



ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ

ΧΑΡΗΣ Β. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Ερευνητής Πληροφορικής M.Sc., Ph.D.

Πολύπλοκα Συστήματα

Μπορεί η επιστήμη να εξηγήσει το απρόβλεπτο;



Από τη θεωρία της εξέλιξης και τη συμπεριφορά μιας αγέλης ζώων, μέχρι τα σύγχρονα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας και τις χρηματιστηριακές αγορές, σιγά-σιγά γίνεται ολοένα και πιο φανερό ότι υπάρχει «κάτι», κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, που καθιστά αυτές και πολλές άλλες διαδικασίες εξαιρετικά σύνθετες και απρόβλεπτες. Η μέχρι σήμερα επιστημονική προσέγγιση, αυτή του κατακερματισμού και της παρατήρησης των επιμέρους συστατικών ενός συστήματος, αποδεικνύεται ανεπαρκής. Τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα φαίνονται τόσο πολυπλοκά που είναι σχεδόν αδύνατο ακόμα και να διατυπωθούν με ακρίβεια. Τα «πολύπλοκα συστήματα» (complex systems) προκαλούν τις ανθρώπινες νοητικές δυνατότητες και βρίσκονται στα όρια της σημερινής επιστημονικής γνώσης.

Η καθημερινότητα και οι συνηθισμένες, επαναλαμβανόμενες εργασίες συνήθως γίνονται αντιληπτές ως απλές διαδικασίες, χωρίς κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση κάθε φορά. Όμως, με μια πιο προσεκτική ματιά, είναι εύκολο να διαπιστωθεί πως αυτό απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Ιδιαίτερα όσοι ασχολούνται συστηματικά με τις επιστήμες και τον τρόπο μοντελοποίησης διαφόρων διαδικασιών, φυσικών, κοινωνικών, οικονομικών, κλπ. φαινόμενα διαπιστώνουν πως όσο λεπτομερέστερη είναι η μελέτη κάποιων συστημάτων, τόσο πιο δύσκολη και αναπολεσματική γίνεται η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Συχνά, η δυσκολία πρόβλεψης σε τέτοιες περιπτώσεις οδηγεί στο εύκολο συμπέρασμα ότι δεν γνωρίζουμε αρκετά για το σύστημα, για τη διεργασία ή για τις παραμέτρους που το επηρεάζουν. Αυτό ίσως να ισχύει σε αρκετές περιπτώσεις, όμως το γεγονός ότι το ίδιο ακριβώς χαρακτηριστικό παρατηρείται και σε φαινομενικά απλά συστήματα, οδηγεί τους επιστήμονες στο συμπέρασμα ότι κάτι άλλο υποκρύπτεται, κάτι πέρα από τη συμπεριφορά των επιμέρους συστατικών του συστήματος.

Οικονομολόγοι γνωρίζουν τι επηρεάζει την τιμή μιας συγκεκριμένης μετοχής στο χρηματιστήριο, ωστόσο δεν μπορούν να προβλέψουν ανά πάσα στιγμή με ακριβεια τη μελλοντική τιμή της. Οι μετεωρολόγοι γνωρίζουν πως λειτουργούν οι νόμοι της θερμοδυναμικής και της μηχανικής των ρευστών στην ατμόσφαιρα, όμως ποτέ δεν είναι απόλυτα βέβαιοι για την ακρίβεια της



τοπικής πρόβλεψης καιρού, σύμφωνα με το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιούν. Οι συγκοινωνιολόγοι είναι σε θέση να σχεδιάσουν τη ρύθμιση της κυκλοφορίας στους κεντρικούς οδικούς άξονες μιας πόλης, αλλά δεν μπορούν να προβλέψουν πού και πότε θα συμβεί η επόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Παρόμοια παραδείγματα υπάρχουν σε όλους σχεδόν τους επιστημονικούς κλάδους, όπως στην Κοινωνιολογία ή στην Επιδημιολογία, καθώς επίσης και σε αμιγώς τεχνικούς κλάδους, όπως για παράδειγμα στην πρόβλεψη της κατανάλωσης και στα δίκτυα μεταφοράς ενέργει-

ας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι λεπτομέρειες ως προς τη συμπεριφορά του συστήματος σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή σε μικρή κλίμακα, είναι γνωστές και συνήθως μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά με αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα. Ωμως, σε ό,τι αφορά το ίδιο το σύστημα ως σύνολο, δηλαδή σε μεγάλη κλίμακα, η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του και ιδιαίτερα των εξαιρετικών, μη κανονικών καταστάσεων του (π.χ. θλάσεις), αποδεικνύεται εξαιρετικά δύσκολη έως και αδύνατη.

Τα τελευταία χρόνια, ένας νέος επιστημονικός κλάδος επικεντρώνεται α-

κριβώς σε αυτά τα «αναπάντεχα σύνθετα» προβλήματα και ιδιαίτερα στη δυσκολία πρόβλεψης της συμπεριφοράς παρόμοιων συστημάτων ή διεργασιών. Η νέα αυτή προσέγγιση είναι η θεωρία των «Πολύπλοκων Συστημάτων» η οποία φιλοδοξεί να συνδυάσει τα κομμάτια του πάζλ που περιγράφει την πραγματική συμπεριφορά φαινομένων, που ακόμα και τα Μαθηματικά αδυνατούν να το κάνουν με ακρίβεια.

ΕΝΑ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Κάποιος που οδηγεί κάθε πρωί με το αυτοκίνητό του κατευθυνόμενος στην εργασία του, κατά κανόνα ακολουθεί περίπου την ίδια διαδρομή κάθε φορά. Η διαδρομή αυτή ίσως έχει προκύψει αρχικά ως αποτέλεσμα της μελέτης της περιοχής, των δρόμων και της πρόσβασης σε κύριους οδικούς άξονες, όμως αυτό το αρχικό σχέδιο σπανίως εφαρμόζεται επακριβώς, ιδιαίτερα όταν υπεισέρχονται απρόβλεπτοι παράγοντες: ένα μικροατύχημα στον δρόμο που προκαλεί κυκλοφοριακή συμφόρηση, μια θροχή που επιβραδύνει συνολικά την κυκλοφορία, ακόμα και η ξαφνική απόφαση για παρακάμψη και ανεφοδιασμό σε ένα πρατήριο καυσίμων. Όλα αυτά τα στοιχεία καθιστούν εξαιρετικά δύσκολο το φαινομενικά απλό πρόβλημα της εύρεσης της «καλύτερης» διαδρομής, δηλαδή της συντομότερης ή οικονομικότερης ή ταχύτερης λύσης, ανάλογα με το βασικό κριτήριο ή προτεραιότητα που τίθεται κάθε φορά. Το κυριότερο, όμως, στοιχείο που πολλαπλασιάζει τη δυσκολία της πρόβλεψης σε ένα τέτοιο σύνθετο σύστημα είναι το γεγονός ότι το ίδιο ακριβώς επιδιώκουν χιλιάδες άλλοι οδηγοί με τα αυτοκίνητά τους, ταυτόχρονα, εφαρμόζοντας τα ίδια ή διαφορετικά κριτήρια και τρόπους εύρεσης της «καλύτερης» διαδρομής για τους ίδιους, κάτι που αναπόφευκτα επηρεάζει όλους τους υπόλοιπους οδηγούς και την κατάσταση του συστήματος συνολικά. Με άλλα λόγια, δεν πρόκειται απλώς για ένα μεμονωμένο αυτοκίνητο που προσπαθεί να υπολογίσει την καλύτερη διαδρομή ανάμεσα σε σταθερά «εμπόδια», αλλά για ένα περιβάλλον όπου όλα τα «εμπόδια» μετακινούνται, προσπαθώντας να πετύχουν ταυτόχρονα τον ίδιο ακριβώς στόχο.

Πώς, λοιπόν, είναι δυνατό ένα τόσο

Οι συγκοινωνιολόγοι είναι σε θέση να σχεδιάσουν τη ρύθμιση της κυκλοφορίας στους κεντρικούς οδικούς άξονες μιας πόλης, αλλά δεν μπορούν να προβλέψουν πού και πότε θα συμβεί η επόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση.



