεις επεξεργασίας μεγάλων πακέτων δεδομένων τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν παράλληλα¹³⁶. Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι τα παρακάτω:

- αλγόριθμος μέγιστης ροής push-rebel
- Γρήγοροι αλγόριθμοι ταξινόμησης μεγάλων λιστών
- Αλγόριθμοι γρήγορων δυσδιάστατων μετασχηματισμών κύματος
- προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής
- μηχανική μάθηση

3.4. Υπολογιστικές Λειτουργίες

Οι σύγχρονες μονάδες GPU χρησιμοποιούν τα περισσότερα από τα τρανζίστορ για να κάνουν υπολογισμούς που σχετίζονται με 3D γραφικά υπολογιστή. Εκτός από το υλικό 3D, οι σημερινές GPU περιλαμβάνουν βασικές δυνατότητες επιτάχυνσης 2D και framebuffer (συνήθως με λειτουργία συμβατότητας VGA). Στις νεότερες κάρτες, όπως η AMD / ATI HD5000-HD7000, δεν υπάρχει καν επιτάχυνση 2D. Πρέπει να εξομοιωθεί με υλικό 3D. Οι GPU χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την επιτάχυνση της μνημοβόρας εργασίας της χαρτογράφησης υφής (texture mapping) και για την απόδοση πολυγώνων (rendering of polygons), ενώ αργότερα προστέθηκαν μονάδες για την επιτάχυνση των γεωμετρικών υπολογισμών όπως η περιστροφή (rotation) και η μετάφραση (translation) κορυφών σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Οι πρόσφατες εξελίξεις στις GPU περιλαμβάνουν υποστήριξη για προγραμματιζόμενους shaders που μπορούν να χειριστούν κορυφές και υφές με πολλές από τις ίδιες λειτουργίες που υποστηρίζονται από CPU,

¹³⁶<https://en.wikipedia.org/wiki/CUDA>

τεχνικές υπερδειγματοληψίας (oversampling) και παρεμβολής (interpolation) για να μειώσουν το aliasing και χώρους χρωμάτων πολύ υψηλής ακρίβειας. Επειδή οι περισσότεροι από αυτούς τους υπολογισμούς περιλαμβάνουν λειτουργίες με πίνακες και διανύσματα, οι μηχανικοί και οι επιστήμονες έχουν μελετήσει όλο και περισσότερο τη χρήση των GPU για μη γραφικούς υπολογισμούς. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για άλλα εντονότατα παράλληλα προβλήματα.

Με την εμφάνιση της βαθιάς μάθησης (deep learning) η σημασία των GPUs έχει αυξηθεί. Σε έρευνα που έγινε από τον Indigo, διαπιστώθηκε ότι, κατά την εκπαίδευση νευρικών δικτύων βαθιάς μάθησης, οι GPU μπορούν να είναι 250 φορές γρηγορότερες από τις CPU. Η εκρηκτική ανάπτυξη της βαθιάς μάθησης τα τελευταία χρόνια αποδίδεται στην εμφάνιση μονάδων GPU γενικού σκοπού. Υπήρξε κάποιο επίπεδο ανταγωνισμού στον τομέα αυτό με τα ASIC, κυρίως την Μονάδα επεξεργασίας Tensor (Tensor Processing Unit – TPU) της Google. Ωστόσο, αυτές απαιτούν αλλαγές στον υπάρχοντα κώδικα και οι GPU εξακολουθούν να είναι πολύ δημοφιλείς.

3.5. Μορφές GPU

Υπάρχουν διάφορες μορφές GPUs με την σημαντικότερη από αυτές στην τρέχουσα εργασία τις GPUs Γενικού Σκοπού (General Purpose Computing GPUs – GPGPUs) και Stream Processing. Αναφορικά έχουμε τις παρακάτω:

- **Αφιερωμένες ή διακριτές κάρτες γραφικών (Dedicated or Discrete):** Συνδέονται με την μητρική κάρτα μέσω PCIe ή AGP θυρών με ελάχιστες πλέον να συνδέονται μέσω απλής PCI (περιορισμένου bandwidth). Οι κάρτες αυτές έχουν δική τους RAM αφιερωμένη στις λειτουργίες των καρτών (εξού και το dedicated). Διάφορες τεχνολογίες αυτής της κατηγορίας επιτρέπουν τον ταυτόχρονο σχεδιασμό εικόνων από δύο ή περισσότερες κάρτες σχετικά με την ίδια οθόνη, αυξάνοντας έτσι την επεξεργαστική ισχύ που είναι διαθέσιμη για τα γραφικά
- **Ολοκληρωμένες GPUs (IGPUs):** χρησιμοποιούν ένα ποσοστό της RAM του συστήματος. Μπορούν να είναι ενσωματωμένες πάνω στην motherboard ή ακόμα και στο ίδιο die της CPU, με εξαίρεση κάποιες IGPUs της AMD που έχουν ξεχωριστή μνήμη. Αποτελούν τις συνηθέστερες GPUs μιας και είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τις dedicated, με λιγότερες όμως δυνατότητες.
- **Υβριδικές GPUs:** Ανταγωνίζονται σε χαμηλό κόστος τις IGPUs στα φθηνά desktops και notebooks. Είναι λίγο ακριβότερες από τις ολοκληρωμένες κάρτες γραφικών αλλά πολύ φθηνότερες από τις Dedicated GPUs. Μοιράζονται μνήμη με το σύστημα και

έχουν μικρή dedicated cache μνήμη ώστε να βελτιώνουν την απόδοση που χάνεται λόγω της καθυστέρησης της RAM του συστήματος.

- **Εξωτερικές GPUs (External GPUs – eGPUs):** πρόκειται για εξωτερικές του κυρίως συστήματος του υπολογιστή κάρτες και χρησιμοποιούνται συνήθως σε Laptops, μιας και αυτή η κατηγορία υπολογιστών παρά τα άλλα καλά χαρακτηριστικά της (RAM, CPU κλπ) συνήθως υπολείπεται σε επιδόσεις GPU (συνήθως για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας). Για τον λόγο αυτό συνδέονται eGPUs σε θύρες που σχετίζονται με τον δίαυλο PCI Express.

3.5.1. GPUs Γενικού Σκοπού (GPGPUs) και Επεξεργασία Ρεύματος Δεδομένων (STREAM Processing)

Γίνεται όλο και πιο σύνηθες να χρησιμοποιεί κανείς GPGPU ως τροποποιημένη μορφή επεξεργαστή ρεύματος δεδομένων (ή επεξεργαστή διανύσματος δεδομένων – Vector processor) στα compute Kernels^{137,138}. Τα compute kernels ή είναι ρουτίνες που σχετίζονται με υψηλού throughput (μεγάλου όγκου επεξεργασίας) κομμάτια προγράμματος που ξεχωρίζουν από το κυρίως πρόγραμμα. Πολλές φορές καλούνται και Compute Shaders λόγω του ότι μοιράζονται επεξεργαστικές μονάδες με τους Vertex Shaders και Pixel Shaders. Αυτή η ιδέα μετατρέπει τη μαζική υπολογιστική ενός pipeline σύγχρονου επιταχυντή γραφικών σε υπολογιστική ισχύ γενικού σκοπού, σε αντίθεση με την περίπτωση μιας κλασικής κάρτας γραφικών που έχει hard-wired λειτουργίες που αφορούν γραφικές πράξεις. Σε ορισμένες εφαρμογές που απαιτούν τεράστιο όγκο λειτουργιών διανύσματος δεδομένων, αυτό μπορεί να αποδώσει μερικές τάξεις μεγέθους υψηλότερη απόδοση από μια συμβατική CPU. Οι δύο μεγαλύτερες σχεδιάστριες εταιρείες διακριτών GPUs (βλ. "Αφιερωμένες κάρτες γραφικών" παραπάνω), η AMD και η Nvidia, αρχίζουν να ακολουθούν αυτήν την προσέγγιση σε μια σειρά εφαρμογών. Τόσο η Nvidia όσο και η AMD συνεργάστηκαν με το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ για να δημιουργήσουν έναν client που βασίζεται σε GPU για το έργο κατανεμημένου υπολογισμού Folding @ home, σχετικά με υπολογισμούς αναδίπλωσης πρωτεϊνών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η GPU κάνει υπολογισμούς σαράντα φορές ταχύτερα από τις συμβατικές CPU που χρησιμοποιούνται συνήθως από τέτοιες εφαρμογές.

¹³⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Stream_processing

¹³⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/General-purpose_computing_on_graphics_processing_units

Οι GPGPUs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλούς τύπους ενοχλητικά παράλληλων εργασιών (Embarrassingly Parallel Tasks)¹³⁹, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης ακτίνων (ray tracing). Είναι γενικά κατάλληλα για υπολογισμούς τύπου υψηλής απόδοσης (high-throughput) που παρουσιάζουν παραλληλισμό δεδομένων για να εκμεταλλευτούν την αρχιτεκτονική SIMD ευρέος πλάτους διανύσματος της GPU.

Επιπλέον, οι υπολογιστές υψηλής απόδοσης που βασίζονται σε GPU αρχίζουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην μεγάλης κλίμακας μοντελοποίηση (large-scale modelling). Τρεις από τους 10 πιο ισχυρούς υπερυπολογιστές στον κόσμο εκμεταλλεύονται την επιτάχυνση της GPU.

Η GPU υποστηρίζει επεκτάσεις API στη γλώσσα προγραμματισμού C όπως OpenCL και OpenMP. Επιπλέον, κάθε εταιρεία GPU εισήγαγε το δικό της API που λειτουργεί μόνο με τις κάρτες τους, AMD APP SDK και CUDA από την AMD και την Nvidia, αντίστοιχα. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν σε ένα κανονικό πρόγραμμα C να τρέχει συγκεκριμένες λειτουργίες που ονομάζονται υπολογιστικοί πυρήνες (compute kernels) ώστε να δρομολογούνται προς επεξεργασία στους επεξεργαστές ροής (stream processors) της GPU. Αυτό καθιστά δυνατό για τα προγράμματα C να εκμεταλλευτούν την ικανότητα της GPU να λειτουργεί σε παράλληλα μεγάλα buffers ενώ ταυτόχρονα να χρησιμοποιούν την CPU όταν χρειάζεται. Το CUDA είναι επίσης το πρώτο API (application program interface) που επιτρέπει στις εφαρμογές που βασίζονται σε CPU να έχουν άμεση πρόσβαση στους πόρους μιας GPU για υπολογισμούς γενικού σκοπού χωρίς τους περιορισμούς χρήσης ενός γραφικού API.

Από το 2005 υπήρξε ενδιαφέρον να αξιοποιηθούν οι επιδόσεις που προσφέρονται από τις GPU για εξελικτικούς υπολογισμούς (evolutionary computation)¹⁴⁰ γενικά καθώς και για την επιτάχυνση της αξιολόγησης της φυσικής κατάστασης στον γενετικό προγραμματισμό ειδικότερα. Οι περισσότερες προσεγγίσεις μεταγλωττίζουν (compile) γραμμικά ή δενδρικά προγράμματα στο κεντρικό υπολογιστή και μεταφέρουν το εκτελέσιμο αρχείο στη GPU που πρόκειται να εκτελεστεί. Συνήθως, το πλεονέκτημα απόδοσης επιτυγχάνεται μόνο εκτελώντας το μοναδικό ενεργό πρόγραμμα ταυτόχρονα σε πολλά παραδειγματικά προβλήματα παράλληλα, χρησιμοποιώντας την SIMD αρχιτεκτονική της GPU. Ωστόσο, ουσιαστική επιτάχυνση μπορεί επίσης να επιτευχθεί με την μη μεταγλώττιση των

¹³⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Embarrassingly_parallel

¹⁴⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_computation

προγραμμάτων και, αντίθετα, με τη μεταφορά τους στη GPU, ώστε να ερμηνευτούν εκεί. Η επιτάχυνση μπορεί στη συνέχεια να επιτευχθεί είτε με την ταυτόχρονη μεταγλώττιση πολλών προγραμμάτων, με ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών παραδειγματικών προβλημάτων, είτε με συνδυασμούς και των δύο. Μια σύγχρονη GPU μπορεί εύκολα να μεταγλωττίσει ταυτόχρονα εκατοντάδες χιλιάδες πολύ μικρά προγράμματα.

Ορισμένες σύγχρονες μονάδες GPU, όπως οι κάρτες γραφικών Nvidia Quadro που χρησιμοποιούν τις αρχιτεκτονικές Volta και Turing, διαθέτουν αφιερωμένους πυρήνες επεξεργασίας για εφαρμογές βαθιάς μάθησης που βασίζονται σε tensor. Στην τρέχουσα σειρά GPU των Nvidia, αυτοί οι πυρήνες ονομάζονται Tensor Cores [78]. Αυτές οι GPUs έχουν συνήθως σημαντικές αυξήσεις της απόδοσης FLOPS (floating point operations per second), χρησιμοποιώντας πολλαπλασιασμό και διαίρεση πινάκων 4x4, με αποτέλεσμα την απόδοση υλικού έως 128 TFLOPS σε ορισμένες εφαρμογές. Αυτοί οι tensor πυρήνες τείνουν επίσης να εμφανίζονται σε κάρτες καταναλωτών που λειτουργούν με την αρχιτεκτονική Turing και πιθανώς στη σειρά καταναλωτικών καρτών Navi της AMD.

3.6. CUDA

Η CUDA είναι μια παράλληλη υπολογιστική πλατφόρμα και μοντέλο διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface – API) που δημιουργήθηκε από την Nvidia¹⁴¹. Επιτρέπει στους προγραμματιστές λογισμικού και στους μηχανικούς λογισμικού να χρησιμοποιούν μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU) με δυνατότητα για γενική επεξεργασία - μια προσέγγιση που ονομάζεται GPGPU (υπολογισμός γενικής χρήσης σε μονάδες επεξεργασίας γραφικών), δίνοντας έτσι την δυνατότητα γρηγορότερης εκτέλεσης υπολογιστικά απαιτητικών εφαρμογών αξιοποιώντας την ισχύ των GPUs όσον αφορά το παραλληλοποιήσιμο μέρος των υπολογισμών¹⁴². Η πλατφόρμα CUDA είναι ένα layer λογισμικού το οποίο δίνει άμεση πρόσβαση στο εικονικό σύνολο εντολών της GPU καθώς και σε υπολογιστικά στοιχεία, με στόχο την εκτέλεση υπολογιστικών πυρήνων (compute kernels – βλ. Κεφ. Καρτών γραφικών).

Η πλατφόρμα CUDA έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με γλώσσες προγραμματισμού όπως C, C++ και Fortran. Αυτή η προσβασιμότητα διευκολύνει τους ειδικούς στον παράλληλο προγραμματισμό να χρησιμοποιούν πόρους GPU, σε αντίθεση με τα προηγούμενα API όπως το Direct3D και το OpenGL, τα οποία απαιτούσαν προηγμένες

¹⁴¹<https://en.wikipedia.org/wiki/CUDA>

¹⁴²<https://www.infoworld.com/article/3299703/what-is-cuda-parallel-programming-for-gpus.html>

δεξιότητες στον προγραμματισμό γραφικών. Επίσης, η CUDA υποστηρίζει πλαίσια προγραμματισμού όπως OpenACC και OpenCL. Όταν παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τη Nvidia, το όνομα CUDA ήταν ένα αρκτικόλεξο για την Compute Unified Device Architecture, αλλά η Nvidia στη συνέχεια απέρριψε τη χρήση του ακρωνυμίου.

3.6.1. Προγραμματιστικές Δυνατότητες

Η πλατφόρμα CUDA είναι προσβάσιμη από τους προγραμματιστές λογισμικού μέσω CUDA-Accelerated libraries (βιβλιοθήκες προγραμματισμού), οδηγών μεταγλωττισμού όπως είναι ο OpenACC και επεκτάσεων σε εμπορικές τυποποιημένες γλώσσες προγραμματισμού συμπεριλαμβανομένων των C, C++ και Fortran. Οι προγραμματιστές C/C++ μπορούν να χρησιμοποιούν το 'CUDA C/C++' το οποίο έχει μεταγλωττιστεί με nvcc, τον βασισμένο σε LLVM μεταγλωττιστή C/C++ της Nvidia. Οι προγραμματιστές Fortran μπορούν να χρησιμοποιήσουν το 'CUDA Fortran', το οποίο μεταγλωττίζεται με τον PGI CUDA Fortran compiler από το The Portland Group.

Εκτός των βιβλιοθηκών και των παραπάνω οδηγών μεταγλωττισμού η πλατφόρμα CUDA υποστηρίζει και άλλες υπολογιστικές διεπαφές (interfaces), συμπεριλαμβανομένων των OpenCL της Kronos Group, DirectCompute της Microsoft, OpenGL Compute Shaders και C++ AMP. Επίσης διαθέσιμα είναι και πακέτα άλλων εταιρειών για Python, Perl, Fortran, Java, Ruby, Lua, Common Lisp, Haskell, R, MATLAB, IDL, Julia και Mathematica.

Το CUDA παρέχει τόσο API χαμηλού επιπέδου (API Driver CUDA, μη ενιαία πηγή) όσο και API υψηλότερου επιπέδου (CUDA Runtime API, μονής πηγής). Το αρχικό CUDA SDK δημοσιοποιήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2007, για τα Microsoft Windows και το Linux. Η υποστήριξη Mac OS X προστέθηκε αργότερα στην έκδοση 2.0, η οποία αντικαθιστά το beta που κυκλοφόρησε στις 14 Φεβρουαρίου 2008. Το CUDA συνεργάζεται με όλες τις GPU της Nvidia από τη σειρά G8x, συμπεριλαμβανομένων των GeForce, Quadro και της σειράς Tesla. Το CUDA είναι συμβατό με τα περισσότερα τυπικά λειτουργικά συστήματα. Η Nvidia δηλώνει ότι τα προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί για τη σειρά G8x θα λειτουργήσουν επίσης χωρίς τροποποίηση σε όλες τις μελλοντικές κάρτες γραφικών Nvidia, λόγω δυαδικής συμβατότητας.

3.6.2. Τρέχουσες και Μελλοντικές Χρήσεις της Αρχιτεκτονικής CUDA

Έχει χρησιμοποιηθεί στην υπολογιστική επιτάχυνση κατά μία ή περισσότερων τάξεων μεγέθους διάφορων μη γραφικών εφαρμογών:

- Υπολογιστική βιολογίας (computational biology – bioinformatics πχ NGS DNA Sequencing BarraCUDA)
- Υπολογιστική Χημείας
- Υπολογιστική Οικονομίας
- Προσομοίωση φυσικών φαινομένων, Υπολογιστική Μηχανικής Ρευστών και Υπολογιστική Δομικής Μηχανικής, Υπολογιστική Μηχανικής Μορίων
- Επιστήμη Δεδομένων
- Άμυνα, συλλογή πληροφοριών, ασφάλεια
- Αυτοματοποίηση σχεδιασμού ηλεκτρικών κυκλωμάτων
- Απεικόνιση και Όραση Υπολογιστών
- Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων και Μηχανική Μάθηση γενικότερα
- Ιατρική Απεικόνιση και προσομοίωσης Ιατρικής ανάλυσης (πχ εικονική πραγματικότητα βασισμένη σε εικόνες αξονικής ή μαγνητικής τομογραφίας)
- Ανάλυση Αριθμών
- Μοντελοποίηση Καιρού, κλίματος και ωκεανών
- Κρυπτογραφία
- Βιομηχανία/Αρχιτεκτονική, Engineering και κατασκευή
- Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης και διασκέδαση, Επιταχυνόμενο rendering των 3D Γραφικών, επιταχυνόμενη αλληλομετατροπή των μορφών αρχείων βίντεο (animation, modeling, rendering, color correction, grain management, compositing, effects, editing, encoding and digital distribution, on-air graphics, on-set review and stereo tools, weather graphics)
- Μελέτη και εξόρυξη καυσίμων
- Έρευνα γενικότερα
- Επιταχυνόμενα Encryption, Decryption και Compression
- Κατανεμημένοι υπολογισμοί, όπως για παράδειγμα η πρόβλεψη της φυσικής διαμόρφωσης των πρωτεϊνών
- Αναγνώριση προσώπων
- Εξόρυξη Κρυπτονομισμάτων
- BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing)¹⁴³
- Seti@home¹⁴⁴
- Structure from Motion (SfM) software¹⁴⁵

¹⁴³https://en.wikipedia.org/wiki/Berkeley_Open_Infrastructure_for_Network_Computing

¹⁴⁴<https://en.wikipedia.org/wiki/SETI@home>

3.6.3. Πλεονεκτήματα

Η πλατφόρμα CUDA έχει διάφορα πλεονεκτήματα συγκριτικά με την παραδοσιακή υπολογιστική γενικού σκοπού σε GPUs (GPGPU) χρησιμοποιώντας APIs γραφικών:

- Διάσπαρτη ανάγνωση: ο κώδικας μπορεί να διαβάσει από αυθαίρετες διευθύνσεις στην μνήμη
- Ενιαία εικονική μνήμη (από το CUDA 4.0 κι έπειτα)
- Ενιαία μνήμη (από το CUDA 6.0 κι έπειτα)
- Κοινόχρηστη μνήμη: το CUDA εκθέτει μια περιοχή κοινής μνήμης που μπορεί να διαμοιραστεί μεταξύ των νημάτων (threads). Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσωρινή μνήμη που διαχειρίζεται ο χρήστης, επιτρέποντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης από ό, τι είναι δυνατό χρησιμοποιώντας αναζητήσεις υφής.
- Ταχύτερη λήψη και ανάγνωση από και προς τη GPU
- Πλήρης υποστήριξη για λειτουργίες ακέραιων και δυαδικών αριθμών, συμπεριλαμβανομένων αναζητήσεων υφής ακέραιων αριθμών

3.6.4. Περιορισμοί

Είτε για τον κεντρικό υπολογιστή είτε για τη συσκευή GPU, όλος ο πηγαίος κώδικας CUDA επεξεργάζεται πλέον σύμφωνα με τους κανόνες σύνταξης C ++. Αυτό δεν συνέβαινε πάντοτε. Οι παλαιότερες εκδόσεις του CUDA βασίστηκαν στους κανόνες σύνταξης C. Όπως συμβαίνει με τη γενικότερη περίπτωση της μεταγλώττισης κώδικα C με έναν μεταγλωττιστή C ++, είναι συνεπώς πιθανό ότι ο παλιός πηγαίος κώδικας CUDA στυλ C είτε θα αποτύχει να μεταγλωττιστεί είτε δεν θα συμπεριφέρεται όπως είχε αρχικά προοριστεί.

- Η διαλειτουργικότητα με τις γλώσσες rendering, όπως το OpenGL, είναι μονόδρομη, με το OpenGL να έχει πρόσβαση σε καταχωρημένη μνήμη CUDA, αλλά η CUDA δεν έχει πρόσβαση στη μνήμη OpenGL.
- Η αντιγραφή μεταξύ της μνήμης του κεντρικού υπολογιστή και της συσκευής ενδέχεται να επιδεινωθεί λόγω του εύρους ζώνης του διαύλου συστήματος και της καθυστέρησης (αυτό μπορεί να μετριαστεί εν μέρει με ασύγχρονες μεταφορές μνήμης, που χειρίζεται ο κινητήρας DMA της GPU)
- Τα νήματα (threads) θα πρέπει να εκτελούνται σε ομάδες τουλάχιστον των 32 για καλύτερη απόδοση, με τον συνολικό αριθμό των νημάτων να αριθμείται στις χιλιάδες.

¹⁴⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion

Οι διακλαδώσεις (branches) στον κώδικα του προγράμματος δεν επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση, με την προϋπόθεση ότι κάθε ένα από τα 32 νήματα παίρνει την ίδια διαδρομή εκτέλεσης. Το μοντέλο εκτέλεσης SIMD γίνεται ένας σημαντικός περιορισμός για κάθε εγγενώς διαφορετική εργασία (π.χ. μετακίνηση μιας δομής δεδομένων διαχωρισμού χώρου κατά την ανίχνευση ακτίνων).

- Σε αντίθεση με το OpenCL, οι μονάδες GPU με δυνατότητα CUDA διατίθενται μόνο από τη Nvidia. [18]
- Δεν υπάρχουν λειτουργίες εξομοίωσης ή εφεδρείας για σύγχρονες αναθεωρήσεις (Revisions).
- Έγκυρος κώδικας C++ μπορεί μερικές φορές να επισημανθεί (flagged) και να αποτραπεί ο μεταγλωττισμός του εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο ο μεταγλωττιστής προσεγγίζει τη βελτιστοποίηση για τους περιορισμούς της συσκευής προορισμού GPU.
- Οι λειτουργίες C++ run-time type information (RTTI) και C++ style exception handling υποστηρίζονται μόνο στον κώδικα του host, και όχι στον κώδικα της συσκευής.
- Στις συσκευές πρώτης γενιάς CUDA υπολογιστικής ικανότητας 1.x απλής ακρίβειας, οι denormal αριθμοί δεν υποστηρίζονται και μηδενίζονται, και οι ακρίβειες των πράξεων της διαίρεσης και της τετραγωνικής ρίζας είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τα μαθηματικά απλής ακρίβειας που είναι συμβατά με το πρότυπο IEEE 754. Οι συσκευές που υποστηρίζουν υπολογιστική ικανότητα από 2.0 και πάνω υποστηρίζουν denormal αριθμούς και οι πράξεις της διαίρεσης και της τετραγωνικής ρίζας είναι συμβατές με το IEEE 754 από προεπιλογή. Ωστόσο, οι χρήστες μπορούν να αποκτήσουν το προηγούμενο γρηγορότερο μαθηματικά συσκευών υπολογιστικών δυνατοτήτων 1.x, εάν θέλουν, θέτοντας σημαίες μεταγλωττιστή για να απενεργοποιήσουν ακριβείς διαιρέσεις και ακριβείς τετραγωνικές ρίζες και να επιτρέψουν την απόρριψη των denormal αριθμών θέτοντάς τους στο μηδέν.

3.6.5. GPUs που Υποστηρίζουν CUDA

Οι GPUs που υποστηρίζονται από την πλατφόρμα CUDA είναι οι παρακάτω:

- CUDA SDK 1.0 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 1.1 (Tesla)[20]
- CUDA SDK 1.1 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 1.1+x (Tesla)

- CUDA SDK 2.0 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 1.1+x (Tesla)
- CUDA SDK 2.1 – 2.3.1 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 1.3 (Tesla)
- CUDA SDK 3.0 – 3.1 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 2.0 (Tesla, Fermi)
- CUDA SDK 3.2 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 2.1 (Tesla, Fermi)
- CUDA SDK 4.0 – 4.2 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 2.1+x (Tesla, Fermi)
- CUDA SDK 5.0 – 5.5 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 2.1+x (Tesla, Fermi)
- CUDA SDK 6.0 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.0 – 3.5 (Tesla, Fermi, Kepler)
- CUDA SDK 6.5 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.1 – 5.x (Tesla, Fermi, Kepler, Maxwell). Τελευταία έκδοση με υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 1.x (Tesla)
- CUDA SDK 7.0 – 7.5 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 2.0 – 5.x (Fermi, Kepler, Maxwell)
- CUDA SDK 8.0 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 2.0 – 6.x (Fermi, Kepler, Maxwell, Pascal). Τελευταία έκδοση με υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 2.x (Fermi)
- CUDA SDK 9.0 – 9.2 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 3.0 – 7.2 (Kepler, Maxwell, Pascal, Volta)
- CUDA SDK 10.0 – 10.1 υποστήριξη για υπολογιστική ικανότητα κατηγορίας 3.0 – 7.5 (Kepler, Maxwell, Pascal, Volta, Turing)

4. COMPUTER CLUSTERS (ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ) ΚΑΙ ΤΟ PROJECT BEOWULF

Ένα σύμπλεγμα (cluster) Beowulf είναι ένα σύμπλεγμα υπολογιστών εμπορικού επιπέδου συνήθως πανομοιότυποι, που είναι δικτυωμένοι σε ένα μικρό τοπικό δίκτυο με εγκατεστημένες βιβλιοθήκες και προγράμματα που επιτρέπουν την κοινή χρήση της επεξεργασίας μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι ένα υψηλής απόδοσης παράλληλο σύμπλεγμα υπολογιστών από φθινό υλικό προσωπικών υπολογιστών¹⁴⁶.

Το όνομα Beowulf αναφερόταν αρχικά σε έναν συγκεκριμένο υπολογιστή που φτιάχτηκε το 1994 από τους Thomas Sterling και Donald Becker στη NASA. Το όνομα "Beowulf" προέρχεται από το παλιό αγγλικό επικό ποίημα με το ίδιο όνομα. Κανένα συγκεκριμένο κομμάτι λογισμικού δεν ορίζει ένα σύμπλεγμα ως Beowulf. Τα Beowulf Clusters εκτελούν συνήθως ένα λειτουργικό σύστημα που μοιάζει με Unix, όπως το BSD, το Linux ή το Solaris, που συνήθως κατασκευάζονται από δωρεάν λογισμικό ανοικτού κώδικα. Στα συστήματα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες παράλληλης επεξεργασίας που περιλαμβάνουν το Interface Passing Interface (MPI) και την Παράλληλη Εικονική Μηχανή (PVM). Και οι δύο επιτρέπουν στον προγραμματιστή να καταμερήσει την εργασία σε ένα σύνολο δικτυωμένων υπολογιστών και να συλλέξει τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Παραδείγματα λογισμικού MPI περιλαμβάνουν το Open MPI ή το MPICH. Υπάρχουν πρόσθετες εφαρμογές MPI διαθέσιμες στο ευρύ κοινό. Από το 2014, τα συστήματα Beowulf λειτουργούν παγκοσμίως, κυρίως για την υποστήριξη της επιστημονικής πληροφορικής.

4.1. Περιγραφή και Ανάπτυξη

Μία περιγραφή του Beowulf Cluster από το πρωτότυπο "how-to" που δημοσιεύτηκε από τους Jacek Radajewski και Douglas Eadline κάτω από το Linux Documentation Project το 1998 είναι η παρακάτω:

Το Beowulf είναι μια αρχιτεκτονική πολλαπλών υπολογιστών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράλληλους υπολογισμούς. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο αποτελείται συνήθως από έναν κόμβο διακομιστή (server node) και έναν ή περισσότερους κόμβους πελάτη (client nodes) συνδεδεμένους μέσω Ethernet ή άλλου δικτύου. Είναι ένα σύστημα που έχει κατασκευαστεί με βασικά συνηθισμένα εμπορικά εξαρτήματα, όπως κάθε υπολογιστή ικανός να τρέχει λειτουργικό σύστημα τύπου Unix, με τυπικούς

¹⁴⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Beowulf_cluster

προσαρμογείς Ethernet και διακόπτες (switches). Δεν περιέχει καθόλου προσαρμοσμένα hardware components και είναι εύκολα αναπαραγώγιμο. Το Beowulf χρησιμοποιεί επίσης λογισμικό βασικών προϊόντων όπως το λειτουργικό σύστημα FreeBSD, Linux ή Solaris, το Parallel Virtual Machine (PVM) και το Interface Passing Interface (MPI). Ο κόμβος του διακομιστή ελέγχει ολόκληρο το σύμπλεγμα και διαμοιράζει αρχεία στους κόμβους του πελάτη. Είναι επίσης η κονσόλα του συμπλέγματος και η πύλη προς τον έξω κόσμο. Οι μεγάλες μηχανές Beowulf ενδέχεται να έχουν περισσότερους από έναν κόμβους διακομιστών και, ενδεχομένως, και άλλους κόμβους που είναι αφιερωμένοι σε συγκεκριμένες εργασίες, όπως π.χ. κονσόλες ή σταθμοί παρακολούθησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κόμβοι πελάτη σε ένα σύστημα Beowulf είναι «χαζοί», όσο πιο χαζοί είναι τόσο το καλύτερο. Οι κόμβοι πελάτες ρυθμίζονται και ελέγχονται από τον κόμβο του διακομιστή και κάνουν μόνο ό, τι τους υποδεικνύεται από αυτόν να κάνουν. Σε μια διαμόρφωση πελάτη χωρίς δίσκους, ένας κόμβος πελάτη δεν γνωρίζει καν τη διεύθυνση IP ή το όνομα του, μέχρι να του το πει ο διακομιστής.

Μία από τις κύριες διαφορές μεταξύ του Beowulf και του Cluster Of Workstations (COW) είναι ότι η Beowulf συμπεριφέρεται περισσότερο σαν μία και μόνο μηχανή και όχι σαν πολλοί σταθμοί εργασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κόμβοι των πελατών δεν διαθέτουν πληκτρολόγια ή οθόνες και έχουν πρόσβαση μόνο μέσω απομακρυσμένης σύνδεσης ή πιθανώς σειριακού τερματικού. Οι κόμβοι Beowulf μπορούν να θεωρηθούν ως μία CPU + ένα πακέτο μνήμης που μπορεί να συνδεθεί στο cluster, ακριβώς όπως μια CPU ή μια μονάδα μνήμης μπορεί να συνδεθεί σε μια μητρική πλακέτα.

Το Beowulf δεν είναι ένα ειδικό πακέτο λογισμικού, μια νέα τοπολογία δικτύου ή το τελευταίο kernel hack. Το Beowulf είναι μια τεχνολογία clustering υπολογιστών για να σχηματίσει ένα παράλληλο, εικονικό υπερυπολογιστή. Αν και υπάρχουν πολλά πακέτα λογισμικού, όπως τροποποιήσεις πυρήνα (kernel modifications), βιβλιοθήκες PVM και MPI και εργαλεία διαμόρφωσης που καθιστούν την αρχιτεκτονική Beowulf πιο γρήγορη, ευκολότερη στη διαμόρφωση και πολύ πιο χρηστική, κάποιος μπορεί να κατασκευάσει μια μηχανή κλάσης Beowulf χρησιμοποιώντας μια τυπική διανομή Linux χωρίς επιπλέον λογισμικό. Εάν έχετε δύο υπολογιστές δικτύου που μοιράζονται τουλάχιστον το /home file system μέσω NFS και εμπιστεύονται ο ένας το άλλον για την εκτέλεση απομακρυσμένων shells (rsh), τότε θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι έχετε ένα απλό, δύο κόμβων Beowulf μηχανήμα.

4.2. Λειτουργικά Συστήματα

Από το 2014 ένα πλήθος εκδόσεων Linux (Linux distributions) καθώς και τουλάχιστον ένα Berkeley Software Distribution (BSD) έχουν σχεδιαστεί για την κατασκευή Beowulf Clusters. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- MOSIX, προσανατολισμένη σε υπολογιστικά εντατικές εφαρμογές χαμηλού IO (input-output)
- ClusterKnoppix, βασισμένο στον Knoppix
- Kerrighed
- Rocks Cluster Distribution
- Scyld
- DragonFly BSD
- Quantian, ένα λειτουργικό DVD με επιστημονικής εφαρμογές, βασισμένο στο Knoppix και στο ClusterKnoppix
- KestrelHPC
- ABC GNU/Linux βασισμένο στο Ubuntu
- Kentucky Linux Athlon Testbed
- PelicanHPC, βασισμένο στο Debian Live

Ένα cluster μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας CD με bootable Knoppix σε συνδυασμό με το OpenMosix. Οι υπολογιστές θα συνδέονται αυτόματα μαζί, χωρίς να χρειάζονται περίπλοκες ρυθμίσεις, για να σχηματίσουν ένα Beowulf cluster, χρησιμοποιώντας όλες τις CPU και RAM του cluster. Ένα Beowulf cluster είναι κλιμακώσιμο σε σχεδόν απεριόριστο αριθμό υπολογιστών, περιοριζόμενο μόνο από τα γενικά έξοδα του δικτύου.

Η παροχή λειτουργικών συστημάτων και άλλου λογισμικού για ένα Beowulf Cluster μπορεί να αυτοματοποιηθεί με τη χρήση λογισμικού, όπως το Open Source Cluster Application Resources (OSCAR). Το OSCAR εγκαθίσταται πάνω από μια τυποποιημένη εγκατάσταση μιας υποστηριζόμενης διανομής Linux στον κόμβο κεφαλής ενός cluster.

4.3. Χρήση των Beowulf Clusters

Ένα Beowulf Cluster πρακτικά είναι ένας υπερυπολογιστής που μπορεί να φτιάξει και να χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε. Πιο συγκεκριμένα ένα Beowulf Cluster είναι ένας παράλληλος υπολογιστής φτιαγμένος από συνηθισμένα εμπορικά components. Αυτή η προσέγγιση εκμεταλλεύεται την εκπληκτική απόδοση που είναι τώρα διαθέσιμη στους

εμπορικούς προσωπικούς υπολογιστές. Με πολλές μετρικές, συμπεριλαμβανομένης της υπολογιστικής ταχύτητας, του μεγέθους της κύριας μνήμης, του διαθέσιμου χώρου στο δίσκο και του εύρους ζώνης, ένας μόνο υπολογιστής του σήμερα είναι πιο ισχυρός από τους υπερυπολογιστές του παρελθόντος. Αξιοποιώντας τη δύναμη των δεκάδων χιλιάδων τέτοιων ισχυρών επεξεργαστικών στοιχείων τόσο χαμηλού κόστους, μπορεί κανείς να δημιουργήσει έναν ισχυρό υπερυπολογιστή. Μάλιστα υπάρχουν πολύ δυνατοί υπερυπολογιστές στην παγκόσμια λίστα των υπερυπολογιστών που είναι Beowulf Cluster.

Ένα Beowulf Cluster είναι μια μορφή παράλληλου υπολογιστή, που δεν είναι τίποτα περισσότερο από έναν υπολογιστή που χρησιμοποιεί περισσότερους από έναν επεξεργαστές. Υπάρχουν διάφορα είδη παράλληλων υπολογιστών, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα από τα είδη επεξεργαστών που χρησιμοποιούν καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο οι επεξεργαστές αυτοί ανταλλάσσουν δεδομένα. Ένα Beowulf Cluster εκμεταλλεύεται δύο συνήθη εμπορικά components: γρήγορες CPUs σχεδιασμένες αρχικά για την αγορά προσωπικών υπολογιστών και δίκτυα σχεδιασμένα να συνδέουν προσωπικούς υπολογιστές (σε αυτό που αποκαλείται Local Area Network – LAN). Επειδή αυτά είναι εμπορικά εξαρτήματα το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό. Όπως θα δούμε και παρακάτω υπάρχουν μερικές συνέπειες στις επιδόσεις του συστήματος και τα Beowulf Clusters δεν είναι κατάλληλα για όλα τα προβλήματα. Παρόλα αυτά για τα πολλά προβλήματα για τα οποία λειτουργούν καλά, τα Beowulf Clusters προσφέρουν μια αποδοτική και χαμηλού κόστους λύση με σκοπό την επίδοση τεράστιας υπολογιστικής ισχύος σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται εικονικά παντού. Αυτό εγείρει το παρακάτω ερώτημα: εαν τα Beowulf Clusters είναι τόσο σπουδαία γιατί δεν εμφανίστηκαν νωρίτερα;

Πολλές πρότερες προσπάθειες χρησιμοποίησαν clusters ή μικρότερα συστήματα, συνήθως workstations, σαν δομικά στοιχεία στην δημιουργία χαμηλού κόστους παράλληλων υπολογιστών. Επιπροσθέτως πολλά software projects ανέπτυξαν το βασικό λογισμικό για τον προγραμματισμό παράλληλων μηχανημάτων. Μερικά από αυτά διέθεσαν το λογισμικό τους στο ευρύ κοινό και έδωσαν έμφαση στην συμβατότητα του κώδικα, κάνοντας αυτά τα εργαλεία εύκολα συμβατά με νέα μηχανήματα. Αλλά το project που πραγματικά εκτόξευσε τα clusters ήταν το Beowulf project στο κέντρο Goddard Space Flight της NASA. Το 1994 ο Thomas Sterling, ο Donald Becker και άλλοι πήραν ένα πρότερο Linux λειτουργικό σύστημα, ανέπτυξαν λογισμικό Ethernet Driver για Linux και εγκατέστησαν το PVM (ένα λογισμικό πακέτο για προγραμματισμό σε παράλληλους υπολογιστές) σε ένα σύστημα 16 προσωπικών υπολογιστών Intel 80486 στα 100MHz. Το Cluster αυτό

χρησιμοποιούσε dual 10-Mbit Ethernet για να παρέχει βελτιωμένο bandwidth στις επικοινωνίες μεταξύ των επεξεργαστών, αλλά ήταν κατά τα άλλα πολύ απλό και πολύ χαμηλού κόστους.

Έτσι ερχόμαστε στο ερώτημα του γιατί το Beowulf project πέτυχε. Μέρος της απάντησης είναι το ότι ήταν η σωστή λύση στο σωστό χρόνο. Οι προσωπικοί υπολογιστές ξεκινούσαν να γίνονται ανταγωνιστικές υπολογιστικές πλατφόρμες (ένας 100MHz 80486 έχει γρηγορότερο ρολόι από τον αυθαιντικό Cray 1, ένα μηχάνημα που θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά πρότερα supercomputers). Η έκρηξη του μεγέθους της αγοράς των PCs μείωνε το κόστος του hardware. Ισότιμα σημαντικό παράλαυτά η δέσμευση στο Beowulf project προς παράδοση μιας λειτουργικής λύσης, όχι μόνο μιας πειραματικής ερευνητικής πλατφόρμας. Το Beowulf project δουλευόταν σκληρά προς αντιμετώπιση των πραγματικών προβλημάτων που στέκονταν στον δρόμο προς την ευρεία χρήση της τεχνολογίας Cluster για συνηθισμένα εμπορικά εξαρτήματα. Αυτή ήταν μια κρίσιμη συνεισφορά μιας και το να φτιάξει κανείς ένα αξιόπιστο και εύρωστο cluster συνήθως απαιτεί την επίλυση νέων κι ακόμα δυσκολότερων προβλημάτων. Η συνεισφορά της κοινότητας σε αυτήν την προσπάθεια, μέσω της προσφοράς λογισμικού και γενικής βοήθειας σε άλλους οι οποίοι έφτιαχναν Clusters, έκανε το Beowulf clustering συναρπαστικό.

Από την περίοδο των πρώτων Beowulf Clusters, η χρήση commodity-off-the-shelf (COTS) εξαρτημάτων (εμπορικών εύκολα αποκτήσιμων εξαρτημάτων) για την κατασκευή Clusters ξεφύτρωσε παντού. Τα Clusters βρίσκονται παντού, από τα σχολεία και τα δωμάτια φοιτητικών εστιών μέχρι τα μεγαλύτερα εργαστήρια υπολογιστών. Μεγάλα Clusters αποτελούν πλέον ένα αυξανόμενο ποσοστό των υπολογιστικών συστημάτων που βρίσκονται στην λίστα Top500 <https://en.wikipedia.org/wiki/TOP500>. Είναι εφικτό να στήσει κανείς το δικό του cluster αγοράζοντας ξεχωριστά εξαρτήματα, αλλά και αγοράζοντας ένα προσυναρμολογημένο και ελεγμένο cluster από διάφορες εταιρείες, συμπεριλαμβανομένων τόσο μεγάλων γνωστών εταιρειών υπολογιστών όσο και εταιρειών σχηματισμένων για εξειδικευμένη πώληση clusters.

4.4. Τι Είναι ένα Cluster

Πριν μιλήσουμε για cluster υπολογιστική πρέπει να ορίσουμε κάποιους την ορολογία μας. Cluster καλούμε έναν παράλληλο υπολογιστή ο οποίος είναι κατασκευασμένος από συνηθισμένα εμπορικά εξαρτήματα και τρέχει σαν software συστήματος εμπορικό

λογισμικό. Ένα cluster είναι φτιαγμένο από nodes (κόμβους), κάθε ένας από τους οποίους εμπεριέχει έναν ή περισσότερους επεξεργαστές, μνήμη η οποία είναι χρησιμοποιείται από κοινού από όλους τους υπολογιστές (και μόνο) του κόμβου και από επιπρόσθετες περιφερειακές συσκευές (όπως δίσκοι). Οι κόμβοι αυτοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε ένα δίκτυο που επιτρέπει την ροή δεδομένων μεταξύ τους.

Οι κόμβοι μπορούν να είναι διαφόρων ποικιλιών, αλλά συνήθως αποτελούνται από επεξεργαστές που έχουν σχεδιαστεί για την αγορά προσωπικών υπολογιστών. Αν ένας κόμβος εμπεριέχει περισσότερους από έναν επεξεργαστές αποκαλείται SMP (symmetric multiprocessor – συμμετρικός πολυεπεξεργαστής).

Τα δίκτυα επίσης μπορούν να είναι διαφόρων ποικιλιών. Ποικίλουν από πολύ απλά δίκτυα (και σχετικά χαμηλών επιδόσεων) βασισμένα σε επικοινωνία μέσω Ethernet, μέχρι δίκτυα υψηλών επιδόσεων σχεδιασμένα για Clusters. Τα Clusters μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: στα «φτιάξε το μόνος σου» και στα προπαρασκευασμένα. Ένα «φτιάξε το μόνος σου» cluster συναρμολογείται από τον χρήστη με την βοήθεια εμπορικών εξαρτημάτων τα οποία αγοράζονται ξεχωριστά. Ένα προπαρασκευασμένο cluster (αποκαλείται μερικές φορές και turnkey system) συναρμολογείται από κάποια εταιρεία κατασκευής clusters είτε πριν είτε μετά την παράδοση του υλικού στον πελάτη. Το τι επιλέγει κανείς εξαρτάται από τον οικονομικό του προϋπολογισμό και την ανάγκη του από βοήθεια όσον αφορά την τεχνογνωσία και την εμπειρία του χρήστη.

4.5. Χτίζοντας και Χρησιμοποιώντας ένα Cluster

Σε αυτήν την ενότητα προσεγγίζονται τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαμόρφωση, την κατασκευή και τη χρήση ενός συμπλέγματος και παρέχονται αναφορές στις αντίστοιχες ενότητες αυτού του βιβλίου. Το τμήμα 1.5 παρέχει μια εναλλακτική άποψη αυτού του βιβλίου, που οργανώνεται γύρω από συγκεκριμένες εργασίες, όπως ο προγραμματισμός ή η διαχείριση ενός cluster.

4.6. Επιλέγοντας ένα Cluster

Κατά την αρχική επιλογή των στοιχείων ενός cluster ή κατά την επιλογή από ένα προσχεδιασμένο cluster, πρέπει να εστιάσει κανείς στις εφαρμογές που θα εκτελεστούν στο σύμπλεγμα. Η παρακάτω λίστα καλύπτει ορισμένα από τα θέματα που πρέπει να εξεταστούν.

1. Κατανόηση των αναγκών της εφαρμογής. Μερικά από αυτά έχουν καλυφθεί παραπάνω. Θα βρείτε περισσότερα για την κατανόηση της απόδοσης των εφαρμογών στο Μέρος II.
2. Λήψη απόφασης ως προς τον αριθμό και τον τύπο των κόμβων. Με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής, πρέπει να επιλεγεί ένας τύπος κόμβου (π.χ., έναν επεξεργαστή ή SMP), ο τύπος επεξεργαστή και το σύστημα μνήμης. Το κεφάλαιο 2 καλύπτει το υλικό κόμβων. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο ρυθμός ρολογιού CPU δεν είναι πάντα ένας καλός οδηγός για την απόδοση, οπότε απαιτείται η καλή και πλήρης κατανόηση των εφαρμογών που θα εκτελεστούν στο cluster. Άλλα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν γίνεται η επιλογή του τύπου του επεξεργαστή είναι εάν θα εκτελεστούν στο σύστημα προεγκατεστημένες εφαρμογές που απαιτούν ένα συγκεκριμένο τύπο επεξεργαστή, αν χρειάζονται διευθύνσεις 64 ή 32 bit ή εάν ο κώδικας που θα τρέξει στο σύστημα αφορά περισσότερο σε ακεραίους ή σε αριθμούς κινητής υποδιαστολής.
3. Λήψη απόφασης σχετικά με το δίκτυο. Πρέπει να προσδιοριστεί το εάν οι εφαρμογές που θα τρέξουν στο cluster απαιτούν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο (latency) και / ή υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth) στο δίκτυο. Εάν όχι, για παράδειγμα, τρέχοντας embarrassingly parallel εφαρμογές σε έναν throughput cluster, τότε ένα απλό γρήγορο Ethernet με χαμηλού κόστους διακόπτες μπορεί να είναι επαρκές. Διαφορετικά, μπορεί να χρειαστεί να επενδύσετε σε ένα δίκτυο cluster υψηλής απόδοσης. Αυτές οι επιλογές δικτύου καλύπτονται λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 4. Σημειώστε ότι το κόστος ενός δικτύου γρήγορου Ethernet είναι πολύ χαμηλό ενώ ένα δίκτυο υψηλής απόδοσης μπορεί να διπλασιάσει το κόστος ενός cluster.
4. Απαιτείται ο προσδιορισμός των αναγκών της φυσικής υποδομής. Πόσος χώρος θα χρειαστεί; Καλύπτεται η απαιτούμενη ισχύς; Είναι η ψύξη επαρκής; Ο θόρυβος είναι παράγοντας;
5. Καθορισμός του λειτουργικού συστήματος (OS) που θα χρησιμοποιηθεί. Το Κεφάλαιο 3 παρέχει πληροφορίες σχετικά με την σωστή επιλογή συγκεκριμένης διανομής του Linux καθώς και πληροφορίες σχετικά με την κατανόηση του τρόπου ρύθμισης του Linux για το cluster. Η επιλογή του λογισμικού εγκατάστασης cluster μπορεί επίσης να επηρεάσει τη διανομή του Linux που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτό καλύπτεται στο κεφάλαιο 6. Κατά την επιλογή του λειτουργικού συστήματος, πρέπει να εξεταστούν τα εξής:
 - i. Οι εφαρμογές που θα εκτελεστούν μπορούν να τρέξουν στο επιλεγμένο σύστημα; Πολλές εφαρμογές και μοντέλα προγραμματισμού (Μέρος II)

εκτελούνται σε πολλά λειτουργικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των Windows, του Linux και άλλων μορφών Unix.

