

Τίτλος πρωτοτύπου: *DE L'AUTRE CÔTÉ DE LA MACHINE.*
VOYAGE D'UNE SCIENTIFIQUE AU PAYS DES ALGORITHMES

Συγγραφέας: AURÉLIE JEAN

Copyright © Édition de l'Observatoire/Humensis, *De l'autre côté de la machine.*
Voyage d'une scientifique au pays des algorithmes, 2019

Copyright © ΣΤΕΡΕΩΜΑ Α.Ε., 2023

Για την ελληνική γλώσσα σε όλο τον κόσμο.

Απαγορεύεται η αναδημοσίευση και γενικά η αναπαραγωγή του παρόντος έργου συνολικά ή τμηματικά με οποιοδήποτε τρόπο ή μέσον χωρίς γραπτή άδεια του εκδότη.

ΣΕΙΡΑ: ΔΟΚΙΜΙΟ

ISBN: 978-618-5617-30-1

Εκδόσεις ΣΤΕΡΕΩΜΑ Α.Ε. / ΣΙΟΛΑ-ΑΛΕΞΙΟΥ

Κομνηνών 24, Αθήνα 11472

Τηλ. 210-6426393

Fax 210-6459312

E-mail: info@stereoma-sa.gr

www.stereoma-sa.gr

Facebook Εκδόσεις Στερέωμα

ΟΡΕΛΙ ΖΑΝ

ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΛΛΗ ΠΛΕΥΡΑ
ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

ΕΝΑ ΤΑΞΙΔΙ ΣΤΗ ΧΩΡΑ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Μετάφραση

ΓΙΩΡΓΟΣ ΜΠΟΛΙΕΡΑΚΗΣ

Εκδόσεις ΣΤΕΡΕΩΜΑ
2023

Στους παππούδες μου, Αλμπέρ και Ελέν Ζαν.

«Όσο επιτυχημένος κι αν γίνεις,
πάντα να στέλνεις πίσω το ασανσέρ»

ΤΖΑΚ ΛΕΜΟΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
Υπάρχει πάντα μια πρώτη φορά	26
1 الجزاوي لِيْغِيْهِ ΛΙΓΗ ΙΣΤΟΡΙΑ.....	35
Περσία: εκεί όπου ξεκίνησαν όλα... ή περίπου.....	36
Ένα διάλειμμα στον κήπο (εφαρμοσμένα μαθηματικά)	40
Ο αλγόριθμος δεν είναι συνταγή μαγειρικής (το αντίστροφο όμως ισχύει).....	43
<i>Welcome to the Neguev Desert</i>	48
2 ΟΙ ΠΡΩΤΟΙ ΜΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	52
Η ανακάλυψη της γλώσσας και ερωτήματα δίχως απάντηση ..	60
Ο πρώτος μου «πραγματικός» αλγόριθμος	71
Το παράδοξο της προσομοίωσης: κατανόηση του πραγματικού μέσω του εικονικού	74
Ένας αλγόριθμος μοντελοποίησης της μορφολογίας των νανοσωματιδίων	80
Από τον αλγόριθμο στον κώδικα προγραμματισμού	83
Οι θυσίες που κάνει κανείς στη διατύπωση υποθέσεων	85
3 ΜΙΑ ΣΥΝΑΝΤΗΣΗ ΔΙΧΩΣ ΤΕΛΟΣ; ΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΠΡΟΚΑΤΑΛΗΨΕΙΣ.....	91
Από την ψηφιακή μηχανική... στην ιατρική.....	92
Πώς είπατε; «Αλγοριθμική προκατάληψη»;.....	94

