

## Η συμβολή της εγκεφαλικής πλευρίωσης στη διδασκαλία και μάθηση των μαθηματικών

*Παναγής Τσιγγούνης, Ευγένιος Αυγερινός*

### Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη συμβολή της εκπαιδευτικής νευροεπιστήμης στη διδασκαλία και μάθηση των μαθηματικών, με έμφαση στη λειτουργική εγκεφαλική πλευρίωση και στα βρεγματικά κυκλώματα που υποστηρίζουν την αριθμητική επεξεργασία. Παρουσιάζονται νευροεπιστημονικά δεδομένα που αφορούν τον ρόλο του βρεγματικού λοβού και ειδικότερα του οριζόντιου τμήματος της ενδοβρεγματικής αύλακας (HIPS), της αριστερής γωνιώδους έλικας (L-AG) και της υπερκείμενης περιοχής του οπίσθιου ανώτερου βρεγματικού λοβού (PSPL), σύμφωνα με το μοντέλο των τριών βρεγματικών κυκλωμάτων για την επεξεργασία αριθμών. Επίσης, αναλύεται η έννοια της εγκεφαλικής πλευρίωσης, οι μορφές και τα πλεονεκτήματά της, καθώς και η αναπτυξιακή και πλαστική της φύση κατά την παιδική και εφηβική ηλικία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σχέση μεταξύ του βαθμού λειτουργικής εξειδίκευσης των ημισφαιρίων και της μαθηματικής απόδοσης, όπως αυτή τεκμηριώνεται τόσο σε ανθρώπινες μελέτες όσο και σε συγκριτικά δεδομένα από μη ανθρώπινα είδη. Παρουσιάζονται, επίσης, ευρήματα από μελέτες με λειτουργικό διακρανιακό υπέρηχο Doppler (fTCD) σε ενήλικες, τα οποία αναδεικνύουν τη διαφοροποιημένη πλευρίωση ανάλογα με τον τύπο της αριθμητικής πράξης και το είδος της γνωστικής στρατηγικής που ενεργοποιείται. Τέλος, συζητούνται οι εκπαιδευτικές και μεθοδολογικές προεκτάσεις των ευρημάτων και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα σε παιδικούς πληθυσμούς, με στόχο την παιδαγωγικά τεκμηριωμένη αξιοποίηση των νευροεπιστημονικών δεδομένων στη μαθηματική εκπαίδευση.

### Abstract

The present paper examines the contribution of educational neuroscience to the teaching and learning of mathematics, with particular emphasis on functional brain lateralization and the parietal circuits that support numerical processing. Neuroscientific evidence is presented regarding the role of the parietal lobe, and more specifically the horizontal segment of the intraparietal sulcus (HIPS), the left angular gyrus (L-AG), and the overlying region of the posterior superior parietal lobule (PSPL), in accordance with the three parietal circuits model of number processing. In addition, the concept of brain lateralization is analyzed, including its forms as well as its developmental and plastic nature during childhood and adolescence. Special emphasis is placed on the relationship between the degree of functional hemispheric specialization and mathematical performance, as documented both in human studies and in comparative evidence from non-human species. Findings from studies employing functional transcranial Doppler ultrasonography (fTCD) in adults are also presented, highlighting differentiated patterns of lateralization depending on the type of arithmetic operation and the cognitive strategy engaged. Finally, the educational and methodological implications of these findings are discussed, and directions for future research in child populations are proposed, with the aim of pedagogically grounded integration of neuroscientific evidence into mathematics education.

### Εισαγωγή

Η εκπαιδευτική νευροεπιστήμη αποτελεί ένα αναδυόμενο επιστημονικό πεδίο που επιδιώκει να γεφυρώσει τις γνώσεις για τη λειτουργία του εγκεφάλου με την παιδαγωγική πράξη, προσφέροντας νέα ερμηνευτικά εργαλεία για τη μελέτη της μάθησης (Thomas et al., 2019, p. 447). Η αξιοποίηση σύγχρονων νευροαπεικονιστικών τεχνικών έχει καταστήσει δυνατή τη συστηματική διερεύνηση των νευρωνικών διεργασιών που υποστηρίζουν διαφορετικές μορφές γνωστικής δραστηριότητας, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην κατανόηση των μηχανισμών της μάθησης (Aulet et al., 2025; Weyandt et al., 2020; Everts et al., 2009; Delazer et al., 2005). Τα δεδομένα αυτά δημιουργούν νέες προοπτικές τόσο για τη θεωρητική ερμηνεία των γνωστικών λειτουργιών όσο και για τον παιδαγωγικό αναστοχασμό γύρω από τη σχολική διδασκαλία (Sigman et al., 2014).

Στο πεδίο της μαθηματικής εκπαίδευσης, η συμβολή της νευροεπιστήμης αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς τα μαθηματικά συνδέονται στενά με ανώτερες γνωστικές λειτουργίες, όπως η επεξεργασία ποσοτήτων, η εργαζόμενη μνήμη και η χωρική σκέψη (Menon, 2016, pp. 159–161). Παράλληλα, οι μαθησιακές δυσκολίες στα μαθηματικά, και ειδικότερα η δυσκακουλία, σε συνδυασμό με το μαθηματικό άγχος, συγκροτούν έναν φαύλο κύκλο που επηρεάζει αρνητικά τη μαθησιακή πορεία πολλών μαθητών (Buckley et al., 2016). Το

γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική τη διερεύνηση των νευρογνωστικών παραγόντων που σχετίζονται με τη μαθηματική επίδοση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει τη συμβολή της εγκεφαλικής πλευρίωσης στις γνωστικές διεργασίες συνολικά, τόσο σε ζωικά μοντέλα όσο και στον άνθρωπο (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020; Everts et al., 2009), και ειδικότερα στη μαθηματική μάθηση (Aulet et al., 2025; Gatto et al., 2020). Παράλληλα, παρουσιάζονται νευροεπιστημονικά ευρήματα που αφορούν τα βρεγματικά κυκλώματα και τις επιμέρους εγκεφαλικές περιοχές που εμπλέκονται στην αριθμητική επεξεργασία (Aulet et al., 2025; Connaughton et al., 2017; Ansari, 2008; Dehaene et al., 2005), ενώ διερευνώνται οι εκπαιδευτικές προεκτάσεις αυτών των γνώσεων για τη διδασκαλία των μαθηματικών.