Η εικόνα των δρόμων και της κυκλοφορίας σε πολυσύχναστες περιοχές, όπως π.χ. στην Καλκούτα ή σε οποιαδήποτε άλλη μεγάλη πόλη στην Ινδία σε μια τυπική εργάσιμη ημέρα, μοιάζει με πραγματικό χάος. Παρόλο αυτό, ακόμα και με παντελή έλλειψη ρύθμισης της κυκλοφορίας μέσω σηματοδότησης ή τροχονόμων, τα οχήματα και οι πεζοί καταφέρνουν να «συντονιστούν» και να κυκλοφορήσουν με συνήθως όχι καταστροφικές συνέπειες. Το σύστημα ως σύνολο αυτο-οργανώνεται και αναδεικνύονται συγκεκριμένες συμπεριφορές ως αποτελεσματικές και ασφαλείς. Έτσι, ενώ σε μικρή κλίμακα, μεμονωμένοι άτομοι ή οχήματα, η πορεία φαίνεται πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά λόγω φαινομενικά τυχαίων καθυστερήσεων και παρακάμψεων, εντούτοις σε μεγάλη κλίμακα, ως οδικό δίκτυο, η ροή της κυκλοφορίας σε αυτό αποδεικνύεται αναπάντεχα ομαλή.



Τα σμήνη εντόμων, φαρμών ή πτηνών αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτο-οργάνωσης και ανάδειξης σύνθετης συμπεριφοράς ως σύνολο. Ενώ κάθε πτηνό γνωρίζει να πετά και να κινείται στον τρισδιάστατο χώρο μεμονωμένα, ολόκληρο το σμήνος ως σύνολο εμφανίζει μια σειρά από ανώτερες και «εξυπνότερες» λειτουργίες, όπως για παράδειγμα τη σηματοδότηση κατεύθυνσης, τη δημιουργία σχηματισμών για την αεροδυναμική μείωση της κατασάλωσης ενέργειας, καθώς και τη συλλογική παραπλάνηση μεγαλύτερων ορσαστικών.

σύνθετο σύστημα, με χιλιάδες επιμέρους συστατικά που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κυρίως «τοπικά», να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια και να περιγραφεί με μαθηματικό τρόπο, ώστε στη συνέχεια να μελετηθεί η συμπεριφορά του; Η απάντηση είναι πως στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό, τουλάχιστον όχι με την απαραίτητη ακρίβεια ώστε να είναι πρακτικά χρήσιμο. Η βασική δυσκολία δεν συνδέεται αποκλειστικά με το μέγεθος του προβλήματος, δηλαδή το πλήθος των επιμέρους συστατικών του, αλλά κυρίως με το γεγονός ότι αυτά αλληλεπιδρούν και μάλιστα σε τοπικό επίπεδο (όχι όλα με όλα). Η αλληλεπίδραση αυτή ίσως φαίνεται τυχαία και εντελώς απρόβλεπτη, αλλά η πραγματικότητα είναι διαφορετική. Εκτός εξαιρετικών περιπτώσεων, η κυκλοφορία στους δρόμους ανά πάσα στιγμή είναι κατά κανόνα σταθερή και χωρίς σημαντικές αποκλίσεις ως προς τον ρυθμό. Ακόμα και όταν σε μεγάλες διασταυρώσεις όπου υπάρχει πρόβλημα στη σηματοδότηση, η κυκλοφορία γίνεται πιο πυκνή και ακανόνιστη τοπικά, μετά από κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα αποκαθίσταται και πάλι ένας νέος ρυθμός, ένα νέο «μοτίβο» κυκλοφορίας, δηλαδή το σύστημα μεταδίδει σε μια νέα κατάσταση

ισορροπίας. Αν συμβεί κάποιο έκτακτο περιστατικό, όπως για παράδειγμα κάποιο μικροατύχημα ή η ξαφνική απενεργοποίηση των φωτεινών σηματοδοτών σε κάποια μεγάλη διασταύρωση, η κυκλοφορία προσωρινά διαταράσσεται, αλλάζει, αναγκάζοντας τους οδηγούς να συμπεριφέρονται διαφορετικά στο συγκεκριμένο σημείο. Για παράδειγμα επεξεργάζοντας κάποια παράκαμψη ή εφαρμόζοντας μεταξύ τους κάποιους είδους συνεννόηση που πριν δεν υπήρχε. Μετά από λίγο, ο ρυθμός της κυκλοφορίας σταθεροποιείται εκ νέου, αν και είναι διαφορετικός από πριν, αλλά και πάλι χαρακτηρίζεται από ισορροπία, προσρμοσμένος στη νέα κατάσταση που έχει προκύψει.

Το οδικό δίκτυο και η ροή της κυκλοφορίας σε αυτό αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα πολύπλοκων συστημάτων. Η κίνηση κάθε οχήματος ορίζεται από απλούς κανόνες, ενώ ο καθορισμός στόχων είναι εξίσου απλός και περιορίζεται συνήθως στην εύρεση μιας «καλής» διαδρομής μεταξύ μιας αφετηρίας Α και ενός προορισμού Β. Ωστόσο, η ύπαρξη ενός πλήθους οχημάτων με παρόμοια συμπεριφορά και παρόμοιους στόχους δημιουργεί ένα σύνολο αλληλεπιδράσεων τόσο σύνθετο και απρόβλεπτο,

που τελικά φαίνεται αφύσικη ή γενικά σμαλή καθημερινή κυκλοφορία στους δρόμους μιας πυκνοκατοικημένης πόλης. Αν και το σύστημα είναι εξαιρετικά «πολύπλοκο», η γενική λειτουργία του ως σύνολο βρίσκεται σε ισορροπία, η οποία μάλιστα αναδεικνύεται αυτόματα, αργά ή γρήγορα, σε κάθε περίπτωση.

ΤΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΕΙ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΩΣ «ΠΟΛΥΠΛΟΚΟ»;

Το παράδειγμα του κυκλοφοριακού δικτύου μιας πόλης και της εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής μέσα σε αυτό σε πραγματικές συνθήκες αναδεικνύει τρία από τα πιο χαρακτηριστικά ίσως στοιχεία των πολύπλοκων συστημάτων:

- «**Αυτο-οργάνωση**» (self-organization): Αυθόρμητη δημιουργία σύνθετων δομών από απλούστερα συστατικά.
- «**Ανάδειξη**» (emergence): Εμφάνιση νέων, πρωτότυπων μοτίβων συμπεριφοράς και λειτουργίας, μέσω αυτόματων διαδικασιών.
- «**Κλιμάκωση**» (scaling): Διαφοροποίηση ή δυνατότητα διαφοροποίησης των μοτίβων συμπεριφοράς ενός συστήματος, σε διαφορετικές κλίμακες εσωτερικών δομών ή αλληλεπιδράσεων.

Εξετάζοντας τον τρόπο και τη μορ-



Πειραματική κατασκευή «σμήνους» (swarm) από αυτόνομους απλούς ρομποτικούς μηχανισμούς, οι οποίοι συνδυάζονται μέσω αυτο-οργάνωσης ώστε να δημιουργήσουν κάτι πιο σύνθετο. Ο κάθε μεμονωμένος ρομποτικός μηχανισμός ενσωματώνει πολύ περιορισμένες λειτουργίες, συγκεκριμένα τη δυνατότητα να κινείται στο επίπεδο και να συνδέεται με άλλους όμοιους μηχανισμούς σε κάθε πλευρά του, μέσω κινούμενων συνδέσμων. Η διασύνδεση μεταξύ τους γίνεται αυτόματα, μετά από «δοκιμές». Καθώς ο χώρος όπου βρίσκονται περιβάλλεται από τοίχωμα, λόγω της κατασκευής του κάθε ένας τέτοιος μηχανισμός αρχικά έχει τρόπο να εξέλθει από αυτόν τον χώρο από μόνος του. Όταν, όμως, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, μερικοί μηχανισμοί αυτο-οργανωθούν σε μια κατάλληλη δομή, ο νέος σύνθετος μηχανισμός «αναδεικνύει» μια νέα λειτουργία, αυτή της συλλογικής υπερήλθεσης του τοιχώματος.