Οι ρητές αλγοριθμικές προκαταλήψεις	100
Οι υπόρρητες αλγοριθμικές προκαταλήψεις	105
Τα παράδοξα της παρατήρησης.	107
Οι προκαταλήψεις είναι ο καλύτερος εχθρός του επιστήμονα . .	110
Από την ιατρική στη Γουόλ Στριτ: αλγόριθμοι, δημοσιογραφία... και πολιτική	115
Προκαταλήψεις 2 — Η επιστροφή	118
4 ΟΛΟΙ ΕΙΜΑΣΤΕ ΕΝΟΧΟΙ ΓΙΑ ΑΥΤΕΣ ΤΙΣ ΠΡΟΚΑΤΑΛΗΨΕΙΣ.	126
Όταν επικρατεί σύγχυση.	127
Η δίκη των αλγορίθμων: ζητείται αθώωση!	132
Ο πιτσαδόρος του MIT	135
Προκαταλήψεις εναντίον στατιστικών: όταν οι αλγόριθμοι ενισχύουν τις υπάρχουσες ανισότητες	138
Πάντα θα υπάρχουν προκαταλήψεις.	140
Η μηχανική μάθηση ως παράγοντας ενίσχυσης των συνεπειών των αλγοριθμικών προκαταλήψεων	142
Ρυθμίσεις, αυτορρυθμίσεις... και άλλες λύσεις	151
5 ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΛΟΙΠΟΝ Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ;.	156
Προσοχή στους γκουρού του εικονικού	157
Η βελτίωση του αλγοριθμικού καθρέφτη: στο όριο μεταξύ πραγματικού και εικονικού	162
Η κατηγοριοποίηση του κόσμου ως μέσο για την καλύτερη κατανόησή του	168
Τα όρια των κατηγοριών (ή πώς ξέφυγα από τις προκαταλήψεις)	172
Μήπως η λύση είναι ο κβαντικός υπολογιστής;	179
6 ΑΠΟ ΜΙΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΚΡΙΣΗ;.	183
Μια παρεξηγημένη επανάσταση	186
Αγώνας μέσω της εκπαίδευσης	194

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η επιλογή θα ανήκει σε όσους κατανοούν	197
Και ο σαρκικός έρωτας σε όλα αυτά;	203
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	211
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	219

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Φθινόπωρο 2011, Βοστόνη, Νέα Αγγλία. Εδώ και έναν μήνα εργάζομαι στην πανεπιστημιούπολη του Τεχνολογικού Ινστιτούτου Μασσαχουσέτης (MIT) όπου, υπό την επίβλεψη των καθηγητών Ραούλ Ραντοβίτσκι και Τζον Τζοαννόπουλος, χρησιμοποιώ τα μαθηματικά, τη φυσική, την αλγοριθμική και τον κώδικα προγραμματισμού προκειμένου να κατανοήσω τους μηχανισμούς του κρανιακού τραυματισμού.

Κάθε πρωί περνώ τους στύλους του Μεγάλου Θόλου και μπαίνω στον περίφημο «άπειρο διάδρομο» (ακριβώς ένα τέταρτο του μιλίου) που έχουν διασχίσει πριν από εμένα ο Κόφι Ανάν, ο Μπαζ Όλντριν, ο Μπεν Μπερνάνκι, η Ρόμπιν Τσείς και το είδωλό μου, ο Ρίτσαρντ Φάινμαν.¹ Περνώ δίπλα από αίθουσες διδασκαλίας, αίθουσες για επιστημονικά πειράματα ή ακόμα και πινακίδες αφισοκόλλησης, όπου ανακοινώνονται διαγωνισμοί σάλσα,

1. Πρόκειται για επιφανείς αποφοίτους του MIT: Κόφι Ανάν (1938-2018), Γκανέζος διπλωμάτης, έβδομος γραμματέας του ΟΗΕ (1997-2006)· Μπαζ Όλντριν (1930-), Αμερικανός μηχανικός και αστροναύτης, μέλος της αποστολής Απόλλων 11· Μπεν Μπερνάνκι (1953-), Αμερικανός οικονομολόγος, πρόεδρος της Ομοσπονδιακής Τράπεζας των ΗΠΑ (2006-2014)· Ρόμπιν Τσείς, Αμερικανίδα επιχειρηματίας Ρίτσαρντ Φάινμαν (1918-1988), Αμερικανός θεωρητικός φυσικός, κάτοχος του βραβείου Νομπέλ Φυσικής (1965). [Σ.τ.Μ.]

των φυλετικών ή σεξουαλικών διακρίσεων για τις οποίες κατηγορείται τακτικά; Αν ο κώδικας προγραμματισμού είναι γλώσσα, μπορούν άραγε να εφαρμοστούν σε αυτόν οι κανόνες της σύγχρονης γλωσσολογίας; Πρόκειται για ερωτήσεις που κανένας αλγόριθμος δεν έχει καταφέρει να απαντήσει ακόμη. Αν θέλετε, θα τις εξετάσουμε μαζί.