Η μαθηματική σκέψη δεν συνιστά ενιαία γνωστική λειτουργία, αλλά ένα σύνολο επιμέρους διεργασιών που περιλαμβάνουν την επεξεργασία ποσοτήτων, τη συμβολική αναπαράσταση αριθμών, την ανάκληση αριθμητικών γεγονότων και τη χρήση στρατηγικών επίλυσης προβλημάτων. Η ετερογένεια αυτή αντικατοπτρίζεται και στη νευρωνική οργάνωση των μαθηματικών, καθώς διαφορετικοί τύποι αριθμητικών έργων ενεργοποιούν διακριτά εγκεφαλικά δίκτυα, με ιδιαίτερη συμμετοχή του βρεγματικού λοβού και των λειτουργικά συνδεδεμένων με αυτόν περιοχών (Ansari, 2008; Dehaene et al., 2005). Η κατανόηση της λειτουργικής διαφοροποίησης αυτών των δικτύων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη θεωρητική θεμελίωση της μαθηματικής μάθησης και για την ερμηνεία των ατομικών διαφορών στη μαθηματική επίδοση.

Στο πλαίσιο αυτό, η έννοια της εγκεφαλικής πλευρίωσης αποκτά κεντρική σημασία, καθώς αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι γνωστικές λειτουργίες κατανέμονται και εξειδικεύονται μεταξύ των δύο ημισφαιρίων. Η πλευρίωση δεν ταυτίζεται με απόλυτη «κυριαρχία» του ενός ημισφαιρίου, αλλά αντανακλά λειτουργικά πρότυπα εξειδίκευσης και συνεργασίας, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με το γνωστικό έργο και το αναπτυξιακό στάδιο (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020). Στα μαθηματικά, η διαφοροποίηση αυτή φαίνεται να συνδέεται με το είδος της γνωστικής στρατηγικής που ενεργοποιείται, όπως η λεκτική ανάκληση απομνημονευμένων αριθμητικών γεγονότων ή η ποσοτική και οπτικοχωρική επεξεργασία.

Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η αναπτυξιακή διάσταση της πλευρίωσης, καθώς κατά την παιδική και εφηβική ηλικία παρατηρείται σταδιακή ενίσχυση της λειτουργικής εξειδίκευσης των ημισφαιρίων, σε συνάρτηση με τη γνωστική ωρίμανση και τη μαθησιακή εμπειρία (Everts et al., 2009). Η δυναμική αυτή υποδηλώνει ότι η εγκεφαλική οργάνωση των μαθηματικών δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά διαμορφώνεται μέσα από τη συνεχή αλληλεπίδραση βιολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της πλευρίωσης στα μαθηματικά δεν έχει μόνο θεωρητική αξία, αλλά μπορεί να προσφέρει κρίσιμες ενδείξεις για την κατανόηση των μαθησιακών δυσκολιών και για τον σχεδιασμό παιδαγωγικά τεκμηριωμένων διδακτικών προσεγγίσεων.

### **Βιβλιογραφική επισκόπηση**

*Ο ρόλος της ενδοβρεγματικής αύλακας (IPS) και τα τρία βρεγματικά κυκλώματα για την επεξεργασία αριθμών*  
Η ενδοβρεγματική αύλακα (Intraparietal Sulcus, IPS) αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες εγκεφαλικές περιοχές για την επεξεργασία αριθμητικών και ποσοτικών πληροφοριών (Aulet et al., 2025). Πλήθος νευροαπεικονιστικών μελετών έχει καταδείξει ότι το οριζόντιο τμήμα της ενδοβρεγματικής αύλακας (Horizontal IPS, HIPS) ενεργοποιείται συστηματικά κατά την εκτέλεση αριθμητικών εργασιών, όπως η σύγκριση μεγεθών, η εκτίμηση ποσοτήτων και οι πράξεις με αριθμούς (Ansari, 2008· Dehaene et al., 2003). Η δραστηριότητά της ενδοβρεγματικής αύλακας δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε αριθμητικά καθήκοντα, αλλά εκτείνεται και σε μη αριθμητικές ποσοτικές εκτιμήσεις, όπως η σύγκριση μήκους (Ansari, 2008), εμβαδού ή φωτεινότητας (Pinel, 2004).

Τα τρία νευρωνικά κυκλώματα: Σε μία σημαντική έρευνα του 2005 από τους Dehaene et al. με τίτλο: «Τρία Βρεγματικά Κυκλώματα για την Επεξεργασία Αριθμών» καταδεικνύεται ο σπουδαίος ρόλος του βρεγματικού λοβού (Parietal Lobe) κατά τη διάρκεια αριθμητικών διεργασιών. Συγκεκριμένα αναφέρονται τα εξής τρία βρεγματικά κυκλώματα:

1) Οριζόντιο τμήμα της ενδοβρεγματικής αύλακας (Horizontal Segment of the Intraparietal Sulcus – HIPS). Το HIPS αποτελεί τον νευρωνικό πυρήνα του «βασικού συστήματος ποσοτήτων» (core quantity system), ενεργοποιούμενο κάθε φορά που οι αριθμοί επεξεργάζονται, ανεξάρτητα από τη μορφή αναπαράστασής τους (σύμβολα, λέξεις ή μη συμβολικά μεγέθη). Η ενεργοποίησή του κορυφώνεται όταν το έργο απαιτεί άμεση ποσοτική εκτίμηση, υποστηρίζοντας τη νοητική γραμμή αριθμών και τη διαισθητική σύγκριση μεγεθών. Με τον τρόπο αυτό θεμελιώνει την «αριθμητική διαίσθηση», δηλαδή την καθολική και μη γλωσσική ικανότητα κατανόησης ποσοτήτων.

2) Αριστερή Γωνιώδης Έλিকা (Left Angular Gyrus – AG). Η αριστερή γωνιώδης έλικα (L-AG), συνδεδεμένη με το λεκτικό δίκτυο του αριστερού ημισφαιρίου, υποστηρίζει την ανάκληση αριθμητικών γεγονότων από τη μακροπρόθεσμη μνήμη, όπως οι πίνακες πολλαπλασιασμού και οι βασικές προσθέσεις. Δεν αποτελεί κέντρο γνήσιας ποσοτικής επεξεργασίας, αλλά λειτουργεί ως μηχανισμός αυτοματοποιημένης αναπαραγωγής αποθηκευμένων γνώσεων. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνει πιο σύνθετες αριθμητικές διεργασίες, εξοικονομώντας γνωστικούς πόρους.

3) Υπερκείμενη περιοχή του οπίσθιου ανώτερου βρεγματικού λοβού (Posterior Superior Parietal Lobule – PSPL). Η PSPL παρουσιάζει ενεργοποίηση σε ποικίλες αριθμητικές εργασίες, όπως η σύγκριση, η αφαίρεση, η απαρίθμηση και οι προσεγγιστικοί υπολογισμοί. Ωστόσο, η εμπλοκή της δεν υποδηλώνει αριθμητική εξειδίκευση, καθώς η περιοχή αυτή συνδέεται πρωτίστως με οπτικοχωρικές και προσοχικές διεργασίες (π.χ. νοητική περιστροφή, προσανατολισμός βλέμματος, οπτικοχωρική μνήμη). Η συμμετοχή της στην απαρίθμηση φαίνεται να απορρέει από την ανάγκη διαδοχικού προσανατολισμού της προσοχής στα προς καταμέτρηση αντικείμενα. Σε πιο αφηρημένες πράξεις, όπως η σύγκριση ή η αφαίρεση, η PSPL φαίνεται να συμβάλλει σε έναν γενικότερο μηχανισμό κατεύθυνσης της προσοχής στη νοητική γραμμή αριθμών, λειτουργώντας ως σύστημα επιλογής και εστίασης εντός ενός χωροαναλογικού πλαισίου.

