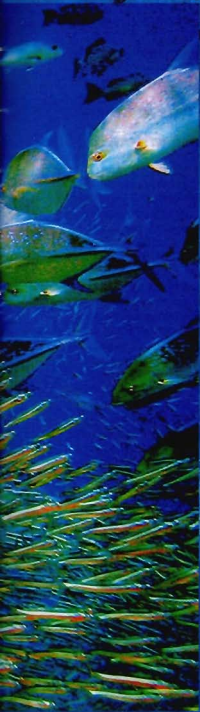




Νοημοσύνη Σμήνους

Από τις «αναθώσιμες» μονάδες στις «έξυπνες» ομάδες



ΧΑΡΗΣ Β. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Ερευνητής Πληροφορικής, M.Sc., Ph.D

Τι σημαίνει «έξυπνο σμήνος»; Πώς εξηγείται η συλλογική νοημοσύνη; Με ποιον τρόπο φαινομενικά «αναλίσιοι» πληθυσμοί ενόμιων, πτηνών, ψαριών, εμφανίζουν απροσδόκητα αποειλεσματική συμπεριφορά και καταφέρνουν να επιβιώνουν πύνοντας προβλήματα που ακόμα και σήμερα είναι εξαιρετικά δύσκολα για την ανθρώπινη επιστήμη; Σίγουρα μια αποικία μυρμηγκιών ή μελισσών δεν γνωρίζει καμία μαθηματική μέθοδο βελτιστοποίησης, κι όμως τα πλάσματα αυτά κατορθώνουν να εντοπίζουν την τροφή, να σηματοδοτούν και να μεταδίδουν στα υπόλοιπα μέλη πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία της, να ανακαλύπτουν την καλύτερη διαδρομή επιστροφής ή την καλύτερη τοποθεσία για τη φωλιά. Μέσα σε αυτή τη φαινομενικά απλή συμπεριφορά τους, υπάρχει μια ενδογενής πολυπλοκότητα που μόλις τώρα αρχίζει να γίνεται πλήρως ανιληπτή.

Η επιστήμη και η τεχνολογία συχνά δημιουργούν την ψευδαίσθηση στον σύγχρονο άνθρωπο ότι σχεδόν όλα τα προβλήματα στη Φύση και στην καθημερινή ζωή έχουν μελετηθεί επαρκώς και δεν κρύβουν πλέον κανένα μυστήριο. Επιπλέον, από τον τρόπο προσέγγισης και μελέτης των πιο σύνθετων προβλημάτων, συχνά δίδεται η εντύπωση ότι μια «αρκούντως καλή» λύση πρέπει αναγκαστικά να είναι σύνθετη στη διατύπωση και στην υλοποίησή της – και μάλιστα όσο πιο σύνθετη, τόσο καλύτερη θεωρητικά. Πράγματι, τις τελευταίες δεκαετίες και με τη βοήθεια της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, πολλά από τα προβλήματα που κάποτε φαίνονταν ανυπέρβλητα σήμερα αποτελούν απλώς ένα από τα πολλά στάδια μιας τυπικής τεχνικής μελέτης. Για παράδειγμα, μέχρι πριν μερικές δεκαετίες ήταν σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί με ακρίβεια το κόστος μεταφοράς αγαθών και καυσίμων μεταξύ κρατών και ηπείρων, συνδυάζοντας παράγοντες όπως η επιλογή κατάλληλου μέσου και βέλτιστων διαδρομών, η αποφυγή όσχημων καιρικών συνθηκών και εμπόλεμων ζωνών, η ζήτηση που συγκεκριμένου αγαθού στον τόπο προορισμού κατά τη χρονική στιγμή της άφιξης (και όχι της αναχώρησης, πολλές εδομάδες πριν). Σήμερα τέτοιου είδους σύνθετα προβλήματα επιλύονται με πολύ ικανοποιητικό τρόπο με τη βοήθεια «έξυπνου» λογισμικού, τεράστιων θάσεων δεδομένων και ισχυρών υπολογιστών.

Παρόλα αυτά, μερικές περιπτώσεις είναι τόσο σύνθετες ή εμπειρεύουν τον παράγοντα του απρόβλεπτου σε τέτοιο βαθμό, ώστε ακόμα και σήμερα τα τελειοποιημένα μέσα που διαθέτουμε και κυρίως ο τρόπος προσέγγισης που εφαρμόζεται αδυνατεί να οδηγήσει σε μια ρεαλιστική και οικονομική λύση. Αντίθετα, παρόμοια προβλήματα και καταστάσεις που συχνά

συναντώνται στη Φύση όχι μόνο επιλύονται πολύ αποτελεσματικά, αλλά επιπλέον αναδεικνύουν τρόπους και ιδιότητες που μόλις τώρα αρχίζουν να γίνονται κατανοητά. Μάλιστα, όταν η λύση προέρχεται από εξαιρετικά απλούς, ως μονάδες, αλλά ταυτόχρονα πολυσύνθετους, ως σύνολο, μηχανισμούς, το ενδιαφέρον δεν είναι μόνο πρακτικό αλλά εξίσου επιστημονικό και θεωρητικό.

ΠΕΡΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΗ «ΚΕΝΤΡΙΚΗ» ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Ακόμα και ένα μικρό παιδί γνωρίζει πώς συμπεριφέρονται, για παράδειγμα, τα μυρμηγκία. Παρατηρεί πώς κυκλοφορούν συντεταγμένα σε συγκεκριμένες διαδρομές, γνωρίζει πώς κτίζουν τις φωλιές τους και πώς «συντονίζονται» μεταξύ τους με κάποιο περίεργο και άορατο τρόπο. Όταν κάπου θρεθεί ένα κομμάτι τροφής, σύντομα γύρω από αυτό θα θρεθούν μυρμηγκία που ολόένα θα αυξάνονται σε αριθμό, ανάλογα με το μέγεθος το κομματιού. Μέσα σε ελάχιστο χρόνο, ένα μονοπάτι θα αρχίσει να σχηματίζεται μεταξύ της τροφής και της φωλιάς τους, μέσω του οποίου σταδιακά θα μεταφέρονται μικρά κομμάτια, με

Ακόμα και ένα μικρό παιδί γνωρίζει πώς συμπεριφέρονται, για παράδειγμα, τα μυρμηγκία. Παρατηρεί πώς κυκλοφορούν συντεταγμένα σε συγκεκριμένες διαδρομές, γνωρίζει πώς κτίζουν τις φωλιές τους και πώς «συντονίζονται» μεταξύ τους με κάποιο περίεργο και άορατο τρόπο.

σταθερή και απαρέγκλιτη ροή. Αν σε κάποιο σημείο της διαδρομής τοποθετηθεί κάποιο εμπόδιο, για παράδειγμα κάποια μεγάλη πέτρα ή μια κοιλότητα με νερό, σε μικρό χρονικό διάστημα τα μυρμηγκία θα έχουν εντοπίσει τη συντομότερη παράκαμψη του εμποδίου, ώστε να επανέλθουν στη βασική διαδρομή τους. Όλα αυτά που φαίνονται αυτονόητα και απλά στην καθημερινότητα, στην πραγματικότητα κρύβουν τόσο σύνθετες και χαρακτηριστικές επιστημονικές ιδέες ώστε μόλις τα τελευταία χρόνια έχει γίνει δυνατό να χρησιμοποιηθούν μερικές σε πρακτικές τεχνολογικές εφαρμογές. Η Deborah M. Gordon, βιολόγος στο Πανεπιστήμιο του Stanford, τονί-

ζει χαρακτηριστικά πως «αν παρατηρήσουμε ένα μεμονωμένο μυρμηγκί που προσπαθεί να ολοκληρώσει κάποια εργασία, μας εκπλήσσει το πόσο αναποτελεσματικό είναι από μόνο του». Και επισημαίνει πως «τα μυρμηγκία δεν είναι έξυπνα. Οι αποικίες όμως είναι».

