

**Οι Βασικοί Άξονες της ομιλίας με θέμα
«Τα Μαθηματικά στην Επιστήμη Συστημάτων
με Εφαρμογές στις Φυσικές και στις Κοινωνικές Επιστήμες»
που έκανε ο Νικόλαος Λάος
στην Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία,
Αθήνα 28 Νοεμβρίου 2025**

Αξιότιμε Πρόεδρε της Ελληνικής Μαθηματικής Εταιρείας, Καθηγητή Ανάργυρε Φελλούρη,
Λοιπά Μέλη του Διοικητικού Συμβουλίου της Ελληνικής Μαθηματικής Εταιρείας,
Κυρίες και Κύριοι,

με ιδιαίτερο αίσθημα τιμής και ευχαρίστησης κάνω την αποψινή μου ομιλία ενώπιόν σας, έχοντας επίγνωση της ιστορικής και πνευματικής κληρονομιάς και δράσης της Ελληνικής Μαθηματικής Εταιρείας.

Προσωπικώς, εργάζομαι κυρίως στα πεδία της επιστήμης συστημάτων, των διεπιστημονικών μαθηματικών, και της μαθηματικής μοντελοποίησης, είμαι επιστημονικός εταίρος της ρωσικής ιδιωτικής εταιρείας πληροφοριών και αναλύσεων R-Techno Ltd, και έχω αναπτύξει ένα πολύπλευρο διδακτικό έργο σε προγράμματα σπουδών του London Metropolitan University και του Cardiff Metropolitan University. Τα κύρια μαθηματικά μου συγγράμματα στην ελληνική γλώσσα άρχισαν να εκδίδονται από τις Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών το 2025. Πρώτον, κυκλοφόρησε το βιβλίο μου με τίτλο *Εισαγωγή στα Καθαρά και στα Εφαρμοσμένα Μαθηματικά και στην Επιστημολογία*, που καλύπτει τα πεδία του λογισμού και των διαφορικών εξισώσεων μαζί με τις διασυνδέσεις τους με τα πεδία της άλγεβρας, της πραγματικής και της μιγαδικής ανάλυσης, και της γεωμετρίας. Δεύτερον, κυκλοφόρησε το βιβλίο μου με τίτλο *Συναρτησιακή Ανάλυση: Μια Βασική Εννοιολογική Μελέτη*, στο οποίο, παρέχοντας αρχικώς όλες τις προαπαιτούμενες γνώσεις από τους κλάδους της τοπολογίας και της γραμμικής άλγεβρας, μελετώνται συστηματικώς οι θεωρίες: διανυσματικών χώρων, νορμικών χώρων, χώρων Banach, χώρων εσωτερικού γινομένου, χώρων Hilbert, γραμμικών τελεστών και γραμμικών συναρτησοειδών, κυρτής βελτιστοποίησης, βέλτιστης προσέγγισης, και λογισμού των μεταβολών.

Στις αρχές του 2026, έχει προγραμματιστεί να κυκλοφορήσει το βιβλίο μου με τίτλο *Επιστήμη Συστημάτων, Θεωρία της Πολυπλοκότητας, και Οργάνωση*, επίσης από τις Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών. Αυτό το εκπαιδευτικό και ερευνητικό βιβλίο αποτελεί μια συστηματική μελέτη των εξής θεμάτων: **(i)** επιστήμη συστημάτων και θεωρία πολυπλοκότητας με εφαρμογές στη φυσική, στη βιολογία, στη διοικητική επιστήμη, και στην πολιτική οικονομία, **(ii)** θεωρία δικτύων, **(iii)** θεωρία πολλαπλοτήτων και διαφορίσιμων πολλαπλοτήτων, **(iv)** θεωρία δυναμικών συστημάτων, περιλαμβανομένων των μαθηματικών θεωριών διαταραχών και διχαλώσεων, **(v)** στοχαστικές διαδικασίες και μέτρηση κινδύνων, **(vi)** δυναμική μοντελοποίηση, **(vii)** ειδικά θέματα επιστημολογίας, μεθοδολογίας, και μαθηματικής μοντελοποίησης προβλημάτων τόσο των φυσικών όσο και των κοινωνικών επιστημών καθώς και ζητήματα τεχνητής νοημοσύνης, **(viii)** οργανωσιακή συμπεριφορά, **(ix)** προβλήματα ανάλυσης, προγραμματισμού, και σχεδιασμού οικονομικών και, γενικώς, κοινωνικών συστημάτων, **(x)** συγκριτική πολιτική οικονομία και θεωρίες των οικονομικών κρίσεων και των οικονομικών κύκλων, **(xi)** οργανωσιακή και επιχειρησιακή ανθεκτικότητα,

