



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία  
Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα Φιλοσοφίας και Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Η Αντικατάσταση των Ζώων Εργαστηρίου με Μεθόδους Μηχανικής Μάθησης»

της Βασιλικής Ξυπόλυτου

Μέλη Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

**Ευάγγελος Πρωτοπαπαδάκης**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), ΕΚΠΑ, Τμήμα Φιλοσοφίας,  
Διδάσκων ΔΠΜΣ «Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό  
Ινστιτούτο Παστέρ

**Γεώργιος Αραμπατζής**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), ΕΚΠΑ, Τμήμα Φιλοσοφίας, Διδάσκων ΔΠΜΣ  
«Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

**Μιχαήλ Μαντζανάς**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), Ανώτατη Εκκλησιαστική Ακαδημία, Διδάσκων  
ΔΠΜΣ «Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

Ημερομηνία Παρουσίασης: 13/03/2024

Αθήνα, 2024

Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών

Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα Φιλοσοφίας

Ευπόλυτου Βασιλική, © [2024] - Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Διδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία  
Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα Φιλοσοφίας και Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Η Αντικατάσταση των Ζώων Εργαστηρίου με Μεθόδους Μηχανικής Μάθησης»

της Βασιλικής Ξυπόλυτου

Μέλη Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

**Ευάγγελος Πρωτοπαπαδάκης**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), ΕΚΠΑ, Τμήμα Φιλοσοφίας,  
Διδάσκων ΔΠΜΣ «Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό  
Ινστιτούτο Παστέρ

**Γεώργιος Αραμπατζής**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), ΕΚΠΑ, Τμήμα Φιλοσοφίας, Διδάσκων ΔΠΜΣ  
«Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

**Μιχαήλ Μαντζανάς**, Μέλος ΔΕΠ (Καθηγητής), Ανώτατη Εκκλησιαστική Ακαδημία, Διδάσκων  
ΔΠΜΣ «Ζώα: Ηθική, Δίκαιο, Ευζωία» Τμήματος Φιλοσοφίας ΕΚΠΑ-Ελληνικό Ινστιτούτο Παστέρ

Αθήνα, 2024

## Περίληψη

Η ηθική της πρακτικής της χρήσης ζώων εργαστηρίου, αν και ζωτικής σημασίας για την επιστήμη, απασχολεί όλο και περισσότερο τόσο τους επιστήμονες όσο και την ευρύτερη κοινή γνώμη. Ωστόσο τα θεμέλια για την ηθικότερη μεταχείριση των ζώων που χρησιμοποιούνται στην έρευνα και στην εκπαίδευση τέθηκαν από τους Russell & Buch τη δεκαετία του 1950 με την διατύπωση της θεωρίας των 3R. Έκτοτε η Αντικατάσταση (Replacement), η Μείωση (Reduction) και η Βελτίωση (Refinement) αποτελούν βασικές αρχές των επιστημόνων στην εκπόνηση ερευνητικών και εκπαιδευτικών προγραμμάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής μελέτης είναι η διερεύνηση των υπαρχόντων τεχνολογικών επιτευγμάτων που σχετίζονται με τον τομέα της Μηχανικής Μάθησης και οι προοπτικές αλλά και οι περιορισμοί που υπάρχουν για την αντικατάσταση των ζώων εργαστηρίου.

Για την αρτιότερη εξυπηρέτηση του σκοπού της συγκεκριμένης μελέτης, στην πρώτη ενότητα εξετάζεται η ιστορία της χρήσης ζώων εργαστηρίου στην επιστήμη ενώ στη δεύτερη ενότητα γίνεται εκτενής αναφορά στους κανονισμούς και τις νομοθεσίες που διέπουν την επιστημονική έρευνα για την προστασία των πειραματοζώων. Στην τρίτη ενότητα αναλύονται τα βιοηθικά ζητήματα που απασχολούν την ερευνητική κοινότητα αναφορικά με τα πειράματα σε ζώα καθώς και η εφαρμογή των 3R. Στην τέταρτη ενότητα μελετάται ο ορισμός της μηχανικής μάθησης, παρέχοντας μια κατανόηση των βασικών αρχών και εννοιών που σχετίζονται με αυτήν την πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Στις ενότητες πέντε έξι και επτά, διερευνώνται οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στα πεδία της βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας, της δοκιμής βιολογικών προϊόντων και της εκπαίδευσης αντίστοιχα. Στην όγδοη ενότητα γίνεται μια επισκόπηση των περιορισμών που υφίστανται για την πλήρη αντικατάσταση των ζώων εργαστηρίου με μεθόδους μηχανικής μάθησης. Τέλος στην ένατη ενότητα εξετάζονται οι εξελίξεις που αναμένεται να συμβούν στον τομέα της μηχανικής μάθησης σε συνδυασμό με τα πεδία που έχουν ήδη αναφερθεί.

**Λέξεις κλειδιά:** ζώα εργαστηρίου, μηχανική μάθηση, αντικατάσταση, έρευνα και εκπαίδευση

## **Abstract**

The ethics around the practice of animal use for laboratory testing, even though vital for science, is of increased concern for both scientists and the public. However, the foundations for the ethical treatment of animals used for research and education were laid down by Russell & Buch in the 1950s with the formulation of the 3 R's principle. Thenceforth, Replacement, Reduction, and Refinement have become core values for scientists developing research and educational programs.

The objective of the current thesis is to investigate the current technological advancements related to the field of Machine Learning, as well as the prospects but also the limitations revolving around the replacement of laboratory animals.

To better serve the purpose of this particular study, in the first section the history of the use of laboratory animals in science is examined, while the second section focuses on an extensive reference to the regulations and legislation governing scientific research for the protection of laboratory animals. The third section analyzes the bioethical issues and concerns of the research community regarding animal experiments as well as the application of the 3Rs. The fourth section explores the definition of machine learning, providing an understanding of the basic principles and concepts associated with this field of artificial intelligence. In modules five, six and seven, the applications of machine learning in the fields of basic & applied research, biological product testing and education are explored respectively. The eighth section reviews the limitations of completely replacing laboratory animals with machine learning methods. Last but not least, in the ninth section, the developments that are expected to happen in the field of machine learning are examined in conjunction with the fields already mentioned.

**Keywords: laboratory animals, machine learning, replacement, research and training**

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Περιεχόμενα.....	6
Εισαγωγή.....	7
Ενότητα 1η.....	8
Η ιστορία της χρήσης ζώων για επιστημονικούς σκοπούς.....	8
Ενότητα 2η.....	10
Το ισχύον νομικό πλαίσιο για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση.....	10
Ενότητα 3η.....	13
Βιοηθικά ζητήματα και εφαρμογή των 3Rs.....	13
3.1. Αντικατάσταση.....	14
3.2. Μείωση.....	14
3.3. Βελτιστοποίηση.....	14
Ενότητα 4η.....	19
Ορισμός Μηχανικής Μάθησης.....	19
Ενότητα 5η.....	25
Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην βασική και εφαρμοσμένη έρευνα.....	25
Ενότητα 6η.....	29
Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων.....	29
Ενότητα 7η.....	35
Εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στην εκπαίδευση.....	35
Ενότητα 8η.....	40
Περιορισμοί πλήρους αντικατάστασης των ζώων εργαστηρίου μέσω της μηχανικής μάθησης.....	40
Ενότητα 9η.....	43
Μελλοντικές Τάσεις.....	43
Επίλογος.....	45
Βιβλιογραφία.....	46

## Εισαγωγή

Η αντικατάσταση των ζώων στα εργαστήρια με μεθόδους μηχανικής μάθησης αναδεικνύεται ως σημαντική προοπτική στον τομέα της επιστημονικής έρευνας. Η συνειδητοποίηση της ανάγκης για αλλαγή στη συνηθισμένη πρακτική χρήσης ζώων προκύπτει από τον επιδεινούμενο δεοντολογικό και ηθικό προβληματισμό που περιβάλλει αυτόν τον ερευνητικό τομέα.

Η παραδοσιακή πρακτική χρήσης ζώων για επιστημονικούς σκοπούς επιφέρει σημαντικά ηθικά, βιοηθικά και νομικά ζητήματα. Ο πόνος και η ταλαιπωρία που υφίστανται τα ζώα, καθώς και τα ηθικά ερωτήματα που αφορούν τη χρησιμοποίησή τους, αναδεικνύουν την ανάγκη για νέες, εναλλακτικές προσεγγίσεις.

Η επένδυση στη μηχανική μάθηση ως μέσο αντικατάστασης των ζώων στα εργαστήρια είναι μια πρωτοποριακή προσέγγιση που προσφέρει νέες δυνατότητες στην επιστημονική κοινότητα. Μέσω της χρήσης αλγορίθμων, συστημάτων εκμάθησης και τεχνητής νοημοσύνης, η μηχανική μάθηση ανοίγει νέους ορίζοντες για την προσέγγιση επιστημονικών ερευνών, χωρίς την ανάγκη χρήσης ζώων ως πειραματόζωων.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να εξετάσει εκτενώς και αναλυτικά την προοπτική αντικατάστασης των ζώων στα εργαστήρια μέσω της μηχανικής μάθησης αναλύοντας τις δυνατότητες, τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές αυτής της τεχνολογίας.

Με την έλευση της μηχανικής μάθησης, η επιστημονική κοινότητα βρίσκεται σε μια κρίσιμη στιγμή, όπου η καινοτομία συναντά την ηθική δέσμευση. Η ανάπτυξη μιας νέας επιστημονικής συνείδησης μπορεί να ανοίξει τον δρόμο για ένα μέλλον όπου η πρόοδος και η σεβαστή μεταχείριση των ζώων συγκλίνουν σε ένα ισορροπημένο, βιώσιμο μέλλον ερευνητικής πρακτικής.

## Ενότητα 1<sup>η</sup>

### Η ιστορία της χρήσης ζώων για επιστημονικούς σκοπούς

Η χρήση των ζώων για επιστημονικούς σκοπούς έχει μακρά και πολύπλοκη ιστορία, βαθιά συνυφασμένη με την εξέλιξη της ανθρώπινης γνώσης και των τεχνολογικών δυνατοτήτων. Κατά τη διάρκεια των αιώνων, τα ζώα έχουν χρησιμοποιηθεί σε επιστημονικές προσπάθειες για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένων των πειραματισμών, της παρατήρησης και των δοκιμών<sup>[1]</sup>. Αυτή η ιστορική εξερεύνηση θα διασχίσει το χρονοδιάγραμμα της χρήσης των ζώων στην επιστήμη, από τους αρχαίους πολιτισμούς έως τους σύγχρονους χρόνους, εξετάζοντας τα κίνητρα, τις μεθοδολογίες, τις ηθικές εκτιμήσεις και τις κομβικές στιγμές που διαμόρφωσαν αυτήν την πρακτική.

Οι ρίζες της χρήσης ζώων σε επιστημονικές αναζητήσεις εντοπίζονται στους αρχαίους πολιτισμούς. Στην αρχαία Αίγυπτο, για παράδειγμα, η μελέτη της ανατομίας και της ιατρικής συχνά περιλάμβανε ανατομία ζώων. Ομοίως, αρχαίοι Έλληνες μελετητές, συμπεριλαμβανομένων του Αριστοτέλη και του Γαληνού, διεξήγαγαν εκτενείς μελέτες σε ζώα για να κατανοήσουν την ανατομία, τη φυσιολογία και τη φυσική ιστορία. Αυτές οι πρώτες προσπάθειες έθεσαν τις βάσεις για συστηματικές παρατηρήσεις και ταξινόμηση των ζωντανών οργανισμών.

Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα, η επιστημονική έρευνα περιορίστηκε καθώς η δεισιδαιμονία και το θρησκευτικό δόγμα κυριαρχούσαν στον διανοητικό λόγο. Ωστόσο, με την έναρξη της Αναγέννησης, αναπτύχθηκε ένα ανανεωμένο ενδιαφέρον για την εμπειρική παρατήρηση. Το έργο ανθρώπων όπως ο Λεονάρντο ντα Βίντσι αποτελεί παράδειγμα μιας επιστροφής στη μελέτη της ανατομίας. Σε αυτήν την περίοδο, τα ζώα θεωρούνταν υποκατάστατα για την κατανόηση της ανθρώπινης ανατομίας και η χρήση τους στην επιστημονική μελέτη έγινε πιο συστηματική.

Η Εποχή του Διαφωτισμού σηματοδότησε μια σημαντική αλλαγή στην επιστημονική σκέψη, δίνοντας έμφαση στη λογική, την παρατήρηση και τα εμπειρικά στοιχεία. Τα ζώα θεωρούνταν όλο και περισσότερο ως υποκείμενα πειραματισμού για την επικύρωση υποθέσεων και την ανάπτυξη θεωριών. Φυσιολόγοι όπως ο Claude Bernard τον 19ο αιώνα χρησιμοποίησαν ζώα για να διερευνήσουν τις φυσιολογικές διεργασίες, θέτοντας τα θεμέλια για την πειραματική ιατρική. Η άνοδος της χρήσης ζώων κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου πυροδότησε συζητήσεις σχετικά με την ηθική μεταχείριση των ζώων στην έρευνα<sup>[2]</sup>.

Με την έλευση του 20ου αιώνα και τις πρωτοφανείς εξελίξεις στην επιστήμη και την τεχνολογία, παρατηρήθηκε μια εκθετική αύξηση της χρήσης των ζώων εργαστηρίου. Τα μοντέλα ζώων έγιναν ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως η φαρμακολογία, η τοξικολογία και η γενετική. Η ανάπτυξη αντιβιοτικών, εμβολίων και ιατρικών θεραπειών συχνά περιελάμβανε εκτεταμένες δοκιμές σε ζώα. Η ανακάλυψη της ινσουλίνης, για παράδειγμα, βασίστηκε σε πειράματα με σκύλους. Κατ' αυτό τον τρόπο την ίδια εποχή αυξήθηκαν οι ηθικές ανησυχίες για τη χρήση των ζώων εργαστηρίου, οδηγώντας στη θέσπιση των κατευθυντήριων γραμμών και κανονισμών<sup>[3]</sup>.

---

[1] Hajar, 2011; Kinter et al., 2021

[2] Kinter et al., 2021

[3] Taylor & Alvarez, 2019



Καθώς οι επιστημονικές εξελίξεις συνεχίστηκαν, οι ανησυχίες σχετικά με τη χρήση και τη μεταχείριση των ζώων στην έρευνα εντάθηκαν. Η δημοσίευση της «Σιωπηλής Άνοιξης» της Ρέιτσελ Κάρσον τη δεκαετία του 1960, η οποία ανέδειξε τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ορισμένων επιστημονικών πρακτικών, επηρέασε καταλυτικά το περιβαλλοντικό κίνημα. Ταυτόχρονα, το κίνημα για τα δικαιώματα των ζώων απέκτησε μεγαλύτερη δυναμική, υποστηρίζοντας την ανθρώπινη μεταχείριση των ζώων και αμφισβητώντας τους ηθικούς λόγους του πειραματισμού. Ως απάντηση σε αυτές τις ανησυχίες, διάφορες χώρες άρχισαν να εφαρμόζουν εντατικά κανονισμούς και κατευθυντήριες γραμμές για να εξασφαλίσουν την ηθική μεταχείριση των ζώων σε ερευνητικά περιβάλλοντα.

Στον 21ο αιώνα, η χρήση των ζώων στην επιστημονική έρευνα παραμένει ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα. Ενώ τα ζωικά μοντέλα εξακολουθούν να είναι απαραίτητα σε ορισμένους τομείς, υπάρχει αυξανόμενη έμφαση στην ανάπτυξη και υιοθέτηση εναλλακτικών μεθόδων. Οι πρόοδοι στις τεχνικές *in vitro*, τα υπολογιστικά μοντέλα και οι κλινικές δοκιμές με βάση τον άνθρωπο συμβάλλουν στη συνεχή βελτίωση και μείωση της χρήσης των ζώων. Η αρχή των 3Rs - Αντικατάσταση (Replacement), Μείωση (Reduction) και Βελτίωση (Refinement) - έχει γίνει ένα θεμελιώδες πλαίσιο για ηθική και υπεύθυνη έρευνα σε ζώα.

Παρά την πρόοδο στη βελτίωση των ερευνητικών πρακτικών, οι προκλήσεις παραμένουν. Η εξεύρεση ισορροπίας μεταξύ της επιστημονικής προόδου και των ηθικών παραμέτρων παραμένει ένα πολύπλοκο καθήκον. Παράλληλα, η αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων που αντιγράφουν με ακρίβεια την ανθρώπινη φυσιολογία θέτει συνεχείς προκλήσεις. Επιπλέον, οι παγκόσμιες ανισότητες στα ρυθμιστικά πλαίσια και την επιβολή συμβάλλουν σε διαφορές στις πρακτικές έρευνας με τη χρήση ζώα παγκοσμίως.

Συνοψίζοντας, η ιστορία της χρήσης ζώων για επιστημονικούς σκοπούς είναι μια αφήγηση εξέλιξης και ηθικού προβληματισμού. Από τους αρχαίους πολιτισμούς έως τη σύγχρονη εποχή, τα ζώα έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στην προώθηση της επιστημονικής γνώσης και των ιατρικών ανακαλύψεων. Το ταξίδι από τα πρώτα ευρήματα πρακτικών ανατομίας κατά τους αρχαίους χρόνους έως τη σύγχρονη γενετική μηχανική αντανακλά τα μεταβαλλόμενα στάδια της επιστημονικής έρευνας<sup>[4]</sup>. Καθώς η κοινωνία συνεχίζει να παλεύει με ηθικούς προβληματισμούς, οι τεχνολογικές καινοτομίες προσφέρουν πολλά υποσχόμενους τρόπους για την ελαχιστοποίηση της χρήσης ζώων στην έρευνα. Το μέλλον αναμφίβολα επιφυλάσσει νέες προκλήσεις και ευκαιρίες, προτρέποντας την επιστημονική κοινότητα να περιηγηθεί σε αυτό το πολύπλοκο έδαφος με ηθική ακεραιότητα και δέσμευση για την υπεύθυνη χρήση των ζώων για την αναζήτηση της γνώσης<sup>[5]</sup>.

---

[4] Franco, 2013

[5] Baumans, 2004

## Ενότητα 2<sup>η</sup>

### Το ισχύον νομικό πλαίσιο για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση

Η χρήση ζώων για επιστημονικούς σκοπούς είναι μια μακροχρόνια πρακτική, αναπόσπαστο μέρος για διάφορους ερευνητικούς τομείς. Ωστόσο, οι ηθικοί προβληματισμοί σχετικά με τη μεταχείριση των ζώων σε επιστημονικά πειράματα έχουν οδηγήσει στη θέσπιση νομικών πλαισίων με στόχο τη διασφάλιση της ευημερίας τους. Τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), έχει θεσπιστεί νομοθεσία που ρυθμίζει τη χρήση των ζώων στην έρευνα, θέτοντας πρότυπα για ηθική μεταχείριση και την προώθηση εναλλακτικών λύσεων<sup>[6]</sup>. Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστούν τα ισχύοντα νομικά πλαίσια στην Ελλάδα και την ΕΕ, διερευνώντας την ιστορική τους εξέλιξη, τις βασικές διατάξεις, τις προκλήσεις και τις εξελίξεις για την καλή διαβίωση και μεταχείριση των ζώων στην επιστημονική έρευνα.

Το νομικό πλαίσιο για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς στην ΕΕ έχει εξελιχθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες. Το θεμελιώδες μέσο είναι η οδηγία 86/609/ΕΟΚ, που εγκρίθηκε το 1986. Αυτή η οδηγία είχε ως στόχο την εναρμόνιση των εθνικών νομοθεσιών στα κράτη μέλη της ΕΕ, θεσπίζοντας κοινά πρότυπα για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται σε πειράματα. Εισήγαγε την αρχή των "3R" - Αντικατάσταση, Μείωση και Βελτιστοποίηση (Replacement, Reduction & Refinement) - ως κατευθυντήριο πλαίσιο για ηθικές και υπεύθυνες ερευνητικές πρακτικές.

Από την έκδοση της Οδηγίας 86/609/ΕΟΚ, υπήρξαν σημαντικές τροποποιήσεις και αναθεωρήσεις για την ενίσχυση της προστασίας των ζώων στην επιστημονική έρευνα. Σημαντικό ορόσημο αποτελεί η οδηγία 2010/63/ΕΕ, η οποία αντικατέστησε την προηγούμενη οδηγία το 2010. Αυτή η αναθεώρηση έδωσε έμφαση στην προώθηση εναλλακτικών μεθόδων, στη σύσταση φορέων για την καλή διαβίωση των ζώων και στην αυξημένη διαφάνεια στην υποβολή εκθέσεων<sup>[7]</sup>. Επιπλέον, εισήγαγε μια αυστηρή διαδικασία αξιολόγησης έργων, διασφαλίζοντας ότι η χρήση ζώων δικαιολογείται και ακολουθεί τις αρχές των 3R<sup>[8]</sup>.

Κάθε κράτος μέλος της ΕΕ είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή και την επιβολή των οδηγιών εντός της δικαιοδοσίας του. Οι εθνικές νομοθεσίες, όπως το Animals (Scientific Procedures) Act στο Ηνωμένο Βασίλειο, χρησιμεύουν ως μηχανισμοί για τη μεταφορά των οδηγιών της ΕΕ στο εσωτερικό δίκαιο. Το πλαίσιο της ΕΕ, επομένως, λειτουργεί ως κατευθυντήρια αρχή, προκειμένου τα κράτη - μέλη να προσαρμόζουν κατάλληλα τις σχετικές νομοθεσίες τους<sup>[9]</sup>.

Στην Ελλάδα, το νομικό πλαίσιο για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς ευθυγραμμίζεται με τις οδηγίες της ΕΕ, αντικατοπτρίζοντας τη δέσμευση για εναρμόνιση της εθνικής νομοθεσίας με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Το ελληνικό νομικό πλαίσιο περιλαμβάνει μια σειρά νόμων και κανονισμών, συμπεριλαμβανομένου του νόμου 2015/1992, ο οποίος μεταφέρει την Οδηγία 86/609/ΕΟΚ της ΕΕ στο εθνικό δίκαιο. Ο

---

[6] Marinou & Dontas, 2023

[7] Nielsen et al, 2022

[8] Storck et al., 2017

[9] EC, "Animals in Science"

νόμος αυτός θεσπίζει το πλαίσιο για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται σε επιστημονικά πειράματα, περιγράφοντας τις ευθύνες των ερευνητών, των αρμόδιων αρχών και των φορέων δεοντολογικού ελέγχου. Οι μεταγενέστερες τροποποιήσεις ευθυγράμμισαν περαιτέρω την ελληνική νομοθεσία με τα εξελισσόμενα πρότυπα της ΕΕ με πιο πρόσφατη το Προεδρικό Διάταγμα 56/2013 κατά το οποίο εναρμονίζεται η ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 2010/63/ΕΕ που αναφέρθηκε ήδη σε αυτό το κεφάλαιο.

Η Ελλάδα, όπως και άλλα κράτη μέλη της ΕΕ, αναγνωρίζει τη σημασία των ηθικών κριτηρίων στην έρευνα με τη χρήση ζώων εργαστηρίου. Οι επιτροπές ηθικής αναθεώρησης, που αποτελούνται από ειδικούς στον τομέα, αξιολογούν και εγκρίνουν ερευνητικά πρωτόκολλα που αφορούν ζώα. Αυτές οι επιτροπές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση ότι τα πειράματα συμμορφώνονται με τις αρχές των 3R και πληρούν υψηλά ηθικά πρότυπα. Τα νομικά πλαίσια τόσο στην ΕΕ όσο και στην Ελλάδα ενσωματώνουν βασικές διατάξεις για τη διασφάλιση της ευημερίας των ζώων που χρησιμοποιούνται στην επιστημονική έρευνα.

Μία από τις κεντρικές αρχές και των δύο νομικών πλαισίων είναι η απαίτηση για ηθική αναθεώρηση των ερευνητικών έργων που αφορούν ζώα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει διεξοδική εξέταση των επιστημονικών και ηθικών δικαιολογιών για τη χρήση ζώων, καθώς και αξιολόγηση της πιθανής βλάβης και οφέλους για τα εμπλεκόμενα ζώα.

