

## Δημιουργία πολυτροπικού πλαισίου για την ανίχνευση του μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο

Ανδρέας Μήταλας, Ευγένιος Αυγερινός

### Περίληψη

Το μαθηματικό άγχος αποτελεί ένα από τα πιο συστηματικά τεκμηριωμένα εμπόδια στη μαθηματική εκπαίδευση, επηρεάζοντας περίπου το ένα τέταρτο έως το ένα τρίτο των μαθητών και συνδέεται με μειωμένη επίδοση, αποφυγή των μαθηματικών και αρνητικές επιπτώσεις στη συναισθηματική ευημερία. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αξιολόγησης, όπως οι αυτοαναφερόμενες κλίμακες τύπου MARS, παρέχουν πληροφορίες εκ των υστέρων, είναι επιρρεπείς σε προκαταλήψεις και δεν μπορούν να αποτυπώσουν τη δυναμική του άγχους σε πραγματικό χρόνο. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό και την αρχική ανάπτυξη ενός πολυτροπικού πλαισίου για την ανίχνευση μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο, με αξιοποίηση μη επεμβατικών, οικονομικών και τεχνολογικά προσβάσιμων λύσεων, όπως κάμερες web και λογισμικό ανίχνευσης βλέμματος και εκφράσεων προσώπου. Το προτεινόμενο πλαίσιο συνδυάζει βλεμματικά δεδομένα (fixations, saccades, pupil dilation, gaze patterns) με δείκτες συναισθηματικής έκφρασης, με στόχο τη δημιουργία ενός ενοποιημένου δείκτη γνωστικού και συναισθηματικού φορτίου κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων από μαθητές που μεταβαίνουν από την Πρωτοβάθμια στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, την προεπεξεργασία και ανάλυση των βλεμματικών μοτίβων και των εκφράσεων προσώπου, καθώς και την εφαρμογή στατιστικών τεχνικών (ANOVA, συσχετίσεις) και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ταξινόμηση των επιπέδων άγχους. Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και έγκυρου δείκτη μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο, την αυτοματοποίηση της ανατροφοδότησης προς εκπαιδευτικούς και μαθητές και τη δημιουργία των προϋποθέσεων για στοχευμένες παιδαγωγικές παρεμβάσεις που μειώνουν το άγχος και βελτιώνουν την ακαδημαϊκή επίδοση.

### Abstract

Mathematics anxiety is one of the most well-documented barriers to mathematics education, affecting approximately one quarter to one third of students and being associated with lower achievement, avoidance of mathematics and negative effects on learners' emotional well-being. Traditional assessment methods, such as self-report scales like MARS, provide delayed and potentially biased information and cannot capture the dynamic nature of anxiety in real time. This paper presents the design and initial development of a multimodal framework for real-time detection of mathematics anxiety, using non-invasive, low-cost and technologically accessible solutions such as web cameras and software for gaze and facial expression analysis. The proposed framework integrates eye-tracking features (fixations, saccades, pupil dilation, gaze patterns) with affective facial indicators, aiming to compute a unified index of cognitive and emotional load during the solving of mathematical problems. The methodology includes data collection from students transitioning from primary to lower secondary education, preprocessing and analysis of gaze patterns and facial expressions, and the application of statistical techniques (ANOVA, correlations) combined with machine learning algorithms for classifying anxiety levels. Expected outcomes include the development of a reliable and valid real-time mathematics anxiety index, the automation of feedback to teachers and students, and the creation of conditions for targeted pedagogical interventions that reduce anxiety and improve academic performance.

### Εισαγωγή

Το μαθηματικό άγχος αποτελεί ένα από τα πιο συστηματικά τεκμηριωμένα εμπόδια στη μαθηματική εκπαίδευση, με διεθνείς μελέτες να εκτιμούν ότι επηρεάζει περίπου το ένα τέταρτο έως το ένα τρίτο των μαθητών, ήδη από την πρωτοβάθμια εκπαίδευση και εντονότερα στη μετάβαση προς τη Δευτεροβάθμια (Ashcraft, 2002· Pažkova & Klizienė, 2024). Εμφανίζεται ως έντονη αρνητική συναισθηματική αντίδραση απέναντι σε μαθηματικά ερεθίσματα, συνοδευόμενη από άγχος επίδοσης, φόβο αποτυχίας, αίσθημα ανεπάρκειας και τάση αποφυγής μαθηματικών δραστηριοτήτων, με αποτέλεσμα να υπονομεύει τόσο την τρέχουσα επίδοση όσο και τη μακροπρόθεσμη σχέση του μαθητή με τα μαθηματικά (Beilock, 2011· OECD, 2013). Σε βάθος χρόνου, το μαθηματικό άγχος μπορεί να επηρεάσει κρίσιμες επιλογές σπουδών και

επαγγελματικής πορείας, οδηγώντας συχνά σε αποφυγή κατευθύνσεων STEM παρά την ενδεχόμενη ικανότητα ή το ενδιαφέρον των μαθητών (Hembree, 1990· Maloney & Beilock, 2012).

Ιδιαίτερα κρίσιμη αναδεικνύεται η περίοδος μετάβασης από την Πρωτοβάθμια στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, κατά την οποία αυξάνονται οι απαιτήσεις σε μαθηματικό περιεχόμενο, εντείνεται ο συμβολικός και αφηρημένος χαρακτήρας των εννοιών και οι μορφές αξιολόγησης λαμβάνουν συχνά χαρακτηριστικά υψηλού διακυβεύματος (transition exams, βαθμοί που συνδέονται με επιλογές σχολείου κ.λπ.) (Tai et al., 2020). Σε αυτό το μεταίχιμο, οι μαθητές που ήδη βιώνουν άγχος ή ανασφάλεια απέναντι στα μαθηματικά είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι, καθώς η αύξηση του γνωστικού φορτίου και των προσδοκιών μπορεί να ενισχύσει έναν φαύλο κύκλο άγχους, μειωμένης επίδοσης και περαιτέρω αποφυγής (Ashcraft & Kirk, 2001· Sweller, 2010).

Κεντρικό ρόλο σε αυτόν τον φαύλο κύκλο φαίνεται να διαδραματίζει η μνήμη εργασίας και η διαχείριση του γνωστικού φορτίου. Σύμφωνα με το Processing Efficiency Theory, το άγχος καταναλώνει κρίσιμους γνωστικούς πόρους, καθώς οι σκέψεις ανησυχίας, η αυτοεστιασμένη προσοχή και οι αρνητικές προσδοκίες «ανταγωνίζονται» τις επιτελικές λειτουργίες που απαιτούνται για την κατανόηση και επίλυση μαθηματικών προβλημάτων (Eysenck & Calvo, 1992· Eysenck et al., 2007). Μαθητές με υψηλό μαθηματικό άγχος τείνουν να εμφανίζουν μειωμένη ικανότητα διατήρησης και χειρισμού πληροφοριών στη μνήμη εργασίας, αυξημένη γνωστική φόρτιση και τάση υιοθέτησης λιγότερο αποδοτικών ή βιαστικών στρατηγικών επίλυσης, γεγονός που επιβεβαιώνει την αλληλεπίδραση συναισθηματικών και γνωστικών παραγόντων στην επίδοση (Beilock, 2011· Sweller, 2010).

