

ΓΡΑΜΜΑΤΗ ΠΑΝΤΖΙΟΥ - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΤΟΜΑΡΑΣ

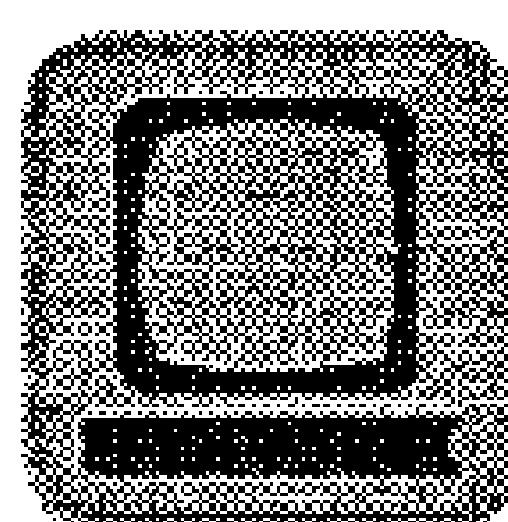
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Κάθε γνήσιο αντίγραφο έχει την υπογραφή των συγγραφέων.

Έκδοση 1η, Copyright 2003
ISBN:960-8105-48-X



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
Στουρνάρη 49Α, 106 82 Αθήνα
Τηλ.: 210.3845594 - Fax: 210.3808009
<http://www.newtech-publications.gr>
[email:contact@newtech-publications.gr](mailto:contact@newtech-publications.gr)

Ηλεκτρονική σελιδοποίηση - Σχεδίαση εξωφύλλου
Σκούφος Γιώργος

Απαγορεύεται η με οποιονδήποτε τρόπο ανατύπωση, καταχώρηση σε σύστημα αποθήκευσης και επανάκτησης ή μετάδοση με κάθε μορφή και μέσο (ηλεκτρονικό, μηχανικό, φωτοαντιγραφικό κ.τ.λ.) του συνόλου ή μέρους του βιβλίου αυτού, χωρίς την έγγραφη άδεια του εκδότη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	11
1. Εισαγωγή	15
1.1 Οι Μεγάλες Σύγχρονες Επιστημονικές Προκλήσεις	15
1.2 Εξέλιξη της Παράλληλης Επεξεργασίας Δεδομένων	16
1.3 Οι Έννοιες της Σωλήνωσης, του Παραλληλισμού Δεδομένων και του Παραλληλισμού Ελέγχου	19
1.4 Το Κόσκινο του Ερατοσθένη	24
1.5 Ο Νόμος του Amdahl	34
1.6 Κατηγοριοποίηση Ψηφιακών Υπολογιστικών Συστημάτων	37
1.6.1 Γενικότητες	37
1.6.2 Το Πρότυπο SISD	38
1.6.3 Το Πρότυπο SIMD	39
1.6.4 Το Πρότυπο MISD	42
1.6.5 Το Πρότυπο MIMD	42

2. Στοιχεία Αρχιτεκτονικής Παράλληλων Υπολογιστών	47
2.1 Δίκτυα Διασύνδεσης	48
2.1.1 Δίκτυα Μοναδικού Σταδίου (single stage networks)	52
2.1.2 Δίκτυα Πολλαπλού Σταδίου (multiple stage networks)	58
2.1.3 Αξιολόγηση Δικτύων Διασύνδεσης	71
2.2 Πολυεπεξεργαστές (Multiprocessors)	73
2.2.1 Πολυεπεξεργαστές Ομοιόμορφης Προσπέλασης Μνήμης (UMA)	73
2.2.2 Πολυεπεξεργαστές Μη Ομοιόμορφης Προσπέλασης Μνήμης (NUMA)	81
2.3 Πολυυπολογιστές (Multicomputers)	82
2.3.1 Επικοινωνία Επεξεργαστών	84
2.3.2 Μελέτη Εμπορικών Πολυυπολογιστών	87
3. Προτυποποίηση Παράλληλου Υπολογισμού	93
3.1 Θεμελιώδεις Έννοιες	95
3.2 Πρότυπα Παράλληλου Υπολογισμού	97
3.2.1 Πρότυπα Πολυεπεξεργαστών	97
3.2.1.1 PRAM	97
3.2.1.2 Το Πρότυπο Δικτύου	104
3.2.1.3 BSP	107
3.2.2 Τα Πρότυπα Έργου-Βάθους	110
3.2.2.1 Γλωσσικό Πρότυπο με Βάση τη NESL	111
3.3 Προσομοιώσεις μεταξύ των προτύπων	116
3.4 Το Έργο-Χρόνος Πλαίσιο Παρουσίασης Παράλληλων Αλγορίθμων	119