- ii. Ο χρήστης που θα λειτουργήσει το cluster έχει εμπειρία με ένα συγκεκριμένο λειτουργικό σύστημα;
 - iii. Υπάρχουν προβλήματα αδειών (κόστος αγοράς ή μίσθωσης) λογισμικού, συμπεριλαμβανομένου του λειτουργικού συστήματος και των μεταγλωττιστών;
6. Tradeoffs κόστους. Το κόστος ενός κόμβου δεν σχετίζεται γραμμικά με την απόδοση αυτού του κόμβου. Οι γρηγορότεροι κόμβοι είναι ακριβότεροι ανά φλοπ (και συνήθως ανά MByte / sec του bandwidth της μνήμης) από ότι οι κόμβοι χαμηλότερου κόστους. Το ερώτημα είναι τότε: Χρειάζεται ο προς κατασκευή cluster να χρησιμοποιεί τους γρηγορότερους διαθέσιμους κόμβους ανεξάρτητα από το κόστος ή πρέπει να χρησιμοποιεί κόμβους μεσαίου ή και χαμηλού εύρους απόδοσης; Η απάντηση εξαρτάται, όπως πάντα, από τις ανάγκες που ορίζει η χρήση του cluster:
- i. Εάν η το κόστος δεν είναι παράμετρος που απασχολεί την διαχείριση του project, τότε, όπως είναι λογικό, το καλύτερο είναι να επιλεγούν οι γρηγορότεροι κόμβοι. Αυτή η προσέγγιση θα μειώσει τον αριθμό κόμβων που απαιτούνται για κάθε δεδομένη ποσότητα υπολογιστικής ισχύος, και επομένως το πλήθος του παράλληλου overhead.
 - ii. Εάν η συνολική υπολογιστική ισχύ παρά την πάροδο του χρόνου είναι ο στόχος, τότε είναι λογικό να επιλεγούν κόμβοι μεσαίας ή χαμηλής τρέχουσας τεχνολογίας συνεπώς και κόστους, οι οποίοι όμως θα αντικαθίστανται συχνά (π.χ. κάθε 18 μήνες έως δύο χρόνια) με νεότερους κόμβους. Αυτή η στρατηγική εκμεταλλεύεται την ταχεία πρόοδο στην απόδοση των κόμβων. Η αγορά δύο κόμβων χαμηλού κόστους κάθε δύο χρόνια μπορεί να παρέχει συχνά μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ (ενσωματωμένη με την πάροδο του χρόνου) από ότι να ξοδευτεί το ίδιο ποσό κάθε τέσσερα χρόνια σε έναν κόμβο υψηλής τεχνολογίας.
 - iii. Εάν ο στόχος είναι μία συγκεκριμένη ποσότητα υπολογιστικής ισχύος (π.χ. για μια συγκεκριμένη εφαρμογή), τότε πρέπει να αναλυθούν τα tradeoffs μεταξύ μεγαλύτερου πλήθους αλλά μικρότερης απόδοσης (και πιθανώς πολύ μικρότερου κόστους) κόμβων, και ενός μικρότερου πλήθους ταχύτερων, αλλά μεμονωμένα λιγότερο αποδοτικών κόμβων.

4.7. Ετοιμασία και Ρύθμιση ενός Cluster

Αφού καθοριστεί από τι θα αποτελείται το cluster, πρέπει να συγκεντρωθούν τα εξαρτήματα και να ρυθμιστεί το αρχικό λογισμικό. Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει μεγάλα βήματα στην απλοποίηση της διαδικασίας εκκίνησης του περιβάλλοντος λογισμικού σε ένα cluster. Σε αυτό το σημείο, είναι καλό να αξιολογηθεί το cluster σύμφωνα με γνωστές εφαρμογές αξιολόγησης (διαδικασία benchmarking=συγκριτική αξιολόγηση). Δεδομένου ότι η συγκριτική αξιολόγηση θα απαιτήσει την εκτέλεση κάποιου παράλληλου προγράμματος. Εναλλακτικά, ίσως ο δημιουργός και χρήστης του cluster προτιμά να εκτελέσει κάποια προσυσκευασμένη σουίτα επιδόσεων, όπως το Beowulf Performance Suite (BPS), που διατίθεται στη διεύθυνση www.plogis.com/bps. Το BPS περιέχει τόσο δοκιμές απλής λειτουργίας όσο και παράλληλες επιδόσεις, συμπεριλαμβανομένων των εξής¹⁴⁷:

- bonnie++: I/O (disk) performance;
- www.coker.com.au/bonnie++
- Stream: Memory system performance;
- www.cs.virginia.edu/stream
- netperf: General network performance;
- www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html
- netpipe: A more detailed network performance benchmark;
- www.scl.ameslab.gov/Projects/ClusterCookbook/nprun.html
- unixbench: General Unix benchmarks;
- www.linuxdoc.org/HOWTO/Benchmarking-HOWTO.html
- LMBench: Low-level benchmarks;
- www.bitmover.com/lmbench
- NAS parallel benchmarks: A suite of parallel benchmarks derived from some important applications;

4.8. Ανάπτυξη νέων Εφαρμογών

Πριν αποφασίσει ο χρήστης να αναπτύξει νέες εφαρμογές, πρέπει να ελέγξει τι είναι ήδη διαθέσιμο για clusters. Νέες εφαρμογές αναπτύσσονται συνεχώς, γι 'αυτό πρέπει να ελεγχθεί το διαδίκτυο καθώς και οι καταλόγοι αλληλογραφίας Beowulf (Beowulf mailing lists) προτού ξεκινήσει ο χρήστης να αναπτύσσει τη δική του εφαρμογή. Προηγούμενες αναφορές έχουν παρουσιάσει τον παράλληλο προγραμματισμό, καλύπτοντας τόσο τα πιο

¹⁴⁷ www.nas.nasa.gov/Software/NPB

δημοφιλή εργαλεία για την κατασκευή embarrassingly parallel εφαρμογών, όσο και τις δύο πιο δημοφιλείς βιβλιοθήκες για παράλληλο προγραμματισμό, MPI και PVM.

4.9. Ρύθμιση των Clusters

Η αρχική ρύθμιση του cluster εξαρτάται απόλυτα από την διαχείριση του cluster). Η ρύθμισή του δεν είναι ένα γεγονός που γίνεται μια μοναδική φορά για διάφορους λόγους. Πρώτον, οι κόμβοι χαλάνε και οι κόμβοι αντικατάστασης πρέπει να είναι ενεργοποιημένοι και να τους παρέχεται το πιο πρόσφατο λογισμικό. Δεύτερον, οι clusters συχνά αναπτύσσονται προοδευτικά και απαιτούν την παροχή νέων (και μερικές φορές διαφορετικών σε χαρακτηριστικά) κόμβων κατά τη διάρκεια της ζωής ενός συστήματος. Τρίτον, το λειτουργικό σύστημα Linux εξελίσσεται αρκετά γρήγορα - με πακέτα ενημερώσεων σχεδόν κάθε δύο ημέρες - το οποίο σημαίνει ότι σε κάποιο σημείο το patching απλά δεν θα λειτουργήσει και μια γενική επανεγκατάσταση είναι απαραίτητη για να κάνει το cluster σταθερό και συνεκτικό ξανά. Συνεπώς απαιτείται ένα πραγματικό σχέδιο τόσο για τη διαχείριση όσο και για την ρύθμιση (management and setup) του συστήματος. Αυτές οι δύο πτυχές υποστηρίζουν υποστηρίζουν η μία την άλλη.

Πριν μπει κανείς σε πιο βαθιές λεπτομέρειες, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το κεφάλαιο καλύπτει τα παραδοσιακά Beowulfs όπου κάθε κόμβος έχει δίσκο και περιέχει ένα τοπικό αντίγραφο του λειτουργικού συστήματος. Εργαλειοθήκες εικόνας ενιαίου συστήματος όπως το Scyld και το SCORE έχουν τα δικά τους προσαρμοσμένα προγράμματα εγκατάστασης. Τα συστήματα χωρίς δίσκους δεν καλύπτονται σε αυτό το τμήμα.

Η ρύθμιση και η διαρκής διαχείριση του συστήματος είναι στενά συνδεδεμένες και το στυλ του διαχειριστή συχνά υπαγορεύει τον τρόπο λειτουργίας και εφοδιασμού ενός συστήματος. Σε τελική ανάλυση, τα clusters, είτε χτίστηκαν με Rocks, OSCAR, SCE, είτε με άλλα εργαλεία συστήματος λιγότερο γνωστά, έχουν πολύ παρόμοια λειτουργικότητα. Μετά από όλα, το καθένα από αυτά έχει ένα βασικό λειτουργικό σύστημα Linux, ένα σύστημα αναμονής (queuing system), το κομμάτι της επίβλεψης/παρακολούθησης (monitoring), την διαβίβαση μηνυμάτων και υποσυστήματα I/O. Το κλειδί για την αξιολόγηση καθενός από αυτά τα συστήματα στην εκάστοτε εξειδικευμένη χρήση είναι το πώς μια συγκεκριμένη προσέγγιση μειώνει το χρόνο για ζητήματα administration και αυξάνει το χρόνο πραγματικής χρήσης του cluster.

4.9.1. Προκλήσεις Παροχής Λογισμικού-Δεν Υπάρχουν Ομοιογενή Clusters

Αυτή η υποενότητα ξεκινά με μια τολμηρή πρόταση- "Δεν υπάρχουν ομοιογενείς ομάδες". Τα πρότυπα Beowulfs έχουν τουλάχιστον δύο τύπους κόμβων: τύπου login και τύπου compute, οπότε η ομοιογένεια της λειτουργίας είναι ήδη χωρισμένη. Καθώς τα clusters γίνονται μεγαλύτερα, ορισμένοι κόμβοι λαμβάνουν εξειδικευμένους ρόλους. Κόμβοι υπεύθυνοι για login συστήματος, κόμβοι υπεύθυνοι σε I/O, κόμβοι υπεύθυνοι για public login, κόμβοι υπεύθυνοι για εγκαταστάσεις προγραμμάτων είναι μόνο μερικά από τα είδη κόμβων που μπορεί να χρειαστεί να υποστηριχθούν. Η εξειδίκευση των κόμβων σε συγκεκριμένους ρόλους δεν είναι ο μόνος τρόπος με τον οποίο ένα μοντέλο ομοιογένειας μπορεί να σπάσει. Διαφορές στο hardware είναι αρκετά συχνές και συνηθισμένες κατά τον σχεδιασμό και κατά την διάρκεια της ζωής ενός cluster, όπως και στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας που χρησιμοποιούνται εξαρτήματα από διάφορους υπολογιστές διαφόρων επιδόσεων.

Παρόλο που πολλά clusters μπορούν να ξεκινήσουν με τους υπολογιστικούς κόμβους (compute nodes) να είναι ομοιογενούς τύπου υλικού, συχνά δεν παραμένουν με αυτόν τον τρόπο. Το hardware εξελίσσεται απλά πολύ γρήγορα για να περιμένει κανείς ότι οι μελλοντικές επεκτάσεις ενός cluster θα μπορούσαν να είναι ταυτόσημες με τους τρέχοντες κόμβους. Το hardware φθείρεται και χαλάει και τα ανταλλακτικά ενδέχεται να έχουν διαφορετικούς τύπους μνήμης, εξελιγμένους επεξεργαστές ή διαφορετικό προσαρμογέα δικτύου. Ακόμη και όταν όλοι οι κόμβοι αγοράζονται ταυτόχρονα σε μια προσπάθεια να διασφαλιστεί η ομοιομορφία του υλικού, οι μικρές διαφορές μπορούν να σταθούν εμπόδιο.

Ένα παράδειγμα δύσκολου problem solving αφορά ένα σύστημα το οποίο δούλευε με NT-Clusters. Για το σύστημα αυτό υπήρχαν 64 δίσκοι 9.1 GB SCSI, όλοι με τον ίδιο κωδικό και τα ίδια χαρακτηριστικά. Διέφεραν ελάχιστα, με μόνη διαφορά μεταξύ τους ότι κάποιοι είχαν 980 κυλίνδρους ενώ κάποιοι άλλοι 981. Από την σκοπιά του κατασκευαστή και οι δύο τύποι παρείχαν την διαφημιζόμενη χωρητικότητα. Το πρόβλημα προέκυψε στο imaging program (ImageCast). Κάνοντας image από δίσκο τύπου 981-κυλίνδρων δεν μπορούσε να γίνει re-image σε τύπο 981-κυλίνδρων, λόγω της μικρής αυτής διαφοράς τους. Φυσικά από τότε τα προγράμματα imaging έχουν βελτιωθεί, αλλά τέτοιου τύπου μικροδιαφορές μπορούν να προκαλέσουν πολλές χαμένες ώρες δουλειάς. Το πρόβλημα τότε λύθηκε στείνοντας το πρότυπο μοντέλο του συστήματος σε δίσκο 980 κυλίνδρων το οποίο έτυχε να λειτουργεί σε εκείνο των 981 κυλίνδρων. Αυτό ήταν πραγματικά θέμα τύχης, διότι θα μπορούσε να ήταν απαραίτητη η ύπαρξη δύο images απλά και μόνο λόγω

της διαφοράς ενός κυλίνδρου στον εκάστοτε τοπικό δίσκο. Η πραγματικότητα είναι ότι στην πλειονότητα των εξαρτημάτων υπάρχουν μικρές low level διαφορές. Αυτό πρέπει να προβλεφθεί και να είναι δυνατόν να διαχειριστεί από την αρχική ρύθμιση και την μέθοδο διαχείρισης του συστήματος (setup and management methodology) δίχως να απαιτείται παρέμβαση από administrator.

Το προηγούμενο παράδειγμα κάνει τα cluster να ακούγονται δυσοίωνα, αδύνατα να προβλεφθούν, αποδιοργανωμένα και ο αναγνώστης μπορεί να αισθάνεται ότι είναι μια απελπιστικά δύσκολο να οικοδομηθεί ένα πραγματικό, λειτουργικό και σταθερό cluster. Οι κάπως μικρές διαφορές μπορούν να προκαλέσουν όλεθρο στο στάδιο της παροχής (provisioning stage). Παρόλα αυτά δεν υπάρχει λόγος φόβου. Τα clusters βρίσκονται παντού. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται κάποια από τα γρηγορότερα μηχανήματα του κόσμου τα οποία λειτουργούν με σταθερότητα και μπορούν να διαχειρίζονται και να συντηρούνται εύκολα αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις του configuration, ελέγχοντας πολύ καλά την ανομοιογένεια τόσο σε επίπεδο λειτουργικότητας όσο και σε επίπεδο hardware.

4.9.2. Διαφοροποίηση κατά τις Λειτουργικές Γραμμές

Συνήθως, απαιτούνται διάφοροι τύποι λειτουργικότητας κατά την οικοδόμηση ενός λειτουργικού cluster. Καθώς τα clusters αναπτύσσονται ως προς τον αριθμό των κόμβων, η εξειδίκευση συγκεκριμένων κόμβων για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών γίνεται πιο συνηθισμένη. Στα μεγαλύτερα clusters, η λειτουργική εξειδίκευση των κόμβων είναι μια αναγκαιότητα. Η εξειδίκευση είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ανάγκης να κλιμακωθούν ορισμένα services. Σε ένα μικρό cluster, ο κόμβος κεφαλής (head node) μπορεί να "τα κάνει όλα" - την καταγραφή του συστήματος, την παρακολούθηση ganglia (ganglia monitoring)¹⁴⁸, να λειτουργεί ως server εγκατάστασης, να κάνει compile, login, καθώς και την εξυπηρέτηση home areas. Καθώς αυξάνεται το cluster, οι υπηρεσίες αυτές πρέπει να εξαπλωθούν σε φυσικά μηχανήματα (εξειδικευμένους κόμβους), έτσι ώστε κάθε ένας να μπορεί να χειριστεί το φορτίο.

Οποιοσδήποτε κόμβος στο σύμπλεγμα διαφοροποιείται ανάλογα με τους τύπους υπηρεσιών και λογισμικού που έχουν οριστεί και διαμορφωθεί σε αυτόν. Οι κόμβοι μπορούν να αλλάξουν τη λογική λειτουργικότητά τους απλά με την εγκατάσταση και τη

¹⁴⁸<http://ganglia.sourceforge.net>

διαμόρφωση μιας διαφορετικής στοίβας λογισμικού. Μια κοινή κατηγοριοποίηση των κόμβων σε μεσαίου μεγέθους clusters είναι η παρακάτω (εφεξής καλούμε αυτά ως appliances):

- Κόμβος Κεφαλής (Head Node) / Κόμβος Frontend: ο κόμβος αυτός είναι το «δημόσιο πρόσωπο» του cluster. Σε αυτόν συνδέονται οι χρήστες, γίνεται το compile των εφαρμογών και υποβάλλονται εργασίες.
- Κόμβος Υπολογισμών (Compute Node): σε αυτόν πραγματοποιείται το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας
- I/O Server: Συχνά πρόκειται για έναν διακομιστή NFS, αλλά σε πιο επιθετικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν PVFS
- Web Server
- System Logging Server
- Installation Server
- Grid Gateway Node
- Κόμβος χρονικής οργάνωσης πακέτων εργασιών και επίβλεψη του συνόλου του cluster (Batch Scheduler and cluster-wide monitoring)

Κατά τη δημιουργία ενός cluster, λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τον αριθμό των servers I/O, τον αριθμό των servers καταγραφής και εισόδου του συστήματος και τον αριθμό των servers εγκατάστασης που απαιτούνται για την υποστήριξη ενός δεδομένου αριθμού υπολογιστικών κόμβων. Για μικρές έως μεσαίες ομάδες (ίσως έως και 128 κόμβους), όλες οι υπηρεσίες φιλοξενούνται από έναν (ή μικρό αριθμό) front-end ή head κόμβων, έτσι δεν χρειάζεται να ληφθεί πραγματική απόφαση. Ωστόσο, ακόμη και σε ομάδες μεσαίου μεγέθους, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται συχνά στη βελτίωση της δυνατότητας διαχείρισης αρχείων παρέχοντας μια υπο-ομάδα κόμβων αφιερωμένη στην είσοδο / έξοδο. Η Chiba City στο Argonne, για παράδειγμα, έχει διαφορετικές «πόλεις» - οπτικοποίησης, αποθήκευσης και υπολογισμού- που ορίζουν σαφώς λειτουργικές διαφορές.

Στην κοινή κατασκευή cluster, δημιουργείται ένας κόμβος κεφαλής, ένα σύνολο κόμβων I / O (συλλογικά, ένα σύμπλεγμα I / O) και ένα σύνολο υπολογιστικών κόμβων. Αυτό το κεφάλαιο υποθέτει ότι αυτοί οι τύποι ταξινομήσεων "συσκευών" έχουν ήδη γίνει από τον σχεδιαστή συμπλέγματος, αλλά ότι σε αυτό το σημείο δεν έχει εγκατασταθεί ή ρυθμιστεί τίποτα.

4.9.3. Συνέπεια Λογισμικού του Συστήματος σε όλο το Cluster

Το ζήτημα που επισκιάζει όλα τα άλλα στο setup και τη διαχείριση του cluster είναι η δημιουργία και η συντήρηση ενός περιβάλλοντος λογισμικού που είναι συνεπές σε όλους τους κόμβους και τους τύπους κόμβων. Μικρές ανωμαλίες όπως οι διαφορετικές εκδόσεις της τυπικής βιβλιοθήκης C μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα επιδόσεων και ορθότητας των λειτουργιών. Ο προγραμματισμός των clusters είναι μία πρόκληση από μόνο του ώστε να μην χρειάζονται χρήστες να ανακαλύπτουν διαφορές στις συμπεριφορές των κόμβων λόγω διαφορών στις εκδόσεις λογισμικού κατά μήκος του cluster. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η εγκατάσταση και η ρύθμιση του cluster συνδέονται τόσο στενά με τη συνεχή διαχείριση. Απλά δεν είναι καλό να εγκατασταθεί ένας νέος κόμβος (είτε επέκταση είτε αντικατάσταση ενός αποτυχημένου κόμβου) που διαφέρει σε εκδόσεις λογισμικού ή ρυθμίσεων από το τρέχον cluster. Ο νέος κόμβος πρέπει να ευθυγραμμιστεί με το υπόλοιπο cluster. Δύο δημοφιλή clustering toolkits ανοικτού κώδικα, το NPACI Rocks και το OSCAR, υιοθετούν ριζικά διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την παροχή (provisioning) και τη διαχείριση. Η προοπτική και των δύο εργαλείων σχετικά με την εγκατάσταση θα περιγραφεί λεπτομερώς σε αυτό το κεφάλαιο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα clusters χωρίς δίσκους έχουν συχνά λιγότερα προβλήματα με την απόκλιση του λογισμικού επειδή όλοι οι κόμβοι μοιράζονται ένα κοινό σύστημα ρίζας αρχείων (root file system) μέσω του NFS. Ακόμα κι έτσι, τα clusters χωρίς δίσκους είναι σημαντικά λιγότερο δημοφιλή λόγω κλιμακώμενων προβλημάτων της εξυπηρέτησης όλων των λογισμικών συστήματος από έναν κεντρικό διακομιστή NFS.

4.9.4. Προκλήσεις και Βέλτιστες Πρακτικές Παροχής Υλικού

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται μερικά «κόλπα του εμπορίου» που, κατά το πέρασμα του χρόνου που δουλεύεται το cluster, μπορούν να κάνουν μια τεράστια διαφορά όσον αφορά την καθαρότητα, τη συντηρησιμότητα και, τελικά, την αξιοπιστία. Το σύνθημα είναι οργάνωση. Τα καλώς τακτοποιημένα καλώδια δεν είναι μόνο για να φαίνονται όμορφα, αλλά μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ικανότητά σας να εντοπίζετε λάθη σε ορισμένα είδη προβλημάτων στο cluster. Το να μπαίνουν ταμπέλες στα καλώδια και στους κόμβους είναι πάντοτε βοηθητικό, αλλά το να υπάρχει τακτική διάταξη είναι σημαντικότερο. Για προφανείς λόγους, οι δυνάμεις του δύο (και / ή των πολλαπλασίων των 8) είναι φυσικές ποσότητες για να ασχοληθεί κανείς στον υπολογιστικό κόσμο, και όσον αφορά στο cluster αυτό δεν διαφέρει. Υπάρχουν τέσσερις βασικές περιοχές για να επικεντρωθεί κανείς όσον αφορά την παροχή υλικού:

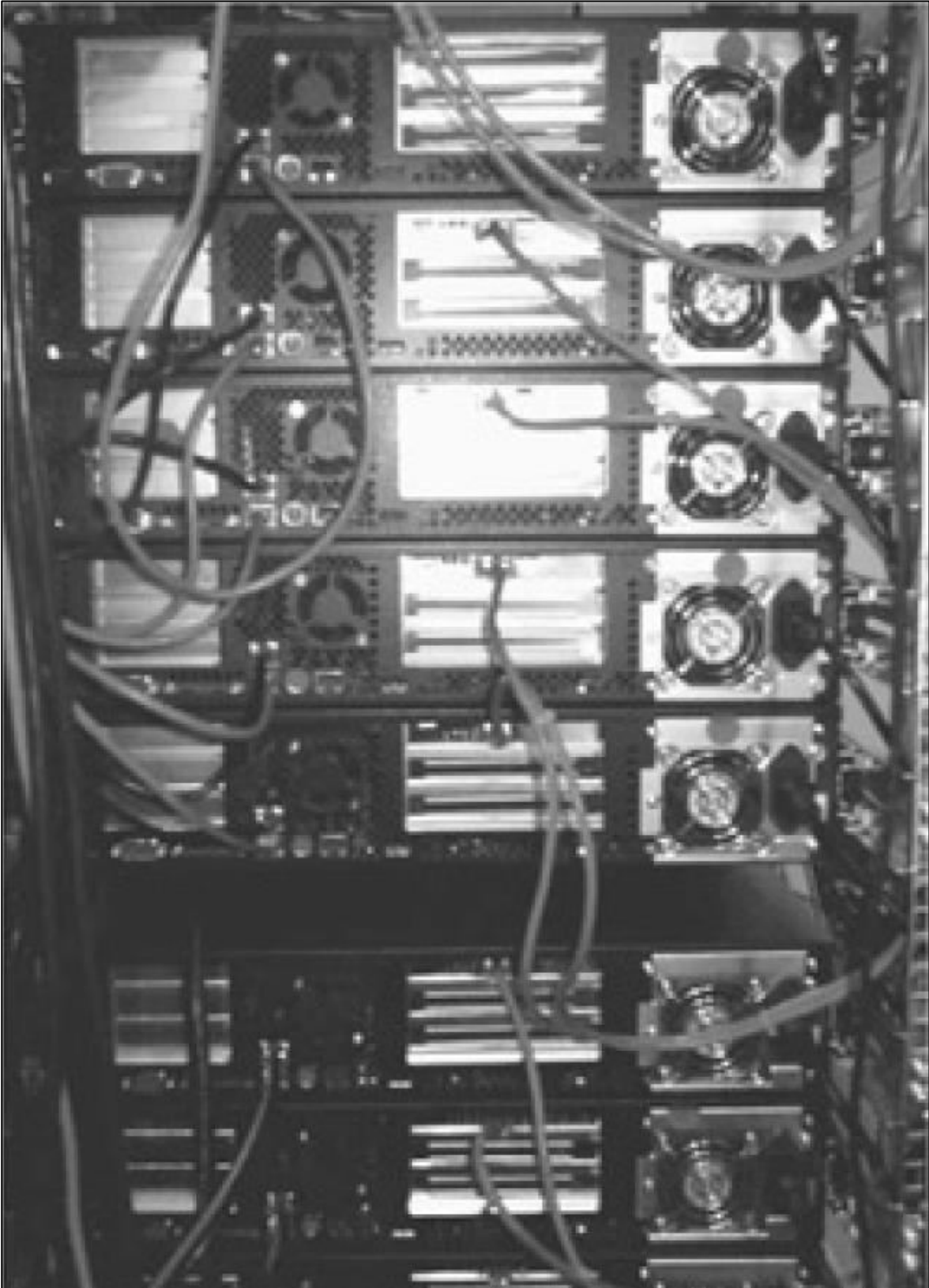
- Διάταξη των κόμβων — Rackmount vs. Workstation Towers vs. Blades
- Διαχείριση καλωδίων
- Διαχείριση ροής αέρα
- Διαχείριση ενέργειας

Η προσοχή σε αυτά τα θέματα για τη συσσώρευση των κουτιών στη γωνία θα κάνει το cluster να διαρκέσει περισσότερο και να είναι πιο σταθερό. Η οικοδόμηση ενός συμπλέγματος είναι διασκεδαστική και ανταμείβει τον κατασκευαστή, και είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί χρόνος για τον σχεδιασμό της φυσικής διάταξης του cluster.

4.9.5. Διάταξη Κόμβων και Διαχείριση Καλωδίων

Τα συστήματα Rackmount είναι ίσως ο πιο βολικός τρόπος στοίβαξης των κόμβων σε ένα μικρό χώρο. Στην **Εικόνα 62**, βλέπουμε την εμπρόσθια πλευρά και την πίσω πλευρά ενός τυπικού συστήματος racking. Οι ίδιοι οι κόμβοι συμπλέγματος ορίζονται με βάση μια τυπική μονάδα rack ή "U". Μια μονάδα Rack (U) είναι 4.45cm και τα Racks κανονικού ύψους (2 μέτρα ύψος) έχουν 42U διαθέσιμου χώρου. Οι κόμβοι Rackmount συνήθως ονομάζονται servers, αλλά υπάρχουν πολλά σασί hardware που μπορούν να τοποθετηθούν στο rack και να πάρουν τις βασικές μητρικές πλακέτες. Όσο πυκνότερα στημένο είναι ένα σύστημα, όπως σε έναν πύργο γεμάτο 1U servers, το CAP (Cable, Airflow, and Power) αποκτά πρωταρχική σημασία. Θα χρειαστούμε λίγο χρόνο για να αναλύσουμε αυτά τα ζητήματα για τα συστήματα με βάση το rack και στη συνέχεια να σχολιάσουμε πώς αυτά μπορούν να μεταφερθούν στα ράφια επιτραπέζιων υπολογιστών και νεότερων blade servers.

Στη διαχείριση των καλωδίων, ομάδες τεσσάρων (4) και οκτώ (8) είναι τα εισιτήρια για την επιτυχία. Στην **Εικόνα 63**, μπορεί κανείς να δει 8 καλώδια τροφοδοσίας σε μία δέσμη και 4 καλώδια ethernet σε μια άλλη δέσμη χρησιμοποιώντας συνδετικά καλωδίων διαθέσιμα από το τοπικό κατάστημα βελτίωσης κατοικίας. Για να προετοιμάσετε τα καλώδια, απλώς βάλτε τα στο πάτωμα και τυλίξτε ένα σύρμα 15-30 εκατοστά. Κόψτε την περίσσεια από κάθε συρμάτινο σύρμα και έχετε ξοδέψει μόλις λίγα λεπτά για να δημιουργήσετε ωραία, τακτοποιημένα πακέτα καλωδίων. Κάνετε αυτό με όλα τα καλώδια σας. Σύντομα θα ανακαλύψετε ότι ένα cluster 128 κόμβων μπορεί να συνδεθεί με 16 δέσμες καλωδίων ενέργειας και 16 δέσμες ethernet. Απαιτείται κάποιος προσχεδιασμός του μήκους των καλωδίων, ειδικά στην περίπτωση πύργων σταθμών εργασίας (workstation towers). Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να χρειαστεί ένα πρώτο τύλιγμα σε σύνολο καλωδίων που μπορεί να περιέχει δύο καλώδια Ethernet μήκους από 1,5 έως 2,5 μέτρων. Στο ένα άκρο του συνόλου καλωδίων καλώδια είναι ίσα έτσι ώστε να συνδέονται εύκολα στο ethernet switch, ενώ στο άλλο άκρο τα καλώδια έχουν το σωστό μήκος για να συνδεθούν το κάθε ένα σε ένα συγκεκριμένο server από το διαμορφωμένο ράφι όπου κάθονται οι servers ο ένας δίπλα στον άλλον σε μια γραμμή. Εάν οι πύργοι είναι πλάτους 15 cm, τότε ο 8ος πύργος είναι περίπου 1 μέτρο πιο μακριά από τον πρώτο. Εάν από την άλλη πλευρά, έχουν τοποθετηθεί στο rack 2U servers τότε ο κορυφαίος server σε ένα σύνολο των 8 είναι μόνο περίπου 40 εκατοστά μακριά από τον πρώτο. Στην περίπτωση αυτή, η καλωδίωση 8 καλωδίων ethernet του ίδιου μήκους λειτουργεί συχνά καλά.



Εικόνα 62. Πίσω πλευρά ενός τυπικού συστήματος racking.



Εικόνα 63. Cable Bundles: Tires καλωδίων σχηματίζουν μία καλά διαχειρίσιμη ομάδα 8 καλωδίων.

Τα καλώδια τροφοδοσίας είναι επίσης ομαδοποιημένα και συνδυσασμένα. Προκύπτει ότι τα καλώδια τροφοδοσίας είναι στην πραγματικότητα μεγάλος πονοκέφαλος. Είναι μεγάλα, ογκώδη, βαριά και σπάνια πλησιάζουν το σωστό μήκος. Αυτό που αποφασίζει τελικά κανείς να κάνει με τα καλώδια τροφοδοσίας μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ψύξη. Το σχήμα 6.2 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο τα καλώδια τραβιούνται στο πλάι του rack ώστε να επιτρέπουν την ανεμπόδιση ροή αέρα. Αυτός είναι πραγματικά ένας από τους επιτακτικούς λόγους για την οργάνωση σε δέσμες των καλωδίων - η τακτοποίηση βελτιώνει την ικανότητα του πλαισίου να κρυώσει με το να βγάλει τα καλώδια από τη ροή του αέρα. Η θερμότητα καταστρέφει τα clusters συστάδες και μία κακή ροή του αέρα είναι ένα συνηθισμένο λάθος. Οι κορυφαίοι κόμβοι (high-end nodes) συχνά διαχέουν 150-200 Watts, οπότε ένα rack 32 παρόμοιων servers είναι ισοδυναμούν θερμικά με 4 στεγνωτήρες μαλλιών που δουλεύουν στην μέγιστη λειτουργία. Καθώς βελτιώνονται οι ταχύτητες των

επεξεργαστών, η κατανάλωση ενέργειας ανεβαίνει πάντοτε προτού επανέλθει σε χαμηλότερα επίπεδα, όταν η διαδικασία των ημιαγωγών βελτιώνεται.

Η κατανάλωση ενέργειας σχετικά με τις ανάγκες του συστήματος προϋποθέτει τον προσχεδιασμό και τη μελέτη στο σύνολο των κυκλωμάτων και στο σύνολο των μονάδων διανομής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, η ενέργεια είναι απλά ένα ακόμη δίκτυο. Πρέπει να διαχειρίζεται η κατανάλωση ενέργειας με σοβαρότητα - υπάρχουν πολλές περιπτώσεις υπερφορτωμένων λωρίδων ισχύος που λιώνουν ή, χειρότερα, πιάνουν φωτιά. Υπάρχουν πολλοί κανόνες για το πόσα μηχανήματα μπορούν να πάνε σε ένα μόνο κύκλωμα. Η κριτική παρατήρηση υποδεικνύει το να μην φτάνει κανείς πολύ κοντά στο μέγιστο ρεύμα που αντέχει το κύκλωμα και να χρησιμοποιούνται καλές καλωδιώσεις ισχύος. Οι τυπικές μονάδες διανομής ενέργειας (PDU) είναι σημαντικά καλύτερες από τη λωρίδα ισχύος των 2,00 δολαρίων από το τοπικό κατάστημα hardware. Τα PDU κοστίζουν περίπου 10,00 δολάρια / έξοδο και έχουν ποιοτική καλωδίωση που δεν θα υπερθερμανθεί ακόμα και με την αύξηση του τρέχοντος φορτίου. Πρέπει να θυμάται ο αναγνώστης ότι ένα συγκρότημα Beowulf είναι πρακτικά ένας προσωπικός υπερυπολογιστής, συνεπώς έχει μεγάλη «όρεξη» όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει. Τα ελεγχόμενα από δίκτυο PDUs γενικά κοστίζουν γύρω στα \$ 50 / έξοδο, και αυτά επιτρέπουν την διαχείριση ενέργειας από απόσταση. Αυτή είναι μια πολύ ωραία ευκολία για μεγάλες εγκαταστάσεις.

4.9.6. Διαφορετικοί Τύποι Διαχείρισης Εγκατάστασης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η οργάνωση, το setup και η διαχείριση ομάδων εξαρτάται και από την προσωπική επιλογή στυλ. Ωστόσο, υπάρχουν τεχνικοί και πρακτικοί λόγοι να επιλεγεί ένας τύπος μεθόδου εγκατάστασης έναντι κάποιου άλλου. Θα περιγράψουμε τα tradeoffs κάθε τύπου εγκατάστασης. Τα δημοφιλή συστήματα διαχείρισης ανοιχτού κώδικα περιλαμβάνουν τα εξής: NPACI Rocks, OSCAR, SCORE, Scyld και XCAT.

Το σύνολο των διανομών Linux είναι ένας κινούμενος στόχος και περιλαμβάνει ένα σύνολο παικτών: RedHat, SuSE, Mandrake, Debian, United Linux, και άλλα. Κάθε διανομή έχει το δικό της στυλ, τη διάταξη αρχείων (file layout), το package format, τους ορισμούς πακέτων και την υποστήριξη για μια γκάμα hardware. Οι μικρές διαφορές, όπως η χρήση ή όχι των κωδικών πρόσβασης σκιάς (shadow passwords), η χρήση του xinetd ή του inetd και το εαν είναι συμβατό με SysV, διαφοροποιούν τις διάφορες διανομές του

Linux. Για τους σχεδιαστές λογισμικού υπηρεσιών cluster (π.χ. PBS, MPICH, Sun Grid Engine, Ganglia), οι διαφορές στους ορισμούς των packages μπορούν να προκαλέσουν περισσότερους πονοκεφάλους, ειδικά στην επίλυση των εξαρτήσεων. Τα πακέτα Redhat, για παράδειγμα, συναρμολογούνται διαφορετικά από τα πακέτα SuSE που ονομάζονται παρομοίως. Το Debian χρησιμοποιεί dpkg και apt-get. Για τον σχεδιαστή εργαλείων cluster, η υποστήριξη όλων αυτών των παραλλαγών είναι ένα απίστευτα μεγάλο έργο. Ο πιθανός δημιουργός ενός cluster θα πρέπει να επιλέξει τη διανομή Linux και την εργαλειοθήκη (toolkit). Πρέπει αρχικά να επιλέξει ένα toolkit ως σημείο εκκίνησης για το cluster και να εμπλέκεται στη βελτίωση του στη συνέχεια. Δεν είναι έξυπνο ο χρήστης και δημιουργός του cluster να ασχολείται με το χτίσιμο όλων των εργαλείων που χρειάζονται ενώ οι αντίστοιχες εργασίες μπορούν να εξυπηρετηθούν κάλλιστα από έτοιμα toolkits, μιας και ο χρόνος του είναι πολύτιμος και καλύτερα να καταναλώνεται στην χρήση του καινούργιου cluster.

Κάθε μία από τις εμπορικές διανομές Linux πρέπει να κάνει ανίχνευση hardware για να εγκαταστήσει αυτόματα τα σωστά προγράμματα οδήγησης συσκευών (drivers) στην ευρύτερη δυνατή τεχνολογία. Οι διανομές που δεν ανιχνεύουν το πιο συνηθισμένο hardware (και δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις γρήγορες αλλαγές του κόσμου των συσκευών δικτύου) απλά απορρίπτονται από την κοινότητα των χρηστών σε μια κλασική περίπτωση «επιβίωσης του ικανότερου». Αυτό το τελευταίο σημείο είναι πολύ σημαντικό για τους κατασκευαστές cluster λόγω της επιθυμίας να χρησιμοποιήσουν τα καλύτερα, ταχύτερα, νεότερα και φθηνότερα. Δεν γίνεται εδώ κρίση σχετικά με το ποια διανομή είναι ανώτερη, αλλά το ότι έχουν μεταξύ τους διαφορές και είναι σημαντικές.

Ο χώρος του hardware γίνεται όλο και πιο περίπλοκος κάθε ημέρα. Οι Beowulf clusters αποτελούσαν μόνο δίσκους IDE. Σήμερα, οι προσαρμογείς IDE (EIDE, UltraATA, Serial ATA), SCSI, ενσωματωμένων συστοιχειών μονάδων (Integrated Drive Arrays), και οι προσαρμογείς δικτύου περιοχής αποθήκευσης (Storage Area Network-SAN) είναι πολύ σημαντικοί για τους κατασκευαστές clusters. Οι διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας, συμπεριλαμβανομένων των Scalī, Myrinet, Quadrics και Infiniband, πρέπει να υποστηρίζονται από εργαλεία cluster. Οι μητρικές πλακέτες, τα εξειδικευμένα chipsets, οι παραλλαγές του x86, του Itanium και του Opteron προσθέτουν περισσότερο στο μίγμα hardware. Και πάλι, κανένα από τα εργαλεία δεν καλύπτει όλο αυτό το χώρο hardware. Μπορεί κανείς να αναρωτηθεί "Ποιο είναι το πρόβλημα; Γιατί δεν υποστηρίζονται όλα τα εργαλεία συμπλέγματος;". Αφορά σε τελική ανάλυση πρακτικά ζητήματα χρόνου,

χρήματος και πόρων. Κάθε ομάδα εργαλείων cluster δοκιμάζει μια έκδοση σε όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό, όμως αυτή το σύνολο hardware είναι απλά πολύ μικρό για να καλύψει τις περισσότερες περιπτώσεις που προκύπτουν στους χρήστες. Οι σχεδιαστές εργαλείων και οι υπεύθυνοι υλοποίησης πρέπει να αποφασίσουν στο κομμάτι «ποια διανομή» και «ποιο υλικό» υποστηρίζεται. Ένας άλλος τρόπος για να τεθεί η ερώτηση είναι: Πρέπει το toolkit να κλιμακώνεται στο εύρος των διαφόρων διανομών Linux; Ή εκφρασμένο σε άλλο επίπεδο: Θα έπρεπε το toolkit να κλιμακώνεται στο εύρος του hardware; Η κλιμάκωση και των δύο δεν είναι απλώς κάτι που οι σχεδιαστές εργαλείων είναι σε θέση να ικανοποιήσουν πρακτικά.

Τα tradeoffs είναι απλά – αν επιλέξει κανείς να κλιμακώσει το toolkit (υποστηρίζοντας) σε πολλαπλές διανομές, τότε είναι ουσιαστικά αναγκασμένος να κάνει κάποιες γενικεύσεις για να ταιριάζει σε όλες τις διανομές (χάνοντας σε εξειδίκευση). Η γενίκευση που επιλέγεται συνήθως από τα toolkits που είναι διαβαθμισμένα σε όλες τις διανομές είναι το να αναλάβει το βασικό κομμάτι ανίχνευσης hardware και hardware από τους προμηθευτές και να κάνει αυτά τα βασικά κομμάτια του cluster toolkit. Αυτές οι προσεγγίσεις δεν επηρεάζουν τον installer που παρέχεται από τη διανομή. Αντ' αυτού, δημιουργούν τα δικά τους προσαρμοσμένα προγράμματα εγκατάστασης που μπορούν να χειριστούν ένα σύνολο διαφορετικών διανομών. Το πλεονέκτημα είναι ότι οι χρήστες έχουν περισσότερες επιλογές συγκεκριμένων διανομών. Το μειονέκτημα εδώ είναι ότι ο χώρος του hardware είναι μεγάλος και είναι αρκετή δουλειά η διαχείριση της ανίχνευσης του υλικού και των προσαρμοσμένων kernel modules για πλήθος hardware.

Αν επιλέξετε μια συγκεκριμένη διανομή, τότε μπορείτε να αξιοποιήσετε την ανίχνευση εγκατάστασης και υλικού του εμπορικού προμηθευτή και να ανησυχήσετε μόνο για τις επεκτάσεις σε συγκεκριμένα κομμάτια υλικού, όπως το Myrinet. Το σαφές μειονέκτημα είναι ότι εάν η διανομή κάνει μια κακή δουλειά γι' αυτό, τότε η εργαλειοθήκη υποφέρει από την ίδια μοίρα.

Αυτό που βλέπουμε στο χώρο των cluster toolkits είναι μια διχοτόμηση προσεγγίσεων, απεικόνισης δίσκων (disk imaging) και μεθόδων περιγραφής. Η απεικόνιση δίσκων αποτελεί έναν πρακτικό τρόπο κλωνοποίησης ενός συστήματος στους κόμβους του cluster. Υπάρχουν εμπορικά και ανοιχτού κώδικα εργαλεία imaging και κάποια δημοφιλή από αυτά είναι: Norton Ghost, PowerQuest Drive Image, SystemImager, Chiba City Imager και Power-Cockpit. Ολοκληρωμένα clustering toolkits που χρησιμοποιούν imaging

περιλαμβάνουν τα OSCAR, Chiba City και CLIC. Οι description-based installers, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν αρχεία κειμένου για την παροχή μιας λίστας πακέτων και οδηγιών που απαιτούνται για την πλήρη διαμόρφωση ενός κόμβου. Οι text-based installers είναι εξειδικευμένοι ανά διανομή: Redhat Kickstart, SuSE YaST και Debian Fully Automatic Installation (FAI). Τα περισσότερα οφείλουν τη γένεση τους (ή, τουλάχιστον, την έμπνευσή τους) στον Sun's Jumpstart installer. Η text-based εγκατάσταση (με βάση αρχεία κειμένου) καταγράφει τη διαμέριση δίσκων (disk partitioning), τη λίστα πακέτων και τη διαμόρφωση του λογισμικού. Το πλεονέκτημα εδώ είναι ότι μια εύλογα γενική περιγραφή κειμένου μπορεί να λειτουργήσει σε πολλές διαφορετικές παραλλαγές υλικού, επειδή ο εγκαταστάτης της διανομής χειρίζεται όλες τις λεπτομέρειες χαμηλού επιπέδου ανίχνευσης υλικού. Ένα πολύ δημοφιλές description-based εργαλείο cluster είναι το NPACI Rocks. Υπάρχουν όμως και άλλα παραδείγματα, όπως το XCAT μερικώς ανοικτού κώδικα της IBM, και το LCFG του Ευρωπαϊκού Δίκτυο Δεδομένων.

4.9.7. Τα Βασικά Βήματα

Πριν επιλέξετε μια εργαλειοθήκη για να δημιουργήσετε το cluster σας, πρέπει να κατανοήσετε τα βασικά βήματα high-level που απαιτούνται για την εγκατάσταση του βασικού σας Beowulf. Σε αυτό το σημείο, υποθέτουμε ότι το υλικό έχει συναρμολογηθεί φυσικά, καλωδιωθεί και είναι έτοιμο για λειτουργία. Τα βήματα είναι:

1. Εγκατάσταση του κόμβου κεφαλής (Head Node)
2. Ρύθμιση υπηρεσιών του Cluster στον Κόμβο Κεφαλής
3. Καθορισμός ρυθμίσεων ενός Κόμβου Υπολογισμών (Compute Node)
4. Για κάθε Κόμβο Υπολογισμών:
 - a. Εντοπισμός της διεύθυνσης υλικού Ethernet του νέου κόμβου
 - b. Εγκατάσταση πλήρους λειτουργικού συστήματος στον νέο κόμβο
 - c. Πλήρης ρύθμιση (configuration) νέου κόμβου
5. Επανεκκίνηση των Services στον Head Node που είναι σχετικές με την λειτουργικότητά του ως μέλος του Cluster (π.χ. PBS, Sun Grid Engine)

Ακούγεται αρκετά απλό, και είναι. Ας εξετάσουμε τα πρώτα βήματα της εγκατάστασης και των υπηρεσιών συμπλέγματος στον κόμβο κεφαλής. Ορισμένα toolkits, όπως το OSCAR, απαιτούν από τον χρήστη να ρυθμίσει τη διαμόρφωση του Linux ξεχωριστά από την εγκατάσταση του συνόλου εργαλείων συμπλέγματος. Άλλα, όπως το Rocks, συνδυάζουν αυτά τα δύο βήματα σε ένα.

Το επόμενο βήμα (ορισμός της διαμόρφωσης (configuration) ενός κόμβου του Cluster) είναι ίσως εκεί όπου οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων disk imaging και περιγραφής είναι πιο έντονα αισθητές. Για το disk imaging, ένας χρυσός κόμβος πρέπει να εγκατασταθεί και να ρυθμιστεί από έναν savvy administrator. Το SIS (System Installation Suite) του OSCAR, το οποίο είναι ένας συνδυασμός του Linux Utility for Installation και του System Imager (αρχικά από το VA Linux), χρησιμοποιεί μια λίστα πακέτων και ένα περίπλοκο σύνολο GUI για να δημιουργήσει ένα χρυσό image χωρίς να εγκαταστήσει πρώτα έναν κόμβο, και αντιπροσωπεύει σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις παλαιότερες μεθόδους. Το Rock χρησιμοποιεί μια αυτόματα δημιουργούμενη περιγραφή κειμένου ενός υπολογιστικού κόμβου "συσκευής" που είναι αρκετά γενική σε μια μεγάλη ποικιλία τύπων hardware.

Μόλις το βασικό configuration του Κόμβου Υπολογισμών είτε έχει δημιουργηθεί από ένα χρυσό Image, είτε έχει οριστεί μέσω μιας περιγραφής κειμένου (text description), πρέπει να χαρτογραφηθούν που υπάρχουν κόμβοι στο cluster. Όλα τα Ethernet interfaces έχουν μια μοναδική διεύθυνση MAC (Media Access Control), 00:50: 8B: D3: 47: A5 είναι ένα παράδειγμα) και αυτό χρησιμοποιείται από όλα τα toolkits για την αναγνώριση συγκεκριμένων κόμβων. Όταν ένας κόμβος εκκινείται, χρειάζεται παραμέτρους διαμόρφωσης δικτύου και συνήθως τις παίρνει μέσω ενός DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) αιτήματος. Ο κόμβος παρουσιάζει τον διακομιστή DHCP με τη διεύθυνση MAC του και ο διακομιστής επιστρέφει την IP, το Netmask, την δρομολόγηση (routing), το όνομα κόμβου και άλλα χρήσιμα στοιχεία. Σχεδόν όλα τα toolkits έχουν κάποια λειτουργία ή πρόγραμμα για να βοηθήσουν στην ανίχνευση νέων διευθύνσεων MAC (και συνεπώς νέων κόμβων). Το Rocks, για παράδειγμα, ανιχνεύει το αρχείο '/var/log/messages' για την εμφάνιση των αιτημάτων DHCPDISCOVER και τα ελέγχει σε μια βάση δεδομένων. Εάν εμφανιστεί μια άγνωστη διεύθυνση, ο κόμβος προστίθεται. Το OSCAR χρησιμοποιεί το tcpdump για να διαπιστώσει τις ίδιες πληροφορίες. Τα toolkits αυτά όχι μόνο ανιχνεύουν τις νέες διευθύνσεις, αλλά τα νέα ονόματα κόμβων εκχωρούνται αυτόματα. Μόλις ολοκληρωθεί η ανίχνευση ενός κόμβου, δεν χρειάζεται να επαναληφθεί, και η καθορισμένη διεύθυνση IP είναι (σχεδόν πάντα) μόνιμη.

Η εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος σε κάθε κόμβο είναι ένα άλλο μέρος όπου τα συστήματα description και τα image-based συστήματα διαφοροποιούνται. Τα image-based συστήματα κατεβάζουν το χρυσό Image, πραγματοποιούν κάποιες προσαρμογές για διαφορές στη γεωμετρία του δίσκου, τη διεύθυνση IP και άλλες περιορισμένες αλλαγές

και, στη συνέχεια, εγκαθιστούν το image στον δίσκο του Κόμβου Υπολογισμού. Οι μέθοδοι που σχετίζονται με description-based προσεγγίσεις κατεβάζουν μία text-based περιγραφή του κόμβου (η οποία περιέχει ήδη πληροφορίες προσαρμογής) και χρησιμοποιεί το εγγενές πρόγραμμα εγκατάστασης για να καθοδηγήσει την εγκατάσταση αυτόματα. Η περιγραφή θα χωρίσει το δίσκο (disk partitioning), θα κατεβάσει τα πακέτα και θα εκτελέσει τη διαμόρφωση των πακέτων. Τα ίδια τα πακέτα κατεβαίνουν από έναν server διανομής (distribution server) αντί να βρίσκονται μέσα στο disk image.

Είναι κρίσιμο να κατανοήσουμε ότι οι μέθοδοι disk image βάζουν το μεγαλύτερο μέρος των πληροφοριών διαμόρφωσης στη δημιουργία του χρυσού image. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην περιγραφή, από την άλλη πλευρά, βάζουν πληροφορίες διαμόρφωσης στην περιγραφή κειμένου, η οποία εφαρμόζεται στη συνέχεια κατά την εγκατάσταση. Είναι συχνά θέμα στυλ ως προς το ποια μέθοδο προτιμά ένας διαχειριστής. Αλλά, ορισμένα σενάρια ευνοούν μια μέθοδο έναντι μιας άλλης.

Το τελικό βήμα της εγκατάστασης κόμβου είναι η ολοκλήρωση της διαμόρφωσης κόμβου (node configuration). Μέχρι πρόσφατα, αυτό ήταν κάτι που έπρεπε να γίνει ρητά από το διαχειριστή του συστήματος μετά την εγκατάσταση των base images. Τα τρέχοντα σύνολα εργαλείων αυτοματοποιούν πλήρως αυτό το βήμα.

Το τελευταίο βήμα του πλήρους cluster configuration είναι η απλή αναδιάρθρωση και η επανεκκίνηση services σε επίπεδο cluster, όπως schedulers και monitors, για να αντικατοπτρίζουν μια ενημερωμένη διαμόρφωση cluster. Τα σύγχρονα εργαλεία αυτοματοποιούν αυτό το βήμα.

Στις επόμενες δύο ενότητες περιγράφονται λεπτομερώς το NPACI Rocks Toolkit και το OSCAR Toolkit ως δύο παραδείγματα μεθόδων, μιας μεθόδου με βάση την περιγραφή (description based) και μεθόδου με βάση το image. Αυτές οι ενότητες δεν αντικαθιστούν τις οδηγίες του οδηγού ή της εγκατάστασης, αλλά περιγράφουν τους μηχανισμούς εγκατάστασης και διαμόρφωσης.