### **Εγκεφαλική πλευρίωση και μαθηματικά**

Ορισμός εγκεφαλικής πλευρίωσης, μορφές, πλεονεκτήματα, ανάπτυξη και πλαστικότητα: Η εγκεφαλική πλευρίωση αναφέρεται στις δομικές και λειτουργικές διαφορές μεταξύ αριστερού και δεξιού ημισφαιρίου· ο ανθρώπινος εγκέφαλος δεν κατανέμει ισομερώς τις ίδιες γνωστικές λειτουργίες, αλλά τείνει να τις εξειδικεύει πλευρικά (Güntürkün et al., 2020). Η συμπεριφορική πλευρίωση (π.χ. προτίμηση χεριού) αποτελεί ορατή έκφραση αυτών των ασυμμετριών, χωρίς να ταυτίζεται πάντα με τη νευρωνική εξειδίκευση, παρότι συχνά συσχετίζεται με αυτήν (π.χ. αριστερή πλευρίωση της γλώσσας στους δεξιόχειρες).

Ως προς τη μορφολογία της λειτουργικής οργάνωσης, διακρίνονται δύο βασικοί τύποι. Πρώτον, η μονομερής λειτουργική εξειδίκευση, όπου ένα μονοεστιακό έργο υποστηρίζεται κυρίως από το ένα ημισφαίριο, με το έτερο να διαδραματίζει ρόλο υποστήριξης/ρύθμισης. Εδώ προτιμάται ο όρος «κύρια εξειδίκευση» αντί «κυριαρχία», για να αποφευχθεί η εσφαλμένη ιδέα ότι το μη κύριο ημισφαίριο είναι ανενεργό· αντίθετα, η συμβολή του είναι συχνά κρίσιμη για τη βέλτιστη απόδοση (Rogers, 2021). Δεύτερον, η παράλληλη λειτουργική εξειδίκευση, όπου τα δύο ημισφαίρια ενεργοποιούνται ταυτόχρονα για δύο διακριτές λειτουργίες χωρίς λειτουργική επικάλυψη, επιτρέποντας επιμερισμό της επεξεργασίας και αποτελεσματικότερη διαχείριση διπλών απαιτήσεων (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020).

Τα πλεονεκτήματα της πλευρίωσης είναι πολλαπλά και εξαρτώνται από το γνωστικό πλαίσιο. Σε μονοεστιακά καθήκοντα, η κύρια εξειδίκευση μειώνει τη γνωστική παρεμβολή, επιταχύνει τον χρόνο απόκρισης και αυξάνει την ακρίβεια· στους ανθρώπους, ισχυρότερη αριστερή γλωσσική πλευρίωση συσχετίζεται με καλύτερες λεκτικές επιδόσεις, ενώ εξειδίκευση δεξιού ημισφαιρίου συνδέεται με ανώτερες οπτικοχωρικές δεξιότητες (Güntürkün et al., 2020; Everts et al., 2009). Σε διπλές απαιτήσεις, η παράλληλη εξειδίκευση αυξάνει την «γνωστική χωρητικότητα», καθώς κάθε ημισφαίριο επεξεργάζεται διαφορετικό τύπο πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο, κάτι που έχει τεκμηριωθεί πειραματικά σε διάφορα είδη (Rogers, 2021). Αντίθετα, η απουσία σαφούς πλευρίωσης μπορεί να οδηγήσει σε πλεοναστική, μη διαφοροποιημένη επεξεργασία και μειωμένη απόδοση, ιδίως όταν απαιτείται ταχύτητα και εξειδίκευση (Rogers, 2021).

Κεντρικό ρόλο στη λειτουργικότητα της πλευρίωσης έχει ο ρυθμός και ο «συντονισμός» της διαημισφαιρικής συνεργασίας. Πέρα από απλή διέγερση ή αναστολή μεταξύ ημισφαιρίων, οι commissural αλληλεπιδράσεις

φαίνεται να ρυθμίζουν τον χρονισμό της συμμετοχής του μη κύριου ημισφαιρίου, βελτιστοποιώντας τον επιμερισμό της επεξεργασίας (Güntürkün et al., 2020). Συνεπώς, η ιδανική κατάσταση στα μονοεστιακά έργα δεν είναι η απόλυτη μονομέρεια, αλλά μια «λειτουργική κυριαρχία» με μετρημένη, ουσιώδη συνεισφορά του έτερου ημισφαιρίου που προσδίδει έλεγχο, σύγκριση και ευελιξία (Rogers, 2021).

Αναπτυξιακά, η πλευρίωση δεν είναι στατική. Αναδύεται από πρώιμες γονιδιακές ασυμμετρίες και διαμορφώνεται πολυπαραγοντικά από γενετικούς, επιγενετικούς, ορμονικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Güntürkün et al., 2020). Κατά την παιδική και εφηβική ηλικία παρατηρείται ενίσχυση της μονομερούς λειτουργικής εξειδίκευσης: αριστερές λεκτικές και δεξιές οπτικοχωρικές λειτουργίες σταδιακά ισχυροποιούνται, με σαφείς συνδέσεις με την απόδοση (Everts et al., 2009). Η αισθητηριακή εμπειρία – ιδίως στα πρώιμα στάδια – μπορεί να ενισχύσει ή να τροποποιήσει τις ασυμμετρίες (π.χ. ασύμμετρη οπτική διέγερση στα πτηνά), χωρίς ωστόσο να εξαντλεί τη γενετική/επιγενετική βάση του φαινομένου (Güntürkün et al., 2020).

Καίριο συμπέρασμα είναι η αμφίδρομη σχέση πλευρίωσης και μάθησης: η σαφής λειτουργική εξειδίκευση διευκολύνει την απόδοση, ενώ η επαναλαμβανόμενη εξάσκηση ενισχύει περαιτέρω τις πλευρικές εξειδικεύσεις μέσω νευρωνικής πλαστικότητας. Η σχέση δεν είναι γραμμική αλλά κυκλική: η απόδοση τροφοδοτεί την εξειδίκευση και η εξειδίκευση τροφοδοτεί την απόδοση, με τη διαημισφαιρική δυναμική να ρυθμίζει τον χρονισμό και την ισορροπία αυτής της συνεργασίας (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020). Επομένως, η εγκεφαλική πλευρίωση συνιστά δυναμική, εξελικτικά διαμορφούμενη ιδιότητα με πραγματική πλαστικότητα—δεκτική σε επιρροές ηλικίας, εμπειρίας και περιβάλλοντος—η οποία, όταν οργανώνεται ως κύρια και/ή παράλληλη λειτουργική εξειδίκευση, προσδίδει ουσιαστικά πλεονεκτήματα στη γνωστική αποτελεσματικότητα.