Το παραπάνω πρόβλημα, δηλαδή η εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού, αποτελεί ένα από τα συχνότερα ζητήματα σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών, από τη διακίνηση αγαθών και καυσίμων, τον έλεγχο κυκλοφορίας των οχημάτων, σε μια πόλη, μέχρι τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών δικτύων και τηλεφωνικών κέντρων. Συνήθως, τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται σε καθαρά μαθηματικό επίπεδο και μοντελοποιούνται με μια σειρά γραμμικών ή επαναληπτικών μοντέλων επίλυσης. Συχνά, όμως, απαιτούν σημαντικές απλοποιήσεις στο αρχικό πρόβλημα ενώ οι λύσεις που υιοθετούνται είναι κατά κανόνα προσεγγιστικές ή/και «τοπικές». Με άλλα λόγια, στην πράξη οι τρόποι επίλυσης που εφαρμόζονται εντοπίζουν μια «αρκούντως καλή» λύση στο πρόβλημα, ικανοποιώντας μια σειρά από περιορισμούς, αλλά δεν υπάρχει εγγύηση ότι αυτή η λύση είναι μοναδική, ούτε η βέλτιστη σε όλες τις περιπτώσεις. Φυσικά, η προσέγγιση αυτή λειτουργεί αποτελεσματικά σε πρακτικό επίπεδο, όταν το ζητούμενο είναι ακριβώς μια τέτοια (οποιαδήποτε) λύση, όμως όταν το μέγεθος και η συνθετότητα του προβλήματος αυξάνονται, παρόμοιες μεθοδολογίες παύουν να λειτουργούν ουσιαστικά.

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων τα οποία έχουν την ικανότητα να «μαθαίνουν» από παραδείγματα (Μη-



Το σμήνη πτηνών, ειδικά των είδων που μεταναστεύουν, έχουν εξελίξει τις πτητικές τους ικανότητες σε τέτοιο βαθμό, ώστε ακολουθούν αυθόρμητα σχηματισμούς με βέλτιστη αεροδυναμική αντίσταση, αναδίδει μέρητα και πρόσανατολισμό με βάση τη συλλογική «οπτική» του μαγνητικού πεδίου της Γης.

χανική Μάθηση - Machine Learning) ή να λειτουργούν με αφαιρετική και συμπερασματική «λογική» (Τεχνητή Νοημοσύνη - Artificial Intelligence), βασισμένα σε μικρό ή μεγάλο βαθμό στον τρόπο που λειτουργεί η ανθρώπινη συλλογιστική. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως σε πολλούς τομείς όπου ο άνθρωπος παράγοντας είτε αποσιάζει εντελώς είτε χρειάζεται μια «δεύτερη γνώμη», όπως για παράδειγμα σε συστήματα Τηλειατρικής, Αυτόματης Διάγνωσης στην Ιατρική, στη Μηχανολογία, κ.ά.

Στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια ορθής λειτουργίας και μη απώλειας δεδομένων, καθώς προσδιορίζει τον αποδοτικότερο τρόπο εγκατάστασης και διαχείρισης των διαδρομών (πάντοτε περιορισμένων) τηλεπικοινωνιακών πόρων του συστήματος. Όταν όμως αυτό αφορά δίκτυα δεκάδων χιλιάδων κόμβων όπως είναι το διαδίκτυο και το σχέδιο διαχείρισης πρέπει να ενημερώνεται δυναμικά και σε ελάχιστο χρόνο σύμφωνα με τις αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος (π.χ. τηλεπικοινωνιακές γραμμές ή κόμβοι εκτός λειτουργίας), ακόμα και αυτές οι «έξυπνες» μέθοδοι επίλυσης αδυνατούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις κάτω από πραγματικές συνθήκες. Πώς λοιπόν είναι δυνατό μια αποικία με δεκάδες χιλιάδες έως και εκατομμύρια μυρμηγκία, τα οποία σαφώς και δεν διαθέτουν μεμονωμένα τον βαθμό «ευφυΐας» ενός τέτοιου αλγορίθμου, να συντονίζονται άψογα και να λειτουργούν ως σύνολο εξαιρετικά κοντά στη βέλτιστη λύση;

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ «ΕΞΥΠΝΟ ΣΜΗΝΟΣ»;

Πολλές φορές το ζήτημα της «ευφυΐας» ενός συστήματος ή ενός οργανισμού συνδέεται με κάποιο αντίστοιχο κεντρικό μηχανισμό ελέγχου και καθορισμού της συμπεριφοράς, ο οποίος είναι σχεδιασμένος και λειτουργεί με «έξυπνο» τρόπο, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό. Σε έναν αυτόματο διακόπτη πλήρωσης μιας δεξαμενής, το «έξυπνο» σύστημα ελέγχου είναι απλά η βαλβίδα πλήρωσης που συνδέεται με κάποιο μηχανισμό ελέγχου της στάθμης. Αντίστοιχα, στον αυτό-

ματο πιλότο ενός αεροσκάφους ο μηχανισμός ελέγχου εμπεριέχεται στο «έξυπνο» λογισμικό της αντίστοιχης μονάδας και στη σύνδεσή της με τα χειριστήρια ελέγχου του ίδιου του αεροσκάφους. Στην περίπτωση των μυρμηγκιών, όμως, τέτοιος κεντρικός μηχανισμός ελέγχου δεν υφίσταται, ούτε τα μεμονωμένα μυρμηγκία διαθέτουν τέτοιον βαθμό αποτελεσματικότητας στη συμπεριφορά τους ως μονάδες. Συνεπώς, η όποια «ευφυΐα» της αποικίας ως σύνολο πηγάζει αναγκαστικά από τη συνεργασία και την από κοινού συμπεριφορά τους ως ομάδα.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence) και συναντάται σε ολόένα και περισσότερα παραδείγματα στη Φύση, ιδιαίτερα στα έντομα, σε θαλάσσιους οργανισμούς και γενικά σε ζώα που ζουν και μετακινούνται σε μικρές ή μεγάλες ομάδες. Από τις αποικίες μελισσών και τον τρόπο που εντοπίζουν τροφή και τοποθεσία για τη φωλιά τους, τα κοπάδια μικρών ψαριών και τον τρόπο που αποφεύγουν τους θηρευτές, μέχρι τη μετανάστευση πτηνών και ζώων στην Αφρική και στη Βόρεια Αμερική, η «ευφυΐα» της ομάδας φαίνεται να λειτουργεί εξαιρετικά αποτελεσματικά, αυτόματα και χωρίς κάποιο κεντρικό συντονισμό.