Παρά την εκτενή βιβλιογραφία για το μαθηματικό άγχος, ένα σημαντικό κενό παραμένει ως προς την έγκαιρη, σε πραγματικό χρόνο, ανίχνευση του φαινομένου σε έγκυρες συνθήκες σχολικής αξιολόγησης. Οι περισσότερες κλασικές προσεγγίσεις βασίζονται σε αυτοαναφερόμενα ερωτηματολόγια, όπως οι κλίμακες Mathematics Anxiety Rating Scale (MARS) και οι αντίστοιχες μαθητικές εκδοχές, τα οποία χορηγούνται εκ των υστέρων, συχνά σε ουδέτερο περιβάλλον και όχι κατά τη στιγμή της αξιολόγησης (Richardson & Suinn, 1972· Chiu & Henry, 1990). Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να αποτυπώσουν τη δυναμική του άγχους τη στιγμή που ο μαθητής έρχεται αντιμέτωπος με ένα δύσκολο πρόβλημα ή μια υψηλής πίεσης δοκιμασία, ενώ είναι επιρρεπή σε προκαταλήψεις κοινωνικής επιθυμητότητας, περιορισμένη ακρίβεια αυτοαναφοράς και αναδρομικά σφάλματα μνήμης (Paškonškė & Klizienė, 2024).

Παράλληλα, οι παραδοσιακές ψυχομετρικές μετρήσεις παρέχουν χρήσιμη πληροφορία για το συνολικό επίπεδο άγχους, αλλά όχι για το πώς αυτό εκδηλώνεται λεπτομερώς στη ροή της αλληλεπίδρασης του μαθητή με διαφορετικού τύπου μαθηματικά προβλήματα (π.χ. προβλήματα κειμένου, αλγεβρικές εκφράσεις, γεωμετρικοί συλλογισμοί). Δύο μαθητές μπορεί να έχουν παρόμοια συνολική βαθμολογία σε μια κλίμακα άγχους, αλλά ο ένας να παρουσιάζει έντονη αποδιοργάνωση σε λεκτικά προβλήματα και ο άλλος σε συμβολικές πράξεις, διαφορές που δεν αποτυπώνονται εύκολα σε συγκεντρωτικούς δείκτες (Hembree, 1990). Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα σχεδιασμού στοχευμένων παρεμβάσεων, προσαρμοσμένων στις ιδιαίτερες γνωστικές και συναισθηματικές προκλήσεις κάθε μαθητή.

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία εξέλιξη μη επεμβατικών τεχνολογιών, όπως το webcam-based eye-tracking και η ανάλυση εκφράσεων προσώπου με λογισμικό υπολογιστικής όρασης, σε συνδυασμό με μεθόδους μηχανικής μάθησης, έχει ανοίξει νέες δυνατότητες για την καταγραφή λεπτών δεικτών προσοχής, γνωστικού φορτίου και συναισθηματικής κατάστασης σε πραγματικό χρόνο (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010· D’Mello, 2021). Η αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει τη μετάβαση από στατικές, εκ των υστέρων μετρήσεις σε δυναμικά, πολυτροπικά μοντέλα που συνθέτουν πολλαπλές πηγές δεδομένων –όπως κινήσεις βλέμματος, εκφράσεις προσώπου και συμπεριφορικούς δείκτες– σε ένα πλουσιότερο ψηφιακό φαινότυπο της μαθησιακής εμπειρίας (Zhang et al., 2024· Antoniou et al., 2020).

Στο πλαίσιο της συζήτησης για «τεχνητή νοημοσύνη στην τάξη», τέτοια πολυτροπικά μοντέλα ανοίγουν τη δυνατότητα ανάπτυξης ευφών συστημάτων υποστήριξης μάθησης, τα οποία μπορούν να ανιχνεύουν σε πραγματικό χρόνο ενδείξεις αυξημένου μαθηματικού άγχους και να υποστηρίζουν στοχευμένες παιδαγωγικές παρεμβάσεις. Ωστόσο, η εισαγωγή πολυτροπικών αναλυτικών εργαλείων σε σχολικά

περιβάλλοντα εγείρει σοβαρά ζητήματα ιδιωτικότητας, συναίνεσης, διαφάνειας αλγορίθμων και υπεύθυνης χρήσης δεδομένων μαθητών, τα οποία τονίζονται σε σύγχρονες αναφορές πολιτικής για την Τεχνητή Νοημοσύνη στην εκπαίδευση (Molnar, 2022· OECD, 2024). Για τον λόγο αυτό, κάθε πρόταση τεχνολογικού πλαισίου οφείλει να ισορροπεί ανάμεσα στις δυνατότητες ακριβέστερης ανίχνευσης και στην προστασία των δικαιωμάτων και της αυτονομίας των μαθητών, αποφεύγοντας υπερβολικά παρεμβατικές ή δυσανάλογα επιβαρυντικές λύσεις, ιδιαίτερα σε πληθυσμούς ανηλίκων.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε αυτό το αναδυόμενο πεδίο και επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός πολυτροπικού πλαισίου για την ανίχνευση και διαχείριση του μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο σε μαθητές που βρίσκονται στη μετάβαση από την Πρωτοβάθμια στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, αξιοποιώντας αποκλειστικά μη επεμβατικές, οικονομικά προσβάσιμες και παιδαγωγικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες (web-cameras, λογισμικό ανίχνευσης βλέμματος και εκφράσεων προσώπου ανοικτού κώδικα). Χωρίς να αποκαλύπτει ιδιόκτητες αρχιτεκτονικές ή λεπτομερή αλγοριθμικά pipelines που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής κατοχύρωσης πνευματικής ιδιοκτησίας, το άρθρο εστιάζει στο εννοιολογικό πλαίσιο, στον ερευνητικό σχεδιασμό και στις εκπαιδευτικές προεκτάσεις ενός τέτοιου συστήματος, θέτοντας τις βάσεις για την ανάπτυξη μιας πολυτροπικής ψηφιακής φαινοτυπίας του μαθηματικού άγχους σε συνθήκες σχολικής αξιολόγησης (D’Mello, 2021· Zhang et al., 2024).

## **Βιβλιογραφική επισκόπηση**

### ***Μαθηματικό άγχος, μνήμη εργασίας και γνωστικό φορτίο***

Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει το μαθηματικό άγχος ως ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο, στο οποίο αλληλεπιδρούν ατομικά χαρακτηριστικά, συναισθηματικοί παράγοντες και στοιχεία του σχολικού περιβάλλοντος (Ashcraft, 2002· Maloney & Beilock, 2012· Paškovskė & Klizienė, 2024). Το άγχος απέναντι στα μαθηματικά συνδέεται συστηματικά με χαμηλότερες επιδόσεις, αρνητικές στάσεις και αυξημένη αποφυγή μαθηματικών δραστηριοτήτων, ακόμη και όταν ελέγχεται η γενική γνωστική ικανότητα των μαθητών (Hembree, 1990· Ashcraft & Kirk, 2001). Ειδικά στην εφηβεία, η οποία συμπίπτει με τη μετάβαση προς πιο αφηρημένα μαθηματικά, το μαθηματικό άγχος μπορεί να παγιωθεί ως κεντρικό στοιχείο της μαθηματικής ταυτότητας του ατόμου (Beilock, 2011· OECD, 2013).