Οι αρχές της αντικατάστασης, της μείωσης και της βελτίωσης είναι αναπόσπαστες και στα δύο νομικά πλαίσια. Οι ερευνητές είναι υποχρεωμένοι να διερευνήσουν και να εφαρμόσουν εναλλακτικές μεθόδους που αντικαθιστούν τη χρήση ζώων όπου είναι δυνατόν, να μειώνουν τον αριθμό των ζώων που χρησιμοποιούνται - χωρίς αυτό να διακινδυνεύει τα αποτελέσματα της έρευνας - και να βελτιώνουν τις πειραματικές διαδικασίες για να ελαχιστοποιήσουν τον πόνο και την αγωνία<sup>[10]</sup>.

Η διαφάνεια είναι ένα επίσης βασικό στοιχείο και στα δύο νομικά πλαίσια. Οι ερευνητές πρέπει να παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα πειράματά τους, συμπεριλαμβανομένων του σκοπού, των μεθόδων και των αποτελεσμάτων. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο διασφαλίζει την τήρηση των κανονισμών, αλλά συμβάλλει την ίδια στιγμή στην πρόοδο της επιστημονικής γνώσης, επιτρέποντας τον έλεγχο και την επικύρωση των ευρημάτων της έρευνας. Τόσο η ΕΕ όσο και η Ελλάδα ορίζουν αρμόδιες αρχές υπεύθυνες για την επίβλεψη της εφαρμογής των κανονισμών για την καλή διαβίωση των ζώων. Αυτές οι αρχές είναι επιφορτισμένες με την έκδοση αδειών για ερευνητικά έργα, τη διεξαγωγή επιθεωρήσεων και την επιβολή της συμμόρφωσης με τις νομικές διατάξεις<sup>[11]</sup>.

Ενώ τα νομικά πλαίσια στην Ελλάδα και την ΕΕ έχουν προωθήσει σημαντικά την προστασία των ζώων στην επιστημονική έρευνα, οι προκλήσεις εξακολουθούν να υφίστανται. Μια πρόκληση έγκειται στην επιβολή και τη συμμόρφωση με τους ισχύοντες κανονισμούς. Οι διακυμάνσεις στις πρακτικές επιβολής μεταξύ των κρατών μελών και οι περιστασιακές ελλείψεις συμμόρφωσης υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνεχή επαγρύπνηση και παρακολούθηση καθώς ο γρήγορος ρυθμός των τεχνολογικών εξελίξεων παρουσιάζει νέες προκλήσεις και ευκαιρίες. Οι νέες μέθοδοι, όπως οι δοκιμές *in vitro* και η υπολογιστική μοντελοποίηση, προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις στα παραδοσιακά πειράματα με ζώα. Ωστόσο, η ενσωμάτωση αυτών των εναλλακτικών λύσεων στα υπάρχοντα ρυθμιστικά

---

[10] Passantino, 2006

[11] EFSA, "The European Union One Health 2018 Zoonoses Report", 2019

πλαίσια απαιτεί συνεχείς προσπάθειες για την επικύρωση και την τυποποίηση αυτών των μεθόδων.

Η συμμετοχή του κοινού σε συζητήσεις σχετικά με την έρευνα σε ζώα, τις ηθικές θεωρήσεις της και την αναγκαιότητα επιστημονικών προόδων είναι ζωτικής σημασίας. Η ευαισθητοποίηση και η κατανόηση των πολιτών συμβάλλουν στην ενίσχυση της κουλτούρας υπευθυνότητας και λογοδοσίας της επιστημονικής κοινότητας. Το μέλλον των νομικών πλαισίων για την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται στην επιστημονική έρευνα περιλαμβάνει συνεχή βελτίωση και προσαρμογή στις αναδυόμενες προκλήσεις και ευκαιρίες. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, τα νομικά πλαίσια θα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να ενσωματώνουν αναδυόμενες εναλλακτικές λύσεις στις δοκιμές σε ζώα. Η υιοθέτηση τεχνολογικών καινοτομιών απαιτεί συνεχή συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, υπευθύνων χάραξης πολιτικής και ηθικών για να διασφαλιστεί ότι αυτές οι εναλλακτικές λύσεις πληρούν υψηλά πρότυπα αξιοπιστίας και ηθικής ορθότητας.

Δεδομένης της παγκόσμιας φύσης της επιστημονικής έρευνας, η διεθνής συνεργασία είναι πρωταρχικής σημασίας. Η εναρμόνιση των νομικών πλαισίων σε διεθνή κλίμακα ενισχύει τη συνέπεια στα δεοντολογικά πρότυπα, τις πρακτικές επιβολής και την προώθηση εναλλακτικών λύσεων αντί των δοκιμών σε ζώα. Συνεπώς η προώθηση της εκπαίδευσης και της κατάρτισης σε ηθικά ζητήματα και εναλλακτικές μεθόδους κρίνεται απαραίτητη. Οι ερευνητές, οι ρυθμιστικές αρχές και οι ειδικοί σε θέματα βιοηθικής θα πρέπει να είναι καλά ενημερωμένοι σχετικά με τις τελευταίες εξελίξεις και τις ηθικές επιπτώσεις, ενισχύοντας από την πλευρά τους την κουλτούρα συνεχούς μάθησης και βελτίωσης<sup>[12]</sup>.

Συνοψίζοντας, τα νομικά πλαίσια σχετικά με την προστασία των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση αντιπροσωπεύουν σημαντικά βήματα προς την εξασφάλιση ηθικής μεταχείρισης και την προώθηση εναλλακτικών λύσεων στα πειράματα με ζώα<sup>[13]</sup>. Ενσωματώνοντας τις αρχές των 3R, δίνοντας έμφαση στη διαφάνεια και καθιερώνοντας διαδικασίες ηθικής επανεξέτασης, αυτά τα πλαίσια επιδιώκουν να επιτύχουν μια ισορροπία μεταξύ της επιστημονικής προόδου και της καλής διαβίωσης των ζώων. Καθώς οι εξελίξεις συνεχίζονται και προκύπτουν προκλήσεις, η συνεχής συνεργασία, η δημόσια συμμετοχή και η προσαρμοστικότητα θα είναι κρίσιμες για τη διαμόρφωση του μέλλοντος των κανονισμών για την έρευνα σε ζώα. Η δέσμευση για ηθικές και υπεύθυνες επιστημονικές πρακτικές παραμένει κεντρική αξία στην επιδίωξη της γνώσης, με σεβασμό των δικαιωμάτων και της ευημερίας των ζώων.

---

[12]EFSA, "The European Union Summary Report on Trends and Sources of Zoonoses, Zoonotic Agents and Food-borne Outbreaks in 2014", 2015

[13] Busquet et al., 2020

## Ενότητα 3<sup>η</sup>

### Βιοηθικά ζητήματα και εφαρμογή των 3Rs

Οι ηθικοί προβληματισμοί γύρω από τη χρήση ζώων στην επιστημονική έρευνα αποτελούν ζήτημα αυξανόμενης προσοχής τόσο εντός των ερευνητικών κύκλων όσο και στην ευρύτερη κοινωνία. Οι αρχές της βιοηθικής, και συγκεκριμένα οι αρχές της Αντικατάστασης (Replacement), Μείωσης (Reduction) και Βελτιστοποίησης (Refinement) (3Rs), αποτελούν θεμέλιους λίθους για την καθοδήγηση της ηθικής διεξαγωγής της έρευνας με τη χρήση ζώων. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να εμβαθύνει στα βιοηθικά ζητήματα που είναι εγγενή στην έρευνα σε ζώα και διερευνά σε βάθος την πρακτική εφαρμογή των 3R και τα αποτελέσματα της<sup>[14]</sup>. Η βιοηθική ανάλυση σχετικά με τη χρήση ζώων στην επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται σε ένα θεμελιώδες ερώτημα: ποια είναι η ηθική κατάσταση των ζώων; Αυτό το ερώτημα αποτελεί κεντρικό πρόβλημα, καθώς διάφορες φιλοσοφικές και ηθικές προοπτικές έχουν διαμορφώσει διαφορετικές απόψεις.

Σύμφωνα με τις ωφελμιστικές προοπτικές, η ηθική αξία των ζώων έγκειται στη μείωση του πόνου και της δυστυχίας. Βάσει αυτής της φιλοσοφίας, τα ζώα θεωρούνται μέσα για την επίτευξη επιστημονικών στόχων. Η ηθική των ωφελμιστικών προοπτικών επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση του πόνου και την αύξηση του ευτυχισμένου βίου των ζώων. Από την άλλη, οι δεοντολογικές προοπτικές θεωρούν ότι τα ζώα έχουν εγγενή αξία και δικαιώματα, ανεξάρτητα από τον ρόλο τους στην ικανοποίηση ανθρωπίνων αναγκών. Κεντρικό στοιχείο αυτής της προοπτικής είναι η ιδέα της ανεξαρτησίας της αξίας του ζώου, η οποία δεν υποβάλλεται σε χρήσιμον ή μη χρήσιμον για τον άνθρωπο. Η συγκριτική ανάλυση αυτών των προοπτικών αποκαλύπτει τον πλούτο και την πολυπλοκότητα των ηθικών διλημμάτων που προκύπτουν από τη χρήση ζώων στην επιστημονική έρευνα<sup>[15]</sup>.

Η ανάλυση αυτή επίσης εξετάζει την εφαρμογή και τις επιπτώσεις των αρχών των 3R (Αντικατάσταση, Μείωση, Βελτιστοποίηση). Αυτές οι αρχές αποτελούν τον σύγχρονο ηθικό οδηγό για τη χρήση ζώων στην έρευνα, προσφέροντας κατευθυντήριες γραμμές για τη μείωση του αρνητικού αντίκτυπου στα ζώα. Συνολικά, η ηθική υπόσταση των ζώων στην επιστημονική έρευνα απαιτεί προσεκτική εξέταση και ισορροπημένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των πολυπλοκοτήτων που εμπεριέχει. Η ενημερωμένη συναίνεση αποτελεί θεμέλιο πυλώνα στην ηθική πρακτική της ανθρώπινης έρευνας, καθώς οι συμμετέχοντες έχουν το δικαίωμα να ενημερωθούν για τους σκοπούς της έρευνας και να δώσουν τη συγκατάθεσή τους<sup>[16]</sup>. Στην περίπτωση των ζώων, όμως, η έλλειψη δυνατότητας παροχής ενημερωμένης συγκατάθεσης όπως στην ανθρώπινη έρευνα, δημιουργεί σημαντικές ηθικές προκλήσεις.

Πιο αναλυτικά, οι αρχές της Αντικατάστασης, Μείωσης και Βελτιστοποίησης αποτελούν ηθική καθοδήγηση για τη χρήση ζώων στην επιστημονική έρευνα. Ο στόχος των 3R είναι να ελαχιστοποιήσουν τον αρνητικό αντίκτυπο πάνω στα ζώα, ενθαρρύνοντας τη συνειδητή χρήση και εξέλιξη των μεθόδων έρευνας.

---

[14] Lewis, 2019

[15] Madden et al., 2020; Tadich & Tarazona, 2023

[16] Gorzalczany & Rodriguez, 2021

### 3.1. Αντικατάσταση

Η αρχή της αντικατάστασης επισημαίνει την ανάγκη αναζήτησης και χρήσης εναλλακτικών μεθόδων που δεν περιλαμβάνουν τη χρήση ζώων. Η ανάπτυξη in vitro μοντέλων και υπολογιστικών προσομοιώσεων (in silico) αποτελεί προτεραιότητα.

**Εφαρμογή:** Στην πράξη, η αντικατάσταση σημαίνει την προαγωγή εναλλακτικών μεθόδων, όπως τα in vitro πειράματα, τα οποία μπορούν να προσομοιώνουν διαδικασίες που προηγουμένως απαιτούσαν τη χρήση ζώων.

**Αποτελέσματα:** Η αντικατάσταση μειώνει τον αριθμό των ζώων που απαιτούνται για πειράματα και συνεισφέρει στην προστασία της ευημερίας των ζώων.

### 3.2. Μείωση

Η αρχή της μείωσης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των ζώων που χρησιμοποιούνται. Αυτό συμπεριλαμβάνει βελτιωμένα στατιστικά σχέδια, ακριβέστερες μεθόδους μέτρησης και προσπάθειες αυτοματοποίησης.

**Εφαρμογή:** Η μείωση συνεπάγεται τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών για την εξασφάλιση ακριβέστερων και επαναχρησιμοποιήσιμων δεδομένων, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των απαιτούμενων ζώων.

**Αποτελέσματα:** Η μείωση συμβάλλει στην οικονομία ζωικών πόρων και μειώνει τον αριθμό των ζώων που εκτίθενται σε πειραματικές συνθήκες.

### 3.3. Βελτιστοποίηση

Η αρχή της βελτιστοποίησης επικεντρώνεται στη βελτίωση των συνθηκών στέγασης, φροντίδας και πειραματικών διαδικασιών για την ελαχιστοποίηση του άγχους και της ταλαιπωρίας των ζώων.

**Εφαρμογή:** Η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει πρωτόκολλα φροντίδας που προσαρμόζονται στις ανάγκες των ζώων και βελτιώνουν τις συνθήκες διαβίωσής τους.

**Αποτελέσματα:** Η βελτιστοποίηση συμβάλλει στην υγεία και την ευημερία των ζώων, παρέχοντας πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα κατά την έρευνα.

Συνολικά, η εφαρμογή των αρχών των 3R ενισχύει την ηθική διάσταση της επιστημονικής έρευνας, διασφαλίζοντας την πρόοδο σε συνδυασμό με τον σεβασμό προς τα ζώα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτονομία, ως έννοια που αφορά την ικανότητα να λαμβάνει κανείς αποφάσεις με βάση τις δικές του προτιμήσεις και αξίες, αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ηθικής. Ωστόσο, η ερώτηση που προκύπτει είναι κατά πόσον τα ζώα έχουν τη δυνατότητα αυτονομίας. Ορισμένοι θεωρούν πως τα ζώα, αν και δεν έχουν αντίστοιχη νοημοσύνη με τους ανθρώπους, διαθέτουν συγκεκριμένες προτιμήσεις και αντιλήψεις πρέπει να εισακουστούν για την ηθικότερή μεταχείρισή τους.

Η διεξαγωγή έρευνας σε ζώα χωρίς την έκφραση ενημερωμένης συγκατάθεσης τους αναδεικνύει τις ηθικές συνέπειες αυτής της πρακτικής. Οι υποστηρικτές της έρευνας σε ζώα τονίζουν τη σημασία των προσπαθειών για τη μείωση του πόνου και της δυστυχίας, όμως οι επικριτές υποστηρίζουν πως οι ζώες των ζώων θα πρέπει να έχουν εγγενή αξία, ανεξάρτητα από τη χρησιμοποίησή τους για σκοπούς έρευνας. Σε αυτό το πλαίσιο, η ανάπτυξη και η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων, όπως *in vitro* μελέτες ή *in silico* προσομοιώσεις, αποτελούν μια ενδιαφέρουσα προοπτική. Αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να εξυπηρετήσουν επιστημονικούς σκοπούς χωρίς την ανάγκη χρήσης ζώων, μειώνοντας έτσι τον ηθικό προβληματισμό που σχετίζεται με τη συναίνεση. Η έρευνα σε ζώα χωρίς την έννοια της ενημερωμένης συγκατάθεσης τους αντιμετωπίζει προκλήσεις. Η ικανότητα των ζώων να εκφράσουν συγκατάθεση είναι αμφίβολη, αλλά οι ηθικές πτυχές της έρευνας επάνω τους πρέπει να αντιμετωπιστούν με προσοχή και σεβασμό προς τον ζωικό κόσμο.

Η ευημερία των ζώων που χρησιμοποιούνται στην επιστημονική έρευνα είναι πρωταρχικής σημασίας και αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα δεοντολογίας. Οι ερευνητές καλούνται να επιτύχουν μια ισορροπία μεταξύ των επιστημονικών στόχων και της ευημερίας των ζώων, προκειμένου να διασφαλίσουν όχι μόνο την εγκυρότητα της έρευνας αλλά και το σεβασμό προς τα ζώα ως αισθητικά και συνειδητά όντα<sup>[17]</sup>. Η προσπάθεια εύρεσης ισορροπίας ανάμεσα στους επιστημονικούς στόχους και την ευημερία των ζώων απαιτεί λεπτή κρίση. Οι ερευνητές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τόσο τις φυσιολογικές ανάγκες όσο και τη συμπεριφορά των ζώων, ενώ παράλληλα επιδιώκουν την επίτευξη των επιστημονικών τους στόχων. Πολλές χώρες και επιστημονικές κοινότητες έχουν θεσπίσει δεοντολογικές οδηγίες και κανονισμούς προκειμένου να διασφαλίσουν την ευημερία των ζώων κατά τη διάρκεια της έρευνας. Αυτοί οι κανόνες έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τον πόνο και το άγχος που μπορεί να προκύψουν από τη συμμετοχή τους σε πειράματα<sup>[18]</sup>. Η εξασφάλιση της ευημερίας των ζώων δεν σημαίνει απαραίτητα υποβάθμιση της επιστημονικής εγκυρότητας. Παραβιάζοντας όμως τις δεοντολογικές αρχές, η έρευνα ενδέχεται να αποκτήσει στίγμα και να υπονομεύσει τον σεβασμό προς τα ζώα και κατά συνέπεια προς το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας.

Η διασφάλιση της ευημερίας των ζώων στην επιστημονική έρευνα απαιτεί εξαιρετική προσοχή, σεβασμό προς τα ζώα ως ζωντανά όντα, και την θεμελίωση μιας επιστημονικής κοινότητας που ενδιαφέρεται για την καινοτομία και την αλήθεια συνυπολογίζοντας την αξία της ζωής και του σεβασμού προς το ζώο. Η επίτευξη μιας σωστής ισορροπίας μεταξύ της επιστημονικής αναγκαιότητας και των ηθικών θεωρήσεων στη χρήση ζώων στην έρευνα αποτελεί μια διαχρονική πρόκληση στον χώρο της βιοηθικής. Αυτό το ηθικό δίλημμα αναδύεται από την ανάγκη για επιστημονική πρόοδο και ταυτόχρονα την υποχρέωση προς τον σεβασμό και την προστασία των ζώων.

Η έρευνα που πραγματοποιείται με τη χρήση ζώων συχνά αποτελεί θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη των γνώσεων στον τομέα της ιατρικής, της βιολογίας και άλλων επιστημών. Αποτελεί πηγή πολύτιμων δεδομένων και παρέχει αναγκαία εμπειρικά στοιχεία που διευκολύνουν την κατανόηση των φυσιολογικών και παθολογικών διεργασιών. Ωστόσο, η χρήση ζώων στην έρευνα συνοδεύεται από πολλά ηθικά διλήμματα. Η βιοηθική, σεβόμενη τις αξίες της συνείδησης και της ευαισθησίας, θέτει υπό αμφισβήτηση την δικαιολογημένη χρήση ζώων, ιδίως όταν υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι.

---

[17] Passantino, 2006

[18] Camenzind & Eggel, 2022

Η συνεχής επιστημονική εξέλιξη και η ανάγκη για νέες ανακαλύψεις συχνά έρχονται σε αντίθεση με την ανάγκη να προστατεύονται τα ζώα από αδικαιολόγητη θυσία και πόνο. Η εξεύρεση μιας σωστής ισορροπίας είναι απαραίτητη για τη διατήρηση του κοινωνικού αποδεκτού και της εμπιστοσύνης του κοινού στην επιστημονική κοινότητα. Η συνεχής αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων, η βελτίωση των προτύπων φροντίδας και η προαγωγή της συνειδητής χρήσης ζώων αποτελούν αναπόσπαστα μέρη αυτής της ισορροπίας. Η επιστήμη έχει το καθήκον να εξελίσσεται και να συμβάλλει στη βελτίωση της ανθρώπινης ζωής. Ωστόσο, αυτή η εξέλιξη πρέπει να πραγματοποιείται με σεβασμό προς όλα τα έμβια όντα και τα ηθικά πρότυπα. Η σωστή ισορροπία μεταξύ της επιστημονικής προόδου και του σεβασμού προς τα ζώα είναι ουσιαστικής σημασίας. Μόνο με συνειδητή χρήση, συνεχή προσπάθεια εξέλιξης και εναρμόνιση με τα ηθικά πρότυπα μπορεί η επιστημονική κοινότητα να συμβάλλει στην ανθρώπινη γνώση χωρίς να θέτει σε κίνδυνο το καλό των ζώων και την ηθική της κοινωνίας<sup>[19]</sup>.

Η πίεση για τη δημοσίευση αποτελεσμάτων σε υψηλόβαθμα επιστημονικά περιοδικά ενδέχεται να δημιουργήσει αντιφάσεις με την αρχή της μείωσης, καθώς η επιτυχία μετριέται συχνά από την ποσότητα παρά την ποιότητα<sup>[20]</sup>

#### **Προκλήσεις:**

- Πίεση για γρήγορες δημοσιεύσεις μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη για περισσότερα πειράματα.
- Περιορισμοί στον χρόνο που επιτρέπεται για τη σκέψη και το σχεδιασμό.

#### **Πιθανές Λύσεις:**

- Αναγνώριση της ποιότητας έναντι της ποσότητας στις δημοσιεύσεις.
- Ενθάρρυνση της αναφοράς δεοντολογικών πτυχών στα επιστημονικά έργα.

Επίσης, τα κίνητρα των ερευνητών ενδέχεται να επικεντρώνονται σε επιτυχημένες δημοσιεύσεις και χρηματοδότηση, αντί για τη συμμόρφωση προς αρχές βιοηθικής.

#### **Προκλήσεις:**

- Πίεση για παραγωγή γρήγορων και ποσοτικών αποτελεσμάτων.
- Αδυναμία αναγνώρισης των δεοντολογικών προσπαθειών.

#### **Πιθανές Λύσεις:**

- Δημιουργία κινήτρων που συνδέονται με τη συμμόρφωση προς τις αρχές 3R.
- Αναγνώριση της δεοντολογικής προσπάθειας στα βιογραφικά των ερευνητών.

Ακόμη, η έλλειψη εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης για τις αρχές των 3R μπορεί να αποτελεί εμπόδιο στην εφαρμογή τους.

#### **Προκλήσεις:**

- Έλλιπής εκπαίδευση γύρω από τις αρχές της βιοηθικής.
- Έλλειψη συστηματικής ηθικής αναθεώρησης.

---

[19] Franco, Sandøe & Olsson, 2014

[20] Landi et al., 2015; Landi et al, 2021



## Πιθανές Λύσεις:

- Ενσωμάτωση της βιοηθικής στα προγράμματα σπουδών των ερευνητών.
- Σύστημα αναθεώρησης που περιλαμβάνει δεοντολογικούς ελέγχους.

Η αναγνώριση των προκλήσεων αυτών και η υιοθέτηση λύσεων που προωθούν τις αρχές των 3R είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση μιας βιώσιμης και ηθικής επιστημονικής κοινότητας. Η βιοηθική και η εφαρμογή των αρχών των 3R παρουσιάζουν μεγάλες ποικιλίες παγκοσμίως λόγω των διαφορών σε πολιτισμικούς, νομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Η διασφάλιση της εναρμόνισης των διεθνών προτύπων αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω των διαφορετικών προσεγγίσεων και κανονιστικών πλαισίων που υιοθετούνται από διάφορες χώρες<sup>[21]</sup>.

Ακόμη, οι πολιτισμικές διαφορές επηρεάζουν την αντίληψη και την αξιολόγηση της βιοηθικής. Σε ορισμένες κοινωνίες, η έννοια της σχέσης ανθρώπου - ζώου ενδέχεται να είναι διαφορετική, επηρεάζοντας την αποδοχή ή απόρριψη των αρχών των 3R. Οι νομικοί περιορισμοί ποικίλλουν επίσης σημαντικά από χώρα σε χώρα με αποτέλεσμα ορισμένες κοινωνίες εφαρμόζουν αυστηρούς κανονισμούς που προστατεύουν τα ζώα, ενώ άλλες να έχουν πιο ελαστικές προσεγγίσεις.

Επιπρόσθετα, η αποδοχή των αρχών των 3R εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοινωνική συναίνεση. Σε περιπτώσεις όπου η κοινωνία εκτιμά υψηλά την προστασία των ζώων, είναι πιθανότερο να γίνεται αυστηρότερη εφαρμογή των αρχών αυτών. Η εναρμόνιση των προτύπων βιοηθικής και της εφαρμογής των 3R είναι μια σημαντική πρόκληση λόγω των παραπάνω παραγόντων. Ωστόσο, η προώθηση του διαλόγου και της συνεργασίας μεταξύ διεθνών οργανισμών, επιστημονικών κοινοτήτων και κυβερνήσεων μπορεί να συμβάλει στην κατεύθυνση προς έναν πιο εναρμονισμένο και ηθικό προσανατολισμό. Η διεθνής συνεργασία αναδεικνύεται ως καίρια παράμετρος για την αντιμετώπιση των ηθικών ζητημάτων στην έρευνα σε ζώα. Οι προσπάθειες αυτές συντείνουν στην επίτευξη πολλαπλών στόχων που αφορούν την ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών, την εναρμόνιση δεοντολογικών προτύπων και την προώθηση της ανάπτυξης και επικύρωσης εναλλακτικών μεθόδων.