Ο πρώτος μου «πραγματικός» αλγόριθμος

Είναι Δεκέμβριος του 2005, είμαι 23 χρονών και ξεκινώ τη διδακτορική διατριβή μου στην École des Mines του Παρισιού. Το πρώτο μάθημα αλγοριθμικής που παρακολούθησα βρίσκεται πια πολύ πίσω μου. Στο μεταξύ, αφού πήρα το πτυχίο μου, πέρασα τρία χρόνια στην École Normale Supérieure του Κασάν για ένα επαγγελματικό δίπλωμα μηχανικής... και μια πρακτική εξάσκηση στο Πανεπιστήμιο του Κολοράντο, στο Μπόλντερ, επιβεβαίωσε την επιθυμία μου να συνεχίσω στον δρόμο της πληροφορικής. Μαζί με έναν συνάδελφο υποψήφιο διδάκτορα, υπό την καθοδήγηση του καθηγητή Γιούνπινγκ Σι, γράψαμε έναν μικρό κώδικα, στη γλώσσα που λέγεται MATLAB, με στόχο τον υπολογισμό του βάθους διεύθυνσης του αλατιού που φέρεται από τους θαλάσσιους ανέμους στο σκυρόδεμα των παράκτιων κτηρίων — αλάτι που διαχέεται στους πόρους των τοίχων και κρυσταλλοποιείται, οπότε μπορεί να προκαλέσει ρωγμές και δομικές βλάβες. Η πρώτη μου εμπειρία κώδικα με εφαρμογή σε μια συγκεκριμένη περίπτωση της πραγματικής ζωής!

Όμως τον Δεκέμβριο του 2005 μπαίνω σε μια νέα διάσταση. Έχω μπροστά μου τρία χρόνια για να λύσω το εξής πρόβλημα:

*Μελέτη ενός ελαστομερούς
ενισχυμένου με νανοσωματίδια αιθάλης:
από τη δομή του στη μακροσυμπεριφορά του*

Είναι ο τίτλος που, έπειτα από τρία χρόνια, θα δώσω στη διατρι-

βή μου. Τρία χρόνια μελέτης των ελαστομερών που συντίθενται από νανοσωματίδια αιθάλης και τα οποία ονομάζονται επίσης... καουτσούκ.

Το καουτσούκ παίρνει το σκούρο χρώμα του από τον άνθρακα και συνθέτει τα σωματίδιά του. Το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται «νανοσύνθετο», καθώς, αν και φαίνεται ομοιόμορφο και ομοιογενές στην εκατοστομετρική κλίμακα (αυτή που αντιστοιχεί στο γυμνό μάτι), στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο συστατικά στη νανοσκοπική κλίμακα (αυτή του νανοσκόπιου, δηλαδή του ενός εκατομμυριοστού του χιλιοστού): το ελαστομερές και τα σωματίδια άνθρακα. Ανάλογα με τον τρόπο που αναμειγνύονται αυτά τα δύο συστατικά (ταχύτητα, διάρκεια μείξης, θερμοκρασία...), το καουτσούκ είναι περισσότερο ή λιγότερο ελαστικό και ανθεκτικό στη ρήξη. Έτσι, όταν εξετάζουμε το καουτσούκ στο μικροσκόπιο, παρατηρούμε ότι τα σωματίδια άνθρακα συγκεντρώνονται σε συμπλέγματα διαφορετικών μορφών ανάλογα με τις συνθήκες της μείξης.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής έρευνάς μου, προσπαθώ να κατανοήσω τη νανοσκοπική μορφολογία των συμπλεγμάτων σωματιδίων άνθρακα εντός της ελαστομερούς μίτρας και να τη συσχετίσω με την ελαστική συμπεριφορά του καουτσούκ. Με άλλα λόγια, προσπαθώ να κατανοήσω πώς ο τρόπος διάταξης των νανοσωματιδίων άνθρακα μπορεί να επιδράσει στην ευκολία με την οποία παραμορφώνεται το καουτσούκ.