Συμπέρασμα – Ενίσχυση της πλευρίωσης και γνωστική ικανότητα: Η σχέση μεταξύ πλευρίωσης και γνωστικής απόδοσης αναδεικνύεται ως αμφίδρομη και δυναμική. Από τη μία πλευρά, η ύπαρξη σαφούς λειτουργικής εξειδίκευσης μειώνει τη γνωστική παρεμβολή και αυξάνει την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας, λειτουργώντας ως προϋπόθεση ή ενισχυτικός παράγοντας της απόδοσης (Güntürkün et al., 2020). Από την άλλη πλευρά, η συστηματική εξάσκηση ενεργοποιεί επαναλαμβανόμενα συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου, οδηγώντας μέσω μηχανισμών νευροπλαστικότητας σε ενίσχυση των σχετικών ημισφαιρικών εξειδικεύσεων (Kleim & Jones, 2008). Πρόκειται για μία κυκλική διαδικασία αλληλεπίδρασης, στην οποία η πλευρίωση διευκολύνει την επίδοση και η επιτυχής εμπειρία, με τη σειρά της, ενισχύει τη λειτουργική πλευρίωση.

Η εγκεφαλική πλευρίωση δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό, αλλά δυναμική και εξελικτικά διαμορφούμενη ιδιότητα, η οποία επηρεάζεται από γενετικούς, επιγενετικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Güntürkün et al., 2020). Εμπειρικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η λειτουργική εξειδίκευση ενισχύεται με την ηλικία και την εμπειρία (Everts et al., 2009), χωρίς να είναι απολύτως σαφές αν προηγείται η βιολογική προδιάθεση ή η επίδραση της εμπειρίας. Η «εξειδίκευση μέσω εμπειρίας» περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία η στοχευμένη, επαναλαμβανόμενη άσκηση ενισχύει τη μονομερή λειτουργική εξειδίκευση, με θετική επίδραση στην απόδοση (Güntürkün et al., 2020).

Το ερώτημα αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις άτυπης πλευρίωσης, όπου παρατηρείται αμφοτερόπλευρη ενεργοποίηση ακόμη και σε απλά μονοεστιακά καθήκοντα. Η κατάσταση αυτή, που συχνά συνοδεύεται από χαμηλότερη απόδοση, φαίνεται να αντανακλά γνωστική παρεμβολή και όχι παράλληλη εξειδίκευση. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι κατάλληλες παρεμβάσεις μπορούν να κατευθύνουν τη λειτουργική οργάνωση προς πιο τυπικά πρότυπα ενεργοποίησης, αξιοποιώντας τη δυναμικότητα της παιδικής και εφηβικής νευροπλαστικότητας (Weyandt et al., 2020). Ωστόσο, καθώς η νευροπλαστικότητα είναι χρήση-εξαρτώμενη, ακατάλληλα σχεδιασμένη εξάσκηση μπορεί να παγιώσει δυσπροσαρμοστικά μοτίβα ενεργοποίησης αντί να τα διορθώσει (Kleim & Jones, 2008).

Συνεπώς, η ενίσχυση της πλευρίωσης μέσω παρέμβασης είναι εφικτή, αλλά προϋποθέτει παιδαγωγικά τεκμηριωμένες, εξατομικευμένες και δυναμικά αναπροσαρμοζόμενες στρατηγικές, οι οποίες θα συνδυάζουν νευροφυσιολογικές μετρήσεις (π.χ. EEG, fNIRS) με συστηματικές συμπεριφορικές αξιολογήσεις.

Οι ορμονικές παρεμβάσεις, αν και υποσχόμενες βάσει δεδομένων από ζωικά μοντέλα (Güntürkün et al., 2020), παραμένουν προς το παρόν επιστημονικά και δεοντολογικά αδόκιμες για τον παιδικό πληθυσμό.

### **Συγκριτικά δεδομένα από μελέτες σε μη ανθρώπινα είδη**

Ενδείξεις για τη συστηματική σχέση μεταξύ εγκεφαλικής πλευρίωσης και αριθμητικής ικανότητας προέρχονται και από συγκριτικές μελέτες σε μη ανθρώπινα είδη, οι οποίες επιτρέπουν την απομόνωση βασικών γνωστικών και νευρολειτουργικών μηχανισμών ανεξάρτητα από γλωσσικούς ή πολιτισμικούς παράγοντες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μελέτη σε γυρρίες (*Poecilia reticulata*), ένα είδος ψαριού με τεκμηριωμένες ικανότητες διάκρισης ποσοτήτων, στην οποία εξετάστηκε ο ρόλος της εγκεφαλικής πλευρίωσης στην εκτέλεση αριθμητικών έργων (Gatto et al., 2019).

Στη συγκεκριμένη έρευνα, η λειτουργική πλευρίωση αξιολογήθηκε μέσω ενός μη κοινωνικού συμπεριφορικού παραδείγματος (detour test), το οποίο βασίζεται στην προτίμηση χρήσης του αριστερού ή του δεξιού οπτικού πεδίου κατά την αποφυγή ενός εμποδίου πίσω από το οποίο βρίσκεται ένα δυνητικά απειλητικό ερέθισμα. Η δοκιμασία αυτή θεωρείται αξιόπιστος δείκτης λειτουργικής πλευρίωσης, καθώς αντανακλά ασύμμετρη επεξεργασία οπτικών πληροφοριών από τα δύο ημισφαίρια. Με βάση τη συνέπεια της κατεύθυνσης των στροφών, τα άτομα κατηγοριοποιήθηκαν ως έντονα πλαγιοποιημένα (αριστερά ή δεξιά) ή ως μη πλαγιοποιημένα, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της πλευρίωσης (Gatto et al., 2019).