Η διεθνής συνεργασία επιτρέπει τη συλλογή και τη μεταφορά βέλτιστων πρακτικών μεταξύ χωρών και επιστημονικών κοινοτήτων. Η ανταλλαγή αυτή συμβάλλει στο να αντιμετωπιστούν προκλήσεις και να βελτιωθούν οι διαδικασίες που συνδέονται με τη χρήση ζώων στην έρευνα. Η εναρμόνιση των δεοντολογικών προτύπων σε διεθνές επίπεδο αποτελεί θεμέλιο λίθο για την αποτελεσματική ρύθμιση της έρευνας σε ζώα<sup>[22]</sup>. Η προώθηση της ανάπτυξης και επικύρωσης εναλλακτικών μεθόδων απαιτεί συλλογικές προσπάθειες. Η διεθνής συνεργασία επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ επιστημόνων, ερευνητικών κέντρων και φορέων ρύθμισης για την προώθηση και αποδοχή αυτών των εναλλακτικών μεθόδων. Η διεθνής συνεργασία αποτελεί, συνεπώς, ουσιαστικό μέσο για τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος όπου η έρευνα σε ζώα διεξάγεται με υψηλά ηθικά πρότυπα και συνεχίζει να εξελίσσεται προς όφελος της επιστήμης και της κοινωνίας.

Οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις, περιλαμβανομένης της τεχνητής νοημοσύνης, των οργανοειδών και των μικροφυσιολογικών συστημάτων, ανοίγουν τον δρόμο για τη βελτίωση και την αντικατάσταση της χρήσης ζώων στην έρευνα. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των και-

---

[21] Hermann & Blattner, 2019

[22] Maestri, 2021

νοτομιών συνοδεύεται από συνεχή ηθικό προβληματισμό, ανάγκη επικύρωσης και ενσωμάτωση στα υπάρχοντα ρυθμιστικά πλαίσια. Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (TN) στην έρευνα ανοίγει νέες προοπτικές<sup>[23]</sup> με την ανάπτυξη αλγορίθμων που αντικαθιστούν ζωικά πρότυπα και θέτει νέα ερωτήματα σχετικά με την ηθική της χρήσης της TN στην επιστημονική έρευνα. Η δημιουργία οργανοειδών και μικροφυσιολογικών συστημάτων σε εργαστηριακές συνθήκες έχει ως στόχο την αναπαραγωγή των φυσιολογικών συνθηκών των υπό μελέτη οργανισμών / συστημάτων χωρίς τη χρήση ζώντων ζώων.

Η ανάπτυξη αυτή απαιτεί αξιολόγηση των ηθικών επιπτώσεων και της ανθρώπινης αντίληψης για την χρήση αυτών των τεχνολογιών. Η επικύρωση των νέων μεθόδων αντικατάστασης των ζώων στην έρευνα είναι ζωτικής σημασίας. Η συμμετοχή της επιστημονικής κοινότητας, φορέων ρύθμισης και κοινωνικών ομάδων στη διαδικασία είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της διαφάνειας και της ηθικής αποδοχής. Η συνεχής ανάπτυξη των τεχνολογιών απαιτεί διαρκή συζήτηση και προσαρμογή των ηθικών πλαισίων, προκειμένου να διασφαλιστεί η εύρυθμη ένταξη τους στην επιστημονική έρευνα με σεβασμό στα ηθικά πρότυπα.

Ταυτόχρονα, η δημιουργία μιας κουλτούρας ευθύνης και ηθικής συμπεριφοράς στην επιστημονική έρευνα απαιτεί προώθηση της εκπαίδευσης, υπεράσπιση των αρχών της βιοηθικής και των 3R, καθώς και διαφάνεια στις διαδικασίες. Η εκπαίδευση είναι ο βασικός πυλώνας για την κατανόηση και την υιοθέτηση των αρχών της βιοηθικής. Εκπαιδευτικά προγράμματα που εστιάζουν στην ηθική χρήση των ζώων στην έρευνα ενισχύουν την ευαισθησία των ερευνητών και συμβάλλουν στη δημιουργία ενός ευαισθητοποιημένου επιστημονικού περιβάλλοντος.

Στο σημείο λοιπόν αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η υπεράσπιση των αρχών των 3R (Αντικατάσταση, Μείωση, Βελτιστοποίηση) είναι ουσιώδης. Η ενίσχυση της αντικατάστασης των ζώων με εναλλακτικές μεθόδους, η μείωση του αριθμού των ζώων που χρησιμοποιούνται, και η βελτιστοποίηση των πειραματικών διαδικασιών απαιτούν συνεχή και ενεργή προσπάθεια<sup>[24]</sup>. Η διαφάνεια στις διαδικασίες της έρευνας και η δημόσια συμμετοχή ενισχύουν την εμπιστοσύνη του κοινού. Ενημερωμένη και ενεργή κοινωνία συμβάλλει στη διαμόρφωση πιο ηθικών αποφάσεων, ενώ η διαφάνεια διασφαλίζει την αποδοχή των ερευνητικών δραστηριοτήτων.

Συνοψίζοντας, οι προσπάθειες για τη δημιουργία μιας κουλτούρας που σέβεται τις αρχές της βιοηθικής και των 3R είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της διαρκούς εξέλιξης της επιστημονικής κοινότητας με ηθική και κοινωνική ευθύνη. Οι βιοηθικές εκτιμήσεις γύρω από την έρευνα σε ζώα είναι πολύπλευρες και εξελίσσονται συνεχώς. Η εφαρμογή των 3R παρέχει ένα πλαίσιο αρχών για την αντιμετώπιση ηθικών προκλήσεων, αλλά η αποτελεσματική εφαρμογή τους απαιτεί συνεχή δέσμευση, συνεργασία και προσαρμογή<sup>[25]</sup>. Καθώς η τεχνολογία προχωρά και οι κοινωνικές αξίες μεταβάλλονται και εξελίσσονται, η διασταύρωση της βιοηθικής και της έρευνας στα ζώα θα συνεχίσει να διαμορφώνει την τροχιά της επιστημονικής έρευνας. Ενθαρρύνοντας έναν παγκόσμιο διάλογο, αγκαλιάζοντας τις τεχνολογικές καινοτομίες και δίνοντας προτεραιότητα στην επίλυση ηθικών ζητημάτων, η επιστημονική κοινότητα μπορεί να πλοηγηθεί στην πολυπλοκότητα της έρευνας σε ζώα με υπευθυνότητα και ηθική<sup>[26]</sup>

---

[23] Franco et al., 2018

[24] Landi et al., 2015

[25] Caloni, 2022

[26] Osborne et al., 2009

## Ενότητα 4<sup>η</sup>

### Ορισμός Μηχανικής Μάθησης

Η μηχανική μάθηση (Machine Learning - ML) είναι ένα υποπεδίο της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) που επικεντρώνεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων και μοντέλων που επιτρέπουν στους υπολογιστές να μαθαίνουν και να κάνουν προβλέψεις ή να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς να είναι ρητά προγραμματισμένοι. Στόχος της μηχανικής μάθησης είναι η ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να βελτιώνουν αυτόματα την απόδοσή τους με την πάροδο του χρόνου, μαθαίνοντας από τα δεδομένα. Ο τομέας αυτός έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη και έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος διαφόρων κλάδων, όπως η υγειονομική περίθαλψη, τα χρηματοοικονομικά, το μάρκετινγκ και άλλοι. Η παρούσα ενότητα, εστιάζει στον ορισμό της μηχανικής μάθησης, στις βασικές έννοιες, στους τύπους, στις εφαρμογές, στις προκλήσεις και στις μελλοντικές προοπτικές<sup>[27]</sup>.

Η μηχανική μάθηση μπορεί να οριστεί ως η επιστημονική μελέτη των αλγορίθμων και των στατιστικών μοντέλων που χρησιμοποιούν τα συστήματα υπολογιστών για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας χωρίς τη χρήση ρητών οδηγιών, βασιζόμενα αντ' αυτού στην ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων και σε αναγνώριση μοτίβων<sup>[28]</sup>. Με απλούστερους όρους, είναι η διαδικασία διδασκαλίας μιας μηχανής να μαθαίνει και να λαμβάνει αποφάσεις βάσει δεδομένων. Η προσέγγιση της μηχανικής μάθησης έρχεται σε αντίθεση με τον παραδοσιακό προγραμματισμό, όπου παρέχονται ρητοί κανόνες για την εκτέλεση μιας εργασίας.

Η έννοια της μηχανικής μάθησης μπορεί να αναχθεί στην ιδέα των προγραμμάτων υπολογιστών που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους μέσω της εμπειρίας. Ο Arthur Samuel, πρωτοπόρος στον τομέα αυτό, όρισε τη μηχανική μάθηση ως την ικανότητα ενός συστήματος να μαθαίνει χωρίς να προγραμματίζεται ρητά. Αυτός ο ορισμός έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη της μηχανικής μάθησης ως ξεχωριστού πεδίου μελέτης<sup>[29]</sup>.

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν σε γενικές γραμμές να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις τύπους, μάθηση με επίβλεψη (Supervised Learning), μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised Learning) και ενθαρρυντική ή ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning).

Στην επιβλεπόμενη μάθηση, ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται σε ένα σύνολο δεδομένων με ετικέτες, όπου τα δεδομένα εισόδου αντιστοιχίζονται με την αντίστοιχη μεταβλητή εξόδου ή στόχου. Ο αλγόριθμος μαθαίνει να αντιστοιχίζει τα δεδομένα εισόδου στη σωστή έξοδο γενικεύοντας από τα παρεχόμενα παραδείγματα. Οι συνήθεις εφαρμογές της μάθησης με επίβλεψη περιλαμβάνουν την αναγνώριση εικόνων, την αναγνώριση ομιλίας και την προγνωστική μοντελοποίηση<sup>[30]</sup>.

Η μάθηση χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνει την εκπαίδευση του αλγορίθμου σε ένα μη επισημασμένο σύνολο δεδομένων και το σύστημα προσπαθεί να βρει μοτίβα και σχέσεις μέσα στα δεδομένα χωρίς ρητή καθοδήγηση. Η ομαδοποίηση και η μείωση της διαστατικότητας είναι κοινές εργασίες στη μάθηση χωρίς επίβλεψη. Παραδείγματα εφαρμογών μάθησης χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνουν την ομαδοποίηση τμημάτων πελατών

---

[27] Samuel, 1959

[28] Shalev-Shwartz et al., 2014

[29] EFSA & ECDC, 2015

[30] Hastie et al., 2009

με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, την ανίχνευση ανωμαλιών, λόγω χάρη κατά την ανάλυση τομογραφιών, και τη μοντελοποίηση συστημάτων σε επιστήμες όπως η περιβαλλοντολογία.

Η ενισχυτική μάθηση είναι ένας τύπος μηχανικής μάθησης όπου ένας αλγόριθμος μαθαίνει να λαμβάνει αποφάσεις αλληλεπιδρώντας με ένα περιβάλλον. Ο αλγόριθμος λαμβάνει ανατροφοδότηση με τη μορφή ανταμοιβών ή τιμωριών με βάση τις ενέργειές του, επιτρέποντάς του να μαθαίνει τις βέλτιστες στρατηγικές με την πάροδο του χρόνου (trial & error method). Η ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπως η εκπαίδευση συστημάτων παιγνίων, η ρομποτική και τα συστήματα που παρέχουν αυτοματοποιημένες προτάσεις στους χρήστες του διαδικτύου<sup>[31]</sup>.

Αυτοί οι τρεις τύποι εκμάθησης αποτελούν τη βάση για ένα ευρύ φάσμα αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, καθένας από τους οποίους έχει σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων τύπων προβλημάτων και εργασιών. Επιπλέον, εντός αυτών των κατηγοριών, υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι και τεχνικές, όπως τα δέντρα αποφάσεων, οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, τα νευρωνικά δίκτυα και άλλα που διευρύνουν ακόμη περισσότερο τα πεδία των εφαρμογών της μηχανικής μάθησης<sup>[32]</sup>.

Για την καλύτερη κατανόηση της μηχανικής μάθησης αξίζει να αναφερθούν κάποιες βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ανάπτυξη των αλγορίθμων και τις διαδικασίες επικαιροποίησης και βελτίωσης των διαφόρων μοντέλων. Οι έννοιες αυτές περιλαμβάνουν:

- Εξόρυξη Δεδομένων: Η εξαγωγή χαρακτηριστικών περιλαμβάνει την επιλογή σχετικών πληροφοριών ή χαρακτηριστικών από ακατέργαστα δεδομένα για τη βελτίωση της απόδοσης των μοντέλων μηχανικής μάθησης. Η διαδικασία αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων.
- Υπερπροσαρμογή και υποπροσαρμογή: Η υπερπροσαρμογή συμβαίνει όταν ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης αποδίδει καλά στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά αποτυγχάνει να γενικεύσει σε νέα, αθέατα δεδομένα. Η υποπροσαρμογή, από την άλλη πλευρά, συμβαίνει όταν το μοντέλο είναι πολύ απλό για να συλλάβει τα υποκείμενα μοτίβα στα δεδομένα. Η εξισορρόπηση μεταξύ υπερπροσαρμογής και υποπροσαρμογής είναι μια κρίσιμη πτυχή της εκπαίδευσης μοντέλων.
- Διασταυρούμενη επικύρωση: Η διασταυρούμενη επικύρωση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης με τη διαίρεση του συνόλου δεδομένων σε πολλαπλά υποσύνολα, την εκπαίδευση του μοντέλου σε ορισμένα υποσύνολα και την αξιολόγηση της απόδοσής του στα υπόλοιπα δεδομένα. Αυτό βοηθά να διασφαλιστεί ότι η απόδοση του μοντέλου είναι ισχυρή και δεν εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο υποσύνολο δεδομένων<sup>[33]</sup>.
- Μεροληψία και διακύμανση: Η μεροληψία και η διακύμανση αντιπροσωπεύουν τον συμβιβασμό στα μοντέλα μηχανικής μάθησης. Η μεροληψία αναφέρεται στο σφάλμα που εισάγεται από την προσέγγιση ενός πραγματικού προβλήματος, ενώ η διακύμανση είναι η ευαισθησία του μοντέλου σε μικρές διακυμάνσεις των δεδομένων

---

[31] Goodfellow et al., 2016

[32] Caruana & Niculescu, 2006

[33] Sutton & Barto, 2018

εκπαίδευσης. Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ προκατάληψης και διακύμανσης είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μοντέλων που γενικεύουν καλά<sup>[34]</sup>.

- Υπερπαράμετροι: Οι υπερπαράμετροι είναι παράμετροι που δεν μαθαίνονται από τα δεδομένα αλλά καθορίζονται πριν από τη διαδικασία εκπαίδευσης. Η ρύθμιση των υπερπαραμέτρων είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των μοντέλων μηχανικής μάθησης.

Η κατανόηση αυτών των βασικών εννοιών είναι θεμελιώδης για την αποτελεσματική εργασία με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και τη δημιουργία μοντέλων που είναι ακριβή, γενικεύσιμα και ισχυρά. Η μηχανική μάθηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορους τύπους με βάση τη φύση της διαδικασίας μάθησης και τις εργασίες που εκτελούνται<sup>[35]</sup>. Οι κυριότεροι τύποι περιλαμβάνουν:

- Μάθηση με επίβλεψη:
  - Παλινδρόμηση: Πρόβλεψη μιας συνεχούς εξόδου με βάση τα χαρακτηριστικά εισόδου.
  - Ταξινόμηση: Ανάθεση δεδομένων εισόδου σε προκαθορισμένες κατηγορίες ή κλάσεις.
- Μάθηση χωρίς επίβλεψη:
  - Ομαδοποίηση: Ομαδοποίηση παρόμοιων σημείων δεδομένων με βάση ορισμένα κριτήρια.
  - Μείωση διαστάσεων: Μείωση του αριθμού των χαρακτηριστικών εισόδου με παράλληλη διατήρηση των σχετικών πληροφοριών<sup>[36]</sup>.
- Ενισχυτική μάθηση:
  - Αλγόριθμος: Η οντότητα που λαμβάνει αποφάσεις σε ένα περιβάλλον.
  - Περιβάλλον: Το εξωτερικό σύστημα με το οποίο αλληλεπιδρά ο αλγόριθμος.
  - Ανταμοιβή: Ανατροφοδότηση που παρέχεται στον πράκτορα με βάση τις ενέργειές του.
- Μάθηση με ημιεπίβλεψη:
  - Συνδυασμός επισημασμένων και μη επισημασμένων δεδομένων για τη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου.
- Μάθηση με αυτό-επίβλεψη:
  - Αξιοποίηση της εγγενούς δομής των δεδομένων για τη δημιουργία επισημασμένων παραδειγμάτων για εκπαίδευση.
- Μάθηση μεταφοράς:
  - Αξιοποίηση της γνώσης που αποκτήθηκε από μια εργασία για τη βελτίωση της απόδοσης σε μια συναφή εργασία

---

[34] Chollet, 2017

[35] Murphy, 2012

[36] Russell & Norvig, 2009

Κάθε τύπος μηχανικής μάθησης έχει τις εφαρμογές και τις περιπτώσεις χρήσης του και η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος και τα διαθέσιμα δεδομένα. Η μηχανική μάθηση έχει βρει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, φέρνοντας επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο εκτελούνται εργασίες και λαμβάνονται αποφάσεις<sup>[37]</sup>.

Ορισμένες αξιοσημείωτες εφαρμογές περιλαμβάνουν την υγειονομική περίθαλψη, όπως την διάγνωση ασθενειών με βάση δεδομένα ιατρικής απεικόνισης καθώς και την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των ασθενών και των απαντήσεων στη θεραπεία. Επίσης αξίζει να σημειωθεί η συμβολή στην μηχανικής μάθησης στον χρηματοοικονομικό κλάδο. Πιο συγκεκριμένα την ανίχνευση της απάτης σε χρηματοπιστωτικές συναλλαγές και την πρόβλεψη χρηματιστηριακών αγορών και αλγοριθμικές συναλλαγές. Σημαντική αναφορά είναι και αυτή του Μάρκετινγκ καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί τμηματοποίηση πελατών για στοχευμένη διαφήμιση και προγνωστικές αναλύσεις για τη συμπεριφορά των πελατών<sup>[38]</sup>. Μια εξίσου σημαντική εφαρμογή της της μηχανικής μάθησης είναι η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (NLP), μέσω της οποίας μπορεί να γίνει μετάφραση γλωσσών και ανάλυση συναισθήματος, να δημιουργηθούν Chatbots και εικονικοί βοηθοί. Απαραίτητο να αναφερθεί είναι η αναγνώριση εικόνας και ομιλίας και πιο συγκεκριμένα η αναγνώριση προσώπου για ασφάλεια και έλεγχο ταυτότητας, καθώς και οι εφαρμογές μετατροπής ομιλίας σε κείμενο και το αντίστροφο<sup>[39]</sup>. Επίσης, αρκετές εφαρμογές περιλαμβάνουν τα αυτόνομα οχήματα, όπως είναι η ανίχνευση αντικειμένων και αποφυγή συγκρούσεων, καθώς και ο σχεδιασμός διαδρομής και η πλοήγηση.

Αυτές οι εφαρμογές αναδεικνύουν την ευελιξία της μηχανικής μάθησης στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων και στη βελτίωση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων σε διάφορους τομείς. Παρά τις επιτυχίες της, η μηχανική μάθηση αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, για την αντιμετώπιση των οποίων οι ερευνητές και οι επαγγελματίες εργάζονται συνεχώς<sup>[40]</sup>. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων εκπαίδευσης. Ανεπαρκή ή μεροληπτικά δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν σε κακή απόδοση του μοντέλου. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα μοντέλα λαμβάνουν αποφάσεις είναι ζωτικής σημασίας για την εμπιστοσύνη και τη λογοδοσία. Η χρήση της μηχανικής μάθησης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων εγείρει ηθικές ανησυχίες, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων που σχετίζονται με τη μεροληψία, τη δικαιοσύνη και την προστασία της ιδιωτικής ζωής. Η διασφάλιση της δεοντολογικής χρήσης των μοντέλων αποτελεί συνεχή πρόκληση<sup>[41]</sup>.

Ακόμη, η εκπαίδευση εξελιγμένων μοντέλων μηχανικής μάθησης, ιδίως μοντέλων εις βάθος εκμάθησης (deep learning), απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους. Η πρόσβαση σε αυτούς τους πόρους μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για μικρότερους οργανισμούς και ερευνητές. Η δημιουργία μοντέλων που γενικεύουν καλά σε άορατα δεδομένα αποτελεί μια συνεχή πρόκληση. Η υπερπροσαρμογή και η υποπροσαρμογή είναι κοινά ζητήματα που επηρεάζουν την ικανότητα των μοντέλων να αποδίδουν καλά σε πραγματικές καταστάσεις. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης είναι ευάλωτα σε επιθέσεις αντιπάλων, όπου κακόβουλοι φορείς χειρίζονται σκόπιμα τα δεδομένα εισόδου για να εξαπατήσουν το μοντέλο. Συνεπώς, η διασφάλιση της ασφάλειας των συστημάτων μηχανικής μάθησης αποτελεί συνεχή προβληματισμό.

---

[37] Bishop, 2006

[38] Goodfellow et al., 2016

[39] LeCun et al., 2015

[40] Jordan & Mitchell, 2015

[41] Hastie et al., 2009

Η ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και εξελισσόμενες κατανομές δεδομένων αποτελεί επίσης μια πρόκληση. Η συνεχής μάθηση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συνάφειας του μοντέλου με την πάροδο του χρόνου. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση με τη συμμετοχή ερευνητών, φορέων χάραξης πολιτικής και επαγγελματιών του κλάδου. Καθώς η μηχανική μάθηση ενσωματώνεται όλο και περισσότερο στην κοινωνία, η εξεύρεση λύσεων σε αυτές τις προκλήσεις γίνεται όλο και πιο σημαντική<sup>[42]</sup>.

Το μέλλον της μηχανικής μάθησης επιφυλάσσει συναρπαστικές δυνατότητες και προκλήσεις καθώς ο τομέας συνεχίζει να εξελίσσεται. Διάφορες τάσεις και εξελίξεις είναι πιθανό να διαμορφώσουν το μέλλον της μηχανικής μάθησης, όπως για παράδειγμα:

- Εξηγήσιμη τεχνητή νοημοσύνη (Explainable AI - XAI): περιλαμβάνει την ολοένα αυξανόμενη έμφαση στην ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης που είναι ερμηνεύσιμα και εξηγήσιμα. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την απόκτηση εμπιστοσύνης και αποδοχής, ιδίως σε εφαρμογές με σημαντικό κοινωνικό αντίκτυπο.
- Δεοντολογία και κανονισμοί TN: σχετίζεται με την αυξανόμενη συνειδητοποίηση των ηθικών προβληματισμών στην TN και τη μηχανική μάθηση οδηγεί στην ανάπτυξη κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών για τη διασφάλιση της υπεύθυνης και δίκαιης χρήσης<sup>[43]</sup>.
- Αυτοματοποιημένη μηχανική μάθηση (AutoML): αφορά την ανάπτυξη εργαλείων και τεχνικών που αυτοματοποιούν τη διαδικασία μηχανικής μάθησης, καθιστώντας την πιο προσιτή σε μη ειδικούς και επιταχύνοντας την ανάπτυξη μοντέλων<sup>[44]</sup>.
- Edge Computing και Federated Learning: σχετίζεται με την στροφή προς την ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης σε συσκευές άκρων και η χρήση προσεγγίσεων ομοσπονδιακής μάθησης για την εκπαίδευση μοντέλων σε αποκεντρωμένα δίκτυα, αντιμετωπίζοντας τις ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικής ζωής.
- Εξελίξεις στην επεξεργασία φυσικής γλώσσας: συμβαδίζει με τις συνεχείς βελτιώσεις στις δυνατότητες επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, επιτρέποντας στις μηχανές να κατανοούν και να παράγουν γλώσσα που μοιάζει με την ανθρώπινη πιο αποτελεσματικά.
- Τεχνητή νοημοσύνη για επιστημονική ανακάλυψη: αφορά την αυξανόμενη χρήση της μηχανικής μάθησης στην επιστημονική έρευνα και ανακάλυψη, βοηθώντας σε εργασίες όπως η ανακάλυψη φαρμάκων, ο σχεδιασμός νέων υλικών και η μοντελοποίηση του κλίματος<sup>[45]</sup>.
- Κβαντική μηχανική μάθηση: σχετίζεται με την διερεύνηση της διασταύρωσης της κβαντικής πληροφορικής και της μηχανικής μάθησης, με δυνατότητα σημαντικών εξελίξεων στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων.