φή των «μοτίβων» που εμφανίζονται στο κυκλοφοριακό δίκτυο μιας πόλης, είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι υφίστανται και τα τρία αυτά χαρακτηριστικά, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Στο μεγαλύτερο μέρος της, η κυκλοφορία στο οδικό δίκτυο αυτο-οργανώνεται: υπάρχει βέλτεια σηματοδότησης, φωτεινοί σηματοδότες και ισχύς τροχονόμοι σε καίριες τοποθεσίες και διασταυρώσεις, όμως η ροή της κυκλοφορίας σε όλο το μήκος του δικτύου λειτουργεί αυθόρμητα και κατά κανόνα με επιτυχία. Στις περιπτώσεις που η κυκλοφορία γίνεται πιο αραιή ή πιο πυκνή, ιδιαίτερα όταν εμφανίζονται έκτακτες καταστάσεις, όπως η μη λειτουργία ή κάποιο φωτεινό σηματοδότη, οι διασταυρώσεις, οι οδηγοί προσαρμόζουν ανάλογα τη δική τους, ατομική συμπεριφορά: μειώνουν ταχύτητα, γίνεται πιο προσεκτική, συντονίζονται με τους υπόλοιπους οδηγούς που προσπαθούν να περάσουν κάθετα στη δική τους πορεία. Με τον τρόπο αυτό σύντομα προκύπτει ένα νέο, «τοπικό» μοτίβο συμπεριφοράς, και μάλιστα αυθόρμητα. Φυσικά η ύπαρξη του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας διευκολύνει την εμφάνιση σε συντομότερο χρονικό διάστημα αυτού του νέου μοτίβου, όμως αυτό δεν αποτελεί απαραίτητη προϋ-

πόθεση, καθώς δεν είναι σίγουρο ότι όλοι οι οδηγοί ακολουθούν πιστά τις επιταγές του (π.χ. προτεραιότητα από δεξιά), ενώ υπάρχουν αμέτρητα παραδείγματα όπου η νέα κατάσταση ισορροπίας εμφανίζεται χωρίς ουσιαστικά κανένα κανόνα οδικής συμπεριφοράς (π.χ. Καλκούτα, Ινδία). Τέλος, σε ό,τι αφορά την κλιμάκωση, είναι φανερό πως, ενώ κατά προσέγγιση μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος χρόνος για μια συγκεκριμένη απόσταση κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες, με βάση τη μέση ωριαία ταχύτητα από ένα μεγάλο πλήθος οχημάτων στην ίδια διαδρομή, εντούτοις είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί επακριβώς ο χρόνος που χρειάζεται ένα συγκεκριμένο αυτοκίνητο, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, για να διανύσει την ίδια διαδρομή. Με άλλα λόγια, σε μακροσκοπική κλίμακα το σύστημα είναι προβλέψιμο, ενώ σε μικροσκοπική κλίμακα εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις από τη μέση συμπεριφορά, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι σε κάποιο άλλο πολύπλοκο σύστημα ή κλιμάκωση δεν εμφανίζεται με ακριβώς αντίστροφο τρόπο (προβλέψιμο τοπικά, απρόβλεπτο συνολικά).

Τα παραπάνω αποτελούν τα τρία πιο σημαντικά, αλλά όχι μοναδικά, χαρακτηριστικά πολύπλοκων συστημάτων. Η

ύπαρξη και των τριών δεν συνιστά απαραίτητη συνθήκη για τον χαρακτηρισμό κάποιο συστήματος ως «πολύπλοκου» με τη μαθηματική έννοια, όμως η ύπαρξη έστω και ενός από τα παραπάνω στοιχεία είναι ικανή (κατά περίπτωση) να οδηγήσει σε αυτό που ονομάζεται «πολύπλοκη» συμπεριφορά. Επομένως, η μελέτη κάθε μιας από τις παραπάνω ιδιότητες ξεχωριστά αποτελεί ιδιαίτερο διεπιστημονικό πεδίο, το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία που συνδυάζουν φαινομενικά ανεξάρτητες επιστήμες, όπως για παράδειγμα την Κοινωνιολογία (συμπεριφορά ομάδων) με τη Βιολογία (εξελικτική διαδικασία) και την Πληροφορική (νηροσοφική σμήνους).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια των πολύπλοκων συστημάτων συγγέεται συχνά με τις έννοιες των χαστικών ή των τυχαίων διαδικασιών. Στην πραγματικότητα πρόκειται για έννοιες αρκετά συναφείς, τόσο ως προς τον ορισμό όσο και ως προς τον τρόπο που εμφανίζονται στην πράξη. Στο ένα άκρο βρίσκονται τα ντετερμινιστικά ή αλλιώς πλήρως προβλέψιμα συστήματα, όπου οι εσωτερικές διεργασίες μπορούν να διατυπωθούν με ακρίβεια ως μαθηματικά μοντέλα και η εξέδός μπορεί πάντα να υπολογιστεί με βάση την αντίστοιχη είσοδο. Στο αντίθετο άκρο βρίσκονται τα μη-ντετερμινιστικά ή στοχαστικά συστήματα, όπου οι εσωτερικές διαδικασίες είναι εντελώς τυχαίες και κατά συνέπεια η συμπεριφορά τους είναι κατά περίπτωση εντελώς απρόβλεπτη ή, αντίστοιχα, προβλέψιμη μόνο με στατιστικούς όρους (μέση τιμή, διακύμανση, κλπ.). Ανάμεσα σε αυτά τα δύο άκρα κινούνται τα χαστικά συστήματα, τα οποία, να μεν εμφανίζουν φαινομενικά «τυχαία» συμπεριφορά, όμως οι εσωτερικές τους διεργασίες καθορίζονται από συγκεκριμένα και συνήθως πολύ απλά αναδρομικά μαθηματικά μοντέλα και όχι από κάποια πραγματικά τυχαία φυσική διεργασία. Αυτό σημαίνει ότι, δεσφόμενων κάποιων πολύ συγκεκριμένων αρχικών συνθηκών, η συμπεριφορά τους μπορεί πάντα να προβλεφθεί με ακρίβεια. Η περίπτωση των πολύπλοκων συστημάτων φαίνεται να προσέγγιζε μια επιπλέον διάσταση στην παραπάνω ταξινόμηση: πρόκειται πλέον για τριάνωμο (αντί για ευθεία γραμμή), στις κορυφές του οποίου βρίσκονται αντίστοιχα τα αμιγώς ντετερμινιστικά, τα αμιγώς στοχαστικά και τα πο-

λύπλοκα συστήματα. Με άλλα λόγια, ένα σύστημα μπορεί να προκύψει ως «πολύπλοκο» από μια ντετερμινιστική, μια στοχαστική ή ακόμη και μια χαοτική διεργασία. Ο κρίσιμος παράγοντας δεν είναι τόσο η δομή και το «είδος» των επιμέρους συστατικών του, αλλά η κυρίαφη αλληλεπίδραση που εμφανίζουν μεταξύ τους.

Ενα άλλο στοιχείο που συχνά συγχέεται με τη δομή ενός πολύπλοκου συστήματος είναι το κατά πόσον οι εσωτερικές του διεργασίες είναι «γραμμικές» ή όχι, δηλαδή αν ικανοποιούν την αρχή της αναλογίας σε ότι αφορά τη σχέση της εισόδου και εξόδου. Αν και γενικά φαίνεται απλό ως μαθηματικό μοντέλο, ένα γραμμικό σύστημα μπορεί να εμφανίζει χαοτική ή ακόμα και «σχεδόν-τυχαία» συμπεριφορά. Παράδειγμα αποτελούν οι γεννήτριες ψευδοτυχαίων αριθμών (Pseudo-Random Number Generators - PRNG) και ψευδοτυχαίων διυδικίων ψηφίων (Pseudo-Random Bit Generators - PRBG), που χρησιμοποιούνται σε κάθε κρυπτογραφική ηλεκτρονική συσκευή ή λογισμικό και οι οποίες απλά εκμεταλλεύονται συγκεκριμένες ιδιότητες αριθμητικών πράξεων (π.χ. υπόλοιπο ακεραίας διαίρεσης) και τη διασύνδεση της εξόδου με την είσοδο. Με παρόμοιο τρόπο, πολλές χαοτικές συναρτήσεις, οι οποίες δημιουργούν εξαιρετικά σύνθετα γεωμετρικά μοτίβα γνωστά ως fractal, δεν είναι τίποτα περισσότερο από απλές αναδρομικές συναρτήσεις ή ακολουθίες που εμφανίζουν ομοιότητες σε επίπεδο «κλιμάκωσης» (αυτο-ομοιότητα). Ενα σύστημα με μη γραμμικές εσωτερικές διεργασίες είναι ασφύστατα πολύ πιο σύνθετο και δύσκολο να μελετηθεί από ένα αντίστοιχο γραμμικό, όμως αυτό δεν το καθιστά αναγκαστικά «πολύπλοκο» με την έννοια της «αυτο-οργάνωσης», της «ανάδειξης» ή της «κλιμάκωσης».