4.9.8. NPACI Rocks

Το λογισμικό cluster NPACI Rocks αξιοποιεί το βοηθητικό πρόγραμμα Kickstart του RedHat για τη διαχείριση και τη διαμόρφωση όλων των κόμβων. Επιτρέπει θεμελιωδώς την ιδέα ότι τα clusters συγκεντρώνουν πολλούς τύπους κόμβων (εφεξής αναφερόμενοι ως

"appliance types" ή "appliances"). Το Rocks αποσυνθέτει το configuration του κάθε appliance σε διάφορα μικρά απλού σκοπού πακέτα και configuration modules. Επιπλέον, όλες οι πληροφορίες για συγκεκριμένες τοποθεσίες και μηχανήματα διαχειρίζονται από μια βάση δεδομένων SQL (MySQL) που αποτελεί την κεντρική «βάση» πληροφορίας σε επίπεδο cluster.

Τα Rocks Configuration Modules μπορούν εύκολα να διαμοιραστούν μεταξύ των κόμβων του cluster και κυρίως μεταξύ τοποθεσιών του συμπλέγματος. Για παράδειγμα, ένα module χρησιμοποιείται για την περιγραφή των στοιχείων του λογισμικού και της διαμόρφωσης της υπηρεσίας ssh. Οι τύποι appliances του cluster που απαιτούν ssh κατασκευάζονται με αυτό το module. Η διαμόρφωση είναι πλήρως μεταβιβάσιμη, ως έχει, σε όλα τα Rocks clusters.

Στο Rocks, ένα ενιαίο object-oriented framework χρησιμοποιείται για την κατασκευή της ιεραρχίας της διαμόρφωσης / εγκατάστασης των modules, με αποτέλεσμα να κατασκευάζονται πολλαπλά appliances του cluster από το βασικό λογισμικό και την περιγραφή των παραμέτρων. Αυτό το framework αποτελείται από XML Files και έναν μηχανισμό Python για τη μετατροπή των περιγραφών των στοιχείων ενός appliance σε ένα αρχείο Kickstart που είναι συμβατό με το Redhat.

Το Anaconda είναι το πρόγραμμα εγκατάστασης του RedHat που ερμηνεύει τα αρχεία Kickstart. Το αρχείο του Kickstart περιγράφει τις κινήσεις που πρέπει να γίνουν, από το disk partitioning μέχρι την εγκατάσταση πακέτων και τελικά από τις πρότερες ρυθμίσεις και τις τρέχουσες ρυθμίσεις ώστε να δημιουργηθεί ένας εντελώς λειτουργικός κόμβος. Στην **Εικόνα 64** παρουσιάζεται ένα αρχείο Kickstart ως δείγμα. Έχει τρία τμήματα: command, package, και post. Το τμήμα Command περιέχει σχεδόν όλες τις απαντήσεις που θέτει μια διαδραστική εγκατάσταση (π.χ. τοποθεσία της διανομής, παράμετροι διαμέρισης δίσκων και υποστήριξη γλώσσας). Το τμήμα packages παραθέτει τα ονόματα των πακέτων Redhat (RPM) που πρόκειται να εγκατασταθούν στο μηχάνημα. Τέλος, το post-section περιέχει scripts τα οποία τρέχουν κατά την διάρκεια της εγκατάστασης ώστε να ρυθμίσουν περαιτέρω τα πακέτα που έχουν εγκατασταθεί. Αυτό το τμήμα είναι το πιο περίπλοκο διότι σε αυτό γίνεται το site-specific customization. Το Rocks, για παράδειγμα δεν επαναπακετάρει το ήδη διαθέσιμο software, αλλά απλά έχει έναν μηχανισμό που εύκολα παρέχει το απαιτούμενο post-configuration.

Ενώ ένα αρχείο Kickstart είναι μια text-based περιγραφή όλων των πακέτων λογισμικού και των ρυθμίσεων λογισμικού που πρόκειται να αναπτυχθούν σε έναν κόμβο, είναι στατικό και μονολιθικό. Στην καλύτερη περίπτωση, αυτό απαιτεί ένα ξεχωριστό αρχείο για κάθε τύπο appliance. Στη χειρότερη περίπτωση, αυτό απαιτεί ένα ξεχωριστό αρχείο για κάθε host. Το συντριπτικό πλεονέκτημα του Kickstart είναι ότι παρέχει ένα de facto πρότυπο για την εγκατάσταση λογισμικού, την εκτέλεση του συστήματος ανίχνευσης που απαιτείται για την εγκατάσταση και την διαμόρφωση των σωστών προγραμμάτων οδήγησης (drivers) συσκευών και την αυτοματοποίηση της επιλογής αυτών των προγραμμάτων οδήγησης σε επίπεδο μηχανήματος. Ένα αρχείο Kickstart είναι αρκετά γενικό, επειδή δεν απαιτούνται αναφορές σε συγκεκριμένες εκδόσεις πακέτων. Ούτε είναι απαραίτητη η συγκεκριμένη αναγνώριση του ethernet, του δίσκου, του βίντεο, της μνήμης, της μητρικής πλακέτας ή άλλων συσκευών υλικού.

```
url --url http://10.1.1.1/install/1386
zerombr yes
clearpart --all
part / --size 4096
lang en_US
keyboard us
mouse genericps/2
timezone --utc GMT
skipx
install
reboot

%packages
@Base
pdksh

%post
cat > /etc/motd << 'EOF'
Kickstarted on 'date'
EOF
```

Εικόνα 64. Βασικό αρχείο RedHat Kickstart. Το Anaconda, που είναι το RedHat installer, ερμηνεύει τα περιεχόμενα του αρχείου kickstart για να δημιουργήσει έναν κόμβο.

Επειδή το αρχείο Kickstart δεν περιέχει εκδόσεις πακέτων, η ανάλυση συγκεκριμένων πληροφοριών έκδοσης πρέπει να πραγματοποιηθεί κάπου. Για το RedHat, οι πληροφορίες αυτές διατηρούνται σε ένα δέντρο διανομής. Η διανομή είναι απλά μια συλλογή από πακέτα RedHat (RPMS) σε συγκεκριμένη δομή καταλόγου και ένα αρχείο ευρετηρίου ειδικά για το RedHat, το οποίο χαρτογραφεί ένα γενικό όνομα πακέτου στην πλήρως εξειδικευμένη του έκδοση. Με αυτό τον τρόπο, το αρχείο Kick-start μπορεί να εμφανίσει ένα πακέτο openssh-clients, αλλά το πρόγραμμα εγκατάστασης Anaconda θα το αναλύσει στο πλήρες όνομα openssh-clients-3. 1p1-6.i386.rpm κάνοντας αναφορές στο αρχείο

ευρετηρίου της διανομής. Το Rocks παρέχει κάποιο κρίσιμο λογισμικό (rocks-dist) που απλοποιεί σημαντικά τη δημιουργία προσαρμοσμένων διανομών. Πολλαπλές διανομές μπορούν να υπάρχουν σε έναν μόνο server και οι τελικοί χρήστες μπορούν εύκολα να ενσωματώσουν το κάθε site-specific λογισμικό. Επιπλέον, η διανομή μπορεί να κατασκευαστεί με την τελευταία ενημέρωση των πακέτων, έτσι ώστε όταν εγκαθίσταται μια συσκευή Rocks (Rocks appliance), να μπορεί να εφαρμόσει εντελώς ενημερωμένο λογισμικό σε ένα μόνο βήμα. Αυτό εξαλείφει το install-then-patch σενάριο.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η διανομή περιέχει όλα τα πιθανά πακέτα που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε έναν appliance κόμβο του cluster. Το αρχείο Kickstart περιγράφει ακριβώς ποια από αυτά θα εγκατασταθούν και πώς κάθε υποσύστημα λογισμικού θα διαμορφωθεί για να δημιουργήσει ένα συγκεκριμένο appliance. Το Rocks επιτρέπει σε έναν κόμβο κεφαλής να εξυπηρετεί πολλαπλές διανομές. Αυτό διευκολύνει τη δοκιμή των κόμβων (node testing) στο νέο λογισμικό απλά αντιστοιχίζοντας τον installer σε νέα διανομή.

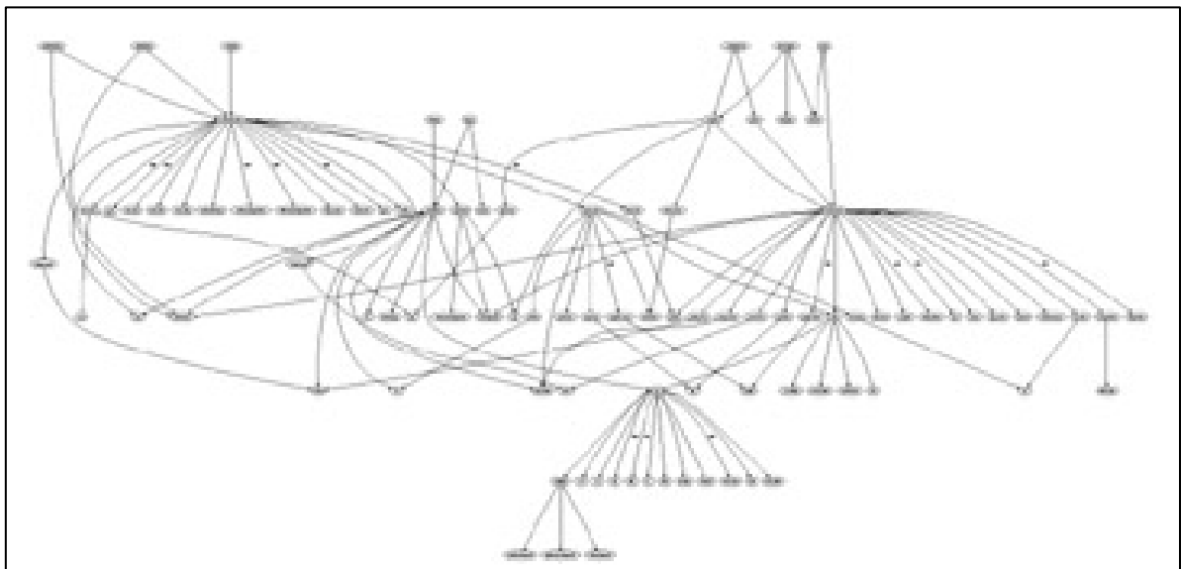
Υπάρχουν μηχανισμοί περιγραφής για άλλες διανομές και λειτουργικά συστήματα και περιλαμβάνουν τα YaST (και YaST2) της SuSE, το Debian FAI (πλήρως αυτόματος installer) και το Sun Solaris Jumpstart. Η δομή καθεμιάς από τις περιγραφές κειμένων (text descriptions) είναι στην πραγματικότητα αρκετά παρόμοια με τα ίδια προβλήματα της ανίχνευσης hardware, της εγκατάστασης λογισμικού και των ρυθμίσεων του λογισμικού που πρέπει να γίνει μετά την εγκατάσταση. Οι εξειδικευμένες πληροφορίες της ονομασίας πακέτων, των εντολών διαμέρισης και άλλων λεπτομερειών είναι εντελώς διαφορετικές μεταξύ αυτών των μεθόδων.

4.9.9. Διαμόρφωση Βασισμένη στα Components

Η βασική λειτουργικότητα που λείπει από το Kickstart για να γίνει το μοναδικό εργαλείο εγκατάστασης που απαιτείται για clusters είναι η έλλειψη γλώσσας μακροεντολών και πλαισίου (framework) για την επαναχρησιμοποίηση κώδικα. Μια γλώσσα μακροεντολών θα βελτιώσει την προγραμματισιμότητα του Kickstart και η επαναχρησιμοποίηση των διαφόρων τμημάτων κώδικα θα βελτιώσει σημαντικά τα προβλήματα του λογισμικού ανίχνευσης σε όλες τις συσκευές (appliances), έχοντας κοινόχρηστο configuration μεταξύ των τύπων appliances που πραγματικά μοιράζεται (αντί να είναι αντίγραφα που απαιτούν επαγρύπνηση (vigilance) για να παραμένουν συγχρονισμένα).

Το Rocks χρησιμοποιεί την έννοια των modules των packages και του configuration ως δομικά στοιχεία για τη δημιουργία ολοκληρωμένων συσκευών (appliances). Τα Rocks modules είναι μικρά αρχεία XML που ενσωματώνουν τα ονόματα των πακέτων και τις μεταρρυθμίσεις (post-configuration) μέσα σε λογικά "κομμάτια" λειτουργικότητας. Η XML χρησιμοποιείται από το Rocks λόγω του de facto πρότυπου λογισμικού για την ανάλυση δεδομένων.

Μόλις η λειτουργικότητα ενός συστήματος κατακερματιστεί σε μικρές μονάδες ενιαίου σκοπού, ένα framework που περιγράφει το μοντέλο κληρονομιάς χρησιμοποιείται για να αποκομίσει την πλήρη λειτουργικότητα των ολοκληρωμένων συστημάτων, καθένα από τα οποία έχει κοινή διαμόρφωση βάσης (base configuration). Στην **Εικόνα 65** είναι μια αναπαράσταση ενός τέτοιου πλαισίου που περιγράφει τη διαμόρφωση όλων των συσκευών σε ένα cluster Rocks. Το framework είναι ένα κατευθυνόμενο γράφημα - κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει το configuration μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας (software package(s), service configuration, local machine configuration κ.λπ.). Οι σχέσεις μεταξύ υπηρεσιών παρουσιάζονται με ακμές. Στο πάνω μέρος του γραφήματος υπάρχουν τέσσερις κορυφές που υποδηλώνουν το configuration μιας cluster appliance τύπου "laptop", "desktop", "frontend" και "compute".



Εικόνα 65. Γράφημα περιγραφής (Kickstart). Αυτό το γράφημα περιγράφει πλήρως όλες τις συσκευές ενός Rocks Cluster.

Όταν ένας κόμβος είναι χτισμένος χρησιμοποιώντας το Rocks, το αρχείο Kickstart για έναν συγκεκριμένο κόμβο παράγεται και προσαρμόζεται επί τόπου ξεκινώντας από έναν

4.9.10. Graph Components

Τα συστήματα που βασίζονται σε Image τοποθετούν το μεγαλύτερο μέρος της ρύθμισής τους στη δημιουργία ενός image, ενώ οι μέθοδοι περιγραφής (description methods) τοποθετούν το μεγαλύτερο μέρος της διαμόρφωσής τους στο αρχείο περιγραφής (π.χ. Kickstart). Στο Rocks, τα modules είναι μικρά αρχεία XML με απλές δομές, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 67** και στην **Εικόνα 68**.

```
1 <?xml version="1.0" standalone="no"?>
2 <!DOCTYPE kickstart SYSTEM "dtds/node.dtd"
3 [<!ENTITY ssh "openssh">]>
4 <kickstart>
5
6     <package>&ssh;</package>
7     <package>&ssh;-clients</package>
8     <package>&ssh;-server</package>
9     <package>&ssh;-askpass</package>
10
11     <!-- Required for X11 Forwarding -->
12     <package>XFree86</package>
13     <package>XFree86-libs</package>
14
15 <post>
16 <!-- default client setup -->
17 cat &gt; /etc/ssh/ssh_config &lt;&lt; 'EOF'
18 Host *
19     CheckHostIP no
20     ForwardX11 yes
21     ForwardAgent yes
22     StrictHostKeyChecking no
23     UsePrivilegedPort no
24     FallBackToRsh no
25     Protocol 1,2
26 EOF
27 </post>
28
29 </kickstart>
```

Εικόνα 67. Το module ssh.xml περιλαμβάνει τα πακέτα ssh και ρυθμίζει την υπηρεσία στην post ενότητα του Kickstart.

```
1 <?xml version="1.0" standalone="no"?>
2 <!DOCTYPE kickstart SYSTEM "dtds/node.dtd">
3 <kickstart>
4     <main>
5         <lang><var name="Kickstart_Lang"/></lang>
6         <keyboard><var name="Kickstart_Keyboard"/></keyboard>
7         <mouse><var name="Kickstart_Mouse"/></mouse>
8         <timezone><var name="Kickstart_Timezone"/></timezone>
9         <rootpw>--iscrypted <var name="RootPassword"/></rootpw>
10        <install/>
11        <reboot/>
12    </main>
13 </kickstart>
```

Εικόνα 68. Το module "base.xml" ρυθμίζει τη βασική ενότητα του αρχείου Kickstart.

Στην **Εικόνα 68** παρουσιάζεται το αρχείο XML για ένα module "ssh" στο γράφημα. Ο μοναδικός σκοπός αυτού του module είναι να περιγράψει τα πακέτα και τη διαμόρφωση που σχετίζονται με την εγκατάσταση του ssh service και του client σε ένα μηχάνημα. Το

πακέτο και τα Post XML tags αντιστοιχούν απευθείας στις λέξεις-κλειδιά Kickstart. Το Σχήμα 6.7 δείχνει πώς μπορούν να περιγραφούν ομοίως παγκόσμιες λειτουργίες, όπως ο κωδικός πρόσβασης για τον root και η επιλογή του ποντικιού.

Το Rocks περιέχει επίσης επιλογές για διαμερισμό σκληρών δίσκων που κυμαίνονται από ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σχήμα (το οποίο λειτουργεί σε IDE, SCSI και RAID Arrays) σε εντελώς χειροκίνητα (ελεγχόμενα από τον διαχειριστή). Το πραγματικό πλεονέκτημα εδώ είναι ότι η πολιτική διαμόρφωσης ssh γίνεται μία φορά αντί να αναπαραχθεί σε όλους τους τύπους appliance.

4.9.11. Ολοκλήρωση

Το "Rocks" χρησιμοποιεί μια δομή γραφημάτων για να δημιουργήσει αρχεία περιγραφής για τα appliances. Στο παρασκήνιο υπάρχει μια βάση δεδομένων MySQL που περιέχει πληροφορίες διαμόρφωσης σε επίπεδο cluster. Όταν ένας κόμβος ζητήσει μια διεύθυνση IP, ένας διακομιστής dhcp στον κόμβο κεφαλής απαντά με μια ετικέτα ονόματος αρχείου που περιέχει μια διεύθυνση URL για το αρχείο kickstart του κόμβου. Ο κόμβος έρχεται σε επαφή με τον διακομιστή ιστού και εκτελείται μια δέσμη ενεργειών CGI που 1) αναζητά τον τύπο κόμβου και συσκευής στη βάση δεδομένων και 2) διασχίζει και διευρύνει το γράφημα για τη συσκευή και τον τύπο κόμβου για να δημιουργήσει δυναμικά το αρχείο Kickstart. Μόλις ολοκληρωθεί η λήψη του description, ο εγγενής installer αναλαμβάνει και κατεβάζει πακέτα από τη θέση που καθορίζεται στο αρχείο kickstart, εγκαθιστά πακέτα, εκτελεί τις καθορισμένες εργασίες μετά την εγκατάσταση και στη συνέχεια επανεκκινεί. Το Rocks χρησιμοποιεί επίσης την ίδια δομή για την εκκίνηση ενός κόμβου κεφαλής, εκτός από το ότι το πλαίσιο δημιουργίας kickstart και η διανομή Linux κρατούνται στο τοπικό CD εκκίνησης και οι διαδραστικές οθόνες συγκεντρώνουν τις τοπικές πληροφορίες. Εν ολίγοις, σχολιάζουμε τα βήματα εγκατάστασης με τα βήματα που ακολουθεί το Rocks:

1. Εγκαταστήστε το δίσκο CD με κεφαλίδα Node-Boot Rocks
2. Διαμορφώστε τις υπηρεσίες του Cluster στον κόμβο κεφαλής - αυτόματα γίνεται στο βήμα 1
3. Καθορίστε το configuration ενός κόμβου Υπολογισμών-το Basics setup έχει εγκατασταθεί
4. Για κάθε υπολογιστικό κόμβο-επανάληψη
 - a. Ανίχνευση της διεύθυνσης υλικού Ethernet του Νέου κόμβου χρησιμοποιήστε το εργαλείο εισαγωγής-αιθέρων

- b. Εγκατάσταση του πλήρους λειτουργικού συστήματος στον νέο κόμβο-Kickstart
 - c. Πλήρης configuration του νέου κόμβου - που περιγράφεται ήδη στο αρχείο Kickstart
5. Επανεκκίνηση των υπηρεσιών στον κεντρικό κόμβο που είναι cluster aware (π.χ. PBS, Sun Grid Engine) - μέρος των αιθέρων εισαγωγής

Τα βασικά χαρακτηριστικά του Rocks είναι ότι είναι ειδικά για το RedHat, χρησιμοποιεί περιγραφές για την κατασκευή appliances, εκμεταλλεύεται τον Redhat Installer για να κάνει ανίχνευση hardware και θα δεχθεί υλικό χωρίς εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα σε λειτουργικό cluster σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τα αρχεία περιγραφής (description files) είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου ανεξάρτητα από το hardware, επιτρέποντας την κατασκευή Beowulfs με διαφορετικούς φυσικούς κόμβους να χειρίζονται τόσο εύκολα όσο οι ομοιογενείς κόμβοι.

4.9.12. Το OSCAR Toolkit

Το Open Source Cluster Application Resource (OSCAR – Πηγή Εφαρμογών Cluster Ανοιχτού Κώδικα) χρησιμοποιεί το imaging ως την κύρια μέθοδο εγκατάστασης λειτουργικού συστήματος σε Κόμβους Υπολογισμού ενός Cluster. Επειδή βασίζεται στο image, το OSCAR υποστηρίζει μια ευρύτερη σειρά διανομών Linux (Redhat 7.2, 7.3 και Mandrake 8.0 από αυτή τη γραφή) με την ίδια στοίβα εργαλείων cluster, αλλά είναι πιο περιορισμένη στην υποστήριξη hardware. Η πιο περιορισμένη υποστήριξη hardware σε σχέση με την υποστήριξη περισσότερων διανομών φαίνεται να είναι κάτι το οξύμωρο. Θα πρέπει κανείς να εξετάσει ακριβώς πώς πραγματικά λειτουργούν οι image-based installers ώστε να καταλάβει γιατί συμβαίνει αυτό.

4.9.13. Πως Λειτουργούν οι Image-Based Installers

Το πιο πρωτόγονο πρόγραμμα image είναι η πολύτιμη εντολή Unix dd. Με το dd, μπορεί να αποθηκεύσει κανείς bit-προς-bit, ένα διαμέρισμα δίσκου ή ολόκληρο το δίσκο ως αρχείο. Το πρόβλημα είναι ότι η αποκατάσταση ενός image με ένα τέτοιο αφελές τρόπο απαιτεί το νέο υλικό να είναι πανομοιότυπο σε όλα τα επίπεδα. Για τους δίσκους, αυτό το επίπεδο ταυτοσημότητας φτάνει σε επίπεδο γεωμετρίας και ακριβούς πλήθους κυλίνδρων. Οι σύγχρονοι image-based installers λαμβάνουν αυτή τη βασική δυνατότητα, αλλά στη συνέχεια προσθέτουν ορισμένα κρίσιμα χαρακτηριστικά για να αυξήσουν σημαντικά τη χρησιμότητά τους σε όλο το hardware.

Η πρώτη βασική ιδέα για το πώς λειτουργεί το imaging είναι ο χειρισμός ενός image δίσκου (ή διαμέρισης (partition)) ως συστήματος αρχείων. Ας το δούμε με ένα παράδειγμα. Υποθέστε ότι έχετε ένα σύστημα Linux με root partition '/dev/hdal' και ένα ξεχωριστό partition (π.χ. scratch) με αρκετό ελεύθερο χώρο για να κρατήσετε ένα πλήρες image της ρίζας. Στη συνέχεια, δοκιμάστε την ακόλουθη ακολουθία (ως root):

- # dd if=/dev/hdal of=/scratch/root.image
- # mkdir /mnt/root
- # mount /scratch/root.image /mnt/root -o loop
- # ls -l /mnt/root

Καθώς κάνετε αλλαγές στο '/mnt/root', τα περιεχόμενα του '/scratch/root.image' ενημερώνονται. Όταν αποσυνδέετε (unmount) το σύστημα αρχείων, αυτές οι αλλαγές αποθηκεύονται στο αρχικό αρχείο image. Έτσι είναι πραγματικά εύκολο να τραβήξετε ένα Image του συστήματος, να το αποθηκεύσετε, να ενημερώσετε το image χρησιμοποιώντας τα τυποποιημένα εργαλεία και tricks. Επειδή ολόκληρο το root file system είναι διαθέσιμο σε ένα image, δεν υπάρχουν όρια για το τι θα μπορούσε να γίνει σε αυτό. Τα αρχεία (όπως 'fstab', 'hosts', IP configuration και άλλα) μπορούν να προστεθούν, να επεξεργαστούν ή να διαγραφούν. Στην πραγματικότητα, επειδή είναι το ακατέργαστο σύστημα αρχείων, θεωρητικά δεν έχει σημασία αν η διανομή είναι Redhat, Mandrake, Debian ή οποιαδήποτε από τις 100 διανομές Linux που είναι εκεί έξω. Πρακτικά, ο installer γνωρίζει περισσότερο ότι η διάταξη του αρχείου είναι αποτελεσματική και επομένως μόνο ένα μικρό υποσύνολο διανομών υποστηρίζεται από οποιοδήποτε πρόγραμμα εγκατάστασης με βάση το image. Το ένα βασικό χαρακτηριστικό που πολλοί admin αρέσκονται σε image-based τεχνικές είναι ότι μπορούν να χειριστούν και να πλάσουν ένα configuration ακριβώς όπως το θέλουν και στη συνέχεια να πάρουν ένα snapshot. Τα image-based προγράμματα εγκατάστασης βοηθούν στην αναπαραγωγή αυτού του snapshot.

Το δεύτερο κρίσιμο κομμάτι της image-based διαχείρισης είναι το προσαρμοσμένο πρόγραμμα εγκατάστασης. Το πρόγραμμα εγκατάστασης πρέπει να κατεβάσει ένα image από έναν server, να προσαρμόσει μερικά τμήματα του για τον κόμβο-στόχο και στη συνέχεια να εγκαταστήσει το ενημερωμένο image στο συγκεκριμένο hardware του κόμβου, λαμβάνοντας υπόψη τις μικρές διαφορές στο υλικό. Ένα παράδειγμα απαραίτητης προσαρμογής είναι η αλλαγή του network configuration file (αρχείο ρυθμίσεων δικτύου) το οποίο πρέπει να ενημερωθεί με τη διεύθυνση IP ενός νέου κόμβου. Αν αυτό δεν γίνει σωστά, τότε οι κόμβοι θα είναι πανομοιότυποι σε κάθε περίπτωση - ακόμη και στη

διεύθυνση IP τους - που προφανώς οδηγεί σε ένα μη χρηστικό cluster. Το πρόγραμμα εγκατάστασης, όπως το System Imager που χρησιμοποιείται στο OSCAR, μπορεί να κάνει αρκετές αλλαγές με βάση τις διαφορές στο hardware των κόμβων. Υποστηρίζει τις πιο συνηθισμένες προσαρμογές χωρίς παρέμβαση του διαχειριστή: αλλαγές στον οδηγό ethernet, αλλαγές στη γεωμετρία μονάδας δίσκου (αλλά όχι στον τύπο του δίσκου) και διαφορές μεγέθους μνήμης. Επειδή ο ίδιος ο installer έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται μια ποικιλία διανομών, ο εντοπισμός βασικού hardware (π.χ. γεωμετρία δίσκου, πρόγραμμα οδήγησης δικτύου) βρίσκεται στο πρόγραμμα εγκατάστασης και όχι στη διανομή. Οι περιορισμοί πόρων στην υποστήριξη του imaging software οδηγούν στο ότι μόνο ένα υποσύνολο του hardware μπορεί να υποστηριχθεί. Στο OSCAR, για παράδειγμα, οι συσκευές IDE και SCSI υποστηρίζονται από το πρόγραμμα εγκατάστασης, αλλά το hardware RAID του IDE και SCSI (π.χ. `/dev/ida/`) δεν είναι κατανοητό από τον installer και επομένως δεν υποστηρίζεται. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι ο ίδιος ο installer είναι ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα το οποίο τρέχει έναν προσαρμοσμένο πυρήνα Linux.

Ο πυρήνας μπορεί να μην έχει το πλήρες σύνολο οδηγών συσκευών (device drivers) που απαιτούνται για την εκτέλεση του hardware σας, ακόμα και αν η διανομή υποστηρίζει εγγενώς το υλικό σας. Το OSCAR επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν προσαρμοσμένους πυρήνες εγκατάστασης για να χειριστούν την περίπτωση όπου ένας διαχειριστής μπορεί να εντοπίσει χειροκίνητα τον απαραίτητο οδηγό. Παρόλο που το παραπάνω dd-based παράδειγμα είναι απλό, η εγκατάσταση και η προσαρμογή των images είναι στην πραγματικότητα αρκετά περίπλοκη: για να γίνουν αλλαγές στο configuration, ο installer πρέπει να καταλάβει το σύστημα αρχείων, το layout και τη θέση των αρχείων ρυθμίσεων για να πραγματοποιήσει τον εντοπισμό (localization). Οι μικρές διαφορές, όπως η επιλογή του inetd έναντι του xinetd, πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διαχειριστούν χρησιμοποιώντας τις διάφορες διανομές.

4.9.14. Bootsstrapping και Configuration

Το OSCAR υποθέτει την ύπαρξη ενός λειτουργικού Κόμβου Κεφαλής (head node) — το οποίο γενικώς εγκαθίσταται με το «χέρι» χρησιμοποιώντας εργαλεία από την βασική διανομή (Mandrake ή Redhat). Το σύνολο εργαλείων OSCAR εγκαθίσταται έπειτα και χρειάζεται επιπλέον βήματα ρυθμίσεων. Ο πυρήνας του OSCAR είναι ένα σύνολο εργαλείων, τα οποία όλα καθοδηγούνται από το OSCAR install wizard, ώστε να καθοριστεί το σύνολο των πακέτων (packages) και των πόρων (resources) τα οποία χρειάζονται για να δημιουργηθεί ένα disk image. Οι πόροι περιλαμβάνουν την

εγκατάσταση διαμέρισης μονάδας δίσκου, την οποία εγκαθιστούν οι βιβλιοθήκες (libraries) της MPI και άλλα ειδικά εργαλεία OSCAR. Μόλις επιλεγεί το σύνολο λογισμικού βάσης (αποθηκευμένο ως RPMs), δημιουργείται ένα client image. Εάν απαιτείται περαιτέρω προσαρμογή, τότε το image μπορεί να "επεξεργαστεί" χρησιμοποιώντας τα εργαλεία SIS (System Installation Suite). Εάν κάποιος θέλει να δημιουργήσει άλλους τύπους κόμβων (π.χ. έναν διακομιστή NFS αντί για Κόμβο Υπολογισμών) ή εάν οι κόμβοι του ίδιου τύπου δεν έχουν διαφορετικά υποσυστήματα δίσκων (IDE και SCSI), ολόκληρη η διαδικασία ξεκινά ξανά με διαφορετικό όνομα image. Η περίπτωση ομοιογενούς υλικού (και ο τύπος λειτουργίας του κόμβου) γίνεται εύκολα διαχειρίσιμη από αυτήν τη ρύθμιση. Εάν το cluster σας έχει ετερογενείς τύπους κόμβων ή / και διαφορετικούς τύπους συσκευών, τότε οι μέθοδοι που βασίζονται στην περιγραφή (description-based methods) γενικά παρέχουν μια απλούστερη λύση.

Μόλις κατασκευαστεί το OSCAR image, ο οδηγός θα καθοδηγεί τον χρήστη για να ξεκινήσει την ενσωμάτωση νέων κόμβων. Το OSCAR χρησιμοποιεί ένα tcrdump για την ανίχνευση αιτημάτων DHCP - όταν εμφανιστεί ένας νέος κόμβος, ένα νέο όνομα αντιστοιχίζεται σε αυτόν αυτόματα. Ο πυρήνας του installer του SIS ξεκινά τη διαδικασία λήψης του σωστού image από τον server και σε αυτό το σημείο αναλαμβάνει κάνοντας το customization του κόμβου αναζητώντας εξειδικευμένες πληροφορίες για τον κόμβο στη βάση δεδομένων SIS. Συνοπτικά, σημειώνονται τα βήματα εγκατάστασης παράλληλα με τα βήματα που λαμβάνει το OSCAR:

1. Εγκατάσταση του Κόμβου Κεφαλής – με το χέρι. Συνήθως σε αυτό το βήμα χρησιμοποιείται το Distro Installer
2. Ρύθμιση των Cluster Services στον Κόμβο Κεφαλής – ακολούθηση του script εγκατάστασης
3. Καθορισμός configuration ενός Κόμβου Υπολογισμών – Χρήση του OSCAR wizard για τον προσδιορισμό ενός client image
4. Για κάθε Κόμβο Υπολογισμών επανάληψη των βημάτων:
 - a. Εντοπισμός της διεύθυνσης Ethernet του Hardware του νέου κόμβου – χρήση του οδηγού OSCAR
 - b. Εγκατάσταση του πλήρους λειτουργικού συστήματος στον νέο κόμβο – το SIS Disk Image κατεβαίνει και εγκαθίσταται
 - c. Πλήρης configuration ενός νέου κόμβου – οι περισσότερες ρυθμίσεις έχουν ήδη γίνει στο image

5. Επανεκκίνηση των services στον Κόμβο Κεφαλής που είναι cluster aware (π.χ. PBS, Sun Grid Engine) – μέρος του OSCAR Install Wizard

Τα βασικά χαρακτηριστικά του OSCAR είναι ότι χρησιμοποιεί disk images και υποστηρίζει πολλαπλές διανομές, χρησιμοποιεί έναν οδηγό ρύθμισης παραμέτρων για να δημιουργήσει μια client image χωρίς να εγκαταστήσει πρώτα έναν golden client και υποστηρίζει κόμβους cluster χωρίς προηγουμένως εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα. Τα images έχουν κάποια ανεξαρτησία υλικού, αλλά οι διαφορές στο τύπο υποσυστήματος δίσκου απαιτούν διαφορετικά images.

4.9.15. Άλλα Σημαντικά Toolkits

Υπάρχουν διάφορα άλλα εργαλεία που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Σε αυτή την ενότητα δίνουμε μια μη εξαντλητική περιγραφή μερικών από τα πιο δημοφιλή kit.

4.9.15.1. Score

Το SCORE είναι ένα μοναδικό system image abstraction το οποίο επικεντρώνεται παραδοσιακά στις ακραίες επιδόσεις. Το SCORE σχεδιάστηκε αρχικά ως σύστημα για την έρευνα συστημάτων υψηλής απόδοσης και το γνωστό layer ανταλλαγής μηνυμάτων PM είναι μία από τις βασικές του τεχνολογίες. Το PM δουλεύει σε Myrinet και σε άλλα δίκτυα χαμηλής καθυστέρησης (μερικά από τα οποία αναπτύσσονται από την Ιαπωνική Κοινοπραξία (Japanese Consortium) που διατηρεί και εξελίσσει σήμερα το SCORE). Το SCORE χρησιμοποιεί ένα πρόγραμμα εγκατάστασης images με βάση την υπηρεσία multicast για να τοποθετήσει το λογισμικό σε κάθε κόμβο. Η υπηρεσία Multicast χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ταχύτητας εγκατάστασης, μεταδίδοντας το image σε έναν αριθμό clients. Ο installer είναι ο ίδιος ένα προσαρμοσμένο κομμάτι του λογισμικού και πρέπει να καταφέρει να καταστήσει αξιόπιστη την multicast μεταφορά.

4.9.15.2. LCFG

Το LCFG είναι ένα πρόγραμμα εγκατάστασης με βάση την περιγραφή (description-based installer). Διαφέρει από το Rocks στο ότι το inheritance υποστηρίζεται στο LCFG μέσω της συμπερίληψης αρχείου (π.χ., #include). Το LCFG χρησιμοποιεί επίσης μια ιδιόκτητη γλώσσα configuration για τα αρχεία προέλευσης (source files) και παρέχει ένα προσαρμοσμένο μεταγλωττιστή προφίλ για να συνδυάσει τα αρχεία προέλευσης σε ένα ενιαίο προφίλ XML. Το LCFG δεν χρησιμοποιεί το kickstart για να εγκαταστήσει το περιβάλλον λειτουργίας. Χρησιμοποιεί το δικό του περιβάλλον εκκίνησης για να ρυθμίσει

τις παραμέτρους του μηχανήματος (π.χ. ανίχνευση του υλικού, διαμέριση του δίσκου, εγκατάσταση RPM).

4.9.15.3. XCat

Το XCat χρησιμοποιεί περιγραφές (descriptions) για να δημιουργήσει αρχεία Kickstart και μόλις πρόσφατα πρόσθεσε περιορισμένη υποστήριξη για το SuSE Linux YaST. Το XCat είναι σχεδόν ανοιχτού κώδικα και η συγκεκριμένη άδεια χρήσης του περιορίζεται για χρήση μόνο σε υλικό της IBM. Η δημιουργία περιγραφών πρέπει να συμβαίνει εκ των προτέρων από τον διαχειριστή του συστήματος και κάθε κόμβος πρέπει να έχει δικό του αρχείο εγκατάστασης. Το XCat παρέχει κάποια δομή στη δημιουργία των αρχείων περιγραφής, αλλά υπάρχει αρκετό scripting που απαιτείται για τον ορισμό διαφορετικών τύπων κόμβων, την προσθήκη πόρων (resources) και άλλα παρόμοια. Η δύναμη του XCat έγκειται στην ενσωμάτωσή του με τον ιδιόκτητο επεξεργαστή διαχείρισης της IBM, επιτρέποντας στους διαχειριστές να διαχειρίζονται τις ενημερώσεις του BIOS, την απομακρυσμένη χρήση του κυκλώματος ισχύος και πολλά άλλα μέσω της απομακρυσμένης πρόσβασης από την κονσόλα και των προσαρμοσμένων scripts.

4.9.15.4. Chiba City Toolkit

Το Chiba City Toolkit είναι μια μη υποστηριζόμενη συλλογή εργαλείων από το Εθνικό Εργαστήριο Argonne. Το Chiba χρησιμοποιεί ένα πρόγραμμα εγκατάστασης με βάση το image και σχεδιάστηκε για να βοηθήσει τους ερευνητές της αμερικανικής υπηρεσίας ενέργειας να διερευνήσουν προβλήματα συστημάτων. Το μοντέλο λειτουργίας για τους προγραμματιστές συστημάτων είναι ότι η πλήρης (σειριακή) πρόσβαση στην κονσόλα είναι διαθέσιμη σε ένα χρήστη, ώστε να μπορούν να εγκαταστήσουν οποιοδήποτε image του λειτουργικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των Windows. Έχουν αναπτύξει ένα πρόγραμμα εγκατάστασης με βάση το image και ένα σύνολο εργαλείων που αλληλεπιδρούν με κάθε σειριακή κονσόλα, ώστε να υποδεικνύεται σε κάθε κόμβο πώς να εκκινήσει (π.χ. από τοπικό σκληρό δίσκο ή να κατεβάσει ένα συγκεκριμένο image). Όπως και στη σουίτα SIS που περιλαμβάνεται στο OSCAR, οι διαχειριστές μπορούν να επεξεργαστούν ένα image σε έναν server και στη συνέχεια να προωθήσουν τις αλλαγές ή ολόκληρα τα images σε έναν κόμβο. Όπως όλα τα image-based συστήματα, η ποικιλία του hardware που υποστηρίζει το πρόγραμμα εγκατάστασης είναι περιορισμένη.

4.9.16. Όταν τα Πράγματα Πηγαίνουν Λανθασμένα

Για την εγκατάσταση του cluster υπάρχουν κυριολεκτικά εκατοντάδες μικρά αντικείμενα που μπορούν να αποδειχθούν εμπόδια στο να κάνει κανείς μια εγκατάσταση να δουλεύει μέσα στο δίκτυο. Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε μερικά από τα κοινά προβλήματα που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οι χρήστες. Υπάρχουν πολλές πηγές ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και ιστού για να συμβουλευτεί κάποιος εάν αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των λιστών συζήτησης συγκεκριμένων εργαλείων και της γενικής λίστας χρηστών Beowulf. Το βασικό πράγμα που κάνει τα clusters διαφορετικά είναι ότι ο χρήστης βασίζεται σε ένα δίκτυο για να πραγματοποιήσει την εγκατάσταση (είτε image είτε description).

- **Οι διευθύνσεις MAC των νέων κόμβων δεν εντοπίζονται ποτέ.** Υπάρχουν μερικά πράγματα που πρέπει να ελεγχθούν εδώ. Πρώτον, βεβαιωθείτε ότι στις μητρικές με διπλά interfaces έχει συνδεθεί το Interface το οποίο θα ονομαστεί eth0. Εάν χρησιμοποιείται PXE, πρέπει να διαβεβαιωθεί ότι είναι ενεργοποιημένο σε αυτό το Interface. Δεν είναι τυποποιημένο ως προς το ποιο interface είναι eth0 και μερικές φορές η διόρθωση γίνεται απλά εναλλάσσοντας το καλώδιο. Εάν εξακολουθεί ο χρήστης να μην βλέπει μηνύματα DHCPDISCOVER στο frontend, πρέπει να συνδέσει το frontend στον κόμβο με ένα τυπικό Ethernet cross-over καλώδιο. Εάν δείτε το μήνυμα DHCPDISCOVER στα αρχεία καταγραφής (log files) (βεβαιωθείτε ότι το dhcpd εκτελείται), τότε έχετε περιορίσει την αναζήτηση του προβλήματος στο ίδιο το δίκτυο. Για τους σύγχρονους διαχειριζόμενους διακόπτες (today's managed switches), θα πρέπει να βεβαιωθείτε ότι η εκπομπή (broadcast) είναι ενεργοποιημένη στον ίδιο τον διακόπτη.
- **Κατά τη λήψη του image ή των πακέτων, ο κόμβος παγώνει.** Υπάρχουν γενικά δύο πιθανότητες. Το πρόγραμμα οδήγησης συσκευής για την κάρτα δικτύου σας έχει bugs ή είναι αναξιόπιστο (αυτό είναι σύνθηρες όταν εισάγονται νέες NICs) ή το hardware του κόμβου σας είναι απλά κακό (μνήμη, επεξεργαστής, δίσκος ή περισσότερα). Εάν το πρόβλημα επηρεάζει όλους τους κόμβους, αναζητήστε κάτι που είναι κοινό (όπως το πρόγραμμα οδήγησης δικτύου). Είναι επίσης πιθανό ότι είτε μια εικόνα είτε ένα πακέτο είναι κατεστραμμένο στον ίδιο τον server. Για τις εγκαταστάσεις που είναι βασισμένες σε RPM, το πρόγραμμα εγκατάστασης συχνά θα σας πει σε ποια πράγματα πακέτων έχει αποτύχει η εγκατάσταση και η χρήση RPM για την επαλήθευση του πακέτου στο διακομιστή είναι μια εύκολη λύση.
- **Η κάρτα δικτύου μου δεν υποστηρίζεται.** Αυτό το πρόβλημα είναι πολύ πιο κοινό από όσο νομίζετε. Οι κατασκευαστές NIC χρησιμοποιούν διάφορες παραλλαγές ενός

τυποποιημένου interface (το Intel e1000 έχει πάνω από 6 παραλλαγές hardware) και ο οδηγός Linux μπορεί να μην έχει φτάσει στις πιο πρόσφατες εκδόσεις. Πρώτα πρέπει να προσδιορίσετε ακριβώς ποιο είναι το interface – εάν μπορείτε να εγκαταστήσετε με το «χέρι» μια έκδοση του Linux στον κόμβο, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το lspci για να βρείτε όλα τα σχετικά με τις συσκευές στο δίαυλο PCI. Οι ελεγκτές Ethernet θα εμφανίζονται με αυτόν τον τρόπο και θα μπορείτε να δείτε τα specifications PCI ID και την περιγραφή κειμένου στην εγγραφή PCI. Μια ματιά στον πηγαίο κώδικα θα καθορίσει εάν υποστηρίζεται αυτή η παραλλαγή μιας γνωστής συσκευής. Εάν υποστηρίζεται, τότε πρέπει να εργαστείτε για να φτιάξετε έναν πυρήνα προσαρμοσμένης εγκατάστασης (custom installation kernel), δισκέτα εκκίνησης (boot floppy) ή PXE image. Αυτό εξαρτάται από την εξειδίκευση το

ΜΕΡΟΣ ΙΙ-ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

5. ΥΛΙΚΟ

5.1. Επεξεργαστές που Χρησιμοποιήθηκαν στην Παρούσα Διπλωματική

Οι υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική αυτή ήταν της Intel με σειρά μοντέλων Pentium IV Core 2 και Xeon. Οι αντίστοιχες μικροαρχιτεκτονικές που ακολουθήθηκαν από τους επεξεργαστές αυτούς ήταν η γενιά NetBurst x64 (P64, έβδομη γενιά) για τον Pentium IV και η μικροαρχιτεκτονική Core x86 για τους Intel Core 2. Οι μικροαρχιτεκτονικές της Intel διαδέχθηκαν χρονικά η μία την άλλη με αυτήν την σειρά. Οι υπολογιστές συλλέχθηκαν από απόσυρση ή αντικατάσταση, από μηχανήματα δηλαδή τα οποία τα εργαστήρια είτε άλλαξαν λόγω αναβάθμισης ή λόγω βλάβης. Στην περίπτωση των υπολογιστών με βλάβη γινόταν επιθεώρηση του μηχανήματος και αν επιδεχόταν επισκευής αυτό επισκευαζόταν, αλλιώς τα τμήματά του χρησιμοποιούντο ως ανταλλακτικά για τα επόμενα μηχανήματα. Με τον τρόπο αυτό, συλλέχθηκαν πρώτα αρκετά ανταλλακτικά, τα οποία αποτέλεσαν σημαντικό υλικό για τη δημιουργία των επόμενων υπολογιστικών μονάδων. Συνολικά συλλέχθηκαν 43 υπολογιστικές μονάδες. Η συλλογή των υπολογιστικών μονάδων έγινε από τον Γ. Λάμπρου, στο χρονικό διάστημα από το 2011 μέχρι το 2016 στο Χωρέμειο Ερευνητικό Εργαστήριο (XEE). Οι μονάδες αυτές ελέγχθηκαν τη λειτουργία τους και κατόπιν αφαιρέθηκαν όλα τα λειτουργικά τμήματα, με στόχο να επανασυνδεθούν. Από το σύνολο των υπολογιστικών τμημάτων, επιλέχθηκαν οι ακόλουθες μητρικές για τη δημιουργία της συστοιχίας, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 23**).

5.2. Εργαλεία

Για τις ανάγκες της εργασίας, οργανώθηκε ένας ειδικός χώρος στον οποίο δημιουργήθηκαν δύο θέσεις εργασίας, όπου η κάθε μια είχε ένα σετ εργαλείων και δύο οθόνες για ταυτόχρονο έλεγχο των λειτουργικών μηχανημάτων. Ένας λειτουργικός υπολογιστής εγκαταστάθηκε και συνδέθηκε στο διαδίκτυο για άμεση αναζήτηση πληροφοριών καθώς και οδηγούς (drivers) για τα υπομνήματα των υπό κατασκευή υπολογιστών. Επίσης, για τη δημιουργία της συστοιχίας ήταν απαραίτητη η χρήση εργαλείων, ηλεκτρονικής και μικρο-ηλεκτρονικής, κολλητική συσκευή, πολύμετρο και παλμογράφος.

5.3. Λογισμικό

Για τις ανάγκες της συστοιχίας, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά λειτουργικά συστήματα και υπολογιστικά περιβάλλοντα. Ειδικότερα χρησιμοποιήσαμε τα λειτουργικά συστήματα,

Windows XP, Windows 7, Linux Ubuntu 12.0, Linux Ubuntu 14.0 και Linux Ubuntu 16.0. Για τη λειτουργία της συστοιχίας χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό περιβάλλον Matlab ® (The Mathworks, Inc.). Για τις υπολογιστικές ανάγκες της συστοιχίας μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τα περιβάλλοντα SciLab και R. Για τα εμπορικά πακέτα οι άδειες ήταν διαθέσιμες στο ΧΕΕ από το ΕΚΠΑ.

CPU Type	DualCore Intel Core i3-2120, 3300 MHz (33 x 100)
Motherboard Name	Foxconn 2ABF
Motherboard Chipset	Intel Cougar Point H61, Intel Sandy Bridge
System Memory	8104 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM)
GPU	Intel(R) HD Graphics (2108 MB)
GPU	Intel(R) HD Graphics (2108 MB)
GPU	Intel HD Graphics 2000
CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	8192 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
GPU	Standard VGA Graphics Adapter (14 MB)
GPU	nVIDIA GeForce GT 220
GPU	nVIDIA GeForce GT 220
CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	8192 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
GPU	Standard VGA Graphics Adapter (14 MB)
GPU	nVIDIA GeForce GT 220
GPU	nVIDIA GeForce GT 220

Πίνακας 24. Οι μητρικές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

6. ΜΕΘΟΔΟΣ

Τα στάδια της μεθοδολογίας, αναφέρθηκαν και σε προηγούμενη ενότητα και ως εκ τούτου περιελάμβαναν την ακόλουθη διαδικασία. Η διαλογή των υπολογιστικών τμημάτων είχε προηγηθεί με τυχαία διαδικασία και ως εκ τούτου το επόμενο στάδιο αφορούσε στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας των υπολογιστών. Κάθε μητρική τοποθετείτο στη θέση εργασίας με κατάλληλη τροφοδοσία, μνήμη, σύνδεση σε οθόνη TFT και εξεταζόταν για τη βασική λειτουργία του BIOS. Στην περίπτωση που ευρίσκετο μια κατάλληλη μητρική, ξεκινούσε η διαδικασία συναρμολόγησης σε κατάλληλο κουτί, με τα επακόλουθα εξαρτήματα ήτοι μνήμη, σκληρό δίσκο, κάρτα δικτύου στην περίπτωση που δεν υπήρχε ήδη στη μητρική.

Μετά την εγκατάσταση των τμημάτων των υπολογιστών, ξεκινούσε αμέσως η διαδικασία της εγκατάστασης του λειτουργικού. Ειδικότερα, ο δίσκος χωριζόταν σε δύο διαμερίσματα (partitions), όπου στο ένα εγκαθίστατο το λειτουργικό των Windows 7 και στο δεύτερο το λειτουργικό Linux. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήσαμε ένα dual-boot system, όπου στην εκκίνηση μπορούσε ο χρήστης να επιλέξει το λειτουργικό περιβάλλον με το οποίο θα ξεκινούσε ο χρήστης. Κατά την εγκατάσταση σε κάθε υπολογιστή αντιστοιχούσαμε ένα μοναδικό όνομα και μια μοναδική IP. Στην εισαγωγή αναφερθήκαμε στον Έρω τον Αλεξανδρεύ, και από τον οποίο πήρε το όνομά της η συστοιχία μας.