Αν και λόγω της διεπιστημονικότητας του αντικείμενου δεν υπάρχει σαφής ορισμός ως προς το τι χαρακτηρίζεται «έξυπνο σμήνος», τρεις είναι οι βασικές του ιδιότητες:

- (α) Πλήρως αποκεντρωμένος μηχανισμός καθορισμού της συμπεριφοράς
- (β) Απλός μηχανισμός συμπεριφοράς σε ατομικό επίπεδο
- (γ) Απλός μηχανισμός σηματοδότησης σε τοπικό επίπεδο

Από τις παραπάνω ενδογενείς ιδιότητες ενός «έξυπνου σμήνους», σε ά.τι αφορά το (α), δηλαδή τον πλήρως αποκεντρωμένο μηχανισμό συμπεριφοράς, αυτός προκύπτει φαινομενικά ως συνδυαστικό αποτέλεσμα των (β) και (γ), δηλαδή κάποιων απλών κανόνων ατομικής συμπεριφοράς και κάποιου εξίσου απλού μηχανισμού άμεσης ή έμμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ μεμονωμένων ατόμων. Με άλλα λόγια, η «έξυπνη» συμπεριφορά της ομάδας αναδεικνύεται αυτόματα (emergent behavior) μέσω της συνεργασίας των (β) και (γ) και όχι κάποιου πρόσθετου μη-



Τα κοπάδια μετασυστευτικών ζώων, όπως το κορίμπου στις ανοικτές πεδιάδες, υιοθετούν εξαιρετικά αποτελεσματικές τεχνικές άμυνας ως ομάδα εναντίον επιθέσεων θηρευτών, χρησιμοποιώντας ομαδικές αντιπθέσεις, μαζικές αλλαγές κατεύθυνσης, σκόμο και κινήσεις παραπλάνησης.

χανισμού ή αλγορίθμου. Η αυτόματη αυτή ανάδειξη μιας πολύ πιο σύνθετης και «έξυπνης» συμπεριφοράς ή δομής στο συνολικό σύστημα, ονομάζεται αυτο-οργάνωση (self-organization) και αποτελεί ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των έμβιων οργανισμών, αν και παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται στη Φύση και αφορούν ποικιλία δομών, από τους σχηματισμούς σμηνών και γαλαξιών στο Σύμπαν μέχρι και τη μορφή των αμμολόφων στις ερήμους. Όλα αυτά τα σύνθετα συστήματα που χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ απλών συστατικών τους, αναφέρονται ως Πολύπλοκα Συστήματα (Complex Systems). Μάλιστα, η συνεργασία αυτή μεταξύ ατομικής συμπεριφοράς και σηματοδότησης μεταξύ των μελών της ομάδας συχνά συνδέεται με την προαρμοστικότητα (adaptiveness) τέτοιων συστημάτων ως σύνολο, τόσο ως προς το ίδιο το πρόβλημα, όσο και ως προς τις γενικότερες συνθήκες κάτω από τις οποίες το σύστημα καλείται να λειτουργήσει. Όπως ακριβώς οι αποικίες μυρμηγκιών ή μελισσών καλούνται να ανταπεξέλθουν σε εμπόδια στο άμεσο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα κάποια πέτρα στο μέσο της επίτευξης της διαδρομής, το ίδιο αποτελεσματικό πρέπει να είναι αυτοί οι ενδογενείς μηχανισμοί «ευφυΐας» της ομάδας, ανεξαρτήτως αν η απεικία θρίσκει σε δύσσο, σε έρημο, σε βουνό ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του πλανήτη. Έτσι, τα συστήματα αυτά δεν θεωρούνται ατλήως «πολύπλοκα» αλλά και «προσαρμοστικά», και ο διεπιστημονικός τομέ-



Η φυσική μέθοδος εντοπισμού τροφής, εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής, καθώς και η απόδοση εργασιών σε αποικίες μυρμηγκών βασίζεται στην ασύγχρονη ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω χημικών χνών φερομόνης. Η μέθοδος αυτή αποτέλεσε έναν από τους πρώτους μηχανισμούς που αποτυπώθηκε σε αλγόριθμο και εφαρμόζεται σήμερα σε πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης πολυπλοκότητας.

ας που ασχολείται με τα λεγόμενα Προσαρμοστικά Πολύπλοκα Συστήματα (Adaptive Complex Systems – ACS) αποτελεί μια από τις πιο σύγχρονες και δραστήριες περιοχές έρευνας κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες.

Ο βαθμός «ευφυΐας» ενός σμψ-

νους, δηλαδή μιας ομοιάμορφης ομάδας φαινομενικά «απλοϊκών» ως προς τη συμπεριφορά τους μονάδων, εξαρτάται ακριβώς από το είδος και τον τρόπο υλοποίησης των μηχανισμών (β) και (γ), με άλλα λόγια από το τι σημαίνει σηματοδότηση, τι μηνύματα α-

νταλλάσσονται, με ποιον τρόπο και σε ποιο χρόνο, καθώς επίσης και από το πώς αυτά ανιχνεύονται σε τοπικό (και μόνο) επίπεδο και μεταφράζονται σε συγκεκριμένες ενέργειες από τα άτομα.



Τα εργαστηριακά πειράματα απέδειξαν ότι ο μηχανισμός ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των μυρμηγκιών βασίζεται σε φερομόνες, δηλαδή ειδικές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται από πολλούς οργανισμούς ως σήματα, τα οποία εντοπίζονται μέσω της γεύσης ή της όσφρησης.

παραδείγματα. Δύο τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο τρόπος αυτο-οργάνωσης των αποικιών μυρμηγκιών σε επίπεδο αναζήτησης τροφής και ανόδωσης εργασιών, καθώς επίσης και ο τρόπος αυτο-οργάνωσης των αποικιών μελισσών όσον αφορά την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας για νέα εγκατάσταση της φωλιάς.

Η Deborah Gordon, μεταξύ άλλων ερευνητών, μελέτησε τον τρόπο που υλοποιείται στην πράξη ο μηχανισμός «συντονισμού» των μυρμηγκιών σε ότι αφορά την αναζήτηση, τον εντοπισμό και τη μεταφορά τροφής μέσω της βέλτιστης διαδρομής μέχρι τη φωλιά. Τα εργαστηριακά πειράματα απέδειξαν ότι ο μηχανισμός ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των μυρμηγκιών βασίζεται σε φερομόνες, δηλαδή ειδικές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται από πολλούς οργανισμούς ως σήματα, τα οποία εντοπίζονται μέσω της γεύσης ή της όσφρησης. Στα μυρμηγκία, ο αισθητήριος μηχανισμός είναι οι κεραίες στο κεφάλι των εντόμων, ενώ ο μηχανισμός παραγωγής είναι ειδικοί αδένες στο κάτω μέρος του κορμού και στην κοιλιά τους. Καθώς το μυρμηγκί περπατά, αφήνει πίσω του ίχνη φερομόνης, σε συγκεκριμένο χρόνο και με συγκεκριμένη σημασία, τα οποία κωδικοποιούν ένα μήνυμα για τα υπόλοιπα μυρμηγκία της αποικίας. Ένα μυρμηγκί που έχει εντοπίσει τροφή και μεταφέρει ένα κομμάτι πίσω στη φωλιά, «μαρκάρι» τη διαδρομή του έτσι ώστε να γίνει φανερό ότι αυτό το μονοπάτι συνδέει τη φωλιά με εντοπισμένη τροφή. Με αυτό τον τρόπο, κάποιο άλλο μυρμηγκί που θα βρεθεί σε μεταγενέστερο χρόνο πάνω στο μονοπάτι, θα αποσπαστεί να το ακολουθήσει, είτε προς τη μία είτε προς την άλλη κατεύθυνση. Ακόμα και αν η αρχική κατεύθυνση είναι λανθασμένη, αργά ή γρήγορα θα ε-

πανελάει στη σωστή πορεία και θα καταλήξει στην εντοπισμένη τροφή. Με άλλα λόγια, η «λήψη» του συγκεκριμένου μηνύματος θα το αναγκάσει να εγκαταλείψει τη συμπεριφορά «τυχαία αναζήτηση» και να υιοθετήσει τη συμπεριφορά «μετάβαση προς σημείο».