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ

Αν και η επισταμένη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων αποτελεί αντικείμενο των τελευταίων 10-15 μόλις ετών, η «πολύπλοκότητα» σε φυσικά, μαθηματικά ή κατασκευαστικά μοντέλα υπάρχει ως έννοια εδώ και πολλές δεκαετίες. Ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 40 ο Αμερικανός μαθηματικός Norbert Wiener διατύπωσε για πρώτη

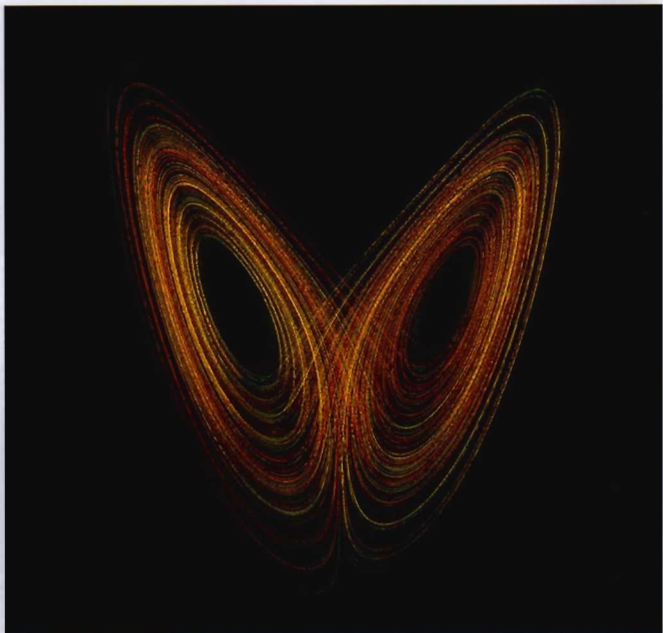
Αν και η επισταμένη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων αποτελεί αντικείμενο των τελευταίων 10-15 μόλις ετών, η «πολύπλοκότητα» σε φυσικά, μαθηματικά ή κατασκευαστικά μοντέλα υπάρχει ως έννοια εδώ και πολλές δεκαετίες.

φορά τη θεωρία της Κυβερνητικής (Cybernetics), τον πρώτο γενικό και ουσιαστικό ορισμό του πεδίου που αργότερα έγινε πιο συγκεκριμένο και γνωστό ως Θεωρία Ελέγχου, και η οποία σήμερα αποτελεί τη θεωρητική βάση κάθε συστήματος αυτοματισμού ανοικτού ή κλειστού βρόχου. Ο ορισμός αυτός είναι εξαιρετικά σημαντικός, όχι μόνο γιατί οριοθετεί την έννοια του «συστήματος» ως ένα περιβάλλον με «εισόδους» (ερεθίσματα) και «εξόδους» (ενέργειες-δράσεις), αλλά και γιατί η έννοια της «ανάδρασης»

(feedback), ή αλλιώς της ανατροφοδότησης μέρους της εξόδου στην είσοδο, αποτελεί το κύριο θεμεριώδες εργαλείο μοντελοποίησης της «αυτο-διόρθωσης» ενός συστήματος. Με άλλα λόγια, το ίδιο το σύστημα διαπιστώνει, μετρά, διορθώνει και «μαθαίνει» από τα λάθη του, βελτιώνοντας σταδιακά τη συμπεριφορά του ως προς ένα συγκεκριμένο «βέλτιστο» σημείο αναφοράς. Ακριβώς η ίδια αρχή εφαρμόζεται τόσο στη σχεδίαση ενός απλού αυτοματισμού πλέρωσης μιας δεξαμενής με νερό, όσο και στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστή-



Η μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ) που προσομοιώνουν τις βασικές λειτουργίες ενός πραγματικού βιολογικού εγκεφάλου, ανέδειξε τα «πολύπλοκα» χαρακτηριστικά τους ως ενιαίο σύστημα. Κάθε τεχνητός νευρώνας αποτελείται από ένα σύνολο παραμέτρων (βάρων), οι οποίες συνδυάζονται με αντίστοιχες εισόδους με γραμμικό τρόπο σε ένα στοχαστικό άθροισμα, ενώ η τελική εξόδος υπολογίζεται μέσω μιας εξίσου απλής συνάρτησης ενεργοποίησης. Ενώ η λειτουργία κάθε τεχνητού νευρώνα φαίνεται απλή, εν τούτοις, όταν συνδυάζονται μεταξύ τους, και μάλιστα σε δύο ή περισσότερο συνδυασθέντα επίπεδα, το συνολικό σύστημα μπορεί να «βραδύνει» ένα πλήθος από δύσκολες γνωστικές λειτουργίες, όπως είναι π.χ. η οπτική αναγνώριση σχημάτων ή χαρακτηρισμών ενός χειρόγραφου κειμένου.



Γραφική απεικόνιση του τανυστή Lorenz (Lorenz attractor), ο οποίος αποτελεί τη λύση ενός συστήματος τριών διαφορικών εξισώσεων που αναπαριστά ένα απλοποιημένο ατμοσφαιρικό μοντέλο. Το συγκεκριμένο σύστημα εμφανίζει χαστική συμπεριφορά, δηλαδή εξαιρετική ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες λύσεις να είναι διαφορετικές ακόμα και για ελάχιστα διαφοροποιημένες παραμέτρους, αλλά πάντοτε με την ίδια μορφή τανυστή, που απομimείται την κίνηση των φτερών της πεταλούδας.

ματα ελέγχου αερόσρακν σε ένα αυτοκίνητο.

Το βασικό πρόβλημα με την έννοια του μηχανισμού ανάδρασης είναι πως δημιουργεί ένα σημαντικό παράγοντα μη-προβλεψιμότητας, καθώς η συγκεκριμένη είσοδος δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη ανά πάσα χρονική στιγμή. Πρακτικά, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται στη συμπεριφορά του συστήματος ως «αστάθεια», δηλαδή μη κανονική

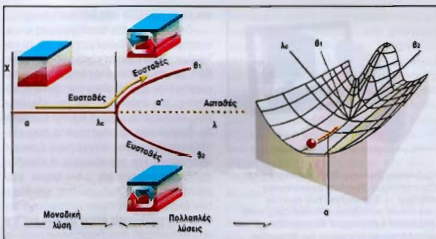
έξοδος, όταν κάποιες παράμετροι λειτουργίας βρεθούν εκτός των προκαθορισμένων ορίων. Το φαινόμενο του «μικροφωνισμού» στις ηχητικές εγκαταστάσεις αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα: ο ελάχιστος θόρυβος που καταγράφεται από τα μικρόφωνα ενισχύεται και αναμεταδίδεται από το σύστημα μεγαφώνων, καθιστώντας στη συνέχεια την καταγραφή του ακόμα πιο ισχυρή σε δεύτερο, τρίτο στάδιο. κ.ο.κ. Τελικά,

αυτό που συμβαίνει είναι τα μεγάφωνα να μεταδίδουν την ελάχιστη αυτή είσοδο, εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές ενισχυμένη, δημιουργώντας τον χαρακτηριστικό ήχο του «μικροφωνισμού». Ένα απλό σύστημα, με τρία πολύ απλά συστατικά μέρη (μικρόφωνο, ενισχυτής, μεγάφωνο), το καθένα με απόλυτα προβλέψιμη λειτουργία, εμφανίζουν μια εντελώς απρόβλεπτη συμπεριφορά όταν λειτουργήσουν μαζί. ακριβώς λόγω

της αλληλεπίδρασης τους (ανάδραση).

Ο οικονομολόγος και φιλόσοφος Friedrich Hayek (1889-1992) χαρακτηρίζει το φαινόμενο αυτό ως εγγενή αδυναμία των ανθρώπων, καθιστώντας σαφή τη διακρίση μεταξύ της ανθρώπινης δυνατότητας πρόβλεψης της συμπεριφοράς «απλών» συστημάτων και της πραγματικής δυνατότητας πρόβλεψης σε «πολύπλοκα» συστήματα, κάτι που συχνά δεν είναι δυνατό. Το βασικό χαρακτηριστικό που καθιστά τη δεύτερη περίπτωση εξαιρετικά δύσκολη για τα ανθρώπινα δεδομένα δεν είναι τόσο το μέγεθος του συστήματος ή ίσως η ελλιπής κατανόηση της λειτουργίας των επιμέρους συστατικών του, αλλά κυρίως η αδυναμία αντίληψης του αποτελέσματος που έχουν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, ο Hayek υποστηρίζει ότι, αν και δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη σε λεπτομερές επίπεδο, παρόμοια συστήματα αργά ή γρήγορα εμφανίζονται ως σύνολο σταθερά «μοτίβα» συμπεριφοράς, τα οποία μπορούν να αναλυθούν και να προβλεφθούν με ακρίβεια σε αρκετές περιπτώσεις.