Το τελικό αποτέλεσμα αποτελείται από τρεις συστοιχίες, τον Έρω I (Heron I), τον Έρω II (Heron II) και τον Έρω III (Heron III). Κάθε μονάδα, ελάμβανε ένα σειριακό αριθμό (π.χ. Heron III-01, Heron III-02 κτλ.) ως το μοναδικό συνθηματικό. Η συστοιχία Heron I αφορούσε υπολογιστές βασισμένους σε τεχνολογία P2 και P3, η συστοιχία Heron II αφορούσε σε υπολογιστές βασισμένους σε τεχνολογία P4 και η συστοιχία Heron III αφορούσε σε υπολογιστές Core 2, Quad Core, Xeon και κάρτες γραφικών με τεχνολογία CUDA. Η παρούσα διπλωματική ασχολήθηκε με τη δημιουργία των Heron III, ενώ ο Heron I & II αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής του συναδέλφου Ανδρέα Παρασκευά Καβαζίδη.

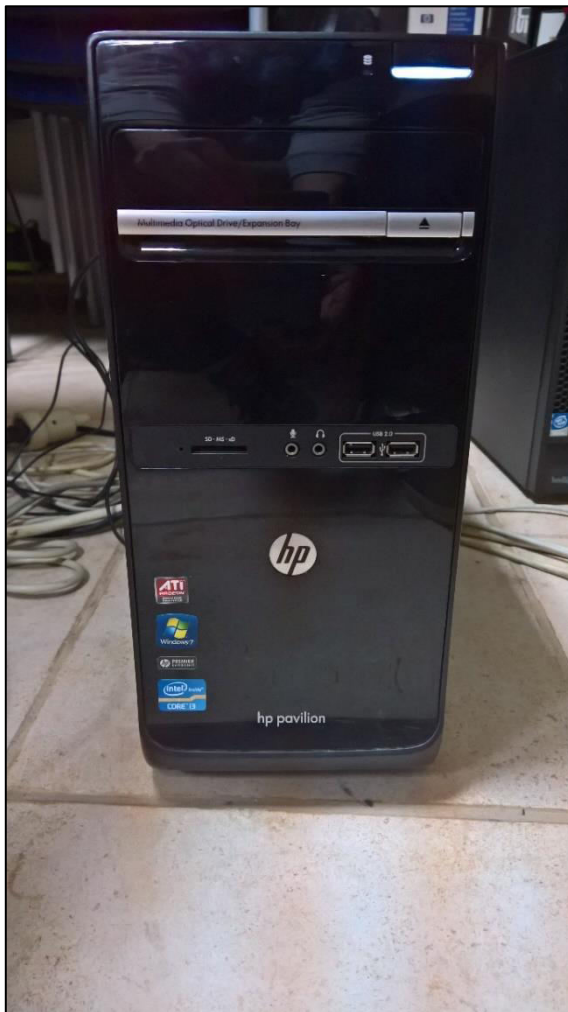
ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7. ΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Η ακολουθία των προηγούμενων βημάτων μας οδήγησε στη δημιουργία των τελικών μηχανημάτων της συστοιχίας, όπως παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες και πίνακες. Ειδικότερα, καταλήξαμε στη δημιουργία οκτώ υπολογιστών, οι οποίοι ονομάστηκαν, όπως περιεγράφηκε στην ενότητα «Υλικό και Μέθοδος». Οι επιμέρους υπολογιστές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

7.1. Heron III Master

Ο πρώτος υπολογιστής ήταν ο Heron III Master, ο οποίος είχε ως σκοπό την κύρια λειτουργία της συστοιχίας. Ακολούθως παρουσιάζεται ο υπολογιστής (**Εικόνα 69, Εικόνα 70, Εικόνα 71, Εικόνα 72, Εικόνα 73**) καθώς και οι προδιαγραφές του (configuration) (**Πίνακας 25**).



Εικόνα 69. Ο υπολογιστής *Heron_III_Master*.



Εικόνα 70. Ο υπολογιστής *Heron_III_Master*.



Εικόνα 71. Ο υπολογιστής *Heron_III_Master*.



Εικόνα 72. Ο υπολογιστής *Heron_III_Master*.



Εικόνα 73. Ο υπολογιστής *Heron_III_Master*.

Heron III-Master	
Computer	HERON-III-Master
Generator	Heron_III_Master
Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Professional
OS Service Pack	Service Pack 1
DirectX	4.09.00.0904 (DirectX 9.0c)
Computer Name HERON-III-Master	
User Name Heron_III_Master	
Logon Domain	HERON-III-Master
Motherboard:	
CPU Type	DualCore Intel Core i3-2120, 3300 MHz (33 x 100)
Motherboard Name	Foxconn 2ABF
Motherboard Chipset	Intel Cougar Point H61, Intel Sandy Bridge
System Memory	8104 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM)
DIMM1	Hynix 71V32635HCT8-H 256 MB PC133 SDRAM (3.0-3-3-6 @ 133 MHz) (2.0-2-2-5 @ 100 MHz)
DIMM2	MSC F3264 256 MB PC100 SDRAM (3.0-2-2-5 @ 100 MHz) (2.0-2-2-5 @ 100 MHz)
DIMM3	128 MB PC133 SDRAM (3.0-3-3-6 @ 133 MHz)
BIOS Type	Award Modular (06/16/99)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	Printer Port (LPT1)
Display:	
Video Adapter	2×Intel(R) HD Graphics (2108 MB)
3D Accelerator	Intel HD Graphics 2000
Monitor	LG W1934 [19" LCD] (180266126)
Multimedia:	
Audio Adapter	Realtek ALC662 @ Intel Cougar Point PCH - High Definition
Storage:	
IDE Controller	Intel(R) Desktop/Workstation/Server Express Chipset SATA AHCI Controller
Floppy Drive	Floppy disk drive
Disk Drive	WDC WD800JD-00MSA1 (80 GB, 7200 RPM)
Optical Drive	DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
Optical Drive	DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
SMART Hard Disks Status	OK
Network	
Primary IP Address	88.197.48.106
Primary MAC Address	E8-39-35-59-36-3A
Network Adapter	Realtek PCIe GBE Family Controller (88.197.48.106)
Processors/Pentium III	
Manufacturer	Intel
Version	Pentium 4
External Clock	100 MHz
Maximum Clock	3800 MHz
Current Clock	3300 MHz
Type	Central Processor
Voltage	3.3 V

Πίνακας 25. Οι προδιαγραφές (configuration) του υπολογιστή *Heron I 01*.

7.2. Heron III 01 & 02

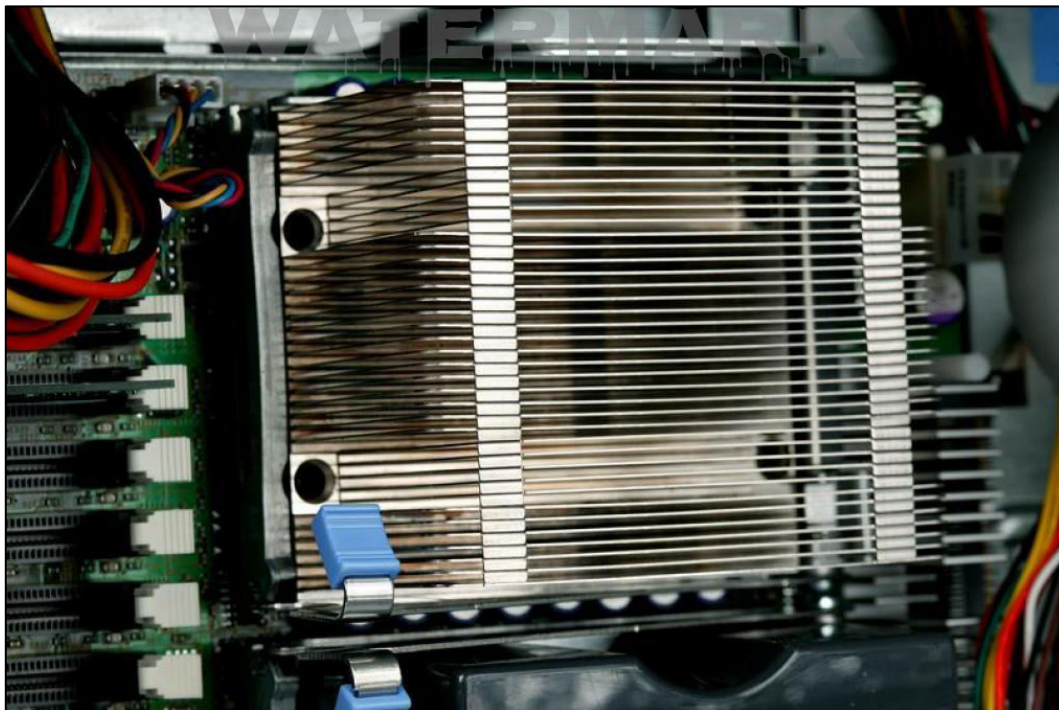
Ο δεύτερος και ο τρίτος υπολογιστής ήταν ο Heron III-01 και III-02, οι οποίοι ήταν οι κόμβοι της συστοιχίας. Ακολούθως παρουσιάζονται οι υπολογιστές (**Εικόνα 74**, **Εικόνα 75**, **Εικόνα 76**) καθώς και οι προδιαγραφές τους (configuration) (**Πίνακας 26**), αφού ήταν ίδιοι.



Εικόνα 74. Ο υπολογιστής *Heron_III_01 & III_02*.



Εικόνα 75. Το εσωτερικό του υπολογιστή *Heron_III_01* & *III_02*.



Εικόνα 76. Το εσωτερικό του υπολογιστή *Heron_III_01* & *III_02*.

Heron III-01 & III-02	
Computer	HERON-III-01 & III-02
Generator	Heron_III_01 & III_02
Computer Type	Standard PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Professional
OS Service Pack	Service Pack 1
DirectX	4.09.00.0904 (DirectX 9.0c)
Computer Name HERON-III-01 & III-02	
User Name Heron_III_01 & III-02	
Logon Domain	HERON-III-01 & III-02
Motherboard:	
CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 × 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	8192 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
DIMM1	
DIMM2	
BIOS Type	Phoenix (08/25/05)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	Printer Port (LPT1)
Display:	
Video Adapter	2×nVIDIA GeForce GT 220
3D Accelerator	nVIDIA GeForce GT 220
Monitor	LG W1934 [19" LCD] (180266126)
Multimedia:	
Audio Adapter	nVIDIA HDMI @ nVIDIA GT216 - High Definition Audio Controller
Storage:	
IDE Controller	Intel(R) 82801EB Ultra ATA Storage Controllers - 24D1
Floppy Drive	Floppy disk drive
Disk Drive	ST3250410AS ATA Device (250 GB, 7200 RPM, SATA-II)
Optical Drive	DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
Optical Drive	DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
SMART Hard Disks Status	OK
Network	
Primary IP Address	88.197.48.108
Primary MAC Address	00-0D-60-17-28-5C
Network Adapter	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet (88.197.48.108)
Processors/Pentium III	
Manufacturer	Intel
Version	Intel Xeon
External Clock	133 MHz
Maximum Clock	3800 MHz
Current Clock	3300 MHz
Type	Central Processor
Voltage	3.3V

Πίνακας 26. Οι προδιαγραφές (configuration) του υπολογιστή *Heron II 01*.

8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ (BENCHMARKING) ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

8.1. Διατύπωση του Προβλήματος

Το βιοϊατρικό πρόβλημα, που επελέξαμε να επιλύσουμε με τη βοήθεια της συστοιχίας που κατασκευάσαμε αφορούσε στη μελέτη βολταμετρικών διαγραμμάτων και την υπολογιστική ανάλυσή τους, σκοπός που είναι εξαιρετικά απαιτητικός από την υπολογιστική άποψη. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήσαμε τα συλλεχθέντα δεδομένα από μια διπλωματική του ΕΜΠ και πιο συγκεκριμένα του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Ιάσωνα Θεοδωρίδη, από την οποία δανειστήκαμε τον κώδικα και με βάση αυτόν κάναμε τους απαραίτητους υπολογισμούς με τη συστοιχίας μας (10).

Η έρευνα του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος (ΚΝΣ) έχει τις απαρχές της στην αυγή του 19^{ου} αιώνα. Οι πρώτες απόπειρες αφορούσαν τις ανακαλύψεις των μορφολογικών και ανατομικών χαρακτηριστικών του ΚΝΣ, παρά το γεγονός ότι είχαν προηγηθεί κατά έναν αιώνα έρευνες σχετικές με την ηλεκτρική φύση του νευρικού συστήματος, χάρη στις προσπάθειες του *Luigi Galvani*. Επιπλέον, στα μέσα του 20^{ου} αιώνα (1924), η ανακάλυψη της πολαρογραφίας, από τον *Jaroslav Heyrovský*, άνοιξε νέες προοπτικές στην έρευνα της φυσιολογίας του ΚΝΣ (**Εικόνα 74**) (10). Πιο συγκεκριμένα, η ανακάλυψη του *Heyrovský* αφορούσε στην ιδιότητα ορισμένων ηλεκτροδίων να οξειδώνουν μόρια που εκδήλωναν μια τάση οξειδωσης. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατό να εκτιμήσεις την παρουσία συγκεκριμένων μορίων ή στοιχείων σε ένα διάλυμα και σε μερικές περιπτώσεις την ποσότητά τους. Ο *Heyrovský* διαμόρφωσε τον πρόδρομο της βολταμμετρικής μεθόδου στα 1924, χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο υδραργύρου και συμπεραίνοντας ότι το μετρούμενο ρεύμα από το ηλεκτρόδιο, όταν εφαρμόζεται μια τάση, παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση των ουσιών στο διάλυμα που έχουν την ιδιότητα να οξειδώνονται (11). Αργότερα, η ίδια ιδέα εφαρμόστηκε σε ηλεκτρόδια άνθρακα ή άλλου τύπου, και αποτέλεσε την βολταμμετρία (12). Αυτές οι ανακαλύψεις άνοιξαν νέες πειραματικές δυνατότητες, όπως οι *in vivo* και *in vitro* ηλεκτροχημικές τεχνικές που θα επέτρεπαν τη μέτρηση βιολογικών ουσιών ή μορίων σε περιοχές του άθικτου ζωντανού εγκεφάλου των ζώων (10, 13).



Εικόνα 77. Ο πολαρογράφος του Heyrovsky¹⁴⁹.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70, εισάγεται μια ηλεκτροχημική τεχνική που προοριζόταν στο να υπερκεράσει τις δυσκολίες, με το όνομα βολταμετρία (13, 14). Η βολταμετρία βασίστηκε στην ηλεκτροχημική ιδιότητα των βιολογικών υγρών, και ειδικότερα κάποιων μορίων όπως οι νευροδιαβιβαστές και οι μεταβολίτες τους (φαινόλες, θιόλες, κλπ.) να οξειδώνονται όταν έρθουν σε απειροστά μικρή απόσταση με μεταλλική ή ημιαγώγιμη επιφάνεια¹⁵⁰ (10, 13, 15, 16). Η βολταμετρική μέθοδος αποδείχθηκε ότι διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα, όπως ικανοποιητική χρονική (της τάξης των ms) και χωρική ανάλυση, χημική ταυτοποίηση των υπό μελέτη ουσιών, μικρή διαταραχή των περιοχών του εγκεφάλου, αντιστοίχιση μεταξύ των χημικών αποτελεσμάτων και των συμπεριφορικών παραμέτρων, κλπ. (16-18). Η βολταμετρία έχει εξελιχθεί και έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία τεχνικών. Κάποιες από αυτές είναι η κυκλική βολταμετρία, η διαφορική βολταμετρία (Differential Pulse Voltammetry (DPV)), η υδροδυναμική βολταμετρία, *stripping voltammetry*, η αμπερομετρία, και άλλες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βασικό πλεονέκτημα της βολταμετρίας ήταν το γεγονός ότι επέτρεπε *in vivo* μετρήσεις, παρά τον περιορισμό της σε δύο σημαντικά χαρακτηριστικά, την ευαισθησία και την επιλεξιμότητα. Επιπροσθέτως, είχε αναπτυχθεί και ένας αριθμός άλλων τεχνικών για τη μελέτη της φυσιολογίας του ΚΝΣ. Πολλές από αυτές (cortical cup,

¹⁴⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Polarography#/media/File:Heyrovsk%C3%A9ho_polarograf_2.jpg

¹⁵⁰ Οι Hochstetler SE & Wightman RM (1998) εκτιμούν αυτή την απόσταση σε λίγα άγκαστρομ, για τις βολταμετρικές τεχνικές.

push-pull cannula, μικροδιάλυση) παρουσίαζαν τη δυνατότητα να μετρούν τα επίπεδα μονοαμινών σε *in vitro* και *in vivo* συστήματα. Αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζουν υψηλή εκλεκτικότητα και ευαισθησία, αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι προκαλούν υπερβολική ζημιά στον εγκεφαλικό ιστό και υλοποιούν ανακριβείς μετρήσεις των υπό μελέτη ουσιών (12, 13, 19).

Καταληκτικά, όλες οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες έχουν βρει εφαρμογή σε μια ευρεία ποικιλία επιστημονικών ερευνών και προσπαθειών, όπως είναι η μελέτη της φυσιολογίας των νευροδιαβιβαστών, που είναι κρίσιμη, λόγω της σχέσης της με τις νευρικές και ψυχικές διαταραχές (κατάθλιψη, άγχος, παχυσαρκία, κλπ.) (20-23).

8.1.1. Στοιχεία Ηλεκτροχημείας

Η ηλεκτροχημεία θα μπορούσε να οριστεί ως ο τομέας που μελετά την αλληλεπίδραση μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και της χημικής δαπάνης. Όταν μια χημική αντίδραση προκαλείται από ένα εξωτερικά παρεχόμενο ρεύμα, όπως στην ηλεκτρόλυση, τότε αυτή ονομάζεται ηλεκτροχημική αντίδραση. Μια βασική κατηγορία ηλεκτροχημικών φαινομένων είναι οι αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής. Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις αναφέρονται σε μια ηλεκτροχημική διαδικασία, όπου η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου από ή προς ένα μόριο ή ιόν, μεταβάλλει την κατάσταση οξειδωσής του. Αυτές οι αντιδράσεις συμβαίνουν αυθόρμητα ή μετά την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης. Σε συνέχεια των προηγούμενων, ορίζουμε το ηλεκτροχημικό κύτταρο ως μια συσκευή που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα από ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης. Παραδείγματα ηλεκτροχημικών κελιών περιλαμβάνουν συσκευές όπως τα γαλβανικά ή βολταϊκά κύτταρα, καθώς και τα βολταμμετρικά κύτταρα. Τα ηλεκτροχημικά κύτταρα περιλαμβάνουν δύο αγωγίμα ηλεκτρόδια, ανόδου και καθόδου, όπου το ηλεκτρόδιο ανόδου προκαλεί οξείδωση και το ηλεκτρόδιο καθόδου προκαλεί αναγωγή. Κρίσιμο συστατικό του ηλεκτροχημικού κυττάρου είναι ένα διάλυμα που διευκολύνει τη ροή του ρεύματος, και που ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Οι ηλεκτρολύτες είναι συνήθως ρυθμισμένα διαλύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται και ως διαλυτικά μέσα για άλλες ουσίες που πρόκειται να εκτιμηθούν. Στην περίπτωση των βολταμμετρικών κυττάρων προστίθεται ένα ακόμα ηλεκτρόδιο, το οποίο αποτελεί το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Δύο κύριες εξισώσεις συγκροτούν την αρχή της ηλεκτροχημείας. Η πρώτη είναι η εξίσωση *Nernst*, η οποία μπορεί να ταυτοποιήσει τη συγκέντρωση των αντιδρώντων σε μια ηλεκτροχημική κυψέλη. Η εξίσωση αυτή εκφράζεται ως:

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln Q_r \quad (5)$$

Ειδικότερα, $E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln Q_r$ (**Εξίσωση 5**), όπου E είναι το δυναμικό του κυττάρου σε θερμοκρασία T , E_0 είναι το δυναμικό ηρεμίας του κυττάρου, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, z είναι ο αριθμός των moles ή των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται λόγω της αντίδρασης, F είναι η σταθερά Faraday και Q_r είναι ο λόγος της συγκέντρωσης των ουσιών που υφίστανται οξείδωση ($[S_{ox}]$) προς τη συγκέντρωση των ουσιών που υφίστανται αναγωγή ($[S_{red}]$).

Η δεύτερη εξίσωση είναι η εξίσωση *Gibbs*, η οποία προβλέπει αν μια αντίδραση μπορεί να συμβεί αυθόρμητα βασισμένη στην ελεύθερη ενέργεια. Η εξίσωση *Gibbs* σχηματίζεται ως εξής:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (6)$$

Ειδικότερα, $\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q$ (**Εξίσωση 6**), όπου ΔG είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια *Gibbs*, ΔG^0 είναι το δυναμικό του κυττάρου όταν $Q=1$, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T είναι η θερμοκρασία και $\ln Q$ είναι ο λόγος των προϊόντων επί των αντιδρώντων.

8.1.1.1. Οξείδωση

Στην απλούστερη της μορφή, η οξείδωση συμβαίνει όταν ένα μέταλλο βυθίζεται μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα. Στη συνέχεια, ιόντα του ηλεκτρολύτη αντιδρούν με την επιφάνεια του μετάλλου και δωρίζουν ηλεκτρόνια σε αυτή (16). Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα αποτελεί η οξείδωση του ασκορβικού οξέος (Ascorbic Acid (AA)) σε Dehydroascorbate (DHA) (12). Η γενικευμένη αντίδραση της οξείδωσης μπορεί να γραφεί ως εξής:



Όπου ne^- είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταβαίνουν στην επιφάνεια του μετάλλου (16, 24, 25). Η αντίστροφη διαδικασία, όπου ηλεκτρόνια μεταφέρονται στα ιόντα του ηλεκτρολύτη, ονομάζεται αναγωγή (24).

8.1.1.2. Ηλεκτροκατάλυση

Το φαινόμενο της ηλεκτροκατάλυσης παρουσιάζεται σε ένα διάλυμα με περισσότερες της μίας ουσίες, όταν το ρεύμα οξείδωσης μίας συγκεκριμένης ουσίας ενισχύεται, άρα καταλύεται, από την παρουσία μιας άλλης ουσίας, λόγω επαναληπτικών αντιδράσεων οξείδωσης (16). Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ταυτόχρονης παρουσίας ντοπαμίνης (DA) και ασκορβικού οξέος (AA) στο ίδιο διάλυμα, εκδηλώνεται το φαινόμενο της

ηλεκτροκατάλυσης. Η ορθοκουϊνόνη (DOQ), που παράγεται από την οξείδωση της ντοπαμίνης, αντιδρά με το ασκορβικό οξύ και παράγει διυδροασκορβικό οξύ (DHA), που είναι το προϊόν οξείδωσης του AA, και ντοπαμίνη (12, 16). Αυτή η διαδικασία περιγράφεται από την αντίδραση που ακολουθεί:



Αυτός είναι ο λόγος που ένα μέρος της ντοπαμίνης δύναται να οξειδωθεί δύο ή περισσότερες φορές και άρα να μετρηθεί παραπάνω φορές, προκαλώντας λανθασμένα αποτελέσματα (12, 16). Αυτό το ρεύμα ηλεκτροκατάλυσης είναι ανεπιθύμητο και μπορεί να μειωθεί εφαρμόζοντας υψηλούς ρυθμούς σάρωσης (όπως στην FSCV) ή με την χρήση σημαντικά μικρών ηλεκτροδίων (12, 16).

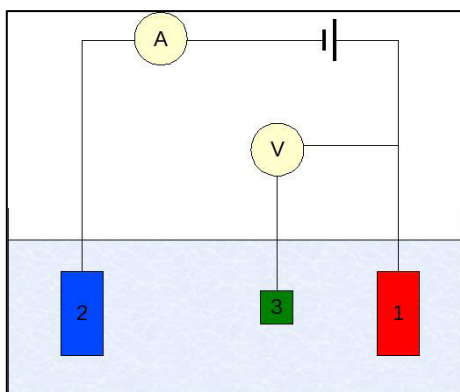
8.1.1.3. Οξειδωτικές Ενώσεις

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο λόγος που η βολταμετρία μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα εύρος πειραματικών ερευνών, προέρχεται από το γεγονός ότι πολλές βιοχημικές ουσίες οξειδώνονται (18), με άλλα λόγια μπορούν να παράξουν ένα ρεύμα (ρεύμα *Faraday*) το οποίο είναι εντοπίσιμο και μετρήσιμο. Το ανιχνεύσιμο ρεύμα μιας άγνωστης ουσίας μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά με την *in vitro* βαθμονόμηση, όπου γνωστές συγκεντρώσεις αντιστοιχίζονται σε μετρούμενα ρεύματα (19). Στην περίπτωση της έρευνας του εγκεφάλου υπάρχει μια πληθώρα παραδειγμάτων όπου εφαρμόζεται η προηγούμενη μεθοδολογία, όπως λόγου χάρη στην περίπτωση των νευροδιαβιβαστών. Σε μια αναφορά του *Crespi F.* (2011), χρησιμοποιήθηκε η Διαφορική Βολταμετρία και αναφέρθηκαν διάφορα δυναμικά οξείδωσης για ποικίλους νευροδιαβιβαστές. Για παράδειγμα, σημειώνονται οι τιμές οξείδωσης του νευροπεπτιδίου Y (NPY) στα 600mV, των κομματιών 13-36 του NPY στα 595mV και του hPP στα 580mV (20). Επίσης, τα μετρούμενα ρεύματα που καταγράφηκαν ήταν 2.8nA για το NPY, 2.4nA για το hPP και 0.46 nA για τα NPY 13-36 (20). Σε μια άλλη εργασία των *Cesuglio et al.* (1981) τα δυναμικά οξείδωσης που ανακαλύφθηκαν περιλαμβάνουν τα -50mV για το AA, 100mV για τις κατεχολαμίνες, 300mV για τις 5-hydroxy ενώσεις (5-HT, 5-HTP, 5-HIAA), 680mV για τα αμινοξέα (τρυπτοφάνη, τυροσίνη) και 680mV μέχρι 800mV για τα νευροπεπτίδια (σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που αναφέρει ο *Crespi F.* (2011)) (18, 20). Επιπλέον, οι *Gonon et al.* (1980), αναφέρουν δυναμικά οξείδωσης στα -50mV για το AA και στα 100mV για το DOPAC στο ραβδωτό σώμα (26), ενώ οι *Clement et al.* (1993) εντόπισαν μια κορυφή τάσης στα 280mV για το 5-HIAA (27). Σημαντικές δυσκολίες φαίνεται να εκδηλώνονται στην ανίχνευση της ισταμίνης, λόγω των ηλεκτροχημικών της ιδιοτήτων. Η ισταμίνη είναι μια αμίνη που οξειδώνεται, αλλά η διαδικασία οξείδωσής της διαφέρει από

τις αντίστοιχες της ντοπαμίνης ή της σεροτονίνης, εξαιτίας του γεγονότος ότι προκαλεί μια μετάβαση φορτίου (21). Οι *Samaranayake et al.* (2015) εντόπισαν μια τιμή οξειδωσης, *in vitro* και *in vivo*, περίπου στα 300mV, ενώ οι *Pihel et al.* (1995) ήταν ικανοί να ανιχνεύσουν την ισταμίνη μόνο μετά από κατάλληλη προεπεξεργασία των ηλεκτροδίων (28). Τέλος, σε μια πολύ ενδιαφέρουσα αναφορά των *Kennedy et al.* (1993) θεμελιώνεται μια προσέγγιση για την ανίχνευση της ινσουλίνης (29). Συμπερασματικά, παρά το γεγονός ότι αρκετές μονοαμίνες έχουν εντοπιστεί μέσω ηλεκτροχημικών τεχνικών, υπάρχει ακόμα μία πληθώρα αυτών που δεν έχουν ακόμα ανιχνευθεί, ή τουλάχιστον όχι ικανοποιητικά. Μία εξήγηση για αυτή τη δυσκολία έχει αποδοθεί στους ελλειπείς μετασχηματισμούς της επιφάνειας των ηλεκτροδίων (16).

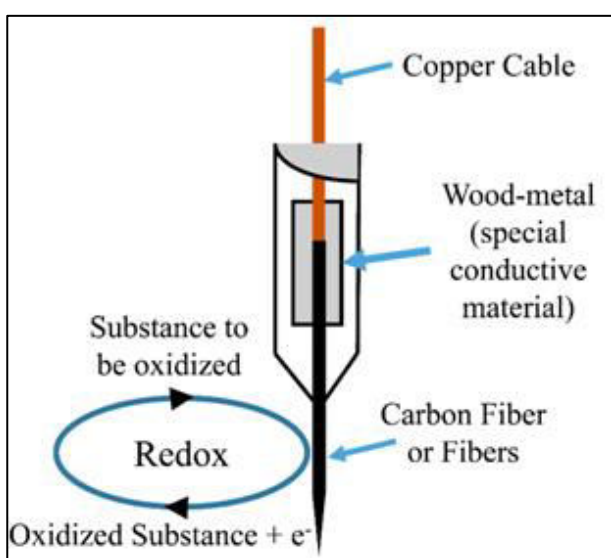
8.1.2. Βολταμετρία

Στη βολταμετρία, ένα δυναμικό που είναι συνάρτηση του χρόνου, εφαρμόζεται σε μια ηλεκτροχημική κυψέλη, μετρώντας το παραγόμενο ρεύμα σαν συνάρτηση αυτού του δυναμικού. Το παραγόμενο διάγραμμα του ρεύματος σε σχέση με το δυναμικό εισόδου ονομάζεται βολταμμόγραμμα, και είναι το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο του φάσματος στη φασματοσκοπία, παρέχοντας ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με τις ουσίες που συμμετέχουν στις αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής. Οι πρώιμες βολταμετρικές μέθοδοι χρησιμοποιούσαν δύο ηλεκτρόδια, ενώ οι επόμενες έκαναν χρήση ενός συστήματος τριών ηλεκτροδίων (**Εικόνα 75**). Το χρονικά εξαρτώμενο, διεγερτικό δυναμικό εισόδου εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο εργασίας, και έτσι μεταβάλλεται η τάση σε σχέση με το σταθερό δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς. Αυτό ακολούθως αλλάζει το ρεύμα που ρέει μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας και του βοηθητικού ηλεκτροδίου. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως ένα σύρμα πλατίνας ενώ το ηλεκτρόδιο αναφοράς είναι συνήθως τύπου *Sat'd Calomel* (SCE) (Χλωριούχου Υδραργύρου Hg/HgCl₂) ή τύπου χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl) (10).



Εικόνα 78. Σύστημα τριών ηλεκτροδίων στη βολταμμετρία. (1) Ηλεκτρόδιο εργασίας, (2) βοηθητικό ηλεκτρόδιο, (3) ηλεκτρόδιο αναφοράς¹⁵¹.

Η περίπτωση του ηλεκτροδίου εργασίας είναι πιο περίπλοκη, αφού μπορεί να κατασκευαστεί από πολλά διαφορετικά υλικά (υδράργυρος, λευκόχρυσος, χρυσός, ασήμι, άνθρακας, κλπ.). Στις πρώτες βολταμμετρικές τεχνικές, όπως και στην πολαρογραφία, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο εργασίας από υδράργυρο. Λόγω της ρευστής φύσης του υδραργύρου, το ηλεκτρόδιο εργασίας είναι συχνά μια σταγόνα αποκομμένη από το τέρμα ενός τριχοειδούς σωλήνα. Αργότερα, στη βολταμμετρία χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια εργασίας από ίνες άνθρακα, ενός νήματος ή πολλαπλών νημάτων (**Εικόνα 76**).



Εικόνα 79. Μοντέλο του βολταμμετρικού ηλεκτροδίου και η αντίστοιχη οξειδοαναγωγική αντίδραση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου άνθρακα (από: Theodoridis & Lambrou (2019)) (30).

8.1.2.1. Βολταμμετρικές Τεχνικές

Τροποποιήσεις της βολταμμετρικής μεθοδολογίας βασίζονται στις ποικίλες μεταβολές της τάσης εισόδου που εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο εργασίας (13). Κάθε μία από αυτές τις παραλλαγές, διαφέρει σε σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η χρονική ανάλυση, η ευαισθησία, και η δυνατότητα χημικής ταυτοποίησης των εντοπιζόμενων στοιχείων (13). Αρκετές από τις υπάρχουσες βολταμμετρικές μεθοδολογίες παρουσιάζονται παρακάτω (10).

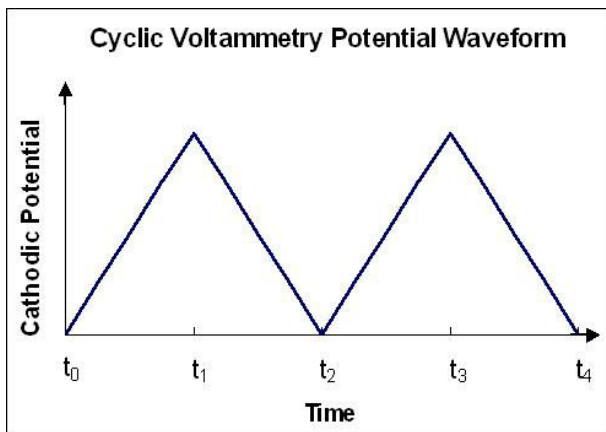
¹⁵¹https://en.wikipedia.org/wiki/Voltammetry#/media/File:Three_electrode_setup.png

8.1.2.2. Αμπερομετρία

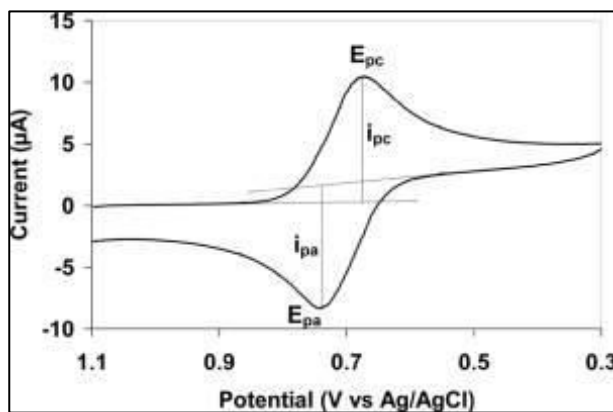
Στην αμπερομετρία, εφαρμόζεται ένα δυναμικό στο ηλεκτρόδιο εργασίας το οποίο διατηρείται σταθερό και αρκούντως θετικό έτσι ώστε να προκαλέσει οξείδωση των υπό μελέτη ουσιών (12, 16, 19). Το ρεύμα εξόδου μετράται σε συνάρτηση με τον χρόνο (14, 16). Το σταθερό δυναμικό εισόδου προκαλεί μειωμένη χωρητικότητα στη διεπιφάνεια ηλεκτροδίου-διαλύματος, και άρα, χαμηλότερο θόρυβο (16), καθώς επίσης και ικανοποιητικό λόγο ρεύματος Faraday προς ρεύμα φόρτωσης (12, 14). Η αμπερομετρία εκδηλώνει επίσης ικανοποιητική χρονική ανάλυση (υπό της κλίμακας των millisecond (16, 19, 31)) για γρήγορες μετρήσεις (μεταβολές στη συγκέντρωση των νευροδιαβιβαστών, απελευθέρωση, κλπ. (14, 19)). Οι *Adams et al.*(2008) ισχυρίζονται ότι, όταν η αμπερομετρία εφαρμόζεται σε ένα συμβάν απελευθέρωσης νευροδιαβιβαστή, το σχήμα του γραφήματος που προκύπτει παρέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες του συμβάντος (32), έχει όμως επίσης αναφερθεί ότι η αμπερομετρία δεν μπορεί να υλοποιήσει χημική ταυτοποίηση της ουσίας που εντοπίζεται σε ένα διάλυμα (10, 12-14, 16, 19, 31).

8.1.2.3. Κυκλική Βολταμετρία

Στην κυκλική βολταμετρία, εφαρμόζεται μία αύξουσα τάση με μορφή ράμπας (12), και το ρεύμα οξείδωσης προκύπτει από την στιγμή που το δυναμικό του ηλεκτροδίου φτάνει να ταυτίζεται με τα κατάλληλα δυναμικά οξείδωσης των ουσιών (**Εικόνα 77**) (12). Πριν από αυτή την στιγμή, μετράται μόνο το ρεύμα φόρτισης. Ακολούθως, εφαρμόζεται μια αρνητική σάρωση, όπου επισυμβαίνει η αναγωγή των ουσιών που προηγουμένως είχαν οξειδωθεί (**Εικόνα 78**) (14, 16). Οι *Kawagoe et al.*(1993) ανέφεραν ότι το προϊόν της οξείδωσης μπορεί να υποστεί διάχυση, με αποτέλεσμα οι ουσίες που υφίστανται αναγωγή στην καθοδική σάρωση να υποεκτιμηθούν (14). Κρίσιμη δυνατότητα της κυκλικής βολταμετρίας, όπως και των υπόλοιπων τεχνικών που περιγράφονται παρακάτω (FSCV, DPV, etc.) είναι η παροχή χημικής ταυτοποίησης των ουσιών που υφίστανται οξείδωση (10, 12, 13, 16).



Εικόνα 80. Το δυναμικό εισόδου στην κυκλική βολταμμετρία αυξάνει σαν ράμπα γραμμικά σε κυκλικές φάσεις¹⁵².



Εικόνα 81. Κυκλική βολταμμετρία¹⁵³.

8.1.2.4. Fast Scan Cyclic Voltammetry (FSCV)

Το εφαρμοζόμενο δυναμικό είναι μια τριγωνική κυματομορφή (16). Η FSCV χρησιμοποιείται κυρίως στη μελέτη της ισταμίνης (21), της σεροτονίνης (19, 22, 32, 33) και της ντοπαμίνης (19, 31, 34, 35), όπως επίσης εφαρμόζεται στον εντοπισμό της απελευθέρωσης και της πρόσληψης των κατεχολαμινών στα χρωμοφόρα κύτταρα (36). Η FSCV παρουσιάζει τη δυνατότητα του εντοπισμού της συγκέντρωσης μονοαμινών στο εύρος των nmol- μmol (19, 35).

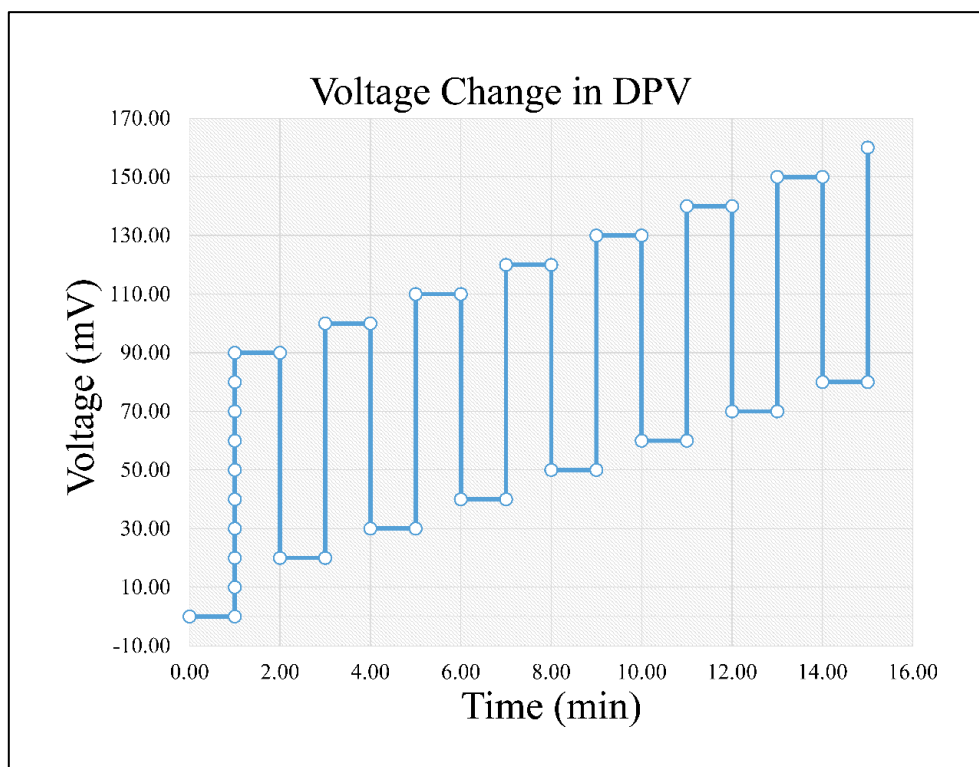
8.1.2.5. Differential Pulse Voltammetry (DPV)

Η Διαφορική Βολταμμετρία αποτελείται από έναν συνδυασμό της αμπερομετρίας και της κυκλικής βολταμμετρίας (12-14, 18). Έτσι, η τεχνική αυτή συνδυάζει το πλεονέκτημα της αμπερομετρίας για μειωμένο ρεύμα φόρτισης, μαζί με υψηλή εκλεκτικότητα και

¹⁵²https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry#/media/File:Cyclicvoltammetrywaveform.jpg

¹⁵³https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry#/media/File:Cyclovoltammogram.jpg

ευαισθησία, καθώς επίσης και χημική ταυτοποίηση (12, 14, 20, 37). Παρόλα αυτά, στερείται στην χρονική ανάλυση (14) (για την καταστολή του ρεύματος φόρτισης απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί σάρωσης). Η εφαρμοζόμενη τάση αποτελείται από μια σειρά από χρονικά εξαρτώμενα και διαρκώς αυξανόμενα δυναμικά (**Εικόνα 79**). Από τη μορφή της τάσης εισόδου προκύπτει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, ότι το μετρούμενο ρεύμα στην DPV είναι η διαφορά μεταξύ των ρευμάτων στην αρχή και στο τέλος του κάθε παλμού (14, 18). Ο *Crespi F.* (2011) εφάρμοσε την διαφορική βολταμετρία στην αμυγδαλή των ποντικών με σκοπό να μελετήσει τις δραστηριότητες του νευροπεπτιδίου Υ (NPY) και των υποδοχέων του (20). Επιπλέον, οι *Clement et al.*(1993) μέτρησαν σεροτονίνη και 5-HIAA στην περιοχή του ραχιαίου πυρήνα ραφής (*nucleus raphe dorsalis*) σε επίμυες χρησιμοποιώντας DPV (27, 38), και οι *Ozel et al.* (2011) μέτρησαν σεροτονίνη *in vivo* με DPV σε έμβρυα του είδους *Danio rerio* (γνωστό ως *zebrafish*, ή σε ελεύθερη απόδοση στα ελληνικά *Ζεβρόψαρο*) (17). Τέλος, υπάρχει μια πληθώρα άλλων παρόμοιων τεχνικών, όπως η *Differential Normal Pulse Voltammetry* (DNPV) (12, 19, 37), η *Differential Double Pulse Voltammetry* (DDPV), η *Steady State Voltammetry* (SSV) (12), *Fast Differential Ramp Voltammetry* (FDRV) (39), *Differential Pulse Amperometry* (DPA) (25, 40) και *Square Wave Voltammetry* (SWV) (24).



Εικόνα 82. Αλλαγή της τάσεως εισόδου στην Διαφορική Βολταμετρία (από Theodoridis & Lambrou (2019)) (10, 30).

8.1.3. Άλλες Αναλυτικές Τεχνικές

Πέρα από τις βολταμετρικές τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω, διαμορφώθηκε μια αξιολογη σύζτηση γύρω από τη σύγκριση αυτών των βολταμετρικών μεθόδων με τεχνικές διάχυσης. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν πρώτη φορά στη διάρκεια του δεύτερου μισού του 20^{ου} αιώνα, και αποτελούνταν κυρίως από τις εξής μεθόδους: *cortical cup*, *push pull cannula* και *μικροδιάλυση* (12, 13). Από τις παραπάνω μεθοδολογίες, η πιο προηγμένη είναι η μικροδιάλυση, κυρίως λόγω της μεμβράνης διάλυσης που εφαρμόζεται στην άκρη του ηλεκτροδίου, αποτρέποντας την εξωτερική διάχυση και τη διαταραχή των ιστών (12, 13). Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στη μικροδιάλυση έχουν διάμετρο στο εύρος των 200-300μm, ενώ, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ηλεκτρόδια της βολταμετρίας πρόσκεινται στο εύρος των 10-35μm (12-14, 19). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται στη μικροδιάλυση να προκαλεί υπερβολική και ανεπιθύμητη διαταραχή ή τραυματισμό της περιοχής του εγκεφάλου στην οποία εισχωρεί (12-14, 19). Αντιθέτως, τα βολταμετρικά ηλεκτρόδια προκαλούν την ελάχιστη δυνατή ζημιά, και έτσι μπορούν να μετρήσουν ηλεκτροχημικές ουσίες σε διάφορες περιοχές του εγκεφάλου (χωρική ανάλυση της τάξης των μm) (12, 18, 19, 41).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ηλεκτροχημικών τεχνικών είναι και η χρονική ανάλυση. Οι βολταμετρικές τεχνικές είναι κατάλληλες για μετρήσεις σε διαστήματα των 100ms (13), ή των 250ms, όπως ανέφερε ο *Stamford JA* (1985) (12), και γενικά αποτυπώνουν παροδικά συμβάντα εύρους 10-500ms (34). Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη, από την στιγμή που η ανίχνευση της απελευθέρωσης ή πρόσληψης νευροδιαβιβαστών συμβαίνει σε διαστήματα μικρότερα του ενός δευτερολέπτου (19, 34). Παρόλα αυτά, οι βολταμετρικές τεχνικές εκδηλώνουν περιορισμένες δυνατότητες στη μέτρηση μη παροδικών, μεγάλης χρονικής κλίμακας μεταβολών (18, 19), ενώ οι μετρήσεις με μικροδιάλυση περιορίζονται σε διαστήματα 5-20 λεπτών (13, 14) (χρονική κλίμακα της τάξης των λεπτών ή ωρών (19)).

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η μικροδιάλυση εκδηλώνει υψηλή ευαισθησία και επιλεξιμότητα, όντας ικανή να ανιχνεύσει οποιαδήποτε χημική ουσία, ανεξαρτήτως της δυνατότητας αυτής να οξειδώνεται (13, 14, 19).

8.1.4. Ανάκτηση Δεδομένων

Το εύρος του σήματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν από -0.150V έως +0.600V και η ενίσχυση εξαρτήθηκε από την ισχύ του σήματος κάθε μέτρησης. Οι λήψεις

βολταμετρικών σημάτων υλοποιήθηκαν όπως περιγράφηκε παραπάνω. (42-44) Οι μετρήσεις έγιναν με έναν ορθογώνιο παλμό (-0.1 έως 0.6V έναντι ηλεκτροδίου Ag^+/AgCl , $400\text{V}\cdot\text{sec}^{-1}$) επαναλαμβανόμενο κάθε 100 msec. Το ηλεκτρόδιο διατηρήθηκε στα -0.4 V μεταξύ των σαρώσεων. Η κυματομορφή παράχθηκε και το βολταμετρικό σήμα καταγράφηκε από έναν πολαρογράφο. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το *BIOPULSE Pulse Voltammetry System* (SOLEA amplifier, TACUSSEL Electronique, Lyon-Villeurbanne, France). Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας τροποποιημένος πολαρογράφος E506 (Metrohm, FRG) για τη λήψη των μετρήσεων διαφορικής βολταμετρίας (Differential Pulse Voltammetry/DPV).

8.1.5. Recording Sessions

Την ημέρα του πειράματος, ένα μικροηλεκτρόδιο ιών άνθρακα εμφυτεύθηκε στο ανατομικό σημείο ενδιαφέροντος με τη βοήθεια ενός μικρο-οδηγού (Microdrive) (University of North Carolina, Department of Chemistry, Instrument Shop). Η θέση του μικροηλεκτροδίου βελτιστοποιήθηκε ελέγχοντας μια ηλεκτρικώς προκλητή απελευθέρωση ντοπαμίνης (biphasic, 2 ms perphase, 24 pulses, 60 Hz, 125 μA). Όταν παρατηρήθηκε ένα σημαντικά ικανοποιητικό σήμα, στο ανατομικό σημείο ενδιαφέροντος, θεωρήθηκε αυτό ως η απαρχή των μετρήσεων (19). Τα καταγεγραμμένα δεδομένα, εκτυπώθηκαν σε χαρτί με τη χρήση πολαρογράφου και οι μετρήσεις κρατήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία (10).

8.1.6. Ψηφιοποίηση Δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων έπρεπε να πραγματοποιηθεί πρωτίστως η ψηφιοποίηση τους. Η ψηφιοποίηση των δεδομένων, δηλαδή των βολταμογραμμάτων, έγινε χειρονακτικά. Τα γραφήματα σχεδιάστηκαν σε μιλιμετρέ ριζόχαρτο μεγέθους A3 (297 \times 420mm), και ελήφθησαν μετρήσεις του μήκους του βολταγράμματος ανά 1 χιλιοστό του άξονα x . Δεδομένου ότι η ταχύτητα u του χαρτιού ήταν σταθερή κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων και ίση με u , χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$u = \frac{x}{t} \quad (7)$$

Ειδικότερα, $u = \frac{x}{t}$ (Εξίσωση 7), όπου u είναι η ταχύτητα του χαρτιού, x η απόσταση που διανύεται σε χρόνο t .

Αν αντικαταστήσουμε ως, $x=1\text{mm}=0.001\text{m}$, μπορούμε να λύσουμε ως προς t και να υπολογίσουμε την περίοδο ήτοι:

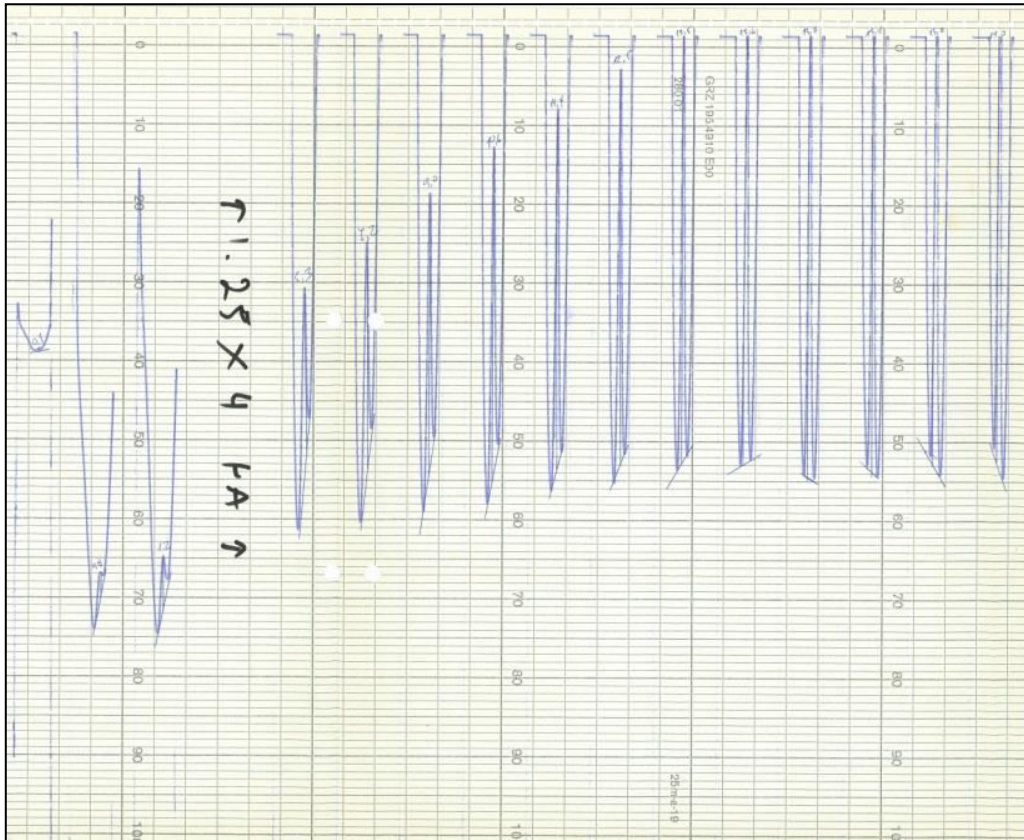
$$T = \frac{x}{u} \quad (8)$$

Ειδικότερα, $T = \frac{x}{u}$ (**Εξίσωση 8**), όπου T είναι η περίοδος της δειγματοληψίας, x η απόσταση που διανύεται και u η ταχύτητα του χαρτιού.