Το πρόβλημα αυτό διαφέρει από τα προβλήματα με τα οποία ασχολήθηκα στις σπουδές μου, για έναν λόγο απλό όσο και συναρπαστικό: δεν έχει επιλυθεί ακόμη. Πάει καιρός που έγραφα αλγόριθμους για να λύσω θεωρητικά προβλήματα με γνωστή λύση! Αυτή τη φορά ο Ευκλείδης δεν θα μπορέσει να μου τείνει χείρα βοηθείας...

Αυτή η διαφορά συνεπιφέρει δύο σοβαρά εμπόδια. Καταρχάς τίποτα δεν εγγυάται ότι υπάρχει λύση σε αυτό το πρόβλημα — τουλάχιστον στο μέτρο των τεχνικών μέσων που διαθέτουμε. Διότι, ακόμα κι αν η λύση υπάρχει, μπορεί να προϋποθέτει πειραματικά ή ψηφιακά μέσα που δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμη. Τίποτα δεν με βεβαιώνει, για παράδειγμα, ότι τα μικροσκόπια μάς παρέχουν τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε πραγματικά τη μορφή των σωματιδίων στη νανοσκοπική κλίμακα. Ξεκινώ λοιπόν τη διατριβή μου χωρίς να ξέρω αν η επίλυση του προβλήματός μου είναι τεχνικώς εφικτή. Δεύτερο εμπόδιο: εφόσον το πρόβλημα δεν τέθηκε ποτέ, τίποτα δεν με βεβαιώνει ότι εγώ το έθεσα ορθώς. Ακόμα χειρότερα: η διατύπωσή του ενδέχεται να είναι εντελώς λανθασμένη. Δεν σας έτυχε ποτέ να απαντήσετε λανθασμένα σε μια ερώτηση, έστω και σε μια απλή ερώτηση, επειδή αυτή δεν είχε τεθεί σωστά; Αυτό μου συμβαίνει πολύ συχνά — και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο, σε περίπτωση αμφιβολίας, ζητώ πάντα από τον συνομιλητή μου να επαναδιατυπώσει την ερώτησή του...

Στις σελίδες που ακολουθούν, θα δούμε ότι δεν ανέπτυξα μόνο έναν, αλλά μια σειρά αλγορίθμων, οι οποίοι διαιρούνται σε δύο διακριτές ομάδες. Στην πρώτη ομάδα κατανέμονται όλοι οι αλγόριθμοι που μου επέτρεψαν να αναλύσω, να μοντελοποιήσω και να προσομοιώσω τη νανοσκοπική μορφολογία του καουτσούκ. Η δεύτερη ομάδα συγκεντρώνει τους αλγόριθμους χάρη στους οποίους κατάφερα να μοντελοποιήσω και να προσομοιώσω τη μακροσκοπική ελαστικότητα του υλικού, στη βάση νανοδομών που προέκυψαν από εικονική παραγωγή. Ο στόχος ήταν να εξασφαλιστεί, μέσω καλοσχεδιασμένων αλγορίθμων, η δυνατότητα κατανόησης και πρόβλεψης της ελαστικότητας του καουτσούκ ανάλογα με τις συνθήκες μείξης κατά την παρασκευή

του. Αυτό είναι η ψηφιακή προσομοίωση — εκείνη που μέσω του εικονικού εξασφαλίζει καλύτερη κατανόηση του πραγματικού.

Με τη συγκατάθεσή σας, θα εξετάσουμε τα στάδιά της λεπτομερώς. Δεν θα σας επιβαρύνω με τις περισσότερες τεχνικές πτυχές της, σας το υπόσχομαι. Και σε λίγες σελίδες από τώρα, ακόμα κι αν σας διαφύγουν κάποιες λεπτομέρειες, θα έχετε ήδη μια σαφή εικόνα των ερωτημάτων που τίθενται όταν επιδιώκουμε τη μοντελοποίηση της πραγματικότητας με τη δημιουργία αλγορίθμων.

*Το παράδοξο της προσομοίωσης:
κατανόηση του πραγματικού μέσω του εικονικού*

Στις προπτυχιακές σπουδές μου, υλοποιούσα αλγόριθμους για να λύσω προβλήματα συνηθισμένα, πολλές φορές αρκετά απλά. Άρχισα να μελετώ πολύ πιο σύνθετους αλγόριθμους στο μεταπτυχιακό, αλλά τα προβλήματα εξακολουθούσαν να μη μου κινούν πολύ το ενδιαφέρον και ακόμη δεν μου δινόταν η ευκαιρία να δοκιμάσω τη δύναμη των αλγορίθμων εκτελώντας μια εκτεταμένη προσομοίωση.

