

## Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) στην Εξωσωματική Γονιμοποίηση (IVF)

ΡΩΞΑΝΗ ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΥ

Ομότιμος Καθηγήτρια Ιατρικής ΕΚΠΑ

Η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στην Υγεία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 5 τομείς. Ως *εργαλείο πρόβλεψης* (χρησιμοποιώντας δεδομένα για την πρόβλεψη μελλοντικών αποτελεσμάτων), *εργαλείο ταξινόμησης* (ταξινόμηση δεδομένων σε φυσιολογικά/μη φυσιολογικά), *εργαλείο συσχέτισης* (εύρεση σχέσεων μεταξύ διαφορετικών μεταβλητών για την εξαγωγή κλινικών συμπερασμάτων), *εργαλείο καταστολής* (αξιολόγηση της ισχύος μιας σχέσης, μιας μεταβλητής με άλλες μεταβλητές π.χ. νεογνική θνησιμότητα) ή ως *εργαλείο βελτιστοποίησης* (αυτοματοποίηση πρακτικών εργασιών, π.χ. διοικητικών εργασιών). Στην επόμενη ενότητα, παρέχεται μια σύντομη επισκόπηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην IVF, η οποία περιλαμβάνει κυρίως την αξιοποίηση των δυνατοτήτων πρόβλεψης, ταξινόμησης και βελτιστοποίησης της TN.

Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στην Εξωσωματική Γονιμοποίηση (IVF)

Για μια δεκαετία η επιτυχία της εξωσωματικής γονιμοποίησης παρέμεινε στάσιμη με ποσοστό ~30%. Πρόσφατες έρευνες επιδιώκουν να το βελτιώσουν χρησιμοποιώντας την Τεχνητή Νοημοσύνη - TN ή τις μηχανές που μιμούνται την ανθρώπινη νοημοσύνη και κερδίζουν έδαφος λόγω των δυνατοτήτων τους. Από τα υπάρχοντα στοιχεία η εφαρμογή της TN σε πολλαπλές πτυχές ενός κύκλου εξωσωματικής γονιμοποίησης, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής ωαρίων/σπέρματος και εμβρύων, καθώς και της διαμόρφωσης ενός θεραπευτικού σχήματος εξωσωματικής γονιμοποίησης, λειτουργεί ως ένα πανίσχυρο υποστηρικτικό εργαλείο για τους ειδικούς.

Μέσω της ανάλυσης τεράστιου όγκου δεδομένων για τη βελτίωση της επιλογής εμβρύων και σπερματοζωαρίων, την πρόβλεψη της βιωσιμότητας και την εξατομίκευση των θεραπειών, αυξάνονται οι πιθανότητες επιτυχίας, μειώνεται το κόστος και το άγχος και αντιμετωπίζονται δύσκολες περιπτώσεις υπογονιμότητας.

## Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στην Εξωσωματική Γονιμοποίηση (IVF)

- **Επιλογή Εμβρύων:** Αλγόριθμοι AI αναλύουν την ανάπτυξη των εμβρύων (μορφολογία, κίνηση) για να επιλέξουν το πιο βιώσιμο, με ποσοστά επιτυχίας που αγγίζουν το 92%. Αυτή είναι μία από τις πιο κρίσιμες εφαρμογές. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναλύουν χιλιάδες εικόνες εμβρύων, συχνά από συστήματα καταγραφής με κάμερες (time-lapse imaging), για να εντοπίσουν ανεπαίσθητα μορφολογικά χαρακτηριστικά και ρυθμούς ανάπτυξης που σχετίζονται με υψηλότερη πιθανότητα επιτυχούς εμφύτευσης και εγκυμοσύνης. Αυτό μειώνει την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης κρίσης.

Παραδοσιακά, στην επιλογή εμβρύων με βάση τη μορφολογία, ένας εκπαιδευμένος εμβρυολόγος επιθεωρεί οπτικά και επιλέγει τα έμβρυα με την πιο υγιή εμφάνιση, ωστόσο, αυτό μπορεί να διαφέρει από παρατηρητή σε παρατηρητή. Η επιλογή εμβρύων σχετίζεται με την σχολιασμό της απεικόνισης εμβρύων και την κατάταξη της ποιότητας μεταξύ μιας δεδομένης ομάδας εμβρύων. Οι εικόνες μπορεί να είναι στατικές (π.χ. έμβρυα στο στάδιο της αυλάκωσης που βαθμολογούνται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια) είτε να χρησιμοποιείται βιντεοσκόπηση με χρονική καθυστέρηση (time-lapse videography - TLV), η οποία θεωρείται ότι μειώνει την υποκειμενικότητα μεταξύ των χειριστών και επιτρέπει την αναγνώριση νέων βιοδεικτών βιωσιμότητας. Η TLV περιλαμβάνει οπτική μικροσκοπική απεικόνιση που λαμβάνεται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα για να επιτρέψει την αξιολόγηση της ανάπτυξης του εμβρύου. Ωστόσο, η TLV από μόνη της δεν έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τα ποσοστά κλινικής εγκυμοσύνης ή ζωντανών γεννήσεων σε σύγκριση με την τυπική στατική μορφολογική επιλογή εικόνας. Έχουν αναπτυχθεί πολλαπλές τεχνολογίες TN που ενσωματώνουν είτε στατικές εικόνες, TLV ή/και πρόσθετες κλινικές παραμέτρους με στόχο τη βελτίωση της επιλογής εμβρύων. Οι Wang *et al.* συνέκριναν την επιλογή εμβρύων από εμβρυολόγους (σύστημα βαθμολόγησης Gardner) έναντι της TN (χρησιμοποιώντας μοντέλα TLV και βαθιάς μάθησης) και έδειξαν βελτιωμένα ποσοστά εμφύτευσης στην ομάδα τεχνητής νοημοσύνης (81% έναντι 68%,  $p = 0,02$ ), ωστόσο, δεν υπήρξε διαφορά στα ποσοστά ζωντανών γεννήσεων ή αποβολών. Η μετα-ανάλυση 20 μελετών έδειξε πώς τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης προέβλεπαν την πιθανότητα επιτυχούς κλινικής