Συνήθως η πολυπλοκότητα σε επίπεδο μεμονωμένων συστατικών του συστήματος αντιμετωπίζεται διαχρονικά με ένα και μόνο τρόπο: την αφαίρεση ή έστω τη μείωση των απρόβλεπτων παραγόντων. Στη Θεωρία Συστημάτων αυτό σχεδόν πάντα σημαίνει δύο επιμέρους στάδια, που αποτελούν και τις απαραίτητες προϋποθέσεις: (α) το σύστημα μελετάται μόνο τοπικά, δηλαδή σε μια συγκεκριμένη μικρή κλίμακα μεγέθους ή χρόνου, και (β) σε αυτή την κλίμακα εφαρμόζονται γραμμικές προσεγγίσεις. Με το πρώτο στάδιο διασφαλίζεται ότι τα τυχόν πολύπλοκα φαινόμενα ελαχιστοποιούνται, καθώς οι αλληλεπιδράσεις είναι ευκολότερο να ελεγχθούν και να προβλεφθούν. Με το δεύτερο στάδιο διασφαλίζεται ότι τα απαραίτητα μαθηματικά που απαιτούνται για τη λεπτομερή σχεδίαση του συστήματος είναι σχετικά απλά και ελέγχσιμα, τόσο ως προς την ορθότητα, όσο και ως προς την πρακτική εφαρμογή τους. Έτσι, στο παράδειγμα του κυκλοφοριακού δικτύου, ένας τροχονόμος ρυθμίζει την κυκλοφορία σε μια διασταύρωση λαμβάνοντας υπόψη σχεδόν αποκλειστικά το τι συμβαίνει στους δρόμους της διασταύρωσης όπου βρίσκεται, δηλαδή σε σχέση με τη ροή οχημάτων με τα οποία έχει άμεση οπτική επαφή. Αν πρέπει να λάβει υπόψη του ε-



Χημاتيη αναπαράσταση της μετάπτωσης ενός πολύπλοκου συστήματος από μια κατάσταση ισορροπίας σε δύο (ή περισσότερες) άλλες καταστάσεις ισορροπίας, με σφαιρική κάψα «γεγονός» σημαντικής αμσασθεροποίησης του. Η τροχιά α αντιστοιχεί στην αρχική ισορροπία (σταθερή τροχιά), ενώ το «γεγονός» λc στο σημείο αμσασθεροποίησης (αρχή ανηφορικής κλίσης). Οι τροχίες β1 και β2 αποτελούν δύο ελξίου πθάνες επακόλουδες σταθερές καταστάσεις. Η διακεκομμένη τροχιά α' αναπαριστά τη θεωρητικά πθάνη, αλλά σαστάθι κατάσταση μετά το λc που, φανερσνικά τουλάχιστον, ίσως να αποκρούεται εντελώς το ότι η πρόεκταση της τροχιάς α δεν είναι πλέον σταθερή. Πρακτικά, η μετάπτωση του συστήματος σε ένα νέο τρόπο συμπεριφοράς (τροχιά β1 ή β2) γίνεται αντιληπτή ως κάτι «ανεξήγητο», δηλαδή εξαιρετικά δύσκολο να ερμηνευτεί, καθώς το σημείο αμσασθεροποίησης λc συχνά δεν είναι παρατηρήσιμο.

Συνήθως η πολυπλοκότητα σε επίπεδο μεμονωμένων συστατικών του συστήματος αντιμετωπίζεται διαχρονικά με ένα και μόνο τρόπο: την αφαίρεση ή έστω τη μείωση των απρόβλεπτων παραγόντων.

πιπλέον το τι συμβαίνει σε άλλες γειτονικές διασταυρώσεις, το πρόβλημα γίνεται αρκετά δυσκολότερο. Σε ό,τι αφορά τη γραμμικότητα, ο περιορισμός αυτός έχει σχέση κυρίως με την απλότητα και τους περιορισμούς των μαθηματικών μοντέλων επίλυσης των αντίστοιχων προβλημάτων, αλλά και με την εγγενή ικανότητα του ανθρώπου να σκέπτεται με βάση αναλογίες: διπλάσια ροή σημαίνει διπλάσιο πλήθος οχημάτων, άρα διπλάσιο χρόνο κυκλοφορίας στο ρεύμα, κ.ο.κ.

Ο μηχανισμός ανάδρασης, καθώς και η αναδρομικότητα, αποτελούν τις απλούστερες, αλλά όχι μοναδικές, μορφές αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους συστατικών ενός συστήμα-

τος, καθώς αφορούν αποκλειστικά και μόνο τη διασύνδεση της εξόδου με την είσοδο. Ο κύριος παράγοντας αλληλεπίδρασης στα πολύπλοκα συστήματα είναι συνήθως οι εσωτερικές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των επιμέρους συστατικών του συστήματος. Έτσι, ενώ εξωτερικά ένα πολύπλοκο σύστημα παρουσιάζει συχνά μια φαινομενικά στατική και προβλέψιμη κατάσταση, στην πραγματικότητα η ισορροπία αυτή είναι έτοιμη να καταρρεύσει, οδηγώντας το σύστημα σε μια σημαντικά διαφορετική και συχνά «απρόβλεπτη» μετάπτωση της συμπεριφοράς του, μέχρις ότου βρεθεί και πάλι κάποια στιγμή σε μια νέα, διαφορετική κατάσταση ισορροπίας.



Πρόσφατα (Ιούλιος 2012) ερευνητές στο Πανεπιστήμιο Stanford ανακοίνωσαν επίσημα τη δημιουργία του πρώτου «εικονικού κυττάρου» (Virtual Cell), ενός ψηφιακού οργανισμού βασισμένου εξ ολοκλήρου σε λογισμικό και δεδομένα. Είναι η πρώτη φορά που υλοποιείται με επιτυχία μια τόσο λεπτομερής και ρεαλιστική προσομοίωση ενός ολόκληρου κυττάρου σε Η/Υ. Το σημαντικότερο εύρημα της συγκεκριμένης προσπάθειας είναι η ανακάλυψη και παρατήρηση διεργασιών που συμβαίνουν στο σωστήριο του κυττάρου και που μέχρι σήμερα δεν γίνονταν άμεσα αντιληπτές με κανένα τρόπο.

Μολονότι τα πολύπλοκα συστήματα παρουσιάζουν γενικά εξαιρετικά δυσκολία όσον αφορά την πλήρη μαθηματική μοντελοποίησή τους, η λεπτομερής προσομοίωση του τρόπου λειτουργίας τους αποτελεί κατά κανόνα ένα σημαντικό ευκολότερο εγχείρημα.

ΓΙΑΤΙ ΕΙΝΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ Η ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ;

Η μελέτη συστημάτων και διεργασιών που εμφανίζονται ως «πολύπλοκα», δηλαδή εμπεριέχουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό τα τρία παραπάνω βασικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό αλλά και τεχνολογικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Ενώ μέχρι τώρα παρόμοια συστήματα χαρακτηρίζονταν απλά ως υπερβολικά σύνθετα ή εν γένει πολύ δύσκολα να αναλυθούν πλήρως λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων, σήμερα εστιμίζουμε από διάφορους τομείς προσεγγίζοντας το ζήτημα με νέα οπτική

και νέα εργαλεία στη διάθεσή τους.

Οι λόγοι για την αναθέρμανση του επιστημονικού ενδιαφέροντος για τα πολύπλοκα συστήματα είναι κυρίως τρεις. Κατ' αρχήν η πολυπλοκότητα, όπως περιγράφεται στο πλαίσιο της αυτο-οργάνωσης, της ανάδειξης και της κλιμάκωσης, καθίσταται ολοένα και πιο εμφανής σε διεργασίες και συστήματα που εξετάζονται ως μέρος σύγχρονων έργων ή υπηρεσιών. Για παράδειγμα, η ακριβής πρόβλεψη καιρού αποτελεί πλέον απαραίτητη προϋπόθεση για την ασφάλεια των όλο και πυκνότερων μεταφορών (ειδικά των ενσέρων), όπως επίσης για την αποδοτικότερη παραγωγή γεωργικών αγαθών και ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Εξίσου κρίσιμη είναι η δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισης στα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας ή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όπως επίσης και σε μια σειρά συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου. Καθώς τα αντίστοιχα προβλήματα γίνονται όλο και πιο σημαντικά σε καθημερινή βάση, ο όγκος και η ακρί-