Στη συνέχεια, η αριθμητική τους ικανότητα εκτιμήθηκε μέσω ενός έργου αριθμητικής διάκρισης φυσικού τύπου (shoal-choice task), κατά το οποίο τα ψάρια έπρεπε να διακρίνουν μεταξύ δύο ομάδων ομοειδών διαφορετικού μεγέθους. Η απόδοση ποσοτικοποιήθηκε με βάση τον χρόνο παραμονής κοντά στο μεγαλύτερο κοπάδι, δείκτη που αντανακλά την ακρίβεια της ποσοτικής διάκρισης και αξιοποιεί τη φυσική τάση των ψαριών να προτιμούν μεγαλύτερες ομάδες, καθώς αυτές προσφέρουν αυξημένη προστασία (Gatto et al., 2019).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα έντονα πλαγιοποιημένα άτομα, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της πλευρίωσης, παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια στη διάκριση ποσοτήτων σε σύγκριση με τα μη πλαγιοποιημένα άτομα. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από συστηματική σύγκριση ομάδων με διαφορετικό βαθμό πλευρίωσης και όχι από μεμονωμένες συμπεριφορικές παρατηρήσεις, ενισχύοντας την ερμηνεία ότι η ένταση της λειτουργικής εξειδίκευσης των ημισφαιρίων σχετίζεται με την αποτελεσματικότητα της αριθμητικής επεξεργασίας (Gatto et al., 2019).

Η σημασία των ευρημάτων αυτών έγκειται στο ότι καταδεικνύουν τη σχέση πλευρίωσης και αριθμητικής απόδοσης, υποστηρίζοντας την άποψη ότι η λειτουργική οργάνωση του εγκεφάλου αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα της ποσοτικής επεξεργασίας. Αν και τα δεδομένα αυτά δεν μπορούν να μεταφερθούν άμεσα στον άνθρωπο, προσφέρουν ένα ισχυρό συγκριτικό πλαίσιο για την υπόθεση ότι η εγκεφαλική πλευρίωση, ως μηχανισμός μείωσης της γνωστικής παρεμβολής και αύξησης της επεξεργαστικής αποδοτικότητας, ενδέχεται να διαδραματίζει αντίστοιχο ρόλο και στη μαθηματική σκέψη του ανθρώπου.

### **Λειτουργική πλευρίωση αριθμητικών πράξεων και εμπειρική τεκμηρίωση με fTCD**

Εμπειρική στήριξη στη διάκριση μεταξύ διαφορετικών αριθμητικών πράξεων ως προς την εγκεφαλική τους οργάνωση παρέχουν μελέτες που αξιοποιούν τη λειτουργική διακρανιακή Doppler υπερηχογραφία (fTCD). Σε έρευνα σε υγιείς ενήλικες (Connaughton et al., 2017), κατά την οποία καταγράφηκε ταυτόχρονα η αιματική ροή στις μέσες εγκεφαλικές αρτηρίες των δύο ημισφαιρίων, διαπιστώθηκε ότι η εκτέλεση πράξεων πολλαπλασιασμού συνοδεύεται από στατιστικά σημαντική αριστερή λειτουργική πλευρίωση, ενώ αντίθετα η εκτέλεση πράξεων αφαίρεσης δεν παρουσίασε σαφή πλευρική εξειδίκευση, αλλά διμερή κατανομή της αιμοδυναμικής δραστηριότητας. Το εύρημα αυτό ερμηνεύεται ως ένδειξη ότι ο πολλαπλασιασμός βασίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό στη λεκτική ανάκληση απομνημονευμένων αριθμητικών γεγονότων, η οποία συνδέεται λειτουργικά με το αριστερό ημισφαίριο και ειδικότερα με τη γωνιώδη έλικα, ενώ η αφαίρεση φαίνεται να στηρίζεται περισσότερο σε ποσοτικές και οπτικοχωρικές διεργασίες που ενεργοποιούν διμερή βρεγματικά κυκλώματα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνάδουν με το μοντέλο των τριών βρεγματικών κυκλωμάτων για την επεξεργασία αριθμών, σύμφωνα με το οποίο διακριτοί τύποι αριθμητικών πράξεων ενεργοποιούν διαφορετικούς νευρωνικούς κώδικες. Η αριστερή πλευρίωση που παρατηρείται στον πολλαπλασιασμό ερμηνεύεται ως ενεργοποίηση του λεκτικού κώδικα, ο οποίος υποστηρίζει την αυτοματοποιημένη ανάκληση αριθμητικών γνώσεων από τη μακροπρόθεσμη μνήμη, ενώ η απουσία σαφούς πλευρίωσης στην αφαίρεση αντανακλά την εμπλοκή του βασικού συστήματος ποσοτήτων και μη λεκτικών μηχανισμών εκτίμησης μεγέθους. Η διαφοροποίηση αυτή ενισχύει τη θέση ότι η εγκεφαλική πλευρίωση στα μαθηματικά δεν αποτελεί ενιαίο φαινόμενο, αλλά εξαρτάται από τη φύση του αριθμητικού έργου, το είδος της γνωστικής στρατηγικής που ενεργοποιείται και τον βαθμό αυτοματοποίησης της αντίστοιχης γνώσης (Connaughton et al., 2017).

### **Μεθοδολογία**

Η παρούσα εργασία ακολουθεί μεθοδολογία θεωρητικής σύνθεσης και ερμηνευτικής ανάλυσης της σύγχρονης διεθνούς βιβλιογραφίας στο πεδίο της εκπαιδευτικής νευροεπιστήμης, με έμφαση στη λειτουργική εγκεφαλική πλευρίωση και στη μαθηματική επεξεργασία. Η ανάλυση βασίστηκε σε ερευνητικές μελέτες που αξιοποιούν νευροαπεικονιστικές και νευροφυσιολογικές τεχνικές (όπως fMRI, EEG και fTCD), καθώς και σε συγκριτικές έρευνες σε μη ανθρώπινα είδη, οι οποίες συμβάλλουν στην κατανόηση βασικών μηχανισμών λειτουργικής εξειδίκευσης των ημισφαιρίων.

Η επιλογή των πηγών πραγματοποιήθηκε με κριτήρια τη συνάφεια με το αντικείμενο της μαθηματικής μάθησης, τη σαφή θεωρητική τεκμηρίωση της έννοιας της πλευρίωσης και τη δυνατότητα σύνδεσης των νευροεπιστημονικών ευρημάτων με εκπαιδευτικά ερωτήματα. Η σύνθεση των δεδομένων οργανώθηκε θεματικά, με στόχο την ανάδειξη σταθερών προτύπων εγκεφαλικής οργάνωσης, διαφοροποιήσεων ως προς τον τύπο του μαθηματικού έργου και αναπτυξιακών τάσεων. Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την κριτική ερμηνεία των ευρημάτων και τη διατύπωση παιδαγωγικά τεκμηριωμένων προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

### **Αποτελέσματα**

Η συνθετική ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε συνεκτικά πρότυπα λειτουργικής εγκεφαλικής οργάνωσης που συνδέονται με την αριθμητική επεξεργασία και τη μαθηματική επίδοση (Connaughton et al., 2017; Ansari, 2008; Dehaene et al., 2003). Κεντρικό εύρημα αποτελεί η διαφοροποιημένη εμπλοκή των βρεγματικών κυκλωμάτων ανάλογα με τον τύπο του μαθηματικού έργου, επιβεβαιώνοντας το μοντέλο των τριών βρεγματικών κυκλωμάτων για την επεξεργασία αριθμών (Connaughton et al., 2017). Ειδικότερα, το οριζόντιο τμήμα της ενδοβρεγματικής αύλακας (HIPS) αναδεικνύεται ως βασικός νευρωνικός πυρήνας της ποσοτικής επεξεργασίας, ανεξάρτητα από τη μορφή αναπαράστασης των αριθμών, ενώ η αριστερή γωνιώδης έλικα (L-AG) εμπλέκεται κυρίως σε αυτοματοποιημένες, λεκτικά διαμεσολαβούμενες αριθμητικές πράξεις. Παράλληλα, η υπερκείμενη περιοχή του οπίσθιου ανώτερου βρεγματικού λοβού (PSPL) φαίνεται να υποστηρίζει προσοχικές και οπτικοχωρικές διεργασίες που συνοδεύουν σύνθετα ή μη αυτοματοποιημένα αριθμητικά έργα (Connaughton et al., 2017; Ansari, 2008; Dehaene et al., 2003).