3.5 Η Έννοια του Βέλτιστου Παράλληλου Αλγορίθμου	125
4. Παράλληλοι Αλγόριθμοι	127
4.1 Βασικές Τεχνικές Σχεδιασμού Παράλληλων Αλγορίθμων	128
4.1.1 Ισοζυγισμένα Δένδρα	128
4.1.1.1 Υπολογισμός Προθεμάτων	128
4.1.2 Η Τεχνική του Διπλασιασμού Δεικτών	132
4.1.2.1 Εύρεση της Τάξης Στοιχείου Λίστας	133
4.1.3 Η Τεχνική της Διαδρομής του Euler	137
4.1.3.1 Υπολογισμός της Διαδρομής του Euler	137
4.1.3.2 Εφαρμογές της Τεχνικής της Διαδρομής του Euler ..	143
4.1.4 Η Τεχνική της Διαμέρισης	148
4.1.4.1 Συγχώνευση Ακολουθιών	149
4.2 Αλγόριθμοι Ταξινόμησης	153
4.3 Αλγόριθμοι Γράφων	157
4.3.1 Συνεκτικές Συνιστώσες	158
4.3.2 Τεχνικές Ανάπτυξης Αλγορίθμων σε Γράφους	159
4.4 Στοιχεία της Θεωρίας Παράλληλης Πολυπλοκότητας	163
4.4.1 Η Κλάση NC	163
4.4.2 P-Πλήρη Προβλήματα	165
5. Κατευθύνσεις Παράλληλου Προγραμματισμού	167
5.1 Εισαγωγή	167
5.1.1 Γλώσσες Λεπτομερών Εργασιών (explicit-tasking languages)	167
5.1.2 Άμεση Μεταγλώτιση Συμβατικών Γλωσσών	169

5.1.3 Η Εναλλαγή: Μέτριες Επεκτάσεις Γλώσσας	170
5.2 Διαμοιραζόμενη Εικονική Μνήμη (SVM: Shared Virtual Memory)	171
5.2.1 Γιατί η SVM Μπορεί να μην Εργασθεί	174
5.2.2 Γιατί η SVM Μπορεί να Εργασθεί	176
5.2.3 Χρονοδρομολόγηση Παράλληλων Βρόχων για SVM	178
5.2.4 Βελτιστοποιήσεις Μεταγλωττιστή για SVM	179
5.2.5 Βελτιστοποίηση Χρόνου Τρεξίματος για SVM	181
5.2.6 Μείξη Μηνυμάτων και SVM	183
5.3 Fortran-S: Ένα Περιβάλλον Πρωτοτύπου για SVM	184
5.3.1 Γεννήτρια Κώδικα Fortran-S	185
5.4 HPF (High Performance Fortran): Fortran Υψηλής Απόδοσης	186
5.4.1 Επισκόπηση της HPF	188
5.4.2 Οδηγίες Απεικόνισης Δεδομένων	190
5.4.3 Παράλληλες Κατασκευές Δεδομένων	195
5.4.4 Παραδείγματα HPF-Κωδίκων	198
5.5 Αντικειμενοστρεφής Παραλληλισμός με την pC++	200
5.5.1 Συναρτήσεις Συλλογής και Παραλληλισμός	204
5.5.2 Ένα Παράδειγμα: ο Αλγόριθμος Gram-Schmidt	205
5.6 Σύνοψη	208