βοποίηση του τρόπου λειτουργίας τους αποτελεί κατά κανόνα ένα σημαντικό ευκολότερο εγχείρημα. Αυτό συμβαίνει επειδή ακριβώς η πολυπλοκότητα στη συμπεριφορά τους δεν οφείλεται τόσο στην εξαιρετικά σύνθετη δομή τους σε επίπεδο τοπικό ή ανά στατιστικό μέρος, αλλά περισσότερο στον τρόπο αλληλεπίδρασης, δηλαδή στον τρόπο που η συνολική συμπεριφορά του συστήματος αναδεικνύεται αυτόματα από τον συνδυασμό των επιμέρους συστατικών του. Η βασική προϋπόθεση για μια τέτοια προσέγγιση «προσομοίωσης» (αντί αναλυτικής επίλυσης-πρόβλεψης) είναι να υπάρχει η αντίστοιχη τεχνολογική δυνατότητα, κυρίως σε ό,τι αφορά υπολογιστικούς πόρους και το κατάλληλο λογισμικό. Για παράδειγμα, η αμερικανική υπηρεσία παρακολούθησης τυφώνων (Storm Prediction Center – SPC/NWS) προβλέπει σε καθημερινή βάση την εμφάνιση, την εξέλιξη και την πορεία μετακίνησης κάθε σημαντικής τροπικής καταιγίδας και τυφώνα στις ανατολικές και στις δυτικές ακτές των ΗΠΑ. Η ακριβής πρόβλεψη της πορείας ενός τυφώνα, σε συνδυασμό με την ακριβεία του μεγέθους του (ισχύς σε κλίμακα F), αποτελεί το κρίσιμο στοιχείο που καθορίζει την ασφάλεια και την ίδια τη ζωή εκατομμυρίων χιλιάδων ανθρώπων, όπως έγινε φανερό το 2005 με τον τυφώνα Κατρίνα. Τα τροπικά συστήματα τυφώνων αποτελούν ίσως τα πιο ασταθή και πιο απρόβλεπτα ατμοσφαιρικά μοντέλα, αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά κρίσιμα και σημαντικά ως προς την ανάγκη σωστής πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους σε πραγματικό χρόνο. Ενώ μέχρι σήμερα η πλήρης μαθηματική μοντελοποίηση παρόμοιων «πολύπλοκων» φυσικών διεργασιών ήταν ουσιαστικά αδύνατη, σήμερα υπάρχει πλέον η τεχνολογική δυνατότητα της προσεγγιστικής επίλυσής τους με μεγάλη ακρίβεια, μέσω κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης. Παρότι δηλαδή η αναλυτική επίλυση είναι μη εφικτή, τα σημερινά τεχνικά μέσα, κυρίως η χρήση υπερυπολογιστών και κατάλληλων αλγορίθμων (π.χ. Hurricane Weather Research and Forecasting – HWRF), δίνουν τη δυνατότητα εύρεσης ικανοποιητικών προσεγγιστικών λύσεων, με σφάλμα προσέγγισης που συνήθως δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες μίλια σε σχέση με την πρόβλεψη της πορείας ενός τυφώνα (απόκλιση 33-36 μίλια ανά 12 ώρες πρόβλεψης).

βεια πρόβλεψης σε ό,τι αφορά τις απαιτήσεις καθίστανται όλο και πιο καθοριστικοί παράγοντες. Κατά συνέπεια, η στοχευμένη σχεδίαση-έλεγχος των αντίστοιχων συστημάτων και η λεπτομερής κατανόηση της «πολυπλοκότητας» τους, αποτελούν πλέον απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο.

Ενας δεύτερος παράγοντας που εννοεί την αναθέρμανση του ενδιαφέροντος σχετικά με τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων αποτελεί το σημερινό τεχνολογικό επίπεδο και τα αντίστοιχα μέσα που υπάρχουν πλέον διαθέσιμα. Μολονότι τα πολύπλοκα συστήματα παρουσιάζουν γενικά εξαιρετικά δυσκολία όσον αφορά την πλήρη μαθηματική μοντελοποίησή τους, η λεπτομερής προ-

Ένας τρίτος παράγοντας που ευνοεί σήμερα την ανάπτυξη της έρευνας η οποία συνδέεται με τα πολύπλοκα συστήματα είναι οι σύγχρονες εξελίξεις σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Η Συστημική Βιολογία ασχολείται με την ολιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς των έμβιων οργανισμών, δηλαδή τη μελέτη των σύνθετων αλληλεπιδράσεων που δίνουν έμφαση στις διεργασίες αυτο-οργάνωσης και ανάδειξης χαρακτηριστικών ανώτερου επιπέδου (π.χ. εξειδίκευση γονιδίων ή κυττάρων σε έναν οργανισμό), αντί στις επιμέρους βιοχημικές αντιδράσεις που παρατηρούνται αποκλειστικά σε τοπική κλίμακα. Ένα κύτταρο αποτελεί από μόνο του ένα πολύπλοκο σύστημα, καθώς τα επιμέρους συστατικά του, δηλαδή τα μακρομόρια, οι πρωτεΐνες, τα ένζυμα κλπ. δεν επιτρέπουν την πλήρη περιγραφή της λειτουργίας του ως σύνολο απλά και μόνο μελετώντας ξεχωριστά κάθε ένα από τα συστατικά αυτά. Μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχε η τεχνολογική δυνατότητα της πλήρους προσομοίωσης ενός κυττάρου, με τρόπο παρόμοιο με εκείνον της προσομοίωσης τυφώνων.

Τον περασμένο Ιούλιο (2012) ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Stanford ανακοίνωσαν επίσημα τη δημιουργία του πρώτου «εικονικού κυττάρου» (Virtual Cell), ενός ψηφιακού οργανισμού βασισμένου εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό και δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα 900 σχετικών επιστημονικών εργασιών. Είναι η πρώτη φορά που υλοποιείται με επιτυχία μια τόσο λεπτομερής και ρεαλιστική προσομοίωση ενός ολοκληρωμένου κυττάρου σε Η/Υ. Το εικονικό αυτό κύτταρο ενσωματώνει 28 βιοχημικές λειτουργίες και όλα τα συστατικά στοιχεία ενός πραγματικού κυττάρου βακτηριδίου (*Mycobacterium genitalium*), συμπεριλαμβανομένων των DNA, RNA, πρωτεϊνών, κλπ. Το συγκεκριμένο βακτηρίδιο επιλέχθηκε λόγω του μεγέθους του, καθώς το κύτταρό του αποτελεί το μικρότερο στο είδος του, ενώ το DNA του περιλαμβάνει μόλις 525 γονίδια. Για την προσομοίωση ενός και μόνο κύκλου λειτουργίας του κυττάρου απαιτούνται σήμερα 10 ώρες παράλληλης επεξεργασίας σε 128 τυπικούς Η/Υ. Σε αντίθεση, το DNA του περισσότερο γνωστού βακτηριδίου *E. coli* περιλαμβάνει 4.288 γονίδια, ενώ το ανθρώπινο DNA τουλάχιστον 20.000 γονίδια. Το σημαντικότερο εύρημα της συγκεκριμένης προσπάθειας είναι η ανακάλυψη και πα-

ρατήρηση διεργασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κυττάρου και που μέχρι σήμερα δεν γίνονταν άμεσα αντιληπτές με κανένα τρόπο. Στάχος των ερευνητών είναι, με την πάροδο των ετών και την πλήρη χαρτογράφηση του ανθρώπινου γονιδιώματος, να ξεκινήσει σταδιακά η προσομοίωση αντίστοιχων κυτταρικών διεργασιών του ανθρώπινου σώματος, καθώς είναι βέβαιο πως και εκεί συμβαίνουν παρόμοιες διαδικασίες, οι οποίες σήμερα είναι μόνο μερικής ή ελάχιστα παρατηρήσιμες.

ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΕΣ

Παρόλο που η λεπτομερής προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων αποτελεί μια χρήσιμη εναλλακτική επιλογή για τη μελέτη και την προσεγγιστική περιγραφή εξαιρετικά σύνθετων αλληλεπιδράσεων, η σχεδίαση και κατασκευή αντίστοιχων συστημάτων ελέγχου, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας τους σε όλο το προ-

βλεπόμενο πεδίο καταστάσεών τους, εξακολουθεί να αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο ζήτημα από κάθε άποψη. Για την κατασκευή ενός δικτύου μεταφοράς ενέργειας, ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου ή ενός συγκοινωνιακού δικτύου γραμμών τραίνου, η διαδικασία «δοκιμών» προσομοίωσης χρησιμεύει μόνο ως εργαλείο επικύρωσης του σχεδίου. Η ίδια η σχεδίαση, όμως, παραμένει πρόβλημα αναλυτικής επίλυσης των ίδιων διαδικασιών, δηλαδή της εύρεσης των κατάλληλων παραμέτρων έτσι ώστε το τελικό σύστημα, ως σύνολο, να μη ξεφεύγει από ένα αυστηρά καθορισμένο σύνολο τιμών ή καταστάσεων, καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να έχει συχνά καταστροφικές συνέπειες. Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τη Θεωρία Συστημάτων, εφόσον τα αντίστοιχα συστήματα και διεργασίες εμφανίζουν εγγενή «πολυπλοκότητα» που δεν μπορεί να αποφευχθεί ή να αντιμετωπιστεί διαφορετικά, η συνθήκευση προσέγγιση σε τεχνολογικό και κατασκευαστικό επίπε-



Ο Αμερικανός μαθηματικός Norbert Wiener (1894-1964) υπήρξε ένας από τους σημαντικότερους θεμελιωτές της γενικότερης έννοιας της Κυβερνητικής καθώς και της σύγχρονης Θεωρίας Ελέγχου, η οποία σήμερα αποτελεί τη θεωρητική βάση κάθε συστήματος αυτοματισμού.