Μόνο κατά την προετοιμασία της διατριβής μου αντιλήφθηκα πραγματικά τη δύναμη του ψηφιακού υπολογισμού και συνειδητοποίησα ότι οι υπολογιστές μπορούν να μας βοηθήσουν στην κατανόηση του κόσμου. Θα βυθιζόμουν στον ψηφιοποιημένο εικονικό κόσμο προκειμένου να απαντήσω ερωτήματα που κανείς δεν είχε καταφέρει να απαντήσει στον πραγματικό κόσμο: η προοπτική ήταν συναρπαστική!

Έπρεπε όμως να εξοπλιστώ με υπομονή... και με εργαλεία που δεν είχα ξαναδεί ποτέ. Πράγματι, για την εικονική προσομοίωση δοκιμών συμπίεσης σε δείγματα με δεκάδες χιλιάδες σω-

ματίδια άνθρακα, ακόμα κι αν είχα στη διάθεσή μου τον καλύτερο αλγόριθμο του πλανήτη, θα χρειαζόμουν μηχανές με μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για να το πω αφελώς (αλλά ακριβώς από επιστημονική άποψη): για μεγάλους υπολογισμούς χρειάζονται μεγάλοι υπολογιστές! Δεν θα αργούσα να γνωρίσω έναν από αυτούς τους υπερυπολογιστές...

Βρισκόμαστε λοιπόν στον Δεκέμβριο του 2005, είναι η πρώτη μέρα των διδακτορικών σπουδών μου. Μεσ στην ξενοιασιά μου, δεν ξέρω τι με περιμένει. Η εμπειρία μου μου λέει πως όλοι οι υποψήφιοι διδάκτορες περνούν από αυτή τη διαδικασία: νεοφερμένοι, ξεκινούν χαμογελαστοί και πεπεισμένοι ότι ξέρουν πώς διεξάγεται μια επιστημονική έρευνα, ενώ μετά από λίγα χρόνια καταλήγουν με ρυτίδες και πολλά παραπανίσια κιλά — πάντα όμως χαμογελαστοί, εξαντλημένοι αλλά περήφανοι που έγιναν ένα είδος «μαχητών». Η ίδια πήρα εννέα κιλά κατά την προετοιμασία της διατριβής μου, τα οποία ευτυχώς έχασα στην επόμενη χρονιά. Οι υποψήφιοι διδάκτορες εργάζονται σκληρά, με μέτρια αποτελέσματα, τρέφονται άσχημα και δεν ασκούνται σωματικά. Ωστόσο, μετά από κάποια χρόνια εκμάθησης του τρόπου με τον οποίο εργάζεται κανείς γρήγορα και σωστά, η αποτελεσματικότητά τους ευτυχώς αυξάνεται...

Αρχίζω λοιπόν αυτή την πρώτη μέρα με την αφέλεια μιας ηρωίδας παραμυθιού που θα την καταβροχθίσει ο δράκος. Με υποδέχεται στο εργαστήριο ένας από τους επιβλέποντες καθηγητές μου, ο Σαμουέλ Φορέστ. Παίρνουμε έναν καφέ, μου μιλά για τη θεωρία δεύτερης παραγωγού του και με βάζει στην αίθουσα υπολογισμού. «Έλα, θα σου παρουσιάσω τις μηχανές που θα σου επιτρέψουν να βρεις τη λύση του προβλήματός σου».

Μπαίνουμε στην αίθουσα όπου εργάζονται οι υποψήφιοι διδάκτορες: η ίδια στεγάζει και τον υπολογιστή του εργαστηρίου.

Πρόκειται για έναν εξυπηρετητή που αποτελείται από 130 κόμβους υπολογισμού (κάτι σαν 130 υπολογιστές, με δύο επεξεργαστές ο καθένας, συναρμολογημένοι παράλληλα). Σήμερα αυτοί οι 130 κόμβοι ενδέχεται να προκαλέσουν το χαμόγελο ορισμένων υποψιασμένων αναγνωστών: έκτοτε έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος... Αλλά δεν ξεχνώ τον ενθουσιασμό που είχε ο Σαμουέλ Φορέστ όταν μου παρουσίασε το καμάρι του εργαστηρίου...