Σε επίπεδο λειτουργικής εγκεφαλικής πλευρίωσης, τα δεδομένα συγκλίνουν στο ότι η μαθηματική επεξεργασία δεν παρουσιάζει ενιαίο πρότυπο πλευρικής εξειδίκευσης, αλλά διαφοροποιείται δυναμικά ανάλογα με τη γνωστική στρατηγική που ενεργοποιείται. Μελέτες λειτουργικής διακρανιακής Doppler υπερηχογραφίας (fTCD) δείχνουν ότι πράξεις που βασίζονται στη λεκτική ανάκληση αριθμητικών γεγονότων, όπως ο πολλαπλασιασμός, συνοδεύονται από στατιστικά σημαντική αριστερή λειτουργική πλευρίωση, ενώ πράξεις που απαιτούν ποσοτική εκτίμηση ή οπτικοχωρική επεξεργασία, όπως η αφαίρεση, παρουσιάζουν διμερή ή λιγότερο σαφή πλευρική εξειδίκευση. Το εύρημα αυτό υποστηρίζει τη θέση ότι η λειτουργική πλευρίωση στα μαθηματικά εξαρτάται από τη φύση του έργου και τον βαθμό αυτοματοποίησης της γνώσης (Connaughton et al., 2017).

Επιπλέον, συγκριτικά δεδομένα από μη ανθρώπινα είδη ενισχύουν τη συσχέτιση μεταξύ βαθμού λειτουργικής πλευρίωσης και αριθμητικής απόδοσης. Άτομα με σαφή λειτουργική εξειδίκευση των ημισφαιρίων παρουσιάζουν ανώτερη ακρίβεια σε έργα ποσοτικής διάκρισης σε σύγκριση με μη πλευριωμένα άτομα, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της πλευρίωσης. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η

ένταση της λειτουργικής εξειδίκευσης, και όχι η πλευρική κατεύθυνση καθαυτή, σχετίζεται με την αποτελεσματικότητα της ποσοτικής επεξεργασίας (Gatto et al., 2019).

Συνολικά, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής σύνθεσης καταδεικνύουν ότι η εγκεφαλική πλευρίωση αποτελεί δυναμικό και έργο-εξαρτώμενο χαρακτηριστικό της μαθηματικής επεξεργασίας, το οποίο συνδέεται συστηματικά με τη γνωστική αποδοτικότητα και διαμορφώνεται αναπτυξιακά μέσω εμπειρίας και εξάσκησης (Everts et al., 2009).

### **Συζήτηση**

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η εγκεφαλική πλευρίωση συνιστά κρίσιμο παράγοντα για την κατανόηση των γνωστικών μηχανισμών που υποστηρίζουν τη μαθηματική επεξεργασία, τόσο στον άνθρωπο όσο και σε συγκριτικά μοντέλα μη ανθρώπινων ειδών (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020; Gatto et al., 2019; Connaughton et al., 2017; Everts et al., 2009). Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι η μαθηματική σκέψη δεν εδράζεται σε ένα ενιαίο και ομοιογενές νευρωνικό υπόστρωμα, αλλά προκύπτει από τη δυναμική αλληλεπίδραση διακριτών βρεγματικών κυκλωμάτων, των οποίων η λειτουργική εξειδίκευση και η πλευρική κατανομή διαφοροποιούνται ανάλογα με τη φύση του αριθμητικού έργου και τη γνωστική στρατηγική που ενεργοποιείται (Dehaene et al., 2005).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η διαφοροποίηση που παρατηρείται μεταξύ αριθμητικών πράξεων, όπως αυτή τεκμηριώνεται από μελέτες λειτουργικής διακρανιακής Doppler υπερηχογραφίας. Η συστηματική αριστερή λειτουργική πλευρίωση κατά την εκτέλεση πράξεων πολλαπλασιασμού, σε αντιδιαστολή με τη διμερή κατανομή της αιμοδυναμικής δραστηριότητας κατά την αφαίρεση, υποστηρίζει την άποψη ότι οι αυτοματοποιημένες, λεκτικά διαμεσολαβούμενες διαδικασίες βασίζονται κυρίως σε αριστερόστροφα δίκτυα, ενώ οι πράξεις που απαιτούν ενεργή ποσοτική επεξεργασία και οπτικοχωρικό χειρισμό ενεργοποιούν ευρύτερα και διμερή βρεγματικά κυκλώματα. Η διάκριση αυτή ευθυγραμμίζεται με το μοντέλο των τριών βρεγματικών κυκλωμάτων και προσφέρει ένα συνεκτικό ερμηνευτικό πλαίσιο για τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στη μαθηματική επίδοση (Connaughton et al., 2017).

Παράλληλα, τα συγκριτικά δεδομένα από μελέτες σε μη ανθρώπινα είδη, όπως τα guppies, ενισχύουν την υπόθεση ότι η λειτουργική πλευρίωση συνδέεται με αυξημένη γνωστική αποδοτικότητα σε ποσοτικά έργα, ανεξάρτητα από γλωσσικούς ή πολιτισμικούς παράγοντες. Το γεγονός ότι τα έντονα πλαγιοποιημένα άτομα εμφανίζουν ανώτερη ακρίβεια στη διάκριση ποσοτήτων υποστηρίζει την ερμηνεία της πλευρίωσης ως μηχανισμού μείωσης της γνωστικής παρεμβολής και βελτιστοποίησης της επεξεργασίας. Αν και τα ευρήματα αυτά δεν επιτρέπουν άμεση γενίκευση στον άνθρωπο, προσφέρουν ένα ισχυρό συγκριτικό πλαίσιο για τη διερεύνηση θεμελιωδών αρχών νευρωνικής οργάνωσης (Gatto et al., 2019).