επιχειρησιακή συνέχεια, και διαχείριση κινδύνων, και **(xii)** τεχνολογία Blockchain. Με βάση αυτό το βιβλίο, έχω διαμορφώσει την αποψινή ομιλία μου.

Στην αποψινή ομιλία, θα παρουσιάσω μια σύντομη εισαγωγή και ένα σχέδιο μελέτης της επιστήμης συστημάτων, και, σε αυτό το πλαίσιο, θα αναφερθώ ιδιαίτερος στον ρόλο των μαθηματικών στην επιστήμη συστημάτων.

1. Τι είναι σύστημα;

Ένα **σύστημα** είναι ένα σύνολο από αλληλεξαρτώμενα στοιχεία (συστατικά) που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με οργανωμένο τρόπο, για να παράγουν κάποιο αποτέλεσμα ή να εκπληρώνουν έναν σκοπό, που δεν μπορεί να επιτευχθεί από τα μεμονωμένα στοιχεία ξεχωριστά. Με λίγα λόγια, ένα σύστημα είναι ένα σύνολο εφοδιασμένο με μια δομή, δηλαδή με ένα σύνολο κανόνων που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των μελών του εν λόγω συνόλου. Ορισμένα παραδείγματα συστήματος είναι τα εξής: το ανθρώπινο σώμα, μια επιχείρηση, ένα οικοσύστημα, ένα αυτοκίνητο, η οικονομία μιας χώρας, ένας βράχος, ένα ρολόι, ένα βιβλίο, κ.ο.κ.

2. Βασικές αρχές της Επιστήμης Συστημάτων

1. **Ολισμός (Holism):** Το όλον είναι κάτι περισσότερο (ή διαφορετικό) από το άθροισμα των μερών του. Ότι ένα σύστημα δεν είναι απλώς μια συλλογή από κομμάτια που τα προσθέτουμε μηχανικά. Οι ιδιότητες, η συμπεριφορά, και η λειτουργία του όλου προκύπτουν από τον τρόπο που τα μέρη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, και όχι μόνο από τα ίδια τα μέρη ξεχωριστά. Για παράδειγμα, για να κατανοήσετε αυτή την απόφαση στην περίπτωση ενός αυτοκινήτου σκεφθείτε τα εξής: Έχετε έναν κινητήρα, τέσσερις τροχούς, ένα τιμόνι, φρένα, κ.λπ. Αν τα βάλετε όλα σε μια αποθήκη, δεν έχετε αυτοκίνητο. Μόνο όταν τα συνδέσετε και μάλιστα ορθώς, δηλαδή μόνο όταν προκύψει το κατάλληλο σύστημα, θα προκύψουν τελικώς η ιδιότητα της μετακίνησης και, γενικώς, η λειτουργικότητα ενός αυτοκινήτου.
2. **Το φαινόμενο της ανάδυσης (Emergence):** Ιδιότητες που εμφανίζονται μόνο στο επίπεδο του συστήματος και δεν μπορούν να προβλεφθούν πλήρως από τα επιμέρους στοιχεία. Παράδειγμα: Η «συνείδηση» αναδύεται από νευρώνες, η «κυκλοφορία» αναδύεται στην πόλη από μεμονωμένα αυτοκίνητα, κ.ο.κ. Με άλλα λόγια, με τον όρο «ανάδυση», αναφερόμαστε στο γεγονός ότι ένα σύστημα, λόγω της αλληλεπίδρασης των μερών του, αποκτά ξαφνικά νέες ιδιότητες ή συμπεριφορές που δεν τις είχε κανένα από τα μέρη του εν λόγω συστήματος ατομικώς και που δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως μόνο με την ανάλυση των μερών. Εξού και λέμε ότι το όλον παρουσιάζει ιδιότητες που τα μέρη του από μόνα τους δεν έχουν.
3. **Ιεραρχία (Hierarchy):** Τα συστήματα είναι οργανωμένα σε επίπεδα. Κάθε επίπεδο έχει δικές του αναδυόμενες ιδιότητες και ιδιαίτερους νόμους. (π.χ., άτομο → μόριο → κύτταρο → όργανο → οργανισμός → πληθυσμός → οικοσύστημα). Εξού και ο αναγωγισμός πρέπει συχνά να αντικατασταθεί από τον αναδυσμό, και ο μηχανικισμός πρέπει συχνά να αντικατασταθεί από τον οργανικισμό. Όλα αυτά τα ουσιαστικά και μεθοδολογικά ζητήματα μελετώνται ενδελεχώς στο υπό έκδοση βιβλίο μου με τίτλο *Επιστήμη Συστημάτων, Θεωρία Πολυπλοκότητας, και Οργάνωση*, το οποίο έχει προγραμματιστεί να κυκλοφορήσει από τις Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών στις αρχές του 2026.
4. **Ανοικτά έναντι Κλειστών Συστημάτων:**
 - Ανοικτά: ανταλλάσσουν ύλη, ενέργεια, και πληροφορίες με το περιβάλλον (όλα τα βιολογικά και κοινωνικά συστήματα).