Ο υπολογιστής είναι εγκατεστημένος στο κέντρο της αίθουσας υπολογισμού, μέσα σε ένα μεγάλο γυάλινο «κλουβί» που περικλείει τους εγκεφάλους του από σιλικόνη διαχωρίζοντάς τους από τους δικούς μας βιολογικούς εγκεφάλους. Το τζάμι είναι απαραίτητο, και για να προστατεύει τις μηχανές από ένα ρεύμα κρύου αέρα, αλλά και για να προστατεύει εμάς, τους ανθρώπους, από έναν θόρυβο ανυπόφορο. Φανταστείτε 130 υπολογιστές σε πλήρη λειτουργία μέσα σε ένα δωμάτιο 20 m²: είναι εκκωφαντικό. Πίσω από το τζάμι δεν ακούγαμε τίποτε από τη δουλειά της μηχανής, μπορούσαμε όμως να δούμε τα μπλε λαμπάκια LED που αναβόσβηναν συνεχώς. Το θέαμα ήταν πολύ πιο όμορφο από τον Mark I που θα ανακάλυπτα μετά από λίγα χρόνια στο Χάρβαρντ!

Υπό μία έννοια, αυτός ο υπολογιστής έπαιξε στην έρευνά μου τον ρόλο του καθρέφτη στο βιβλίο του Λιούις Κάρολ. Η Αλίκη τον διαπερνά για να επισκεφθεί τον κόσμο της κόκκινης βασίλισσας. Με το μηχάνημα, μπορούσα κι εγώ να ταξιδέψω σε έναν άλλο κόσμο: τον εικονικό κόσμο.

Όμως, αλήθεια, γιατί να διαμεσολαβεί ένας εικονικός κόσμος προκειμένου να αναπαρασταθεί ένας κόσμος πλασμένος από άτομα, υλικά και πρόσωπα απτά; Η απάντηση είναι ότι τις περισσότερες φορές δεν έχουμε άλλη επιλογή. Ο υλικός κόσμος υψώνει πολλά εμπόδια στην πρόοδο της κατανόησης του κόσμου, και οι προσομοιώσεις που εκτελούνται από υπολογιστές

μπορούν να μας βοηθήσουν. Για να κάνουμε προβλέψεις, λόγου χάρη. Πάρτε το δελτίο καιρού: αυτό που μας επιτρέπει να προβλέψουμε τον καιρό που θα κάνει σε τρεις μέρες δεν είναι η παρατήρηση των νεφών με γυμνό μάτι! Πίσω από τους αριθμούς και τα συμπαθητικά εικονογράμματα μιας μετεωρολογικής εφαρμογής κρύβονται υπολογισμοί, ενίοτε γιγαντιαίων διαστάσεων, με στόχο την πρόβλεψη των ρευμάτων θερμού αέρα, των θερμοκρασιών και των ποσοστών υγρασίας σε σχετικά μεγάλες γεωγραφικές ζώνες και σε χρονικές περιόδους ενίοτε αρκετά μακρές. Στη μετεωρολογία, όπως και σε πολλές άλλες επιστήμες, ο ψηφιακός υπολογισμός μάς επιτρέπει να παράσχουμε ενδείξεις για το μέλλον, να το προβλέψουμε με σχετική βεβαιότητα. Όμως αυτές οι προβλέψεις δεν είναι, τολμώ να πω, παρά μόνο η ορατή κορυφή του παγόβουνου των ψηφιακών προσομοιώσεων. Η μεγάλη προστιθέμενη αξία τους συνίσταται στη δυνατότητα που μας δίνουν να καταλάβουμε, να αναλύσουμε ένα φαινόμενο που δεν μπορούμε να αναπαραγάγουμε στον πραγματικό κόσμο.