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ MPI

Εισαγωγή213

1. MPI Προγράμματα215

1.1 MPI χειριστές215

1.2 Επιστροφή λαθών216

1.3 Συμβάσεις ονοματολογίας και Τύποι Δεδομένων του MPI217

1.4 Αρχικοποίηση του MPI219

1.5 Τερματισμός του MPI220

1.6 Η έννοια του Communicator221

1.6.1 Τάξη διεργασίας και η συνάρτηση MPI_Comm_rank222

1.6.2 Ομάδα διεργασίας222

1.7 Δομή ενός προγράμματος MPI σε C224

1.8 Η συνάρτηση MPI_Get_processor_name226

1.9 Αδιαφανή αντικείμενα226

1.10 Είδη MPI συναρτήσεων227

2. Επικοινωνία Κόμβου με Κόμβο229

2.1 Μηνύματα229

2.2 Επικοινωνία κόμβου με κόμβο230

2.3 Αναστέλλουσα επικοινωνία232

2.3.1 Η έννοια της ολοκλήρωσης των MPI_Send και MPI_Recv . . .234

2.3.2 Επιλογή ενός μηνύματος235

2.3.3 Σχόλια στο blocking receive236

2.4 Εκτέλεση ενός προγράμματος MPI240

3. Μη Αναστέλλουσα Επικοινωνία241

3.1 Κλήσεις μη αναστέλλουσας επικοινωνίας και αντικείμενο request242

3.2	Συναρτήσεις μη αναστέλλουσας επικοινωνίας	243
3.2.1	Συναρτήσεις έναρξης επικοινωνίας (posting send και receive)	243
3.2.2	Συναρτήσεις ολοκλήρωσης επικοινωνίας	245
3.3	Ακύρωση επικοινωνίας	247
3.4	Έλεγχος ολοκλήρωσης πολλών επικοινωνιών	249
3.5	Καταστάσεις επικοινωνίας	253
3.5.1	Standard send	255
3.5.2	Synchronous send	256
3.5.3	Buffered send	257
3.5.4	Ready send	259
4.	Συλλογική Επικοινωνία	261
4.1	Είδη συναρτήσεων συλλογικής επικοινωνίας	262
4.2	Σύγκριση point-to-point και συλλογικής επικοινωνίας	263
4.3	Συναρτήσεις συλλογικής επικοινωνίας	264
5.	Εικονικές Τοπολογίες	271
5.1	Βασικές συναρτήσεις διαχείρισης καρτεσιανών τοπολογιών	272
6.	MPI Συναρτήσεις και Σταθερές	275
6.1	Οι συναρτήσεις του MPI σε κατηγορίες	275
6.2	MPI σταθερές	283
	Βιβλιογραφία	287
	Ευρετήριο	293
	Λίγα Λόγια για τους Συγγραφείς	299

Πρόλογος

Οι μεγάλες προκλήσεις του αιώνα μας, όπως αποκαλούνται συνήθως τα σύγχρονα πολύπλοκα επιστημονικά προβλήματα, τα οποία αφορούν την ιατρική, την φαρμακολογία, την κβαντοχημεία, την αστροφυσική, την γενετική μηχανική, κ.ά., αντιμετωπίζονται σήμερα με αριθμητική προσομοίωση, η οποία απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ, την οποία οι ακολουθιακοί υπολογιστές δεν διαθέτουν. Αν, για παράδειγμα, σκεφθεί κανείς ότι ένα σύγχρονο υπολογιστικό πείραμα πρόβλεψης των δομικών, ταλαντωτικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων ενός νέου υλικού, απαιτεί 150 τρισεκατομμύρια πράξεις κινητής υποδιαστολής, θα συνειδητοποιήσει την αδήριτη ανάγκη σχεδιασμού και παραγωγής συστημάτων υπολογιστών, επιδεκτικών υπολογισμών τέτοιου μεγέθους. Τέτοια συστήματα υπάρχουν ήδη και είναι γνωστά ως παράλληλοι υπολογιστές.

Η Ευκλείδεια έννοια της παραλληλίας αποτελεί την βάση της θεωρητικής υποδομής, η οποία διέπει τους παράλληλους υπολογιστές, οι οποίοι είναι υπολογιστικές μηχανές με δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων. Το παρόν πόνημα πραγματεύεται τα συστατικά στοιχεία του παράλληλου υπολογισμού, και αποβλέπει στη μύηση του αναγνώστη στη σχετική με αυτά τα στοιχεία γνώση. Δεν θα ήταν άσκοπο να υπογραμμισθεί η ανάγκη καλής πληροφορικής παιδείας, ως προϋπόθεσης προς κατανόηση των παρατιθεμένων στο βιβλίο αυτό.

Η «Εισαγωγή» αναφέρεται κατ'αρχήν στις μεγάλες σύγχρονες επιστημονικές προκλήσεις και στη συνέχεια περιλαμβάνει την εξέλιξη της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων, τις έννοιες της σωλήνωσης, του παραλληλισμού δεδομένων και του παραλληλισμού ελέγχου, το Κόσκινο του Ερατοσθένη, το νόμο του Amdahl, και ολοκληρώνεται με την κατηγοριοποίηση των ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων, όπου πέραν των γενικότητων περιγράφονται τα πρότυπα SISD, SIMD, MISD και MIMD.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** επισκοπεί στοιχεία της αρχιτεκτονικής παράλληλων υπολογιστών. Τα πραγματευόμενα στοιχεία είναι τα δίκτυα διασύνδεσης, και ειδικότερα τα δίκτυα μοναδικού σταδίου, τα δίκτυα πολλαπλού σταδίου και η αξιολόγηση δικτύων διασύνδεσης, οι πολυεπεξεργαστές, και ειδικότερα οι πολυεπεξεργαστές ομοιόμορφης προσπέλασης μνήμης και οι πολυεπεξεργαστές μη ομοιόμορφης προσπέλασης μνήμης, και οι πολυυπολογιστές, με ειδικότερη αναφορά στην επικοινωνία επεξεργαστών και στη μελέτη εμπορικών πολυυπολογιστών.