Επιπλέον, ο μηχανισμός με τις φερομόνες εμπεριέχει και ένα άλλο εξίσου χρήσιμο χαρακτηριστικό, αυτό της σταδιακής «εξάτμισης»: το ίχνος που εναποθέτει κάποιο μυρμηγκί δεν παραμένει εκεί για πάντα αλλά σταδιακά εξαφανίζεται με σταθερό ρυθμό. Έτσι, αν η επιλεγμένη διαδρομή δεν οδηγεί γρήγορα στον στόχο (επιστροφή στη φωλιά) ή αν δεν εντοπιστεί σύντομα από άλλα μέλη της ομάδας, αυτομάτως καθίσταται «άχρηστη» και «διαγράφεται». Αντίθετα, ένα μονοπάτι που αποδεικνύεται σύντομο και εύκολο προσβάσιμο από άλλα μέλη της ομάδας, σταδιακά ενισχύεται καθώς το διασχίζουν όλο και περισσότερα μυρμηγκία που μεταφέρουν τροφή πίσω στη φωλιά. Στη θεωρία Συστημάτων, η διαδικασία αυτή τυπικά ονομάζεται μηχανισμός θετικής ανάδρασης, δηλαδή η μετάβαση της κατάστασης του συστήματος που οδηγεί στην επιθυμητή λύση αυτόματα ενισχύει τη μετάβαση αυτή. Με αυτό τον τρόπο, αργά ή γρήγορα, θα βρεθεί η επιθυμητή κατάσταση «λύσης» και θα είναι η νέα κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Πρακτικά, καθώς όλο και περισσότερα μυρμηγκία ακολουθούν διάφορα μονοπάτια επιστρέφοντας στη φωλιά με τροφή και εναποθέτοντας ίχνη φερομόνης, η πραγματικά συντομότερη διαδρομή σταδιακά θα συγκεντρώνει όλο και μεγαλύτερη ροή, αφού όλα μυρμηγκία αναχωρούν και πάλι προς την τροφή μέσω αυτής της διαδρομής, θα επιστρέφουν γρηγορότερα από τα υπόλοιπα.

Με τον ίδιο περίπου τρόπο λειτουργ-

ΠΩΣ ΕΝΑ ΣΗΜΝΟΣ ΓΙΝΕΤΑΙ «ΕΞΥΠΝΟ»;

Για να γίνει πλήρως κατανοητό τι ακριβώς σημαίνει κάθε μία από τις παραπάνω ιδιότητες, καθώς επίσης και το πώς η συμπεριφορά του συνόλου προκύπτει ως αποτέλεσμα ακριβώς της ενέργειας και της αυτο-οργάνωσης που χαρακτηρίζει το σύστημα, αξίζει να αναλυθεί συνοπτικά ο ακριβής τρόπος λειτουργίας των μηχανισμών αυτών με

γεί και ο μηχανισμός ανάθεσης εργασιών στα μέλη της φωλιάς. Μια ειδική ομάδα μυρμηγκιών-ανιχνευτών περιφέρεται στην περιοχή γύρω από τη φωλιά, μερικές ώρες πριν την έναρξη της κύριας εργασίας αναζήτησης τροφής από άλλες ομάδες. Τα μυρμηγκία που πρόκειται να αρχίσουν την αναζήτηση τροφής, αρχικά περιμένουν κοντά στη φωλιά και «μετρούν» τον ρυθμό επιστροφής των μυρμηγκιών-ανιχνευτών, εντοπίζοντας αντίστοιχες φερομόνες πάνω τους. Όταν διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός είναι σταθερός και ικανοποιητικός (υψηλός), αυτό σημαίνει ότι η περιοχή είναι ασφαλής από θηρευτές και καιρικά φαινόμενα και άρα μπορούν να αρχίσουν την εργασία τους. Αν αντίθετα τα μυρμηγκία-ανιχνευτές επιστρέ-

μηνυμάτων (φερομόνης) που χρησιμοποιούν και που ουσιαστικά δημιουργεί διαχωρισμό των τύπων εργασιών, καθώς επίσης και το τεράστιο πλήθος ατόμων έτσι ώστε οποιαδήποτε αναμενόμενη απώλεια να μη είναι καταστροφική για την αποικία. Ο ακριβής μηχανισμός ασύγχρονης ανταλλαγής μηνυμάτων μέσω φερομόνης στις αποικίες μυρμηγκιών είναι αρκετά πιο σύνθετος και περιλαμβάνει πλήθος μηνυμάτων, τα οποία σε συνδυασμό με κάποιους βασικούς κανόνες ατομικής συμπεριφοράς των μυρμηγκιών δημιουργεί τη συνολική εικόνα μιας «έξυπνης» ομάδας.

Ξε ότι αφορά τις αποικίες μελισσών και την αναζήτηση βέλτιστης τοποθεσίας για τη νέα φωλιά, το γενικό-

οπίες επιστρέφουν και ενισχύουν τη διαπίστωση της αρχικής ανίχνευσης. Όσο πιο πειστικό είναι το μήνυμα που μεταφέρουν, τόσο περισσότερες είναι οι μέλισσες που θα παρακινήθούν να τις ακολουθήσουν και να ανιχνευθούν το σημείο. Αργά ή γρήγορα, κάποια από τις πιθανές τοποθεσίες συγκεντρώνει γύρω της αρκετές μέλισσες (περίπου 15-20) ώστε να είναι ορατές από αρκετά μακριά, οπότε λαμβάνεται η τελική απόφαση. Η νέα αποικία μετακινείται από την προσωρινή τοποθεσία στη νέα (μόνιμη) θέση της φωλιάς που πρόκειται να κατασκευαστεί. Στην περίπτωση αυτή η ανταλλαγή των μηνυμάτων «θετικής απόδρασης» δεν πραγματοποιείται μέσω ιχθύων φερομόνης όπως στα μυρμηγκία, αλλά μέσω οπτικών μηνυμάτων με επίδειξη του «χορού» των μελισσών-ανιχνευτών. Στην πραγματικότητα ο μηχανισμός ανταλλαγής μηνυμάτων στις μέλισσες είναι πολύ πιο σύνθετος και πλούσιος σε πληροφοριακό περιεχόμενο απ' ό,τι τα ίχνη φερομόνης στα μυρμηγκία και περιλαμβάνει μηνύματα σχετικά με πιθανές απειλές, τοποθεσίες τροφής, κατανόηση εργασιών, κλπ. Συνεπώς η «συνέργεια» σε αυτή την περίπτωση της ατομικής συμπεριφοράς και του συστήματος ανταλλαγής μηνυμάτων, καθιστά τις αποικίες μελισσών ένα από τα σπουδαιότερα παραδείγματα αυτο-οργανωσής και «έξυπνης» συμπεριφοράς.