- ο Κλειστά: δεν ανταλλάσσουν (κυρίως θεωρητικώς, μάλλον σπανίως στην πράξη).
- 5. **Ομοιόσταση / Αυτορρύθμιση (Homeostasis & Homeokinesis):** Διατήρηση εσωτερικής ισορροπίας παρά τις εξωτερικές αλλαγές (π.χ., θερμοκρασία σώματος). Στα πολύπλοκα συστήματα μιλάμε και για homeokinesis (δυναμική ισορροπία).
- 6. **Ανατροφοδότηση (Feedback):**
 - ο Αρνητική ανατροφοδότηση → σταθεροποιεί (π.χ., θερμοστάτης).
 - ο Θετική ανατροφοδότηση → ενισχύει και μπορεί να οδηγήσει σε εκθετική ανάπτυξη ή κατάρρευση (π.χ., αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση, ή viral φαινόμενα στα social media).
- 7. **Εντροπία και Αυτο-οργάνωση:** Η εντροπία μπορεί να γίνει κατανοητή ως ένα μέτρο της αβεβαιότητας της κατανομής πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής. Η πιο ενορατική και σύγχρονη κατανόηση της εντροπίας (ιδιαιτέρως στη θεωρία της πληροφορίας) είναι ακριβώς μέσα από την έννοια της έκπληξης (surprise) ή, πιο τυπικά, της απροσδόκητης πληροφορίας. Η εντροπία μετρεί πόσο μας εκπλήσσει κατά μέσο όρο ένα σύστημα ή μια πηγή μηνυμάτων. Όσο πιο προβλέψιμο είναι κάτι → τόσο λιγότεροτερη έκπληξη → χαμηλή εντροπία. Όσο πιο άτακτο, απρόβλεπτο, χαοτικό είναι κάτι → τόσο μεγαλύτερη έκπληξη → υψηλή εντροπία.
Ας εξετάσουμε και το ακόλουθο συναφές, αλλά απλούστερο, παράδειγμα: Σε ένα φλιτζάνι που περιέχει καφέ, ρίχνουμε γάλα. Αρχικώς, έχουμε τον καφέ και το γάλα χωριστά, και έτσι το ρόφημα αρχικώς χαρακτηρίζεται από ένα υψηλό επίπεδο τάξης, δεν είναι πολύπλοκο, αλλά, καθώς αναμειγνύουμε τον καφέ και το γάλα, συμβαίνουν πολύπλοκα πράγματα (που φαίνονται ακόμα και στα σχήματα που εμφανίζονται στο μείγμα)· και, όταν ο καφές και το γάλα είναι πλήρως αναμειγμένα μεταξύ τους, προκύπτει το μέγιστο επίπεδο εντροπίας, μεγιστοποιείται η αταξία (αναμειγνύοντας αυτά τα δύο συστατικά, έχουμε αυξήσει την αταξία του ροφήματος, και, τώρα, για να ξαναχωρίσουμε τον καφέ από το γάλα, χρειάζεται να καταβάλλουμε πολύ μεγάλη προσπάθεια—αυτό είναι ένα παράδειγμα της «εντροπίας της ανάμειξης»). Η «πολυπλοκότητα» αναφέρεται σε μια κατάσταση που βρίσκεται μεταξύ της αυστηρής τάξης και της μέγιστης αταξίας, δηλαδή μεταξύ πολύ χαμηλής και πολύ υψηλής εντροπίας.