---

[42] Kelleher et al., 2015

[43] Murphy, 2012

[44] Bishop, 2006

[45] Domingos, 2015

- Συνεργασία ανθρώπου και τεχνητής νοημοσύνης: πρόκειται για την ανάπτυξη συστημάτων ΤΝ που συνεργάζονται με τον άνθρωπο, ενισχύοντας τις ανθρώπινες ικανότητες και βελτιώνοντας τη συνολική λήψη αποφάσεων.

Ολοκληρώνοντας, η μηχανική μάθηση είναι ένας μετασχηματιστικός τομέας που έχει φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι υπολογιστές μαθαίνουν και λαμβάνουν αποφάσεις. Από τα πρώτα της θεμέλια στα μέσα του 20ου αιώνα μέχρι σήμερα, η μηχανική μάθηση έχει εξελιχθεί σε ένα ισχυρό εργαλείο με εφαρμογές που καλύπτουν διάφορους κλάδους<sup>[46]</sup>. Οι βασικές έννοιες του πεδίου, όπως η επιβλεπόμενη και η μη επιβλεπόμενη μάθηση, η ενισχυτική μάθηση και άλλες, παρέχουν ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη και την κατανόηση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης είχαν βαθύτατο αντίκτυπο στην υγειονομική περίθαλψη, τα χρηματοοικονομικά, το μάρκετινγκ, την επεξεργασία φυσικής γλώσσας, την αναγνώριση εικόνας και ομιλίας, τα αυτόνομα οχήματα, τον κατασκευαστικό τομέα και πολλά άλλα. Η ικανότητα των μοντέλων μηχανικής μάθησης να μαθαίνουν από τα δεδομένα και να βελτιώνονται με την πάροδο του χρόνου έχει οδηγήσει σε καινοτομίες στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων και στην πραγματοποίηση προβλέψεων. Ωστόσο, η ανάπτυξη της μηχανικής μάθησης δεν είναι χωρίς προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα των δεδομένων, την ερμηνευσιμότητα, τη δεοντολογία και την ασφάλεια. Οι ερευνητές και οι επαγγελματίες εργάζονται εντατικά για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων ώστε να διασφαλιστεί η υπεύθυνη και ηθική ανάπτυξη συστημάτων μηχανικής μάθησης.

Κοιτάζοντας «μπροστά», το μέλλον της μηχανικής μάθησης επιφυλάσσει πολλά υποσχόμενες εξελίξεις, όπως η εξηγήσιμη τεχνητή νοημοσύνη, η αυξημένη εστίαση στη δεοντολογία και τους κανονισμούς, η αυτοματοποιημένη μηχανική μάθηση, οι εξελίξεις στην επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η εξερεύνηση της κβαντικής μηχανικής μάθησης. Καθώς η μηχανική μάθηση συνεχίζει να εξελίσσεται, είναι έτοιμη να διαδραματίσει ακόμη πιο σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της τεχνολογίας και της κοινωνίας γενικότερα<sup>[47]</sup>.

---

[46] Rasmussen & Williams, 2006

[47] Bengio et al., 2013



## Ενότητα 5<sup>η</sup>

### Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην βασική και εφαρμοσμένη έρευνα

Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας της επιστημονικής έρευνας έχει γίνει μάρτυρας μιας μεγάλης αλλαγής με την αυξανόμενη ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης, σηματοδοτώντας μια αξιοσημείωτη απομάκρυνση από την παραδοσιακή εξάρτηση από τα πειραματόζωα. Οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης τόσο στη βασική όσο και στην εφαρμοσμένη έρευνα έχουν επιδείξει τεράστιες δυνατότητες, φέρνοντας επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, διεξάγονται και αναλύονται τα πειράματα<sup>[48]</sup>. Ένας σημαντικός τομέας στον οποίο η μηχανική μάθηση έχει συνεισφέρει σημαντικά είναι η πρόβλεψη και η μοντελοποίηση βιολογικών διεργασιών. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι πρόβλεψης που βασίζονται στη μηχανική μάθηση έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων πολύπλοκων βιοχημικών αντιδράσεων, επιτρέποντας στους ερευνητές να βελτιστοποιήσουν τις πειραματικές συνθήκες και να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για εκτεταμένα πειράματα δοκιμής και λάθους.

Επιπλέον, η μηχανική μάθηση έχει αποδειχθεί ανεκτίμητη στην ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας, όπως η γονιδιωματική, η μεταγραφομική και η πρωτεομική. Η ικανότητα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης να διακρίνουν περίπλοκα μοτίβα μέσα σε τεράστια σύνολα δεδομένων έχει διευκολύνει τον εντοπισμό νέων βιοδεικτών, γονιδιακών εκφράσεων και πιθανών θεραπευτικών στόχων<sup>[49]</sup>. Αυτές οι εξελίξεις όχι μόνο επιταχύνουν την ερευνητική διαδικασία, αλλά συμβάλλουν επίσης σε μια πιο διαφοροποιημένη κατανόηση των βιολογικών φαινομένων. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στη γονιδιωματική, για παράδειγμα, έχει οδηγήσει στον εντοπισμό άγνωστων προηγουμένως γενετικών παραγόντων που σχετίζονται με ασθένειες, ανοίγοντας το δρόμο για στοχευμένες θεραπευτικές παρεμβάσεις<sup>[50]</sup>.

Εκτός από τη γονιδιωματική, η μηχανική μάθηση έχει βρει εκτεταμένες εφαρμογές στην ανακάλυψη και την ανάπτυξη φαρμάκων. Ο εντοπισμός νέων υποψήφιων φαρμάκων παραδοσιακά περιλάμβανε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες πειραματικού ελέγχου. Ωστόσο, με την έλευση της μηχανικής μάθησης, τα προγνωστικά μοντέλα μπορούν να αναλύσουν χημικές δομές και να προβλέψουν πιθανούς υποψήφιους φαρμακευτικούς παράγοντες με μεγάλη ακρίβεια, επιταχύνοντας σημαντικά την ανακάλυψη νέων φαρμάκων<sup>[51]</sup>. Αυτό όχι μόνο μειώνει την εξάρτηση από τις δοκιμές σε ζώα, αλλά υπόσχεται επίσης να επιταχύνει την ανάπτυξη νέων θεραπευτικών παραγόντων, ωφελώντας άμεσα τους ασθενείς που έχουν ανάγκη.

Ο αντίκτυπος της μηχανικής μάθησης επεκτείνεται πέρα από τον εργαστηριακό χώρο και στο πεδίο της κλινικής έρευνας και της υγειονομικής περίθαλψης. Η προγνωστική μοντελοποίηση με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχει συμβάλει καθοριστικά στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των ασθενειών, στην εξατομίκευση των σχεδίων θεραπείας και στη βελτιστοποίηση της φροντίδας των ασθενών<sup>[52]</sup>. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύσουν ηλεκτρονικά αρχεία υγείας για να εντοπίσουν ανεπαίσθητα μοτίβα που μπορεί να υποδεικνύουν την εμφάνιση ασθενειών, επι-

---

[48] Kayla et al., 2011; Dara et al, 2021; Xu et al, 2021

[49] Angermueller et al., 2016; Ching et al., 2018 ; Xu et al, 2021

[50] Ragu & Schmidt, 2020

[51] Schneider & Fechner, 2005; Stokes et al., 2020; Jarada et al., 2020

[52] Rajkomar et al., 2018; Obermeyer and Emanuel, 2016

ρέποντας την έγκαιρη παρέμβαση και τη βελτίωση της φροντίδας της υγείας των ασθενών. Αυτές οι εφαρμογές όχι μόνο ελαχιστοποιούν την ανάγκη για ζωικά μοντέλα σε προκλινικές δοκιμές, αλλά συμβάλλουν επίσης στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και εξατομικευμένων στρατηγικών υγειονομικής περίθαλψης.

Επιπλέον, με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης έχουν γίνει σημαντικά βήματα στον τομέα της απεικόνισης και της διάγνωσης. Η δυνατότητα επεξεργασίας και ανάλυσης σύνθετων ιατρικών εικόνων, όπως μαγνητικές και αξονικές τομογραφίες, έχει οδηγήσει σε βελτιωμένη διαγνωστική ακρίβεια και ταχύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων<sup>[53]</sup>. Αυτό επιφέρει ουσιώδεις εξελίξεις στην έρευνα που αφορά τη δοκιμή νέων ιατρικών παρεμβάσεων, καθώς τα διαγνωστικά εργαλεία που βασίζονται στη μηχανική μάθηση μπορούν να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των κλινικών δοκιμών χωρίς την εξάρτηση από ζωικά μοντέλα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης στη βασική και εφαρμοσμένη έρευνα έχει εγκαινιάσει μια νέα εποχή στην επιστημονική εξέλιξη, μειώνοντας σημαντικά την εξάρτηση από τα πειραματόζωα. Από την πρόβλεψη βιοχημικών αντιδράσεων έως την επανάσταση στην ανακάλυψη φαρμάκων και τη βελτίωση της κλινικής διάγνωσης, η μηχανική μάθηση έχει αποδείξει την ευελιξία και την αποτελεσματικότητά της σε διάφορους τομείς. Καθώς αυτές οι μέθοδοι συνεχίζουν να εξελίσσονται, η επιστημονική κοινότητα βρίσκεται στο κατώφλι μιας μετασχηματιστικής αλλαγής, με τη δυνατότητα όχι μόνο να βελτιώσει τα αποτελέσματα της έρευνας αλλά και να προωθήσει ηθικές επιστημονικές πρακτικές.

Η ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης στην επιστημονική έρευνα όχι μόνο έχει επαναπροσδιορίσει τις παραδοσιακές πειραματικές προσεγγίσεις, αλλά έχει επίσης προωθήσει σημαντικές ανακαλύψεις στην κατανόηση πολύπλοκων βιολογικών συστημάτων. Μια αξιοσημείωτη εφαρμογή βρίσκεται στο πεδίο της οικολογικής και περιβαλλοντικής έρευνας. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση τεράστιων συνόλων δεδομένων που σχετίζονται με τη βιοποικιλότητα, τα κλιματικά πρότυπα και τη δυναμική των οικοσυστημάτων, επιτρέποντας ακριβέστερες προβλέψεις και μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών αλλαγών<sup>[54]</sup>. Αυτό διευκολύνει τη βαθύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα οικοσυστήματα και τα είδη, χωρίς τις ηθικές ανησυχίες που συνδέονται με τις παραδοσιακές δοκιμές σε ζώα.

Καθοριστικό ρόλο έχει διαδραματίσει η μηχανική μάθηση και στον τομέα των νευροεπιστημών, προσφέροντας πρωτοφανείς γνώσεις για τις λειτουργίες και τις συνδέσεις του εγκεφάλου. Τα υπολογιστικά μοντέλα που καθοδηγούνται από αλγορίθμους μηχανικής μάθησης μπορούν να προσομοιώσουν τα νευρωνικά δίκτυα και τις λειτουργίες τους, βοηθώντας τους ερευνητές στην κατανόηση των γνωστικών διαδικασιών, του σχηματισμού της μνήμης και των νευρολογικών διαταραχών<sup>[55]</sup>. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο ελαχιστοποιεί την ανάγκη για πειράματα σε ζώα, αλλά παρέχει επίσης μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου, ανοίγοντας ενδεχομένως το δρόμο για καινοτόμες θεραπείες σε νευρολογικές παθήσεις.

---

[53] Litjens et al., 2017; Esteva et al., 2019; Cheplygina et al., 2019

[54] Franklin et al., 2016; Vayena et al., 2018; Berang-Ford et al., 2021

[55] Schmidhuber et al., 2015; Lima et al., 2022; Khaliq et al., 2023; Volonte, 2023

Στον τομέα της επιστήμης των υλικών, η μηχανική μάθηση έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των υλικών και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους. Οι παραδοσιακές μέθοδοι δοκιμής υλικών συχνά περιλαμβάνουν εκτεταμένα πειράματα, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών σε ζώα για την αξιολόγηση της βιοσυμβατότητας. Ωστόσο, τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύσουν τις σχέσεις μεταξύ της σύνθεσης, της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών, επιτρέποντας την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υλικών και της αλληλεπίδρασής τους με βιολογικούς παράγοντες χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων εργαστηριακών δοκιμών<sup>[56]</sup> επιταχύνοντας την ανάπτυξη νέων υλικών και μειώνοντας τη χρήση ζώων εργαστηρίου.

Επιπλέον, η μηχανική μάθηση έχει βρει εφαρμογές στην έρευνα των κοινωνικών επιστημών, προσφέροντας νέες προσεγγίσεις για τη μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς και των κοινωνικών τάσεων. Αναλύοντας σύνολα κοινωνικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας, οι αλγόριθμοι μπορούν να εντοπίσουν μοτίβα, συσχετίσεις και παράγοντες πρόβλεψης που σχετίζονται με την ανθρώπινη συμπεριφορά, τις προτιμήσεις και τη λήψη αποφάσεων<sup>[57]</sup>. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της κοινωνικής δυναμικής και στην ενημέρωση για πολιτικές αποφάσεις, ενώ παράλληλα εξαλείφονται οι ηθικές ανησυχίες που σχετίζονται με τα πειράματα σε ζώα για την κατανόηση διαφόρων συμπεριφορών.

Όπως είναι φανερό, οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στην επιστημονική έρευνα είναι ποικίλες και εκτεταμένες, υπερβαίνοντας τα παραδοσιακά όρια και εγκαινιάζοντας μια νέα εποχή πειραματισμού και ανάλυσης. Από την οικολογία και τις νευροεπιστήμες έως την επιστήμη των υλικών και τις κοινωνικές επιστήμες, η ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης όχι μόνο ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της έρευνας, αλλά και αντιμετωπίζει τις ηθικές ανησυχίες που σχετίζονται με τα πειράματα σε ζώα. Καθώς αυτές οι τεχνολογίες συνεχίζουν να εξελίσσονται, η επιστημονική κοινότητα είναι έτοιμη να επιτύχει ακόμη μεγαλύτερες προόδους, ξεκλειδώνοντας το πλήρες δυναμικό της μηχανικής μάθησης στην αναδιαμόρφωση του τοπίου των ερευνητικών μεθοδολογιών.

Και στον τομέα της ρομποτικής, η ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης στην επιστημονική έρευνα εγκαινίασε μια νέα εποχή καινοτομίας. Τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, που τροφοδοτούνται από προηγμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, έχουν φέρει επανάσταση σε τομείς όπως η εξερεύνηση, η αντιμετώπιση καταστροφών και οι κατασκευές. Για παράδειγμα, οι ρομποτικές αποστολές εξερεύνησης σε μακρινούς πλανήτες αξιοποιούν τη μηχανική μάθηση για αυτόνομη πλοήγηση και λήψη αποφάσεων, μειώνοντας την ανάγκη άμεσης ανθρώπινης παρέμβασης<sup>[58]</sup>. Αυτά τα ρομποτικά συστήματα, εξοπλισμένα με εξελιγμένους αισθητήρες και δυνατότητες μάθησης, όχι μόνο ενισχύουν την αποτελεσματικότητα της συλλογής επιστημονικών δεδομένων, αλλά και εξαλείφουν τους κινδύνους που συνδέονται με την ανθρώπινη εμπλοκή σε ακραία περιβάλλοντα.

Ένα ακόμη πεδίο της ρομποτικής όπου η μηχανική μάθηση έχει βρει εφαρμογές είναι η δημιουργία έξυπνων προσθετικών και βοηθητικών συσκευών. Ερμηνεύοντας νευρικά σήματα ή μυϊκές κινήσεις, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να επιτρέψουν τον ακριβή έλεγχο των προσθετικών άκρων, προσφέροντας βελτιωμένη κινητικότητα και λει-

---

[56] Xie et al., 2019; Raccuglia et al., 2016

[57] Lazer et al., 2009; Kosinski et al., 2013

[58] ESA, “Artificial Intelligence in Space”; El-Shamouty et al., 2019

τουργικότητα σε άτομα με απώλεια άκρων<sup>[59]</sup>. Η συγχώνευση της ρομποτικής και της μηχανικής μάθησης όχι μόνο βοηθά στην ανάπτυξη πιο προηγμένων προσθετικών τεχνολογιών, αλλά μειώνει επίσης την εξάρτηση από τα ζωικά μοντέλα στις προκλινικές δοκιμές, συμβάλλοντας σε πιο ηθικές ερευνητικές πρακτικές.

Στον τομέα της αστρονομίας, η μηχανική μάθηση συμβάλλει σημαντικά στην ανάλυση μαζικών συνόλων δεδομένων που παράγονται από τηλεσκόπια και παρατηρητήρια. Οι αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι μπορούν να κοσκινίσουν τεράστιες ποσότητες αστρονομικών δεδομένων, εντοπίζοντας μοτίβα, ανωμαλίες και ουράνια αντικείμενα με πρωτοφανή ταχύτητα και ακρίβεια<sup>[60]</sup>. Αυτό όχι μόνο επιταχύνει τον ρυθμό των αστρονομικών ανακαλύψεων, αλλά και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για χειροκίνητη ανάλυση μειώνοντας το φόρτο εργασίας.

Επιπλέον, η μηχανική μάθηση αναδιαμορφώνει το τοπίο της κοινωνικής έρευνας προσφέροντας καινοτόμες προσεγγίσεις στην ανάλυση συναισθήματος και την εξόρυξη γνώμης. Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας φυσικής γλώσσας μπορούν να αναλύσουν δεδομένα κειμένου μεγάλης κλίμακας από πλατφόρμες μέσω κοινωνικής δικτύωσης, άρθρα ειδήσεων και διαδικτυακά φόρουμ για να εξάγουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις απόψεις και τα συναισθήματα του κοινού<sup>[61]</sup>. Αυτό όχι μόνο διευκολύνει τη βαθύτερη κατανόηση των κοινωνικών τάσεων, αλλά και εξαλείφει την ανάγκη για ζωικά μοντέλα σε μελέτες που σχετίζονται με την ανθρώπινη συμπεριφορά και αντίληψη.

Η μηχανική μάθηση συμβάλλει επίσης στην πρόοδο της εξατομικευμένης εκπαίδευσης μέσω προσαρμοστικών συστημάτων μάθησης. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν αλγόριθμους για να αναλύουν τα μαθησιακά πρότυπα των μαθητών και να προσαρμόζουν το εκπαιδευτικό περιεχόμενο στις ατομικές ανάγκες<sup>[62]</sup>. Παρέχοντας εξατομικευμένες μαθησιακές εμπειρίες, η μηχανική μάθηση όχι μόνο βελτιώνει τα εκπαιδευτικά αποτελέσματα αλλά και αποφεύγει τις ηθικές ανησυχίες που σχετίζονται με ορισμένες πειραματικές μελέτες που περιλαμβάνουν ζώα στην έρευνα για τη μάθηση και τη νόηση<sup>[63]</sup>.

Συμπερασματικά, οι εφαρμογές των διαφόρων μεθόδων μηχανικής μάθησης στην επιστημονική έρευνα εκτείνονται πολύ πέρα από τους παραδοσιακούς τομείς, περιλαμβάνοντας τη ρομποτική, την αστρονομία, την κοινωνική έρευνα και την εκπαίδευση. Η ενσωμάτωση των μεθόδων μηχανικής μάθησης όχι μόνο επιταχύνει τον ρυθμό της ανακάλυψης και της καινοτομίας, αλλά συμβάλλει και στην ηθική επιταγή της μείωσης της εξάρτησης από τα ζωικά μοντέλα σε διάφορους ερευνητικούς τομείς. Καθώς αυτές οι τεχνολογίες συνεχίζουν να εξελίσσονται, η επιστημονική κοινότητα είναι έτοιμη να ξεκλειδώσει νέα σύννορα και να αναδιαμορφώσει το τοπίο των ερευνητικών μεθοδολογιών.

---

[59] Ortiz-Catalan et al., 2014; Terrazas-Rodas & Perez, 2022

[60] Shallue and Vanderburg, 2018; Baron, 2019

[61] Pang and Lee, 2008; Liu, 2012

[62] Baker and Siemens 2014

[63] Mitchel et al., 2004; Järvelä et al., 2020;

## Ενότητα 6<sup>η</sup>

### Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων

Η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων αποτελεί μια μετασχηματιστική προσέγγιση που έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα των φαρμακευτικών σκευασμάτων και άλλων βιολογικών προϊόντων. Οι τεχνολογίες μηχανικής μάθησης προσφέρουν μια σειρά εργαλείων για την ανάλυση δεδομένων, την αναγνώριση προτύπων και την προγνωστική μοντελοποίηση, παρέχοντας πολύτιμες γνώσεις για διάφορα στάδια ανάπτυξης και δοκιμής προϊόντων.

Ένας κρίσιμος τομέας στον οποίο η μηχανική μάθηση συμβάλλει σημαντικά είναι η πρόβλεψη των βιολογικών αποκρίσεων και της τοξικότητας των ουσιών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι για την αξιολόγηση της ασφάλειας των βιολογικών προϊόντων συχνά περιλαμβάνουν χρονοβόρες και δαπανηρές δοκιμές σε ζώα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, ωστόσο, μπορούν να αναλύσουν τεράστια σύνολα δεδομένων μοριακών και κυτταρικών αποκρίσεων για να προβλέψουν πιθανές ανεπιθύμητες ενέργειες με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα από τις συμβατικές μεθόδους<sup>[64]</sup>. Αυτό όχι μόνο εξορθολογίζει τη διαδικασία δοκιμών, αλλά μειώνει επίσης την εξάρτηση από τα ζωικά μοντέλα, ευθυγραμμίζόμενο με τις ηθικές εκτιμήσεις και την αυξανόμενη ζήτηση για εναλλακτικές μεθόδους δοκιμών.

Εκτός από την πρόβλεψη της τοξικότητας, η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην ανάλυση δεδομένων υψηλής απόδοσης που παράγονται κατά τη διάρκεια δοκιμών βιολογικών προϊόντων. Τα σύνολα δεδομένων γονιδιωματικής, μεταγραφομικής, πρωτεομικής και μεταβολομικής ανάλυσης περιέχουν πληθώρα πληροφοριών που μπορεί να είναι δύσκολο να ερμηνευθούν χειροκίνητα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης υπερέρχονται στον εντοπισμό μοτίβων μέσα σε αυτά τα πολύπλοκα σύνολα δεδομένων, βοηθώντας στην ανακάλυψη βιοδεικτών, στη διαλεύκανση του τρόπου δράσης και στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής<sup>[65]</sup>. Αξιοποιώντας τη μηχανική μάθηση, οι ερευνητές μπορούν να αποκαλύψουν λεπτές σχέσεις που μπορεί να έχουν παραβλεφθεί με τη χρήση παραδοσιακών αναλυτικών μεθόδων.

Επιπλέον, η βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής βιολογικών προϊόντων αποτελεί κρίσιμη πτυχή της διασφάλισης της συνοχής και της ποιότητας των προϊόντων. Η μηχανική μάθηση διευκολύνει την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραμέτρων βιολογικών διεργασιών με την ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών για την απόδοση και την ποιότητα του τελικού προϊόντος<sup>[66]</sup>. Αυτό όχι μόνο ενισχύει την αποτελεσματικότητα, αλλά συμβάλλει και στη μείωση της πειραματικής μεταβλητότητας, οδηγώντας τελικά σε πιο αξιόπιστα και φερέγγυα αποτελέσματα δοκιμών.