εγκυμοσύνης με μεγαλύτερη ακρίβεια (μέση ακρίβεια 81,5%) σε σύγκριση με την εκτίμηση των εμβρυολόγων (μέση ακρίβεια 51%), ωστόσο, προς το παρόν δεν υπάρχουν δεδομένα από μεγάλης κλίμακας τυχαιοποιημένες μελέτες υψηλής ποιότητας που να αξιολογούν το ποσοστό ζωντανών γεννήσεων ως αποτέλεσμα (Wang S, Chen L, Sun H. Interpretable artificial intelligence-assisted embryo selection improved single-blastocyst transfer outcomes: a prospective cohort study. *Reprod Biomed Online*. 2023;47).

- **Επιλογή Σπερματοζωαρίων:** Η TN μπορεί να παρέχει ακριβή και αντικειμενική ανάλυση της μορφολογίας και της κινητικότητας των σπερματοζωαρίων, βοηθώντας στην επιλογή των καλύτερων δειγμάτων. Συστήματα TN (όπως το SiD) αξιολογούν την ποιότητα, μορφολογία και κινητικότητα μεμονωμένων σπερματοζωαρίων σε πραγματικό χρόνο για την ICSI [(Μικρογονιμοποίηση - Intracytoplasmic Sperm Injection) εξειδικευμένη τεχνική εξωσωματικής γονιμοποίησης (IVF) κατά την οποία ένα μόνο, υγιές σπερματοζώαριο εγχέεται απευθείας μέσα σε ένα ώριμο ωάριο, υπό το μικροσκόπιο. Αποτελεί την κορυφαία λύση για σοβαρά προβλήματα ανδρικής υπογονιμότητας].

- **Πρόβλεψη Αποτελεσμάτων:** Προβλέπει πιθανότητες εγκυμοσύνης ανά κύκλο, τον αριθμό των απαραίτητων εμβρυομεταφορών και τον κίνδυνο ανευπλοειδίας. Τα προγνωστικά μοντέλα TN βοηθούν τους κλινικούς ιατρούς να εκτιμήσουν τα ποσοστά επιτυχίας για συγκεκριμένα ζευγάρια, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων και τη συμβουλευτική των ασθενών.

- **Εξατομίκευση Θεραπείας:** Παρέχει εξατομικευμένες εκτιμήσεις για τη δημιουργία βιώσιμων εμβρύων, βοηθώντας σε δύσκολες περιπτώσεις και επαναλαμβανόμενες αποτυχίες. Τα συστήματα TN μπορούν να αναλύσουν μεγάλα σύνολα δεδομένων ασθενών για να προβλέψουν τα βέλτιστα πρωτόκολλα διέγερσης των ωοθηκών (δόσεις και χρονοδιάγραμμα φαρμάκων), εξατομικεύοντας τη φροντίδα για κάθε ασθενή.

- **Βελτιστοποίηση εργαστηριακής ροής εργασιών:** Η TN μπορεί να παρακολουθεί συνεχώς βασικούς δείκτες απόδοσης και να βελτιστοποιεί τις διαδικασίες εντός του εργαστηρίου, εξασφαλίζοντας υψηλότερα πρότυπα ποιότητας και αποδοτικότητας. Βοηθά στη βελτιστοποίηση της κατάψυξης και απόψυξης ωαρίων.

### **Οφέλη από την εφαρμογή της TN:**

**Αυξημένα ποσοστά επιτυχίας και Ακρίβεια:** Η βελτιωμένη επιλογή εμβρύων και τα εξατομικευμένα σχέδια θεραπείας έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν τα ποσοστά επιτυχίας της IVF. Δίνει νέα ελπίδα σε ζευγάρια με δύσκολες περιπτώσεις.

**Μειωμένη υποκειμενικότητα:** Η ανάλυση βασίζεται σε αντικειμενικά κριτήρια αξιολόγησης και μείωση του ανθρώπινου παράγοντα, εξαλείφει μέρος της ανθρώπινης μεροληψίας και τυποποιεί τις αξιολογήσεις. Μείωση Κόστους & Άγχους: Πιο στοχευμένες θεραπείες μειώνουν τον αριθμό των κύκλων.

**Εξοικονόμηση χρόνου:** Η αυτοματοποίηση ορισμένων εργασιών επιτρέπει στους εμβρυολόγους να επικεντρωθούν σε πιο κρίσιμα καθήκοντα και στην άμεση φροντίδα των ασθενών.

**Ενδυνάμωση Ιατρών:** Λειτουργεί ως ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης, όχι αντικατάστασης, για εμβρυολόγους και γιατρούς.

### **Προκλήσεις:**

- **Ανάγκη για κλινική επικύρωση:** Ο ρόλος της TN στη βελτίωση των κλινικών αποτελεσμάτων πρέπει να επιβεβαιωθεί μέσω μεγάλης κλίμακας κλινικών δοκιμών.
- **Ηθικά ζητήματα:** Υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με το απόρρητο των δεδομένων, την αλγοριθμική μεροληψία και τα ηθικά διλήμματα γύρω από την επιλογή εμβρύων.
- **Κόστος και προσβασιμότητα:** Το υψηλό κόστος της τεχνολογίας TN μπορεί να περιορίσει την ευρεία εφαρμογή της.