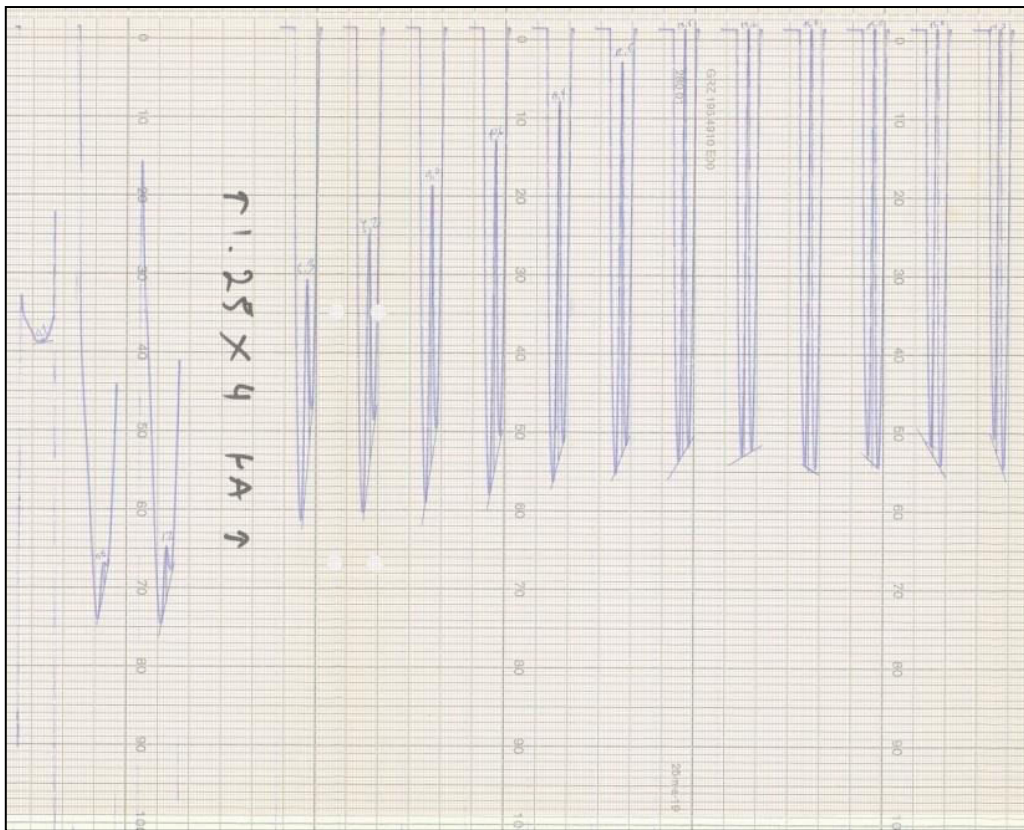
Να σημειωθεί εδώ ότι στον άξονα των y χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη διάσταση του αντιγραφικού χαρτιού (297mm), η οποία ήταν πάντα επαρκής. Η μεγάλη πλευρά του ριζόχαρτου (420mm) χρησιμοποιήθηκε στο μήκος της μέτρησης, και όπου αυτή δεν έφτανε (όπου δηλαδή η μέτρηση υπερέβαινε τα 420mm, κάτι που ισχύει για τις περισσότερες μετρήσεις), προστέθηκαν τα αναγκαία ριζόχαρτα διαδοχικά.

Στην **Εικόνα 80** φαίνεται ένας μέρος μόνο μιας τυχαία επιλεγμένης μέτρησης, ενώ στην **Εικόνα 81** προσθέσαμε ηλεκτρονικά ένα διάφανο millimeter για να παρουσιάσουμε μια προσομοίωση της διαδικασίας. Τέλος, στην **Εικόνα 82** παρουσιάζουμε την ίδια μέτρηση μετά την ψηφιοποίηση.

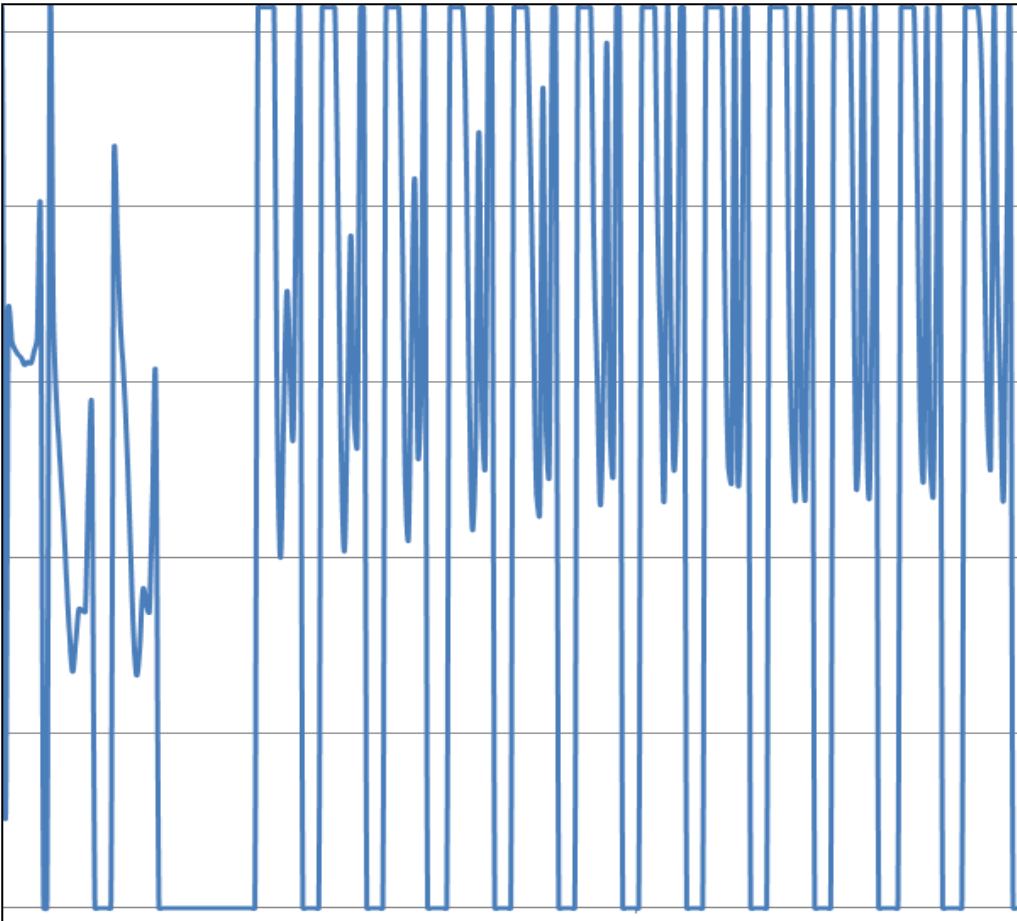
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη δια χειρός μέτρηση, εισήχθησαν στο πρόγραμμα Microsoft Excel ®, για περαιτέρω επεξεργασία. Τα ψηφιοποιημένα σήματα, ταξινομήθηκαν με βάση το είδος της μέτρησης, τις συνθήκες της μέτρησης και τις υπό μέτρηση ενώσεις.



Εικόνα 83. Φωτογραφία μιας μέτρησης (μπλε γραφίδα).



Εικόνα 84. Η μέτρηση με την προσθήκη διάφανου millimeter.



Εικόνα 85. Αναπαράσταση με Excel της παραπάνω μέτρησης μετά την ψηφιοποίηση.

8.1.7. Ανάλυση Δεδομένων

Μετά τη συλλογή των δεδομένων ακολούθησε η διόρθωση θορύβου και το ψηφιακό φιλτράρισμα (4-pole Bessel filter, 2 kHz) με προγράμματα γραμμένα στο LABVIEW (National Instruments). Επειδή η κορυφή οξείδωσης της ντοπαμίνης είναι 0.65V κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες, εξετάστηκαν αλλαγές του ρεύματος στο συγκεκριμένο δυναμικό. Για την αξιολόγηση της παρουσίας ντοπαμίνης ατομικά, τα διορθωμένα βολταμογράμματα συγκρίθηκαν με πρότυπα βολταμογράμματα ντοπαμίνης, και υπολογίσθηκε ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης r . Εκτός από τη νορεπινεφρίνη, τα κυκλικά βολταμογράμματα όλων των ελεγχόμενων ουσιών έχουν έναν συντελεστή αυτοσυσχέτισης ίσο με 0.86 όταν συγκρίνονται με τη ντοπαμίνη. Σε αυτή την εργασία, τα κυκλικά βολταμογράμματα θεωρούντο ως ταυτοποιηθέντα με τη ντοπαμίνη μόνο εάν προέκυπτε συντελεστής αυτοσυσχέτισης $r > 0.86$.

8.1.8. Μετασχηματισμός Fourier

Τα διορθωμένα για το θόρυβο βολταμογράμματα, υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση με μετασχηματισμό Fourier. Τα σήματα ήταν διακριτού χρόνου, συνεπώς

εφαρμόσαμε Μετασχηματισμό Fourier Διακριτού Χρόνου (Discrete Time Fourier Transform (DTFT)) και Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform (DFT)).

8.1.8.1. Μετασχηματισμός Fourier Διακριτού Χρόνου (DTFT)

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως. Αν συμβολίσουμε το σήμα του διακριτού χρόνου ως $x[n]$, τότε ο DTFT περιγράφεται από τη σχέση:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (9)$$

Ειδικότερα, $X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n}$ (Εξίσωση 9), όπου $x[n]$ είναι το σήμα

διακριτού χρόνου και ω η συχνότητα.

Η $x[n]$ γράφεται ως σύνθεση μικρών μιγαδικών ημιτονοειδών, ήτοι:

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (10)$$

Ειδικότερα, $x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega$ (Εξίσωση 10), όπου $X(e^{j\omega})$ είναι το

Φουριεριανό μετασχημάτισμα και ω η συχνότητα.

Η σχέση αυτή αποτελεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Time Fourier Transform (IDTFT)).

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι η μιγαδική συνάρτηση της συχνότητας ω . Συνεπώς, μπορεί να εκφραστεί είτε σε καρτεσιανή μορφή:

$$X(e^{j\omega}) = X_R(e^{j\omega}) + jX_I(e^{j\omega}) \quad (11)$$

Ειδικότερα, $X(e^{j\omega}) = X_R(e^{j\omega}) + jX_I(e^{j\omega})$ (Εξίσωση 11), όπου $X_R(e^{j\omega})$ το πραγματικό μέρος της συνάρτησης και $X_I(e^{j\omega})$ το φανταστικό μέρος της συνάρτησης,

είτε σε πολική μορφή, ως $X(e^{j\omega}) = |X(e^{j\omega})|e^{j\angle X(e^{j\omega})}$, όπου $|X(e^{j\omega})|$ το μέτρο της μιγαδικής συνάρτησης και $\angle X(e^{j\omega})$ η γωνία της.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, χρησιμοποιούμε την πολική αναπαράσταση του μετασχηματισμού Fourier, όπως θα φανεί και παρακάτω, στις γραφικές παραστάσεις του μέτρου και της γωνίας των μετασχηματισμών των βολταμμογραμμάτων. Σημειώνουμε ακόμα ότι για να υπάρχει η $X(e^{j\omega})$ και να συγκλίνει ομοιόμορφα σε συνεχή συνάρτηση του ω , πρέπει η $x[n]$ να είναι απολύτως αθροίσιμη, δηλαδή να ισχύει:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]| < \infty \quad (12)$$

Ειδικότερα, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]| < \infty$ (**Εξίσωση 12**), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου.

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη συνθήκη απόλυτης αθροισιμότητας, η οποία είναι ικανή συνθήκη ύπαρξης της $X(e^{j\omega})$. Βέβαια, δεν είναι όλες οι ακολουθίες απολύτως αθροίσιμες, αλλά υπάρχουν και τετραγωνικά αθροίσιμες ακολουθίες, για τις οποίες ισχύει:

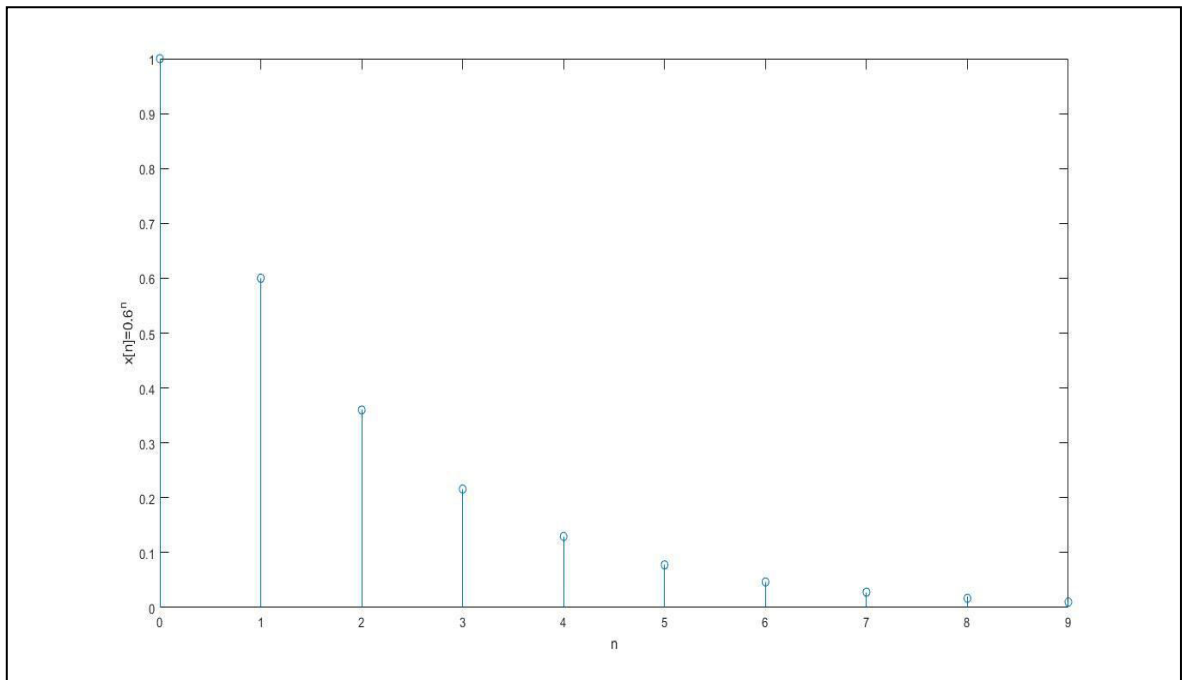
$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 < \infty \quad (13)$$

Ειδικότερα, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 < \infty$ (**Εξίσωση 13**), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου.

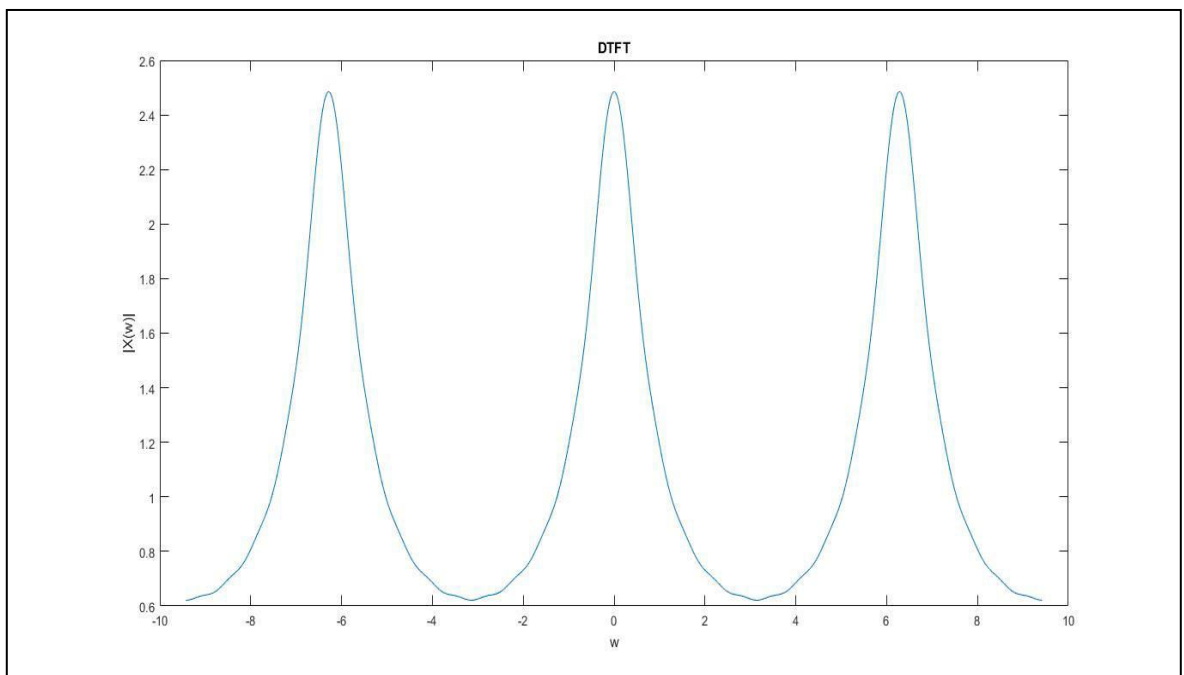
Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ο μετασχηματισμός Fourier και παρουσιάζει μεσο-τετραγωνική σύγκλιση. Υπάρχουν, τέλος, συναρτήσεις που δεν εκδηλώνουν ούτε απόλυτη, ούτε τετραγωνική αθροισιμότητα, αλλά που είναι χρήσιμος ο μετασχηματισμός Fourier. Τέτοιες είναι η σταθερή συνάρτηση $x[n]=1$, για κάθε n , η μοναδιαία βηματική ακολουθία $u[n]$, κλπ. Ολοκληρώνοντας αυτή τη σύνοψη, παραθέτουμε τις εξής ιδιότητες του DTFT, οι οποίες θα γίνουν διακριτές και στους μετασχηματισμούς των βολταμμογραμμάτων των επόμενων κεφαλαίων:

α) ο DTFT είναι συνεχής και περιοδικός ως προς ω με περίοδο 2π (**Εικόνα 84**).

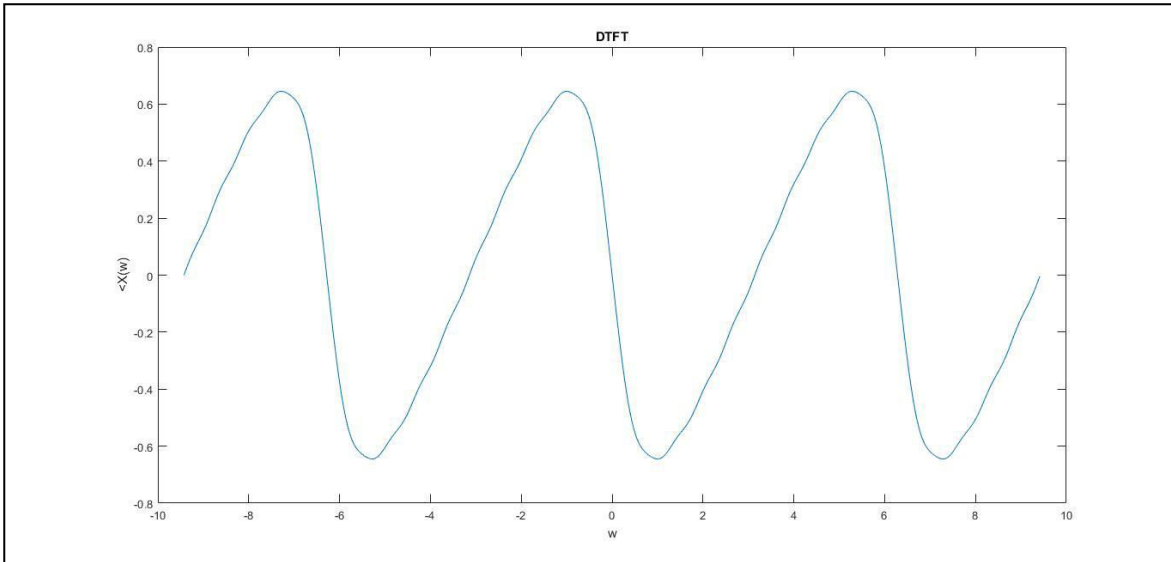
β) αν η $x[n]$ είναι πραγματική συνάρτηση, τότε το μέτρο $|X(e^{j\omega})|$ είναι άρτια συνάρτηση και η γωνία $\angle X(e^{j\omega})$ περιττή συνάρτηση ως προς ω (**Εικόνα 85**).



Εικόνα 86. Γραφική παράσταση της συνάρτησης διακριτού χρόνου $x[n]=0.6^n$, για $0 \leq n \leq 9$.



Εικόνα 87. Γραφική παράσταση του μέτρου $|X(e^{j\omega})|$ του DTFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$ της προηγούμενης εικόνας. Διακρίνεται ότι το μέτρο του DTFT είναι συνεχής συνάρτηση και περιοδική ως προς ω .



Εικόνα 88. Γραφική παράσταση της γωνίας $\angle X(e^{j\omega})$ του DTFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$. Φαίνεται ότι η γωνία του DTFT είναι περιττή συνάρτηση του ω .

8.1.8.2. Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Αντίστοιχα, όπως στην περίπτωση του μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου, ορίζεται και ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier και μπορεί να ορισθεί ως ακολούθως. Σε ένα σήμα $x[n]$ πεπερασμένου μήκους N , μπορούμε να υπολογίσουμε τον Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform (DFT)) κατά τρόπο:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (14)$$

Ειδικότερα,
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (\text{Εξίσωση } 14),$$

όπου όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου.

Ο αντίστροφος DFT (IDFT) δίνεται από την σχέση:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (15)$$

Ειδικότερα,
$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi nk}{N}}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (\text{Εξίσωση } 15),$$
 όπου

$x[n]$, $X(k)$ ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier του $x[n]$.

Φαίνεται λοιπόν ότι $X[k]=0$ εκτός του διαστήματος $[0, N-1]$. Οι τιμές του DFT είναι μιγαδικές, συνεπώς παρουσιάζονται οι δύο εναλλακτικοί τρόποι αναπαράστασης που εκτέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για τον DTFT:

α) καρτεσιανή μορφή: $X[k]=Re\{X[k]\}s+jIm\{X[k]\}$

β) πολική μορφή: $x[k] = \left| x[k]e^{j\angle x(k)} \right|$.

Ο DFT των βολταμμογραμμάτων θα αποτυπωθεί γραφικά χρησιμοποιώντας την πολική μορφή.

Δύο παρατηρήσεις είναι σημαντικές:

α) ο DFT παίρνει διακριτό σήμα στον χρόνο και δίνει διακριτό σήμα στην συχνότητα, σε αντίθεση με τον DTFT που λαμβάνει σήμα διακριτού χρόνου και δίνει συνεχές σήμα στη συχνότητα (**Εικόνα 86, Εικόνα 87**).

β) ο DFT είναι ουσιαστικά μια δειγματοληψία στη συχνότητα του DTFT. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής:

Έστω ένα σήμα $x[n]$, όπου $x[n]=0$ εκτός του διαστήματος $[0, N-1]$. Ο DTFT είναι δίνεται από:

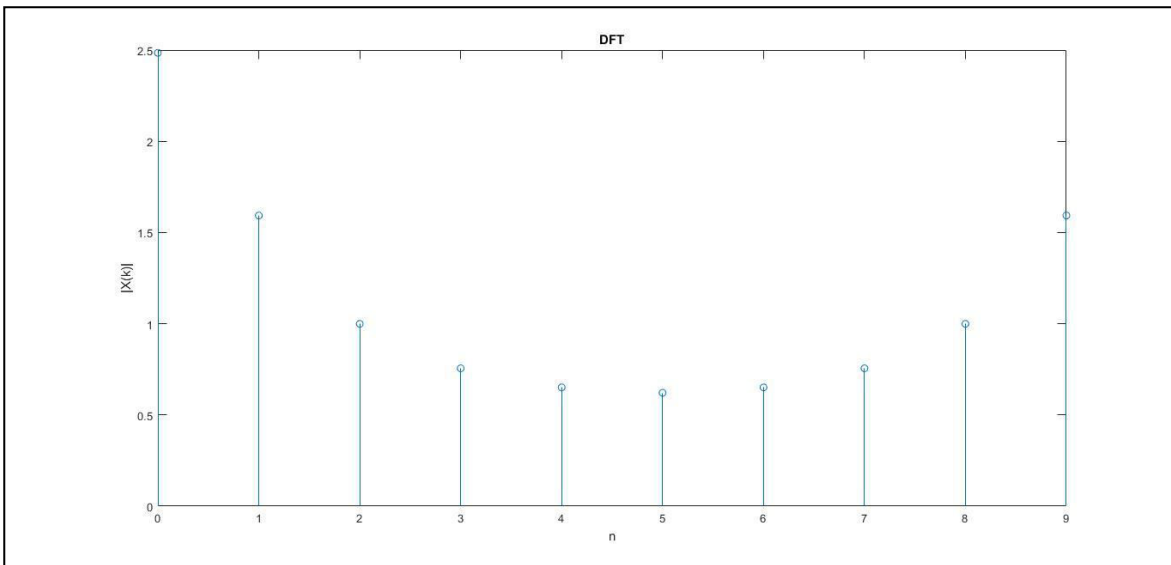
$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\omega n} \quad (16)$$

Ειδικότερα,
$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\omega n} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\omega n} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

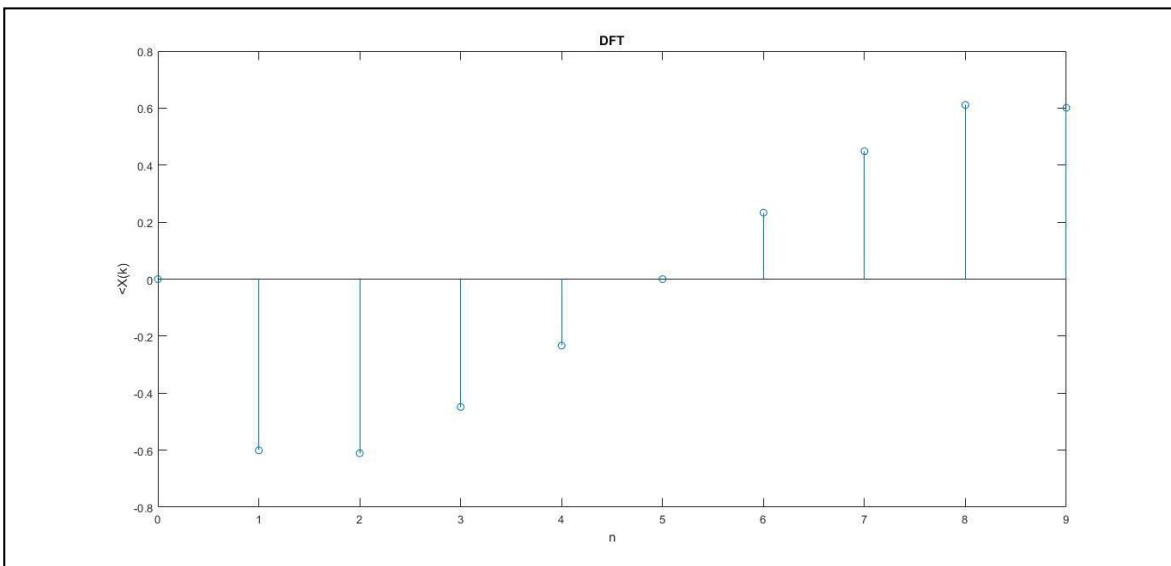
16), όπου $x[n]$ το σήμα διακριτού χρόνου, $X(e^{j\omega})$ ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου του $x[n]$, και ω η συχνότητα.

Αν αντικαταστήσουμε ως $\omega = \frac{2\pi k}{N}$, διαπιστώνουμε ότι ο DTFT γίνεται

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad \text{και ταυτίζεται με τον DFT.}$$



Εικόνα 89. Γραφική παράσταση του μέτρου $|X[k]|$ του DFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$. Διακρίνεται ότι το μέτρο του DFT είναι διακριτή συνάρτηση, σε αντίθεση με τον DTFT.



Εικόνα 90. Γραφική παράσταση της γωνίας $\angle X[k]$ του DFT της συνάρτησης $x[n]=0.6^n$.

8.2. Ο Υπολογισμός του Μετασχηματισμού Fourier με τη Χρήση της Συστοιχίας Υπολογιστών

Για να γίνει η αξιολόγηση της απόδοσης της συστοιχίας, «τρέξαμε» τον ακόλουθο κώδικα σε έναν υπολογιστή P4 και ακολούθως στη συστοιχία σε έξι επεξεργαστές P4 (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ). Το αποτέλεσμα του υπολογισμού ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρον, αφού

φάνηκε ότι η παράλληλη επεξεργασία στη συστοιχία απέδωσε αποτελέσματα πολύ ταχύτερα. Ειδικότερα, η συνολική διαδικασία διήρκεσε 226min (**Πίνακας 27**) με ένα επεξεργαστή ενώ αντίθετα με 3×8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές διήρκεσε 2.98min (**Πίνακας 28**) και με τη χρήση GPUs διήρκεσε 0.27min (**Πίνακας 29**) (**Εικόνα 91**).

Επιπροσθέτως, υλοποιήσαμε ένα αλγόριθμο ο οποίος περιελάμβανε μια απλή ρουτίνα ενός μετασχηματισμού Fourier ο οποίος επαναλαμβανόταν για 10000 φορές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (**Πίνακας 30**, **Πίνακας 31**, **Πίνακας 32**). Ως εκ τούτου, η ρουτίνα χρειάστηκε 0.12min για να τρέξει σε ένα 8-πύρηνο επεξεργαστή, 0.013min στη συστοιχία 3×8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές και 0.0048min στη GPU (**Εικόνα 92**). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ήταν εξαιρετικά σημαντική η μείωση του χρόνου με τη χρήση συστοιχιών. Ειδικότερα, οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (**Πίνακας 27**, **Πίνακας 28**, **Πίνακας 29**) έγιναν 75× ταχύτερα στη συστοιχία ενώ έγιναν 813× ταχύτερα με τη χρήση των GPUs. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ήταν εξαιρετικά σημαντική η μείωση του χρόνου με τη χρήση συστοιχιών στο «τρέξιμο» του βρόγχου επαναλήψεων. Ειδικότερα, οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (**Πίνακας 30**, **Πίνακας 31**, **Πίνακας 32**) έγιναν 7.7× ταχύτερα στη συστοιχία ενώ έγιναν 17× ταχύτερα με τη χρήση των GPUs. Σημειώνεται ότι παρουσιάζεται μια διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων για τον αλγόριθμο του μετασχηματισμού Fourier, ο οποίος ήταν πιο απαιτητικός (**Εικόνα 91**) σε σχέση με τον αλγόριθμο που ήταν λιγότερο απαιτητικός (**Εικόνα 92**). Ο λόγος για αυτό είναι ότι υπάρχει καθυστέρηση στη μεταφορά των δεδομένων μέσα από τους διαύλους επικοινωνίας του υπολογιστή. Έτσι όταν ο όγκος δεδομένων είναι μικρός η μεταφορά στην CPU είναι τάχιστα, ενώ η μεταφορά δεδομένων μέσω ενός δικτύου και στις GPU παίρνει περισσότερο χρόνο. Από το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται ότι όσο πιο απαιτητική είναι η υπολογιστική ανάγκη τόσο επιτακτικότερη είναι η χρήση συστοιχιών.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
process	1	13589.9750	226.4996	13.7303	0.1480	-2.7563
mupadmex (MEX-file)	17167	13588.4250	226.4738	13.7301	13588.2530	13.7301
sym.sym>sym.double	9	8975.1680	149.5861	13.1317	0.3380	-1.5649
sym.sym>sym.privUnaryOp	24	4472.7140	74.5452	12.1269	0.0050	-7.6439
sym.abs	5	2294.7310	38.2455	11.1641	0.0010	-9.9658
sym.angle	4	2172.8830	36.2147	11.0854	0.0010	-9.9658
procl	5	146.9910	2.4499	7.1996	0.0060	-7.3808
MSF	5	146.9200	2.4487	7.1989	0.0220	-5.5064
sym.subs	5	117.3900	1.9565	6.8752	0.0030	-8.3808
sym.subs>mupadsubs	5	117.3840	1.9564	6.8751	0.0040	-7.9658
dtft	5	29.5080	0.4918	4.8830	0.0340	-4.8783
sym.sym>sym.privBinaryOp	15	18.8250	0.3138	4.2346	0.0090	-6.7959
sym.sym>tomupad	467	13.0960	0.2183	3.7111	0.0130	-6.2653
sym.sym>cell2ref	88	13.0300	0.2172	3.7038	0.0060	-7.3808
sym.sym>sym.mtimes	10	9.7480	0.1625	3.2851	0.0030	-8.3808
sym.sym>sym.privResolveArgs	483	9.3580	0.1560	3.2262	0.0250	-5.3219
sym.sym>sym.times	5	9.0820	0.1514	3.1830	0.0020	-8.9658
sym.exp	5	5.0700	0.0845	2.3420	0.0020	-8.9658
sym.display	5	3.9270	0.0655	1.9734	0.0190	-5.7179
sym.display>displayVariable	5	3.7550	0.0626	1.9088	0.0210	-5.5735
sym.subs>normalize	5	3.7390	0.0623	1.9027	0.0140	-6.1584
sym.disp	5	3.7340	0.0622	1.9007	0.0240	-5.3808
...dengine>mupadengine.collectGarbage	5	2.8990	0.0483	1.5356	0.0010	-9.9658
sym.sym>sym.sym	467	2.2420	0.0374	1.1648	0.0190	-5.7179

Πίνακας 27. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε ένα επεξεργαστή.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
Parallel_Routine	1	179.1560	2.9859	7.4851		
			0.0000		0.0220	-5.5064
parallel_function	1	179.1330	2.9856	7.4849		
proc1	5		0.0000		0.0500	-4.3219
MSF	5	174.1630				
			0.0000		0.0110	-6.5064
mupadmex (MEX-file)	20938	174.0800				
			0.0000		0.0270	
sym.subs	5	173.1180			172.8570	7.4334
			0.0000			
sym.subs>mupadsubs	5	155.5520				
dtft	5		0.0000		0.0030	-8.3808
sym.sym>sym.privBinaryOp	15	155.5460	2.5924	7.2812		
sym.sym>tomupad	458		0.0000		0.0030	-8.3808
sym.sym>cell2ref	88	18.5000	0.3083	4.2095	0.0510	-4.2934
sym.sym>sym.privResolveArgs	455	11.5250	0.1921	3.5267	0.0090	-6.7959
sym.sym>sym.times	5	8.2980	0.1383	3.0528	0.0130	-6.2653
sym.sym>sym.mtimes	10	8.2440	0.1374	3.0433	0.0060	-7.3808
sym.display	5	5.8580	0.0976	2.5504	0.0020	-8.9658
sym.display>displayVariable	5	5.8450	0.0974	2.5472	0.0250	-5.3219
sym.disp	5	5.6720	0.0945	2.5039	0.0020	-8.9658

Πίνακας 28. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
GPU Routine	1	15.9529	0.2659	3.9957	0.1480	-2.7563
mupadmex (MEX-file)	17167	0.0000	0.0000		13588.2530	13.7301
sym.sym>sym.double	9	14.7805	0.2463	3.8856	0.3380	-1.5649
sym.sym>sym.privUnaryOp	24	0.0000	0.0000		0.0050	-7.6439
sym.abs	5	13.9261	0.2321	3.7997	0.0010	-9.9658
sym.angle	4	0.0000	0.0000		0.0010	-9.9658
procl	5	18.4785	0.3080	4.2078	0.0060	-7.3808
MSF	5	0.0000	0.0000		0.0220	-5.5064
sym.subs	5	11.8581	0.1976	3.5678	0.0030	-8.3808
sym.subs>mupadsubs	5	0.0000	0.0000		0.0040	-7.9658
dtft	5	11.7480	0.1958	3.5543	0.0340	-4.8783
sym.sym>sym.privBinaryOp	15	0.0000	0.0000		0.0090	-6.7959
sym.sym>tomupad	467	18.7129	0.3119	4.2260	0.0130	-6.2653
sym.sym>cell2ref	88	0.0000	0.0000		0.0060	-7.3808
sym.sym>sym.mtimes	10	1.8840	0.0314	0.9138	0.0030	-8.3808
sym.sym>sym.privResolveArgs	483	0.9996	0.0167	-0.0006	0.0250	-5.3219
sym.sym>sym.times	5	0.6212	0.0104	-0.6869	0.0020	-8.9658
sym.exp	5	0.6195	0.0103	-0.6908	0.0020	-8.9658
sym.display	5	0.6670	0.0111	-0.5842	0.0190	-5.7179
sym.display>displayVariable	5	0.4132	0.0069	-1.2752	0.0210	-5.5735
sym.subs>normalize	5	0.7706	0.0128	-0.3760	0.0140	-6.1584
sym.disp	5	0.0000	0.0000		0.0240	-5.3808
...dengine>mupadengine.collectGarbage	5	0.0000	0.0000		0.0010	-9.9658
sym.sym>sym.sym	467	0.0000	0.0000		0.0190	-5.7179

Πίνακας 29. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) του μετασχηματισμού Fourier για τα βολταμετρικά σήματα σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές και 2xGPUs.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
Normal_DFT_Routine	10000	7.462	0.1244	2.8996	0.032	-4.9658
dft	10000	7.43	0.1238	2.8934	0.302	-1.7274
close	10000	7.128	0.1188	2.8335	0.67	-0.5778
close>safegetchildren	10000	4.705	0.0784	2.2342	0.137	-2.8678
allchild	10000	4.568	0.0761	2.1916	2.647	1.4044
close>getEmptyHandleList	10000	1.71	0.0285	0.7740	1.71	0.7740
onCleanup>onCleanup.delete	10000	0.998	0.0166	-0.0029	0.2	-2.3219
...set(rootobj,'ShowHiddenHandles',Temp)	10000	0.797	0.0133	-0.3273	0.797	-0.3273
allchild>getchildren	10000	0.682	0.0114	-0.5522	0.682	-0.5522
onCleanup>onCleanup.onCleanup	10000	0.135	0.0023	-2.8890	0.135	-2.8890
uitools\private\allchildRootHelper	10000	0.106	0.0018	-3.2379	0.106	-3.2379
uitools\private\allchildRootHelper	10000	0.043	0.0007	-4.5395	0.043	-4.5395
close>checkfigs	10000	0.043	0.0007	-4.5395	0.043	-4.5395

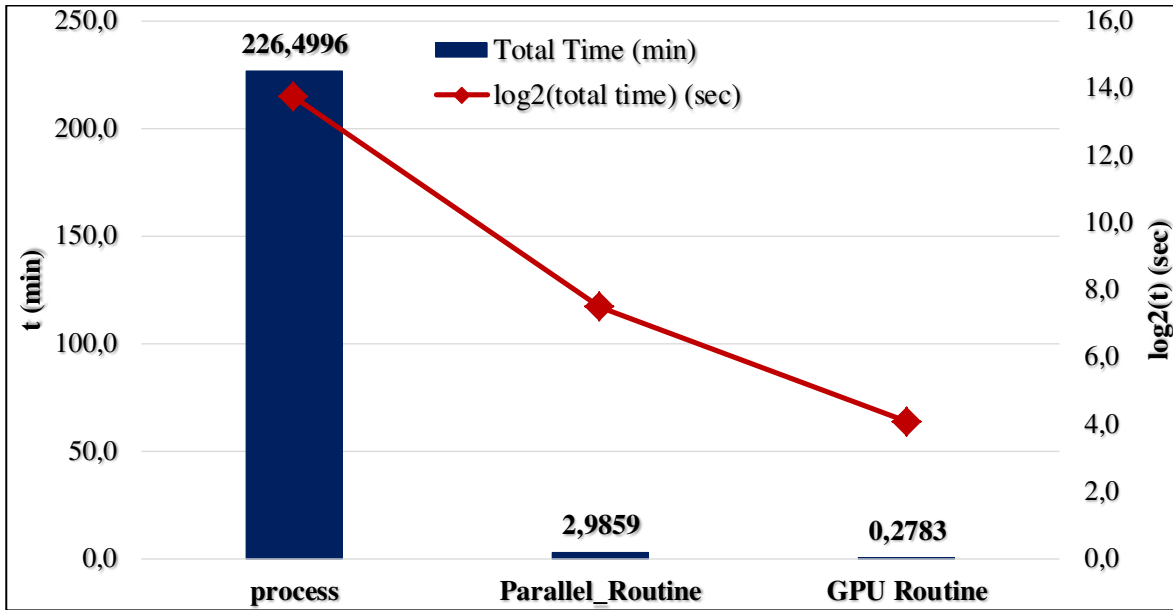
Πίνακας 30. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε 1 (8 πυρήνες) επεξεργαστή.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
Parallel DFT Routine	1	0.7959	0.0133	-0.3298	0.005	-7.6439
parallel_function	1	0.6713	0.0112	-0.5750	0.048	-4.3808
dft	10000	0.7221	0.0120	-0.4698	0.314	-1.6712
close	10000	0.3438	0.0057	-1.5402	0.694	-0.5270
close>safegetchildren	10000	0.4018	0.0067	-1.3154	0.137	-2.8678
allchild	10000	0.2077	0.0035	-2.2672	2.426	1.2786
close>getEmptyHandleList	10000	0.1142	0.0019	-3.1302	1.738	0.7974
onCleanup>onCleanup.delete	10005	0.1361	0.0023	-2.8778	0.208	-2.2653
...arfor>remoteparfor.tryRemoteParfor	1	0.0918	0.0015	-3.4447	0	#NUM!
pctTryCreatePoolIfNecessary	1	0.0189	0.0003	-5.7262	0.002	-8.9658
...rayManager.getOrAutoCreateWithCleanup	1	0.0089	0.0001	-6.8061	0.002	-8.9658
parpool	1	0.0047	0.0001	-7.7396	0.003	-8.3808
doParpool	1	0.0047	0.0001	-7.7226	0.003	-8.3808
...set(rootobj,'ShowHiddenHandles',Temp)	10000	0.0000	0.0000		0.805	-0.3129
Pool.Pool>Pool.hBuildPool	1	0.0000	0.0000		0.003	-8.3808
Pool.Pool>iStartClient	1	0.0000	0.0000		0.004	-7.9658

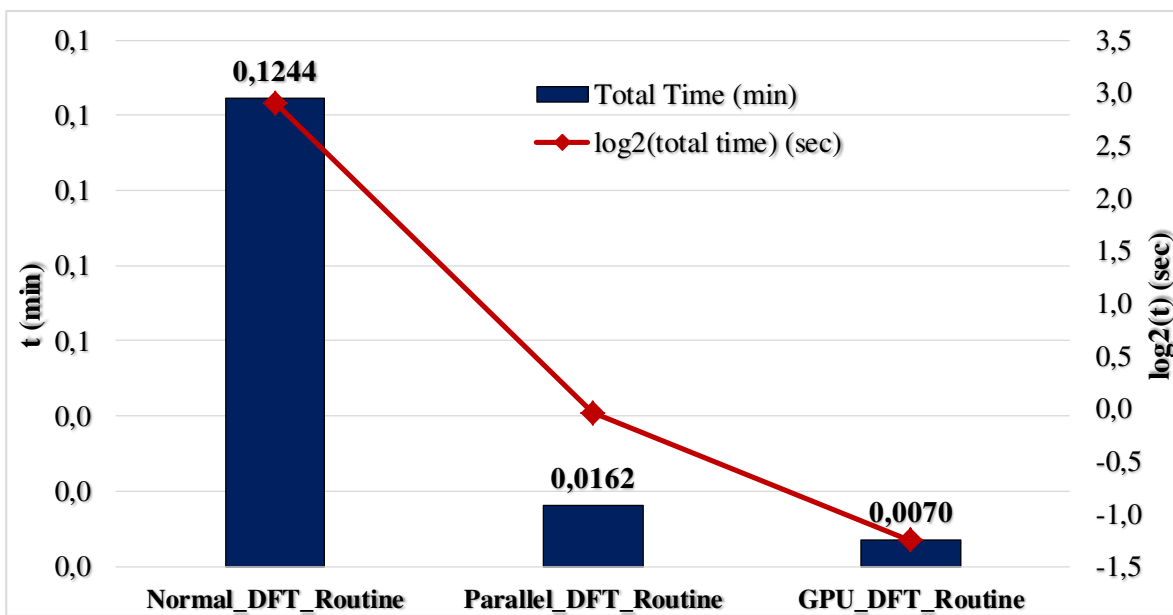
Πίνακας 31. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε σε 3x8 (24 πυρήνες) επεξεργαστές.

Function Name	Calls	Total Time (sec)	Total Time (min)	log2(total time) (sec)	Self Time* (sec)	log2(self time) (sec)
GPU_DFT_Routine	1	0.2858	0.0048	-1.8067	2.495	1.3190
dft	10000	0.2491	0.0042	-2.0052	3.648	1.8671
close	10000	0.3459	0.0058	-1.5316	0.729	-0.4560
close>safegetchildren	10000	0.2673	0.0045	-1.9033	0.139	-2.8468
allchild	10000	0.3370	0.0056	-1.5690	2.717	1.4420
close>getEmptyHandleList	10000	0.0992	0.0017	-3.3337	1.767	0.8213
onCleanup>onCleanup.delete	10000	0.0471	0.0008	-4.4088	0.208	-2.2653
...set(rootobj,'ShowHiddenHandles',Temp)	10000	0.0635	0.0011	-3.9760	0.81	-0.3040
allchild>getchildren	10000	0.0504	0.0008	-4.3109	0.695	-0.5249
onCleanup>onCleanup.onCleanup	10000	0.0095	0.0002	-6.7246	0.138	-2.8573
uitools\private\allchildRootHelper	10000	0.0045	0.0001	-7.7869	0.109	-3.1976
defaultGPUIndex	1	0.0026	0.0000	-8.6045	0.028	-5.1584
close>checkfigs	10000	0.0017	0.0000	-9.1754	0.044	-4.5064
sortDevicesByComputeMode	1	0.0000	0.0000		0.004	-7.9658
gpuDeviceCount	1	0.0000	0.0000		0.012	-6.3808
GPUDevice.GPUDevice>GPUDevice.getDevice	2	0.0000	0.0000		0.007	-7.1584

Πίνακας 32. Η απόδοση και ο χρόνος υπολογισμού (benchmarking) ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων σε 2xGPUs.



Εικόνα 91. Γραφική παράσταση του χρόνου υπολογισμού του μετασχηματισμού Fourier με τη χρήση ενός επεξεργαστή, της συστοιχίας υπολογιστών και των GPUs.



Εικόνα 92. Γραφική παράσταση του χρόνου υπολογισμού του ενός μετασχηματισμού Fourier σε βρόγχο 10000 επαναλήψεων με τη χρήση ενός επεξεργαστή, της συστοιχίας υπολογιστών και των GPUs.

ΜΕΡΟΣ IV-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

9. Η ΧΡΗΣΗ ΜΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

9.1. Γιατί να Χρησιμοποιηθεί ένα Cluster

Ένα σημαντικό ερώτημα είναι το γιατί να χρησιμοποιηθεί cluster αντί για έναν μεμονωμένο υπολογιστή. Στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο λόγοι: επιδόσεις και ανοχή σε σφάλματα. Ο πρωταρχικός λόγος της ανάπτυξης των Beowulf clusters ήταν για την παροχή χαμηλού κόστους υπολογιστικής ισχύος για επιστημονικές εφαρμογές έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες έργων που απαιτούσαν υψηλότερες υπολογιστικές επιδόσεις από εκείνες που προσφέρονταν από εμπορικούς μεμονωμένους επεξεργαστές ή οικονομικά ανεκτούς πολυεπεξεργαστές. Μία εφαρμογή μπορεί να απαιτεί περισσότερη υπολογιστική ισχύ για πολλούς λόγους, αλλά οι ακόλουθοι τρεις είναι οι πιο κοινοί:

- **Περιορισμοί σε πραγματικό χρόνο**, δηλαδή, απαίτηση ο υπολογισμός να ολοκληρώνεται εντός συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Η πρόγνωση του καιρού είναι ένα παράδειγμα. Ένα άλλο είναι η επεξεργασία δεδομένων που παράγονται από ένα πείραμα. Τα δεδομένα πρέπει να επεξεργάζονται (ή να αποθηκεύονται) τουλάχιστον τόσο γρήγορα όσο παράγονται.
- **Throughput**: Μια επιστημονική ή engineering προσομοίωση μπορεί να απαιτήσει πολλούς υπολογισμούς. Ένα cluster μπορεί να παρέχει τους πόρους για την επεξεργασία πολλών σχετικών μεταξύ τους προσομοιώσεων. Από την άλλη πλευρά, μερικές απλές προσομοιώσεις απαιτούν τόσο πολλή υπολογιστική ισχύ ώστε ένας μόνο επεξεργαστής να απαιτεί ημέρες ή και χρόνια για να ολοκληρώσει τον υπολογισμό. Ένα παράδειγμα χρήσης ενός cluster Linux Beowulf για τη διακίνηση είναι το Google, το οποίο χρησιμοποιεί πάνω από 15.000 εμπορικούς υπολογιστές με λογισμικό ανεκτικότητας σφαλμάτων για την παροχή υπηρεσίας αναζήτησης ιστού υψηλής απόδοσης.
- **Μνήμη**: Μερικές από τις πιο απαιτητικές εφαρμογές απαιτούν τεράστια ποσά δεδομένων ως μέρος της προσομοίωσης. Ένα cluster παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο για την παροχή ακόμα και terabytes (10^{12} bytes) μνήμης προγράμματος για μια εφαρμογή.

Οι clusters παρέχουν την υπολογιστική ισχύ μέσω της χρήσης παράλληλου προγραμματισμού, μιας τεχνικής που συντονίζει την χρήση πολλών επεξεργαστών για ένα μεμονωμένο πρόβλημα. Αυτό για το οποίο οι clusters δεν είναι καλοί είναι η επιτάχυνση

των υπολογισμών που δεν είναι ούτε μνημοβόροι ούτε κοστοβόροι από πλευράς επεξεργασίας ή (με έναν τρόπο που θα γίνει ξεκάθαρος παρακάτω) που απαιτούν συχνή επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών του cluster.