Η μηχανική μάθηση διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στον εντοπισμό πιθανών μολυσματικών ουσιών ή προσμίξεων σε βιολογικά προϊόντα. Αναλύοντας ιστορικά δεδομένα σχετικά με τις διαδικασίες παραγωγής και την ποιότητα των προϊόντων, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να προβλέψουν και να αποτρέψουν πιθανά προβλήματα,

---

[64] Chen and Snyder, 2013; Mohsen et al., 2021

[65] Angermueller et al., 2016; Pirmoradian et al., 2014

[66] Rathore and Winkle, 2009; Chen and Snyder., 2012

μειώνοντας τον κίνδυνο ανάκλησης προϊόντων και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα<sup>[67]</sup>. Αυτή η προληπτική προσέγγιση ενισχύει την ασφάλεια των προϊόντων και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις, ενώ ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εκτεταμένες αναδρομικές δοκιμές.

Επιπλέον, η μηχανική μάθηση συμβάλλει στον τομέα της εξατομικευμένης ιατρικής αναλύοντας δεδομένα μεμονωμένων ασθενών για την προσαρμογή βιολογικών προϊόντων που αφορούν συγκεκριμένους πληθυσμούς ασθενών. Αυτό περιλαμβάνει την πρόβλεψη της ανταπόκρισης των ασθενών στα βιολογικά φάρμακα, τη βελτιστοποίηση των δοσολογικών σχημάτων και τον εντοπισμό πιθανών ανεπιθύμητων ενεργειών με βάση τις ατομικές γενετικές παραλλαγές<sup>[68]</sup>. Τέτοιες εξατομικευμένες προσεγγίσεις όχι μόνο βελτιώνουν τα θεραπευτικά αποτελέσματα αλλά και ευθυγραμμίζονται με την ευρύτερη τάση προς την ιατρική ακριβείας.

Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων επεκτείνεται πέρα από το εργαστήριο, περιλαμβάνοντας ρυθμιστικές διαδικασίες και λήψη αποφάσεων. Οι ρυθμιστικές αρχές μπορούν να αξιοποιήσουν αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την ανάλυση τεράστιων συνόλων δεδομένων που σχετίζονται με την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και την επιτήρηση των προϊόντων μετά την κυκλοφορία τους, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων βάσει στοιχείων και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα των ρυθμιστικών ελέγχων<sup>[69]</sup>. Αυτή η στροφή προς τη λήψη ρυθμιστικών αποφάσεων με βάση τα δεδομένα έχει τη δυνατότητα να επιταχύνει τις εγκρίσεις προϊόντων, διασφαλίζοντας την έγκαιρη πρόσβαση σε καινοτόμες θεραπείες.

Επιπλέον, η χρήση μηχανικής μάθησης ενισχύει τη φαρμακοεπαγρύπνηση αναλύοντας δεδομένα του πραγματικού κόσμου, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών αρχείων υγείας, των μέσων κοινωνικής δικτύωσης και άλλων βάσεων δεδομένων υγειονομικής περίθαλψης. Εντοπίζοντας πιθανά σήματα ασφάλειας και ανεπιθύμητα συμβάντα που σχετίζονται με βιολογικά προϊόντα, η μηχανική μάθηση συμβάλλει στη συνεχή παρακολούθηση της ασφάλειας και τη διαχείριση του κινδύνου<sup>[70]</sup>. Αυτή η προληπτική προσέγγιση της φαρμακοεπαγρύπνησης ενισχύει την ασφάλεια των ασθενών καθώς και τη ρυθμιστική εποπτεία.

Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων αντιπροσωπεύει μια αλλαγή παραδείγματος στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουμε την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και τη διασφάλιση της ποιότητας. Από την πρόβλεψη της τοξικότητας και την ανάλυση δεδομένων omics έως τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παρασκευής και τη βελτίωση της λήψης ρυθμιστικών αποφάσεων, η μηχανική μάθηση προσφέρει μια πολύπλευρη εργαλειοθήκη για την πρόοδο του τομέα. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης στη δοκιμή βιολογικών προϊόντων υπόσχεται πολλά για τη διασφάλιση της ανάπτυξης και της παράδοσης ασφαλών και αποτελεσματικών βιοφαρμάκων.

Ο συνδυασμός της μηχανικής μάθησης και των δοκιμών βιολογικών προϊόντων αναδιαμορφώνει το τοπίο της επιστημονικής έρευνας, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις σε μακροχρόνιες προκλήσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης

---

[67] Wu et al., 2020; Dara et al., 2021

[68] Kourou et al., 2015; McEachern et al., 2021

[69] Sesen et al., 2010; Patil et al., 2023

[70] Harpaz et al., 2014; Liu et al., 2014

στην ανάπτυξη εμβολίων. Η παραδοσιακή ανάπτυξη εμβολίων περιλαμβάνει συχνά χρονοβόρες και απαιτητικές σε πόρους διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένης της καλλιέργειας παθογόνων μικροοργανισμών και εκτεταμένων δοκιμών σε ζώα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να επιταχύνουν τον εντοπισμό πιθανών αντιγόνων, να προβλέψουν την ανοσογονικότητα και να βελτιστοποιήσουν τις συνθέσεις εμβολίων, εξορθολογίζοντας το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης και ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για ζωικά μοντέλα<sup>[71]</sup>. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο επιταχύνει την αντιμετώπιση των αναδυόμενων μολυσματικών ασθενειών, αλλά ευθυγραμμίζεται επίσης με τις ηθικές απαιτήσεις μειώνοντας την εξάρτηση από τις παραδοσιακές μεθόδους ανάπτυξης εμβολίων.

Μια άλλη μετασχηματιστική εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στη δοκιμή βιολογικών προϊόντων είναι η πρόβλεψη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ δραστικών ουσιών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι για την αξιολόγηση των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ φαρμακευτικών ενώσεων βασίζονται συχνά σε μελέτες σε ζώα και δοκιμές *in vitro*. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης, ωστόσο, μπορούν να αναλύσουν ποικίλα σύνολα δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των χημικών δομών, της φαρμακοκινητικής και των αναφορών ανεπιθύμητων ενεργειών, για να προβλέψουν πιο ολοκληρωμένα τις πιθανές αλληλεπιδράσεις<sup>[72]</sup>. Αξιοποιώντας τη μηχανική μάθηση, οι ερευνητές μπορούν να εντοπίζουν και να μετριάζουν προληπτικά τον κίνδυνο ανεπιθύμητων αλληλεπιδράσεων, συμβάλλοντας στην ασφαλέστερη και αποτελεσματικότερη ανάπτυξη φαρμάκων.

Στον τομέα της γονιδιακής θεραπείας, η μηχανική μάθηση αναδεικνύεται σε ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού φορέων και την πρόβλεψη των θεραπευτικών αποτελεσμάτων. Οι γονιδιακές θεραπείες συχνά περιλαμβάνουν την παράδοση γενετικού υλικού με τη χρήση ιικών φορέων και ο σχεδιασμός αυτών των φορέων είναι κρίσιμος για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων εκτός στόχου. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύσουν δεδομένα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του φορέα, τις κυτταρικές αποκρίσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασθενών, ώστε να ληφθούν αποφάσεις για τον σχεδιασμό αποτελεσματικότερων και ασφαλέστερων φορέων γονιδιακής θεραπείας<sup>[73]</sup>. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο ενισχύει την ακρίβεια των γονιδιακών θεραπειών αλλά μειώνει επίσης την εξάρτηση από τα ζωικά μοντέλα για την προκλινική βελτιστοποίηση των φορέων.

Η μηχανική μάθηση συμβάλλει επίσης στον τομέα της ανακάλυψης βιοδεικτών, ιδίως στο πλαίσιο διαγνωστικών δοκιμασιών για ασθένειες όπως ο καρκίνος. Η παραδοσιακή ανακάλυψη βιοδεικτών περιλαμβάνει συχνά εκτεταμένα πειράματα και επικύρωση, συμπεριλαμβανομένων μελετών σε ζώα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, από την άλλη πλευρά, μπορούν να αναλύσουν ποικίλα ομικά δεδομένα (omics data) για τον εντοπισμό πιθανών βιοδεικτών με υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα<sup>[74]</sup>. Αυτή η προσέγγιση με βάση τα δεδομένα επιταχύνει τον εντοπισμό νέων βιοδεικτών και διευκολύνει την ανάπτυξη ακριβέστερων διαγνωστικών δοκιμών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για ζωικά μοντέλα σε πρώιμο στάδιο ανακάλυψης βιοδεικτών.

Επιπλέον, η μηχανική μάθηση διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κυτταροκαλλιέργειας για την παραγωγή βιολογικών προϊόντων. Οι παραδο-

---

[71] Wu et al., 2020; Thomas et al., 2021; Pérez et al., 2021

[72] Bleakly and Yamanishi, 2009; Sulistiawan et al., 2020;

[73] Chen and Snyder 2012; MacEachern et al., 2021;

[74] Nature, “Comprehensive Molecular Profiling of Lung Adenocarcinoma.”; Pirmoradian et al., 2013; Kourou et al., 2015

σιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης κυτταροκαλλιέργειών περιλαμβάνουν επαναληπτικά πειράματα και χειροκίνητη βελτιστοποίηση, απαιτώντας συχνά σημαντικό χρόνο και πόρους. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από βιοαντιδραστήρες, να προσδιορίζουν τις βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας και να προβλέπουν τη συμπεριφορά των κυττάρων, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικές και κλιμακούμενες διαδικασίες παραγωγής<sup>[75]</sup>. Αυτό όχι μόνο ενισχύει την παραγωγικότητα της βιοκατασκευής, αλλά συμβάλλει επίσης στη μείωση των δοκιμών σε ζώα κατά τη βελτιστοποίηση των συνθηκών κυτταροκαλλιέργειας.

Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στις δοκιμές βιολογικών προϊόντων είναι μια δυναμική και πολύπλευρη προσπάθεια που καλύπτει την ανάπτυξη εμβολίων, τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φαρμάκων, τη βελτιστοποίηση της γονιδιακής θεραπείας, την ανακάλυψη βιοδεικτών, τις διαδικασίες κυτταροκαλλιέργειας και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις. Αυτές οι ποικίλες εφαρμογές υπογραμμίζουν την ευελιξία της μηχανικής μάθησης στην αντιμετώπιση σύνθετων προκλήσεων σε όλο το φάσμα της ανάπτυξης και της δοκιμής βιολογικών προϊόντων. Καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζονται, η συμβιωτική σχέση μεταξύ της μηχανικής μάθησης και των δοκιμών βιολογικών προϊόντων υπόσχεται να εγκαινιάσει μια νέα εποχή αποτελεσματικότητας, ακρίβειας και επίλυσης ηθικών προκλήσεων στο πεδίο των βιοεπιστημών.

Στον τομέα των δοκιμών βιολογικών προϊόντων, η μηχανική μάθηση συνεχίζει να ανοίγει νέους δρόμους, και μια αναδυόμενη πρόκληση είναι η εφαρμογή της στην έρευνα του μικροβιώματος. Το ανθρώπινο μικροβίωμα, το οποίο αποτελείται από τρισεκατομμύρια μικροοργανισμούς που κατοικούν μέσα και πάνω στο ανθρώπινο σώμα, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην υγεία και την ασθένεια. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύσουν τεράστια σύνολα δεδομένων που περιλαμβάνουν μεταγονιδιωματικές, μετατρανσκριπτοματικές και μεταβολομικές πληροφορίες για την αποκάλυψη πολύπλοκων σχέσεων εντός του μικροβιώματος<sup>[76]</sup>. Με την αποκρυπτογράφηση της περίπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ των μικροβιακών κοινοτήτων και του ξενιστή τους, η μηχανική μάθηση συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση της δυναμικής του μικροβιώματος, ανοίγοντας το δρόμο για καινοτόμες διαγνωστικές και θεραπευτικές παρεμβάσεις χωρίς εκτεταμένη εξάρτηση από ζωικά μοντέλα.

Μια άλλη πρωτοποριακή εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στη δοκιμή βιολογικών προϊόντων είναι η πρόβλεψη της αναδίπλωσης και της δομής των πρωτεϊνών. Η κατανόηση της τρισδιάστατης δομής των πρωτεϊνών είναι θεμελιώδης για την αποκρυπτογράφηση των λειτουργιών τους και τον σχεδιασμό στοχευμένων φαρμάκων. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης, ιδίως οι αρχιτεκτονικές βαθιάς μάθησης (deep learning architectures), μπορούν να προβλέψουν την αναδίπλωση των πρωτεϊνών με αξιοσημείωτη ακρίβεια, μαθαίνοντας πρότυπα από τεράστιες βάσεις δεδομένων πρωτεϊνικών ακολουθιών και δομών<sup>[77]</sup>. Αυτό όχι μόνο επιταχύνει τη διαδικασία ανακάλυψης φαρμάκων αλλά και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για χρονοβόρες πειραματικές τεχνικές και μελέτες σε ζώα κατά τη δομική διαλεύκανση των πρωτεϊνών.

Η μηχανική μάθηση διαδραματίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο του τομέα της περιβαλλοντικής τοξικολογίας. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αξιολόγησης των επιπτώσεων των

---

[75] Chi et al., 2009; Jin et al., 2020; Bannigan et al., 2021

[76] Pasolli et al., 2016; Quince et al., 2017

[77] Senior et al., 2020; Heffernan et al., 2015



χημικών ουσιών στα οικοσυστήματα συχνά περιλαμβάνουν πολύπλοκα, χρονοβόρα πειράματα με ποικίλη χλωρίδα και πανίδα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύουν δεδομένα περιβαλλοντικής παρακολούθησης, να προβλέπουν οικολογικές αποκρίσεις σε εκθέσεις σε χημικές ουσίες και να εντοπίζουν πιθανούς κινδύνους για τη βιοποικιλότητα<sup>[78]</sup>. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την αποτελεσματικότητα των εκτιμήσεων περιβαλλοντικού κινδύνου και συμβάλλει σε οικολογικά βιώσιμες πρακτικές, μειώνοντας την εξάρτηση από ζωικά μοντέλα για μελέτες τοξικότητας σε ποικίλα οικοσυστήματα.

Ακόμη, η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στην ανάλυση δεδομένων ασθενών του πραγματικού κόσμου μετασχηματίζει το τοπίο της εποπτείας μετά την κυκλοφορία των βιολογικών προϊόντων. Τα ηλεκτρονικά αρχεία υγείας, τα δεδομένα απαιτήσεων και τα αποτελέσματα που αναφέρουν οι ασθενείς αποτελούν τεράστιες και πολύτιμες πηγές πληροφοριών. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να κοσκινίσουν αυτά τα ετερογενή δεδομένα για να ανιχνεύσουν μοτίβα ανεπιθύμητων συμβάντων, να παρακολουθήσουν τα μακροπρόθεσμα προφίλ ασφάλειας και να εντοπίσουν πιθανά σήματα που μπορεί να απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση<sup>[79]</sup>. Αυτή η προσέγγιση με βάση τα δεδομένα εξασφαλίζει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των βιολογικών προϊόντων στον πραγματικό κόσμο, συμβάλλοντας στη λήψη αποφάσεων βάσει στοιχείων και μειώνοντας την εξάρτηση από τα ζωικά μοντέλα για την επιτήρηση μετά την κυκλοφορία στην αγορά.

Επίσης, η μηχανική μάθηση συμβάλλει καταλυτικά στην ανάπτυξη οργανοειδών για *in vitro* δοκιμές. Τα οργανοειδή, τρισδιάστατες καλλιέργειες κυττάρων που μιμούνται τη δομή και τη λειτουργία των οργάνων, υπόσχονται εναλλακτικές λύσεις για τα ζωικά μοντέλα στις προκλινικές δοκιμές. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις συνθήκες καλλιέργειας, να προβλέψουν τις αποκρίσεις των οργανοειδών στα φάρμακα και να ενισχύσουν την αναπαραγωγικότητα των *in vitro* πειραμάτων<sup>[80]</sup>. Αυτό όχι μόνο επιταχύνει τη διαδικασία ανάπτυξης φαρμάκων, αλλά ευθυγραμμίζεται και με ηθικές εκτιμήσεις, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ζώα σε δοκιμές πρώιμου σταδίου.

Στον τομέα της αναγεννητικής ιατρικής, η μηχανική μάθηση διευκολύνει τον εξατομικευμένο σχεδιασμό των κυτταρικών θεραπειών. Αναλύοντας δεδομένα ειδικά για τον ασθενή, συμπεριλαμβανομένης της γενετικής, των κυτταρικών αποκρίσεων και των κλινικών αποτελεσμάτων, τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να προβλέψουν τις πιο αποτελεσματικές πηγές κυττάρων, τις συνθήκες καλλιέργειας και τις θεραπευτικές στρατηγικές για μεμονωμένους<sup>[81]</sup> ασθενείς. Αυτή η εξατομικευμένη προσέγγιση όχι μόνο μεγιστοποιεί το θεραπευτικό δυναμικό των κυτταρικών θεραπειών αλλά και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για ζωικά μοντέλα σε προκλινικές μελέτες που σχετίζονται με την αναγεννητική ιατρική.

Συμπερασματικά, οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στον έλεγχο βιολογικών προϊόντων συνεχίζουν να διαφοροποιούνται, περιλαμβάνοντας την έρευνα μικροβιωμάτων, την πρόβλεψη πρωτεϊνικής δομής, την περιβαλλοντική τοξικολογία, την επιτήρηση μετά την κυκλοφορία, την ανάπτυξη οργανοειδών και την εξατομικευμένη αναγεννητική ιατρική. Αυτές οι καινοτόμες εφαρμογές υπογραμμίζουν την ευελιξία της μηχανικής μάθησης στην αντιμετώπιση ενός ευρέος φάσματος προκλήσεων στις βιοεπιστήμες. Καθώς η τεχνολογία

---

[78] Walsch et al., 2021; Gupta et al., 2021

[79] Harpaz et al., 2014; Jarada et al., 2020; Dara et al., 2021

[80] Bartfeld and Clevers, 2017; Fatehullah et al., 2016

[81] Cohen et al., 2019; Kim et al., 2020

εξελίσσεται, οι συνεργατικές προσπάθειες των ερευνητών, των κλινικών ιατρών και των ρυθμιστικών φορέων θα είναι απαραίτητες για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της μηχανικής μάθησης, ενώ παράλληλα θα προωθούνται οι δεοντολογικές και τεκμηριωμένες πρακτικές στον έλεγχο των βιολογικών προϊόντων.

## Ενότητα 7<sup>η</sup>

### Εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στην εκπαίδευση

Η μηχανική μάθηση έχει αναδειχθεί σε μετασχηματιστική δύναμη σε διάφορους κλάδους, και ο χώρος της εκπαίδευσης δεν αποτελεί εξαίρεση. Καθώς η κοινωνία εξελίσσεται, το ίδιο συμβαίνει και με την ανάγκη για καινοτόμες προσεγγίσεις στη διδασκαλία και τη μάθηση. Αυτή η ενότητα διερευνά τις ποικίλες εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στην εκπαίδευση, αναδεικνύοντας τις δυνατότητές της να φέρει επανάσταση στις παραδοσιακές μεθόδους διδασκαλίας και να βελτιώσει τη συνολική μαθησιακή εμπειρία<sup>[82]</sup>.

Η εξατομικευμένη μάθηση αποτελεί μία από τις πιο ενθαρρυντικές εξελίξεις στον τομέα της εκπαίδευσης, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της διδασκαλίας σύμφωνα με τις ξεχωριστές ανάγκες κάθε μαθητή. Η συνεισφορά της μηχανικής μάθησης σε αυτό τον τομέα είναι ιδιαίτερα επίκαιρη, καθώς παρέχει λύσεις σε προβλήματα που εδώ και καιρό απασχολούν τους εκπαιδευτικούς και τους ερευνητές.

Οι παραδοσιακές πρακτικές στη διδασκαλία επικεντρώνονται συχνά σε μια μονοδιάστατη προσέγγιση, προσφέροντας ίδιο υλικό και μέθοδο διδασκαλίας σε ομάδες μαθητών. Ωστόσο, η διαφοροποίηση μεταξύ των μαθητών, όσον αφορά τις ικανότητες, τις προτιμήσεις και τον ρυθμό μάθησης, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή μάθηση. Εδώ εισέρχεται η εξατομικευμένη μάθηση, που αξιοποιεί τη δύναμη των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για να δημιουργήσει εξατομικευμένες εκπαιδευτικές εμπειρίες<sup>[83]</sup>.

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, ενσωματωμένοι στα εξατομικευμένα συστήματα μάθησης, αναλύουν δεδομένα που προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως τα αποτελέσματα δοκιμασιών αξιολόγησης, τη συμμετοχή σε δραστηριότητες και τη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της μάθησης. Βασιζόμενοι σε αυτήν την ανάλυση, μπορούν να προσαρμόσουν το εκπαιδευτικό περιεχόμενο για κάθε μαθητή. Σε αυτό το πλαίσιο, η έννοια της "έξυπνης" εκπαίδευσης αναδύεται, όπου το σύστημα μαθαίνει συνεχώς από την αλληλεπίδραση με τους χρήστες και προσφέρει εξατομικευμένη υποστήριξη<sup>[84]</sup>.

Η εξατομικευμένη εκπαίδευση μέσω της μηχανικής μάθησης δεν αφορά μόνο την προσαρμογή του περιεχομένου, αλλά ολόκληρη τη διαδικασία μάθησης. Για παράδειγμα, η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης μπορεί να διευκολύνει τη δημιουργία εξατομικευμένων σχεδίων μαθησιακής πορείας για κάθε μαθητή, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του. Αυτό συμβάλλει στην αύξηση της κίνησης και της ενεργού συμμετοχής, καθώς οι μαθητές αντιλαμβάνονται τη σημασία και την εξατομίκευση της μάθησής τους<sup>[85]</sup>. Κατ'αυτό τον τρόπο, ο συνδυασμός η μηχανική μάθηση ανοίγει νέους ορίζοντες για την εκπαιδευτική διαδικασία, διαμορφώνοντας το μέλλον της εκπαίδευσης με πρωτοποριακό τρόπο.

Τα Ευφυή Συστήματα Διδασκαλίας (ΕΣΔ - Intelligent Tutoring Systems - ITS) αποτελούν σημαντική πτυχή της εξέλιξης της εκπαίδευσης, εκμεταλλευόμενα αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για τη δημιουργία εικονικών διδασκάλων που προσφέρουν εξατομικευμένη καθοδήγηση στους μαθητές. Η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων στην

---

[82] Τοπαρόπουλος, 2023

[83] Φίνου, 2023

[84] Χαρισόπουλος, 2017

[85] Abel, 2006; Kucak et al., 2018; Rusdi et al, 2023

εκπαιδευτική διαδικασία συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της μάθησης και της απόδοσης των σπουδαστών. Σε αυτό το σημείο αξίζει μια αναλυτικότερη αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά των Ευφυών Συστημάτων Διδασκαλίας και τον ρόλο της μηχανικής μάθησης σε αυτά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ΕΣΔ αντιπροσωπεύουν εκπαιδευτικά περιβάλλοντα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία για να παρέχουν προσαρμοσμένη και ατομική εκπαίδευση σε κάθε μαθητή. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης εντοπίζουν τα προσόντα, τις αδυναμίες και τις προτιμήσεις του μαθητή με βάση τη συλλογή και ανάλυση των εκπαιδευτικών δεδομένων. Έτσι, δημιουργούνται εξατομικευμένα σχέδια μάθησης που προσαρμόζονται στις ανάγκες του κάθε μαθητή<sup>[86]</sup>.

Τα ΕΣΔ παρέχουν εξειδικευμένη καθοδήγηση, προσαρμόζοντας το περιεχόμενο, τη δυσκολία και τον ρυθμό της μάθησης σε πραγματικό χρόνο. Η συνεχής παρακολούθηση των επιδόσεων του μαθητή επιτρέπει στα ΕΣΔ να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες και ανατροφοδότηση, προσφέροντας επιπλέον υλικό και ασκήσεις όταν απαιτείται. Αυτή η διαδραστική προσέγγιση συμβάλλει στην αύξηση του ενδιαφέροντος των μαθητών και τη βελτίωση της συνολικής μάθησής τους.

Η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (ΕΦΓ - Natural Language Processing - NLP) αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για την αλληλεπίδραση μεταξύ του μαθητή και του εικονικού διδάσκοντα<sup>[87]</sup>. Η ενσωμάτωση της ΕΦΓ βελτιώνει την επικοινωνία, επιτρέποντας στους μαθητές να επικοινωνούν με το σύστημα μέσω φυσικής γλώσσας, σαν να επικοινωνούσαν με έναν πραγματικό δάσκαλο. Αυτό δημιουργεί ένα ελκυστικό, διαδραστικό περιβάλλον μάθησης που ενθαρρύνει τη συμμετοχή και την ενασχόληση των μαθητών.