Όταν μια φωλιά μελισσών υπερβεί ένα όριο ως προς το πλήθος των μελών της, τότε η βασίλισσα, μαζί με ένα μέρος της αποικίας, μεταναστεύει προσωρινά σε κάποια κοντινή τοποθεσία και αρχίζει την αναζήτηση της καλύτερης θέσης για τη νέα φωλιά.

φουν με χαμηλούς ρυθμούς, αυτό σημαίνει ότι ένα μεγάλο ποσοστό τους δεν τα κατάφερε και πως υπάρχει κίνδυνος κοντά στη φωλιά. Σημαντικός παράγοντας στην παραπάνω διαδικασία είναι φυσικά ο διαφορετικός τύπος

τερο πρόβλημα και η επίλυσή του φαίνεται εξίσου ενδιαφέροντα με όσα περιγράφηκαν πιο πάνω για τις αποικίες μυρμηγκιών. Όπως επισημαίνει ο Thomas Seeley του Πανεπιστημίου του Cornell, ο οποίος έχει πραγματοποιήσει εκτεταμένες έρευνες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, η στρατηγική των μελισσών είναι σχετικά απλή. Όταν μια φωλιά μελισσών υπερβεί ένα όριο ως προς το πλήθος των μελών της, τότε η βασίλισσα, μαζί με ένα μέρος της αποικίας, μεταναστεύει προσωρινά σε κάποια κοντινή τοποθεσία και αρχίζει την αναζήτηση της καλύτερης θέσης για τη νέα φωλιά. Μερικές από τις μέλισσες της προσωρινής αποικίας ερευνούν τη γύρω περιοχή και μόλις κάποια εντοπίσει συγκεκριμένη θέση με τις ιδανικές προδιαγραφές (προστασία από βροχή και αέρα, αρκετός χώρος, είσοδος από νότια πλευρά), ξεκινά αυτό που ονομάζεται «χορός». Ο τρόπος της κίνησης έχει τη μορφή «8» και κωδικοποιεί με ειδικό τρόπο την κατεύθυνση, την απόσταση και την καταλληλότητα της τοποθεσίας που έχει εντοπιστεί. Με αυτό τον τρόπο προσελκύονται και άλλες μέλισσες προς την τοποθεσία αυτή, οι

ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΙΩΣΗ

Όπως τα παραπάνω παραδείγματα και οι μηχανισμοί που καθιστούν ένα σμήνος «έξυπνο» τελικά να μη είναι και τόσο δυσνόητοι ή πολυσύνθετοι, τουλάχιστον σε πρακτικό επίπεδο. Δεδομένου ότι οι μηχανισμοί αυτοί υπάρχουν και λειτουργούν με συγκεκριμένο τρόπο, φαίνεται τελικά σχεδόν αυτονόητο ότι η συμπεριφορά μιας αποικίας μυρμηγκιών ή μελισσών, ενός κοπαδιού ψαριών ή ενός σμήνους πτηνών, είναι εξαιρετικά αποτελεσματική σε επίπεδο ομάδας, σε σύγκριση με τα μεμονωμένα άτομα που την αποτελούν. Ανακάλυπτε όμως εδώ ένα ζυκολλότερο και ουσιαστικότερο ερώτημα: Πώς τελικά προέκυψαν αυτές οι συμπεριφορές; Πώς δημιουργήθηκαν οι κατάλληλοι μηχανισμοί που κατέστησαν το σμήνος «έξυπνο», αν και απο-



Οι αποικίες μελισσών αποτελούν ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα νοσημόνης σμήνους σε υψηλό επίπεδο. Ο μηχανισμός επικοινωνίας μεταξύ των μελών βασίζεται σε ένα σύνθετο σύστημα οπτικών μηνυμάτων («χορός») με ιδιαίτερα πλούσιο πληροφοριακό περιεχόμενο.

τελείται από πολύ απλές μονάδες:

Όπως αναλύθηκε και πιο πάνω, ο σημαντικότερος παράγοντας σε αυτή την εξέλιξη δεν είναι τίποτα άλλο παρά η εγγενής ικανότητα κάποιων συστημάτων για αυτο-οργάνωση. Όλοι οι έμβιοι οργανισμοί χαρακτηρίζονται σε μικρή ή μεγάλο βαθμό από αυτή την ιδιότητα, αφού, ενώ αποτελούνται από κύτταρα διαφόρων τύπων, τελικά ολόκληρος ο οργανισμός ως σύνολο λειτουργεί ως κάτι πολύ περισσότερο από μια συστάδα μερικών δισεκατομμυρίων μονοκύτταρων οργανισμών. Και επιπλέον, το σημαντικότερο είναι ότι η ενδογενής αυτή οργάνωση προκύπτει αυτόματα, σταδιακά, κατά την εξέλιξη του οργανισμού από ένα και μόνο κύτταρο (σύλληψη) σε μια ολοκληρωμένη οντότητα (φυτό ή ζώο). Με όρους Φυσικής και Θεωρίας Πληροφοριών, η παρατήρηση αυτή φαίνεται να παραβιάζει ένα βασικό νόμο, αυτόν της εντροπίας. Στη Φυσική, η έννοια της εντροπίας εκφράζει την «οργάνωση» και τη «δομή» της ύλης και της ενέργειας. Σε οποιαδήποτε δράση-αντίδραση, η ποσότητα της μεταβλητής εντροπίας παρατηρούμε ως είτε παραμένει σταθερή είτε αυξάνεται, καταδεικνύοντας ότι το σύστημα από «δομημένο» γίνεται περισσότερο «αδόμητο» ή «τυχαίο». Έτσι εξηγείται, για παράδειγμα, το γεγονός ότι η καύση ενός σπύριου δεν μπορεί να αντιστραφεί ως αντίδραση: η χημική ενέργεια του σπύριου μετατρέπεται εύκολα σε εκπομπή θερμότητας και φωτός, όμως το αντίστροφο είναι πρακτικά αδύνατο να συμβεί. Με παρόμοιο τρόπο, η εντροπία της πληροφορίας σε ένα σύστημα εκφράζει το κατά πόσον η εσωτερική δομή και η λειτουργία του είναι «δομημένη» (οργανωμένη). Έτσι, η τηλεοπτική εικόνα ενός σταθμού παρουσιάζει σαφέστατα πληροφοριακή «δομή», ενώ η εικόνα που εμφανίζεται σε κακή λήψη και που απεικονίζει «λευκό θόρυβο» χαρακτηρίζεται από υψηλή «τυχαioτητα».