Ένας άλλος λόγος για τη χρήση clusters είναι για να παρασχεθεί ανοχή σφάλματος, δηλαδή η εξασφάλιση ότι υπολογιστική ισχύς είναι πάντα διαθέσιμη. Επειδή τα clusters συναρμολογούνται από πολλά αντίγραφα των ίδιων ή παρομοίων εξαρτημάτων, η αποτυχία ενός μεμονωμένου μέρους μειώνει μόνο την ισχύ του συμπλέγματος. Έτσι, τα clusters είναι ιδιαίτερα καλές επιλογές για περιβάλλοντα που απαιτούν εγγυήσεις διαθέσιμης επεξεργασίας ισχύος, όπως διακομιστές Web (Web Servers) και συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων.

Παρατηρούμε ότι η ανοχή σφάλματος μπορεί να ερμηνευτεί με διάφορους τρόπους. Για έναν διακομιστή Web ή για την διαχείριση δεδομένων, το cluster μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο υπάρχουν αρκετοί επεξεργαστές και χωρητικότητα δικτύου ώστε να καλύπτονται οι απαιτούμενες ανάγκες. Ένα καλά cluster σύμπλεγμα μπορεί να προσφέρει μια εικονική εγγύηση για διαθεσιμότητα, με εξαίρεση την περίπτωση φυσικής καταστροφής, όπως π.χ. από μια πυρκαγιά που πλήττει ολόκληρο το cluster. Ένα τέτοιο cluster θα έχει σχεδόν 100% uptime. Για τις επιστημονικές εφαρμογές, η ερμηνεία του χρόνου λειτουργίας (uptime) είναι συχνά διαφορετική. Για clusters που χρησιμοποιούνται για επιστημονικές εφαρμογές, ωστόσο, ειδικά για εκείνες που χρησιμοποιούνται για την παροχή επαρκούς μνήμης, το uptime μετράται σχετικά με το μικρότερο δυνατό μέγεθος του cluster (π.χ. αριθμός κόμβων) που επιτρέπει στις εφαρμογές να εκτελούνται. Σε πολλές περιπτώσεις, όλοι ή σχεδόν όλοι οι κόμβοι του cluster πρέπει να είναι διαθέσιμοι για την εκτέλεση αυτών των εφαρμογών. Φυσικά, πολλές χρήσεις των clusters είναι ένας συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων.

9.2. Κατανοώντας τις Απαιτήσεις των Εφαρμογών

Για να κατανοήσουμε ποιες εφαρμογές είναι κατάλληλες για εκτέλεση σε cluster computing και τι ανταλλάγματα (trade-offs) εμπλέκονται κατά τον σχεδιασμό του cluster, χρειάζεται κανείς να κατανοήσει τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

9.2.1. Υπολογιστικές Απαιτήσεις

Η πιο προφανής απαίτηση (τουλάχιστον σε επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές) είναι ο αριθμός των πράξεων κινητής υποδιαστολής που απαιτούνται για την εκτέλεση του

υπολογισμού. Για απλούς υπολογισμούς, ο υπολογισμός αυτού του αριθμού είναι σχετικά εύκολος. Ακόμη και σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις, είναι συνήθως δυνατή μια χονδρική εκτίμηση. Οι περισσότερες κοινότητες έχουν μεγάλη και πλούσια βιβλιογραφία σχετικά με τις απαιτήσεις σε floating-point πράξεις των εφαρμογών και τα αποτελέσματα αυτών των μελετών θα πρέπει πρώτα να συμβουλευτεί κανείς αυτά. Τα περισσότερα βιβλία σχετικά με την αριθμητική ανάλυση μπορούν να παρέχουν τύπους για τον αριθμό των λειτουργιών floating-point που απαιτούνται για πολλές κοινές λειτουργίες. Για παράδειγμα, η λύση ενός συστήματος n γραμμικών εξισώσεων. Εάν λυθεί με τους πιο συνηθισμένους αλγορίθμους, παίρνει $2n^3/3$ πράξεις κινητής υποδιαστολής. Παρόμοιες φόρμουλες υπάρχουν για πολλά κοινά προβλήματα.

Ίσως περιμένει κανείς ότι συγκρίνοντας το πλήθος των floating-point πράξεων με τις επιδόσεις του επεξεργαστή (σε όρους μέγιστων λειτουργιών ανά δευτερόλεπτο) μπορεί να κάνει μια καλή εκτίμηση του χρόνου που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί ένας υπολογισμός. Για παράδειγμα, σε έναν επεξεργαστή 2 GHz, ικανό για 2×10^9 πράξεις κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο (2 GFLOPS), ένας υπολογισμός που απαιτούσε 1 δισεκατομμύριο πράξεις κινητής υποδιαστολής θα χρειαζόταν μόνο μισό δευτερόλεπτο. Ωστόσο, αυτή η εκτίμηση αγνοεί τον μεγάλο ρόλο που παίζει η απόδοση του συστήματος μνήμης στην απόδοση του συνολικού συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, ο ρυθμός με τον οποίο τα δεδομένα μπορούν να παραδοθούν στον επεξεργαστή είναι ένα καλύτερο μέσο μέτρησης της επιτεύξιμης απόδοσης μιας εφαρμογής.

Έτσι, όταν εξετάζουμε τις υπολογιστικές απαιτήσεις, είναι επιτακτικό να γνωρίζουμε ποια θα είναι η αναμενόμενη επιτεύξιμη απόδοση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση τυποποιημένων benchmarks, όπως το LINPACK και το STREAM, αλλά είναι συχνά καλύτερο να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος της εφαρμογής (ή μίγματος εφαρμογών) σε έναν υποψήφιο επεξεργαστή. Εξάλλου, ένα από τα πλεονεκτήματα του υπολογιστικού συμπλέγματος είναι ότι τα επιμέρους στοιχεία, όπως οι κόμβοι του επεξεργαστή, είναι σχετικά φθηνά.

9.2.2. Μνήμη

Οι ανάγκες μνήμης μιας εφαρμογής επηρεάζουν σημαντικά τόσο την απόδοση της εφαρμογής όσο και το κόστος του cluster. Η μνήμη σε έναν υπολογιστικό κόμβο χωρίζεται σε διάφορους κύριους τύπους. Η κύρια μνήμη διατηρεί ολόκληρο το πρόβλημα και θα πρέπει να επιλέγεται να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να περιέχει όλα τα δεδομένα που

χρειάζεται μια εφαρμογή (διανεμημένα φυσικά σε όλους τους κόμβους του cluster). Η μνήμη Cache είναι μικρότερη αλλά γρηγορότερη μνήμη η οποία χρησιμοποιείται προς βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών. Ορισμένες εφαρμογές θα επωφεληθούν περισσότερο από τη μνήμη cache από άλλες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η απόδοση της εφαρμογής μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητη στο μέγεθος της μνήμης cache. Η εικονική μνήμη είναι μνήμη που φαίνεται να είναι διαθέσιμη στην εφαρμογή, αλλά στην πραγματικότητα είναι χαρτογραφημένη έτσι ώστε μέρος αυτής να μπορεί να αποθηκευτεί στον δίσκο. Αυτό διευρύνει σημαντικά τη διαθέσιμη μνήμη για μια εφαρμογή που στοχεύει στο χαμηλό χρηματικό κόστος (ο χώρος στο δίσκο είναι φτηνός). Επειδή οι δίσκοι είναι ηλεκτρομηχανικές συσκευές, η πρόσβαση στη μνήμη που είναι αποθηκευμένη στο δίσκο είναι πολύ αργή. Ως εκ τούτου, ορισμένα clusters υψηλής απόδοσης δεν χρησιμοποιούν εικονική μνήμη.

9.2.3. Input/Output

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών πρέπει να τοποθετούνται σε μη πτητικό μέσω αποθήκευσης, όπως ένα αρχείο δίσκου. Ο παράλληλος υπολογισμός καθιστά δυνατή την εκτέλεση υπολογισμών πολύ γρήγορα, οδηγώντας σε αντίστοιχες απαιτήσεις στο σύστημα εισόδου / εξόδου. Άλλες εφαρμογές, όπως οι διακομιστές Web ή τα clusters ανάλυσης δεδομένων, πρέπει να εξυπηρετούν δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί προηγουμένως σε ένα σύστημα αρχείων.

9.2.4. Άλλες Απαιτήσεις

Ένα cluster μπορεί να χρειαστεί διάφορους πόρους. Για παράδειγμα, ένα cluster που χρησιμοποιείται ως εξαιρετικά διαθέσιμος και επεκτάσιμος διακομιστής Web απαιτεί καλή εξωτερική δικτύωση. Ένα σύμπλεγμα που χρησιμοποιείται για οπτικοποίηση σε οθόνη με tiles απαιτεί κάρτες γραφικών και συνδέσεις με τους projectors. Ένα cluster που χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή υπολογισμών απαιτεί πρόσβαση σε ένα σύστημα αποθήκευσης αρχείων για την υποστήριξη αντιγράφων ασφαλείας και αρχειοθέτησης δεδομένων από χρήστες.

9.2.5. Παραλληλισμός

Οι παράλληλες εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Μια κατηγορία ονομάζεται *embarrassingly* (ή *pleasingly*) *parallel*. Αυτές οι εφαρμογές χωρίζονται εύκολα σε μικρότερες εργασίες που μπορούν να εκτελεστούν ανεξάρτητα. Ένα κοινό παράδειγμα αυτού του είδους της παράλληλης εφαρμογής είναι μια μελέτη

παραμέτρων, όπου παρουσιάζεται ένα ενιαίο πρόγραμμα με διαφορετικές αρχικές εισροές. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ένας διακομιστής Web, όπου κάθε αίτημα είναι ένα ανεξάρτητο αίτημα για πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στον διακομιστή ιστού. Αυτές οι εφαρμογές μεταφέρονται εύκολα σε ένα cluster. Ένα cluster παρέχει μια εύκολα διαχειριζόμενη πλατφόρμα και ανεκτική σε σφάλματα για την εκτέλεση τέτοιου είδους κώδικες.

Η άλλη κύρια κατηγορία παράλληλων εφαρμογών είναι εκείνες που δεν μπορούν να χωριστούν σε ανεξάρτητες υποεργασίες. Τέτοιες εφαρμογές πρέπει συνήθως να γράφονται με ρητό (ορισμένο από τον προγραμματιστή) παραλληλισμό. Επιπλέον, η απόδοσή τους εξαρτάται τόσο από την απόδοση των επιμέρους υπολογιστικών κόμβων όσο και από το δίκτυο που επιτρέπει στους κόμβους αυτούς να επικοινωνούν. Για να κατανοήσουμε αν μια εφαρμογή μπορεί να εκτελεστεί αποτελεσματικά σε ένα cluster (ή σε οποιοδήποτε παράλληλο μηχάνημα), πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε ποσοτικά την απόδοση τόσο του κόμβου όσο και της επικοινωνίας μεταξύ τυπικών εξαρτημάτων του cluster.

Οι βασικοί όροι είναι οι εξής:

- **Latency:** Ο ελάχιστος χρόνος για την αποστολή ενός μηνύματος από τη μία διαδικασία στην άλλη.
- **overhead:** Ο χρόνος που πρέπει να δαπανήσει η CPU για την επίτευξη της επικοινωνίας. (Συχνά περιλαμβάνεται ως μέρος του latency).
- **bandwidth:** Ο ρυθμός με τον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μετακινούνται μεταξύ των διαδικασιών.
- **contention:** Η επίπτωση της επικοινωνίας στην απόδοση μεταξύ διαφορετικών διαδικασιών που μοιράζονται κάποιον πόρο, όπως για παράδειγμα λόγω των καλωδίων δικτύου.

Με αυτούς τους όρους, μπορούμε να συζητήσουμε την απόδοση μιας εφαρμογής σε ένα cluster. Αρχίζουμε με το απλούστερο μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει μόνο όρους latency και bandwidth. Σε αυτό το μοντέλο, ο χρόνος για την αποστολή n bytes δεδομένων μεταξύ δύο διαδικασιών μπορεί να προσεγγισθεί από την παρακάτω σχέση, όπου s είναι το latency και r είναι το αντίστροφο του bandwidth (**Εξίσωση 17**).

$$T = s + rn \tag{17}$$

Ειδικότερα, $T = s + rn$ (**Εξίσωση 17**).

Συνήθεις αριθμοί για τα Beowulf Clusters κυμαίνονται από τα 5 έως τα 100 microseconds για το s και από 0.01 έως 0.1 microseconds/byte για το r . Να σημειωθεί πως ένας επεξεργαστής στα 2GHz μπορεί να εκκινήσει έναν νέο υπολογισμό κινητής υποδιαστολής κάθε 0.0005 microseconds.

Ένας τρόπος να σκεφτούμε σχετικά με τον χρόνο μεταφοράς δεδομένων είναι να κάνουμε αδιάστατους τους όρους latency και bandwidth ως προς ποσοστό των πράξεων κινητής υποδιαστολής. Για παράδειγμα εαν πάρουμε έναν 2GHz επεξεργαστή και συνήθεις επιλογές όσον αφορά το δίκτυο ενός Beowulf Cluster η αναλογία του latency ως προς το ποσοστό των πράξεων κινητής υποδιαστολής κυμαίνεται από 10.000 έως 200.000. Αυτό μας λέει πως τα παράλληλα προγράμματα που τρέχουν σε clusters πρέπει να περιλαμβάνουν σημαντικό όγκο εργασίας μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας (μεταφοράς δεδομένων). Ευτυχώς πολλές εφαρμογές έχουν αυτήν την ιδιότητα.

Το απλό μοντέλο είναι επαρκές για πολλές χρήσεις. Ένα λίγο πιο εκλεπτυσμένο μοντέλο, το οποίο λέγεται logP, διαχωρίζει το overhead από το latency.

9.2.6. Υπολογίζοντας τις Απαιτήσεις της Εφαρμογής

Τι σημαίνουν όλα τα παραπάνω για την επιλογή ενός cluster; Ας δούμε έναν υπολογισμό απλής μερικής διαφορικής εξίσωσης (PDE), χαρακτηριστικός πολλών επιστημονικών προσομοιώσεων.

Σκεφτείτε έναν υπολογισμό PDE σε έναν τρισδιάστατο κύβο, διακριτοποιημένο με ένα κανονικό πλέγμα με N σημεία κατά μήκος μιας πλευράς, για ένα σύνολο σημείων N^3 . Θα υποθέσουμε ότι ο αλγόριθμος λύσης χρησιμοποιεί ένα απλό χρονικό διάγραμμα που περιλαμβάνει μόνο έξι πράξεις κινητής υποδιαστολής ανά σημείο πλέγματος. Υποθέτουμε επίσης ότι κάθε σημείο πλέγματος έχει μόνο τέσσερις τιμές (είτε τρεις τιμές συντεταγμένων και ένα άγνωστο είτε τέσσερα άγνωστα). Αυτό το πρόβλημα φαίνεται απλό μέχρι να βάλουμε τους αριθμούς.

Ας υποθέσουμε ότι $N=1024$, που παρέχει επαρκή (αν και όχι εξαιρετική) λύση για πολλά προβλήματα. Για το απλό μας πρόβλημα 3-D, αυτό μας δίνει στη συνέχεια

$$\text{Όγκος Δεδομένων} = 2 \times 4 \times (1024)^3 = 8 \text{ GWords} = 64 \text{ GBytes}$$

$$\text{Πράξεις ανά βήμα} = 6 \times (1024)^3 = 6 \text{ GFlop}$$

Αυτό προϋποθέτει ότι δύο χρονικά βήματα πρέπει να είναι στη μνήμη ταυτόχρονα (προηγούμενο και τρέχον) και ότι κάθε τιμή κυμαινόμενου σημείου είναι 8 byte.

Από αυτόν τον απλό υπολογισμό μπορούμε να αντιληφθούμε την ανάγκη του parallel computing:

1. Το συνολικό μέγεθος μνήμης υπερβαίνει το διαθέσιμο στους περισσότερους μεμονωμένους κόμβους. Επιπλέον, δεδομένου ότι μόνο 4 GBytes μνήμης απευθύνονται απευθείας σε επεξεργαστές 32 bit, η επίλυση αυτού του προβλήματος σε έναν μόνο κόμβο απαιτεί είτε επεξεργαστή 64 bit είτε εξειδικευμένες τεχνικές εκτός πυρήνα.
2. Το ποσό της εργασίας φαίνεται εύλογο για έναν επεξεργαστή, πολλοί από τους οποίους πλησιάζουν σε 6 GFlops (Giga – 10^9 πράξεις κινητής υποδιαστολής ανα δευτερόλεπτο). Ωστόσο, όπως θα δούμε παρακάτω, ο πραγματικός ρυθμός υπολογισμού για αυτό το πρόβλημα θα είναι πολύ μικρότερος.

Οι επεξεργαστές διαφημίζονται με το ρυθμό ρολογιού τους, με την προϋπόθεση ότι ο επεξεργαστής μπορεί να εκτελέσει χρήσιμη εργασία με αυτόν τον ρυθμό. Για παράδειγμα, ένας επεξεργαστής 2 GHz υποδηλώνει ότι μπορεί να εκτελέσει 2 δισεκατομμύρια λειτουργίες ανά δευτερόλεπτο. Αυτό που αγνοεί αυτό είναι το αν ο επεξεργαστής έχει πρόσβαση σε δεδομένα αρκετά γρήγορα για να κρατήσει τον επεξεργαστή απασχολημένο. Για παράδειγμα, εξετάστε τον ακόλουθο κώδικα, όπου ο επεξεργαστής πολλαπλασιάζει δύο διανύσματα των αριθμών κυμαινόμενου σημείου μαζί και αποθηκεύοντας το αποτέλεσμα:

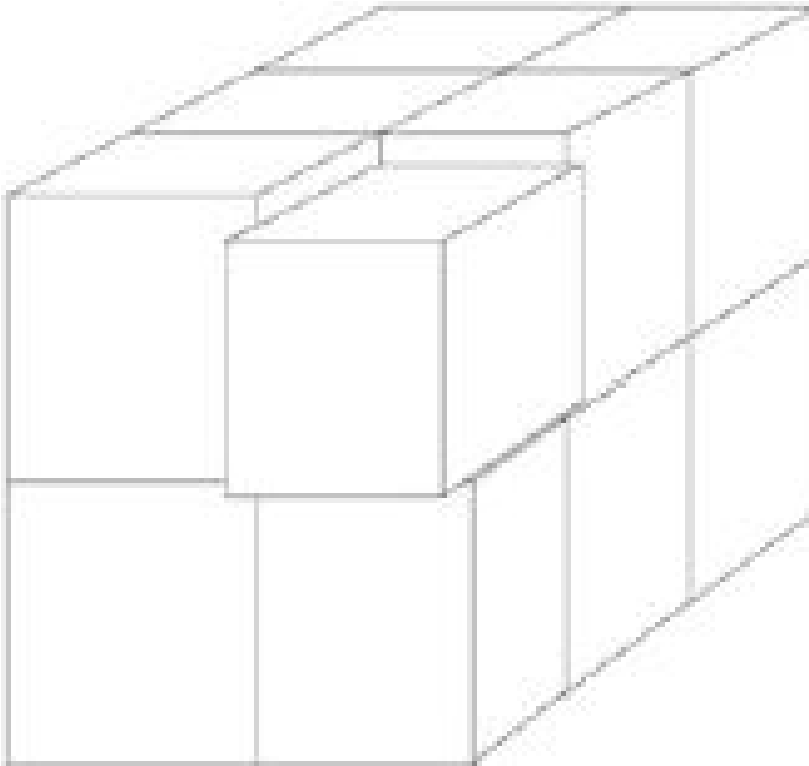
```
for (i=0; i<n; i++)  
    c[i] = a[i] * b[i];
```

Αυτό απαιτεί δύο φορτία μιας μεταβλητής double και ένα store (αποθήκευση στη μνήμη) για κάθε στοιχείο. Για να εκτελέσετε 2 δισεκατομμύρια από αυτά ανά δευτερόλεπτο, απαιτείται το σύστημα μνήμης να μετακινεί $3 \times 8 \times 10^9 = 24$ GBytes / sec. Ωστόσο, κανένας κόμβος του Cluster δεν διαθέτει τέτοιου είδους απόδοση συστήματος μνήμης. Οι τυπικοί ρυθμοί συστήματος μνήμης κυμαίνονται από 0.2 έως 1 GBytes / δευτερόλεπτο. Ως αποτέλεσμα, για υπολογιστές που πρέπει να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από την κύρια μνήμη, η επιτευχθείσα (ή παρατηρούμενη) απόδοση είναι συχνά ένα μικρό κλάσμα της μέγιστης απόδοσης. Σε αυτό το παράδειγμα, οι πιο συνηθισμένοι κόμβοι θα μπορούσαν να επιτύχουν μόνο το 1-4% της μέγιστης απόδοσης.

Ανάλογα με την εφαρμογή, η απόδοση του συστήματος μνήμης μπορεί να είναι μια καλύτερη ένδειξη της πιθανής επιτεύξιμης απόδοσης. Ένα καλό μέτρο της απόδοσης του εύρους ζώνης μνήμης ενός κόμβου είναι το benchmark STREAM. Με αυτόν τον τρόπο μετράται η επιτευχθείσα απόδοση του συστήματος μνήμης, χρησιμοποιώντας ένα απλό πρόγραμμα και επομένως είναι πιο πιθανό να μετρήσει την απόδοση που είναι διαθέσιμη στο χρήστη από οποιονδήποτε αριθμό που βασίζεται στο βασικό υλικό.

Για το παράδειγμά μας του υπολογισμού PDE, η επιτυγχανόμενη απόδοση θα κυριαρχείται από το εύρος ζώνης μνήμης (memory bandwidth) και όχι από την hardware απόδοση της CPU. Επομένως, όταν επιλέγετε κόμβους, ειδικά για ένα συγκρότημα χαμηλού κόστους, η τιμή ανά MByte/sec μπορεί να είναι ένας καλύτερος οδηγός απόφασης αγοράς, αντί της τιμής ανά MFlop / sec.

Μπορούμε να παραλληλίσουμε αυτή την εφαρμογή σπάζοντας το πλέγμα σε μικρότερα κομμάτια, με κάθε κόμβο να επεξεργάζεται ένα κομμάτι όπως φαίνεται στην **Εικόνα 93**. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αποσύνθεση τομέα (domain decomposition). Ωστόσο, τα κομμάτια δεν είναι ανεξάρτητα. Για να υπολογιστούν οι τιμές για το επόμενο βήμα, χρειάζονται τιμές από τα γειτονικά κομμάτια. Ως αποτέλεσμα, πρέπει τώρα να εξετάσουμε το κόστος για την επικοινωνία των δεδομένων μεταξύ των κόμβων καθώς και το υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 93. Sample decomposition ενός 3-D mesh. Το επάνω δεξί γωνιακό κουτί έχει τραβηχτεί για να δείξει ότι το πλέγμα έχει υποδιαιρεθεί κατά μήκος των αξόνων x , y και z .

Για αυτό το απλό πρόβλημα, χρησιμοποιώντας το παραπάνω μοντέλο επικοινωνίας δεδομένων, μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο για ένα μόνο βήμα χρησιμοποιώντας p κόμβους, με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης (**Εξίσωση 18**):

$$T = \frac{1}{p} N^3 f + 6 \left(s + r \frac{N^2}{p^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (18)$$

Ειδικότερα, $T = \frac{1}{p} N^3 f + 6 \left(s + r \frac{N^2}{p^{\frac{2}{3}}} \right)$ (**Εξίσωση 18**).

Ο πρώτος όρος είναι το συνολικό έργο των πράξεων κινητής υποδιαστολής, ο οποίος μειώνεται αναλογικά με την αύξηση του πλήθους των επεξεργαστών p . Ο δεύτερος όρος δίνει το κόστος της επικοινωνίας καθενός από τα έξι πρόσωπα στους γειτονικούς επεξεργαστές και περιλαμβάνει τόσο έναν όρο ανεξάρτητο από τον αριθμό των επεξεργαστών όσο ο οποίος κλιμακώνεται ως $p^{2/3}$, ο οποίος προέρχεται από τη διαίρεση του αρχικού τομέα σε p αριθμό κύβων, καθένα με $N / p^{1/3}$ κατά μήκος μιας πλευράς. Να σημειωθεί ότι ακόμη και για έναν άπειρο αριθμό κόμβων, ο χρόνος για ένα βήμα είναι τουλάχιστον 6 δευτερόλεπτα (ο ελάχιστος χρόνος ή η λανθάνουσα περίοδος (latency) επικοινωνίας με κάθε έναν από τους έξι γείτονες). Επομένως δεν έχει νόημα να χρησιμοποιείται ένας απεριόριστος αριθμός επεξεργαστών. Η πραγματική επιλογή εξαρτάται από το στόχο του cluster:

- Ελαχιστοποίηση κόστους: Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να επιλεγθούν κόμβοι έτσι ώστε κάθε υποτομέας να χωράει σε έναν κόμβο. Στο παράδειγμά μας, αν κάθε κόμβος είχε 2 GBytes μνήμης, θα χρειαζόταν τουλάχιστον 32 κόμβους (ίσως περισσότερο, για να αφήσουμε χώρο για το λειτουργικό σύστημα και άλλα μέρη της εφαρμογής).
- Επίτευξη ενός περιορισμού σε πραγματικό χρόνο, όπως βήματα ανά δευτερόλεπτο: Σε αυτή την περίπτωση, προσδιορίζεται το T και η εξίσωση 1.2 λύνεται ως προς το p , τον αριθμό των κόμβων. Προσοχή στην ανάθεση πολύ μικρού αριθμού στον T . Κατά κανόνα, το συνολικό έργο πράξεων κινητής υποδιαστολής (ο όρος $N^3 f/p$) πρέπει να είναι μεγάλο σε σύγκριση με τους όρους επικοινωνίας. Σε αυτή την περίπτωση, καθώς το p γίνεται μεγάλο, και καθώς προκειμένου να καταστεί η επικοινωνία ως μικρότερο μέρος του συνολικού χρόνου από ότι ο υπολογισμός, πρέπει να έχουμε (**Εξίσωση 19**):

$$T \approx \frac{1}{p} N^3 f + 6s \quad (18)$$

Ειδικότερα, $T \approx \frac{1}{p} N^3 f + 6s$ (Εξίσωση 19).

Και

$$\frac{1}{p} N^3 f > 6s \quad (18)$$

$$p < \frac{N^3 f}{6s}$$

$$\frac{1}{p} N^3 f > 6s$$

Ειδικότερα, $p < \frac{N^3 f}{6s}$ (Εξίσωση 20).

- Για τις τυπικές τιμές των s / f και για $N = 1024$, αυτό το όριο δεν είναι πολύ ισχυρό και περιορίζει το p σε μόνο μερικές χιλιάδες. Για μικρότερα N , ωστόσο, αυτό το όριο μπορεί να είναι σοβαρό. Για παράδειγμα, αν το $N = 128$ και αν χρησιμοποιείται γρήγορο δίκτυο Ethernet, ο τύπος αυτός υποδηλώνει ότι το $p < 10$.

Μερικές σημειώσεις για το παράδειγμα αυτό:

- Επιλέξαμε έναν τρισδιάστατο υπολογισμό. Πολλοί διδιάστατοι υπολογισμοί διεξάγονται καλύτερα σε έναν επεξεργαστή (θεωρήστε αυτό μια άσκηση για τον αναγνώστη!).
- Ο συνολικός χώρος μνήμης υπερβαίνει εκείνο που μπορεί να διευθυνσιοδοτηθεί από έναν επεξεργαστή 32 bit. Αλλά επειδή χρησιμοποιούμε ένα σύμπλεγμα, μπορούμε ακόμα να χρησιμοποιήσουμε επεξεργαστές 32 bit, εφ 'όσον χρησιμοποιούμε αρκετούς από αυτούς.
- Η αναμενόμενη απόδοση είναι πιθανό να είναι ένα μικρό κλάσμα της μέγιστης απόδοσης. Αυτό δεν μας απασχολεί. Το κόστος του cluster είναι χαμηλό.
- Εάν υπάρχουν αρκετοί κόμβοι, το πρόβλημα μπορεί να χωρέσει μέσα στην πολύ ταχύτερη μνήμη cache (αν και αυτό απαιτεί χιλιάδες κόμβους για αυτό το παράδειγμα). Σε αυτή την περίπτωση, ο υπολογιστικός ρυθμός μπορεί να είναι μέχρι και σε τάξη μεγέθους υψηλότερος - ακόμη και προτού εκμεταλλευτούμε τα οφέλη του παραλληλισμού! Αυτό είναι ένα παράδειγμα superlinear επιτάχυνσης: επιτάχυνση που

είναι μεγαλύτερη από p σε επεξεργαστές πλήθους p . Αυτό είναι αποτέλεσμα της μη γραμμικής συμπεριφοράς της απόδοσης στο μέγεθος της μνήμης και δεν είναι παράδοξο.

- Η καθυστέρηση εδώ έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της απόδοσης. Σε άλλους υπολογισμούς ωστόσο, συμπεριλαμβανομένων εκείνων για PDEs που χρησιμοποιούν διαφορετικές αποσυνθέσεις, ο όρος bandwidth μπορεί να είναι ο κυρίαρχος όρος επικοινωνίας.
- Δεδομένου ότι κάθε βήμα χρόνου παράγει 64 GBytes δεδομένων, απαιτείται ένα σύστημα I / O υψηλής απόδοσης ώστε να μην κυριαρχήσει χρονικά ο χρόνος εισόδου / εξόδου από οτιδήποτε άλλο. Ευτυχώς, τα clusters Beowulf μπορούν να παρέχουν υψηλή απόδοση I / O μέσω της χρήσης παράλληλων συστημάτων αρχείων, όπως το PVFS.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιδιώξαμε τη δημιουργία μιας συστοιχίας υπολογιστών από απλούς υπολογιστές, οι οποίοι μπορούν να βρεθούν με χαμηλό ή και μηδενικό κόστος και έτσι να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο θα μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων στη βιοϊατρική τεχνολογία. Η προσπάθειά μας έδειξε ότι κάτι τέτοιο είναι εφικτό και μάλιστα στις δοκιμές που κάναμε δείξαμε ότι η χρήση μιας συστοιχίας μπορεί να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο, αφού η συστοιχία πραγματοποίησε τους υπολογισμούς 54 φορές ταχύτερα σε σχέση με έναν επεξεργαστή. Η απόδοση αυτή ήταν εξαιρετικά σημαντική αφού πολλά από τα προβλήματα της βιοϊατρικής τεχνολογίας είναι εξαιρετικά απαιτητικά σε υπολογιστική ισχύ και άρα κοστοβόρα αν πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει εμπορικά διαθέσιμα clusters για την επίλυσή τους.

Η λύση που εμείς προτείναμε αποτελεί έναν φθηνό και αποτελεσματικό τρόπο για την επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων και μάλιστα που μπορεί να είναι διαθέσιμος σε έναν ακαδημαϊκό χώρο, διαθέσιμο προς όλους που έχουν αντίστοιχα προβλήματα. Το πρόβλημα, που επιλέξαμε να επιλύσουμε αφορούσε στο μετασχηματισμό Fourier σημάτων βολταμετρίας. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις του προβλήματος αυτού ήταν εξαιρετικά απαιτητικές αφού ένας επεξεργαστής για να καταφέρει να μετασχηματίσει πέντε σήματα χρειάστηκαν περίπου τέσσερις ώρες. Αντίστοιχα, με τη χρήση της συστοιχίας χρειάστηκαν 2min για την ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων, ενώ με τη χρήση των GPUs ο χρόνος υπολογισμού μειώθηκε ακόμα περισσότερο. Τόσο στην παρούσα εργασία όσο και στη εργασία του συναδέλφου Ανδρέα Καβαζίδη, δείξαμε ότι η χρήση συστοιχιών είναι εξαιρετικά επωφελής για την επίλυση προβλημάτων της βιοϊατρικής τεχνολογίας.

Ως εκ τούτου, φάνηκε ότι τέτοιες προσπάθειες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την υποβοήθηση του ερευνητικού έργου και ειδικότερα σε εποχές, όπου οι πόροι είναι εξαιρετικά περιορισμένοι και ο ανταγωνισμός εξαιρετικά υψηλός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ulam S, von Neumann J. Random ergodic theorems. *Bull Amer Math Soc.* 1945;51:660.
2. Von Neumann J, Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. *Bull Amer Math Soc.* 1945;51(7):498-504.
3. Aspray W. John von Neumann and the origins of modern computing: Mit Press Cambridge, MA; 1990.
4. Aiken H, Oettinger AG, Bartee TC. Proposed automatic calculating machine. *IEEE Spectrum.* 1964;1(8):62-9.
5. Backus J. The history of Fortran I, II, and III. *ACM Sigplan Notices.* 1978;13(8):165-80.
6. Harandi MT, Howkins TJ. Towards more portable COBOL. *The Computer Journal.* 1979;22(4):290-5.
7. Kaplan A, Haenlein M. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons.* 2019;62(1):15-25.
8. Fitch FB, Warren S, McCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of mathematical biophysics*, vol. 5 (1943), pp. 115–133. *The Journal of Symbolic Logic.* 1944;9(2):49-50.
9. Huang T. *Computer vision: Evolution and promise.* 1996.
10. Θεοδωρίδης I, Theodoridis I. Ανάλυση και μαθηματική προτυποποίηση σήματος ηλεκτροχημικών μετρήσεων νευροδιαβιβαστών και των μεταβολιτών τους με τη χρήση διαφορικής βολταμμετρίας [Senior Thesis]. Athens: National Technical University of Athens; 2019.
11. Heyrovskýa J. The processes at the mercury dropping cathode. Part II. The hydrogen overpotential. *Trans Faraday Soc.* 1924;19(March):785-8.
12. Stamford JA. In vivo voltammetry: promise and perspective. *Brain research.* 1985;357(2):119-35.
13. Finlay J, Zigmond M. A critical analysis of neurochemical methods for monitoring transmitter dynamics in the brain. *Psychopharmacology: the Fourth Generation of Progress* New York: Raven Press Ltd. 1995:29-40.
14. Kawagoe KT, Zimmerman JB, Wightman RM. Principles of voltammetry and microelectrode surface states. *Journal of neuroscience methods.* 1993;48(3):225-40.
15. Nussbaum MA, Przedwiecki JE, Staerk DU, Lunte SM, Riley CM. Electrochemical characteristics of amino acids and peptides derivatized with naphthalene-2,3-dicarboxaldehyde: pH effects and differences in oxidation potentials. *Analytical chemistry.* 1992;64(11):1259-63.
16. Hochstetler SE, Wightman RM. Detection of secretion with Electrochemical Methods. *On-Line Biophysics Textbook.* 1998.
17. Ozel RE, Wallace KN, Andreescu S. Chitosan coated carbon fiber microelectrode for selective in vivo detection of neurotransmitters in live zebrafish embryos. *Analytica chimica acta.* 2011;695(1-2):89-95.

18. Cespuglio R, Faradji H, Ponchon JL, Buda M, Riou F, Gonon F, et al. Differential pulse voltammetry in brain tissue. I. Detection of 5-hydroxyindoles in the rat striatum. *Brain research*. 1981;223(2):287-98.
19. Robinson DL, Venton BJ, Heien ML, Wightman RM. Detecting subsecond dopamine release with fast-scan cyclic voltammetry in vivo. *Clinical chemistry*. 2003;49(10):1763-73.
20. Crespi F. Influence of Neuropeptide Y and antidepressants upon cerebral monoamines involved in depression: an in vivo electrochemical study. *Brain research*. 2011;1407:27-37.
21. Samaranayake S, Abdalla A, Robke R, Wood KM, Zeqja A, Hashemi P. In vivo histamine voltammetry in the mouse preammygdala nucleus. *The Analyst*. 2015;140(11):3759-65.
22. Dankoski EC, Agster KL, Fox ME, Moy SS, Wightman RM. Facilitation of serotonin signaling by SSRIs is attenuated by social isolation. *Neuropsychopharmacology : official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*. 2014;39(13):2928-37.
23. Morales-Medina JC, Dumont Y, Benoit CE, Bastianetto S, Flores G, Fournier A, et al. Role of neuropeptide Y Y(1) and Y(2) receptors on behavioral despair in a rat model of depression with co-morbid anxiety. *Neuropharmacology*. 2012;62(1):200-8.
24. Scholz F. *Electroanalytical methods*: Springer; 2010.
25. Suaud-Chagny MF, Mermet C, Gonon F. Electrically evoked noradrenaline release in the rat hypothalamic paraventricular nucleus studied by in vivo electrochemistry: characterization and facilitation by increasing the stimulation frequency. *Neuroscience*. 1990;34(2):411-22.
26. Gonon F, Buda M, Cespuglio R, Jouvét M, Pujol JF. In vivo electrochemical detection of catechols in the neostriatum of anaesthetized rats: dopamine or DOPAC? *Nature*. 1980;286(5776):902-4.
27. Clement HW, Schafer F, Ruwe C, Gemsa D, Wesemann W. Stress-induced changes of extracellular 5-hydroxyindoleacetic acid concentrations followed in the nucleus raphe dorsalis and the frontal cortex of the rat. *Brain research*. 1993;614(1-2):117-24.
28. Pihel K, Hsieh S, Jorgenson JW, Wightman RM. Electrochemical detection of histamine and 5-hydroxytryptamine at isolated mast cells. *Analytical chemistry*. 1995;67(24):4514-21.
29. Kennedy RT, Huang L, Atkinson MA, Dush P. Amperometric monitoring of chemical secretions from individual pancreatic beta-cells. *Analytical chemistry*. 1993;65(14):1882-7.
30. Theodoridis I, Lambrou GI. Voltammetry and monoamines determination: an old acquaintance revisited. *Frontiers in bioscience (Landmark edition)*. 2019;24:231-44.
31. Budai D, Hernádi I, Mészáros B, Bali ZK, Gulya K. Electrochemical responses of carbon fiber microelectrodes to dopamine in vitro and in vivo. *Acta Biologica Szegediensis*. 2010;54(2):155-60.
32. Adams KL, Puchades M, Ewing AG. *In Vitro Electrochemistry of Biological Systems*. Annual review of analytical chemistry (Palo Alto, Calif). 2008;1:329.
33. Hashemi P, Dankoski EC, Petrovic J, Keithley RB, Wightman RM. Voltammetric detection of 5-hydroxytryptamine release in the rat brain. *Analytical chemistry*. 2009;81(22):9462-71.
34. Bath BD, Michael DJ, Trafton BJ, Joseph JD, Runnels PL, Wightman RM. Subsecond adsorption and desorption of dopamine at carbon-fiber microelectrodes. *Analytical chemistry*. 2000;72(24):5994-6002.

35. Broderick PA. State-of-the-art microelectrodes for in vivo voltammetry. *Electroanalysis*. 1990;2(3):241-51.
36. Leszczyszyn DJ, Jankowski JA, Viveros OH, Diliberto EJ, Jr., Near JA, Wightman RM. Secretion of catecholamines from individual adrenal medullary chromaffin cells. *Journal of neurochemistry*. 1991;56(6):1855-63.
37. Gonzalez-Mora JL, Guadalupe T, Fumero B, Mas M. Mathematical resolution of mixed in vivo voltammetry signals. Models, equipment, assessment by simultaneous microdialysis sampling. *Journal of neuroscience methods*. 1991;39(3):231-44.
38. Clement HW, Buschmann J, Rex S, Grote C, Opper C, Gemsa D, et al. Effects of interferon-gamma, interleukin-1 beta, and tumor necrosis factor-alpha on the serotonin metabolism in the nucleus raphe dorsalis of the rat. *Journal of neural transmission (Vienna, Austria : 1996)*. 1997;104(10):981-91.
39. Millar J, Williams GV. Fast Differential Ramp Voltammetry - a New Voltammetric Technique Designed Specifically for Use in Neuronal Tissue. *J Electroanal Chem*. 1990;282(1-2):33-49.
40. Marcenac F, Gonon F. Fast in vivo monitoring of dopamine release in the rat brain with differential pulse amperometry. *Analytical chemistry*. 1985;57(8):1778-9.
41. May LJ, Wightman RM. Heterogeneity of stimulated dopamine overflow within rat striatum as observed with in vivo voltammetry. *Brain research*. 1989;487(2):311-20.
42. Grote C, Clement HW, Wesemann W. In: Lehnert H, Murison R, Weiner H, Hellhammer D, Beyer J, editors. *Endocrine and Nutritional Control of Basic Biological Functions*. Toronto: Hogrefe and Huber; 1993. p. 71-5.
43. Wesemann W, Blaschke S, Solbach M, Grote C, Clement HW, Riederer P. Intranigral injected iron progressively reduces striatal dopamine metabolism. *Journal of neural transmission*. 1994;8(3):209-14.
44. Wesemann W, Grote C, Clement HW, Block F, Sontag KH. Functional studies on monoaminergic transmitter release in parkinsonism. *Progress in neuro-psychopharmacology & biological psychiatry*. 1993;17(3):487-99.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΠΛΗΡΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Η/Υ (H/W SPECIFICATIONS)

Master Heron III

-----[AIDA64 Business]-----

Version	AIDA64 v5.70.3800
Benchmark Module	4.2.671-x64
Homepage	http://www.aida64.com/
Report Type	Report Wizard
Computer	MASTER_HERON_II
Generator	Master_Heron_III
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate 6.1.7601.24024 (Win7 RTM)
Date	2018-03-06
Time	17:23

-----[Summary]-----

Computer:

Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate
OS Service Pack	Service Pack 1
Internet Explorer	11.0.9600.18921
DirectX	DirectX 11.1
Computer Name	MASTER_HERON_II
User Name	Master_Heron_III
Logon Domain	Master_Heron_II
Date / Time	2018-03-06 / 17:23

Motherboard:

CPU Type	DualCore Intel Core i3-2120, 3300 MHz (33 x 100)
Motherboard Name	Foxconn 2ABF
Motherboard Chipset	Intel Cougar Point H61, Intel Sandy Bridge
System Memory	8104 MB (DDR3-1333 DDR3 SDRAM)
BIOS Type	AMI (03/23/2012)

Display:

Video Adapter	Intel(R) HD Graphics (2108 MB)
Video Adapter	Intel(R) HD Graphics (2108 MB)
3D Accelerator	Intel HD Graphics 2000
Monitor	LG W1934 [19" LCD] (180266126)

Multimedia:

Audio Adapter Realtek ALC662 @ Intel Cougar Point PCH - High
Definition Audio Controller [B-3]

Storage:

IDE Controller Intel(R) Desktop/Workstation/Server Express Chipset
SATA AHCI Controller
Disk Drive Generic Flash Disk USB Device (3 GB, USB)
Disk Drive Multiple Card Reader USB Device
Disk Drive WDC WD800JD-00MSA1 (80 GB, 7200 RPM)
Disk Drive WDC WD800JD-00MSA1 (80 GB, 7200 RPM)
Optical Drive TSSTcorp CDDVDW SH-S203D (DVD+R9:16x, DVD-
R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x
DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
SMART Hard Disks Status OK

Partitions:

C: (NTFS) 76216 MB (32517 MB free)
Total Size 74.4 GB (31.8 GB free)

Input:

Keyboard HID Keyboard Device
Keyboard HID Keyboard Device
Mouse HID-compliant mouse

Network:

Primary IP Address 88.197.48.106
Primary MAC Address E8-39-35-59-36-3A
Network Adapter 802.11n Wireless LAN Card
Network Adapter Realtek PCIe GBE Family Controller (88.197.48.106)

Peripherals:

Printer Fax
Printer Microsoft XPS Document Writer
USB2 Controller Intel Cougar Point PCH - USB EHCI #1 Controller [B-
3]
USB2 Controller Intel Cougar Point PCH - USB EHCI #2 Controller [B-
3]
USB Device Generic USB Hub
USB Device Generic USB Hub
USB Device USB Composite Device
USB Device USB Composite Device
USB Device USB Input Device
USB Device USB Input Device
USB Device USB Input Device
USB Device USB Input Device
USB Device USB Input Device
USB Device USB Mass Storage Device
USB Device USB Mass Storage Device

DMI:

DMI BIOS Vendor AMI

DMI BIOS Version	7.16
DMI System Manufacturer	Hewlett-Packard
DMI System Product	p6-2101ev
DMI System Version	
DMI System Serial Number	CZC2163MXH
DMI System UUID	30EF4C2C-5575E97E-39513A7C-D705D91D
DMI Motherboard Manufacturer	Foxconn
DMI Motherboard Product	2ABF
DMI Motherboard Version	1.30
DMI Motherboard Serial Number	
DMI Chassis Manufacturer	Hewlett-Packard
DMI Chassis Version	
DMI Chassis Serial Number	
DMI Chassis Asset Tag	CZC2163MXH
DMI Chassis Type	Desktop Case

-----[Computer Name]-----

Computer Comment	Logical
NetBIOS Name	Logical MASTER_HERON_II
DNS Host Name	Logical Master_Heron_II
DNS Domain Name	Logical
Fully Qualified DNS Name	Logical Master_Heron_II
NetBIOS Name	Physical MASTER_HERON_II
DNS Host Name	Physical Master_Heron_II
DNS Domain Name	Physical
Fully Qualified DNS Name	Physical Master_Heron_II

-----[DMI]-----

[BIOS]

BIOS Properties:	
Vendor	AMI
Version	7.16
Release Date	03/23/2012
Size	4 MB
System BIOS Version	7.16
Boot Devices	Floppy Disk, Hard Disk, CD-ROM
Capabilities	Flash BIOS, Shadow BIOS, Selectable Boot, EDD, BBS
Supported Standards	DMI, ACPI, UEFI
Expansion Capabilities	PCI, USB
Virtual Machine	No

BIOS Manufacturer:	
Company Name	American Megatrends Inc.