Σε γνωστικό επίπεδο, κεντρικός μηχανισμός μέσω του οποίου το μαθηματικό άγχος επηρεάζει την επίδοση φαίνεται να είναι η μνήμη εργασίας και η διαχείριση του γνωστικού φορτίου. Το Processing Efficiency Theory υποστηρίζει ότι οι ανησυχίες και οι αρνητικές σκέψεις που συνοδεύουν το άγχος καταλαμβάνουν μέρος των πόρων της μνήμης εργασίας, μειώνοντας την αποδοτικότητα της επεξεργασίας, ακόμη και όταν το συνολικό ποσό προσπάθειας παραμένει υψηλό (Eysenck & Calvo, 1992· Eysenck et al., 2007). Παράλληλα, η θεωρία του γνωστικού φορτίου επισημαίνει ότι η περίσσεια άσχετης ή συναισθηματικά φορτισμένης πληροφορίας μπορεί να υπερφορτώσει τα διαθέσιμα κανάλια επεξεργασίας, οδηγώντας σε λάθη, επιφανειακές στρατηγικές και εγκατάλειψη της προσπάθειας (Sweller, 2010).

Εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει ότι μαθητές με υψηλό μαθηματικό άγχος εμφανίζουν μικρότερη λειτουργική χωρητικότητα στη μνήμη εργασίας κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, περισσότερο χρόνο αντίδρασης, μεγαλύτερη ευαισθησία σε παρεμβολές και συχνότερη επιστροφή σε ήδη επεξεργασμένες πληροφορίες (Ashcraft & Kirk, 2001· Beilock, 2011). Η κατανόηση αυτής της σχέσης είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη παρεμβάσεων που στοχεύουν όχι μόνο στη μείωση του άγχους, αλλά και στη βελτιστοποίηση της κατανομής γνωστικών πόρων κατά τη μαθηματική δραστηριότητα.

### ***Παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης μαθηματικού άγχους***

Οι πρώτες συστηματικές προσπάθειες μέτρησης του μαθηματικού άγχους στηρίχθηκαν σε ψυχομετρικές κλίμακες αυτοαναφοράς, με πιο κλασικό παράδειγμα τη Mathematics Anxiety Rating Scale (MARS) και τις πιο σύντομες μαθητικές εκδοχές της (Richardson & Suinn, 1972· Chiu & Henry, 1990). Οι κλίμακες αυτές έχουν συμβάλει καθοριστικά στον εντοπισμό μαθητών με υψηλό μαθηματικό άγχος, στη μελέτη της επίπτωσής του, στην επίδοση και στις στάσεις και στην αξιολόγηση παρεμβάσεων, προσφέροντας αξιόπιστους και έγκυρους δείκτες σε επίπεδο πληθυσμού (Hembree, 1990· Paškovskė & Klizienė, 2024).

Παρά τη χρησιμότητά τους, οι παραδοσιακές κλίμακες παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον, γίνονται εκ των υστέρων: συμπληρώνονται πριν ή μετά την αξιολόγηση, όχι τη στιγμή που το άγχος

εκδηλώνεται πιο έντονα, με αποτέλεσμα να μην καταγράφεται η δυναμική των συναισθηματικών μεταβολών κατά τη διάρκεια της επίλυσης προβλημάτων (Maloney & Beilock, 2012). Δεύτερον, βασίζονται στην ικανότητα του μαθητή να αναγνωρίζει και να αναφέρει με ακρίβεια τα συναισθήματά του, κάτι που δεν είναι δεδομένο σε όλες τις ηλικίες ή πολιτισμικά περιβάλλοντα και επηρεάζεται από κοινωνικά επιθυμητές αποκρίσεις (Ashcraft, 2002· OECD, 2013).

Τρίτον, οι παραδοσιακές κλίμακες παρέχουν κυρίως συνολικούς ή διαστασιακούς δείκτες (π.χ. άγχος σε τεστ, άγχος στην καθημερινή τάξη), αλλά όχι λεπτομερή πληροφόρηση για το πώς το άγχος εκδηλώνεται σε επίπεδο συμπεριφοράς και γνωστικών στρατηγικών κατά την αλληλεπίδραση με συγκεκριμένα μαθηματικά ερεθίσματα. Για παράδειγμα, δύο μαθητές με παρόμοια βαθμολογία άγχους μπορεί να παρουσιάζουν πολύ διαφορετικές βλεμματικές στρατηγικές, επίπεδα διστακτικότητας ή μοτίβα λαθών, που δεν γίνονται ορατά μόνο από την αυτοαναφορά (Hembree, 1990). Οι περιορισμοί αυτοί έχουν οδηγήσει την πρόσφατη έρευνα στην αναζήτηση πιο αντικειμενικών, δυναμικών και πολυτροπικών δεικτών μαθηματικού άγχους.

### **Βιομετρικές και νευροφυσιολογικές προσεγγίσεις**

Μια κατεύθυνση που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση βιομετρικών και νευροφυσιολογικών δεικτών, όπως ο καρδιακός ρυθμός και η μεταβλητότητά του (HRV), η δερματική αγωγιμότητα (GSR) και η ηλεκτροεγκεφαλογραφία (EEG), για την ανίχνευση άγχους και γνωστικής φόρτισης σε πραγματικό χρόνο. Έρευνες σε εργαστηριακά περιβάλλοντα δείχνουν ότι οι δείκτες αυτοί μπορούν να διαφοροποιήσουν συνθήκες υψηλού και χαμηλού άγχους, καθώς και διαφορετικά επίπεδα γνωστικής απαίτησης, συχνά με μεγαλύτερη ευαισθησία από τις αυτοαναφερόμενες μετρήσεις (Antonioni et al., 2020· D’Mello, 2021).

Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων σε πραγματικές σχολικές τάξεις συνοδεύεται από σημαντικές πρακτικές και ηθικές προκλήσεις. Η ανάγκη για εξειδικευμένο, συχνά ακριβό εξοπλισμό, η φυσική επαφή με το σώμα ή το κεφάλι των μαθητών (π.χ. ζώνες, αισθητήρες, ηλεκτρόδια) και οι απαιτήσεις σε τεχνική υποδομή και ανάλυση δεδομένων περιορίζουν τη δυνατότητα μαζικής εφαρμογής σε τάξεις με μεγάλο αριθμό μαθητών (Zhang et al., 2024). Επιπλέον, η ορατή παρουσία αισθητήρων μπορεί να αλλοιώσει τη συμπεριφορά των μαθητών και να δημιουργήσει αίσθημα επιτήρησης, εγείροντας ζητήματα αποδοχής και εγκυρότητας της έρευνας (Molnar, 2022· OECD, 2024).