Με όρους εντροπίας, τόσο σε επίπεδο Φυσικής όσο και Πληροφορικής, η ικανότητα αυτο-οργάνωσης ενός συστήματος ή ενός σμήνους φαίνεται να παραβιάζει αυτή τη βασική αρχή. Στην πραγματικότητα, αυτό που επιτρέπει στην εντροπία να μειώνεται μέσω της αυτο-οργάνωσης δεν είναι τίποτα άλλο παρά η δυνατότητα «ανάδωσης» νέων ιδιοτήτων, νέων μηχανι-

σμών και νέων συμπεριφορών για την ομάδα, όπως ακριβώς περιγράφηκε πιο πάνω. Με άλλα λόγια, αν και φαίνεται αδύνατο για ένα μεμονωμένο άτομο της ομάδας ξαφνικά να αποκτήσει ιδιότητες που δεν είχε (π.χ. ένα μυρμηγκί να έχει καθολική επετίετα της περιοχής γύρω από τη φωλιά), εν τούτοις, μέσω «αναδυόμενης συμπεριφοράς» αυτό καθίσταται απόλυτα εφικτό και πραγματοποιήσιμο σε επίπεδο ομάδας – εφόσον φυσικά υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις και ενδογενείς δυνατότητες για κάτι τέτοιο. Δεν είναι, λοιπόν, περίεργο το ότι τέτοιες «αναδυόμενες συμπεριφορές» προσδίδουν στο σμήνος αυξημένα πλεονεκτήματα σε εξελικτικό επίπεδο, άρα μεγαλύτερες πιθανότητες επιβίωσης.

Στο παράδειγμα των μυρμηγκιών και της αναζήτησης τροφής, μια σημαντική παράμετρος όσον αφορά την επιτυχία του μηχανισμού ανταλλαγής μηνυμάτων είναι ο ρυθμός εξάτμισης του ίχνους της φερομόνης που αναποθέτουν οι ανιχνευτές στο μονοπάτι. Αν ο ρυθμός εξάτμισης είναι πολύ υψηλός, το ίχνος θα εξαφανιστεί γρήγορα και το μήνυμα δεν θα μεταβιβαστεί ποτέ. Αντίστοιχα, αν ο ρυθμός εξάτμισης είναι πολύ χαμηλός, σχεδόν όλα τα μονοπάτια θα επισωρευτούν ως «δέλτα» και τα μηνύματα ουσιαστικά δεν θα παρέχουν καμία χρήσιμη πληροφορία. Και στις δύο περιπτώσεις, ο μηχανισμός «θετικής ανάδρασης» δεν θα λειτουργήσει ουσιαστικά, ενώ η αναζήτηση τροφής και τα αποθέματα της φωλιάς να μη ανταποκρίνονται στις ανάγκες επιβίωσης της αποικίας. Επομένως, η φυσιολογική εξελικτική διαδικασία σε βιολογικό επίπεδο θα οδηγήσει αργά ή γρήγορα στην εξοφάνιση των ειδών μυρμηγκιών τα οποία δεν παράγουν την κατάλληλη μορφή φερομόνης, ενώ τα είδη με τη σωστή χημική δομή, για το συγκεκριμένο περιβάλλον, θα επιβιώσουν ευκολότερα. Δεν είναι περίεργο το ότι, ενώ ο βασικός μηχανισμός παραμένει ο ίδιος, οι τύποι φερομόνης, τα μηνύματα που μεταφέρουν και ο τρόπος αξιοποίησης αυτών των μηνυμάτων διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στα 10.000 περίπου είδη μυρμηγκιών που ζουν σήμερα σε όλο τον πλανήτη (διαφορετικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά, καιρικές συνθήκες, είδη θηρευμάτων, κλπ.). Σε ανώτερο επίπεδο, ο-



Σε πολλά είδη μικρών ψαριών, οι θαλάσσιοι βιολόγοι έχουν παρατηρήσει ιδιαίτερα εξελιγμένες συμπεριφορές στα κοπάδια: Η ομάδα δεν κινείται απλά ως σύνολο αντιδρώντας στις επείγουσες θηρευμάτων, αλλά περιβάλλεται από μερικούς «ανιχνευτές» σε κάποια απόσταση από αυτό, οι οποίοι μερικές φορές θυσιοζώνουν ως μέρος ενός μηχανισμού «έγκαιρης προειδοποίησης» για την επιβίωση του υπόλοιπου κοπαδιού.

κόμα και πτυχές της ίδιας της συλλογικής συμπεριφοράς της ομάδας αξιολογούνται αυτόματα μέσω της φυσικής εξελικτικής διαδικασίας. Αν κάποια παράμετρος ή κάποια ενέργεια επιδρά αρνητικά στην επιβίωση της αποικίας, είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο, τότε, κατά πόσα πιθανότητα, αργά ή γρήγορα θα εξαλειφθεί από τη συλλογική συμπεριφορά του σμήνους. Αν αντίθετα επιδρά θετικά στην επιβίωση, τότε θα μεταφερθεί άμεσα (γενετικά) ή έμμεσα (μίμηση) στους απογόνους. Οι συμπεριφορές που επιβιώνουν ονομάζονται Εξελικτικά Βελτιστές Συμπεριφορές ή, όπως ονομάζονται στη Θεωρία Αποφάσεων και στη Θεωρία Παιγνίων, Εξελικτικά Σταθερές Στρατηγικές. Δεν είναι καθόλου τυχαίο το γεγονός ότι η Εξελικτική Βιολογία, η Εξελικτική Κοινωνιο-Ψυχολογία και η Εξελικτική Θεωρία Παιγνίων εμφανίζουν κοινό διεπιστημονικό πεδίο έρευνας που εκφράζεται από τη Νοημοσύνη Σμήνους. Τελικά, η μελέτη των φαινομένων αναδυόμενης συμπεριφοράς σε ομάδες φαίνεται να διέπεται από παρόμοιους ενδογενείς κανόνες, είτε πρόκειται για σμήνη πτηνών, είτε για ομάδες ανθρώπων, είτε για τη διακύμανση χρηματιστηριακών παραμέτρων.

ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΕΜΜΗΝΥΣ

Το 1991, ο επιστήμονας ηλεκτρονικών υπολογιστών Marco Dorigo από το Ελεύθερο Πανεπιστήμιο των Βρυξελλών, γνωρίζοντας τι μέχρι τότε θεωρίες σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς των μυρμηγκιών και τη μεθόδου αναζήτησης τροφής, κατασκεύασε ένα απλοποιημένο αλλά ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο του μηχανισμού αυτού, με έμφαση στον μηχανισμό ανταλλαγής μηνυμάτων μέσω ιχών φερομόνης. Πρακτικά, το μοντέλο του προσομοιώνει τη διαδικασία εναπόθεσης, ελάττωσης και ανίχνευσης των ιχών φερομόνης από μεμονωμένους «ανιχνευτές», στο εικονικό περιβάλλον ενός υπολογιστή. Η επιτυχία του αλγορίθμου δεν ήταν τόσο ότι λειτουργούσε όπως ακριβώς και σε μια πραγματική αποικία μυρμηγκιών, αλλά το ότι το βασικό πρόβλημα προς επίλυση μπορούσε να είναι οτιδήποτε, από την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μέσα σε μια πόλη, τη σχεδίαση βέλτιστων δρομολογίων προείσισης σε πολυσύχναστα αεροδρόμια, μέχρι τη βέλτιστη δρομολόγηση πακέτων δεδομένων σε τηλεοπτικοδικτά δίκτυα. Αλγόριθμοι αυτού του τύπου σήμερα αναφέρονται γενικά ως Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών, ενώ αντίστοιχα έχουν σχεδιαστεί και εφαρμοσθεί με εξίσου μεγάλη επιτυχία αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Αποικίας Μελισσών.