3. Κύριες έννοιες & κλάδοι

- **Γενική Θεωρία Συστημάτων (General Systems Theory – GST):** Ludwig von Bertalanffy (1950s): αναζήτηση ισομορφισμών (κοινών νόμων) σε συστήματα διαφορετικής φύσης.
- **Κυβερνητική (Cybernetics):** Norbert Wiener, Ross Ashby, Stafford Beer. Μελέτη ελέγχου και επικοινωνίας σε ζώα και μηχανές. Ανατροφοδότηση, «νόμος της απαιτούμενης ποικιλίας» (Ashby). Ο **Νόμος της Απαιτούμενης Ποικιλίας** (Law of Requisite Variety) του W. Ross Ashby είναι ένα από τα πιο θεμελιώδη και ισχυρά θεωρήματα της Κυβερνητικής και της Επιστήμης Συστημάτων.

Η πιο διάσημη διατύπωσή του είναι:

«Μόνο η ποικιλία μπορεί να ελέγξει την ποικιλία» ή πιο τυπικά: **«Only variety can absorb variety»**.

Τι ακριβώς σημαίνει με απλά ελληνικά;

Αν ένα σύστημα (ή ένας ελεγκτής, ένας οργανισμός, ένας εγκέφαλος, μια επιχείρηση, μια κυβέρνηση) θέλει να **ελέγξει πλήρως** ή να σταθεροποιήσει ένα

άλλο σύστημα που έχει πολλές πιθανές καταστάσεις (δηλαδή μεγάλη ποικιλία), τότε **ο ελεγκτής πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον την ίδια ή μεγαλύτερη ποικιλία αντιδράσεων.**

Αν η ποικιλία του ελεγκτή είναι μικρότερη από την ποικιλία του ελεγχόμενου συστήματος → ο έλεγχος θα είναι **ελλιπής ή αδύνατος.**

- **Θεωρία Πολυπλοκότητας & Χάους:** Ελκυστές, ευαισθησία σε αρχικές συνθήκες (butterfly effect), fractal δομές, άκρο του χάους (edge of chaos). Στη θεωρία δυναμικών συστημάτων, ένας ελκυστής (attractor) είναι ένα σύνολο καταστάσεων προς το οποίο τείνει να εξελιχθεί το σύστημα μετά από αρκετό χρόνο, ανεξαρτήτως από τις αρχικές συνθήκες (αρκεί αυτές να βρίσκονται σε μια περιοχή γύρω από τον ελκυστή, που λέγεται *περιοχή έλξης*).

Πιο συγκεκριμένα, ένας ελκυστής μπορεί να είναι:

Σταθερό σημείο: Το σύστημα καταλήγει σε μια σταθερή κατάσταση (π.χ., ηρεμία ενός εκκρεμούς).

Οριακός κύκλος: Η κίνηση γίνεται περιοδική (π.χ. σταθερές ταλαντώσεις).

Τόρος: Η κίνηση είναι σχεδόν περιοδική με πολλαπλές συχνότητες.

Χαοτικός ελκυστής: Το σύστημα κινείται σε ένα μη περιοδικό αλλά δομημένο μονοπάτι (π.χ., ο ελκυστής Lorenz).

Ιδιότητες ενός ελκυστή:

Είναι ένα σύνολο στο χώρο φάσεων (state space).

Έχει μια περιοχή έλξης από όπου οι τροχιές συγκλίνουν προς αυτόν.

Οι τροχιές παραμένουν στον ελκυστή μόλις φθάσουν εκεί.

Μπορεί να έχει πολύπλοκη γεωμετρία (ιδίως στα χαοτικά συστήματα).