Ας πάρουμε την περίπτωση του καουτσούκ. Στον πραγματικό κόσμο, μπορούμε να ελέγξουμε με πειραματικά μέσα ένα μέρος της μορφολογίας των σωματιδιακών συμπλεγμάτων άνθρακα, εκμεταλλευόμενοι διαφορετικές παραμέτρους μείξης. Μπορούμε επίσης να διεξαγάγουμε δοκιμές συμπίεσης δειγμάτων καουτσούκ, ώστε να προσδιορίσουμε τη σταθερά ελαστικότητάς τους. Από αυτή την άποψη λοιπόν, μπορούμε, μέσω διεξαγωγής πειραμάτων στον πραγματικό κόσμο, να συσχετίσουμε μερικώς τις συνθήκες μείξης με την ελαστική συμπεριφορά του καουτσούκ. Αυτή η προσέγγιση όμως υπόκειται σε σοβαρούς περιορισμούς. Καταρχάς υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες: η κατασκευή δειγμάτων προκειμένου αυτά να υποβληθούν σε δοκιμές συμπίεσης

κοστίζει σε χρόνο (και χρήματα). Γι' αυτό συνήθως μειώνουμε τον αριθμό δειγμάτων προς κατασκευή και δοκιμών προς εκτέλεση. Ένας άλλος, ακόμα σημαντικότερος, περιορισμός έχει να κάνει με την αναπαραγωγιμότητα του νανοσύνθετου που κατασκευάζουμε. Είναι αδύνατο να αναπαραγάγουμε επακριβώς τη θέση και τη μορφή κάθε συμπλέγματος άνθρακα στη νανοδομή ενός καουτσούκ που κατασκευάζουμε! Αυτό αποτελεί πρόβλημα όταν επιδιώκουμε να συγκρίνουμε την ελαστικότητα της ίδιας νανοδομής σε διαφορετικές συνθήκες τάνυσης. Φανταστείτε μια τάρτα με φράουλες: όσο κι αν ακολουθήσετε πιστά την ίδια συνταγή με τις ίδιες ποσότητες, μετά το ψήσιμο οι φράουλές σας δεν θα βρίσκονται ποτέ στο ίδιο σημείο στην επιφάνεια του γλυκού. Τελευταίος περιορισμός: δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε λεπτομερώς τη μορφολογία αυτών των νανοσυμπλεγμάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής συμπίεσης. Χρησιμοποιούμε, βέβαια, μικροσκόπια, αλλά αυτά δεν μας δίνουν παρά μια μερική άποψη της νανοδομής σε κατάσταση ηρεμίας και όχι κατά την παραμόρφωση — ενώ αυτή είναι που μας ενδιαφέρει...

Οι προσομοιώσεις μάς επιτρέπουν να υπερβούμε όλους αυτούς τους περιορισμούς και, μάλιστα, να πάμε ακόμα πιο πέρα. Πρώτον: εκτελούνται γρήγορα — και με μικρότερο κόστος αφ' ης στιγμής διαθέτουμε έναν ισχυρό υπολογιστή. Δεύτερον: μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια προσομοιωμένη νανοδομή για περισσότερες ψηφιακές δοκιμές συμπίεσης. Τρίτον: μπορούμε να αναλύσουμε την παραμόρφωση του ελαστομερούς μεταξύ των συμπλεγμάτων σωματιδίων άνθρακα, καθώς και τη μετακίνηση των σωματιδίων, κι αυτό κατά τη διάρκεια της συμπίεσης! Στον πραγματικό κόσμο, είναι αδύνατο να αναλύσουμε στη νανομετρική κλίμακα την παραμόρφωση του καουτσούκ: γι' αυτό οι προσομοιώσεις είναι μαγικές.