Το **τρίτο κεφάλαιο** πραγματεύεται την προτυποποίηση παράλληλου υπολογισμού. Αρχίζει με θεμελιώδεις έννοιες και προχωρεί στα πρότυπα παράλληλου υπολογισμού, με παρουσίαση των προτύπων πολυεπεξεργαστών (PRAM, Πρότυπο Δικτύου, BSP) και των προτύπων έργου-βάθους, όπου ειδική αναφορά γίνεται στο γλωσσικό πρότυπο με βάση τη NESL. Στη συνέχεια αναφέρονται οι προσομοιώσεις μεταξύ των προτύπων, το «έργο-χρόνος» - πλαίσιο παρουσίασης παραλλήλων αλγορίθμων, και η έννοια του βέλτιστου παράλληλου αλγορίθμου.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρεται στους παράλληλους αλγόριθμους. Ξεκινά με την περιγραφή βασικών τεχνικών σχεδιασμού παράλληλων αλγορίθμων, όπου παρουσιάζονται τα ισοζυγισμένα δένδρα, με τον υπολογισμό προθεμάτων, η τεχνική του διπλασιασμού δεικτών, με την εύρεση της τάξης στοιχείου λίστας, η τεχνική της διαδρομής του Euler, με τον υπολογισμό της διαδρομής του Euler και εφαρμογές της τεχνικής της διαδρομής του Euler, και η τεχνική της διαμέρισης, με τη συγχώνευση ακολουθιών. Ακολουθούν αλγόριθμοι ταξινόμησης, αλγόριθμοι γράφων, με αναφορά στις συνεκτικές συνιστώσες και στις τεχνικές ανάπτυξης αλγορίθμων σε γράφους, και στοιχεία της θεωρίας παράλληλης πολυπλοκότητας, με αναφορά στην κλάση NC και στα P- πλήρη προβλήματα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** δίδονται οι κατευθύνσεις παράλληλου προγραμματισμού. Η εισαγωγή σ'αυτές περιλαμβάνει τις γλώσσες λεπτομερών εργασιών, την άμεση μεταγλώττιση συμβατικών γλωσσών, και την εναλλαγή (μέτριες επεκτάσεις της γλώσσας). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαμοι-

ραζόμενη εικονική μνήμη (SVM), με ειδικότερες αναφορές στο γιατί η SVM μπορεί να, ή να μην εργασθεί, στη χρονοδρομολόγηση παράλληλων βρόχων και SVM, στις βελτιστοποιήσεις μεταγλωττιστή και SVM, στη βελτιστοποίηση χρόνου εκτέλεσης για SVM, και στη μείξη μηνυμάτων και SVM. Ακολουθεί μια αναφορά στη Fortran – S, ως ένα περιβάλλον πρωτοτύπου για SVM, με ειδικότερη αναφορά στη γεννήτρια κώδικα Fortran – S. Έπεται η Fortran υψηλής απόδοσης (HPF), με επισκόπησή της, με οδηγίες απεικόνισης δεδομένων, με παράλληλες κατασκευές δεδομένων, και με παραδείγματα HPF-κωδίκων. Κατόπιν παρουσιάζεται ο αντικειμενοστρεφής παραλληλισμός με την pC++ , όπου μετά από συναρτήσεις συλλογής, σε σχέση με τον παραλληλισμό, δίδεται ένα παράδειγμα με τον αλγόριθμο Gram – Schmidt, και το κεφάλαιο κλείνει με μια σύνοψη.

Τέλος, στο Παράρτημα, με το οποίο ολοκληρώνεται το βιβλίο, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο MPI (Message Passing Interface) και παρατίθενται οι βασικές συναρτήσεις επικοινωνίας κόμβου με κόμβο και συλλογικής επικοινωνίας, ενώ παρουσιάζονται οι βασικές συναρτήσεις διαχείρισης εικονικών τοπολογιών. Στην απεικόνιση των συναρτήσεων του Παραρτήματος συνέβαλε και ο φοιτητής μας Μανώλης Κακατσάκης.