Οι ελκυστές περιγράφουν τη μακροχρόνια συμπεριφορά ενός συστήματος: τι τελικά θα κάνει, ανεξαρτήτως από το πώς εκκίνησε.

Αναφορικά με το χάος, στο βιβλίο μου *Επιστήμη Συστημάτων, Θεωρία Πολυπλοκότητας, και Οργάνωση*, διευκρινίζω τα εξής:

«Με τον όρο «χάος», αναφερόμαστε, ειδικώς, σε μια *φαινόμενη* τυχαιότητα (apparent randomness) που προκύπτει από ένα ντετερμινιστικό σύστημα με ευαίσθητη εξάρτηση στις αρχικές συνθήκες, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμα και μικρές αλλαγές στην αρχική κατάσταση οδηγούν σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα με την πάροδο του χρόνου, όπως, π.χ., στα μετεωρολογικά συστήματα. Ουσιαστικώς, τα τυχαία συστήματα είναι *θεμελιωδώς (εγγενώς)* απρόβλεπτα, ενώ τα χαοτικά συστήματα είναι θεμελιωδώς ντετερμινιστικά, αλλά *πρακτικώς* απρόβλεπτα λόγω της εξαιρετικής ευαισθησίας τους στις αρχικές συνθήκες». Στο ίδιο βιβλίο μου, αναφορικά με τον έλεγχο του χάους, γράφω τα εξής: «Ένα χαοτικό σύστημα είναι απρόβλεπτο, και μια αυθαίρετη παρέμβαση σε ένα χαοτικό σύστημα μπορεί να το κάνει «χειρότερο» ως προς την εκδήλωση χαοτικής συμπεριφοράς. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει το χάος δεν μπορεί να ελεγχθεί. Οι ελκυστές των χαοτικών συστημάτων αποτελούνται από απείρως πολλές τροχιές που είναι περιοδικές και, άρα, προβλέψιμες, αλλά είναι επίσης ασταθείς. Ο πραγματικός δρόμος του συστήματος εναλλάσσεται μεταξύ εκείνων των ασταθών περιοδικών τροχιών, και, επειδή το σύστημα βρίσκεται τόσο κοντά σε περιοδικές τροχιές, χρειάζεται μόνο πολύ μικρές διορθώσεις για να διατηρηθεί επάνω σε κάποια από αυτές. Αυτή η διαπίστωση είναι πολύ σημαντική, διότι μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, διαταράσσοντας (perturbing) *καταλλήλως* ένα χαοτικό σύστημα, όχι μόνο δεν το καθιστούμε «χειρότερο» ως προς την εκδήλωση χαοτικής συμπεριφοράς, αλλά μπορούμε να το επαναφέρουμε σε μια κατάσταση εκδήλωσης κανονικής συμπεριφοράς (βλ. Ott, Grebogi, and Yorke, 1990). Με άλλα λόγια, ο «έλεγχος του χάους»

σημαίνει τη σταθεροποίηση, μέσω *κατάλληλων* διαταραχών (perturbations) του συστήματος, μίας από τις προαναφερθείσες ασταθείς περιοδικές τροχιές. Μια σκόπιμη διαταραχή που αποσκοπεί στο να καταστήσει το χαοτικό σύστημα ευσταθές και προβλέψιμο πρέπει να είναι μικρή σε σχέση με το μέγεθος του ελκυστή του συστήματος για να αποφευχθεί η τροποποίηση της φυσικής δυναμικής του συστήματος».

- **Δυναμικά Συστήματα (Dynamical Systems):** Jay Forrester (MIT). Μοντελοποίηση με βρόγχους ανατροφοδότησης και αποθέματα/ροές (εργαλεία: Vensim, Stella). Στα τέλη του 19ου αιώνα και στις αρχές του 20ού αιώνα, ο Γάλλος μαθηματικός και φιλόσοφος Henri Poincaré ανέπτυξε και μελέτησε συστηματικώς την έννοια ενός «δυναμικού συστήματος» (dynamical system)—που συνοπτικώς μπορεί να γίνει κατανοητό ως ένα σύνολο κανόνων που περιγράφουν το πώς κάτι αλλάζει με την πάροδο του χρόνου—προκειμένου να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των υπάρχουσών μαθηματικών μεθόδων στη λύση πολύπλοκων προβλημάτων στην ουράνια μηχανική, ιδιαιτέρως αναφορικώς με την ευστάθεια του ηλιακού συστήματος. Στον 20ό αιώνα, οι σημαντικότεροι μαθηματικοί που πρωτοστάτησαν στη συνέχιση και στην ανάπτυξη του ερευνητικού έργου του Poincaré στη θεωρία δυναμικών συστημάτων ήταν ο Αμερικανός μαθηματικός George David Birkhoff και ο Σοβιετικός-Ρώσος μαθηματικός Vladimir Arnold. Τα δυναμικά συστήματα μοντελοποιούνται με εξισώσεις διαφοράς (difference equations) ή με διαφορικές εξισώσεις (differential equations), όταν είναι διακριτά ή συνεχή, αντιστοίχως.