Ένα άλλο παράδειγμα θα είναι ίσως ακόμα πιο εύγλωττο, ώστε να γίνει κατανοητό αυτό το πολύ σημαντικό σημείο. Κάποια χρόνια μετά τη διατριβή μου, στο MIT, χρησιμοποίησα ψηφιακές προσομοιώσεις για να καταλάβω καλύτερα το κρανιακό τραύμα, αναλύοντας σε πραγματικό χρόνο τους μηχανισμούς που δύνανται να το προκαλέσουν. Η μέτρηση των αντιδράσεων του εγκεφάλου σε ένα χτύπημα στο κεφάλι ενός άνδρα ή μιας γυναίκας εν ζωή είναι το όνειρο κάθε νευρολόγου... Στον πραγματικό κόσμο όμως είναι αδύνατη, για προφανείς λόγους ηθικής τάξης: δεν μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια δοκιμή κρούσης στο κεφάλι ενός ζωντανού ανθρώπου, στον εγκέφαλο του οποίου θα έχουμε τοποθετήσει αισθητήρες για να μετρήσουμε τις αλλαγές της ενδοκρανιακής πίεσης! Ακόμα και οι δοκιμές σε ζώα που έχουν υποστεί αναισθησία είναι περιορισμένες. Άρα δεν έχουμε άλλη επιλογή: πρέπει να περάσουμε από την άλλη πλευρά του καθρέφτη για να πραγματοποιήσουμε πειράματα τέτοιου είδους. Προσομοιώνοντας τη μορφολογία του ανθρώπινου κρανίου με όλα τα συστατικά της (οστά, εγκέφαλο, μυς και κοιλότητες) και την ελαστομετρική αντίδραση καθενός από αυτά τα συστατικά, κατάφερα, στον ψηφιοποιημένο εικονικό κόσμο, να εξασφαλίσω μια λεπτομερή χαρτογράφηση της ενδοκρανιακής πίεσης σε περίπτωση κρούσης. Ήμουν σε θέση να υπολογίσω τις πιέσεις που υφίσταται κάθε χιλιοστό του ανθρώπινου εγκεφάλου. Μπόρεσα να ταυτοποιήσω τις περιοχές που παθαίνουν τη σοβαρότερη βλάβη σε συνάρτηση με τη γωνία σύγκρουσης. Μπόρεσα να καθορίσω ακόμα και τις θέσεις και τις τιμές των αιχμών πίεσης στον εγκέφαλο. Αυτή η διείσδυση στον εικονικό κόσμο επέτρεψε στην ομάδα μου και σ' εμένα να γράψουμε έναν μαθηματικό κανόνα που προσδιορίζει τον κίνδυνο κρανιακού τραύματος σε έναν άνθρωπο ανάλογα με το είδος κρούσης. Αυτό δεν

θα το είχαμε κατορθώσει αν παραμένναμε στον πραγματικό κόσμο. Είναι απολύτως βέβαιο!

Ας μην προτρέχουμε όμως και ας επιστρέψουμε στο 2005... Κατά την προετοιμασία της διατριβής μου κατάλαβα τη δύναμη του ψηφιοποιημένου εικονικού κόσμου. Κατάλαβα επίσης ότι το κλειδί αυτού του κόσμου είναι ο αλγόριθμος, και ότι η ποιότητά του είναι καθοριστική. Ένας κακός αλγόριθμος θα σας παρασύρει σε έναν εικονικό κόσμο που αναπαριστά λανθασμένα την πραγματικότητα. Κατά την εποχή της διατριβής μου δεν γνώριζα ακόμη τις αλγοριθμικές προκαταλήψεις. Είχα ωστόσο επίγνωση της πιθανότητας να κάνω λάθη στις υποθέσεις του πρώτου μου μοντέλου. Συνεπώς πορευόμουν με σύνεση προς την κατεύθυνση του πρώτου μου «αληθινού» αλγόριθμου — εκείνου που μου επέτρεπε να προσομοιώσω τη ναοδομή των συμπλεγμάτων σωματιδίων άνθρακα στην ελαστομερή μήτρα του καουτσούκ...

Ένας αλγόριθμος μοντελοποίησης της μορφολογίας των νανοσωματιδίων

Σωστά διαβάσατε τον παραπάνω τίτλο: έγραψα «ένας αλγόριθμος» και όχι «ο αλγόριθμος». Επειδή στην πραγματικότητα τίποτα δεν υποδεικνύει ότι υπάρχει ένας και μοναδικός αλγόριθμος για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος. Γι' αυτό και η γραφή ενός αλγόριθμου μπορεί να αποδειχτεί περίπλοκη υπόθεση: αυτός οφείλει όχι μόνο να παράγει σωστή λύση, αλλά και να είναι ο πιο αποτελεσματικός. Πρέπει να βελτιστοποιούμε τη χωρική και τη χρονική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου, ώστε αυτός να λειτουργεί γρήγορα και να καταναλώνει τη λιγότερη δυνατή μνήμη. Και ενώ είναι αρκετά εύκολο να σκεφτόμαστε με αυτόν τον τρόπο όταν έχουμε να κάνουμε με θεωρητικούς αλ-