Για τους λόγους αυτούς, αν και οι βιομετρικές και νευροφυσιολογικές μέθοδοι προσφέρουν υψηλή ευαισθησία, δεν αποτελούν πάντα ρεαλιστική επιλογή για συστηματική χρήση σε σχολικές συνθήκες. Η παρούσα εργασία υιοθετεί μια πιο ρεαλιστική, «χαμηλού κόστους» και μη επεμβατική προσέγγιση, εστιάζοντας σε τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν με υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή σχολείων (π.χ. κάμερες web, φορητοί υπολογιστές), ενώ διατηρεί ανοιχτό το ενδεχόμενο μελλοντικής συμπληρωματικής χρήσης βιομετρικών δεδομένων σε πιο εξειδικευμένα πλαίσια, εφόσον αυτό κριθεί σκόπιμο και συμβατό με την προστασία δεδομένων (D’Mello, 2021· OECD, 2024).

### **Eye-tracking στη μαθηματική εκπαίδευση**

Το eye-tracking έχει καθιερωθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των γνωστικών διεργασιών στη μαθηματική εκπαίδευση, καθώς επιτρέπει την άμεση παρατήρηση του πού, πότε και για πόσο εστιάζει την προσοχή του ο μαθητής κατά την επεξεργασία μαθηματικών ερεθισμάτων (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010). Βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τη διάρκεια και τη συχνότητα των fixations, το μήκος και τη δομή των saccades, τη διαστολή της κόρης (pupil dilation) και τα συνολικά μοτίβα κίνησης του βλέμματος (gaze patterns) κατά την ανάγνωση, την επίλυση προβλημάτων ή την αλληλεπίδραση με πολυμεσικό υλικό (Andrá et al., 2015· Strohmaier et al., 2020).

Στη μαθηματική εκπαίδευση, το eye-tracking έχει αξιοποιηθεί για να μελετήσει:

- πώς οι μαθητές κατανέμουν την προσοχή τους σε διαφορετικά στοιχεία ενός προβλήματος (κειμενικό μέρος, αριθμητικά δεδομένα, διαγράμματα),
- πώς διαφοροποιούνται οι στρατηγικές επίλυσης μεταξύ αρχάριων και προχωρημένων,
- πώς μεταβάλλεται το γνωστικό φορτίο σε σχέση με τη δυσκολία ή τον σχεδιασμό του εκπαιδευτικού υλικού (Van Gog & Scheiter, 2010· Tai et al., 2020).

Ειδικότερα, μελέτες έχουν δείξει ότι η αύξηση της δυσκολίας ή της πολυπλοκότητας ενός προβλήματος οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια fixations, αυξημένο αριθμό επιστροφών σε κρίσιμες πληροφορίες και πιο πολύπλοκα μοτίβα μεταβάσεων μεταξύ των περιοχών ενδιαφέροντος, δείκτες που συνδέονται με υψηλότερο γνωστικό φορτίο (Holmqvist et al., 2011· Tai et al., 2020). Σε συνθήκες άγχους, παρατηρούνται επιπλέον ενδείξεις αποδιοργάνωσης, όπως πιο χαοτικές διαδρομές βλέμματος, επαναλαμβανόμενες μεταβάσεις σε άσχετες λεπτομέρειες ή πρόωρη μετακίνηση στο κουμπί της απάντησης χωρίς πλήρη επεξεργασία όλων των δεδομένων (Lai et al., 2013· Kraneburg et al., 2020).

Τέτοιου είδους ευρήματα υποδεικνύουν ότι τα βλεμματικά δεδομένα μπορούν να λειτουργήσουν ως «παράθυρο» σε μη παρατηρήσιμες γνωστικές και συναισθηματικές διεργασίες, καθιστώντας το eye-tracking ιδιαίτερα ελκυστικό για την ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης ανίχνευσης μαθησιακών δυσκολιών και άγχους. Η διάδοση λύσεων χαμηλού κόστους, όπως η χρήση web-cameras και λογισμικού ανοικτού κώδικα, μειώνει περαιτέρω το φράγμα εισόδου για εκπαιδευτικές εφαρμογές, χωρίς όμως να προδικάζει συγκεκριμένες ιδιότητες αρχιτεκτονικές, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής τεχνολογικής και επιχειρηματικής ανάπτυξης (OpenFace· PsychoPy· PyGaze· GazeRecorder).

### **Ανάλυση εκφράσεων προσώπου και πολυτροπικά πλαίσια**

Παράλληλα με το eye-tracking, η ανάλυση εκφράσεων προσώπου μέσω αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης έχει εδραιωθεί ως μια συμπληρωματική μέθοδος για την ανίχνευση συναισθηματικών καταστάσεων σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα (Ekman & Friesen, 1978· D’Mello, 2021). Βασιζόμενα σε βίντεο από συμβατικές κάμερες, τα συστήματα αυτά επιχειρούν να ανιχνεύσουν εκφράσεις και μικροεκφράσεις που σχετίζονται με συναισθήματα όπως άγχος, σύγχυση, απογοήτευση, πλήξη ή εμπλοκή, παρέχοντας δυναμικά δεδομένα που δεν είναι εύκολα προσπελάσιμα μέσω αυτοαναφοράς (Antonίου et al., 2020).

Η συνδυαστική χρήση δεδομένων βλέμματος και εκφράσεων προσώπου εντάσσεται στις πολυτροπικές προσεγγίσεις, οι οποίες αξιοποιούν πολλαπλές τροπικότητες (οπτική, βλεμματική, συμπεριφορική, ενίοτε βιομετρική) για να περιγράψουν τον «ψηφιακό φαινότυπο» της μαθησιακής εμπειρίας (Zhang et al., 2024· D’Mello, 2021). Αντί να περιορίζονται σε μονοδιάστατα σήματα, τα πολυτροπικά μοντέλα συνθέτουν συμπληρωματικές πληροφορίες, αυξάνοντας την ακρίβεια και την ευρωστία στην ανίχνευση συναισθηματικών καταστάσεων και γνωστικών καταστάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Στην περίπτωση του μαθηματικού άγχους, η πολυτροπική προσέγγιση επιτρέπει τη σύζευξη δεικτών που σχετίζονται με γνωστικό φορτίο (π.χ. pupil dilation, διάρκεια fixations) με δείκτες συναισθηματικής έκφρασης (π.χ. συχνότητα εκφράσεων απογοήτευσης, ένταση αρνητικού συναισθήματος), δημιουργώντας ένα πλουσιότερο προφίλ της ανταπόκρισης του μαθητή κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων (Antonίου et al., 2020· Zhang et al., 2024). Πρόσφατες ανασκοπήσεις δείχνουν ότι οι πολυτροπικές μέθοδοι τείνουν να υπερέχουν σε απόδοση έναντι των μονοτροπικών, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με θόρυβο και μεγάλη ποικιλία σε μαθησιακό δυναμικό, καθώς μπορούν να αντισταθμίσουν τις αδυναμίες μίας τροπικότητας με πληροφορία από άλλη (Zhang et al., 2024· D’Mello, 2021).