Μια σημαντική παράμετρος που αξίζει να αναφερθεί σε τέτοιου είδους



Τα σμήνη εντόμων, όπως οι ακριδές που μετακινούνται κατά εκατομμύρια σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, συνήθως βασίζονται στις αρχές της κίνησης ως κοπάδι με φαινομενικά χαμηλό επίπεδο «εμφύσιας». Παρόλα αυτά, ο συντονισμός και η μαζική κίνηση πάνω από περιοχές με τροφή αποτελεί από μόνο του ένα απλοποιημένο σύστημα ανταλλαγής μηνυμάτων.

προσομοιώσεις σε υπολογιστή είναι ότι, ακριβώς επειδή υλοποιούνται σε λογισμικό και είναι πλήρως ελέγξιμες, είναι δυνατή η προσαρμογή των ενδογενών χαρακτηριστικών του σμήνους σε πολλαπλά επίπεδα ανάλογα με το πρόβλημα. Έτσι, όταν η ανταλλαγή μηνυμάτων περιορίζεται μόνο σε συντονισμό της κίνησης του σμήνους ως σύνολο, δηλαδή ως συμπαγούς συστάδας αντί ως διακριτών μονάδων, αλλά χωρίς ιδιαίτερα «έξυπνη» συμπεριφορά κατά τα άλλα, συνήθως αναφέρεται ως «κίνηση σε κοπάδι». Στη φύση, τέτοιου είδους συμπεριφορές είναι αρκετά συνήθειες, ειδικά σε ό,τι αφορά τις στρατηγικές του σμήνους για την αντιμετώπιση επιθέσεων από θηρευτές. Για παράδειγμα, τα κοπάδια ψαριών στη θάλασσα ή των καρμπούς στις ανοικτές πεδιάδες, φαινομενικά λειτουργούν με πολύ απλό αλλά αποτελεσματικό τρόπο όταν δέχονται επίθεση: κινούνται αστραπιαία και συντονισμένα προς διάφορες κατευθύνσεις, δυσκολεύοντας εξαιρετικά τον θηρευτή να εστιώσει και να κυνηγήσει μεμονωμένα άτομα. Φυσικά, σε αρκετές περιπτώσεις, ειδικά μεγάλων θηλαστικών όπως φάλαινες ή δελφίνια, η συνεργασία των μελών του σμήνους είναι πολύ πιο «έξυπνη» από απλή κίνηση σε κοπάδι. Για παράδειγμα, θάλασσας ιτιολόγοι έχουν παρατηρήσει περιπτώσεις όπου μια εξελικτικά βέλτιστη συμπεριφορά σε κοπάδια μικρών ψαριών είναι, όχι απλά το κοπάδι να κινείται ως σύνολο, αλλά να περιβάλλεται από μερικούς «ανιχνευτές» σε κάποια απόσταση από αυτό, οι οποίοι μερικές φορές θυσιάζονται ως μέρος ενός μηχανισμού «έγκαιρης προειδοποίησης» για το υπόλοιπο σμήνος. Σε πρακτικό επίπεδο, ακόμα και η απλή κίνηση σε κοπάδι έχει ευρύτερες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην αυτόματη αναπροσαρμογή θέσης σε δίκτυα οσύρματων ανιχνευτών (πχ. συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης συστημάτων στον Ειρηνικό ωκεανό), στα μελλοντικά συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και αποφυγής σύγκρουσης σε αεροπλάνα κ.ά.

Σε ακόμα απλούστερο επίπεδο, ανάλογα μονάδα θεωρείται απλά ένα σωματίδιο του οποίου η συμπεριφορά καθορίζεται αποκλειστικά από ένα σύνολο «φυσικών» νόμων και παραμετρών, τότε προκύπτει το λεγόμενο σωματιδιακό σμήνος. Ίσως να δίνει την εντύ-

πωση ότι δεν είναι πόλυ χρήσιμο ή ιδιαίτερα «έξυπνο», όμως πρακτικά η έννοια του σωματιδιακού σμήνους μπορεί να οδηγήσει σε εξίσου ενδιαφέρουσες μεθοδολογίες επίλυσης προβλημάτων. Για παράδειγμα, ο φασταστόμης μια ποσία της οποίας ο συνδυασμός είναι μια επιφάνεια ακανόνιστου σχήματος και στην οποία δεν είναι ορατό το σημείο αποστράγγισης, τότε ένα «σωματιδιακό σμήνος» θα μπορούσε να είναι ένα δοχείο με μεταλλικά σφαιρίδια: όταν πέφτουν μέσα στην ποσία από διαφορετικά σημεία, ακολουθώντας διαδρομές ελάχιστης δυναμικής ενέργειας όπως επιβάλλει η βαρύτητα, σύντομα θα καταλήξουν (από διαφορετικές τροχιές) στο χαμηλότερο σημείο, δηλαδή στο σημείο του αγωγού αποστράγγισης. Η ίδια ακριβώς ιδέα, τροποποιημένη έτσι ώστε να επιλύει διαφορετικού τύπου μαθηματικά προβλήματα, αποτελεί τη βάση μιας οικογένειας αλγορίθμων που αναφέρονται ως Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων.

Τέλος, πολλές πτυχές της σύγχρονης ναυτεχνολογίας βασίζονται εν μέρει σε ιδέες και αλγορίθμους που προέρχονται από την ανάγκη συμπεριφοράς τους ως «έξυπνα σμήνη». Συγκεκριμένα, η λεγόμενη τεχνολογία «έξυπνης ακόνης», που εξελίσσεται όλο και περισσότερο με την πάροδο του χρόνου, θα επιτρέπει σε μικροσκοπικές συσκευές νανοκλίμακας (1-100 νονομέτρων) όχι μόνο να λειτουργούν μαζί αλλά και να επικοινωνούν μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι νέες δυνατότητες «αναδυόμενης» συμπεριφοράς ως ομάδα.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Υπάρχει ένα τελευταίο ερώτημα σχετικά με την αποτελεσματικότητα ενός «έξυπνου σμήνους», κάτι που σχετίζεται με τις Εξελικτικά Βέλτιστες Στρατηγικές και το γιατί τελικά η συμπεριφορά της ομάδας ως σύνολο είναι «βέλτιστη»: Εφόσον η εξελικτική διαδικασία της φυσικής επιλογής ευνοεί την ανάδειξη γενετικών (και μόνο) χαρακτηριστικών που ενισχύουν την πιθανότητα επιβίωσης, πώς εξηγείται η λήψη κάθε φορά των σωστών αποφάσεων από την ομάδα; Με άλλα λόγια, αφού π.χ. στα γονίδια των μελισσών κωδικοποιείται μόνο ο μηχανισμός λήψης συλλογικής απόφασης και

όχι η ίδια η απόφαση, πώς συμβαίνει το σμήνος ως σύνολο να λαμβάνει σχεδόν πάντα τις σωστές αποφάσεις χωρίς την τυπική διαδικασία «δοκιμής-σφάλματος-διόρθωσης»;