Για πολλά χρόνια οι επιστήμονες θεωρούσαν «εξαιρέση» την ελεγκτική επίδραση του ιδιαίτερου τύπου καμουφλάζ στις ζέβρες, καθώς η κλασική θεωρία της «επιβίωσης του ικανότερου» δεν μπορεί να εξηγήσει το πώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πλεονέκτημα έναντι των αρπακτικών. Όμως, η σύγχρονη Εξελικτική Βιολογία ερμηνεύει το φαινόμενο αυτό με βάση το ότι, όταν οι ζέβρες βρίσκονται σε πολύπληθές κοπάδι και τρέχουν για να ξεφύγουν, το είδος αυτό του καμουφλάζ δημιουργεί εξαιρετική δυσκολία για τον θηρευτή να εντοπίσει την προσοχή του και να παρακολουθήσει κάποιο μεμονωμένο θήραμα. Πρακτικά, κάποιο χαρακτηριστικό που φαίνεται να αποτελεί μενέκτημα για ένα μεμονωμένο άτομο (μικρά κλίμακα), όταν συνδυάζεται (αυτο-οργανωθεί) με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά άλλων ατόμων σε κοπάδι, τότε μετατρέπεται (αναδεικνύεται) σε πλεονέκτημα για ολόκληρο το κοπάδι (μεγάλη κλίμακα).

δο είναι διαχρονικά η απλοποίηση του προβλήματος, περιορίζοντας σε επίπεδο κλίμακας ή/και αλληλεπιδράσεων, τη δομή και τη λειτουργία του. Αυτό σχεδόν πάντα σημαίνει αύξηση της «τοπικότητας» και «γραμμικοποίηση» του συστήματος κατά προσέγγιση, με κόστος την ακρίβεια του τελικού μοντέλου.

Όμως, η προσέγγιση πραγματικών διεργασιών μέσω «τοπικότητας» και μέσω «γραμμικών» μοντέλων συχνά αποδεικνύεται κάθε άλλο παρά ικανοποιητική. Ήδη από τη δεκαετία του 70 διατυπώθηκε για πρώτη φορά η Θεωρία Καταστροφών και λίγο αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 80, η Θεωρία του Χάους για δυναμικά συστήματα, ακόμα και για γραμμικές διεργασίες. Οι δύο αυτές έννοιες, από περιέργως μαθηματικές θεωρίες, έγιναν γνωστές στο ευρύ κοινό μέσω παραδειγμάτων όπως αυτό του «φαινομένου της πεταλούδας»: μπορεί το φτεροπόνημα μιας πεταλούδας στη μια άκρη του πλανήτη να προκαλέσει ένα καταστρεπτικό μωσαίο στην άλλη άκρη του; Η απάντηση είναι πως, θεωρητικά, αυτό όντως μπορεί να συμβεί. Ο

κρίσιμος παράγοντας εδώ είναι η κατάσταση ισορροπίας στην οποία βρίσκεται το σύστημα, στη συγκεκριμένη περίπτωση το ατμοσφαιρικό. Δηλαδή, εξαρτάται από το κατά πόσον το ποσοστό υγρασίας και θερμοκρασίας βρίσκονται ακριβώς σε εκείνο το οριακό σημείο όπου η παραμικρή αύξηση της τιμής τους, για παράδειγμα με μια ελάχιστη ριπή ανέμου, μπορεί θεωρητικά να προκαλέσει μια αλυσωδής αντίδραση που υποτίθεται ότι είναι δυνατόν να καταλήξει στη δημιουργία ολόκληρου μωσαίου, αρκετά οργότερα, πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά.

Στην πραγματικότητα, τα ατμοσφαιρικά συστήματα στον πλανήτη λειτουργούν πολύ πιο τοπικά, παρόμοια με φαινόμενα θεωρούνται εντελώς άπιστα. Όμως, η βασική αρχή της «ασταθούς ισορροπίας» ενυπάρχει και εμφανίζεται σε πολλά χαιρικά ή πολύπλοκα συστήματα. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το φαινόμενο του σωρού της άμμου: Οσο περισσότερη άμμος τοποθετείται αργά και σταδιακά στην κορυφή, ο σωρός αυξάνει σε ύψος αλλά όχι

και σε διάμετρο, με συνέπεια να αυξάνεται σταδιακά η γωνία κλίσης. Μέχρι κάποιο όριο, η γωνία συνεχίζει να αυξάνεται χωρίς πλευρικές καταλοισθήσεις, έως ότου κάποια στιγμή, μοζικά, μεγάλες ποσότητες άμμου κατρακυλούν προς τη βάση, μειώνοντας απότομα και σε μεγάλο βαθμό τη γωνία κλίσης. Μάλιστα, αν το πείραμα συνεχιστεί, είναι μάλλον απίθανο η επόμενη καταλοισθήση να συμβεί ακριβώς στην ίδια οριακή τιμή της γωνίας κλίσης. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα κινείται μεν γύρω από μια κατάσταση ισορροπίας, λίγο πάνω ή λίγο κάτω από την οριακή τιμή της γωνίας κλίσης, όμως η ακριβής συμπεριφορά του σωρού σε κάθε μεμονωμένη χρονική στιγμή δεν είναι καθόλου προβλέψιμη. Με μια πιο προσεκτική παρατήρηση είναι εύκολο να διαπιστωθεί το γιατί: η ακριβής γωνία καταλοισθήσης εξαρτάται από την «αλληλεπίδραση» των κόκκων της άμμου, συγκεκριμένα από το μέγεθός τους, το πόσο λειασμένη ή ομαλή είναι η επιφάνειά τους, το ποσοστό υγρασίας που τους περιβάλλει, κλπ. Μάλιστα, τα χαρακτηριστικά αυτά δεν είναι όμοια για όλους τους κόκκους, δηλαδή υπάρχει διαφοροποίηση των στοιχείων που αλληλεπιδρούν. Με άλλα λόγια, μια φαινομενικά τόσο απλή φυσική διαδικασία εμφανίζει ουσιαστικά όλα τα χαρακτηριστικά ενός πολύπλοκου συστήματος: αυτο-οργάνωση (διατήρηση σχήματος σωρού), ανάδειξη (διαδικασία «διόρθωσης») και κλιμάκωση (μακροσκοπικά σταθερή γωνία κλίσης, συνήθως μεταξύ 22 και 33 μοιρών). Αυτό το είδος η ασταθής ισορροπία, σε πολύπλοκα ή χαιρικά συστήματα, ονομάζεται «επιτηνόμενη ισορροπία» (punctuated equilibrium) και αποτελεί τη μαθηματική ερμηνεία του φαινομένου που περιγράφει παραστατικά το παράδειγμα του φτεροπόνηματος της πεταλούδας και της πρόκλησης μωσαίου.

Ένα εξαιρετικά σημαντικό σύγχρονο εύρημα των επιστημόνων σε αυτό το πεδίο είναι πως παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται και αναλύονται πλέον ολο και περισσότερο, από την άποψη των χαρακτηριστικών των πολύπλοκων συστημάτων, σε όλες σχεδόν τις πτυχές της σύγχρονης κοινωνίας. Στις χρηματιστηριακές συναλλαγές, αναφέρεται το λεγόμενο «σημείο Minsky» (Minsky moment): είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία η υπερτίμηση ενός αγαθού ή μιας μετοχής ξεπερνά κάποιο άγνωστο αλλά πολύ συγκεκριμένο οριακό τιμή,

πέραν της οποίας οι κάτοχοι του συγκεκριμένου αγαθού ή μετοχής αρχίζουν να πωλούν το χαρτοφυλάκιό τους, ξεκινώντας μια αυτο-τροφοδοτούμενη, προοδευτικά αυξανόμενη τάση πώλησης του ίδιου τίτλου από άλλους κάτοχους του, καταναλώνοντας προς την εφαινετή μαζική κατολίπωση στον σωρό της άμμου. Παρόμοια, η έννοια της εστιγμένης ισορροπίας ερμηνεύει και τη φαινομενικά ακανόνιστη κλαδογένεση ειδών στη Βιολογία και στη Παλαιοντολογία: ενώ οι επιστήμονες περίμεναν να ανακαλύπτουν απολιθώματα που να καταδεικνύουν ομαλή μετάβαση από το ένα

κτύπων, είτε για την αποτελεσματική διαχείριση της μεταφοράς αγαθών παγκοσμίως.