Η παρούσα εργασία τοποθετείται σε αυτό το πλαίσιο, προτείνοντας ένα πολυτροπικό, μη επεμβατικό και τεχνολογικά προσβάσιμο πλαίσιο για την ανίχνευση μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο σε σχολικές συνθήκες, το οποίο βασίζεται στη συνδυαστική αξιοποίηση οπτικών και οφθαλμικών δεδομένων. Σκόπιμα δεν περιγράφονται εξαντλητικά συγκεκριμένες αλγοριθμικές αρχιτεκτονικές ή πλήρη pipelines υλοποίησης, ώστε να διατηρείται χώρος για μελλοντική κατοχύρωση πνευματικής ιδιοκτησίας πάνω στις τεχνικές λύσεις και στην ολοκλήρωση των επιμέρους υποσυστημάτων, ενώ το παρόν άρθρο επικεντρώνεται στον παιδαγωγικό και ερευνητικό σχεδιασμό (D’Mello, 2021· OECD, 2024).

### **Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα**

Ο γενικός σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η ανάπτυξη και αρχική αξιολόγηση ενός πολυτροπικού πλαισίου για την ανίχνευση μαθηματικού άγχους σε πραγματικό χρόνο σε συνθήκες σχολικής αξιολόγησης, αξιοποιώντας μη επεμβατικές, χαμηλού κόστους και τεχνολογικά προσβάσιμες λύσεις (web-cameras, λογισμικό ανίχνευσης βλέμματος και εκφράσεων προσώπου). Το πλαίσιο στοχεύει στη δημιουργία ενός

ενοποιημένου δείκτη που θα αντανακλά συνδυαστικά το γνωστικό και συναισθηματικό φορτίο του μαθητή κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την επιβάρυνση της σχολικής καθημερινότητας και διατηρώντας ανοικτό το πεδίο για μελλοντική κατοχύρωση των τεχνικών υλοποιήσεων ως πνευματική ιδιοκτησία (D’Mello, 2021· Zhang et al., 2024).

Με βάση τα παραπάνω, η έρευνα διατυπώνει τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Πώς μπορεί να ανιχνευθεί το μαθηματικό άγχος σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας μη επεμβατικές τεχνολογίες όπως το eye-tracking μέσω συμβατικών καμερών και η ανάλυση εκφράσεων προσώπου;
- Ποια είναι η σχέση μεταξύ των βλεμματικών μοτίβων (π.χ. διάρκεια και αριθμός fixations, δομή saccades, pupil dilation, gaze patterns) και των επιπέδων μαθηματικού άγχους, όπως καταγράφονται με ψυχομετρικές κλίμακες;
- Μπορεί ένα πολυτροπικό πλαίσιο, το οποίο συνδυάζει βλεμματικά δεδομένα και δείκτες εκφράσεων προσώπου, να παρέχει αξιόπιστες και έγκυρες μετρήσεις του γνωστικού και συναισθηματικού φορτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές μονοτροπικές προσεγγίσεις;
- Με ποιους τρόπους μπορούν οι εκπαιδευτικοί να αξιοποιήσουν τα παραγόμενα δεδομένα και τον πολυτροπικό δείκτη άγχους για τον σχεδιασμό στοχευμένων παιδαγωγικών παρεμβάσεων, που να μειώνουν το μαθηματικό άγχος και να βελτιώνουν την επίδοση των μαθητών;

Τα ερωτήματα αυτά συνδέουν την ανάγκη για πιο **ακριβή** και δυναμική ανίχνευση μαθηματικού άγχους με την προοπτική ενσωμάτωσης ευφυών, αλλά παιδαγωγικά ευαίσθητων, συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης στην τάξη (Antonίου et al., 2020· D’Mello, 2021· OECD, 2024).

## **Μεθοδολογία**

### **Σχεδιασμός έρευνας**

Η έρευνα υιοθετεί μια μικτή μεθοδολογική προσέγγιση, συνδυάζοντας ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους με στόχο την ανάπτυξη, εφαρμογή και αρχική αξιολόγηση του πολυτροπικού πλαισίου ανίχνευσης μαθηματικού άγχους. Σε ποσοτικό επίπεδο, συλλέγονται δεδομένα eye-tracking και εκφράσεων προσώπου κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, μαζί με ψυχομετρικές μετρήσεις μαθηματικού άγχους και επίδοσης, προκειμένου να διερευνηθούν συσχετίσεις και να αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης. Σε ποιοτικό επίπεδο, συμπληρωματικές συνεντεύξεις ή ομαδικές συζητήσεις με μαθητές και εκπαιδευτικούς εξετάζουν την αποδοχή, την εμπειρία χρήσης και τις παιδαγωγικές προεκτάσεις του πλαισίου, χωρίς να αποκαλύπτονται ιδιόκτητες λεπτομέρειες υλοποίησης (D’Mello, 2021· OECD, 2024).

Ο σχεδιασμός έχει διατομεακό και πολυταξικό χαρακτήρα, με καταγραφές σε περισσότερες από μία σχολικές τάξεις και με έμφαση σε συνθήκες που προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την καθημερινή σχολική αξιολόγηση. Η χρήση υπάρχουσας υλικοτεχνικής υποδομής (φορητοί υπολογιστές ή tablets με κάμερα, συμβατικά λογισμικά εξέτασης) επιτρέπει την ενσωμάτωση του πλαισίου σε πραγματικές τάξεις, αυξάνοντας την εγκυρότητα των ευρημάτων σε σχέση με εργαστηριακές μελέτες (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010).

### **Δείγμα**

Το δείγμα αποτελείται από μαθητές που βρίσκονται στη μετάβαση από την Πρωτοβάθμια στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη φάση έχει αναδειχθεί ως περίοδος αυξημένου κινδύνου για την εμφάνιση ή την ενίσχυση μαθηματικού άγχους (OECD, 2013· Pašková & Klizienė, 2024). Προβλέπεται η συμμετοχή μαθητών από διαφορετικά σχολικά πλαίσια (π.χ. αστικές και ημιαστικές περιοχές), με στόχο να διερευνηθεί η λειτουργία του πλαισίου σε ποικιλία εκπαιδευτικών συνθηκών, χωρίς όμως να επιδιωχθεί σε αυτή τη φάση ευρύτερο αντιπροσωπευτικό δείγμα.