Το ζήτημα αυτό ένα από τα πιο αυσιώδη στη Θεωρία Αποφάσεων των Πολιτικών Επιστημών, ακόμα και με την αιτιολόγηση της ύπαρξης εκλογών και κοινοβουλίων ως βασικών συστατικών της αποτελεσματικής διακυβέρνησης των κρατών. Το 1785, ο Μαρκήσιος de Condorcet διατύπωσε μια θεωρία σχετικά με την αποτελεσματικότητα της συλλογικής λήψης αποφάσεων σε ό,τι αφορά τους ενόρκους σε ένα δικαστήριο, η οποία οργότερα ονομάστηκε θεωρία Condorcet. Η ουσία του θεωρήματος ίσως φαίνεται αυτονόητη, αλλά έχει και μαθηματική απόδειξη, η οποία καταδεικνύει τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την ισχύ του: Αν μια ομάδα αποφεύγει από μεμονωμένα άτομα που αποφασίζουν ανεξάρτητα (δεν επηρεάζονται μεταξύ τους) και με τουλάχιστον μέτρια ικανότητα (πιθανότητα «επιτυχίας» > 0,5), τότε, αν οι επιμέρους αποφάσεις τους συνδυαστούν με κάποιο πλειοψηφικό μηχανισμό απόφασης, είναι θέβαιο ότι η συλλογική αποτελεσματικότητα της ομάδας είναι μεγαλύτερη από τη μέση ικανότητα των μελών της - και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η ομάδα, τόσο βελτιώνεται και η συλλογική απόφαση. Με άλλα λόγια, ακόμα και αν μέσα στην ομάδα δεν υπάρχουν ιδιαίτερα ικανά μέλη («ειδικοί»), το πλήθος και μόνο όσων λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της τελικής απόφασης για ολόκληρη την ομάδα είναι ικανό να βελτισίσει το αποτέλεσμα. Όπως ακριβώς συμβαίνει με την απόφαση των μελισσών για τη νέα τοποθεσία της φωλιάς, έτσι και στα εκλεγμένα κοινοβούλια, η τελική συλλογική απόφαση τείνει να είναι η βέλτιστη δυνατή - αρκεί να πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις, σύμφωνα με το θεώρημα Condorcet.

Ισως ακούγεται υπερβολικό, αλλά τελικά φαίνεται πως ο τρόπος υιοθέτησης βέλτιστων μηχανισμών απόφασης σε συλλογικό επίπεδο, τόσο σε κοινωνίες ανθρώπων, όσο και σε κοινωνίες φαινομιμικά «κατώτερων» οργανισμών, να μη διαφέρουν καθόλου. Η ανθρώπινη επιστήμη μόλις τώρα αρχίζει να ανακαλύπτει τα ενδογενή χαρακτηριστικά, τους φυσικούς μηχανισμούς και τις συσχετίσεις μεταξύ των δύο. ■



Πειραματική διάταξη -έξυπνου- σμήνους από αυτόνομους απλούς ρομποτικούς μηχανισμούς, οι οποίοι συνδυάζονται μέσω αυτο-οργάνωσης προκειμένου να δημιουργήσουν κάτι πιο σύνθετο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) Wikipedia, SELF-ORGANIZATION (article), 6 Oct 2012, <http://en.wikipedia.org/wiki/Self-organization>
- (2) Ricard V. Sole, Jordi Bascompte: SELF ORGANIZATION IN COMPLEX ECOSYSTEMS, Princeton University Press (2006).
- (3) Paul Krugman: THE SELF-ORGANIZING ECONOMY, Cambridge, Mass., and Oxford: Blackwell Publishers (1996).
- (4) Steven Berlin Johnson (2001): EMERGENCE: THE CONNECTED LIVES OF ANTS, BRAINS, CITIES AND SOFTWARE, Scribner (2002).
- (5) Hermann Haken: SYNERGETICS: AN INTRODUCTION: NON-EQUILIBRIUM PHASE TRANSITION AND SELF-ORGANIZATION IN PHYSICS, CHEMISTRY AND BIOLOGY, 3rd Revised and Enlarged Edition, Springer-Verlag (1983).
- (6) John Finnigan: THE SCIENCE OF COMPLEX SYSTEMS, Australian Science, June 2005.
- (7) John L. Casti: REALITY RULES: THE FUNDAMENTALS (VOLUME I), Wiley-Interscience, Aug 1992.
- (8) John L. Casti: REALITY RULES: THE FRONTIER (VOLUME II), Wiley-Interscience, Aug 1992.
- (9) Per Bak (1996): HOW NATURE WORKS: THE SCIENCE OF SELF-ORGANIZED CRITICALITY, Copernicus Books (1996).
- (10) Wikipedia, FLOCKING (BEHAVIOR) (article), 12 Sept 2012, http://en.wikipedia.org/wiki/Flocking_%28behavior%29
- (11) Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz: SWARM INTELLIGENCE: FROM NATURAL TO ARTIFICIAL SYSTEMS, Oxford University Press (1999).
- (12) Andries Engelbrecht: FUNDAMENTALS

- OF COMPUTATIONAL SWARM INTELLIGENCE, Wiley & Sons (2006).
- (13) Wikipedia, SWARM INTELLIGENCE (article), 7 Oct 2012, http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_Intelligence
 - (14) Michael G. Hinchey, Roy Sterritt, Chris Rouff: SWARMS AND SWARM INTELLIGENCE, ACM Computer, Volume 40, Issue 4, April 2007, Pages 111-113.
 - (15) L. Fisher: THE PERFECT SWARM: THE SCIENCE OF COMPLEXITY IN EVERYDAY LIFE, Basic Books (2009).
 - (16) Wikipedia, SWARM BEHAVIOUR (article), 6 Oct 2012, http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_behaviour
 - (17) Χάρης Β. Γεωργίου: ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Περιοδικό της Επιστήμης, τεύχος 367, Οκτώβριος 2012.
 - (18) Mitchell Resnick: TURTLES, TERMITES AND TRAFFIC JAMS: EXPLORATIONS IN MASSIVELY PARALLEL MICROWORLDS (COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS), Bradford (1997).
 - (19) Peter Miller: THE GENIUS OF SWARMS, National Geographic, July 2007.
 - (20) David J.T. Sumpter: COLLECTIVE ANIMAL BEHAVIOR, Princeton University Press (2010).

ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

ΔΩΡΟ ΕΠΙΤΑΓΗ 6€
+ Δωρεάν ταχυδρομικά για τις αγορές σας! (σελ. 7)



Νανοφασαλίδες

Μια νέα τεχνολογία με επαναστασιακές εφαρμογές



Ιχνοσποθιδιώματα

Μηγνώσια για τον τρόπο ζωής των οργανισμών του παρελθόντος



Βάδιση

Το καλύτερο φάρμακο του ανθρώπου:

Νοημοσύνη Σμήνους

Από τις «αναλώσιμες» μονάδες στις «έξυπνες» ομάδες



Λίμνη Βοστόκ

Ένας μυστικός κόσμος κάτω από τους πάγους της Ανταρκτικής



Φωτοβολταϊκά

Αξιοποιώντας την ανεξάντηλη ενέργεια του Ηλίου