Η υπέρβαση από τον ακολουθιακό τρόπο σκέψης, σε έναν τρόπο σκέψης με όρους και συνθήκες παραλληλίας, μέσα σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον με βάση την παράλληλη μηχανή, είναι ένας μάλλον φιλόδοξος στόχος. Το υπόψη βιβλίο αποτελεί μια επιστημονική προσπάθεια προς αυτόν τον στόχο, πέραν των παρατιθεμένων σ' αυτό νεοτέρων γνωστικών αντικειμένων. Με την ελπίδα, ότι η Ελληνική τεχνολογική κοινότητα θα θεωρήσει αυτήν την προσπάθεια ως επιτυχή, το βιβλίο παραδίδεται στην αντίστοιχη προς το περιεχόμενό του Ελληνική βιβλιογραφία.

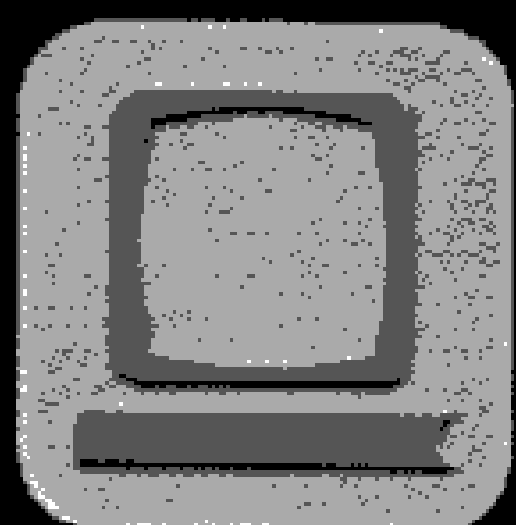
Γραμματή Πάντζιου - Αλέξανδρος Τομαράς

Τα σύγχρονα πολύπλοκα επιστημονικά προβλήματα του αιώνα μας, τα οποία αποκαλούνται «μεγάλες προκλήσεις» και αφορούν την ιατρική, την φαρμακολογία, την κβαντοχημεία, την αστροφυσική, την γενετική μηχανική, κ.ά., αντιμετωπίζονται σήμερα με αριθμητική προσομοίωση, η οποία απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ, την οποία οι ακολουθιακοί υπολογιστές δεν διαθέτουν. Η παραγωγή λοιπόν υπολογιστικών συστημάτων, τα οποία είναι επιδεκτικά εκτεταμένων υπολογισμών, π.χ. 150 τρισεκατομμυρίων πράξεων προς πρόβλεψη των ιδιοτήτων ενός υλικού, έγινε επιτακτική ανάγκη, και είναι ήδη γεγονός. Τα συστήματα αυτά, τα οποία βασίζονται στην Ευκλείδεια έννοια της παραλληλίας, καλούνται παράλληλοι υπολογιστές και είναι υπολογιστικές μηχανές με δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων.

Το βιβλίο αυτό πραγματεύεται τα συστατικά στοιχεία του παράλληλου υπολογισμού, και αποβλέπει, αφ' ενός μεν στη μύηση του αναγνώστη στη σχετική με αυτά τα στοιχεία γνώση, αφ' ετέρου δε στην υπέρβαση από τον ακολουθιακό τρόπο σκέψης, σε έναν τρόπο σκέψης με όρους και συνθήκες παραλληλίας.