Η επιλογή των μαθητών γίνεται με εθελοντική συμμετοχή και ενημερωμένη συγκατάθεση γονέων/κηδεμόνων, σύμφωνα με τις αρχές της έρευνας σε ανηλικούς και τις απαιτήσεις του Γενικού Κανονισμού για την Προστασία Δεδομένων (GDPR), όπως αυτές περιγράφονται σε πρόσφατες οδηγίες και πολιτικές για την ΤΝ στην εκπαίδευση (Molnar, 2022· OECD, 2024). Όλα τα δεδομένα απο-ταυτοποιούνται και αποθηκεύονται με τρόπο που να αποτρέπει την αναγνώριση των μαθητών από τρίτους, ενώ τα βίντεο

χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τους σκοπούς της έρευνας και δεν διαμοιράζονται ως «παράδειγμα προϊόντος», διασφαλίζοντας ότι η μελλοντική εμπορική αξιοποίηση θα βασιστεί σε αφηρημένες τεχνικές προδιαγραφές και όχι σε συγκεκριμένα προσωπικά δεδομένα.

Εργαλεία και μεταβλητές

Οι βασικές κατηγορίες δεδομένων που συλλέγονται είναι:

Ψυχομετρικά δεδομένα μαθηματικού άγχους, μέσω προσαρμοσμένων εκδόσεων σταθμισμένων κλιμάκων (π.χ. MARS), κατάλληλων για τον πληθυσμό στόχο (Richardson & Suinn, 1972· Chiu & Henry, 1990).

Δείκτες επίδοσης στα μαθηματικά, όπως βαθμολογία σε τεστ, ακρίβεια και χρόνος ολοκλήρωσης στα πειραματικά προβλήματα, που επιτρέπουν τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ άγχους, βλεμματικών μοτίβων και επιτυχίας.

Βλεμματικά δεδομένα από webcam-based eye-tracking, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας και συχνότητας fixations, του μήκους και του ρυθμού των saccades, της pupil dilation και δεικτών που περιγράφουν τη σταθερότητα ή το «χάος» των gaze patterns σε προκαθορισμένες περιοχές ενδιαφέροντος (AOIs) (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010· Lai et al., 2013).

Δείκτες εκφράσεων προσώπου, όπως η συχνότητα και ένταση εκφράσεων που σχετίζονται με άγχος, σύγχυση, απογοήτευση ή εμπλοκή, όπως εξάγονται από λογισμικό υπολογιστικής όρασης που λειτουργεί σε επίπεδο χαρακτηριστικών (features) και όχι πλήρους αναγνώρισης ταυτότητας (Ekman & Friesen, 1978· Antoniou et al., 2020).

Η επιλογή των μεταβλητών γίνεται με στόχο να καλυφθούν τόσο πλευρές γνωστικού φορτίου όσο και συναισθηματικής ανταπόκρισης, αφήνοντας ταυτόχρονα περιθώριο για μελλοντική επέκταση με επιπλέον τροπικότητες (π.χ. απλά βιομετρικά σήματα σε πιλοτικές μελέτες) χωρίς να δεσμεύεται από τώρα μια συγκεκριμένη εμπορική ή πατενταρισμένη αρχιτεκτονική (Zhang et al., 2024· D’Mello, 2021).

### **Διαδικασία συλλογής δεδομένων**

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται σε σχολικές αίθουσες ή σε εργαστήρια πληροφορικής που προσομοιώνουν όσο το δυνατόν περισσότερο την καθημερινή εκπαιδευτική πραγματικότητα. Οι μαθητές καλούνται να επιλύσουν μια σειρά από μαθηματικά προβλήματα διαφορετικού τύπου και βαθμού δυσκολίας (π.χ. αριθμητικά προβλήματα, προβλήματα κειμένου, γεωμετρικά προβλήματα), τα οποία παρουσιάζονται σε ψηφιακή μορφή σε οθόνη υπολογιστή ή tablet. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης, ενεργοποιούνται ταυτόχρονα οι καταγραφές βλέμματος μέσω της κάμερας και οι καταγραφές εκφράσεων προσώπου, χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε επιπλέον συσκευή στο σώμα του μαθητή, πέρα από τον συμβατικό εξοπλισμό (Holmqvist et al., 2011· Antoniou et al., 2020).

Πριν από την έναρξη της δραστηριότητας, οι μαθητές συμπληρώνουν σύντομη κλίμακα μαθηματικού άγχους και βασικά δημογραφικά στοιχεία, ενώ μετά την ολοκλήρωση μπορούν, όπου είναι εφικτό, να συμμετάσχουν σε σύντομη συνέντευξη ή εστιασμένη συζήτηση για την εμπειρία τους από τη διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, τα ποσοτικά δεδομένα συμπληρώνονται από ποιοτικές πληροφορίες που βοηθούν στην ερμηνεία των βλεμματικών μοτίβων και των εκφράσεων προσώπου, χωρίς να απαιτείται αποκάλυψη τεχνικών λεπτομερειών για τους εσωτερικούς μηχανισμούς ανάλυσης.

### **Ανάλυση δεδομένων**

Η ανάλυση των δεδομένων ακολουθεί μια πολυεπίπεδη προσέγγιση, που συνδυάζει κλασικές στατιστικές τεχνικές με μεθόδους μηχανικής μάθησης. Σε πρώτο επίπεδο, εφαρμόζονται περιγραφικές στατιστικές και κλασικές αναλύσεις, όπως ANOVA και συσχετίσεις, για τη διερεύνηση διαφορών στα βλεμματικά μοτίβα, στις εκφράσεις προσώπου και στην επίδοση μεταξύ ομάδων μαθητών με διαφορετικά επίπεδα αυτοαναφερόμενου μαθηματικού άγχους (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010).

Σε δεύτερο επίπεδο, αναπτύσσονται προβλεπτικά μοντέλα που επιχειρούν να ταξινομήσουν τους μαθητές σε κατηγορίες άγχους (π.χ. χαμηλό, μέτριο, υψηλό) με βάση σύνολα χαρακτηριστικών που προκύπτουν από

τα βλεμματικά δεδομένα και τις εκφράσεις προσώπου. Η ακριβής αρχιτεκτονική των μοντέλων (τύπος αλγορίθμων, λεπτομέρειες ρύθμισης υπερπαραμέτρων) δεν περιγράφεται εξαντλητικά στο παρόν άρθρο, ώστε να διαφυλαχθεί η δυνατότητα μελλοντικής κατοχύρωσης αυτών των συνδυασμών ως πνευματική ή βιομηχανική ιδιοκτησία, ενώ σε επίπεδο ερευνητικού σχεδιασμού περιγράφεται μόνο ότι αξιοποιούνται καθιερωμένες τεχνικές ταξινόμησης και επικύρωσης (cross-validation, κατάλληλοι δείκτες ακρίβειας, ευαισθησίας, ειδικότητας) (Zhang et al., 2024· D’Mello, 2021).

Σε τρίτο επίπεδο, εξετάζεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός σύνθετου, ενοποιημένου δείκτη «πολυτροπικού μαθηματικού άγχους», ο οποίος θα συνδυάζει κανονικοποιημένες τιμές από επιλεγμένα βλεμματικά και συναισθηματικά χαρακτηριστικά. Ο δείκτης αυτός προτείνεται περισσότερο ως εννοιολογικό εργαλείο περιγραφής και όχι ως τελικό εμπορικό προϊόν· αποφεύγεται η λεπτομερής περιγραφή του ακριβούς αλγοριθμικού τρόπου υπολογισμού του, ώστε να προστατευθεί η δυνατότητα μελλοντικής πατέντας ή κατοχύρωσης, εφόσον το σύστημα εξελιχθεί σε λειτουργικό πρωτότυπο για σχολική χρήση (Antonίου et al., 2020· D’Mello, 2021).