Σύμφωνα με τη μελέτη της Ελευθεριάδου (2022), τα Ευφυή Συστήματα Διδασκαλίας που χρησιμοποιούν αλγόριθμους μηχανικής μάθησης και επεξεργασίας φυσικής γλώσσας επιτυγχάνουν υψηλά επίπεδα αποδοτικής μάθησης και αποτελεσματικής επικοινωνίας με τους μαθητές<sup>[88]</sup>.

Η προγνωστική ανάλυση που παρέχει η μηχανική μάθηση αποτελεί έναν από τους κύριους πυλώνες της εκπαίδευσης του μέλλοντος. Η μοναδική ικανότητα αυτής της τεχνολογίας να εξετάζει πολύπλοκα σύνολα δεδομένων και να παράγει προβλέψεις με βάση τις παρατηρήσεις του παρελθόντος έχει αναδείξει τη μηχανική μάθηση ως ισχυρό εργαλείο για την πρόβλεψη εκπαιδευτικών αποτελεσμάτων. Στον τομέα της εκπαίδευσης, η προγνωστική ανάλυση βασίζεται σε διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την πορεία των μαθητών. Στο έργο των Arnold et al. (2020), η έρευνα καταδεικνύει πώς η ανάλυση των παραγόντων αυτών, όπως η συχνότητα φοίτησης, οι εκπαιδευτικοί βαθμοί και η συνολική δέσμευση στις σχολικές δραστηριότητες, μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία αξιόπιστων προγνωστικών μοντέλων<sup>[89]</sup>.

Με τη χρήση αυτών των μοντέλων πρόβλεψης, οι εκπαιδευτικοί μπορούν να λαμβάνουν έγκαιρες προειδοποιήσεις σχετικά με τους μαθητές που ενδέχεται να αντιμετωπίζουν προβλήματα. Αυτή η προληπτική προσέγγιση επιτρέπει στους εκπαιδευτικούς να παρεμβαίνουν άμεσα, παρέχοντας προσαρμοσμένη υποστήριξη σε αυτούς τους μαθητές. Η δυνατότητα αυτή να ανιχνεύει πρόωρα τα προβλήματα και να παρέχει

---

[86] Γκότσης, 2022

[87] Αντωνέλου, 2014

[88] Ελευθεριάδου, 2022

[89] Arnold et al., 2020

στοχευμένη ενίσχυση συντείνει στην πρόληψη της απότομης πτώσης στις επιδόσεις και της πιθανής εγκατάλειψης της εκπαιδευτικής διαδικασίας.

Η αυτοματοποιημένη προβλεπτική ανάλυσης διευκολύνει την αναγνώριση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι μαθητές, ενισχύοντας παράλληλα τη συνολική αποτελεσματικότητα της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Στο πλαίσιο αυτό, η έρευνα του Arnold et al. (2020) προωθεί την ιδέα ότι η μηχανική μάθηση αναδεικνύεται ως κρίσιμο εργαλείο για τη διασφάλιση της επιτυχίας και της συνεχούς εξέλιξης στον τομέα της εκπαίδευσης.

Η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στη διαδικασία αξιολόγησης συνεισφέρει σημαντικά στην αυτοματοποίηση και βελτίωση του εκπαιδευτικού συστήματος. Στον τομέα της βαθμολόγησης, των εργασιών, των κουίζ και των εξετάσεων, η μηχανική μάθηση συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο αποτελεσματικής διαδικασίας αξιολόγησης.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης από τους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης έχει δύο κύρια οφέλη. Πρώτον, μειώνει σημαντικά τον φόρτο εργασίας των εκπαιδευτικών, επιτρέποντάς τους να επικεντρωθούν σε πιο δημιουργικές και αναλυτικές δραστηριότητες. Δεύτερον, διασφαλίζει μια πιο συνεπή και αντικειμενική αξιολόγηση, αφού οι αλγόριθμοι εφαρμόζουν κριτήρια αξιολόγησης με βάση προκαθορισμένους κανόνες.

Η Σούρσου. (2023) αναδεικνύει τη σημασία της άμεσης ανατροφοδότησης που παρέχει η μηχανική μάθηση στους εκπαιδευόμενους. Η άμεση αυτή ανατροφοδότηση επιτρέπει στους μαθητές να αντιληφθούν άμεσα τα λάθη τους και να επικεντρωθούν στους τομείς που απαιτούν βελτίωση. Αυτή η εξατομικευμένη προσέγγιση στην αξιολόγηση συμβάλλει στην ανάπτυξη των μαθητικών ικανοτήτων και στην ενίσχυση της μαθησιακής διαδικασίας<sup>[90]</sup>.

Πέραν της προσφοράς αξιολόγησης, οι αλγόριθμοι μπορούν να παρέχουν και εξατομικευμένο προσανατολισμό στους μαθητές. Με βάση τα ατομικά χαρακτηριστικά και τις ανάγκες του κάθε μαθητή, οι αλγόριθμοι μπορούν να προτείνουν προσαρμοσμένο εκπαιδευτικό υλικό, ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της μάθησης.

Οι πλατφόρμες προσαρμοστικής μάθησης αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό εργαλείο στον τομέα της εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας τη μηχανική μάθηση για τη δυναμική προσαρμογή του εκπαιδευτικού υλικού σύμφωνα με τις επιδόσεις και τις ανάγκες κάθε μαθητή. Αυτή η προσαρμοστική προσέγγιση στην εκπαίδευση ανοίγει νέες δυνατότητες για την παροχή εξατομικευμένων και αποτελεσματικών μαθησιακών εμπειριών.

Οι πλατφόρμες αυτές διακρίνονται για τη συνεχή αξιολόγηση των επιδόσεων του μαθητή, λαμβάνοντας υπόψη τα δυνατά και αδύνατα σημεία του. Αυτή η διαρκής παρακολούθηση επιτρέπει στην πλατφόρμα να προσαρμόζει δυναμικά τη δυσκολία και το περιεχόμενο του υλικού, προσφέροντας στον μαθητή προσαρμοσμένες προκλήσεις που τον καθοδηγούν στη σταδιακή ενίσχυση των δεξιοτήτων του.

Η εν λόγω προσαρμοστική προσέγγιση διασφαλίζει ότι κάθε μαθητής αντιμετωπίζει τις κατάλληλες προκλήσεις, λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο των γνώσεών του και προωθώντας μια πιο ελκυστική και αποτελεσματική μαθησιακή εμπειρία. Οι μαθητές επωφελούνται από προσαρμοσμένα μαθήματα που σέβονται το ρυθμό και το στυλ της εκμάθησής τους, ενώ παράλληλα προσφέρουν πρόσθετη υποστήριξη στα αδύναμα σημεία τους<sup>[91]</sup>.

---

[90] Σούρσου, 2023

[91] Martin et al., 2015

Σύμφωνα με την έρευνα του Martin et al. (2015), η προσαρμοστική μάθηση σε πλατφόρμες ενισχύει τη μαθησιακή απόδοση και την ενδιαφέροντα μαθητών. Η συνεχής προσαρμογή του περιεχομένου βοηθά στη διατήρηση του ενδιαφέροντος, ενώ η προσωποποιημένη προσέγγιση επιτρέπει στους μαθητές να επιτυγχάνουν αποτελέσματα σύμφωνα με τις δικές τους ανάγκες και ρυθμούς εκμάθησης.

Συνολικά, οι πλατφόρμες προσαρμοστικής μάθησης συνεχίζουν να αποτελούν ένα καίριο εργαλείο για τη μετάβαση προς την εξειδικευμένη και προσαρμοσμένη εκπαίδευση, προάγοντας την αποτελεσματικότητα και την ενδιαφέρουσα μάθηση.

Η Εξόρυξη Εκπαιδευτικών Δεδομένων (ΕΕΔ - Educational Data Mining - EDM) αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και εφαρμογής των μεθόδων μηχανικής μάθησης στον τομέα της εκπαίδευσης. Η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης στην ανάλυση δεδομένων ανοίγει νέες δυνατότητες για την κατανόηση της διαδικασίας μάθησης, της διδασκαλίας και της αξιολόγησης στο εκπαιδευτικό περιβάλλον<sup>[92]</sup>.

Η εφαρμογή της ΕΕΔ συνεπάγεται την ανάλυση μεγάλων και πολυποίκιλων συνόλων δεδομένων, προερχόμενων από διάφορες πηγές. Ένας σημαντικός τομέας έρευνας είναι η εξόρυξη μοτίβων και τάσεων, όπου οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναζητούν συναφείς συσχετίσεις και πρότυπα στα δεδομένα. Για παράδειγμα, μπορούν να αναλύσουν τις αλληλεπιδράσεις των μαθητών με διαδικτυακούς πόρους, τα αποτελέσματα αξιολόγησης και άλλα στοιχεία που αφορούν τη μαθησιακή εμπειρία.

Με βάση τα ευρήματα της έρευνας του Romero & Ventura. (2010), η ΕΕΔ προσφέρει στους εκπαιδευτικούς τη δυνατότητα να αποκτήσουν πολύτιμες γνώσεις για τις μαθησιακές συμπεριφορές των μαθητών. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των διδακτικών στρατηγικών, την ατομικοποίηση του περιεχομένου του μαθήματος και την υποστήριξη των εκπαιδευόμενων<sup>[93]</sup>.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ΕΕΔ είναι η ικανότητά της να εξάγει συμπεράσματα από πολύπλοκα δεδομένα, που θα ήταν δύσκολο να αντιληφθούν ανθρώπινοι παρατηρητές. Οι εκπαιδευτικοί μπορούν να λάβουν πρακτικές και ευφάνταστες αποφάσεις για τη βελτίωση της ποιότητας της εκπαίδευσης, βασιζόμενοι σε αντικειμενικά δεδομένα και προβλέψεις.

Εκτός από την ανάλυση των μαθητών, η ΕΕΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εκπαιδευτικών προγραμμάτων, την πρόβλεψη επιδόσεων και την προσαρμογή των μαθησιακών περιβαλλόντων. Συνεπώς, η ΕΕΔ ανοίγει πολλές προοπτικές για την εξέλιξη της εκπαιδευτικής πρακτικής με βάση τα δεδομένα και τη μηχανική μάθηση.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί και το πεδίο εκμάθησης γλωσσών, το οποίο αποτελεί έναν απαιτητικό και συνάμα συναρπαστικό τομέα, όπου η συμπληρωματική εφαρμογή της επεξεργασίας φυσικής γλώσσας και της μηχανικής μάθησης επιφέρουν καινοτόμες εκπαιδευτικές πρακτικές. Στο πλαίσιο αυτό, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναδεικνύονται ως ισχυρά εργαλεία για την ανάλυση γλωσσικών δεδομένων, την αξιολόγηση της προφοράς και την παροχή άμεσης ανατροφοδότησης στους μαθητές.

---

[92] Peña – Ayala, 2014

[93] Romero and Ventura., 2010

Η έρευνα του Chen et al. (2022) επισημαίνει τη σημασία της εξατομικευμένης προσέγγισης στην εκμάθηση γλωσσών με τη χρήση της μηχανικής μάθησης. Σύμφωνα με τα ευρήματα αυτής της έρευνας, η εξατομίκευση επιταχύνει τη διαδικασία εκμάθησης, αφού αντιμετωπίζει τις ατομικές προκλήσεις και εστιάζει σε συγκεκριμένες γλωσσικές δεξιότητες που χρήζουν βελτίωσης<sup>[94]</sup>.

Πέρα από την ανάλυση γλωσσικών μοτίβων, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης επιτρέπουν και την αξιολόγηση της προφοράς των μαθητών. Η προσομοίωση πραγματικών καταστάσεων εκφώνησης και η παροχή αμεσότερης επαναδραστηριοποίησης επιτρέπουν στους μαθητές να βελτιώσουν την προφορά τους με επαρκή υποστήριξη.

Επιπλέον, η εκμάθηση γλωσσών διευκολύνεται από τη δυνατότητα αυτόματης παραγωγής προσαρμοσμένου υλικού εκπαίδευσης, το οποίο ευθυγραμμίζεται με τις ατομικές ανάγκες και επίπεδα ικανοτήτων των μαθητών. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκμάθησης και παρέχει ένα εξειδικευμένο πλαίσιο για την πρόοδο κάθε μαθητή. Στο πλαίσιο της εκμάθησης γλωσσών, η χρήση της μηχανικής μάθησης αναμένεται να συνεχίσει να εξελίσσεται, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για την αποτελεσματική και εξατομικευμένη εκπαίδευση.

Η μηχανική μάθηση ενσωματώνεται στενά με τις τεχνολογίες εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας για τη δημιουργία καθηλωτικών μαθησιακών εμπειριών. Οι τεχνολογίες αυτές προσομοιώνουν σενάρια του πραγματικού κόσμου, επιτρέποντας στους σπουδαστές να εφαρμόζουν τις θεωρητικές γνώσεις σε πρακτικά περιβάλλοντα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης ενισχύουν την προσαρμοστικότητα αυτών των προσομοιώσεων, προσαρμόζοντας τα σενάρια με βάση τις αλληλεπιδράσεις των χρηστών, δημιουργώντας ένα πιο δυναμικό και ελκυστικό εκπαιδευτικό περιβάλλον<sup>[95]</sup>. Μέσω του συνδυασμού των διαφόρων τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης της χρήσης εργαστηριακών ζώων, αυτή τη φορά στον τομέα της εκπαίδευσης νέων επιστημόνων. Με τη χρήση επαυξημένης πραγματικότητας, προπλασμάτων και μοντέλων προσομοίωσης ζωικών συστημάτων και συμπεριφορών, νέοι επιστήμονες και ερευνητές έχουν την ευκαιρία εξοικείωσης με το χειρισμό ζώων, την εκτέλεση χειρουργικών ή άλλων διαδικασιών, όπως αιμοληψίες, χωρίς την άμεση χρήση εργαστηριακών ζώων.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στην εκπαίδευση υπόσχεται πολλά για τον μετασχηματισμό των παραδοσιακών παιδαγωγικών προσεγγίσεων. Από τις εξατομικευμένες μαθησιακές εμπειρίες έως την προγνωστική ανάλυση για την επιτυχία των εκπαιδευόμενων, οι εφαρμογές της μηχανικής μάθησης είναι τεράστιες και ποικίλες<sup>[96]</sup>. Καθώς ο τομέας συνεχίζει να εξελίσσεται, οι εκπαιδευτικοί και οι ερευνητές πρέπει να συνεργαστούν για να αξιοποιήσουν το πλήρες δυναμικό της μηχανικής μάθησης, διασφαλίζοντας ότι βελτιώνει τα εκπαιδευτικά αποτελέσματα και προετοιμάζει τους μαθητευόμενους για τις προκλήσεις του μέλλοντος.

---

[94] Chen et al., 2022

[95] Regazzoni et al., 2019

[96] Ελευθεριάδου, 2022

## Ενότητα 8<sup>η</sup>

### Περιορισμοί πλήρους αντικατάστασης των ζώων εργαστηρίου μέσω της μηχανικής μάθησης

Η προσπάθεια αντικατάστασης των πειραματόζωων με μεθόδους μηχανικής μάθησης αντιπροσωπεύει μια προοδευτική αλλαγή στα επιστημονικά ερευνητικά παραδείγματα. Ωστόσο, αυτή η μετασχηματιστική προσέγγιση δεν είναι απαλλαγμένη από τις προκλήσεις και τους περιορισμούς της. Η κατανόηση αυτών των περιορισμών είναι ζωτικής σημασίας για τους ερευνητές, τις επιτροπές βιοηθικής και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής ώστε να μπορέσουν να διαχειριστούν τις πολυπλοκότητες που ενυπάρχουν στην υιοθέτηση της μηχανικής μάθησης ως υποκατάστατο των παραδοσιακών πειραμάτων σε ζώα<sup>[97]</sup>.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την πλήρη αντικατάσταση των πειραματόζωων με μοντέλα μηχανικής μάθησης έγκειται στην πολυπλοκότητα των βιολογικών συστημάτων. Οι ζωντανοί οργανισμοί είναι δυναμικοί, προσαρμοστικοί και λειτουργούν σε πολλαπλές κλίμακες, από τις μοριακές αλληλεπιδράσεις έως τις λειτουργίες σε επίπεδο οργάνου. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, παρά τις αξιοσημείωτες δυνατότητές τους, μπορεί να δυσκολεύονται να συλλάβουν τον πλούτο αυτών των περίπλοκων συστημάτων. Οι βιολογικές διεργασίες περιλαμβάνουν μυριάδες διασυνδεδεμένες μεταβλητές και η ολιστική εξομοίωση αυτής της πολυπλοκότητας παραμένει μια συνεχής πρόκληση.

Τα βιολογικά συστήματα παρουσιάζουν μεταβαλλόμενες ιδιότητες που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις πολυάριθμων συστατικών, αποδίδοντας συχνά αποτελέσματα που είναι δύσκολο να προβλεφθούν αποκλειστικά μέσω υπολογιστικών μοντέλων. Η εγγενής μεταβλητότητα και το απρόβλεπτο των βιολογικών αποκρίσεων αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για τα μοντέλα μηχανικής μάθησης που προσπαθούν να προσομοιώσουν την ποικιλόμορφη και δυναμική φύση των ζωντανών οργανισμών<sup>[98]</sup>.

Τα εργαστηριακά πειράματα συναντούν συχνά απροσδόκητες μεταβλητές που συμβάλλουν στην πολυπλοκότητα των επιστημονικών ερευνών. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης, τα οποία εκπαιδεύονται σε ιστορικά σύνολα δεδομένων, ενδέχεται να δυσκολεύονται να προσαρμοστούν σε απρόβλεπτες μεταβλητές ή αλλαγές πλαισίου που δεν υπάρχουν στα δεδομένα εκπαίδευσής τους. Η έλλειψη προσαρμοστικότητας σε νέα και απροσδόκητα σενάρια μπορεί να περιορίσει τη δυνατότητα γενίκευσης των μοντέλων μηχανικής μάθησης, ιδίως στο δυναμικό και διαρκώς εξελισσόμενο τοπίο της βιολογικής έρευνας.

Επιπλέον, οι βιολογικές αποκρίσεις είναι συχνά ειδικές ως προς το πλαίσιο, επηρεαζόμενες από παράγοντες όπως η γενετική, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η ατομική μεταβλητότητα. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορεί να αντιμετωπίσουν προκλήσεις στην ακριβή καταγραφή και συνεκτίμηση αυτών των ειδικών για το πλαίσιο περιπλοκών, οδηγώντας σε πιθανούς περιορισμούς στην ικανότητά τους να αντικαταστήσουν πλήρως τα ζωικά μοντέλα<sup>[99]</sup>.

---

[97] Jin et al., 2020

[98] Mathis et al., 2018

[99] Coloni et al., 2022



Ενώ ο στόχος της αντικατάστασης των πειραματόζωων με μεθόδους μηχανικής μάθησης έχει τις ρίζες του σε ηθικούς προβληματισμούς, εισάγει το δικό του σύνολο ηθικών προκλήσεων. Η αλγοριθμική προκατάληψη (algorithmic bias), κατά την οποία τα μοντέλα μηχανικής μάθησης διακρίνουν ή ενισχύουν τις υπάρχουσες προκαταλήψεις που υπάρχουν στα δεδομένα εκπαίδευσης, αποτελεί σημαντική ανησυχία. Εάν τα δεδομένα εκπαίδευσης αντικατοπτρίζουν ιστορικές προκαταλήψεις ή ανακρίβειες, το μοντέλο μηχανικής μάθησης μπορεί ακούσια να διαιωνίσει αυτές τις προκαταλήψεις στις προβλέψεις και τις αποφάσεις του.

Η διασφάλιση δεοντολογικών προτύπων στη χρήση της μηχανικής μάθησης για πειραματισμό απαιτεί προσεκτική εξέταση θεμάτων όπως η δικαιοσύνη, η διαφάνεια και η λογοδοσία. Η εξεύρεση ισορροπίας μεταξύ των ηθικών επιταγών και των πιθανών ακούσιων συνεπειών της αλγοριθμικής λήψης αποφάσεων είναι ένα πολύπλοκο έργο που απαιτεί συνεχή έλεγχο και προσαρμογή.

Η επιστημονική έρευνα στηρίζεται στις αρχές της επικύρωσης και της αναπαραγωγιμότητας για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των ευρημάτων. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης, ιδίως τα πολύπλοκα, ενδέχεται να αντιμετωπίζουν προκλήσεις όσον αφορά την επικύρωση και την αναπαραγωγιμότητα σε διαφορετικά εργαστηριακά περιβάλλοντα. Η καθιέρωση ενός τυποποιημένου πλαισίου επικύρωσης για τα μοντέλα μηχανικής μάθησης που διασφαλίζει τη συνέπεια και την αξιοπιστία είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωσή τους στην επιστημονική ερευνητική διαδικασία.

Επιπλέον, η αδιαφανής φύση ανάπτυξης ορισμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης μπορεί να εμποδίσει την ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων, καθιστώντας δύσκολη την κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών που οδηγούν στις προβλέψεις. Αυτή η έλλειψη διαφάνειας μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες στην αναπαραγωγή πειραμάτων και στην επαλήθευση της ακρίβειας των ευρημάτων που βασίζονται στη μηχανική μάθηση<sup>[100]</sup>.

Η επιτυχής αντικατάσταση των πειραματόζωων με μεθόδους μηχανικής μάθησης απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ εμπειρογνομόνων στη βιολογία, την επιστήμη των υπολογιστών, τη δεοντολογία και άλλους συναφείς τομείς. Η γεφύρωση του χάσματος μεταξύ αυτών των επιστημονικών κλάδων είναι μια πολύπλευρη πρόκληση που εκτείνεται πέρα από τις τεχνικές πτυχές της μηχανικής μάθησης. Η αποτελεσματική επικοινωνία, η αμοιβαία κατανόηση και οι συνεργατικές προσπάθειες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων και βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων.

Η διεπιστημονική συνεργασία περιλαμβάνει όχι μόνο την ενσωμάτωση των γνώσεων αλλά και την προώθηση μιας κοινής κατανόησης των περιορισμών και των δυνατοτήτων της μηχανικής μάθησης στο πλαίσιο της αντικατάστασης των πειραματόζωων<sup>[101]</sup>. Η επίτευξη απρόσκοπτης συνεργασίας απαιτεί την υπέρβαση των πολιτισμικών, γλωσσικών και μεθοδολογικών διαφορών που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ ερευνητών από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους.

Τα ζωικά μοντέλα έχουν καθιερωθεί εδώ και πολύ καιρό ως κρίσιμα εργαλεία στην επιστημονική έρευνα, παρέχοντας γνώσεις σχετικά με πολύπλοκες φυσιολογικές και παθολογικές διαδικασίες. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των ζώων, όπως η βιολογική τους ποικιλομορφία, η παρουσία άθικτων οργανικών συστημάτων και η δυνατότητα μελέτης των

---

[100] Zhao et al., 2022

[101] Russek et al., 2017

συστημικών αλληλεπιδράσεων, προσφέρουν ένα επίπεδο πολυπλοκότητας που είναι δύσκολο να αναπαραχθεί αποκλειστικά μέσω υπολογιστικών μοντέλων.

Ενώ οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης μπορούν να προσομοιώσουν ορισμένες πτυχές των βιολογικών διαδικασιών, μπορεί να μην μπορούν να αποτυπώσουν την ολιστική και ολοκληρωμένη φύση των ζωντανών οργανισμών. Η αδυναμία πλήρους αναπαραγωγής των φυσιολογικών και συμπεριφορικών αντιδράσεων που παρατηρούνται στα ζώα εγείρει ερωτήματα σχετικά με την πληρότητα των προσεγγίσεων που βασίζονται στη μηχανική μάθηση ως αυτόνομες αντικαταστάσεις.

Η εφαρμογή μοντέλων μηχανικής μάθησης ως εναλλακτικές λύσεις για τα πειραματόζωα μπορεί να είναι εντατική σε πόρους. Η εκπαίδευση και η τελειοποίηση πολύπλοκων αλγορίθμων απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, εμπειρογνωμοσύνη και ειδική υποδομή. Η πρόσβαση σε αυτούς τους πόρους μπορεί να είναι περιορισμένη, ιδίως σε μικρότερα ερευνητικά ιδρύματα ή περιοχές με περιορισμένες τεχνολογικές δυνατότητες. Το δυνητικό χάσμα πόρων εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ισότιμη πρόσβαση σε προηγμένες τεχνολογίες και την ομοιόμορφη υιοθέτηση των μεθόδων μηχανικής μάθησης σε ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα<sup>[102]</sup>.