Σε εκπαιδευτικό επίπεδο, τα παραπάνω ευρήματα υποδεικνύουν ότι η μαθηματική μάθηση δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται ως ενιαία γνωστική δεξιότητα, αλλά ως σύνολο διακριτών διαδικασιών με διαφορετικές νευρογνωστικές απαιτήσεις (Dehaene et al., 2005; Ansari, 2008; Connaughton et al., 2017). Η κατανόηση της διαφοροποιημένης εγκεφαλικής οργάνωσης των αριθμητικών πράξεων μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση παιδαγωγικών προσεγγίσεων που λαμβάνουν υπόψη τόσο τον βαθμό αυτοματοποίησης της γνώσης όσο και την αναπτυξιακή ετοιμότητα των μαθητών. Παράλληλα, η αξιοποίηση μη επεμβατικών μεθόδων, όπως το fTCD, δημιουργεί νέες προοπτικές για τη μελέτη της λειτουργικής πλευρίωσης σε παιδικούς πληθυσμούς, όχι με διαγνωστικό χαρακτήρα, αλλά ως εργαλείο κατανόησης των γνωστικών μηχανισμών που υποστηρίζουν ή παρεμποδίζουν τη μαθηματική μάθηση.

Συνολικά, η συζήτηση των ευρημάτων ενισχύει την άποψη ότι η εγκεφαλική πλευρίωση στα μαθηματικά αποτελεί δυναμικό, αναπτυξιακά διαμορφούμενο και έργο-εξαρτώμενο φαινόμενο, το οποίο επηρεάζεται ουσιαστικά από την εμπειρία και τη φύση της γνωστικής δραστηριότητας (Connaughton et al., 2017; Everts et al., 2009). Η ενσωμάτωση νευροεπιστημονικών δεδομένων στη μαθηματική εκπαίδευση οφείλει, συνεπώς, να γίνεται με επιστημονική σύνεση, αποφεύγοντας απλουστευτικές γενικεύσεις και εστιάζοντας στη λειτουργική κατανόηση των μηχανισμών που υποστηρίζουν τη μάθηση.

### **Πρόταση για μελλοντική έρευνα**

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στη συστηματική διερεύνηση της λειτουργικής εγκεφαλικής πλευρίωσης κατά την εκτέλεση διαφορετικών τύπων μαθηματικών έργων σε παιδιά σχολικής ηλικίας, αξιοποιώντας τη λειτουργική διακρανιακή Doppler υπερηχογραφία (fTCD) για τον υπολογισμό του δείκτη πλευρίωσης (Laterality Index – LI). Σε αντίθεση με τη μέχρι σήμερα βιβλιογραφία, η οποία βασίζεται κυρίως σε δείγματα ενηλίκων και σε περιορισμένο φάσμα αριθμητικών πράξεων, μια αναπτυξιακή προσέγγιση θα επέτρεπε τη μελέτη των μεταβολών στη λειτουργική οργάνωση των ημισφαιρίων κατά την ωρίμανση των αριθμητικών και οπτικοχωρικών δεξιοτήτων.

Συγκεκριμένα, η μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να περιλαμβάνει, πέρα από τις βασικές αριθμητικές πράξεις (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό και διαίρεση), και ένα σύνολο οπτικοχωρικών δοκιμασιών, όπως η νοητή περιστροφή, η αναγνώριση γεωμετρικών σχημάτων υπό μεταβολή της οπτικής γωνίας και η επεξεργασία χωρικών μετασχηματισμών. Η ενσωμάτωση αυτών των έργων θα καθιστούσε δυνατή τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ποσοτικής επεξεργασίας, οπτικοχωρικής σκέψης και λειτουργικής πλευρίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τον ρόλο των βρεγματικών κυκλωμάτων (HIPS, αριστερή γωνιώδης έλικα και PSPL) που αδρούνται από τη μέση εγκεφαλική αρτηρία και είναι προσβάσιμα μέσω fTCD.

Επιπλέον, η κατηγοριοποίηση των μαθητών σε ομάδες διαφορετικού επιπέδου μαθηματικής επίδοσης, βάσει σταθμισμένων ψυχομετρικών εργαλείων, θα επέτρεπε τη διερεύνηση του κατά πόσο οι διαφορές στον δείκτη πλευρίωσης σχετίζονται με την απόδοση, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται σαφής ημισφαιρική εξειδίκευση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση εσωτερικών δεικτών πλευρίωσης (task-specific LI), οι οποίοι αντιστοιχούν σε υποκατηγορίες του ίδιου έργου ή σε διαφορετικά επίπεδα γνωστικής δυσκολίας, καθώς η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποκαλύψει λεπτές διαφοροποιήσεις στη νευρωνική οργάνωση που δεν αποτυπώνονται στον συνολικό LI.

Τέλος, μια τέτοια ερευνητική κατεύθυνση θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στη χαρτογράφηση της αναπτυξιακής δυναμικής της εγκεφαλικής πλευρίωσης στα μαθηματικά, χωρίς διαγνωστικό χαρακτήρα, προσφέροντας όμως πολύτιμες ενδείξεις για τους γνωστικούς μηχανισμούς που υποστηρίζουν ή παρεμποδίζουν τη μαθηματική μάθηση. Τα ευρήματα θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση για παιδαγωγικά τεκμηριωμένες και νευρογνωστικά ευαίσθητες παρεμβάσεις, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη τόσο τη φύση του μαθηματικού έργου όσο και την αναπτυξιακή ετοιμότητα των μαθητών.

### **Συμπεράσματα**

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η εγκεφαλική πλευρίωση συνιστά θεμελιώδη παράμετρο της μαθησιακής επεξεργασίας και της γνωστικής αποδοτικότητας, με καθοριστική σημασία τόσο για την κατανόηση των νευρογνωστικών μηχανισμών όσο και για τη θεωρητική θεμελίωση της μαθηματικής εκπαίδευσης (Rogers, 2021; Güntürkün et al., 2020; Gatto et al., 2019; Connaughton et al., 2017; Everts et al., 2009).

Η σύνθεση των νευροεπιστημονικών δεδομένων καταδεικνύει ότι η μαθηματική σκέψη δεν αποτελεί ενιαία λειτουργία, αλλά προκύπτει από τη συνεργατική και διαφοροποιημένη ενεργοποίηση διακριτών βρεγματικών κυκλωμάτων, των οποίων η λειτουργική εξειδίκευση και η πλευρική οργάνωση εξαρτώνται από τη φύση του αριθμητικού έργου και τον βαθμό αυτοματοποίησης της γνώσης (Connaughton et al., 2017; Ansari, 2008; Dehaene et al., 2003).