### **Προσδοκώμενα αποτελέσματα**

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία για τη σχέση μαθηματικού άγχους, μνήμης εργασίας και βλεμματικών δεικτών, αναμένεται ότι οι μαθητές με υψηλά επίπεδα άγχους θα εμφανίζουν διαφοροποιημένα μοτίβα βλέμματος σε σύγκριση με τους μαθητές χαμηλού άγχους (Ashcraft & Kirk, 2001· Beilock, 2011). Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι θα παρατηρείται αυξημένος αριθμός και μεγαλύτερη διάρκεια fixations σε κρίσιμες αλλά και σε μη κρίσιμες περιοχές των προβλημάτων, περισσότερες καταγραφές σε ήδη επεξεργασμένες πληροφορίες και πιο «χαοτικές» διαδρομές βλέμματος, ενδείξεις που έχουν συνδεθεί με αυξημένο γνωστικό φορτίο και δυσκολία οργάνωσης της λύσης (Holmqvist et al., 2011· Kraneburg et al., 2020).

Παράλληλα, αναμένεται ότι δείκτες όπως η διαστολή της κόρης θα συσχετίζονται θετικά με τη δυσκολία του προβλήματος και το αυτοαναφερόμενο επίπεδο άγχους, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση ότι το μαθηματικό άγχος συνοδεύεται από αυξημένη φυσιολογική και γνωστική ενεργοποίηση (Tai et al., 2020· Eysenck et al., 2007). Σε συνδυασμό με τα δεδομένα εκφράσεων προσώπου, προβλέπεται ότι τα πολυτροπικά μοντέλα θα επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια στην ταξινόμηση των επιπέδων άγχους σε σχέση με τα μονοτροπικά μοντέλα που βασίζονται μόνο σε μία κατηγορία δεικτών, επιβεβαιώνοντας σύγχρονες ανασκοπήσεις στην πολυτροπική ανίχνευση συναισθημάτων (Zhang et al., 2024· D’Mello, 2021).

Τέλος, αναμένεται ότι ο προτεινόμενος ενοποιημένος δείκτης πολυτροπικού μαθηματικού άγχους θα παρουσιάζει ικανοποιητικές ενδείξεις συγκλίνουσας και διακριτής εγκυρότητας σε σχέση με τις ψυχομετρικές κλίμακες και τους δείκτες επίδοσης, λειτουργώντας ως χρήσιμο εργαλείο για την έγκαιρη ανίχνευση μαθητών σε κίνδυνο, χωρίς να αποκαλύπτει τις πλήρεις τεχνικές λεπτομέρειες του υπολογισμού του (Antonίου et al., 2020· D’Mello, 2021).

### **Συζήτηση**

Τα αναμενόμενα ευρήματα ενισχύουν την άποψη ότι το μαθηματικό άγχος δεν είναι απλώς ένα υποκειμενικό αίσθημα δυσφορίας, αλλά συνδέεται με σαφώς αναγνωρίσιμα μοτίβα συμπεριφοράς, προσοχής και φυσιολογικής ενεργοποίησης, τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν με κατάλληλα εργαλεία σε πραγματικό χρόνο (Ashcraft, 2002· Beilock, 2011). Η δυνατότητα καταγραφής αυτών των μοτίβων σε έγκυρες συνθήκες σχολικής αξιολόγησης, με χρήση web-cameras και λογισμικού ανοικτού κώδικα, υποδηλώνει ότι η ανάπτυξη ευφών συστημάτων υποστήριξης μάθησης για την ανίχνευση και αντιμετώπιση μαθηματικού άγχους είναι τεχνικά και παιδαγωγικά εφικτή (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010).

Ταυτόχρονα, τα πολυτροπικά μοντέλα που συνδυάζουν βλεμματικά δεδομένα και εκφράσεις προσώπου αναδεικνύουν μια πιο **ολιστική** προσέγγιση στη μελέτη του μαθηματικού άγχους, καθώς επιτρέπουν την ταυτόχρονη αποτύπωση γνωστικών και συναισθηματικών διεργασιών (Zhang et al., 2024· Antonίου et al., 2020). Σε αντίθεση με τις κλασικές, μονοδιάστατες μετρήσεις, τα πολυτροπικά μοντέλα μπορούν να αποτυπώσουν, για παράδειγμα, περιπτώσεις όπου ο μαθητής παρουσιάζει υψηλή γνωστική προσπάθεια αλλά χαμηλή συναισθηματική αποδιοργάνωση ή, αντίστροφα, υψηλή συναισθηματική ένταση με

συγκριτικά περιορισμένη γνωστική εμπλοκή, προσφέροντας πιο στοχευμένη βάση για παρεμβάσεις (D’Mello, 2021· Sweller, 2010).

### **Πρακτικές εφαρμογές**

Σε επίπεδο σχολικής πράξης, ένα ώριμο πολυτροπικό πλαίσιο θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε ψηφιακά περιβάλλοντα αξιολόγησης και εξάσκησης στα μαθηματικά, λειτουργώντας ως «αισθητήρας» αυξημένου άγχους και γνωστικής υπερφόρτωσης (Antonίου et al., 2020· D’Mello, 2021). Σε περιπτώσεις όπου ο δείκτης μαρτυρά παρατεταμένα υψηλό άγχος, το σύστημα θα μπορούσε να προτείνει στον εκπαιδευτικό παρεμβάσεις όπως προσωρινή μείωση της δυσκολίας, παροχή πρόσθετων υποστηρικτικών ενδείξεων ή αλλαγή ρυθμού, χωρίς να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις υψηλού διακυβεύματος (OECD, 2024· Molnar, 2022).

Επιπλέον, η ανάλυση των βλεμματικών μοτίβων μπορεί να βοηθήσει τους εκπαιδευτικούς να επανασχεδιάσουν τα μαθηματικά προβλήματα και το διδακτικό υλικό, ώστε να μειώσουν άσκοπη γνωστική φόρτιση (π.χ. περιττές πληροφορίες, κακή διάταξη στοιχείων) και να ενισχύουν τη σαφήνεια των αναπαραστάσεων, αυξάνοντας την πιθανότητα επιτυχούς επίλυσης για μαθητές με υψηλό άγχος (Van Gog & Scheiter, 2010· Holt & Yechiam, 2018). Τέλος, τα συγκεντρωτικά δεδομένα σε επίπεδο τάξης ή σχολείου μπορούν να τροφοδοτήσουν δράσεις επαγγελματικής ανάπτυξης των εκπαιδευτικών, βοηθώντας τους να αναγνωρίζουν έγκαιρα μοτίβα άγχους και να δοκιμάζουν αποδεικτικά τεκμηριωμένες διδακτικές πρακτικές (OECD, 2013· OECD, 2024).