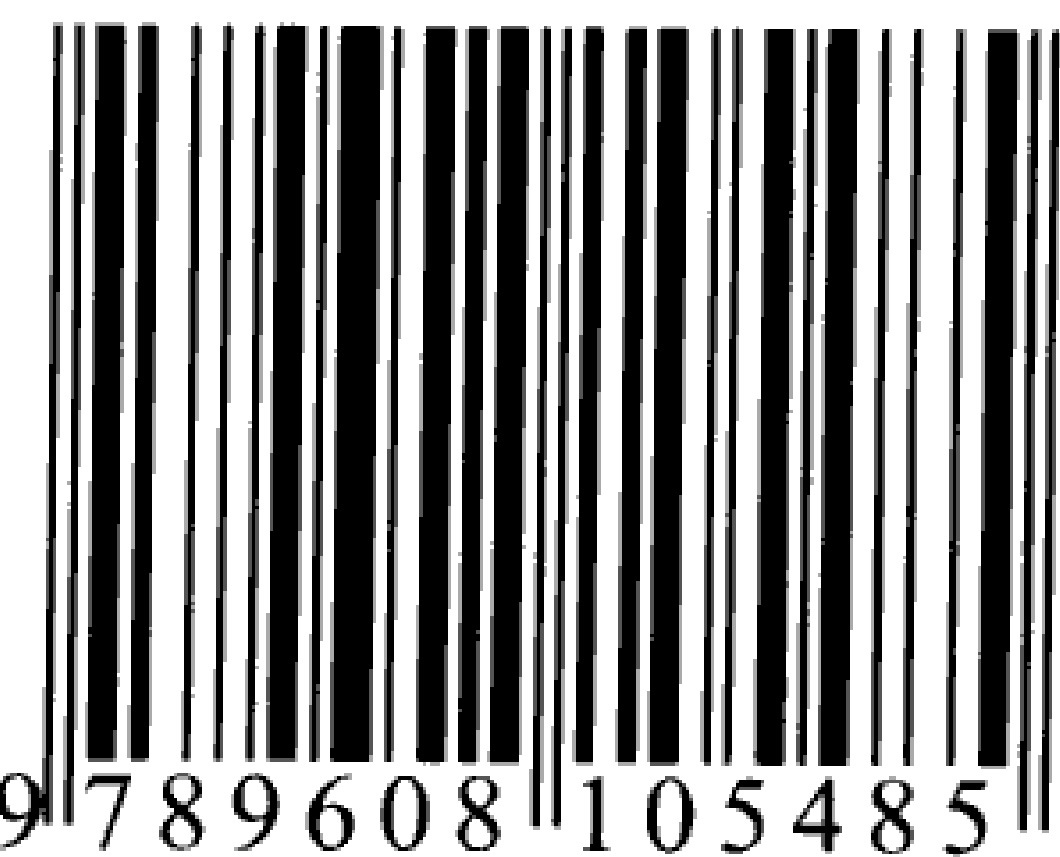
Η εισαγωγή στο βιβλίο περιλαμβάνει τις μεγάλες σύγχρονες επιστημονικές προκλήσεις, την εξέλιξη της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων, τις έννοιες της σωλήνωσης, του παραλληλισμού δεδομένων και του παραλληλισμού ελέγχου, το Κόσκινο του Ερατοσθένη, το νόμο του Amdahl, και την κατηγοριοποίηση ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων. Το δεύτερο κεφάλαιο επισκοπεί στοιχεία της αρχιτεκτονικής παράλληλων υπολογιστών και συγκεκριμένα τα δίκτυα διασύνδεσης, τους πολυεπεξεργαστές, και τους πολυυπολογιστές. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην προτυποποίηση παράλληλου υπολογισμού και, πέραν των θεμελιωδών εννοιών, πραγματεύεται πρότυπα παράλληλου υπολογισμού, προσομοιώσεις μεταξύ των προτύπων και την έννοια του βέλτιστου παράλληλου αλγόριθμου. Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται θέματα παράλληλων αλγορίθμων, περιλαμβάνοντας βασικές τεχνικές σχεδιασμού παράλληλων αλγορίθμων, αλγορίθμους ταξινόμησης, αλγορίθμους γράφων και στοιχεία της θεωρίας παράλληλης πολυπλοκότητας. Στο πέμπτο κεφάλαιο δίδονται κατευθύνσεις παράλληλου υπολογισμού, όπου μετά την εισαγωγή και τη θεώρηση της διαμοιραζόμενης μνήμης, παρουσιάζονται η Fortran-S, η Fortran υψηλής απόδοσης, και ο αντικειμενοστρεφής παραλληλισμός με την $\text{pC}++$. Τέλος, στο Παράρτημα, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στο MPI και παρατίθενται οι βασικές συναρτήσεις επικοινωνίας κόμβου με κόμβο και συλλογικής επικοινωνίας, ενώ παρουσιάζονται οι βασικές συναρτήσεις διαχείρισης εικονικών τοπολογιών.

Για κάθε μελετητή της τεχνολογικής μορφής της παραλληλίας, το βιβλίο αυτό θα αποτελεί, όχι μόνο μια πηγή αξιόπιστης αναφοράς, αλλά και έναν πολύτιμο οδηγό στα δύσβατα μονοπάτια της παράλληλης συλλογιστικής.



**ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΝΕΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**

ISBN 960-8105-48-X



9 789608 105485