Δύο απλά παραδείγματα:

Εξίσωση διαφοράς: Η λογιστική απεικόνιση (logistic map), που χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, στη βιολογία (μελέτη της αύξησης πληθυσμών) καθώς και στα οικονομικά:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n),$$

όπου: το x_n η τιμή της μεταβλητής στη γενεά ή στο χρονικό βήμα n (συνήθως, $x_n \in [0,1]$), το r είναι η παράμετρος ελέγχου (συνήθως, $r \in [0,4]$), και το x_{n+1} είναι η τιμή της μεταβλητής στην επόμενη γενεά ή στο επόμενο χρονικό βήμα $n + 1$.

Διαφορική εξίσωση (δημογραφία):

$$\frac{dp(t)}{dt} = kp(t) \Leftrightarrow \frac{dp(t)}{p(t)} = kdt,$$

όπου: το $p(t)$ συμβολίζει τον συνολικό πληθυσμό στη χρονική στιγμή t , το k είναι η σταθερά μεγέθυνσης ή η σταθερά μείωσης του πληθυσμού, αναλόγως με την περίπτωση, και το $p(t_0) = p_0$ είναι η αρχική συνθήκη (ο αρχικός πληθυσμός). Αυτή η διαφορική εξίσωση είναι γραμμική, και η λύση της (με διαχωρισμό μεταβλητών) είναι $p(t) = p_0 e^{kt}$, όπου το p_0 συμβολίζει τον αρχικό πληθυσμό.

- **Έμβια Συστήματα (Living Systems Theory):** James Grier Miller (1916–2002), στο μνημειώδες έργο του *Living Systems* (1978), απέδειξε ότι *όλα τα έμβια συστήματα* (από το κύτταρο μέχρι την υπερεθνική κοινωνία) έχουν την ίδια βασική αρχιτεκτονική. Για να επιβιώσουν και να λειτουργήσουν, *κάθε έμβιο σύστημα* πρέπει να εκτελεί $19 + 1 = 20$ **κρίσιμα υποσυστήματα** (critical subsystems). Αυτά τα 20 υποσυστήματα είναι **καθολικά**: υπάρχουν σε όλα τα επίπεδα οργάνωσης της ζωής.

- **Ήπια Συστήματα (Soft Systems Methodology – SSM):** Peter Checkland: για κοινωνικοτεχνικά συστήματα όπου οι στόχοι είναι ασαφείς και υπάρχουν πολλαπλές προοπτικές.
- **Θεωρία Αυτο-οργάνωσης & Autopoiesis:** Maturana & Varela: τα έμβια συστήματα είναι αυτο-παραγωγικά δίκτυα (το σύστημα παράγει τα ίδια του τα στοιχεία). Οι Χιλιανοί βιολόγοι και φιλόσοφοι **Humberto Maturana** (1928–2021) και **Francisco Varela** (1946–2001) συνέβαλαν σημαντικά στον τρόπο που κατανοούμε τη ζωή, το νου, και τη γνώση.

Οι τρεις μεγάλες τους έννοιες-κλειδιά:

Αυτοποίηση (Autopoiesis).

Δομικός ετεροκαθορισμός/ζευγισμός (Structural Coupling).

Η γνώση είναι βιολογικό φαινόμενο (Ενσαρκωμένη γνώση – Embodied Cognition).