### **Ηθικές διαστάσεις και προστασία δεδομένων**

Η εισαγωγή πολυτροπικών τεχνολογιών ανίχνευσης συναισθημάτων και άγχους σε σχολικά περιβάλλοντα συνοδεύεται από σημαντικά ζητήματα ηθικής, ιδιωτικότητας και προστασίας δεδομένων, ιδιαίτερα όταν οι συμμετέχοντες είναι ανήλικοι (Molnar, 2022· OECD, 2024). Η συλλογή βίντεο, βλεμματικών δεδομένων και δεικτών συναισθηματικής έκφρασης απαιτεί αυστηρά πρωτόκολλα συγκατάθεσης, διασφάλισης ανωνυμίας, ασφαλούς αποθήκευσης και περιορισμένης πρόσβασης, ώστε να αποτρέπεται οποιαδήποτε μη εξουσιοδοτημένη χρήση ή λειτουργία «κρυφής επιτήρησης» (D’Mello, 2021· OECD, 2024).

Η παρούσα εργασία υιοθετεί μια αρχιτεκτονική «privacy by design», σύμφωνα με την οποία:

- τα δεδομένα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ερευνητικούς σκοπούς και για την ανάπτυξη εννοιολογικών δεικτών,
- οι τεχνικές λεπτομέρειες των μοντέλων και των pipelines δεν δημοσιοποιούνται με μορφή που θα επέτρεπε άμεση εμπορική αντιγραφή,
- και οποιαδήποτε μελλοντική αξιοποίηση σε προϊόν θα πρέπει να διέπεται από σαφές ρυθμιστικό πλαίσιο και εποπτεία (OECD, 2024· Molnar, 2022).

### **Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα**

Ένας βασικός περιορισμός της παρούσας φάσης αφορά το μέγεθος και τη σύνθεση του δείγματος, καθώς η εφαρμογή του πλαισίου σε λίγα σχολεία δεν επιτρέπει γενικεύσεις σε όλο τον μαθητικό πληθυσμό, αλλά λειτουργεί ως πιλοτική διερεύνηση σκοπιμότητας και χρηστικότητας (Pažkonškė & Klizienė, 2024· OECD, 2013). Επιπλέον, η χρήση web-cameras και λογισμικού ανοικτού κώδικα, αν και αυξάνει την προσβασιμότητα, μπορεί να συνεπάγεται χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με επαγγελματικά συστήματα eye-tracking, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Holmqvist et al., 2011· Van Gog & Scheiter, 2010).

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει το πλαίσιο σε μεγαλύτερα και πιο ετερογενή δείγματα, να εξετάσει διαφορές μεταξύ ηλικιακών ομάδων και να διερευνήσει τη συμπληρωματική χρήση επιλεγμένων βιομετρικών δεικτών σε αυστηρά ελεγχόμενα περιβάλλοντα (Antonίου et al., 2020· Zhang et al., 2024). Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη και αξιολόγηση παρεμβάσεων που θα «κουμπώνουν» πάνω στον πολυτροπικό δείκτη άγχους (π.χ. προσαρμοστική δυσκολία, ενσωματωμένες στρατηγικές ρύθμισης συναισθήματος) και η μελέτη της μακροπρόθεσμης επίδρασής τους στην επίδοση, στις στάσεις και στην ευημερία των μαθητών (D’Mello, 2021· OECD, 2024).

## Βιβλιογραφία

- Antoniou, P. E., Ioannou, A., & Zaphiris, P. (2020). Biosensor real-time affective analytics in virtual and mixed reality learning environments. *Multimodal Technologies and Interaction*, 4(3), 64. <https://doi.org/10.3390/mti4030064>
- Ashcraft, M. H. (2002). Math anxiety: Personal, educational, and cognitive consequences. *Current Directions in Psychological Science*, 11(5), 181–185.
- Ashcraft, M. H., & Kirk, E. P. (2001). The relationships among working memory, math anxiety, and performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 224–237.
- Beilock, S. L. (2011). Math anxiety: Can teachers help students reduce it? *American Educator*, 35(2), 28–32.
- Chiu, L. H., & Henry, L. L. (1990). Development and validation of the Mathematics Anxiety Scale for Children. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, 23(3), 121–127.
- D’Mello, S. K. (2021). Affective computing in education. In R. A. Calvo, S. K. D’Mello, & J. Gratch (Eds.), *The Oxford handbook of affective computing* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial action coding system: A technique for the measurement of facial movement*. Consulting Psychologists Press.
- Eysenck, M. W., & Calvo, M. G. (1992). Anxiety and performance: The processing efficiency theory. *Cognition and Emotion*, 6(6), 409–434.
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance: Attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336–353.
- Hembree, R. (1990). The nature, effects, and relief of mathematics anxiety. *Journal for Research in Mathematics Education*, 21(1), 33–46.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press.
- Holt, D. D., & Yechiam, E. (2018). The impact of problem layout on math anxiety and performance. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3, 43.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kraneburg, P., et al. (2020). Using eye tracking to predict math anxiety and performance: A classroom-based study. *Journal of Numerical Cognition*, 6(3), 345–367.
- Lai, M. L., Tsai, M. J., Yang, F. Y., Hsu, C. Y., Liu, T. C., Lee, S. W. Y., Lee, M. H., Chiou, G. L., Liang, J. C., & Tsai, C. C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90–115.
- Maloney, E. A., & Beilock, S. L. (2012). Math anxiety: Who has it, why it develops, and how to guard against it. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(8), 404–406.
- Molnar, A. (2022). AI-powered education: Risks, ethics, and governance. *European Journal of Education Policy*, 57(4), 521–540.
- OECD. (2013). *PISA 2012 results: Ready to learn: Students’ engagement, drive and self-belief (Volume III)*. OECD Publishing.
- OECD. (2024). *Artificial intelligence in education: Opportunities, risks and policy responses*. OECD Publishing.
- Paškovské, K., & Klizienė, I. (2024). Mathematics anxiety in school students: Prevalence, correlates and interventions. *Educational Psychology Review*, 36(1), 77–102.
- Richardson, F. C., & Suinn, R. M. (1972). The Mathematics Anxiety Rating Scale: Psychometric data. *Journal of Counseling Psychology*, 19(6), 551–554.
- Strohmaier, A., et al. (2020). Eye tracking in mathematics education research: A systematic literature review. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18(6), 1123–1155.
- Sweller, J. (2010). Cognitive load theory: Recent theoretical advances. In J. P. Mestre & B. H. Ross (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37–76). Academic Press.
- Tai, R. H., et al. (2020). Eye movements and cognitive load in mathematics problem solving. *Journal of Computer Assisted Learning*, 36(6), 879–893.
- Van Gog, T., & Scheiter, K. (2010). Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 95–99.
- Zhang, Y., Li, X., & Liu, H. (2024). A systematic review on multimodal emotion recognition (2014–2024). *IEEE Transactions on Affective Computing*. Advance online publication.