Προς το παρόν, η σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία μπορεί να αντιμετωπίσει τα παραπάνω προβλήματα μόνο με έμμεσο τρόπο. Η σχεδίαση και κατασκευή πολύπλοκων συστημάτων από τον άνθρωπο (π.χ. δίκτυα μεταφορών) πραγματοποιείται προσεγγιστικά βάσει πολλών παραδοχών και απλοποιήσεων, τυπικά περιορίζοντας την κλίμακα και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται, ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο (αλλά όχι μηδενίζοντας) τις

- (7) *Science Daily*, **COMPLEX SYSTEMS SCIENCE: HOW DO MATH AND INTUITION HELP US UNDERSTAND WHOLE SYSTEMS?**, 24 Nov 2008, <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/11/081122092708.html>
- (8) P. F. Hanshaw, M. McGinley, C. M. Hogan: **COMPLEX SYSTEMS**, 22 Nov 2010, http://www.eoearth.org/article/Complex_systems?topic=49492
- (9) G. Nicolis, C. Rouvès-Nicolis: **COMPLEX SYSTEMS, Scholarpedia**, 2 (11): 1473, 2007, doi:10.4249/scholarpedia.1473, http://www.scholarpedia.org/article/Complex_systems
- (10) Michael Barnsley: **FRACTALS EVERYWHERE**, Academic Press, 1988.
- (11) Michael Le Page: **EVOLUTION MYTHS: NATURAL SELECTION LEADS TO EVER GREATER COMPLEXITY**, *New Scientist*, 16 Apr 2011, <http://www.newscientist.com/article/dn13617-evolution-myths-natural-selection-leads-to-ever-greater-complexity>
- (12) Victor MacGill: **COMPLEXITY PAGES: A NON-TECHNICAL INTRODUCTION TO THE NEW SCIENCE OF CHAOS AND COMPLEXITY (INTRODUCTION)**, *London School of Business and Finance*, 26 Mar 2011, <http://complexity.orconhosting.net.nz/intro.html>
- (13) Victor MacGill: **COMPLEXITY PAGES: A NON-TECHNICAL INTRODUCTION TO THE NEW SCIENCE OF CHAOS AND COMPLEXITY (A HISTORY OF CHAOS AND COMPLEXITY)**, *London School of Business and Finance*, 26 Mar 2011, <http://complexity.orconhosting.net.nz/history.html>
- (14) Victor MacGill: **COMPLEXITY PAGES: A NON-TECHNICAL INTRODUCTION TO THE NEW SCIENCE OF CHAOS AND COMPLEXITY (COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS)**, *London School of Business and Finance*, 26 Mar 2011, <http://complexity.orconhosting.net.nz/cas.html>
- (15) J. R. Karr, J. C. Sanghvi, D. N. Macklin, M. V. Gutschow, J. M. Jacobs, B. Bollival, N. Assad-Garcia, J. I. Glass, M. W. Cover: **A WHOLE-CELL COMPUTATIONAL MODEL PREDICTS PHENOTYPE FROM GENOTYPE**, *Cell*, Vol. 150, No. 2, 389-401, 20 July 2012, doi:10.1016/j.cell.2012.05.044
- (16) George Mobus: **LIMITS TO COMPLEXITY - TECHNOLOGY: THE GREAT SALVATION?**, *March 2011*, http://questionseverything.typepad.com/question_everything2011/03/index.html
- (17) D. Chu, R. Strand, R. Fjelland: **THEORIES OF COMPLEXITY**, *Complexity*, vol. 8, no. 3, 2003.
- (18) G. D. Snooks: **A GENERAL THEORY OF COMPLEX LIVING SYSTEMS: EXPLORING THE DEMAND SIDE OF DYNAMICS**, *Complexity*, vol. 13, no. 6, July/August 2008.
- (19) John L. Casti: **REALITY RULES: THE FUNDAMENTALS (VOLUME I)**, *Wiley-Interscience*, Aug 1992.
- (20) John L. Casti: **REALITY RULES: THE FRONTIER (VOLUME II)**, *Wiley-Interscience*, Aug 1992.

Υπάρχει άραγε τρόπος τα πολύπλοκα συστήματα να σχεδιαστούν σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές και να έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά, όπως απαιτείται πάντοτε στις ανθρώπινες κατασκευές;

είδος οργανισμού σε άλλα, οι μεταβολές αυτές συνήθως παρουσιάζονται ωρεωμένες σε μικρό χρονικό διαστήματα «σπότμος εξέλιξης», περιβαλλόμενες από μεγάλα χρονικά διαστήματα μικρών μεταβολών. Τόσο η εξέλιξη των ειδών, όσο και η συμπεριφορά των χρηματιστηρίων σήμερα, φαίνεται να διέπονται εσωτερικά από παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς τη συνθετότητα της συμπεριφοράς τους, η οποία παρόλα αυτά είναι απόλυτα αναμενόμενη σύμφωνα με τις ιδιότητές τους ως πολύπλοκων συστημάτων.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Πού καταλήγει, λοιπόν, η μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων; Μπορεί η σύγχρονη επιστήμη να δώσει απαντήσεις σε ό,τι αφορά την πραγματική δομή και τη συμπεριφορά τους; Υπάρχει τρόπος αυτά να σχεδιαστούν σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές και να έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά, όπως απαιτείται πάντοτε στις ανθρώπινες κατασκευές; Οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα αποτελούν σε μεγάλο βαθμό τους κύριους στόχους, σε διάφορους κλάδους, είτε πρόκειται για τη μελέτη βιοχημικών διεργασιών σε κυτταρικούς οργανισμούς, είτε για τη σχεδίαση αποδοτικών τηλεπικοινωνιακών δι-

εγγενείς αλληλεπιδράσεις και τη συνθετότητα του τελικού συστήματος ως σύνολο. Σε δεύτερο στάδιο, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να μελετηθεί μέσω προσομοίωσης για τον έλεγχο της ευστάθειας και των παραμέτρων λειτουργίας του. Όμως, τελικά, τα πολύπλοκα συστήματα και οι ιδιότητές τους είναι κάτι που οι επιστήμονες μόλις τώρα αρχίζουν να κατανοούν πραγματικά. ■

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) *Wikipedia*, **COMPLEX SYSTEMS (article)**, 20 Mar 2011, http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_systems
- (2) *Complexity Science Focus*, **COMPLEXITY SCIENCE (article)**, 26 Mar 2011, <http://www.complexity.eecs.soton.ac.uk>
- (3) *ARC Complex Open Systems Research Network (COSNet)*, **A QUIET REVOLUTION – THE SCIENCE OF COMPLEX SYSTEMS**, Oct 2006, <http://www.science.org.au/nova/094/094key.htm>
- (4) *Center for the Study of Complex Systems*, **THE STUDY OF COMPLEX SYSTEMS**, 26 Mar 2011, <http://cscs.umich.edu/old/complexity.html>
- (5) *Danielle Stevens*: **COMPLEX OR JUST COMPLICATED: WHAT IS A COMPLEX SYSTEM?** (article), 26 Mar 2011, http://www.cairo.au/resources/About-Complex_Systems.html
- (6) *John Finnigan*: **THE SCIENCE OF COMPLEX SYSTEMS**, *Australasian Science*, June 2005.

ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ

ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

30%
ΕΚΠΤΩΣΗ
ΣΤΙΣ ΣΥΝΔΡΟΜΕΣ
+ 2 ΒΙΒΛΙΑ-ΔΩΡΟ!



Άχρηστη θερμότητα

Μια άγνοια πτυχή
της υπερθέρμανσης
του πλανήτη



NEOShield Project

Θωρακίζοντας τη Γη
από τους επικίνδυνους
αστεροειδείς

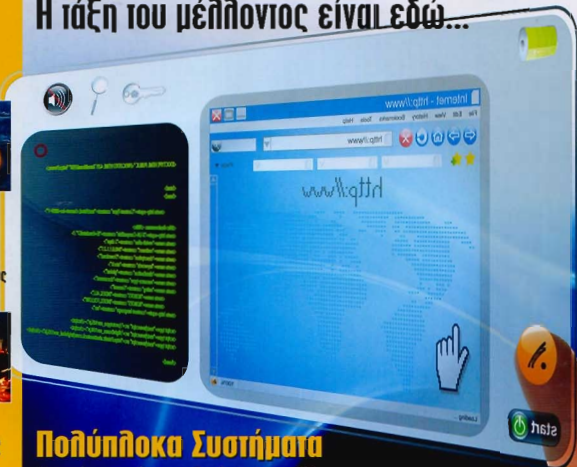


Εκρηκτικές ατμόσφαιρες

Η σθέσιση απειλή

Τηλεκπαίδευση

Η τάξη του μέλλοντος είναι εδώ...



Πολύπλοκα Συστήματα

Μπορεί η επιστήμη να εξηγήσει το απρόβλεπτο;

Αυτοαντιγραφόμενα μόρια

Το «Άγιο Δισκοπότηρο» της Εξελικτικής Βιολογίας