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά η διαπίστωση ότι η λειτουργική εγκεφαλική πλευρίωση στα μαθηματικά δεν είναι στατική ούτε ομοιόμορφη, αλλά παρουσιάζει δυναμικό, έργο-εξαρτώμενο και αναπτυξιακά διαμορφούμενο χαρακτήρα. Η διαφοροποίηση μεταξύ πράξεων που βασίζονται στη λεκτική ανάκληση αριθμητικών γεγονότων και εκείνων που απαιτούν ποσοτική ή οπτικοχωρική επεξεργασία υποστηρίζει την ανάγκη εγκατάλειψης απλουστευτικών μοντέλων ημισφαιρικής «κυριαρχίας» και την υιοθέτηση λειτουργικών εννοιών εξειδίκευσης, συνεργασίας και επιμερισμού της επεξεργασίας μεταξύ των ημισφαιρίων (Connaughton et al., 2017; Everts et al., 2009).

Παράλληλα, τα συγκριτικά δεδομένα από μελέτες σε μη ανθρώπινα είδη ενισχύουν την άποψη ότι η σαφής λειτουργική εξειδίκευση των ημισφαιρίων συνδέεται με αυξημένη γνωστική αποδοτικότητα σε ποσοτικά έργα, υποδηλώνοντας ότι η πλευρίωση αποτελεί εξελικτικά σταθερό μηχανισμό βελτιστοποίησης της

επεξεργασίας και μείωσης της γνωστικής παρεμβολής. Αν και τα δεδομένα αυτά δεν επιτρέπουν άμεσες γενικεύσεις στον άνθρωπο, προσφέρουν ένα ισχυρό συγκριτικό πλαίσιο για την κατανόηση των θεμελιωδών αρχών νευρωνικής οργάνωσης της μαθηματικής σκέψης (Gatto et al., 2019).

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία αναδεικνύει την ανάγκη για μελλοντική έρευνα που θα εστιάσει συστηματικά στη διερεύνηση της λειτουργικής εγκεφαλικής πλευρίωσης κατά την εκτέλεση διαφορετικών τύπων μαθηματικών και οπτικοχωρικών έργων σε παιδιά σχολικής ηλικίας, αξιοποιώντας μη επεμβατικές τεχνικές όπως η λειτουργική διακρανιακή Doppler υπερηχογραφία (fTCD). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των αναπτυξιακών μεταβολών στον δείκτη πλευρίωσης (Laterality Index), καθώς και η διερεύνηση εσωτερικών, έργο-ειδικών δεικτών πλευρίωσης, οι οποίοι ενδέχεται να αποκαλύψουν λεπτές διαφοροποιήσεις στη νευρωνική οργάνωση που δεν αποτυπώνονται σε συνολικές μετρήσεις. Παράλληλα, κρίνεται κρίσιμη η συστηματική εξέταση του κατά πόσο οι διαφοροποιήσεις στον δείκτη πλευρίωσης σχετίζονται με τη μαθηματική απόδοση, τόσο σε τυπικούς μαθητικούς πληθυσμούς όσο και σε μαθητές με χαμηλότερη επίδοση, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται σαφής ημισφαιρική εξειδίκευση. Τέτοιες ερευνητικές κατευθύνσεις μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη χαρτογράφηση της αναπτυξιακής δυναμικής της εγκεφαλικής πλευρίωσης στα μαθηματικά και να αποτελέσουν τη βάση για θεωρητικά συνεπείς και παιδαγωγικά τεκμηριωμένες παρεμβάσεις στη μαθηματική εκπαίδευση.

## Βιβλιογραφία

- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 278–291. <https://doi.org/10.1038/nrn2334>
- Aulet, L. S., Kaicher, C. M., & Cantlon, J. F. (2025). Intersection of spatial and numerical cognition in the developing brain. *Cerebral Cortex*, 35(6), bhaf126. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaf126>
- Buckley, S., Reid, K., Goos, M., Lipp, O. V., & Thomson, S. (2016). Understanding and addressing mathematics anxiety using perspectives from education, psychology and neuroscience. *Australian Journal of Education*, 60(2), 157–170. <https://doi.org/10.1177/0004944116653000>
- Connaughton, V. M., Amiruddin, A., Clunies-Ross, K. L., French, N., & Fox, A. M. (2017). Assessing hemispheric specialization for processing arithmetic skills in adults: A functional transcranial Doppler ultrasonography (fTCD) study. *Journal of Neuroscience Methods*, 283, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.03.010>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2005). Three parietal circuits for number processing. In J. I. D. Campbell (Ed.), *The handbook of mathematical cognition* (pp. 433–453). Psychology Press. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Delazer, M., Ischebeck, A., Domahs, F., Zamarian, L., Hutzler, F., Klein, E., & Kaufmann, L. (2005). Learning by strategies and learning by drill—Evidence from an fMRI study. *NeuroImage*, 25(3), 838–849. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.009>
- Everts, R., Lidzba, K., Wilke, M., Kiefer, C., Mordasini, M., Schroth, G., Perrig, W., & Steinlin, M. (2009). Strengthening of laterality of verbal and visuospatial functions during childhood and adolescence. *Human Brain Mapping*, 30(2), 473–483. <https://doi.org/10.1002/hbm.20523>
- Gatto, E., Agrillo, C., & Dadda, M. (2020). Predator exposure modulates lateralization of social learning in guppies (*Poecilia reticulata*). *Animal Cognition*, 23(5), 919–931. <https://doi.org/10.1007/s10071-020-01369-9>
- Gatto, E., Agrillo, C., Brown, C., & Dadda, M. (2019). Individual differences in numerical skills are influenced by brain lateralization in guppies (*Poecilia reticulata*). *Intelligence*, 75, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2019.04.004>
- Güntürkün, O., Ströckens, F., & Ocklenburg, S. (2020). Brain lateralization: A comparative perspective. *Physiological Reviews*, 100(3), 1019–1063. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2019>
- Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1), S225–S239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008\)018](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008)018)
- Menon, V. (2016). Memory and cognitive control circuits in mathematical cognition and learning. *Progress in Brain Research*, 227, 159–186. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.026>

- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983–993. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00107-2)
- Rogers, L. J. (2021). *Brain lateralization and cognitive capacity*. *Animals*, 11(7), 1996. <https://doi.org/10.3390/ani11071996>
- Sigman, M., Peña, M., Goldin, A. P., & Ribeiro, S. (2014). Neuroscience and education: Prime time to build the bridge. *Nature Neuroscience*, 17(4), 497–502. <https://doi.org/10.1038/nn.3672>
- Thomas, M. S., Ansari, D., & Knowland, V. C. (2019). Annual research review: Educational neuroscience: Progress and prospects. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(4), 477–492. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12973>
- Weyandt, L. L., Clarkin, C. M., Holding, E. Z., May, S. E., Marraccini, M. E., Gudmundsdottir, B. G., Shepard, E., & Thompson, L. (2020). Neuroplasticity in children and adolescents in response to treatment intervention: A systematic review of the literature. *Clinical and Translational Neuroscience*, 4(2), 1–18. <https://doi.org/10.1177/2514183X20974231>