Product Information <http://www.ami.com/amibios>
BIOS Upgrades <http://www.aida64.com/bios-updates>

[System]

System Properties:

Manufacturer Hewlett-Packard
Product p6-2101ev
Serial Number CZC2163MXH
SKU# B2L12EA#AB7
Family 103C_53316J G=D
Universal Unique ID 30EF4C2C-5575E97E-39513A7C-D705D91D
Wake-Up Type Power Switch

[Motherboard]

Motherboard Properties:

Manufacturer Foxconn
Product 2ABF
Version 1.30

Motherboard Manufacturer:

Company Name Foxconn Electronics Inc.
Product Information
<http://www.foxconnchannel.com/LatestProduct.aspx?T=Motherboard>
BIOS Download <http://www.foxconnsupport.com/download.aspx>
Driver Update <http://www.aida64.com/driver-updates>
BIOS Upgrades <http://www.aida64.com/bios-updates>

[Chassis]

Chassis Properties:

Manufacturer Hewlett-Packard
Asset Tag CZC2163MXH
Chassis Type Desktop Case
Boot-Up State Safe
Power Supply State Safe
Thermal State Safe
Security Status None

[Processors / Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz]

Processor Properties:

Manufacturer Intel
Version Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz
External Clock 100 MHz
Maximum Clock 3800 MHz
Current Clock 3300 MHz
Type Central Processor
Status Enabled

Upgrade	Socket LGA1155
Socket Designation	CPU 1
HTT / CMP Units	1 / 2
Capabilities	64-bit

CPU Manufacturer:

Company Name	Intel Corporation
Product	

Information

<http://ark.intel.com/search.aspx?q=Intel%20Core%20i3-2120>

Driver Update	http://www.aida64.com/driver-updates
---------------	---

[Caches / L1-Cache]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Varies with Memory Address
Associativity	8-way Set-Associative
Maximum Size	128 KB
Installed Size	128 KB
Error Correction	Parity
Socket Designation	L1-Cache

[Caches / L2-Cache]

Cache Properties:

Type	Unified
Status	Enabled
Operational Mode	Varies with Memory Address
Associativity	8-way Set-Associative
Maximum Size	512 KB
Installed Size	512 KB
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2-Cache

[Caches / L3-Cache]

Cache Properties:

Type	Unified
Status	Enabled
Operational Mode	Varies with Memory Address
Maximum Size	3072 KB
Installed Size	3072 KB
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L3-Cache

[Memory Arrays / System Memory]

Memory Array Properties:

Location	Motherboard
----------	-------------

Memory Array Function	System Memory
Error Correction	None
Max. Memory Capacity	8 GB
Memory Devices	2

[Memory Devices / DIMM1]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR3
Type Detail	Synchronous
Size	4 GB
Max. Clock Speed	1333 MHz
Total Width	64-bit
Data Width	64-bit
Ranks	2
Device Locator	DIMM1
Bank Locator	BANK0
Manufacturer	Undefined
Serial Number	00000000
Asset Tag	A1_AssetTagNum0
Part Number	F3-10666CL9-4GBNT

[Memory Devices / DIMM3]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR3
Type Detail	Synchronous
Size	4 GB
Max. Clock Speed	1333 MHz
Total Width	64-bit
Data Width	64-bit
Ranks	2
Device Locator	DIMM3
Bank Locator	BANK2
Manufacturer	Undefined
Serial Number	00000000
Asset Tag	A1_AssetTagNum1
Part Number	F3-10666CL9-4GBNT

[System Slots / PCI Express x16 Slot]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI Express x16 Slot
Type	PCI-E
Usage	Empty
Data Bus Width	x16
Length	Long

[System Slots / Mini Card Slot]

System Slot Properties:

Slot Designation	Mini Card Slot
Type	PCI-E
Usage	In Use
Data Bus Width	x1
Length	Short

[System Slots / PCI Express x1 Slot #1]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI Express x1 Slot #1
Type	PCI-E
Usage	Empty
Data Bus Width	x1
Length	Short

[System Slots / PCI Express x1 Slot #2]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI Express x1 Slot #2
Type	PCI-E
Usage	Empty
Data Bus Width	x1
Length	Short

[System Slots / PCI Express x1 Slot #3]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI Express x1 Slot #3
Type	PCI-E
Usage	Empty
Data Bus Width	x1
Length	Short

[On-Board Devices / Onboard IGD]

On-Board Device Properties:

Description	Onboard IGD
Type	Video
Status	Enabled
Bus / Device / Function	0 / 2 / 0

[On-Board Devices / Onboard Audio]

On-Board Device Properties:

Description	Onboard Audio
Type	Sound
Status	Enabled

Bus / Device / Function 0 / 27 / 0

[On-Board Devices / Onboard LAN]

On-Board Device Properties:

Description	Onboard LAN
Type	Ethernet
Status	Enabled
Bus / Device / Function	7 / 0 / 0

[Power Supplies / N/A]

Power Supply Properties:

Device Name	N/A
Serial Number	N/A
Part Number	Standard Efficiency
Type	Switching
Location	N/A
Status	OK
Hot Replaceable	Yes

[Temperature Probes / LM78A]

Device Properties:

Device Description	LM78A
--------------------	-------

[Voltage Probes / LM78A]

Device Properties:

Device Description	LM78A
--------------------	-------

[Electrical Current Probes / ABC]

Device Properties:

Device Description	ABC
--------------------	-----

[Cooling Device / Cooling Device #1]

Device Properties:

Device Type	Fan
-------------	-----

[Cooling Device / Cooling Device #2]

Device Properties:

Device Type	Chip Fan
-------------	----------

[Management Devices / LM78-1]

Management Device Properties:

Description	LM78-1
-------------	--------

[Miscellaneous]

Miscellaneous:

OEM String
FBYTE#2U2V333E3K3N3Q3R3V3X464k5W5c676J6S6b7B7K7M7Q7T7W8D8S949R9S
OEM String .RT;BUILDDID#12EE1RRW605#SAB7#DAB7;

-----[Overclock]-----

CPU Properties:

CPU Type DualCore Intel Core i3-2120
CPU Alias Sandy Bridge-DT
CPU Stepping D2
Engineering Sample No
CPUID CPU Name Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz
CPUID Revision 000206A7h
CPU VID 0.9857 V

CPU Speed:

CPU Clock 1596.6 MHz (original: 3300 MHz)
CPU Multiplier 16x
CPU FSB 99.8 MHz (original: 100 MHz)
North Bridge Clock 1596.6 MHz
Memory Bus 665.2 MHz
DRAM:FSB Ratio 20:3

CPU Cache:

L1 Code Cache 32 KB per core
L1 Data Cache 32 KB per core
L2 Cache 256 KB per core (On-Die, ECC, Full-Speed)
L3 Cache 3 MB (On-Die, ECC, Full-Speed)

Motherboard Properties:

Motherboard ID 63-0100-000001-00101111-061711-
Chipset\$0AAAA000_BIOS DATE: 03/23/2012 CUP716.ROM VER: 7.16
Motherboard Name Foxconn 2ABF

Chipset Properties:

Motherboard Chipset Intel Cougar Point H61, Intel Sandy Bridge
Memory Timings 9-9-9-24 (CL-RCD-RP-RAS)
Command Rate (CR) 1T
DIMM1: G Skill Value F3-10666CL9-4GBNT 4 GB DDR3-1333 DDR3 SDRAM (9-9-9-24 @ 666 MHz) (8-8-8-22 @ 609 MHz) (7-7-7-20 @ 533 MHz) (6-6-6-17 @ 457 MHz)
DIMM3: G Skill Value F3-10666CL9-4GBNT 4 GB DDR3-1333 DDR3 SDRAM (9-9-9-24 @ 666 MHz) (8-8-8-22 @ 609 MHz) (7-7-7-20 @ 533 MHz) (6-6-6-17 @ 457 MHz)

BIOS Properties:

System BIOS Date 03/23/2012
Video BIOS Date 01/02/11
DMI BIOS Version 7.16

Graphics Processor Properties:

Video Adapter Intel Sandy Bridge-DT - Integrated Graphics Controller
(DT GT1)
GPU Code Name Sandy Bridge-DT GT1 (Integrated 8086 / 0102, Rev
09)
GPU Clock 848 MHz (original: 848 MHz)

-----[Power Management]-----

Power Management Properties:

Current Power Source AC Line
Battery Status No Battery
Full Battery Lifetime Unknown
Remaining Battery Lifetime Unknown

Heron III-01

-----[EVEREST Ultimate Edition]-----

Version	EVEREST v5.50.2253 Beta
Benchmark Module	2.5.292.0
Homepage	http://www.lavalys.com/
Report Type	Report Wizard
Computer	HERON_III_01-PC
Generator	Heron_III_01
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate 6.1.7600 (Win7 RTM)
Date	2018-02-21
Time	15:43

-----[Summary]-----

Computer:

Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate
OS Service Pack	-
Internet Explorer	8.0.7600.16385
DirectX	DirectX 11.0
Computer Name	HERON_III_01-PC
User Name	Heron_III_01
Logon Domain	Heron_III_01-PC
Date / Time	2018-02-21 / 15:43

Motherboard:

CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	8192 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
BIOS Type	Phoenix (08/25/05)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	ECP Printer Port (LPT1)

Display:

Video Adapter	Standard VGA Graphics Adapter (14 MB)
3D Accelerator	nVIDIA GeForce GT 220

Multimedia:

Audio Adapter	Analog Devices AD1981B(L) @ Intel 82801EB ICH5 -
AC'97 Audio Controller [A-2/A-3]	
Audio Adapter	nVIDIA HDMI @ nVIDIA GT216 - High Definition
Audio Controller	

Storage:

IDE Controller	Intel(R) 82801EB Ultra ATA Storage Controllers - 24D1
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Disk Drive	ST3250410AS ATA Device (250 GB, 7200 RPM, SATA-II)

II)

Disk Drive	USB Driver USB Device (14 GB, USB)
Optical Drive	TSSTcorp CDDVDW SH-S203D ATA Device

(DVD+R9:16x, DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)

SMART Hard Disks Status OK

Partitions:

C: (NTFS)	135.1 GB (114.1 GB free)
Total Size	135.1 GB (114.1 GB free)

Input:

Keyboard	HID Keyboard Device
Keyboard	Standard PS/2 Keyboard
Mouse	PS/2 Compatible Mouse

Network:

Primary IP Address	88.197.48.108
Primary MAC Address	00-0D-60-17-28-5C
Network Adapter	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet (88.197.48.108)

Peripherals:

Printer	Fax
Printer	Microsoft XPS Document Writer
FireWire Controller	Texas Instruments TSB43AB22 1394A-2000 OHCI

PHY/Link-Layer Controller (PHY: TI TSB41AB1/2)

USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB2 Controller	Intel 82801EB ICH5 - Enhanced USB2 Controller [A-2/A-3]

USB Device	USB Composite Device
USB Device	USB Input Device
USB Device	USB Input Device
USB Device	USB Mass Storage Device

DMI:

DMI BIOS Vendor	IBM
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
DMI System Manufacturer	IBM
DMI System Product	622310Y
DMI System Version	0
DMI System Serial Number	KDVFK22

DMI System UUID	803590A2-01640010-991A958C-EE4C1887
DMI Motherboard Manufacturer	IBM
DMI Motherboard Product	MSI-9151 Boards
DMI Motherboard Version	Not Applicable
DMI Motherboard Serial Number	#A123456789
DMI Chassis Manufacturer	IBM
DMI Chassis Version	N/A
DMI Chassis Serial Number	N/A
DMI Chassis Asset Tag	12345678901234567890123456789012
DMI Chassis Type	Tower

-----[Computer Name]-----

Computer Comment	Logical
NetBIOS Name	Logical HERON_III_01-PC
DNS Host Name	Logical Heron_III_01-PC
DNS Domain Name	Logical
Fully Qualified DNS Name	Logical Heron_III_01-PC
NetBIOS Name	Physical HERON_III_01-PC
DNS Host Name	Physical Heron_III_01-PC
DNS Domain Name	Physical
Fully Qualified DNS Name	Physical Heron_III_01-PC

-----[DMI]-----

[BIOS]

BIOS Properties:

Vendor	IBM
Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
Release Date	08/25/2005
Size	1024 KB
Boot Devices	Floppy Disk, Hard Disk, CD-ROM
Capabilities	Flash BIOS, Shadow BIOS, Selectable Boot, BBS
Supported Standards	DMI, ACPI, ESCD, PnP
Expansion Capabilities	PCI, USB

[System]

System Properties:

Manufacturer	IBM
Product	622310Y
Version	0
Serial Number	KDVFK22
Universal Unique ID	803590A2-01640010-991A958C-EE4C1887
Wake-Up Type	Power Switch

[Motherboard]

Motherboard Properties:

Manufacturer	IBM
Product	MSI-9151 Boards
Version	Not Applicable
Serial Number	#A123456789

[Chassis]

Chassis Properties:

Manufacturer	IBM
Version	N/A
Serial Number	N/A
Asset Tag	12345678901234567890123456789012
Chassis Type	Tower
Boot-Up State	Safe
Power Supply State	Safe
Thermal State	Safe
Security Status	None

[Processors / Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Current Clock	3400 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Status	Enabled
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#1

[Processors / 00000000000000000000000000000000]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	00000000000000000000000000000000
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#2

[Caches / L1 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	16 KB
Installed Size	16 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#1

[Caches / L2 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	2048 KB
Installed Size	1024 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#1

[Caches / L1 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#2

[Caches / L2 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#2

[Memory Devices / DIMM 1]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 1
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	00006083
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 2]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 2
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	04004070
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 3]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 3
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	00001094
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 4]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 4
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	00007057
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 5]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Speed	400 MHz
Device Locator	DIMM 5
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	FFFFFFFF
Asset Tag	FFFF

[Memory Devices / DIMM 6]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Speed	400 MHz
Device Locator	DIMM 6
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	FFFFFFFF
Asset Tag	FFFF

[System Slots / PCIE Slot #1]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIE Slot #1
Type	PCI
Usage	In Use

[System Slots / PCI/33 Slot #2]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #2
Type	PCI

Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCI/33 Slot #3]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #3
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCIX 133 Slot #4]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX 133 Slot #4
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100(ZCR) Slot #5]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100(ZCR) Slot #5
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100 Slot #6]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100 Slot #6
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[Port Connectors / COM 1]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A1
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 1
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / COM 2]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A2
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 2
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / Parallel]

Port Connector Properties:

Port Type	Parallel Port ECP/EPP
Internal Reference Designator	J3A1
Internal Connector Type	25 Pin Dual Inline (pin 26 cut)
External Reference Designator	Parallel
External Connector Type	DB-25 pin female

[Port Connectors / Keyboard]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	Keyboard
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[Port Connectors / PS/2 Mouse]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	PS/2 Mouse
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[On-Board Devices / IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648]

On-Board Device Properties:

Description	IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648
Status	Disabled

[On-Board Devices / Adaptec AIC 7902]

On-Board Device Properties:

Description	Adaptec AIC 7902
Type	SCSI Controller
Status	Enabled

[On-Board Devices / BoardCom BCM5721]

On-Board Device Properties:

Description	BoardCom BCM5721
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / TI 1394]

On-Board Device Properties:

Description	TI 1394
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / SoundMax ADI1981B]

On-Board Device Properties:

Description	SoundMax ADI1981B
Type	Sound
Status	Enabled

[Miscellaneous]

Miscellaneous:

System Configuration Option	JCMOS1: 1-2 Keep CMOS Data(Default), 2-3
Clear CMOS Data (make sure the AC power cord(s) is(are) removed from the system)	
System Configuration Option	JCON1: 1-2 Normal(Default), 2-3 Configuration,
No Jumper - BIOS Crisis Recovery	

-----[Overclock]-----

CPU Properties:

CPU Type	Intel Xeon
CPU Alias	Nocona
CPU Stepping	E0
Engineering Sample	No
CPUID CPU Name	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
CPUID Revision	00000F41h

CPU Speed:

CPU Clock	2800.1 MHz (original: 3400 MHz)
CPU Multiplier	14x
CPU FSB	200.0 MHz (original: 200 MHz)
Memory Bus	200.0 MHz
DRAM:FSB Ratio	1:1

CPU Cache:

L1 Trace Cache	12K Instructions
L1 Data Cache	16 KB
L2 Cache	1 MB (On-Die, ECC, ATC, Full-Speed)

Motherboard Properties:

Motherboard ID <DMI>
Motherboard Name MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)

Chipset Properties:

Motherboard Chipset Intel Tumwater E7525
Memory Timings 3-3-3-? (CL-RCD-RP-RAS)

BIOS Properties:

System BIOS Date 08/25/05
Video BIOS Date 02/06/10
DMI BIOS Version IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-

Graphics Processor Properties:

Video Adapter Asus ENGT220
GPU Code Name GT216 (PCI Express 2.0 x16 10DE / 0A20, Rev A2)
GPU Clock (Geometric Domain) 405 MHz (original: 625 MHz)
GPU Clock (Shader Domain) 810 MHz (original: 1360 MHz)
Memory Clock 324 MHz (original: 790 MHz)

-----[Power Management]-----

Power Management Properties:

Current Power Source AC Line
Battery Status No Battery
Full Battery Lifetime Unknown
Remaining Battery Lifetime Unknown

Heron III-02

-----[EVEREST Ultimate Edition]-----

Version EVEREST v5.50.2253 Beta
Benchmark Module 2.5.292.0
Homepage <http://www.lavalys.com/>
Report Type Report Wizard
Computer HERON_III_02-PC
Generator Heron_III_02
Operating System Microsoft Windows 7 Ultimate 6.1.7601
Date 2018-02-22
Time 15:49

-----[Summary]-----

Computer:

Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate
OS Service Pack	Service Pack 1
Internet Explorer	9.11.9600.18860
DirectX	DirectX 11.0
Computer Name	HERON_III_02-PC
User Name	Heron_III_02
Logon Domain	Heron_III_02-PC
Date / Time	2018-02-22 / 15:50

Motherboard:

CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	6656 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
BIOS Type	Phoenix (08/25/05)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	ECP Printer Port (LPT1)

Display:

Video Adapter	nVIDIA GeForce 9600 GSO
3D Accelerator	nVIDIA GeForce 9600 GSO

Multimedia:

Audio Adapter	Analog Devices AD1981B(L) @ Intel 82801EB ICH5 - AC'97 Audio Controller [A-2/A-3]
---------------	--

Storage:

IDE Controller	Intel(R) 82801EB Ultra ATA Storage Controllers
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Disk Drive	USB Driver USB Device (14 GB, USB)
Disk Drive	WDC WD3200AAKS-75SBA0 ATA Device (298 GB, IDE)
Optical Drive	TSSTcorp CDDVDW SH-S203D ATA Device (DVD+R9:16x, DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD- ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
SMART Hard Disks Status	OK

Partitions:

C: (NTFS)	151.5 GB (112.3 GB free)
Total Size	151.5 GB (112.3 GB free)

Input:

Keyboard	Standard PS/2 Keyboard
Mouse	PS/2 Compatible Mouse

Network:

Primary IP Address	88.197.48.107
Primary MAC Address	00-0D-60-17-28-35
Network Adapter	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet (88.197.48.107)

Peripherals:

Printer	Fax
Printer	Microsoft XPS Document Writer
FireWire Controller	Texas Instruments TSB43AB22 1394A-2000 OHCI
PHY/Link-Layer Controller (PHY: TI TSB41AB1/2)	
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB2 Controller	Intel 82801EB ICH5 - Enhanced USB2 Controller [A-2/A-3]
USB Device	USB Mass Storage Device

DMI:

DMI BIOS Vendor	IBM
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
DMI System Manufacturer	IBM
DMI System Product	622310Y
DMI System Version	0
DMI System Serial Number	KDVFL81
DMI System UUID	0075BE96-05640010-BCA2E01F-4CC51086
DMI Motherboard Manufacturer	IBM
DMI Motherboard Product	MSI-9151 Boards
DMI Motherboard Version	Not Applicable
DMI Motherboard Serial Number	#A123456789
DMI Chassis Manufacturer	IBM
DMI Chassis Version	N/A
DMI Chassis Serial Number	N/A
DMI Chassis Asset Tag	12345678901234567890123456789012
DMI Chassis Type	Tower

-----[Computer Name]-----

Computer Comment	Logical
NetBIOS Name	Logical HERON_III_02-PC
DNS Host Name	Logical Heron_III_02-PC
DNS Domain Name	Logical
Fully Qualified DNS Name	Logical Heron_III_02-PC
NetBIOS Name	Physical HERON_III_02-PC
DNS Host Name	Physical Heron_III_02-PC
DNS Domain Name	Physical
Fully Qualified DNS Name	Physical Heron_III_02-PC

-----[DMI]-----

[BIOS]

BIOS Properties:

Vendor	IBM
Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
Release Date	08/25/2005
Size	1024 KB
Boot Devices	Floppy Disk, Hard Disk, CD-ROM
Capabilities	Flash BIOS, Shadow BIOS, Selectable Boot, BBS
Supported Standards	DMI, ACPI, ESCD, PnP
Expansion Capabilities	PCI, USB

[System]

System Properties:

Manufacturer	IBM
Product	622310Y
Version	0
Serial Number	KDVFL81
Universal Unique ID	0075BE96-05640010-BCA2E01F-4CC51086
Wake-Up Type	Power Switch

[Motherboard]

Motherboard Properties:

Manufacturer	IBM
Product	MSI-9151 Boards
Version	Not Applicable
Serial Number	#A123456789

[Chassis]

Chassis Properties:

Manufacturer	IBM
Version	N/A
Serial Number	N/A
Asset Tag	12345678901234567890123456789012
Chassis Type	Tower
Boot-Up State	Safe
Power Supply State	Safe
Thermal State	Safe
Security Status	None

[Processors / Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Current Clock	3400 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Status	Enabled
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#1

[Processors / 00000000000000000000000000000000]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	00000000000000000000000000000000
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#2

[Caches / L1 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	16 KB
Installed Size	16 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#1

[Caches / L2 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	2048 KB
Installed Size	1024 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC

Socket Designation L2 Cache for CPU#1

[Caches / L1 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#2

[Caches / L2 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#2

[Memory Devices / DIMM 1]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	256 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 1
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	03159616
Asset Tag	1509
Part Number	72T32000HR5A

[Memory Devices / DIMM 2]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	256 MB
Speed	400 MHz

Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 2
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	03159714
Asset Tag	1509
Part Number	72T32000HR5A

[Memory Devices / DIMM 3]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	1024 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 3
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	F203570E
Asset Tag	3343
Part Number	M3 93T2950CZ3-CCC

[Memory Devices / DIMM 4]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	1024 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 4
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	F311041A
Asset Tag	3343
Part Number	M3 93T2950CZ3-CCC

[Memory Devices / DIMM 5]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit

Device Locator	DIMM 5
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	A028802A
Asset Tag	0000
Part Number	K

[Memory Devices / DIMM 6]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 6
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	A128712A
Asset Tag	0000
Part Number	K

[System Slots / PCIE Slot #1]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIE Slot #1
Type	PCI
Usage	In Use

[System Slots / PCI/33 Slot #2]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #2
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCI/33 Slot #3]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #3
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCIX 133 Slot #4]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX 133 Slot #4
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100(ZCR) Slot #5]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100(ZCR) Slot #5
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100 Slot #6]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100 Slot #6
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[Port Connectors / COM 1]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A1
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 1
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / COM 2]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A2
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 2
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / Parallel]

Port Connector Properties:

Port Type	Parallel Port ECP/EPP
Internal Reference Designator	J3A1
Internal Connector Type	25 Pin Dual Inline (pin 26 cut)
External Reference Designator	Parallel
External Connector Type	DB-25 pin female

[Port Connectors / Keyboard]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	Keyboard
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[Port Connectors / PS/2 Mouse]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	PS/2 Mouse
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[On-Board Devices / IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648]

On-Board Device Properties:

Description	IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648
Status	Disabled

[On-Board Devices / Adaptec AIC 7902]

On-Board Device Properties:

Description	Adaptec AIC 7902
Type	SCSI Controller
Status	Enabled

[On-Board Devices / BoardCom BCM5721]

On-Board Device Properties:

Description	BoardCom BCM5721
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / TI 1394]

On-Board Device Properties:

Description	TI 1394
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / SoundMax ADI1981B]

On-Board Device Properties:

Description	SoundMax ADI1981B
-------------	-------------------

Type	Sound
Status	Enabled

[Miscellaneous]

Miscellaneous:

System Configuration Option	JCMOS1: 1-2 Keep CMOS Data(Default), 2-3
Clear CMOS Data (make sure the AC power cord(s) is(are) removed from the system)	
System Configuration Option	JCON1: 1-2 Normal(Default), 2-3 Configuration,
No Jumper - BIOS Crisis Recovery	

-----[Overclock]-----

CPU Properties:

CPU Type	Intel Xeon
CPU Alias	Nocona
CPU Stepping	E0
Engineering Sample	No
CPUID CPU Name	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
CPUID Revision	00000F41h

CPU Speed:

CPU Clock	3400.1 MHz (original: 3400 MHz)
CPU Multiplier	17x
CPU FSB	200.0 MHz (original: 200 MHz)
Memory Bus	200.0 MHz
DRAM:FSB Ratio	1:1

CPU Cache:

L1 Trace Cache	12K Instructions
L1 Data Cache	16 KB
L2 Cache	1 MB (On-Die, ECC, ATC, Full-Speed)

Motherboard Properties:

Motherboard ID	<DMI>
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)

Chipset Properties:

Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
Memory Timings	3-3-3-? (CL-RCD-RP-RAS)

BIOS Properties:

System BIOS Date	08/25/05
Video BIOS Date	04/29/08
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-

Graphics Processor Properties:

Video Adapter	nVIDIA GeForce 9600 GSO
GPU Code Name	G92GSO (PCI Express 1.0 x16 10DE / 0610, Rev A2)
GPU Clock (Geometric Domain)	400 MHz (original: 600 MHz)
GPU Clock (Shader Domain)	810 MHz (original: 1500 MHz)
Memory Clock	499 MHz (original: 900 MHz)

-----[Power Management]-----

Power Management Properties:

Current Power Source	AC Line
Battery Status	No Battery
Full Battery Lifetime	Unknown
Remaining Battery Lifetime	Unknown

Heron III-02

-----[EVEREST Ultimate Edition]-----

Version	EVEREST v5.50.2253 Beta
Benchmark Module	2.5.292.0
Homepage	http://www.lavalys.com/
Report Type	Report Wizard
Computer	HERON_III_01-PC
Generator	Heron_III_01
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate 6.1.7600 (Win7 RTM)
Date	2018-02-21
Time	15:43

-----[Summary]-----

Computer:

Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate
OS Service Pack	-
Internet Explorer	8.0.7600.16385
DirectX	DirectX 11.0
Computer Name	HERON_III_01-PC
User Name	Heron_III_01
Logon Domain	Heron_III_01-PC
Date / Time	2018-02-21 / 15:43

Motherboard:

CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	8192 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
BIOS Type	Phoenix (08/25/05)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	ECP Printer Port (LPT1)

Display:

Video Adapter	Standard VGA Graphics Adapter (14 MB)
3D Accelerator	nVIDIA GeForce GT 220

Multimedia:

Audio Adapter	Analog Devices AD1981B(L) @ Intel 82801EB ICH5 -
AC'97 Audio Controller [A-2/A-3]	
Audio Adapter	nVIDIA HDMI @ nVIDIA GT216 - High Definition
Audio Controller	

Storage:

IDE Controller	Intel(R) 82801EB Ultra ATA Storage Controllers - 24D1
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Disk Drive	ST3250410AS ATA Device (250 GB, 7200 RPM, SATA-II)

II)

Disk Drive	USB Driver USB Device (14 GB, USB)
Optical Drive	TSSTcorp CDDVDW SH-S203D ATA Device

(DVD+R9:16x, DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD-ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)

SMART Hard Disks Status OK

Partitions:

C: (NTFS)	135.1 GB (114.1 GB free)
Total Size	135.1 GB (114.1 GB free)

Input:

Keyboard	HID Keyboard Device
Keyboard	Standard PS/2 Keyboard
Mouse	PS/2 Compatible Mouse

Network:

Primary IP Address	88.197.48.108
Primary MAC Address	00-0D-60-17-28-5C
Network Adapter	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet (88.197.48.108)

Peripherals:

Printer	Fax
Printer	Microsoft XPS Document Writer
FireWire Controller	Texas Instruments TSB43AB22 1394A-2000 OHCI PHY/Link-Layer Controller (PHY: TI TSB41AB1/2)
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB2 Controller	Intel 82801EB ICH5 - Enhanced USB2 Controller [A-2/A-3]
USB Device	USB Composite Device
USB Device	USB Input Device
USB Device	USB Input Device
USB Device	USB Mass Storage Device

DMI:

DMI BIOS Vendor	IBM
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
DMI System Manufacturer	IBM
DMI System Product	622310Y
DMI System Version	0
DMI System Serial Number	KDVFK22

DMI System UUID	803590A2-01640010-991A958C-EE4C1887
DMI Motherboard Manufacturer	IBM
DMI Motherboard Product	MSI-9151 Boards
DMI Motherboard Version	Not Applicable
DMI Motherboard Serial Number	#A123456789
DMI Chassis Manufacturer	IBM
DMI Chassis Version	N/A
DMI Chassis Serial Number	N/A
DMI Chassis Asset Tag	12345678901234567890123456789012
DMI Chassis Type	Tower

-----[Computer Name]-----

Computer Comment	Logical
NetBIOS Name	Logical HERON_III_01-PC
DNS Host Name	Logical Heron_III_01-PC
DNS Domain Name	Logical
Fully Qualified DNS Name	Logical Heron_III_01-PC
NetBIOS Name	Physical HERON_III_01-PC
DNS Host Name	Physical Heron_III_01-PC
DNS Domain Name	Physical
Fully Qualified DNS Name	Physical Heron_III_01-PC

-----[DMI]-----

[BIOS]

BIOS Properties:

Vendor	IBM
Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
Release Date	08/25/2005
Size	1024 KB
Boot Devices	Floppy Disk, Hard Disk, CD-ROM
Capabilities	Flash BIOS, Shadow BIOS, Selectable Boot, BBS
Supported Standards	DMI, ACPI, ESCD, PnP
Expansion Capabilities	PCI, USB

[System]

System Properties:

Manufacturer	IBM
Product	622310Y
Version	0
Serial Number	KDVFK22
Universal Unique ID	803590A2-01640010-991A958C-EE4C1887
Wake-Up Type	Power Switch

[Motherboard]

Motherboard Properties:

Manufacturer	IBM
Product	MSI-9151 Boards
Version	Not Applicable
Serial Number	#A123456789

[Chassis]

Chassis Properties:

Manufacturer	IBM
Version	N/A
Serial Number	N/A
Asset Tag	12345678901234567890123456789012
Chassis Type	Tower
Boot-Up State	Safe
Power Supply State	Safe
Thermal State	Safe
Security Status	None

[Processors / Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Current Clock	3400 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Status	Enabled
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#1

[Processors / 00000000000000000000000000000000]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	00000000000000000000000000000000
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#2

[Caches / L1 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	16 KB
Installed Size	16 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#1

[Caches / L2 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	2048 KB
Installed Size	1024 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#1

[Caches / L1 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#2

[Caches / L2 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#2

[Memory Devices / DIMM 1]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 1
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	00006083
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 2]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 2
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	04004070
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 3]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 3
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	00001094
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 4]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 4
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	00007057
Asset Tag	4141
Part Number	HYMP525R72CP4-E3

[Memory Devices / DIMM 5]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Speed	400 MHz
Device Locator	DIMM 5
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	FFFFFFFF
Asset Tag	FFFF

[Memory Devices / DIMM 6]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Speed	400 MHz
Device Locator	DIMM 6
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	FFFFFFFF
Asset Tag	FFFF

[System Slots / PCIE Slot #1]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIE Slot #1
Type	PCI
Usage	In Use

[System Slots / PCI/33 Slot #2]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #2
Type	PCI

Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCI/33 Slot #3]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #3
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCIX 133 Slot #4]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX 133 Slot #4
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100(ZCR) Slot #5]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100(ZCR) Slot #5
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100 Slot #6]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100 Slot #6
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[Port Connectors / COM 1]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A1
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 1
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / COM 2]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A2
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 2
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / Parallel]

Port Connector Properties:

Port Type	Parallel Port ECP/EPP
Internal Reference Designator	J3A1
Internal Connector Type	25 Pin Dual Inline (pin 26 cut)
External Reference Designator	Parallel
External Connector Type	DB-25 pin female

[Port Connectors / Keyboard]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	Keyboard
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[Port Connectors / PS/2 Mouse]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	PS/2 Mouse
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[On-Board Devices / IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648]

On-Board Device Properties:

Description	IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648
Status	Disabled

[On-Board Devices / Adaptec AIC 7902]

On-Board Device Properties:

Description	Adaptec AIC 7902
Type	SCSI Controller
Status	Enabled

[On-Board Devices / BoardCom BCM5721]

On-Board Device Properties:

Description	BoardCom BCM5721
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / TI 1394]

On-Board Device Properties:

Description	TI 1394
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / SoundMax ADI1981B]

On-Board Device Properties:

Description	SoundMax ADI1981B
Type	Sound
Status	Enabled

[Miscellaneous]

Miscellaneous:

System Configuration Option	JCMOS1: 1-2 Keep CMOS Data(Default), 2-3
Clear CMOS Data (make sure the AC power cord(s) is(are) removed from the system)	
System Configuration Option	JCON1: 1-2 Normal(Default), 2-3 Configuration,
No Jumper - BIOS Crisis Recovery	

-----[Overclock]-----

CPU Properties:

CPU Type	Intel Xeon
CPU Alias	Nocona
CPU Stepping	E0
Engineering Sample	No
CPUID CPU Name	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
CPUID Revision	00000F41h

CPU Speed:

CPU Clock	2800.1 MHz (original: 3400 MHz)
CPU Multiplier	14x
CPU FSB	200.0 MHz (original: 200 MHz)
Memory Bus	200.0 MHz
DRAM:FSB Ratio	1:1

CPU Cache:

L1 Trace Cache	12K Instructions
L1 Data Cache	16 KB
L2 Cache	1 MB (On-Die, ECC, ATC, Full-Speed)

Motherboard Properties:

Motherboard ID	<DMI>
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)

Chipset Properties:

Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
Memory Timings	3-3-3-? (CL-RCD-RP-RAS)

BIOS Properties:

System BIOS Date	08/25/05
Video BIOS Date	02/06/10
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-

Graphics Processor Properties:

Video Adapter	Asus ENGT220
GPU Code Name	GT216 (PCI Express 2.0 x16 10DE / 0A20, Rev A2)
GPU Clock (Geometric Domain)	405 MHz (original: 625 MHz)
GPU Clock (Shader Domain)	810 MHz (original: 1360 MHz)
Memory Clock	324 MHz (original: 790 MHz)

-----[Power Management]-----

Power Management Properties:

Current Power Source	AC Line
Battery Status	No Battery
Full Battery Lifetime	Unknown
Remaining Battery Lifetime	Unknown

Heron III-02

-----[EVEREST Ultimate Edition]-----

Version	EVEREST v5.50.2253 Beta
Benchmark Module	2.5.292.0
Homepage	http://www.lavalys.com/
Report Type	Report Wizard
Computer	HERON_III_02-PC
Generator	Heron_III_02
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate 6.1.7601
Date	2018-02-22
Time	15:49

-----[Summary]-----

Computer:

Computer Type	ACPI x64-based PC
Operating System	Microsoft Windows 7 Ultimate
OS Service Pack	Service Pack 1
Internet Explorer	9.11.9600.18860
DirectX	DirectX 11.0
Computer Name	HERON_III_02-PC
User Name	Heron_III_02
Logon Domain	Heron_III_02-PC
Date / Time	2018-02-22 / 15:50

Motherboard:

CPU Type	Intel Xeon, 3400 MHz (17 x 200)
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)
Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
System Memory	6656 MB (Registered ECC DDR2 SDRAM)
BIOS Type	Phoenix (08/25/05)
Communication Port	Communications Port (COM1)
Communication Port	Communications Port (COM2)
Communication Port	ECP Printer Port (LPT1)

Display:

Video Adapter	nVIDIA GeForce 9600 GSO
3D Accelerator	nVIDIA GeForce 9600 GSO

Multimedia:

Audio Adapter	Analog Devices AD1981B(L) @ Intel 82801EB ICH5 - AC'97 Audio Controller [A-2/A-3]
---------------	--

Storage:

IDE Controller	Intel(R) 82801EB Ultra ATA Storage Controllers
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Storage Controller	Adaptec AIC-7902B - Ultra320 SCSI
Disk Drive	USB Driver USB Device (14 GB, USB)
Disk Drive	WDC WD3200AAKS-75SBA0 ATA Device (298 GB, IDE)
Optical Drive	TSSTcorp CDDVDW SH-S203D ATA Device (DVD+R9:16x, DVD-R9:12x, DVD+RW:20x/8x, DVD-RW:20x/6x, DVD-RAM:12x, DVD- ROM:16x, CD:48x/32x/48x DVD+RW/DVD-RW/DVD-RAM)
SMART Hard Disks Status	OK

Partitions:

C: (NTFS)	151.5 GB (112.3 GB free)
Total Size	151.5 GB (112.3 GB free)

Input:

Keyboard	Standard PS/2 Keyboard
Mouse	PS/2 Compatible Mouse

Network:

Primary IP Address	88.197.48.107
Primary MAC Address	00-0D-60-17-28-35
Network Adapter	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet (88.197.48.107)

Peripherals:

Printer	Fax
Printer	Microsoft XPS Document Writer
FireWire Controller	Texas Instruments TSB43AB22 1394A-2000 OHCI
PHY/Link-Layer Controller (PHY: TI TSB41AB1/2)	
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB1 Controller	Intel 82801EB ICH5 - USB Controller [A-2/A-3]
USB2 Controller	Intel 82801EB ICH5 - Enhanced USB2 Controller [A-2/A-3]
USB Device	USB Mass Storage Device

DMI:

DMI BIOS Vendor	IBM
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
DMI System Manufacturer	IBM
DMI System Product	622310Y
DMI System Version	0
DMI System Serial Number	KDVFL81
DMI System UUID	0075BE96-05640010-BCA2E01F-4CC51086
DMI Motherboard Manufacturer	IBM
DMI Motherboard Product	MSI-9151 Boards
DMI Motherboard Version	Not Applicable
DMI Motherboard Serial Number	#A123456789
DMI Chassis Manufacturer	IBM
DMI Chassis Version	N/A
DMI Chassis Serial Number	N/A
DMI Chassis Asset Tag	12345678901234567890123456789012
DMI Chassis Type	Tower

-----[Computer Name]-----

Computer Comment	Logical
NetBIOS Name	Logical HERON_III_02-PC
DNS Host Name	Logical Heron_III_02-PC
DNS Domain Name	Logical
Fully Qualified DNS Name	Logical Heron_III_02-PC
NetBIOS Name	Physical HERON_III_02-PC
DNS Host Name	Physical Heron_III_02-PC
DNS Domain Name	Physical
Fully Qualified DNS Name	Physical Heron_III_02-PC

-----[DMI]-----

[BIOS]

BIOS Properties:

Vendor	IBM
Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-
Release Date	08/25/2005
Size	1024 KB
Boot Devices	Floppy Disk, Hard Disk, CD-ROM
Capabilities	Flash BIOS, Shadow BIOS, Selectable Boot, BBS
Supported Standards	DMI, ACPI, ESCD, PnP
Expansion Capabilities	PCI, USB

[System]

System Properties:

Manufacturer	IBM
Product	622310Y
Version	0
Serial Number	KDVFL81
Universal Unique ID	0075BE96-05640010-BCA2E01F-4CC51086
Wake-Up Type	Power Switch

[Motherboard]

Motherboard Properties:

Manufacturer	IBM
Product	MSI-9151 Boards
Version	Not Applicable
Serial Number	#A123456789

[Chassis]

Chassis Properties:

Manufacturer	IBM
Version	N/A
Serial Number	N/A
Asset Tag	12345678901234567890123456789012
Chassis Type	Tower
Boot-Up State	Safe
Power Supply State	Safe
Thermal State	Safe
Security Status	None

[Processors / Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Current Clock	3400 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Status	Enabled
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#1

[Processors / 00000000000000000000000000000000]

Processor Properties:

Manufacturer	Intel Corporation
Version	00000000000000000000000000000000
External Clock	200 MHz
Maximum Clock	3600 MHz
Type	Central Processor
Voltage	1.3 V
Upgrade	ZIF
Socket Designation	CPU#2

[Caches / L1 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	16 KB
Installed Size	16 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#1

[Caches / L2 Cache for CPU#1]

Cache Properties:

Type	Internal
Status	Enabled
Operational Mode	Write-Back
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	2048 KB
Installed Size	1024 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC

Socket Designation L2 Cache for CPU#1

[Caches / L1 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L1 Cache for CPU#2

[Caches / L2 Cache for CPU#2]

Cache Properties:

Status	Disabled
Associativity	4-way Set-Associative
Maximum Size	0 KB
Installed Size	0 KB
Supported SRAM Type	Burst, Pipeline Burst
Current SRAM Type	Burst
Error Correction	Single-bit ECC
Socket Designation	L2 Cache for CPU#2

[Memory Devices / DIMM 1]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	256 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 1
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	03159616
Asset Tag	1509
Part Number	72T32000HR5A

[Memory Devices / DIMM 2]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	256 MB
Speed	400 MHz

Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 2
Bank Locator	BANK 1
Serial Number	03159714
Asset Tag	1509
Part Number	72T32000HR5A

[Memory Devices / DIMM 3]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	1024 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 3
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	F203570E
Asset Tag	3343
Part Number	M3 93T2950CZ3-CCC

[Memory Devices / DIMM 4]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	1024 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 4
Bank Locator	BANK 2
Serial Number	F311041A
Asset Tag	3343
Part Number	M3 93T2950CZ3-CCC

[Memory Devices / DIMM 5]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit

Device Locator	DIMM 5
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	A028802A
Asset Tag	0000
Part Number	K

[Memory Devices / DIMM 6]

Memory Device Properties:

Form Factor	DIMM
Type	DDR
Type Detail	Synchronous
Size	2048 MB
Speed	400 MHz
Total Width	72-bit
Data Width	64-bit
Device Locator	DIMM 6
Bank Locator	BANK 3
Serial Number	A128712A
Asset Tag	0000
Part Number	K

[System Slots / PCIE Slot #1]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIE Slot #1
Type	PCI
Usage	In Use

[System Slots / PCI/33 Slot #2]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #2
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCI/33 Slot #3]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCI/33 Slot #3
Type	PCI
Usage	Empty
Data Bus Width	32-bit
Length	Short

[System Slots / PCIX 133 Slot #4]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX 133 Slot #4
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100(ZCR) Slot #5]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100(ZCR) Slot #5
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[System Slots / PCIX100 Slot #6]

System Slot Properties:

Slot Designation	PCIX100 Slot #6
Type	PCI-X
Usage	Empty
Data Bus Width	64-bit
Length	Long

[Port Connectors / COM 1]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A1
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 1
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / COM 2]

Port Connector Properties:

Port Type	Serial Port 16550A Compatible
Internal Reference Designator	J2A2
Internal Connector Type	9 Pin Dual Inline (pin 10 cut)
External Reference Designator	COM 2
External Connector Type	DB-9 pin male

[Port Connectors / Parallel]

Port Connector Properties:

Port Type	Parallel Port ECP/EPP
Internal Reference Designator	J3A1
Internal Connector Type	25 Pin Dual Inline (pin 26 cut)
External Reference Designator	Parallel
External Connector Type	DB-25 pin female

[Port Connectors / Keyboard]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	Keyboard
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[Port Connectors / PS/2 Mouse]

Port Connector Properties:

Port Type	Keyboard Port
Internal Reference Designator	J1A1
Internal Connector Type	None
External Reference Designator	PS/2 Mouse
External Connector Type	Circular DIN-8 male

[On-Board Devices / IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648]

On-Board Device Properties:

Description	IBM Automatic Server Restart - Machine Type 8648
Status	Disabled

[On-Board Devices / Adaptec AIC 7902]

On-Board Device Properties:

Description	Adaptec AIC 7902
Type	SCSI Controller
Status	Enabled

[On-Board Devices / BoardCom BCM5721]

On-Board Device Properties:

Description	BoardCom BCM5721
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / TI 1394]

On-Board Device Properties:

Description	TI 1394
Type	Ethernet
Status	Enabled

[On-Board Devices / SoundMax ADI1981B]

On-Board Device Properties:

Description	SoundMax ADI1981B
-------------	-------------------

Type	Sound
Status	Enabled

[Miscellaneous]

Miscellaneous:

System Configuration Option	JCMOS1: 1-2 Keep CMOS Data(Default), 2-3
Clear CMOS Data (make sure the AC power cord(s) is(are) removed from the system)	
System Configuration Option	JCON1: 1-2 Normal(Default), 2-3 Configuration,
No Jumper - BIOS Crisis Recovery	

-----[Overclock]-----

CPU Properties:

CPU Type	Intel Xeon
CPU Alias	Nocona
CPU Stepping	E0
Engineering Sample	No
CPUID CPU Name	Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.40GHz
CPUID Revision	00000F41h

CPU Speed:

CPU Clock	3400.1 MHz (original: 3400 MHz)
CPU Multiplier	17x
CPU FSB	200.0 MHz (original: 200 MHz)
Memory Bus	200.0 MHz
DRAM:FSB Ratio	1:1

CPU Cache:

L1 Trace Cache	12K Instructions
L1 Data Cache	16 KB
L2 Cache	1 MB (On-Die, ECC, ATC, Full-Speed)

Motherboard Properties:

Motherboard ID	<DMI>
Motherboard Name	MSI E7525 Master-S2 (MS-9151) (2 PCI, 1 PCI-E x16, 3 PCI-X, 6 DDR2 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394, SCSI)

Chipset Properties:

Motherboard Chipset	Intel Tumwater E7525
Memory Timings	3-3-3-? (CL-RCD-RP-RAS)

BIOS Properties:

System BIOS Date	08/25/05
Video BIOS Date	04/29/08
DMI BIOS Version	IBM BIOS Version 1.57-[PME157AUS-1.57]-

Graphics Processor Properties:

Video Adapter	nVIDIA GeForce 9600 GSO
GPU Code Name	G92GSO (PCI Express 1.0 x16 10DE / 0610, Rev A2)
GPU Clock (Geometric Domain)	400 MHz (original: 600 MHz)
GPU Clock (Shader Domain)	810 MHz (original: 1500 MHz)
Memory Clock	499 MHz (original: 900 MHz)

-----[Power Management]-----

Power Management Properties:

Current Power Source	AC Line
Battery Status	No Battery
Full Battery Lifetime	Unknown
Remaining Battery Lifetime	Unknown

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ-ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

Κώδικας για τον Υπολογισμό του Μετασχηματισμού Fourier σε Βολταμετρικό Σήμα

Ο κώδικας, που χρησιμοποιήθηκε υπολόγισε ένα μετασχηματισμό Fourier σε μια σειρά σημάτων βολταμετρίας. Στον κώδικα καλείται μια ρουτίνα «proc1», η οποία παρουσιάζεται παρακάτω (10).

Η Αρχική Ρουτίνα (Μετασχηματισμός Fourier υψηλής υπολογιστικής απαίτησης)

```
clc;
clear all;
load 'measures.mat';

dtft_abs=zeros(90,2000);
dtft_angle=zeros(90,2000);
dft_abs=zeros(90,11100);
dft_angle=zeros(90,11100);

for d=1:9
    string1=strcat('MEXV00',int2str(d));
    [Xw,Xk]=proc1(eval(string1),string1);
    l=length(Xw);
    l1=length(Xk);
    dtft_abs(d,1:l)=abs(Xw);
    dtft_angle(d,1:l)=angle(Xw);
    dft_abs(d,1:l1)=abs(Xk);
    dft_angle(d,1:l1)=angle(Xk);
end
```

Η Ρουτίνα “proc1”

```
function [X1,Xk] = proc1(x ,name)

t = [0:6:6*[length(x)-1]];

found=0;
i=3;
% while (i<=220 & found==0)
%     r = int2str(i);
%     row = strcat('A',r);
%     column1 = strcat('C',r);
%     column2 = strcat('D',r);
%     column3 = strcat('O',r);
%     column4 = strcat('R',r);
%     [n1,n2] = xlsread('metriseis.xlsx', 2, row);
%     n2=string(n2);
%     if (n2==name)
%         found=1;
%         [ee,type] = xlsread('metriseis.xlsx' , 2, column1);
%         [pp,ex] = xlsread('metriseis.xlsx' , 2, column3);
%         ex=string(ex);
%         type=string(type);
%         if ex=='IN VITRO'
%             [ss,substance] = xlsread('metriseis.xlsx' , 2,
column2);
```

```

%           substance=string(substance);
%           heading=strcat(ex, '-', substance, '-', type);
%       else
%           [ff,fluid] = xlsread('metriseis.xlsx' , 2, column4);
%           fluid=string(fluid);
%           heading=strcat(ex, '-', 'body fluid:', fluid);
%       end
%   else
%       i=i+1;
%   end
% end
%
% plot(t, x)
% grid on;
% xlabel('time (s)');
% ylabel('signal (mV)');
% heading2=strcat(n2, ':', heading);
% title(heading2);
% n3=strcat('xn_', name);
% saveas(gcf, n3, 'fig')
% saveas(gcf, n3, 'jpg')
% close all force

% xlog= logarithm(x, t, heading2, name);

[X1, rf]= MSF(x, name);

Xk = dft(x, name);

end

```

Ο μετασχηματισμός παρήγαγε μια σειρά συναρτήσεων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 Xw= & 107 \cdot \exp(-w \cdot 1i) + (23 \cdot \exp(-w \cdot 2i))/2 + (47 \cdot \exp(-w \cdot 3i))/2 + (55 \cdot \exp(-w \cdot 4i))/4 + 29 \cdot \exp(-w \cdot 5i) + (93 \cdot \exp(-w \cdot 6i))/2 + (99 \cdot \exp(-w \cdot 7i))/2 + (183 \cdot \exp(-w \cdot 8i))/4 + 49 \cdot \exp(-w \cdot 9i) + (107 \cdot \exp(-w \cdot 10i))/2 + 65 \cdot \exp(-w \cdot 34i) + 107 \cdot \exp(-w \cdot 35i) + (151 \cdot \exp(-w \cdot 36i))/2 + (297 \cdot \exp(-w \cdot 37i))/4 + (297 \cdot \exp(-w \cdot 38i))/4 + (297 \cdot \exp(-w \cdot 39i))/4 + (297 \cdot \exp(-w \cdot 40i))/4 + (297 \cdot \exp(-w \cdot 41i))/4 + (295 \cdot \exp(-w \cdot 42i))/4 + 107 \cdot \exp(-w \cdot 43i) + 37 \cdot \exp(-w \cdot 44i) + 50 \cdot \exp(-w \cdot 45i) + 101 \cdot \exp(-w \cdot 46i) + 35 \cdot \exp(-w \cdot 71i) + (29 \cdot \exp(-w \cdot 72i))/4 + (105 \cdot \exp(-w \cdot 73i))/2 + (165 \cdot \exp(-w \cdot 74i))/4 + (135 \cdot \exp(-w \cdot 75i))/2 + 80 \cdot \exp(-w \cdot 76i) + (105 \cdot \exp(-w \cdot 77i))/2 + (173 \cdot \exp(-w \cdot 78i))/4 + (127 \cdot \exp(-w \cdot 79i))/2 + 90 \cdot \exp(-w \cdot 80i) + 70 \cdot \exp(-w \cdot 104i) + 48 \cdot \exp(-w \cdot 105i) + (65 \cdot \exp(-w \cdot 106i))/2 + 26 \cdot \exp(-w \cdot 107i) + (65 \cdot \exp(-w \cdot 108i))/2 + (305 \cdot \exp(-w \cdot 109i))/4 + 45 \cdot \exp(-w \cdot 110i) + 36 \cdot \exp(-w \cdot 111i) + 45 \cdot \exp(-w \cdot 112i) + (167 \cdot \exp(-w \cdot 113i))/2 + (139 \cdot \exp(-w \cdot 137i))/2 + 55 \cdot \exp(-w \cdot 138i) + (73 \cdot \exp(-w \cdot 139i))/2 + 26 \cdot \exp(-w \cdot 140i) + (73 \cdot \exp(-w \cdot 141i))/2 + (147 \cdot \exp(-w \cdot 142i))/2 + (93 \cdot \exp(-w \cdot 143i))/2 + (65 \cdot \exp(-w \cdot 144i))/2 + (93 \cdot \exp(-w \cdot 145i))/2 + (159 \cdot \exp(-w \cdot 146i))/2 + 70 \cdot \exp(-w \cdot 171i) + (75 \cdot \exp(-w \cdot 172i))/2 + (51 \cdot \exp(-w \cdot 173i))/2 + 35 \cdot \exp(-w \cdot 174i) + (143 \cdot \exp(-w \cdot 175i))/2 + 50 \cdot \exp(-w \cdot 176i) + 36 \cdot \exp(-w \cdot 177i) + 30 \cdot \exp(-w \cdot 178i) + (105 \cdot \exp(-w \cdot 179i))/2 + 76 \cdot \exp(-w \cdot 180i) + (281 \cdot \exp(-w \cdot 204i))/4 + (87 \cdot \exp(-w \cdot 205i))/2 + 30 \cdot \exp(-w \cdot 206i) + (49 \cdot \exp(-w \cdot 207i))/2 + (139 \cdot \exp(-w \cdot 208i))/2 + (105 \cdot \exp(-w \cdot 209i))/2 + (55 \cdot \exp(-w \cdot 210i))/2 + 35 \cdot \exp(-w \cdot 211i) + (147 \cdot \exp(-w \cdot 212i))/2 + 71 \cdot \exp(-w \cdot 237i) + 45 \cdot \exp(-w \cdot 238i) + 30 \cdot \exp(-w \cdot 239i) + (95 \cdot \exp(-w \cdot 240i))/4 + 30 \cdot \exp(-w \cdot 241i) + (269 \cdot \exp(-w \cdot 242i))/4 + (65 \cdot \exp(-w \cdot 243i))/2 + (103 \cdot \exp(-w \cdot 244i))/4 + (79 \cdot \exp(-w \cdot 245i))/2 + (285 \cdot \exp(-w \cdot 246i))/4 + 71 \cdot \exp(-w \cdot 270i) + (85 \cdot \exp(-w \cdot 271i))/2 + 30 \cdot \exp(-w \cdot 272i) + 23 \cdot \exp(-w \cdot 273i) + 30 \cdot \exp(-w \cdot 274i) + (131 \cdot \exp(-w \cdot 275i))/2 + 30 \cdot \exp(-w \cdot 276i) + (49 \cdot \exp(-w \cdot 277i))/2 + 30 \cdot \exp(-w \cdot 278i) + 69 \cdot \exp(-w \cdot 279i)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Xw= & 81 \cdot \exp(-w \cdot 1i) + 64 \cdot \exp(-w \cdot 2i) + (125 \cdot \exp(-w \cdot 3i))/2 + (247 \cdot \exp(-w \cdot 4i))/4 + (123 \cdot \exp(-w \cdot 5i))/2 + 64 \cdot \exp(-w \cdot 6i) + (141 \cdot \exp(-w \cdot 7i))/2 + (151 \cdot \exp(-w \cdot 8i))/2 + 87 \cdot \exp(-w \cdot 9i) + 101 \cdot \exp(-w \cdot 10i) + 62 \cdot \exp(-w \cdot 38i) + (119 \cdot \exp(-w \cdot 39i))/2 + 59 \cdot \exp(-w \cdot 40i) + 61 \cdot \exp(-w \cdot 41i) + 67 \cdot \exp(-w \cdot 42i) + 75 \cdot \exp(-w \cdot 43i) + (175 \cdot \exp(-w \cdot 44i))/2 + 98 \cdot \exp(-w \cdot 45i) + 63 \cdot \exp(-w \cdot 69i) + 64 \cdot \exp(-w \cdot 70i) + 63 \cdot \exp(-w \cdot 71i) + (125 \cdot \exp(-w \cdot 72i))/2 + (125 \cdot \exp(-w \cdot 73i))/2 + 64 \cdot \exp(-w \cdot 74i) + (137 \cdot \exp(-w \cdot 75i))/2 + (149 \cdot \exp(-w \cdot 76i))/2 +
 \end{aligned}$$