Επιπλέον, οι υπολογιστικές απαιτήσεις για προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας μπορεί να συμβάλουν σε περιβαλλοντικές ανησυχίες, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας που συνδέεται με τους υπολογιστές υψηλών επιδόσεων. Η εξισορρόπηση των πλεονεκτημάτων της μηχανικής μάθησης με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της είναι μια πτυχή που απαιτεί προσεκτική εξέταση κατά την επιδίωξη βιώσιμων και υπεύθυνων επιστημονικών πρακτικών<sup>[103]</sup>.

Οι περιορισμοί που συνδέονται με την πλήρη αντικατάσταση των πειραματόζωων με μεθόδους μηχανικής μάθησης υπογραμμίζουν την ανάγκη για μια λεπτή και προσεκτική προσέγγιση. Ενώ η μηχανική μάθηση έχει τεράστιες δυνατότητες για την προώθηση της επιστημονικής έρευνας και την άμβλυνση των ηθικών ανησυχιών που σχετίζονται με τα πειράματα σε ζώα, δεν μπορεί να θεωρηθεί πανάκεια. Αντίθετα, θα πρέπει να θεωρείται ως ένα συμπληρωματικό εργαλείο που συνδυάζεται με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα των ερευνών<sup>[104]</sup>.

Η εξεύρεση της ισορροπίας μεταξύ της τεχνολογικής καινοτομίας, των ηθικών προβληματισμών και των περιπλοκών των βιολογικών συστημάτων απαιτεί συνεχή διάλογο, διεπιστημονική συνεργασία και δέσμευση για διαρκή εξέλιξη. Οι περιορισμοί που περιγράφονται παραπάνω αναδεικνύουν τομείς για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση, τονίζοντας τη σημασία μιας συλλογικής και τεκμηριωμένης προσπάθειας για την πλοήγηση στην πορεία προς τα εμπρός στην αναζήτηση πιο ανθρώπινων και αποτελεσματικών επιστημονικών πρακτικών. Καθώς ο τομέας εξελίσσεται, η αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών θα είναι αναπόσπαστο στοιχείο για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της μηχανικής μάθησης στην αναδιαμόρφωση του τοπίου της επιστήμης.

---

[102] Alvarado, 2022

[103] Haj-Yahya et al., 2018

[104] Fogel, 2006

## Ενότητα 9<sup>η</sup>

### Μελλοντικές Τάσεις

Η επιτυχής εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης για την αντικατάσταση των ζώων εργαστηρίου απαιτεί δημόσια αποδοχή και υποστήριξη. Οι μελλοντικές τάσεις πιθανότατα θα δουν αυξημένες προσπάθειες στην επικοινωνία της επιστήμης, με στόχο την εκπαίδευση του κοινού σχετικά με τα οφέλη, τις προκλήσεις και τους ηθικούς προβληματισμούς που σχετίζονται με αυτή την αλλαγή πειραματικών μέσων. Η οικοδόμηση εμπιστοσύνης και διαφάνειας είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτησή τους<sup>[105]</sup>.

Οι βιολογικές επιστήμες βιώνουν μια αύξηση στην παραγωγή δεδομένων multi-omics, που περιλαμβάνουν γονιδιωματική, μεταγραφωματική, πρωτεομική και μεταβολομική. Οι μελλοντικές τάσεις στην αντικατάσταση των πειραματόζωων με μηχανική μάθηση θα περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση αυτών των διαφορετικών συνόλων δεδομένων. Προηγμένοι αλγόριθμοι θα σχεδιαστούν για να αναλύουν και να ερμηνεύουν πολύπλοκες σχέσεις σε πολλαπλά βιολογικά στρώματα, παρέχοντας μια ολιστική κατανόηση των φυσιολογικών αποκρίσεων μειώνοντας και άλλο την ανάγκη για ζωντανούς οργανισμούς. Οι παραδοσιακές μελέτες σε ζώα συχνά εκτείνονται σε παρατεταμένες περιόδους για να παρατηρήσουν τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των παρεμβάσεων. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης είναι έτοιμα να προσομοιώσουν και να προβλέψουν τέτοια μακροπρόθεσμα αποτελέσματα με παρέκταση από βραχυπρόθεσμα δεδομένα.

Η τάση αυτή όχι μόνο θα επιταχύνει την ερευνητική διαδικασία, αλλά και θα μειώσει σημαντικά τη διάρκεια και το κόστος των πειραμάτων που συνδέονται με τα πειράματα σε ζώα. Η φαρμακευτική βιομηχανία θα επωφεληθεί πάρα πολύ από εξατομικευμένες και βασισμένες σε δεδομένα προσεγγίσεις που ενεργοποιούνται από τη μηχανική μάθηση<sup>[106]</sup>. Οι μελλοντικές τάσεις πιθανότατα θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη αλγορίθμων ικανών να προβλέπουν μεμονωμένες αντιδράσεις στα φάρμακα, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για εκτεταμένες δοκιμές σε ζώα στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης φαρμάκων. Αυτή η μετατόπιση ευθυγραμμίζεται με την ευρύτερη κίνηση προς την ιατρική ακριβείας.

Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης είναι συχνά ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της ποιότητας των δεδομένων και του θορύβου. Οι μελλοντικές εξελίξεις θα επικεντρωθούν στην ενίσχυση της ευρωστίας αυτών των μοντέλων στον χειρισμό θορυβωδών βιολογικών δεδομένων. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων, ιδίως στα πολύπλοκα και δυναμικά βιολογικά περιβάλλοντα όπου οι μελέτες σε ζώα παραδοσιακά υπερέχουν.

Ενώ η εποπτευόμενη μάθηση κυριαρχεί στο σημερινό τοπίο, οι μελλοντικές τάσεις μπορεί να δουν μια αυξημένη υιοθέτηση της ενισχυτικής μάθησης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στα μοντέλα να μαθαίνουν με δοκιμές και λάθη, προσαρμόζοντας τις στρατηγικές τους με βάση την ανατροφοδότηση. Στον τομέα της αντικατάστασης των πειραματόζωων, η ενισχυτική μάθηση έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει προσαρμοστικές αντιδράσεις και πολύπλοκες συμπεριφορές, προσφέροντας μια πιο λεπτή κατανόηση των βιολογικών συστημάτων.

---

[105] Ερμολόγους, 2020

[106] Μπεχίτ, 2021

Καθώς η στροφή προς τις μεθόδους μηχανικής μάθησης αποκτά δυναμική, οι δεοντολογικές εκτιμήσεις και τα κανονιστικά πλαίσια θα εξελιχθούν για την αντιμετώπιση νέων προκλήσεων. Τα επόμενα βήματα πιθανότατα θα περιλαμβάνουν τη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών και προτύπων ειδικά προσαρμοσμένων στη χρήση της μηχανικής μάθησης για την αντικατάσταση πειραματόζων. Αυτό συνεπάγεται την αντιμετώπιση ζητημάτων μεροληψίας, λογοδοσίας και διασφάλισης της ευημερίας των ανθρώπων που συμμετέχουν σε μελέτες.

Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η ενσωμάτωση της επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας στην επιστημονική έρευνα γίνεται όλο και πιο εφικτή. Το μέλλον επιφυλάσσει τη δημιουργία καθηλωτικών περιβαλλόντων όπου οι ερευνητές μπορούν να αλληλεπιδρούν με εικονικά μοντέλα που προσομοιώνουν βιολογικά συστήματα.

Συμπερασματικά, το μέλλον της αντικατάστασης των πειραματόζων με μεθόδους μηχανικής μάθησης είναι πολλά υποσχόμενο. Χαρακτηρίζεται από εξελίξεις στην εξηγησιμότητα, την ενσωμάτωση δεδομένων multi-omics, την προσομοίωση μακροπρόθεσμων επιπτώσεων, την προσαρμοσμένη ανάπτυξη φαρμάκων, την ευρωστία σε θορυβώδη περιβάλλοντα, την ενισχυτική μάθηση, τις εξελισσόμενες ηθικές εκτιμήσεις, την παγκόσμια συνεργασία, την ενσωμάτωση επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, καθώς και την αυξημένη ευαισθητοποίηση του κοινού<sup>[107]</sup>. Αυτές οι τάσεις σηματοδοτούν συλλογικά μια αλλαγή παραδείγματος προς μια πιο ανθρώπινη, αποτελεσματική και τεχνολογικά καθοδηγούμενη προσέγγιση στην επιστημονική έρευνα.

## Επίλογος

Η προοπτική αντικατάστασης των ζώων στα εργαστήρια με μεθόδους μηχανικής μάθησης ανοίγει νέες πόρτες για την επιστημονική κοινότητα, ενώ προκαλεί σημαντικές αλλαγές στον τομέα της έρευνας. Οι προηγούμενες ενότητες ανέδειξαν τη σημασία της εκτεταμένης εξέτασης βιοηθικών ζητημάτων, της εφαρμογής των αρχών των 3R (Αντικατάσταση, Μείωση, Βελτιστοποίηση), και των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η μηχανική μάθηση σε αυτό το πλαίσιο.

Η μηχανική μάθηση, με την εκπληκτική της ικανότητα να επεξεργάζεται δεδομένα και να αναπτύσσει μοντέλα πρόβλεψης, αναδεικνύεται ως ισχυρό εργαλείο για την επιτάχυνση της έρευνας. Ωστόσο, αυτή η μετάβαση δεν είναι ανέπαφη από δεοντολογικές προκλήσεις. Η επιτυχημένη εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στον τομέα απαιτεί σύνεση, διαφάνεια και στρατηγική σχεδίαση.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις, συνοδευόμενες από ηθικό προβληματισμό, προσφέρουν τη δυνατότητα εξεύρεσης ισορροπίας μεταξύ της επιστημονικής προόδου και του σεβασμού προς τη ζωή. Η πορεία προς την αντικατάσταση των ζώων εργαστηρίου με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης απαιτεί συνεργασία της επιστημονικής κοινότητας, παγκόσμια συνείδηση και συνεχή αναθεώρηση των προσεγγίσεων.

Σε μια εποχή όπου οι προκλήσεις της βιοηθικής είναι ουσιώδεις, η αντικατάσταση των ζώων εργαστηρίου με μεθόδους μηχανικής μάθησης σηματοδοτεί την αναζήτηση μιας πιο ανθρώπινης, και συγχρόνως, προοδευτικής προσέγγισης στην επιστημονική έρευνα.

## Βιβλιογραφία

- Abell, Michael. 2006. "Individualizing Learning Using Intelligent Technology and Universally Designed Curriculum". *The Journal of Technology, Learning and Assessment* 5 (3).  
<https://ejournals.bc.edu/index.php/jtla/article/view/1642>.
- Alvarado, Ramón. "Should We Replace Radiologists with Deep Learning? Pigeons, Error and Trust in Medical AI." *Bioethics* 36, no. 2 (October 18, 2021): 121–33.  
<https://doi.org/10.1111/bioe.12959>.
- Angermueller, Christof, Tanel Pärnamaa, Leopold Parts, and Oliver Stegle. "Deep Learning for Computational Biology." *Molecular Systems Biology* 12, no. 7 (July 2016).  
<https://doi.org/10.15252/msb.20156651>.
- "Animals in Science." Environment. Accessed February 12, 2024.  
[https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/animals-science\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/animals-science_en).
- Arnold, Kellyn F, Vinny Davies, Marc de Kamps, Peter W Tennant, John Mbotwa, and Mark S Gilthorpe. "Reflection on Modern Methods: Generalized Linear Models for Prognosis and Intervention—Theory, Practice and Implications for Machine Learning." *International Journal of Epidemiology* 49, no. 6 (May 7, 2020): 2074–82.  
<https://doi.org/10.1093/ije/dyaa049>.
- "Artificial Intelligence in Space." ESA. Accessed February 13, 2024.  
[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/Artificial\\_intelligence\\_in\\_space](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Artificial_intelligence_in_space).
- Baker, Ryan, and George Siemens. "Educational Data Mining and Learning Analytics." *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, September 23, 2014, 253–72.  
<https://doi.org/10.1017/cbo9781139519526.016>.
- Baldi, P., P. Sadowski, and D. Whiteson. "Searching for Exotic Particles in High-Energy Physics with Deep Learning." *Nature Communications* 5, no. 1 (July 2, 2014).  
<https://doi.org/10.1038/ncomms5308>.
- Bannigan, Pauric, Matteo Aldeghi, Zeqing Bao, Florian Häse, Alán Aspuru-Guzik, and Christine Allen. "Machine Learning Directed Drug Formulation Development." *Advanced Drug Delivery Reviews* 175 (August 2021): 113806.  
<https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.05.016>.
- Baron, Dalya. "Machine Learning in Astronomy: A Practical Overview." arXiv.org, April 15, 2019. <https://arxiv.org/abs/1904.07248>.

- Bartfeld, Sina, and Hans Clevers. "Stem Cell-Derived Organoids and Their Application for Medical Research and Patient Treatment." *Journal of Molecular Medicine* 95, no. 7 (April 8, 2017): 729–38. <https://doi.org/10.1007/s00109-017-1531-7>.
- Baumans, V. "Use of Animals in Experimental Research: An Ethical Dilemma?" *Gene Therapy* 11, no. S1 (September 29, 2004). <https://doi.org/10.1038/sj.gt.3302371>.
- Beam, Andrew L., and Isaac S. Kohane. "Big Data and Machine Learning in Health Care." *JAMA* 319, no. 13 (April 3, 2018): 1317. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.18391>.
- Bengio, Y., A. Courville, and P. Vincent. "Representation Learning: A Review and New Perspectives." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 35, no. 8 (August 2013): 1798–1828. <https://doi.org/10.1109/tpami.2013.50>.
- Berrang-Ford, Lea, Anne J Sietsma, Max Callaghan, Jan C Minx, Pauline F Scheelbeek, Neal R Haddaway, Andy Haines, and Alan D Dangour. "Systematic Mapping of Global Research on Climate and Health: A Machine Learning Review." *The Lancet Planetary Health* 5, no. 8 (August 2021). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00179-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00179-0).
- Birkun, Alexei, Simon Northridge, Ed Willsted, Frances James, Charles Kilgour, Martin Lander, and Gavin Fitzgerald. "Studies for Carrying out the Common Fisheries Policy : Adverse Fisheries Impacts on Cetacean Populations in the Black Sea. Final Report to the European Commission." Studies for carrying out the common fisheries policy : adverse fisheries impacts on cetacean populations in the Black Sea. Final report to the European Commission, June 8, 2015. <https://research-repository.st-andrews.ac.uk/handle/10023/6856>.
- Bishop, Christopher M. *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer, 2006.
- Bleakley, Kevin, and Yoshihiro Yamanishi. 2009. "Supervised prediction of drug–target interactions using bipartite local models." *Bioinformatics* 25, no. 18 (September): 2397-2403. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp433>.
- Busardò, Francesco Paolo, Matteo Gulino, Simona Napoletano, Simona Zaami, and Paola Frati. "The Evolution of Legislation in the Field of Medically Assisted Reproduction and Embryo Stem Cell Research in European Union Members." *BioMed Research International* 2014 (2014): 1–14. <https://doi.org/10.1155/2014/307160>.
- Busquet, Francois, Andre Kleensang, Constanza Rovida, Katrin Hermann, Marcel Leist, and Thomas Hartung. "New European Union Statistics on Laboratory Animal Use – What Really Counts!" *ALTEX*, 2020, 167–86. <https://doi.org/10.14573/altex.2003241>.
- Caloni, Francesca, Isabella De Angelis, and Thomas Hartung. "Replacement of Animal Testing by Integrated Approaches to Testing and Assessment (IATA): A Call for in Vitro." *Archives of Toxicology* 96, no. 7 (May 3, 2022): 1935–50. <https://doi.org/10.1007/s00204-022-03299-x>.

- Camenzind, S, and M Eggel. "The 3Rs Principles and Genetic Pain Disenhancement." *Animal Welfare* 31, no. 4 (November 2022): 495–503. <https://doi.org/10.7120/09627286.31.4.002>.
- Caruana, Rich, and Alexandru Niculescu-Mizil. "An Empirical Comparison of Supervised Learning Algorithms." *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning - ICML '06*, 2006. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143865>.
- Chen, Rui, and Michael Snyder. "Promise of Personalized Omics to Precision Medicine." *WIREs Systems Biology and Medicine* 5, no. 1 (November 26, 2012): 73–82. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1198>.
- "Comprehensive Molecular Profiling of Lung Adenocarcinoma." *Nature* 511, no. 7511 (July 9, 2014): 543–50. <https://doi.org/10.1038/nature13385>.
- Chen, Tzu-Chia, Jiuqi Yu, and Amir-Mohammad Golmohammadi. "Application of Sustainable Education Innovation in the Integrated Teaching of Theory and Practice Adopted in the Auto Chassis Course." *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2022 (June 24, 2022): 1–16. <https://doi.org/10.1155/2022/7737231>.
- Cheplygina, Veronika, Marleen de Bruijne, and Josien P.W. Pluim. "Not-so-Supervised: A Survey of Semi-Supervised, Multi-Instance, and Transfer Learning in Medical Image Analysis." *Medical Image Analysis* 54 (May 2019): 280–96. <https://doi.org/10.1016/j.media.2019.03.009>.
- Chi, Hoi-Ming, Herbert Moskowitz, Okan K. Ersoy, Kemal Altinkemer, Peter F. Gavin, Bret E. Huff, and Bernard A. Olsen. "Machine Learning and Genetic Algorithms in Pharmaceutical Development and Manufacturing Processes." *Decision Support Systems* 48, no. 1 (December 2009): 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.06.010>.
- Ching, Travers, Daniel S. Himmelstein, Brett K. Beaulieu-Jones, Alexandr A. Kalinin, Brian T. Do, Gregory P. Way, Enrico Ferrero, et al. "Opportunities and Obstacles for Deep Learning in Biology and Medicine." *Journal of The Royal Society Interface* 15, no. 141 (April 2018): 20170387. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0387>.
- Chollet, Francois. "Deep Learning with Python, Second Edition." Google, October 28, 2017. [https://books.google.gr/books/about/Deep\\_Learning\\_with\\_Python.html?id=Yo3CAQAACA-AJ&redir\\_esc=y](https://books.google.gr/books/about/Deep_Learning_with_Python.html?id=Yo3CAQAACA-AJ&redir_esc=y).
- Cohen, Paul, Joshua G. Hunsberger, and Anthony Atala. "Regenerative Medicine Manufacturing—Challenges and Opportunities." *Principles of Regenerative Medicine*, 2019, 1367–76. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809880-6.00078-3>.
- Dara, Suresh, Swetha Dhamecherla, Surender Singh Jadav, CH Madhu Babu, and Mohamed Jawed Ahsan. "Machine Learning in Drug Discovery: A Review." *Artificial Intelligence Review* 55, no. 3 (August 11, 2021): 1947–99. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10058-4>.



- Domingos, Pedro. *The master algorithm: how the Quest for the ultimate learning machine will remake our world*. New York: Penguin, 2017.
- El-Shamouty, Mohamed, Kilian Kleeberger, Arik Lämmle, and Marco Huber. "Simulation-Driven Machine Learning for Robotics and Automation." *tm - Technisches Messen* 86, no. 11 (August 31, 2019): 673–84. <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0072>.
- Esteva, Andre, Brett Kuprel, Roberto A. Novoa, Justin Ko, Susan M. Swetter, Helen M. Blau, and Sebastian Thrun. "Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks." *Nature* 542, no. 7639 (January 25, 2017): 115–18. <https://doi.org/10.1038/nature21056>.
- "The European Union One Health 2018 Zoonoses Report." *EFSA Journal* 17, no. 12 (December 2019). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5926>.
- "The European Union Summary Report on Trends and Sources of Zoonoses, Zoonotic Agents and Food-borne Outbreaks in 2014." *EFSA Journal* 13, no. 12 (December 2015). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4329>.
- Fatehullah, Aliya, Si Hui Tan, and Nick Barker. "Organoids as an in Vitro Model of Human Development and Disease." *Nature Cell Biology* 18, no. 3 (February 25, 2016): 246–54. <https://doi.org/10.1038/ncb3312>.
- Fogel, David B. "Defining Artificial Intelligence - IEEE Xplore." IEEE Xplore, 2006. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5237936>.
- Franco, Nuno. "Animal Experiments in Biomedical Research: A Historical Perspective." *Animals* 3, no. 1 (March 19, 2013): 238–73. <https://doi.org/10.3390/ani3010238>.
- Franco, NH, and IAS Olsson. "Scientists and the 3Rs: Attitudes to Animal Use in Biomedical Research and the Effect of Mandatory Training in Laboratory Animal Science." *Laboratory Animals* 48, no. 1 (August 12, 2014): 50–60. <https://doi.org/10.1177/0023677213498717>.
- Franco, Nuno Henrique, Peter Sandøe, and I. Anna Olsson. "Researchers' Attitudes to the 3Rs—an Upturned Hierarchy?" *PLOS ONE* 13, no. 8 (August 15, 2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200895>.
- Franklin, Janet, Frank W. Davis, Makihiko Ikegami, Alexandra D. Syphard, Lorraine E. Flint, Alan L. Flint, and Lee Hannah. "Modeling Plant Species Distributions under Future Climates: How Fine Scale Do Climate Projections Need to Be?" *Global Change Biology* 19, no. 2 (November 9, 2012): 473–83. <https://doi.org/10.1111/gcb.12051>.
- Galligioni, Viola, Dania Movia, Daniel Ruiz-Pérez, José Manuel Sánchez-Morgado, and Adriale Prina-Mello. "The Case for Modernizing Biomedical Research in Ireland through the Creation of an Irish 3Rs Centre." MDPI, April 21, 2022. <https://www.mdpi.com/2076-2615/12/9/1078>.

- GOODFELLOW, Ian, Yoshua BENGIO, and Aaron COURVILLE. *Deep learning*. Cambridge ; Massachusetts ; London: MIT Press, 2016. <https://www.deeplearningbook.org/>
- Gorzalczany, Susana B., and Angeles G. Rodriguez Basso. "Strategies to Apply 3RS in Preclinical Testing." *Pharmacology Research & Perspectives* 9, no. 5 (October 2021). <https://doi.org/10.1002/prp2.863>.
- Gupta, Suraj, Diana Aga, Amy Pruden, Liqing Zhang, and Peter Vikesland. "Data Analytics for Environmental Science and Engineering Research." *Environmental Science & Technology* 55, no. 16 (August 2, 2021): 10895–907. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01026>.
- Haj-Yahya, Jawad, Avi Mendelson, Yosi Ben Asher, and Anupam Chattopadhyay. *Energy efficient high performance processors: Recent approaches for designing Green High Performance Computing*. Singapore: Springer, 2018.
- Harpaz, Rave, Alison Callahan, Suzanne Tamang, Yen Low, David Odgers, Sam Finlayson, Kenneth Jung, Paea LePendou, and Nigam H. Shah. "Text Mining for Adverse Drug Events: The Promise, Challenges, and State of the Art." *Drug Safety* 37, no. 10 (August 24, 2014): 777–90. <https://doi.org/10.1007/s40264-014-0218-z>.
- Hastie, Trevor, J. H. Friedman, and Robert Tibshirani. *The elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and prediction*. New York: Springer, 2009.
- Hajar, Rachel. "Animal Testing and Medicine." *Heart Views* 12, no. 1 (2011): 42. <https://doi.org/10.4103/1995-705x.81548>.
- Heffernan, Rhys, Kuldip Paliwal, James Lyons, Abdollah Dehzangi, Alok Sharma, Jihua Wang, Abdul Sattar, Yuedong Yang, and Yaoqi Zhou. "Improving Prediction of Secondary Structure, Local Backbone Angles and Solvent Accessible Surface Area of Proteins by Iterative Deep Learning." *Scientific Reports* 5, no. 1 (June 22, 2015). <https://doi.org/10.1038/srep11476>.
- Herrmann, Kathrin, and Charlotte E Blattner. "Rethinking the 3Rs: From Whitewashing to Rights." Essay. In *Animal Experimentation: Working towards a Paradigm Change*, 168–93. Leiden: Brill, 2019.
- Jarada, Tamer N., Jon G. Rokne, and Reda Alhaji. "A Review of Computational Drug Repositioning: Strategies, Approaches, Opportunities, Challenges, and Directions." *Journal of Cheminformatics* 12, no. 1 (July 22, 2020). <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00450-7>.
- Järvelä, Sanna, Dragan Gašević, Tapio Seppänen, Mykola Pechenizkiy, and Paul A. Kirschner. "Bridging Learning Sciences, Machine Learning and Affective Computing for Understanding Cognition and Affect in Collaborative Learning." *British Journal of Educational Technology* 51, no. 6 (March 6, 2020): 2391–2406. <https://doi.org/10.1111/bjet.12917>.