4. Γιατί είναι χρήσιμη η Επιστήμη Συστημάτων σήμερα;

- Βοηθεί να κατανοήσουμε πολύπλοκα προβλήματα (κλιματική αλλαγή, πανδημίες, οικονομικές κρίσεις, ψηφιακή διακυβέρνηση) που είναι μη-γραμμικά και διεπιστημονικά.
- Προάγει τη διεπιστημονικότητα και τη γενική μελέτη του φαινομένου της οργάνωσης, είτε αυτό αφορά στις φυσικές επιστήμες είτε αφορά στις κοινωνικές επιστήμες.
- Δίδει εργαλεία για σχεδιασμό ανθεκτικών και βιώσιμων συστημάτων (resilience thinking) και για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας.

Συμπέρασμα:

Η Επιστήμη Συστημάτων μάς διδάσκει να βλέπουμε τον κόσμο όχι ως συλλογή μεμονωμένων αντικειμένων, αλλά ως δίκτυα σχέσεων, ανατροφοδοτήσεων, και αναδυόμενων ιδιοτήτων που εξελίσσονται διαχρονικώς, και, άρα, σε μαθηματικό επίπεδο, οδηγούμαστε από τη θεωρία δικτύων στη θεωρία δυναμικών συστημάτων.

Τα δίκτυα (networks) και τα δυναμικά συστήματα (dynamical systems) δεν είναι ανταγωνιστικά, αλλά **συμπληρωματικά**. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις τα δίκτυα μόνα τους δεν αρκούν, και χρειαζόμαστε απαραίτητως δυναμικά συστήματα. Ακολουθούν οι βασικοί λόγοι:

Αυτό που δίδουν τα δίκτυα	Τι λείπει από τα δίκτυα	Γιατί χρειαζόμαστε δυναμικά συστήματα
Δομή: ποιοι συνδέονται με ποιους (τοπολογία).	Δεν λένουν τίποτε για το πώς αλλάζει η κατάσταση με τον χρόνο.	Χρειαζόμαστε εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη (π.χ., $dx/dt = \dots$ ή $x_{n+1} = \dots$).
Στατική εικόνα (ή στιγμιότυπο).	Δεν περιγράφουν δυναμική, ροή, ταλαντώσεις, χάος, ευσταθείς καταστάσεις.	Χρειαζόμαστε έννοιες χρόνου και εξέλιξης.
Μέτρα όπως degree, centrality, clustering.	Δεν προβλέπουν αν το σύστημα θα συγχρονιστεί, θα εκραγεί, θα καταρρεύσει.	Τα δυναμικά συστήματα πληροφορούν περί ελκυστών, διχαλώσεων, και ευστάθειας.
Μπορούμε να δούμε ποιοι είναι «σημαντικοί» κόμβοι.	Δεν γνωρίζουμε αν η αφαίρεση ενός κόμβου θα προκαλέσει cascade failure ή όχι.	Χρειαζόμαστε μοντέλο διάδοσης (epidemic, opinion, failure) επάνω στο δίκτυο.

5. Σύνοψη των μαθηματικών θεωριών που χρησιμοποιούμε στη σύγχρονη επιστήμη συστημάτων:

A/A	Μαθηματικό πεδίο	Τι περιγράφει και Γιατί είναι απαραίτητο	Κλασικοί/σύγχρονοι εκπρόσωποι & εφαρμογές
1	Δυναμικά Συστήματα (Dynamical Systems)	Εξέλιξη συστημάτων στον χρόνο (συνεχή ή διακριτά)	Lorenz, Poincaré, Strogatz, Smale → καιρικά μοντέλα, πληθυσμοί, νευρωνικά
2	Θεωρία Ελέγχου & Κυβερνητική	Ανατροφοδότηση, ευστάθεια, έλεγχος (optimal control)	Wiener, Ashby, Kalman → ρομποτική, αυτοκίνητα, οικονομία
3	Θεωρία Πληροφορίας (Information Theory)	Εντροπία Shannon, αμοιβαία πληροφορία, κανάλια	Shannon, Jaynes → δίκτυα, βιολογία, μηχανική μάθηση
4	Θεωρία Δικτύων (Network Theory)	Γραφήματα, κλίμακα-ελεύθερα, small-world, centrality	Barabási-Albert, Watts-Strogatz → κοινωνικά δίκτυα, εγκέφαλος, internet
5	Θεωρία Παιγνίων (Game Theory)	Στρατηγικές αλληλεπιδράσεις, Nash equilibrium, evolutionary games	von Neumann, Nash, Axelrod → οικονομία, βιολογία, πολιτική
6	Μη-Γραμμική Δυναμική & Θεωρία Χάους	Attractors, bifurcations, Lyapunov exponents, fractals	Lorenz attractor, Feigenbaum, Mandelbrot → καιρός, καρδιακοί παλμοί
7	Στοχαστικές Διαδικασίες & Markov Chains	Τυχαίες μεταβάσεις, σταθερή κατανομή	Markov, Gillespie → επιδημίες, χρηματιστήριο, γονίδια
8	Θεωρία Πολυπλοκότητας (Complexity Science)	Self-organized criticality, power laws, edge of chaos	Bak, Holland, Kauffman → αμμοσωροί, εξέλιξη, οικονομικές κρίσεις
9	Cellular Automata & Agent-Based Modeling	Τοπικοί κανόνες → καθολική αναδυόμενη συμπεριφορά	von Neumann, Wolfram, Epstein-Axtell → Game of Life, NetLogo μοντέλα
10	Θεωρία Κατηγοριών & Μορφισμοί	Αφηρημένη περιγραφή σχέσεων μεταξύ συστημάτων. Ανάλυση σχέσεων μεταξύ καθαρών δομών	Lawvere, Spivak → εφαρμοσμένη θεωρία κατηγοριών σε συστήματα
11	Bayesian Στατιστική (Μπέϊζιαν Ανάλυση) & Πιθανοτική Συναγωγή	Ενημέρωση πεποιθήσεων, causal inference	Jaynes, Pearl → ιατρική, AI, κοινωνικές επιστήμες
12	Φράκταλ & Αυτο-ομοιότητα	Δομές που επαναλαμβάνονται σε διαφορετικές κλίμακες	Mandelbrot → ακτές, πνεύμονες, χρηματιστήρια
+1	Πολυ-επίπεδη Μοντελοποίηση & Ιεραρχικά Μοντέλα	Συσχέτιση μικρο- και μακρο-επιπέδων (Miller, Maturana)	Μετα-μοντέλα σε οικολογία, κοινωνιολογία, νευροεπιστήμη

Τα «πιο συχνά» μαθηματικά εργαλεία στην καθημερινή έρευνα στο πλαίσιο της σύγχρονης επιστήμης συστημάτων

1. Δυναμικά συστήματα + μη-γραμμική ανάλυση
2. Θεωρία δικτύων
3. (Μαθηματική) Θεωρία πληροφορίας
4. Agent-based & cellular automata
5. Bayesian + causal inference

Παραπέμπω σχετικώς στο βιβλίο μου με τίτλο *Επιστήμη Συστημάτων, Θεωρία Πολυπλοκότητας, και Οργάνωση* (Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, υπό έκδοση, προς κυκλοφορία στο 2026).

Επίλογος

Η Επιστήμη Συστημάτων δεν χρησιμοποιεί τα μαθηματικά τόσο για να περιγράψει την ύλη, όσο για να περιγράψει την οργάνωση και τις σχέσεις. Μια μεθοδική εξήγηση του ουσιαστικού περιεχομένου, της ιστορίας, και της μαθηματικής εργαλειοθήκης και θεμελίωσης της επιστήμης συστημάτων θα βρείτε στο υπό έκδοση βιβλίο μου για την επιστήμη συστημάτων, που θα κυκλοφορήσει στην ελληνική γλώσσα στο πρώτο τρίμηνο του 2026 από τις Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.

Ευχαριστώ πολύ τον Πρόεδρο και το Διοικητικό Συμβούλιο της Ελληνικής Μαθηματικής Εταιρείας και όλους εσάς που παρακολουθήσατε αυτή την ομιλία μου, και είμαι προσωπικώς στη διάθεση κάθε ενδιαφερομένου για μια διανοητική αλληλεπίδραση και αλληλοβοήθεια στην κοινή μας επιδίωξη για απόκτηση όλο και περισσότερων γνωστικών σημαντικών και ικανοποιητικών καταστάσεων.

Νικόλαος Λάος