$(173*\exp(-w*77i))/2 + 95*\exp(-w*78i) + (201*\exp(-w*79i))/2 + (181*\exp(-w*113i))/2 + (135*\exp(-w*114i))/2 + (115*\exp(-w*115i))/2 + (135*\exp(-w*116i))/2 + (421*\exp(-w*117i))/4 + (427*\exp(-w*118i))/4 + (395*\exp(-w*121i))/4 + (133*\exp(-w*123i))/4 + (129*\exp(-w*146i))/2 + (173*\exp(-w*147i))/4 + (191*\exp(-w*148i))/2 + (251*\exp(-w*149i))/4 + (173*\exp(-w*150i))/2 + (135*\exp(-w*151i))/2 + 107*\exp(-w*152i) + 107*\exp(-w*153i) + 107*\exp(-w*154i) + 40*\exp(-w*155i) + (109*\exp(-w*157i))/2 + (91*\exp(-w*159i))/4 + 3*\exp(-w*160i) + 3*\exp(-w*161i) + 3*\exp(-w*162i) + 3*\exp(-w*163i) + 3*\exp(-w*164i) + 3*\exp(-w*165i) + 3*\exp(-w*166i) + 3*\exp(-w*167i) + 3*\exp(-w*168i) + 3*\exp(-w*169i) + 3*\exp(-w*170i) + 3*\exp(-w*171i) + 3*\exp(-w*172i) + 3*\exp(-w*173i) + 3*\exp(-w*174i) + 3*\exp(-w*175i) + 3*\exp(-w*176i) + 107*\exp(-w*177i) + 107*\exp(-w*178i) + 107*\exp(-w*179i) + 107*\exp(-w*180i) + 107*\exp(-w*181i) + 107*\exp(-w*182i) + 56*\exp(-w*183i) + (201*\exp(-w*184i))/2 + 93*\exp(-w*185i) + (271*\exp(-w*186i))/4 + (377*\exp(-w*187i))/4 + 37*\exp(-w*214i) + 37*\exp(-w*215i) + (105*\exp(-w*216i))/2 + (175*\exp(-w*217i))/2 + 16*\exp(-w*218i) + (361*\exp(-w*219i))/4 + (287*\exp(-w*220i))/4 + (195*\exp(-w*221i))/2$

$Xw=214*\exp(-w*1i) + 214*\exp(-w*2i) + 86*\exp(-w*3i) + 84*\exp(-w*4i) + (167*\exp(-w*5i))/2 + (167*\exp(-w*6i))/2 + (167*\exp(-w*7i))/2 + (167*\exp(-w*8i))/2 + 86*\exp(-w*9i) + 84*\exp(-w*10i) + 84*\exp(-w*11i) + 84*\exp(-w*12i) + 84*\exp(-w*13i) + (167*\exp(-w*21i))/2 + (167*\exp(-w*22i))/2 + (167*\exp(-w*23i))/2 + (167*\exp(-w*24i))/2 + (165*\exp(-w*25i))/2 + (165*\exp(-w*26i))/2 + 83*\exp(-w*27i) + 87*\exp(-w*28i) + 85*\exp(-w*29i) + 84*\exp(-w*30i) + 84*\exp(-w*31i) + 84*\exp(-w*32i) + 85*\exp(-w*33i) + 98*\exp(-w*41i) + 98*\exp(-w*42i) + 96*\exp(-w*43i) + 94*\exp(-w*44i) + 92*\exp(-w*45i) + (183*\exp(-w*46i))/2 + (185*\exp(-w*47i))/2 + 110*\exp(-w*48i) + 96*\exp(-w*49i) + 94*\exp(-w*50i) + 95*\exp(-w*51i) + 98*\exp(-w*52i) + 102*\exp(-w*53i) + 98*\exp(-w*61i) + (193*\exp(-w*62i))/2 + 95*\exp(-w*63i) + (187*\exp(-w*64i))/2 + 92*\exp(-w*65i) + 92*\exp(-w*66i) + 94*\exp(-w*67i) + 109*\exp(-w*68i) + 95*\exp(-w*69i) + 94*\exp(-w*70i) + 95*\exp(-w*71i) + 98*\exp(-w*72i) + 102*\exp(-w*73i) + 100*\exp(-w*111i) + 98*\exp(-w*112i) + 96*\exp(-w*113i) + 94*\exp(-w*114i) + (185*\exp(-w*115i))/2 + (183*\exp(-w*116i))/2 + 108*\exp(-w*117i) + 96*\exp(-w*118i) + 93*\exp(-w*119i) + (185*\exp(-w*120i))/2 + (189*\exp(-w*121i))/2 + 102*\exp(-w*122i) + 98*\exp(-w*160i) + 100*\exp(-w*161i) + 98*\exp(-w*162i) + (191*\exp(-w*163i))/2 + 94*\exp(-w*164i) + 92*\exp(-w*165i) + 95*\exp(-w*166i) + 117*\exp(-w*167i) + 105*\exp(-w*168i) + 96*\exp(-w*169i) + 94*\exp(-w*170i) + 96*\exp(-w*171i) + 103*\exp(-w*172i) + 101*\exp(-w*211i) + (197*\exp(-w*212i))/2 + 96*\exp(-w*213i) + (181*\exp(-w*214i))/2 + (181*\exp(-w*215i))/2 + 97*\exp(-w*216i) + 117*\exp(-w*217i) + 103*\exp(-w*218i) + (193*\exp(-w*219i))/2 + (189*\exp(-w*220i))/2 + 96*\exp(-w*221i) + (207*\exp(-w*222i))/2 + 103*\exp(-w*260i) + 100*\exp(-w*261i) + 97*\exp(-w*262i) + (191*\exp(-w*263i))/2 + (187*\exp(-w*264i))/2 + (185*\exp(-w*265i))/2 + 103*\exp(-w*266i) + 117*\exp(-w*267i) + 99*\exp(-w*268i) + (191*\exp(-w*269i))/2 + 95*\exp(-w*270i) + (195*\exp(-w*271i))/2 + 104*\exp(-w*272i) + 103*\exp(-w*310i) + (201*\exp(-w*311i))/2 + 98*\exp(-w*312i) + 94*\exp(-w*313i) + 92*\exp(-w*314i) + 92*\exp(-w*315i) + 103*\exp(-w*316i) + 114*\exp(-w*317i) + 96*\exp(-w*318i) + 94*\exp(-w*319i) + (189*\exp(-w*320i))/2 + 98*\exp(-w*321i) + 104*\exp(-w*322i) + (53*\exp(-w*333i))/2 + (3*\exp(-w*334i))/2 + (3*\exp(-w*335i))/2 + (3*\exp(-w*336i))/2 + (3*\exp(-w*337i))/2 + (3*\exp(-w*338i))/2 + (3*\exp(-w*339i))/2 + (3*\exp(-w*340i))/2 + (3*\exp(-w*341i))/2 + (3*\exp(-w*342i))/2 + (3*\exp(-w*343i))/2 + (3*\exp(-w*344i))/2 + (3*\exp(-w*345i))/2 + (3*\exp(-w*346i))/2 + (3*\exp(-w*347i))/2 + (3*\exp(-w*348i))/2 + (3*\exp(-w*349i))/2 + (3*\exp(-w*350i))/2 + (3*\exp(-w*351i))/2 + (3*\exp(-w*352i))/2 + (3*\exp(-w*353i))/2 + (3*\exp(-w*354i))/2 + (3*\exp(-w*355i))/2 + (3*\exp(-w*356i))/2 + (3*\exp(-w*357i))/2 + (3*\exp(-w*358i))/2 + 214*\exp(-w*359i) + 214*\exp(-w*360i) + (205*\exp(-w*361i))/2 + (199*\exp(-w*362i))/2 + 97*\exp(-w*363i) + 95*\exp(-w*364i) + (189*\exp(-w*365i))/2 + (237*\exp(-w*366i))/2 + 105*\exp(-w*367i) + (195*\exp(-w*368i))/2 + (193*\exp(-w*369i))/2 + 99*\exp(-w*370i) + 124*\exp(-w*371i) + 106*\exp(-w*410i) + 103*\exp(-w*411i) + 100*\exp(-w*412i) + 97*\exp(-w*413i) + (189*\exp(-w*414i))/2 + 98*\exp(-w*415i) + (231*\exp(-w*416i))/2 + 99*\exp(-w*417i) + (193*\exp(-w*418i))/2 + (193*\exp(-w*419i))/2 + 98*\exp(-w*420i) + 107*\exp(-w*421i) + 106*\exp(-w*459i) + 105*\exp(-w*460i) + 102*\exp(-w*461i) + 99*\exp(-w*462i) + 96*\exp(-w*463i) + 94*\exp(-w*464i) + 100*\exp(-w*465i) + 117*\exp(-w*466i) + 99*\exp(-w*467i) + (193*\exp(-w*468i))/2 + 97*\exp(-w*469i) + 102*\exp(-w*470i) + 106*\exp(-w*471i) + 105*\exp(-w*507i) + 102*\exp(-w*508i) + 99*\exp(-w*509i) + (193*\exp(-w*510i))/2 + 94*\exp(-w*511i) + 100*\exp(-w*512i) + 115*\exp(-w*513i) + 98*\exp(-w*514i) + (193*\exp(-w*515i))/2 + (193*\exp(-w*516i))/2 + (195*\exp(-w*517i))/2 + (213*\exp(-w*518i))/2 + 108*\exp(-w*557i) + 104*\exp(-w*558i) + 101*\exp(-w*559i) + 98*\exp(-w*560i) + 95*\exp(-w*561i) + 98*\exp(-w*562i) + (229*\exp(-w*563i))/2 + 100*\exp(-w*564i) + (193*\exp(-w*565i))/2 + 96*\exp(-w*566i) + 97*\exp(-w*567i) + (213*\exp(-w*568i))/2 + 108*\exp(-w*607i) + 104*\exp(-w*608i) + 100*\exp(-w*609i) + 97*\exp(-w*610i) + (189*\exp(-w*611i))/2 + 98*\exp(-w*612i) + 114*\exp(-w*613i) + 99*\exp(-w*614i) + (191*\exp(-w*615i))/2 + (191*\exp(-w*616i))/2 + 98*\exp(-w*617i) + 106*\exp(-w*618i) + 109*\exp(-w*656i) + 105*\exp(-w*657i) + 102*\exp(-w*658i) + 98*\exp(-w*659i) + 96*\exp(-w*660i) + (189*\exp(-w*661i))/2 + 104*\exp(-w*662i) + (231*\exp(-w*663i))/2 + 98*\exp(-w*664i) + 96*\exp(-w*665i) + (191*\exp(-w*666i))/2 + (199*\exp(-w*667i))/2 + 105*\exp(-w*668i) + 104*\exp(-w*706i) + (211*\exp(-w*707i))/2 + 101*\exp(-w*708i) + 96*\exp(-w*709i) + 107*\exp(-w*710i) + 100*\exp(-w*711i) + 95*\exp(-w*712i) + 89*\exp(-w*713i) + 85*\exp(-w*714i) + 82*\exp(-w*715i) + 75*\exp(-w*716i) + 98*\exp(-w*717i) + 105*\exp(-w*718i) + 108*\exp(-w*756i) + 104*\exp(-w*757i) + 101*\exp(-w*758i) + 97*\exp(-w*759i) + 94*\exp(-w*760i) + 97*\exp(-w*761i) + 113*\exp(-w*762i) + 101*\exp(-w*763i) + 95*\exp(-w*764i) + 94*\exp(-w*765i) + 96*\exp(-w*766i) + 99*\exp(-w*767i) + (211*\exp(-w*768i))/2 +$

$(217*\exp(-w*805i))/2 + 106*\exp(-w*806i) + 103*\exp(-w*807i) + 99*\exp(-w*808i) + 96*\exp(-w*809i) + 94*\exp(-w*810i) + 100*\exp(-w*811i) + 115*\exp(-w*812i) + 98*\exp(-w*813i) + 95*\exp(-w*814i) + 95*\exp(-w*815i) + 98*\exp(-w*816i) + 105*\exp(-w*817i)$

$Xw=(433*\exp(-w*1i))/8 + (109*\exp(-w*2i))/2 + (211*\exp(-w*3i))/4 + (101*\exp(-w*4i))/2 + 45*\exp(-w*5i) + 41*\exp(-w*6i) + (83*\exp(-w*7i))/2 + (83*\exp(-w*8i))/2 + (257*\exp(-w*9i))/4 + (245*\exp(-w*10i))/4 + (151*\exp(-w*11i))/4 + (143*\exp(-w*12i))/8 + (47*\exp(-w*13i))/2 + (233*\exp(-w*14i))/8 + 44*\exp(-w*21i) + (179*\exp(-w*22i))/4 + (91*\exp(-w*23i))/2 + (89*\exp(-w*24i))/2 + (161*\exp(-w*25i))/4 + 35*\exp(-w*26i) + (237*\exp(-w*27i))/8 + (227*\exp(-w*28i))/8 + (75*\exp(-w*29i))/2 + (233*\exp(-w*30i))/4 + (75*\exp(-w*31i))/2 + (81*\exp(-w*32i))/4 + (105*\exp(-w*33i))/4 + (63*\exp(-w*34i))/2 + (191*\exp(-w*41i))/4 + (195*\exp(-w*42i))/4 + (103*\exp(-w*43i))/2 + 50*\exp(-w*44i) + 46*\exp(-w*45i) + (81*\exp(-w*46i))/2 + (287*\exp(-w*47i))/8 + (273*\exp(-w*48i))/8 + 44*\exp(-w*49i) + (257*\exp(-w*50i))/4 + 44*\exp(-w*51i) + 22*\exp(-w*52i) + (55*\exp(-w*53i))/2 + (269*\exp(-w*54i))/8 + (191*\exp(-w*61i))/4 + (99*\exp(-w*62i))/2 + (407*\exp(-w*63i))/8 + (207*\exp(-w*64i))/4 + (187*\exp(-w*65i))/4 + 39*\exp(-w*66i) + 35*\exp(-w*67i) + (129*\exp(-w*68i))/4 + (161*\exp(-w*69i))/4 + (481*\exp(-w*70i))/8 + (161*\exp(-w*71i))/4 + (111*\exp(-w*72i))/4 + (283*\exp(-w*73i))/8 + (101*\exp(-w*102i))/2 + (105*\exp(-w*103i))/2 + (433*\exp(-w*104i))/8 + (219*\exp(-w*105i))/4 + 49*\exp(-w*106i) + 45*\exp(-w*107i) + (151*\exp(-w*108i))/4 + (267*\exp(-w*109i))/8 + (151*\exp(-w*110i))/4 + (127*\exp(-w*111i))/2 + (89*\exp(-w*112i))/2 + 25*\exp(-w*113i) + (137*\exp(-w*114i))/4 + (105*\exp(-w*149i))/2 + (109*\exp(-w*150i))/2 + (105*\exp(-w*151i))/2 + (105*\exp(-w*152i))/2 + 52*\exp(-w*153i) + (105*\exp(-w*154i))/2 + (433*\exp(-w*155i))/8 + (217*\exp(-w*156i))/4 + (219*\exp(-w*157i))/4 + (219*\exp(-w*158i))/4 + (223*\exp(-w*159i))/4 + (223*\exp(-w*160i))/4 + (231*\exp(-w*161i))/4 + (469*\exp(-w*162i))/8 + (471*\exp(-w*163i))/8 + 60*\exp(-w*164i) + (479*\exp(-w*165i))/8 + (119*\exp(-w*166i))/2 + (477*\exp(-w*167i))/8 + (241*\exp(-w*168i))/4 + (477*\exp(-w*169i))/8 + (495*\exp(-w*170i))/8 + (243*\exp(-w*171i))/4 + (237*\exp(-w*172i))/4 + (473*\exp(-w*173i))/8 + (461*\exp(-w*174i))/8 + (457*\exp(-w*175i))/8 + (451*\exp(-w*176i))/8 + (113*\exp(-w*177i))/2 + (431*\exp(-w*178i))/8 + (435*\exp(-w*179i))/8 + 51*\exp(-w*180i) + (103*\exp(-w*181i))/2 + (99*\exp(-w*182i))/2 + (191*\exp(-w*183i))/4 + (191*\exp(-w*184i))/4 + (181*\exp(-w*185i))/4 + (91*\exp(-w*186i))/2 + (179*\exp(-w*187i))/4 + (85*\exp(-w*188i))/2 + (181*\exp(-w*189i))/4 + (351*\exp(-w*190i))/8 + (89*\exp(-w*191i))/2 + (181*\exp(-w*192i))/4 + (93*\exp(-w*193i))/2 + 49*\exp(-w*194i) + (107*\exp(-w*195i))/2 + (113*\exp(-w*196i))/2 + (251*\exp(-w*197i))/4 + (257*\exp(-w*198i))/4 + (251*\exp(-w*199i))/4 + (253*\exp(-w*200i))/4 + (241*\exp(-w*201i))/4 + (231*\exp(-w*202i))/4 + (107*\exp(-w*203i))/2 + 47*\exp(-w*204i) + (173*\exp(-w*205i))/4 + (153*\exp(-w*206i))/4 + 34*\exp(-w*207i) + (125*\exp(-w*208i))/4 + (125*\exp(-w*209i))/4 + (123*\exp(-w*210i))/4 + (255*\exp(-w*211i))/8 + (67*\exp(-w*212i))/2 + 34*\exp(-w*213i) + 34*\exp(-w*214i) + 37*\exp(-w*215i) + (149*\exp(-w*216i))/4 + 39*\exp(-w*217i) + (85*\exp(-w*262i))/4 + (383*\exp(-w*263i))/20 + (397*\exp(-w*264i))/20 + (193*\exp(-w*265i))/10 + 25*\exp(-w*266i) + (257*\exp(-w*267i))/10 + (257*\exp(-w*268i))/10 + (257*\exp(-w*269i))/10 + (219*\exp(-w*270i))/20 + (147*\exp(-w*271i))/10 + (71*\exp(-w*272i))/5 + (307*\exp(-w*273i))/20 + (143*\exp(-w*274i))/10 + (277*\exp(-w*275i))/20 + (69*\exp(-w*276i))/5 + (267*\exp(-w*277i))/20 + (267*\exp(-w*278i))/20 + (137*\exp(-w*279i))/10 + (69*\exp(-w*280i))/5 + (147*\exp(-w*281i))/10 + (291*\exp(-w*282i))/20 + (297*\exp(-w*283i))/20 + (309*\exp(-w*284i))/20 + (83*\exp(-w*285i))/5 + (84*\exp(-w*286i))/5 + (88*\exp(-w*287i))/5 + (82*\exp(-w*288i))/5 + (63*\exp(-w*289i))/4 + 15*\exp(-w*290i) + (291*\exp(-w*291i))/20 + (78*\exp(-w*292i))/5 + (33*\exp(-w*293i))/2 + (31*\exp(-w*294i))/2 + (77*\exp(-w*295i))/5 + (289*\exp(-w*296i))/20 + (289*\exp(-w*297i))/20 + (279*\exp(-w*298i))/20 + (149*\exp(-w*299i))/10 + (277*\exp(-w*300i))/20 + (271*\exp(-w*301i))/20 + (29*\exp(-w*302i))/2 + (57*\exp(-w*303i))/4 + (297*\exp(-w*304i))/20 + 14*\exp(-w*305i) + (55*\exp(-w*306i))/4 + (287*\exp(-w*307i))/20 + (283*\exp(-w*308i))/20 + (57*\exp(-w*309i))/4 + (281*\exp(-w*310i))/20 + (147*\exp(-w*311i))/10 + (77*\exp(-w*312i))/5 + (311*\exp(-w*313i))/20 + (161*\exp(-w*314i))/10 + (82*\exp(-w*315i))/5 + (161*\exp(-w*316i))/10 + (78*\exp(-w*317i))/5 + (321*\exp(-w*318i))/20 + (69*\exp(-w*319i))/5 + (143*\exp(-w*320i))/10 + 14*\exp(-w*321i) + (117*\exp(-w*322i))/10 + (23*\exp(-w*323i))/2 + (221*\exp(-w*324i))/20 + (213*\exp(-w*325i))/20 + (221*\exp(-w*326i))/20 + (217*\exp(-w*327i))/20 + (221*\exp(-w*328i))/20 + (21*\exp(-w*329i))/2 + (109*\exp(-w*330i))/10 + (65*\exp(-w*416i))/4 + (319*\exp(-w*417i))/20 + (307*\exp(-w*418i))/20 + (311*\exp(-w*419i))/20 + (31*\exp(-w*420i))/2 + (79*\exp(-w*421i))/5 + (319*\exp(-w*422i))/20 + 17*\exp(-w*423i) + (161*\exp(-w*424i))/10 + (319*\exp(-w*425i))/20 + (167*\exp(-w*426i))/10 + (343*\exp(-w*427i))/20 + (167*\exp(-w*428i))/10 + (82*\exp(-w*429i))/5 + (327*\exp(-w*430i))/20 + (327*\exp(-w*431i))/20 + (351*\exp(-w*432i))/20 + 17*\exp(-w*433i) + 17*\exp(-w*434i) + (329*\exp(-w*435i))/20 + (331*\exp(-w*436i))/20 + (173*\exp(-w*437i))/10 + (75*\exp(-w*438i))/4 + (359*\exp(-w*439i))/20 + (88*\exp(-w*440i))/5 + (169*\exp(-w*441i))/10 + (353*\exp(-w*442i))/20 + (169*\exp(-w*443i))/10 + (81*\exp(-w*444i))/5 + 15*\exp(-w*445i) + (73*\exp(-w*446i))/5 + (69*\exp(-w*447i))/5 + (68*\exp(-w*448i))/5 + (257*\exp(-w*449i))/20 + (133*\exp(-w*450i))/10 + (269*\exp(-w*451i))/20 + (62*\exp(-w*452i))/5 + 12*\exp(-w*453i) + (62*\exp(-w*454i))/5 + (68*\exp(-w*455i))/5 + (287*\exp(-w*456i))/20 + (131*\exp(-w*457i))/10 + (127*\exp(-w*458i))/10 + (123*\exp(-w*459i))/10 + (23*\exp(-w*460i))/2 + (61*\exp(-w*461i))/5 + (121*\exp(-w*462i))/10 + (277*\exp(-w*463i))/20 + (137*\exp(-w*464i))/10 + (281*\exp(-w*465i))/20 + (293*\exp(-w*466i))/20 + (153*\exp(-w*467i))/10 + (313*\exp(-w*468i))/20 + (79*\exp(-w*469i))/5 + (317*\exp(-w*470i))/20 + (31*\exp(-w*471i))/2 + (281*\exp(-w*472i))/20 + (283*\exp(-$

$w*473i)/20 + (25*\exp(-w*474i))/2 + 11*\exp(-w*475i) + (51*\exp(-w*476i))/5 + (49*\exp(-w*477i))/5 + (191*\exp(-w*478i))/20 +$
 $(201*\exp(-w*479i))/20 + (19*\exp(-w*480i))/2 + (99*\exp(-w*481i))/10 + (99*\exp(-w*482i))/10 + 11*\exp(-w*483i) + (157*\exp(-$
 $w*550i))/10 + (319*\exp(-w*551i))/20 + (74*\exp(-w*552i))/5 + (287*\exp(-w*553i))/20 + (303*\exp(-w*554i))/20 + (297*\exp(-$
 $w*555i))/20 + (297*\exp(-w*556i))/20 + (291*\exp(-w*557i))/20 + (291*\exp(-w*558i))/20 + (289*\exp(-w*559i))/20 + (147*\exp(-$
 $w*560i))/10 + (289*\exp(-w*561i))/20 + (151*\exp(-w*562i))/10 + (323*\exp(-w*563i))/20 + (161*\exp(-w*564i))/10 + (311*\exp(-$
 $w*565i))/20 + (77*\exp(-w*566i))/5 + (311*\exp(-w*567i))/20 + (31*\exp(-w*568i))/2 + (63*\exp(-w*569i))/4 + (311*\exp(-w*570i))/20$
 $+ (83*\exp(-w*571i))/5 + (87*\exp(-w*572i))/5 + (87*\exp(-w*573i))/5 + (331*\exp(-w*574i))/20 + (161*\exp(-w*575i))/10 + (81*\exp(-$
 $w*576i))/5 + (74*\exp(-w*577i))/5 + (297*\exp(-w*578i))/20 + (73*\exp(-w*579i))/5 + (149*\exp(-w*580i))/10 + (72*\exp(-w*581i))/5 +$
 $(69*\exp(-w*582i))/5 + (67*\exp(-w*583i))/5 + 13*\exp(-w*584i) + (62*\exp(-w*585i))/5 + (62*\exp(-w*586i))/5 + (61*\exp(-w*587i))/5$
 $+ (61*\exp(-w*588i))/5 + (239*\exp(-w*589i))/20 + 12*\exp(-w*590i) + 12*\exp(-w*591i) + (61*\exp(-w*592i))/5 + (61*\exp(-w*593i))/5$
 $+ 12*\exp(-w*594i) + 12*\exp(-w*595i) + (117*\exp(-w*596i))/10 + (59*\exp(-w*597i))/5 + (61*\exp(-w*598i))/5 + (63*\exp(-w*599i))/5$
 $+ (131*\exp(-w*600i))/10 + (133*\exp(-w*601i))/10 + (263*\exp(-w*602i))/20 + (62*\exp(-w*603i))/5 + (119*\exp(-w*604i))/10 +$
 $(233*\exp(-w*605i))/20 + (117*\exp(-w*606i))/10 + (233*\exp(-w*607i))/20 + (58*\exp(-w*608i))/5 + (229*\exp(-w*609i))/20 +$
 $(229*\exp(-w*610i))/20 + (229*\exp(-w*611i))/20 + (229*\exp(-w*612i))/20 + (231*\exp(-w*613i))/20 + (59*\exp(-w*614i))/5 +$
 $(239*\exp(-w*615i))/20 + (231*\exp(-w*616i))/20 + (231*\exp(-w*617i))/20 + (227*\exp(-w*618i))/20 + (229*\exp(-w*619i))/20 +$
 $(113*\exp(-w*620i))/10 + (59*\exp(-w*621i))/5 + (25*\exp(-w*622i))/2 + (17*\exp(-w*705i))/2 + (17*\exp(-w*706i))/2 + (257*\exp(-$
 $w*707i))/4 + (85*\exp(-w*708i))/4 + (83*\exp(-w*709i))/4 + (173*\exp(-w*710i))/8 + (93*\exp(-w*711i))/4 + (177*\exp(-w*712i))/8 +$
 $(187*\exp(-w*713i))/8 + 23*\exp(-w*714i) + 23*\exp(-w*715i) + (89*\exp(-w*716i))/4 + 23*\exp(-w*717i) + (89*\exp(-w*718i))/4 +$
 $(257*\exp(-w*719i))/4 + (93*\exp(-w*720i))/4 + (145*\exp(-w*721i))/4 + (71*\exp(-w*722i))/2 + (73*\exp(-w*723i))/2 + (131*\exp(-$
 $w*724i))/4 + (127*\exp(-w*725i))/4 + (119*\exp(-w*726i))/4 + (237*\exp(-w*727i))/8 + (117*\exp(-w*728i))/4 + (217*\exp(-w*729i))/8$
 $+ (111*\exp(-w*730i))/4 + 25*\exp(-w*731i) + (95*\exp(-w*732i))/4 + (97*\exp(-w*733i))/4 + 21*\exp(-w*734i) + 18*\exp(-w*735i) +$
 $17*\exp(-w*736i) + (61*\exp(-w*737i))/4 + (123*\exp(-w*738i))/8 + 13*\exp(-w*739i) + 13*\exp(-w*740i) + 13*\exp(-w*741i) +$
 $(23*\exp(-w*742i))/2 + (89*\exp(-w*743i))/8 + (91*\exp(-w*744i))/8 + (25*\exp(-w*745i))/2 + 14*\exp(-w*746i) + (33*\exp(-w*747i))/2$
 $+ 18*\exp(-w*748i) + 20*\exp(-w*749i) + (165*\exp(-w*750i))/8 + 20*\exp(-w*751i) + (71*\exp(-w*752i))/4 + (27*\exp(-w*753i))/2 +$
 $13*\exp(-w*754i) + (41*\exp(-w*755i))/4 + (37*\exp(-w*756i))/4 + (69*\exp(-w*757i))/8 + (33*\exp(-w*758i))/4 + (69*\exp(-w*759i))/8$
 $+ (33*\exp(-w*760i))/4 + (75*\exp(-w*761i))/8 + (37*\exp(-w*762i))/4 + 10*\exp(-w*763i) + (45*\exp(-w*764i))/4 + (49*\exp(-$
 $w*765i))/4 + (55*\exp(-w*766i))/4 + (115*\exp(-w*767i))/8 + 13*\exp(-w*768i) + (55*\exp(-w*769i))/4 + (55*\exp(-w*770i))/4 +$
 $(121*\exp(-w*771i))/8 + (121*\exp(-w*772i))/8 + (33*\exp(-w*773i))/2 + (95*\exp(-w*827i))/2 + (365*\exp(-w*828i))/8 + (181*\exp(-$
 $w*829i))/4 + (351*\exp(-w*830i))/8 + (349*\exp(-w*831i))/8 + (351*\exp(-w*832i))/8 + (181*\exp(-w*833i))/4 + 45*\exp(-w*834i) +$
 $(181*\exp(-w*835i))/4 + (363*\exp(-w*836i))/8 + (353*\exp(-w*837i))/8 + (353*\exp(-w*838i))/8 + (353*\exp(-w*839i))/8 + (359*\exp(-$
 $w*840i))/8 + (355*\exp(-w*841i))/8 + (89*\exp(-w*842i))/2 + (89*\exp(-w*843i))/2 + 44*\exp(-w*844i) + (347*\exp(-w*845i))/8 +$
 $(347*\exp(-w*846i))/8 + 42*\exp(-w*847i) + (163*\exp(-w*848i))/4 + (79*\exp(-w*849i))/2 + (75*\exp(-w*850i))/2 + (145*\exp(-$
 $w*851i))/4 + (137*\exp(-w*852i))/4 + (67*\exp(-w*853i))/2 + (123*\exp(-w*854i))/4 + 30*\exp(-w*855i) + (57*\exp(-w*856i))/2 +$
 $(109*\exp(-w*857i))/4 + (203*\exp(-w*858i))/8 + (203*\exp(-w*859i))/8 + (47*\exp(-w*860i))/2 + (93*\exp(-w*861i))/4 + (175*\exp(-$
 $w*862i))/8 + 22*\exp(-w*863i) + (173*\exp(-w*864i))/8 + (169*\exp(-w*865i))/8 + (169*\exp(-w*866i))/8 + (167*\exp(-w*867i))/8 +$
 $(99*\exp(-w*868i))/4 + 27*\exp(-w*869i) + (59*\exp(-w*870i))/2 + (61*\exp(-w*871i))/2 + (59*\exp(-w*872i))/2 + 28*\exp(-w*873i) +$
 $25*\exp(-w*874i) + (91*\exp(-w*875i))/4 + (163*\exp(-w*876i))/8 + (163*\exp(-w*877i))/8 + (77*\exp(-w*878i))/4 + (147*\exp(-$
 $w*879i))/8 + (147*\exp(-w*880i))/8 + (147*\exp(-w*881i))/8 + (147*\exp(-w*882i))/8 + (147*\exp(-w*883i))/8 + (73*\exp(-w*884i))/4 +$
 $(75*\exp(-w*885i))/4 + (153*\exp(-w*886i))/8 + 19*\exp(-w*887i) + (41*\exp(-w*888i))/2 + (175*\exp(-w*889i))/8 + 22*\exp(-w*890i) +$
 $(99*\exp(-w*891i))/4 + (199*\exp(-w*892i))/8 + (199*\exp(-w*893i))/8 + (111*\exp(-w*894i))/4 + (113*\exp(-w*895i))/4 + (185*\exp(-$
 $w*938i))/4 + 49*\exp(-w*939i) + (189*\exp(-w*940i))/4 + (369*\exp(-w*941i))/8 + (371*\exp(-w*942i))/8 + (185*\exp(-w*943i))/4 +$
 $(373*\exp(-w*944i))/8 + (183*\exp(-w*945i))/4 + 46*\exp(-w*946i) + 46*\exp(-w*947i) + (185*\exp(-w*948i))/4 + (185*\exp(-w*949i))/4$
 $+ (369*\exp(-w*950i))/8 + (95*\exp(-w*951i))/2 + 48*\exp(-w*952i) + (377*\exp(-w*953i))/8 + (375*\exp(-w*954i))/8 + (375*\exp(-$
 $w*955i))/8 + (187*\exp(-w*956i))/4 + (365*\exp(-w*957i))/8 + (175*\exp(-w*958i))/4 + (85*\exp(-w*959i))/2 + (83*\exp(-w*960i))/2 +$
 $(79*\exp(-w*961i))/2 + (75*\exp(-w*962i))/2 + (145*\exp(-w*963i))/4 + 34*\exp(-w*964i) + (131*\exp(-w*965i))/4 + (121*\exp(-$
 $w*966i))/4 + 29*\exp(-w*967i) + (111*\exp(-w*968i))/4 + (53*\exp(-w*969i))/2 + 25*\exp(-w*970i) + (193*\exp(-w*971i))/8 + (91*\exp(-$
 $w*972i))/4 + (91*\exp(-w*973i))/4 + (45*\exp(-w*974i))/2 + (85*\exp(-w*975i))/4 + (87*\exp(-w*976i))/4 + (87*\exp(-w*977i))/4 +$
 $(47*\exp(-w*978i))/2 + (97*\exp(-w*979i))/4 + (55*\exp(-w*980i))/2 + (119*\exp(-w*981i))/4 + (123*\exp(-w*982i))/4 + (119*\exp(-$
 $w*983i))/4 + (51*\exp(-w*984i))/2 + (99*\exp(-w*985i))/4 + 22*\exp(-w*986i) + (177*\exp(-w*987i))/8 + (41*\exp(-w*988i))/2 +$
 $(39*\exp(-w*989i))/2 + 20*\exp(-w*990i) + (161*\exp(-w*991i))/8 + (161*\exp(-w*992i))/8 + 20*\exp(-w*993i) + 20*\exp(-w*994i) +$
 $(75*\exp(-w*995i))/4 + 20*\exp(-w*996i) + (165*\exp(-w*997i))/8 + (165*\exp(-w*998i))/8 + (85*\exp(-w*999i))/4 + (45*\exp(-$
 $w*1000i))/2 + (185*\exp(-w*1001i))/8 + 24*\exp(-w*1002i) + 25*\exp(-w*1003i) + (55*\exp(-w*1004i))/2 + (113*\exp(-w*1005i))/4 +$
 $(117*\exp(-w*1006i))/4$

$$\begin{aligned}
& Xw=129*\exp(-w*1i) + (257*\exp(-w*2i))/2 + (3*\exp(-w*3i))/2 + (163*\exp(-w*4i))/2 + (133*\exp(-w*5i))/2 + 70*\exp(-w*6i) + \\
& (109*\exp(-w*7i))/2 + (101*\exp(-w*8i))/2 + 65*\exp(-w*9i) + (257*\exp(-w*10i))/2 + 65*\exp(-w*11i) + (43*\exp(-w*12i))/4 + 11*\exp(- \\
& w*13i) + 11*\exp(-w*14i) + 20*\exp(-w*15i) + 25*\exp(-w*16i) + 29*\exp(-w*22i) + (45*\exp(-w*23i))/2 + 19*\exp(-w*24i) + 15*\exp(- \\
& w*25i) + 12*\exp(-w*26i) + (19*\exp(-w*27i))/2 + 12*\exp(-w*28i) + 54*\exp(-w*29i) + 20*\exp(-w*30i) + (25*\exp(-w*31i))/2 + \\
& (47*\exp(-w*32i))/4 + 13*\exp(-w*33i) + (45*\exp(-w*34i))/2 + 33*\exp(-w*35i) + 226*\exp(-w*41i) + 145*\exp(-w*42i) + 136*\exp(- \\
& w*43i) + 120*\exp(-w*44i) + 100*\exp(-w*45i) + 91*\exp(-w*46i) + 100*\exp(-w*47i) + 257*\exp(-w*48i) + 145*\exp(-w*49i) + \\
& 67*\exp(-w*50i) + 59*\exp(-w*51i) + 67*\exp(-w*52i) + 85*\exp(-w*53i) + 160*\exp(-w*54i) + 150*\exp(-w*61i) + 131*\exp(-w*62i) + \\
& 122*\exp(-w*63i) + 105*\exp(-w*64i) + 80*\exp(-w*65i) + 59*\exp(-w*66i) + 80*\exp(-w*67i) + (487*\exp(-w*68i))/2 + 160*\exp(- \\
& w*69i) + 75*\exp(-w*70i) + 59*\exp(-w*71i) + 75*\exp(-w*72i) + 95*\exp(-w*73i) + 170*\exp(-w*74i) + 161*\exp(-w*81i) + 145*\exp(- \\
& w*82i) + 133*\exp(-w*83i) + 115*\exp(-w*84i) + 90*\exp(-w*85i) + 75*\exp(-w*86i) + 66*\exp(-w*87i) + 257*\exp(-w*88i) + 160*\exp(- \\
& w*89i) + 75*\exp(-w*90i) + 61*\exp(-w*91i) + 75*\exp(-w*92i) + 105*\exp(-w*93i) + 177*\exp(-w*94i) + 140*\exp(-w*100i) + \\
& 130*\exp(-w*101i) + 116*\exp(-w*102i) + 108*\exp(-w*103i) + 75*\exp(-w*104i) + 54*\exp(-w*105i) + 36*\exp(-w*106i) + 54*\exp(- \\
& w*107i) + 235*\exp(-w*108i) + 145*\exp(-w*109i) + 42*\exp(-w*110i) + 31*\exp(-w*111i) + 42*\exp(-w*112i) + 70*\exp(-w*113i) + \\
& 152*\exp(-w*114i) + 148*\exp(-w*121i) + 124*\exp(-w*122i) + 105*\exp(-w*123i) + 90*\exp(-w*124i) + 50*\exp(-w*125i) + 37*\exp(- \\
& w*126i) + 50*\exp(-w*127i) + 230*\exp(-w*128i) + 70*\exp(-w*129i) + 41*\exp(-w*130i) + 33*\exp(-w*131i) + 41*\exp(-w*132i) + \\
& 90*\exp(-w*133i) + (311*\exp(-w*134i))/2 + 154*\exp(-w*141i) + 135*\exp(-w*142i) + 110*\exp(-w*143i) + 82*\exp(-w*144i) + \\
& 55*\exp(-w*145i) + (81*\exp(-w*146i))/2 + 55*\exp(-w*147i) + 234*\exp(-w*148i) + 70*\exp(-w*149i) + 42*\exp(-w*150i) + 34*\exp(- \\
& w*151i) + 42*\exp(-w*152i) + 90*\exp(-w*153i) + (323*\exp(-w*154i))/2 + (323*\exp(-w*161i))/2 + 135*\exp(-w*162i) + 123*\exp(- \\
& w*163i) + 85*\exp(-w*164i) + 65*\exp(-w*165i) + (93*\exp(-w*166i))/2 + 65*\exp(-w*167i) + 245*\exp(-w*168i) + 100*\exp(-w*169i) + \\
& 45*\exp(-w*170i) + (67*\exp(-w*171i))/2 + 45*\exp(-w*172i) + 80*\exp(-w*173i) + (329*\exp(-w*174i))/2 + 170*\exp(-w*180i) + \\
& 157*\exp(-w*181i) + 141*\exp(-w*182i) + 120*\exp(-w*183i) + 85*\exp(-w*184i) + 61*\exp(-w*185i) + 44*\exp(-w*186i) + 61*\exp(- \\
& w*187i) + 236*\exp(-w*188i) + 80*\exp(-w*189i) + 41*\exp(-w*190i) + 34*\exp(-w*191i) + 41*\exp(-w*192i) + 95*\exp(-w*193i) + \\
& (331*\exp(-w*194i))/2 + 178*\exp(-w*200i) + 160*\exp(-w*201i) + 142*\exp(-w*202i) + 110*\exp(-w*203i) + 85*\exp(-w*204i) + \\
& 56*\exp(-w*205i) + (93*\exp(-w*206i))/2 + 56*\exp(-w*207i) + 241*\exp(-w*208i) + 70*\exp(-w*209i) + 42*\exp(-w*210i) + (69*\exp(- \\
& w*211i))/2 + 42*\exp(-w*212i) + 95*\exp(-w*213i) + 167*\exp(-w*214i) + 180*\exp(-w*220i) + 164*\exp(-w*221i) + 148*\exp(-w*222i) \\
& + 115*\exp(-w*223i) + 95*\exp(-w*224i) + 67*\exp(-w*225i) + 48*\exp(-w*226i) + 67*\exp(-w*227i) + (491*\exp(-w*228i))/2 + 70*\exp(- \\
& w*229i) + 36*\exp(-w*230i) + 41*\exp(-w*231i) + 70*\exp(-w*232i) + 172*\exp(-w*233i) + (375*\exp(-w*241i))/2 + 166*\exp(-w*242i) \\
& + 140*\exp(-w*243i) + 115*\exp(-w*244i) + 70*\exp(-w*245i) + (103*\exp(-w*246i))/2 + 70*\exp(-w*247i) + 257*\exp(-w*248i) + \\
& 100*\exp(-w*249i) + 49*\exp(-w*250i) + 39*\exp(-w*251i) + 49*\exp(-w*252i) + 95*\exp(-w*253i) + 176*\exp(-w*254i) + (387*\exp(- \\
& w*260i))/2 + 181*\exp(-w*261i) + 160*\exp(-w*262i) + 135*\exp(-w*263i) + 101*\exp(-w*264i) + 70*\exp(-w*265i) + 54*\exp(-w*266i) \\
& + 70*\exp(-w*267i) + 257*\exp(-w*268i) + 100*\exp(-w*269i) + 50*\exp(-w*270i) + 40*\exp(-w*271i) + 50*\exp(-w*272i) + 100*\exp(- \\
& w*273i) + 179*\exp(-w*274i) + (399*\exp(-w*280i))/2 + 184*\exp(-w*281i) + 160*\exp(-w*282i) + 133*\exp(-w*283i) + 95*\exp(- \\
& w*284i) + 75*\exp(-w*285i) + 55*\exp(-w*286i) + 75*\exp(-w*287i) + (511*\exp(-w*288i))/2 + 70*\exp(-w*289i) + (77*\exp(-w*290i))/2 \\
& + 41*\exp(-w*291i) + 70*\exp(-w*292i) + 110*\exp(-w*293i) + 177*\exp(-w*294i) + 220*\exp(-w*416i) + 196*\exp(-w*417i) + \\
& 183*\exp(-w*418i) + 175*\exp(-w*419i) + 169*\exp(-w*420i) + 163*\exp(-w*421i) + 159*\exp(-w*422i) + 155*\exp(-w*423i) + \\
& 151*\exp(-w*424i) + 138*\exp(-w*425i) + 132*\exp(-w*426i) + 137*\exp(-w*427i) + 135*\exp(-w*428i) + 123*\exp(-w*429i) + \\
& 125*\exp(-w*430i) + 103*\exp(-w*431i) + (223*\exp(-w*432i))/2 + 108*\exp(-w*433i) + (191*\exp(-w*434i))/2 + (193*\exp(-w*435i))/2 \\
& + 78*\exp(-w*436i) + 78*\exp(-w*437i) + 65*\exp(-w*438i) + 61*\exp(-w*439i) + 62*\exp(-w*440i) + 45*\exp(-w*441i) + 40*\exp(- \\
& w*442i) + (89*\exp(-w*443i))/2 + 37*\exp(-w*444i) + 28*\exp(-w*445i) + (63*\exp(-w*446i))/2 + (65*\exp(-w*447i))/2 + 38*\exp(- \\
& w*448i) + 44*\exp(-w*449i) + 65*\exp(-w*450i) + 85*\exp(-w*451i) + 120*\exp(-w*452i) + 150*\exp(-w*453i) + 175*\exp(-w*454i) + \\
& (375*\exp(-w*455i))/2 + 175*\exp(-w*456i) + 125*\exp(-w*457i) + 90*\exp(-w*458i) + 55*\exp(-w*459i) + 45*\exp(-w*460i) + 32*\exp(- \\
& w*461i) + 27*\exp(-w*462i) + 23*\exp(-w*463i) + 53*\exp(-w*464i) + (113*\exp(-w*465i))/2 + (113*\exp(-w*466i))/2 + (113*\exp(- \\
& w*467i))/2 + (113*\exp(-w*468i))/2 + (113*\exp(-w*469i))/2 + 58*\exp(-w*470i) + 58*\exp(-w*471i) + (121*\exp(-w*472i))/2 + \\
& (121*\exp(-w*473i))/2 + 64*\exp(-w*474i) + 67*\exp(-w*475i) + 71*\exp(-w*476i) + 75*\exp(-w*477i) + 82*\exp(-w*478i) + 88*\exp(- \\
& w*479i) + 97*\exp(-w*480i) + 105*\exp(-w*481i) + 112*\exp(-w*482i) + 120*\exp(-w*483i) + 125*\exp(-w*484i) + 132*\exp(-w*485i) + \\
& 137*\exp(-w*486i) + 141*\exp(-w*487i) + (469*\exp(-w*547i))/2 + 230*\exp(-w*548i) + 222*\exp(-w*549i) + 217*\exp(-w*550i) + \\
& 211*\exp(-w*551i) + 208*\exp(-w*552i) + 206*\exp(-w*553i) + 189*\exp(-w*554i) + 185*\exp(-w*555i) + 189*\exp(-w*556i) + \\
& 189*\exp(-w*557i) + 191*\exp(-w*558i) + 180*\exp(-w*559i) + (357*\exp(-w*560i))/2 + (355*\exp(-w*561i))/2 + 175*\exp(-w*562i) + \\
& 170*\exp(-w*563i) + (341*\exp(-w*564i))/2 + 171*\exp(-w*565i) + (325*\exp(-w*566i))/2 + 163*\exp(-w*567i) + 163*\exp(-w*568i) + \\
& (325*\exp(-w*569i))/2 + 160*\exp(-w*570i) + 160*\exp(-w*571i) + 159*\exp(-w*572i) + 149*\exp(-w*573i) + 147*\exp(-w*574i) + \\
& 143*\exp(-w*575i) + (287*\exp(-w*576i))/2 + 144*\exp(-w*577i) + (283*\exp(-w*578i))/2 + (275*\exp(-w*579i))/2 + 133*\exp(-w*580i)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 130*\exp(-w*581i) + (253*\exp(-w*582i))/2 + 124*\exp(-w*583i) + 120*\exp(-w*584i) + 117*\exp(-w*585i) + 114*\exp(-w*586i) + \\
& 110*\exp(-w*587i) + 91*\exp(-w*588i) + 88*\exp(-w*589i) + 84*\exp(-w*590i) + (175*\exp(-w*591i))/2 + (179*\exp(-w*592i))/2 + \\
& 89*\exp(-w*593i) + 85*\exp(-w*594i) + 83*\exp(-w*595i) + (163*\exp(-w*596i))/2 + (159*\exp(-w*597i))/2 + 77*\exp(-w*598i) + \\
& 75*\exp(-w*599i) + 73*\exp(-w*600i) + 71*\exp(-w*601i) + 68*\exp(-w*602i) + 66*\exp(-w*603i) + 65*\exp(-w*604i) + 64*\exp(- \\
& w*605i) + 63*\exp(-w*606i) + 62*\exp(-w*607i) + 62*\exp(-w*608i) + 62*\exp(-w*609i) + (127*\exp(-w*610i))/2 + (133*\exp(- \\
& w*611i))/2 + 71*\exp(-w*612i) + 81*\exp(-w*613i) + 87*\exp(-w*614i) + 95*\exp(-w*615i) + 110*\exp(-w*616i) + 120*\exp(-w*617i) + \\
& 144*\exp(-w*618i) + 155*\exp(-w*619i) + 175*\exp(-w*620i) + 188*\exp(-w*621i) + 200*\exp(-w*622i) + (407*\exp(-w*623i))/2 + \\
& 200*\exp(-w*624i) + 185*\exp(-w*625i) + 170*\exp(-w*626i) + 145*\exp(-w*627i) + 125*\exp(-w*628i) + 107*\exp(-w*629i) + 90*\exp(- \\
& w*630i) + 80*\exp(-w*631i) + 67*\exp(-w*632i) + 59*\exp(-w*633i) + 54*\exp(-w*634i) + 48*\exp(-w*635i) + 42*\exp(-w*636i) + \\
& 40*\exp(-w*637i) + 38*\exp(-w*638i) + 37*\exp(-w*639i) + 33*\exp(-w*640i) + 35*\exp(-w*641i) + 35*\exp(-w*642i) + 39*\exp(- \\
& w*643i) + 40*\exp(-w*644i) + (79*\exp(-w*645i))/2 + 39*\exp(-w*646i) + (79*\exp(-w*647i))/2 + (79*\exp(-w*648i))/2 + (77*\exp(- \\
& w*649i))/2 + (77*\exp(-w*650i))/2 + 39*\exp(-w*651i) + (79*\exp(-w*652i))/2 + 39*\exp(-w*653i) + 40*\exp(-w*654i) + 40*\exp(- \\
& w*655i) + 41*\exp(-w*656i) + 41*\exp(-w*657i) + (85*\exp(-w*658i))/2 + (85*\exp(-w*659i))/2 + (87*\exp(-w*660i))/2 + (91*\exp(- \\
& w*661i))/2 + 47*\exp(-w*662i) + 49*\exp(-w*663i) + (101*\exp(-w*664i))/2 + (105*\exp(-w*665i))/2 + 53*\exp(-w*666i) + (113*\exp(- \\
& w*667i))/2 + (117*\exp(-w*668i))/2 + 62*\exp(-w*669i) + 64*\exp(-w*670i) + (127*\exp(-w*671i))/2 + (127*\exp(-w*672i))/2 + \\
& 59*\exp(-w*673i) + 62*\exp(-w*674i) + 75*\exp(-w*675i) + 84*\exp(-w*676i) + 81*\exp(-w*677i) + 84*\exp(-w*678i) + 90*\exp(- \\
& w*679i) + 93*\exp(-w*680i) + 96*\exp(-w*681i) + 98*\exp(-w*682i) + 95*\exp(-w*683i) + (197*\exp(-w*684i))/2 + 101*\exp(-w*685i) + \\
& (205*\exp(-w*686i))/2 + 103*\exp(-w*687i) + 104*\exp(-w*688i)
\end{aligned}$$

Η Ρουτίνα Μετασχηματισμού με Βρόγχο (Μετασχηματισμός Fourier χαμηλής υπολογιστικής απαίτησης)

```

clc;
clear all;
load 'measures.mat';

dtft_abs=zeros(90,2000);
dtft_angle=zeros(90,2000);
dft_abs=zeros(90,11100);
dft_angle=zeros(90,11100);

%%
% for d=1:5
%     % string1=strcat('MEXV00',int2str(d));
%     [Xw1,Xk1]=procl(MEXV005,'MEXV005');
%     l=length(Xw1);
%     l1=length(Xk1);
%     dtft_abs(d,1:l)=abs(Xw1);
%     dtft_angle(d,1:l)=angle(Xw1);
%     dft_abs(d,1:l1)=abs(Xk1);
%     dft_angle(d,1:l1)=angle(Xk1);
% end

%%
clc;
disp('Parallel Processing of Initial Routine')
parfor d=1:5
    % string1=strcat('MEXV00',int2str(d));
    [Xw1,Xk1]=procl(MEXV005,'MEXV005');
    l=length(Xw1);
    l1=length(Xk1);

```

```

    % dtft_abs(d,1:1)=abs(Xw1);
    % dtft_angle(d,1:1)=angle(Xw1);
    % dft_abs(d,1:11)=abs(Xk1);
    % dft_angle(d,1:11)=angle(Xk1);
end

%%
clc;
disp('Normal Processing of DFT Routine')
Xw1=MEXV005;
tic
for d=1:10000
    B1 = dft(Xw1);
end
t1=toc;

%%
clc;
disp('Parallel Processing of DFT Routine')
tic
parfor d=1:10000
    B1=dft(Xw1);
end
t1_1=toc;

%%

clc;
disp('GPU Processing of DFT Routine')
tic
for d=1:10000
    X1=gpuArray(Xw1);
    B1=dft(X1);
end
t2_1=toc;

```