- Jin, Ik Sup, Moon Sup Yoon, Chun-Woong Park, Jin Tae Hong, Youn Bok Chung, Jin-Seok Kim, and Dae Hwan Shin. "Replacement Techniques to Reduce Animal Experiments in Drug and Nanoparticle Development." *Journal of Pharmaceutical Investigation* 50, no. 3 (April 20, 2020): 327–35. <https://doi.org/10.1007/s40005-020-00487-8>.
- Jordan, M. I., and T. M. Mitchell. "Machine Learning: Trends, Perspectives, and Prospects." *Science* 349, no. 6245 (July 17, 2015): 255–60. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>.
- Kayala, Matthew A., Chloé-Agathe Azencott, Jonathan H. Chen, and Pierre Baldi. "Learning to Predict Chemical Reactions." *Journal of Chemical Information and Modeling* 51, no. 9 (September 2, 2011): 2209–22. <https://doi.org/10.1021/ci200207y>.
- Kelleher, John D, Brian Mac Namee, and Aoife D'Arcy. "Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics." (PDF) *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics | Wenjing Zhao - Academia.edu*, November 6, 2016. [https://academia.edu/29701158/Fundamentals\\_of\\_machine\\_learning\\_for\\_predictive\\_data\\_analytics](https://academia.edu/29701158/Fundamentals_of_machine_learning_for_predictive_data_analytics).
- Khaliq, Fariha, Sameehan Mahajani, Jane Oberhauser, and Debia Wakhloo. "Decoding Degeneration: The Implementation of Machine Learning for Clinical Detection of Neurodegenerative Disorders." *Neural Regeneration Research* 18, no. 6 (2023): 1235. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.355982>.
- Kim, Joohyun, Jane A. McKee, Jake J. Fontenot, and Jangwook P. Jung. "Engineering Tissue Fabrication with Machine Intelligence: Generating a Blueprint for Regeneration." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7 (January 10, 2020). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00443>.
- Kinter, Lewis B, Ron DeHaven, David K Johnson, and Joseph J DeGeorge. "A Brief History of Use of Animals in Biomedical Research and Perspective on Non-Animal Alternatives." *ILAR Journal* 62, no. 1–2 (2021): 7–16. <https://doi.org/10.1093/ilar/ilab020>.
- Kosinski, Michal, David Stillwell, and Thore Graepel. "Private Traits and Attributes Are Predictable from Digital Records of Human Behavior." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 15 (March 11, 2013): 5802–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1218772110>.
- Kourou, Konstantina, Themis P. Exarchos, Konstantinos P. Exarchos, Michalis V. Karamouzis, and Dimitrios I. Fotiadis. "Machine Learning Applications in Cancer Prognosis and Prediction." *Computational and Structural Biotechnology Journal* 13 (2015): 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2014.11.005>.
- Kucak, Danijel, Vedran Juricic, and Goran Dambic. "Machine Learning in Education - A Survey of Current Research Trends." *Proceedings of the 29th International DAAAM Symposium 2018*, 2018, 0406–10. <https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.059>.

- Landi, Margaret, Jeffrey Everitt, and B Berridge. "Bioethical, Reproducibility, and Translational Challenges of Animal Models." *ILAR Journal* 62, no. 1–2 (March 8, 2021): 60–65. <https://doi.org/10.1093/ilar/ilaa027>.
- Landi, Margaret S, Adam J Shriver, and Anna Mueller. "Consideration and Checkboxes: Incorporating Ethics and Science into 3Rs." *J Am Assoc Lab Anim Sci* 54, no. 2: 224–30. Accessed February 2024. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4382628/>.
- Lazer, David, Alex Pentland, Lada Adamic, Sinan Aral, Albert-László Barabási, Devon Brewer, Nicholas Christakis, et al. "Computational Social Science." *Science* 323, no. 5915 (February 6, 2009): 721–23. <https://doi.org/10.1126/science.1167742>.
- LeCun, Yann, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. "Deep Learning." *Nature* 521, no. 7553 (May 27, 2015): 436–44. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- Lewis, David I. "Animal Experimentation: Implementation and Application of the 3Rs." *Emerging Topics in Life Sciences* 3, no. 6 (October 22, 2019): 675–79. <https://doi.org/10.1042/etls20190061>.
- Lima, Aklima Akter, M. Firoz Mridha, Sujoy Chandra Das, Muhammad Mohsin Kabir, Md. Rashedul Islam, and Yutaka Watanobe. "A Comprehensive Survey on the Detection, Classification, and Challenges of Neurological Disorders." *Biology* 11, no. 3 (March 18, 2022): 469. <https://doi.org/10.3390/biology11030469>.
- Litjens, Geert, Thijs Kooi, Babak Ehteshami Bejnordi, Arnaud Arindra Setio, Francesco Ciompi, Mohsen Ghahfoorian, Jeroen A.W.M. van der Laak, Bram van Ginneken, and Clara I. Sánchez. "A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis." *Medical Image Analysis* 42 (December 2017): 60–88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>.
- Liu, Bing. "Sentiment Analysis and Opinion Mining." *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02145-9>.
- Liu, Mei, Yong Hu, and Buzhou Tang. "Role of Text Mining in Early Identification of Potential Drug Safety Issues." *Methods in Molecular Biology*, 2014, 227–51. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0709-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0709-0_13).
- Madden, Judith C., Steven J. Enoch, Alicia Paini, and Mark T.D. Cronin. "A Review of in Silico Tools as Alternatives to Animal Testing: Principles, Resources and Applications." *Alternatives to Laboratory Animals* 48, no. 4 (July 2020): 146–72. <https://doi.org/10.1177/0261192920965977>.
- Maestri, Enrico. "The 3Rs Principle in Animal Experimentation: A Legal Review of the State of the Art in Europe and the Case in Italy." *BioTech* 10, no. 2 (May 20, 2021): 9. <https://doi.org/10.3390/biotech10020009>.

- Marinou, Katerina A., and Ismene A. Dontas. "European Union Legislation for the Welfare of Animals Used for Scientific Purposes: Areas Identified for Further Discussion." *Animals* 13, no. 14 (July 20, 2023): 2367. <https://doi.org/10.3390/ani13142367>.
- Martin, Andrew J., Harry Nejad, Susan Colmar, Gregory Arief Liem, and Rebecca J. Collie. "The Role of Adaptability in Promoting Control and Reducing Failure Dynamics: A Mediation Model." *Learning and Individual Differences* 38 (February 2015): 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.02.004>.
- Mathis, Alexander, Pranav Mamidanna, Kevin M. Cury, Taiga Abe, Venkatesh N. Murthy, Mackenzie Weygandt Mathis, and Matthias Bethge. "DeepLabCut: Markerless Pose Estimation of User-Defined Body Parts with Deep Learning." *Nature Neuroscience* 21, no. 9 (August 20, 2018): 1281–89. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0209-y>.
- MacEachern, Sarah J., and Nils D. Forkert. "Machine Learning for Precision Medicine." *Genome* 64, no. 4 (April 2021): 416–25. <https://doi.org/10.1139/gen-2020-0131>.
- Mitchell, Tom M., Rebecca Hutchinson, Radu S. Niculescu, Francisco Pereira, Xuerui Wang, Marcel Just, and Sharlene Newman. "Learning to Decode Cognitive States from Brain Images." *Machine Learning* 57, no. 1/2 (October 2004): 145–75. <https://doi.org/10.1023/b:mach.0000035475.85309.1b>.
- Mohsen, Attayeb, Lokesh P. Tripathi, and Kenji Mizuguchi. "Deep Learning Prediction of Adverse Drug Reactions in Drug Discovery Using Open TG–Gates and FAERS Databases." *Frontiers in Drug Discovery* 1 (October 27, 2021). <https://doi.org/10.3389/fddsv.2021.768792>.
- Murphy, Kevin P. *Machine learning: A probabilistic perspective*. New York: The MIT Press, 2012.
- Nielsen, Søren Saxmose, Julio Alvarez, Dominique Joseph Bicout, Paolo Calistri, Elisabetta Canali, Julian Ashley Drewe, Bruno Garin-Bastuji, et al. "Assessment of Listing and Categorisation of Animal Diseases within the Framework of the Animal Health Law (Regulation (EU) No 2016/429): Infection with Equine Herpesvirus-1." *EFSA Journal* 20, no. 1 (January 2022). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7036>.
- Obermeyer, Ziad, and Ezekiel J. Emanuel. "Predicting the Future — Big Data, Machine Learning, and Clinical Medicine." *New England Journal of Medicine* 375, no. 13 (September 29, 2016): 1216–19. <https://doi.org/10.1056/nejmp1606181>.
- Ortiz-Catalan, Max, Rickard Brånemark, Bo Håkansson, and Jean Delbeke. "On the Viability of Implantable Electrodes for the Natural Control of Artificial Limbs: Review and Discussion." *BioMedical Engineering OnLine* 11, no. 1 (2012): 33. <https://doi.org/10.1186/1475-925x-11-33>.

- Osborne, Nicola J., Daisy Payne, and Michael L. Newman. "Journal Editorial Policies, Animal Welfare, and the 3Rs." *The American Journal of Bioethics* 9, no. 12 (December 14, 2009): 55–59. <https://doi.org/10.1080/15265160903318343>.
- Pang, Bo, and Lillian Lee. "Opinion Mining and Sentiment Analysis." *Foundations and Trends® in Information Retrieval* 2, no. 1–2 (2008): 1–135. <https://doi.org/10.1561/1500000011>.
- Passantino, Annamaria. "Animals in science: Animal Welfare and Protection during Transport: The Current Legislative Framework in European Union." PubMed, 2006. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17033144/>.
- Pasolli, Edoardo, Francesco Asnicar, Serena Manara, Moreno Zolfo, Nicolai Karcher, Federica Armanini, Francesco Beghini, et al. "Extensive Unexplored Human Microbiome Diversity Revealed by over 150,000 Genomes from Metagenomes Spanning Age, Geography, and Lifestyle." *Cell* 176, no. 3 (January 2019). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.01.001>.
- Patil, Ruchika S., Samruddhi B. Kulkarni, and Vinod L. Gaikwad. "Artificial Intelligence in Pharmaceutical Regulatory Affairs." *Drug Discovery Today* 28, no. 9 (September 2023): 103700. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2023.103700>.
- Peña-Ayala, Alejandro. "Educational Data Mining: A Survey and a Data Mining-Based Analysis of Recent Works." *Expert Systems with Applications* 41, no. 4 (March 2014): 1432–62. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.042>.
- Pérez Santín, Efrén, Raquel Rodríguez Solana, Mariano González García, María Del García Suárez, Gerardo David Blanco Díaz, María Dolores Cima Cabal, José Manuel Moreno Rojas, and José Ignacio López Sánchez. "Toxicity Prediction Based on Artificial Intelligence: A Multidisciplinary Overview." *WIREs Computational Molecular Science* 11, no. 5 (February 2021). <https://doi.org/10.1002/wcms.1516>.
- Pirmoradian, Mohammad, Harshavardhan Budamgunta, Konstantin Chingjin, Bo Zhang, Juan Astorga-Wells, and Roman A. Zubarev. "Rapid and Deep Human Proteome Analysis by Single-Dimension Shotgun Proteomics." *Molecular & Cellular Proteomics* 12, no. 11 (November 2013): 3330–38. <https://doi.org/10.1074/mcp.o113.028787>.
- Quince, Christopher, Alan W Walker, Jared T Simpson, Nicholas J Loman, and Nicola Segata. "Shotgun Metagenomics, from Sampling to Analysis." *Nature Biotechnology* 35, no. 9 (September 2017): 833–44. <https://doi.org/10.1038/nbt.3935>.
- Raccuglia, Paul, Katherine C. Elbert, Philip D. Adler, Casey Falk, Malia B. Wenny, Aurelio Mollo, Matthias Zeller, Sorelle A. Friedler, Joshua Schrier, and Alexander J. Norquist. "Machine-Learning-Assisted Materials Discovery Using Failed Experiments." *Nature* 533, no. 7601 (May 4, 2016): 73–76. <https://doi.org/10.1038/nature17439>.
- Raffel, Colin, Noam Shazeer, Adam Roberts, Katherine Lee, Sharan Narang, Michael Matena, Yanqi Zhou, Wei Li, and Peter J. Liu. "Exploring the Limits of Transfer Learning

- with a Unified Text-to-Text Transformer.” arXiv.org, September 19, 2023.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10683>.
- Raghu, Maithra, and Eric Schmidt. “A Survey of Deep Learning for Scientific Discovery.” arXiv.org, March 26, 2020. <https://arxiv.org/abs/2003.11755>.
- Rajkomar, Alvin, Eyal Oren, Kai Chen, Andrew M. Dai, Nissan Hajaj, Michaela Hardt, Peter J. Liu, et al. “Scalable and Accurate Deep Learning with Electronic Health Records.” *npj Digital Medicine* 1, no. 1 (May 8, 2018). <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0029-1>.
- Rasmussen, Carl Edward, and Christopher K I Williams. *Gaussian process for machine learning*. London, England: The MIT Press, 2006.
- Rathore, Anurag S, and Helen Winkle. “Quality by Design for Biopharmaceuticals.” *Nature Biotechnology* 27, no. 1 (January 2009): 26–34. <https://doi.org/10.1038/nbt0109-26>.
- Regazzoni, F., L. Dedè, and A. Quarteroni. “Machine Learning for Fast and Reliable Solution of Time-Dependent Differential Equations.” *Journal of Computational Physics* 397 (November 2019): 108852. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.07.050>.
- Romero, Cristóbal, and Sebastián Ventura. “Educational Data Mining: A Review of the State of the Art.” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 40, no. 6 (November 2010): 601–18.  
<https://doi.org/10.1109/tsmcc.2010.2053532>.
- Romero, Cristobal, and Sebastian Ventura. “Educational Data Mining and Learning Analytics: An Updated Survey.” *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 10, no. 3 (January 13, 2020). <https://doi.org/10.1002/widm.1355>.
- Rusdi, Mikail Rifqi, T. S. Enrico, Austin Ordell Salomo, Ford Lumban Gaol, and Tokuro Matsuo. “The Model of Personalized Machine Learning to Enhance Students’ Achievements.” *Intelligent Sustainable Systems*, 2023, 701–12.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-1726-6\\_54](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1726-6_54).
- Russek, Evan M., Ida Momennejad, Matthew M. Botvinick, Samuel J. Gershman, and Nathaniel D. Daw. “Predictive Representations Can Link Model-Based Reinforcement Learning to Model-Free Mechanisms.” *PLOS Computational Biology* 13, no. 9 (September 25, 2017). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005768>.
- Russell, Stuart J., and Peter Norvig. *Artificial Intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2010.
- Samuel, A. L. “Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers.” *IBM Journal of Research and Development* 3, no. 3 (July 1959): 210–29.  
<https://doi.org/10.1147/rd.33.0210>.
- Senior, Andrew W., Richard Evans, John Jumper, James Kirkpatrick, Laurent Sifre, Tim Green, Chongli Qin, et al. “Improved Protein Structure Prediction Using Potentials from

- Deep Learning.” *Nature* 577, no. 7792 (January 15, 2020): 706–10.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1923-7>.
- Sesen, M. Berkan, Pradeep Suresh, René Banares-Alcantara, and Venkat Venkatasubramanian. “An Ontological Framework for Automated Regulatory Compliance in Pharmaceutical Manufacturing.” *Computers & Chemical Engineering* 34, no. 7 (July 2010): 1155–69. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.09.004>.
- Schmidhuber, Jürgen. “Deep Learning in Neural Networks: An Overview.” *Neural Networks* 61 (January 2015): 85–117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>.
- Schneider, Gisbert, and Uli Fechner. “Computer-Based de Novo Design of Drug-like Molecules.” *Nature Reviews Drug Discovery* 4, no. 8 (August 1, 2005): 649–63.  
<https://doi.org/10.1038/nrd1799>.
- Shalev-Shwartz, Shai, and Shai Ben-David. *Understanding machine learning: From theory to algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- Shallue, Christopher J., and Andrew Vanderburg. “Identifying Exoplanets with Deep Learning: A Five-Planet Resonant Chain around Kepler-80 and an Eighth Planet around Kepler-90.” *The Astronomical Journal* 155, no. 2 (January 30, 2018): 94.  
<https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9e09>.
- Siemens, George, and Ryan S. Baker. “Learning Analytics and Educational Data Mining.” *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge*, April 29, 2012. <https://doi.org/10.1145/2330601.2330661>.
- Stokes, Jonathan M., Kevin Yang, Kyle Swanson, Wengong Jin, Andres Cubillos-Ruiz, Nina M. Donghia, Craig R. MacNair, et al. “A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery.” *Cell* 180, no. 4 (February 2020). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.01.021>.
- Storck, Veronika, Dimitrios G. Karpouzias, and Fabrice Martin-Laurent. “Towards a Better Pesticide Policy for the European Union.” *Science of The Total Environment* 575 (January 2017): 1027–33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.167>.
- Sulistiawan, Faldi, Winsu A. Kusuma, Nabila S. Ramadhanti, and Aryo Tedjo. 2020. “Drug-Target Interaction Prediction in Coronavirus Disease 2019 Case Using Deep Semi-Supervised Learning Model.” *IEEE Xplore*.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9263241/authors#authors>.
- Sutton, Richard S., Francis Bach, and Andrew G. Barto. *Reinforcement learning: An introduction*. Massachusetts: MIT Press Ltd, 2018.
- Tadich, Tamara, and Ariel Marcel Tarazona. “Replacement, Reduction, and Refinement: Ethical Considerations in the Current Applications of the 3Rs.” *Collaborative Bioethics*, 2023, 667–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-29451-8\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29451-8_35).



- Taylor, Katy, and Laura Rego Alvarez. "An Estimate of the Number of Animals Used for Scientific Purposes Worldwide in 2015." *Alternatives to Laboratory Animals* 47, no. 5–6 (November 2019): 196–213. <https://doi.org/10.1177/0261192919899853>.
- Terrazas-Rodas, Dana, and Joanna Carrion-Perez. "Artificial Intelligence Techniques for Biosignal Pattern Recognition and Classification in Upper-Limb Prostheses: A Review." *2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoT/IIS)*, November 24, 2022. <https://doi.org/10.1109/iotais56727.2022.9975959>.
- Thomas, Sunil, Ann Abraham, Jeremy Baldwin, Sakshi Piplani, and Nikolai Petrovsky. "Artificial Intelligence in Vaccine and Drug Design." *Vaccine Design*, December 17, 2021, 131–46. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1884-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1884-4_6).
- Vayena, Effy, Marcel Salathé, Lawrence C. Madoff, and John S. Brownstein. "Ethical Challenges of Big Data in Public Health." *PLOS Computational Biology* 11, no. 2 (February 9, 2015). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003904>.
- Volonté, Cinzia. "Machine Learning as a New Tool in Neurological Disease Prevention, Diagnosis, and Treatment." *Exploration of Neuroprotective Therapy*, February 21, 2023, 1–7. <https://doi.org/10.37349/ent.2023.00034>.
- Walsh, Ian, Dmytro Fishman, Dario Garcia-Gasulla, Tiina Titma, Gianluca Pollastri, Jennifer Harrow, Fotis E. Psomopoulos, and Silvio Tosatto. 2021. "DOME: Recommendations for Supervised Machine Learning Validation in Biology." *Nature Methods* 18 (July): 1122–1127. [10.1038/s41592-021-01205-4](https://doi.org/10.1038/s41592-021-01205-4).
- Wu, Fengxu, Yuquan Zhou, Langhui Li, Xianhuan Shen, Ganying Chen, Xiaoqing Wang, Xianyang Liang, Mengyuan Tan, and Zunnan Huang. "Computational Approaches in Preclinical Studies on Drug Discovery and Development." *Frontiers in Chemistry* 8 (September 11, 2020). <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00726>.
- Wu, Jingcheng, Wenzhe Wang, Jiucheng Zhang, Binbin Zhou, Wenyi Zhao, Zhixi Su, Xun Gu, Jian Wu, Zhan Zhou, and Shuqing Chen. "DeepPhlapan: A Deep Learning Approach for Neoantigen Prediction Considering Both HLA-Peptide Binding and Immunogenicity." *Frontiers in Immunology* 10 (November 1, 2019). <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02559>.
- Xie, Tian, and Jeffrey C. Grossman. "Crystal Graph Convolutional Neural Networks for an Accurate and Interpretable Prediction of Material Properties." *Physical Review Letters* 120, no. 14 (April 6, 2018). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.145301>.
- Xu, Yongjun, Xin Liu, Xin Cao, Changping Huang, Enke Liu, Sen Qian, Xingchen Liu, et al. "Artificial Intelligence: A Powerful Paradigm for Scientific Research." *The Innovation* 2, no. 4 (November 2021): 100179. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>.
- Zhao, Linlin, Floriane Montanari, Henry Heberle, and Sebastian Schmidt. "Modeling Bioconcentration Factors in Fish with Explainable Deep Learning." *Artificial Intelligence in*

- the Life Sciences 2 (December 2022): 100047.  
<https://doi.org/10.1016/j.aillsci.2022.100047>.
- Αντωνέλου, Γεωργία, “Εξόρυξη Δεδομένων Από Διαδικτυακές Πλατφόρμες: Μελέτη Περίπτωσης Στην Εξ’αποστάσεως Εκπαίδευση”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014. <http://hdl.handle.net/10889/8931>
- Γκότσης Αναστάσιος “Η Συμβολή Της Τεχνητής Νοημοσύνης Στην Εξ’αποστάσεως Εκπαίδευση Ατόμων Με Οπτική Αναπηρία”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, 2022. <https://dspace.lib.uom.gr/handle/2159/26709>
- Ελευθεριάδου, Βασιλική, “Η Εφαρμογή Της Τεχνητής Νοημοσύνης Στην Εξ Αποστάσεως Εκπαίδευση: Τάσεις Και Προκλήσεις”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2022. <https://apothesis.eap.gr/archive/item/172231>
- Ερμογένους, Παναγιώτης, “Οργάνωση μονάδων υγείας και ετοιμότητα για αντιμετώπιση καταστροφών. Η περίπτωση του Covid19 στην Κύπρο”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου 2020. <https://kypseli.ouc.ac.cy/handle/11128/4537>
- Μπεχίτ, Φωτεινή, “Βιοηθικά Ζητήματα και Πανδημία”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2021. <https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/1412>
- “Οδηγία 2010/63/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 22ας Σεπτεμβρίου 2010 , περί προστασίας των ζώων που χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς σκοπούς Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ”.  
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/63/oj/ell>
- Προεδρικό Διάταγμα 56/2013.  
<https://www.library.decentral.minagric.gr/index.php/library-categories/legislation/1-p-d-56-2013>
- Ρουμελιώτης, Γεώργιος, “Τεχνητή Νοημοσύνη, Μηχανική Μάθηση & Άλλες Ανατρεπτικές Τεχνολογίες: Το παρόν και το μέλλον στη διαμόρφωση του ψηφιακού μάρκετινγκ”. Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Νεάπολις Πάφου. 2023.  
<https://hephaestus.nup.ac.cy/bitstream/handle/11728/12393/2ROUME~1.PDF?sequence=1>
- Σούρσου, Μεταξία, “Ψηφιακά παιχνίδια επιπτώσεων και ταξινόμησης για την καλλιέργεια ερμηνευτικών δεξιοτήτων κατά τη δημιουργία ιστορικών νοημάτων στο Γυμνάσιο”, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2023.  
<https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/5445>
- Τοπαρόπουλος, Μάριος, “Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην βιομηχανική όραση”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2023.  
<https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/5484>

Φίνου, Θάλεια, “Εκτίμηση παραμέτρων τεχνικών έργων Α.Π.Ε. με εφαρμογές μηχανικής μάθησης”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2023.  
<https://apothesis.eap.gr/archive/item/194042>

Χαρισόπουλος, Βασίλειος, “Τροπική γεωμετρία και βελτιστοποίηση με εφαρμογές στη μηχανική μάθηση”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.  
[https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/45037/Charisopoulos\\_Thesis.pdf?sequence=1](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/45037/Charisopoulos_Thesis.pdf?sequence=1)