

3

Η νευροβιολογική βάση της ανάγνωσης και της αναγνωστικής δυσκολίας

Εισαγωγή

Συνήθως, τα επιχειρήματα που προβάλλουν τη νευροβιολογική βάση της αναγνωστικής δυσκολίας/δυσλεξίας προέρχονται από δύο μεγάλα ερευνητικά πεδία – το ένα που μελετάει τον εγκέφαλο και το άλλο που ερευνά το γονιδίωμα. Το κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζει μία βιβλιογραφική συζήτηση που αναφέρεται στον λεγόμενο αναγινώσκοντα εγκέφαλο (*reading brain*) –ο εγκέφαλος, ο οποίος ασχολείται με την ανάγνωση και τις σχετικές αναγνωστικές διεργασίες (Wolf, 2007). Στη συνέχεια, στρέφεται στο γονιδίωμα, καθώς η μεταβλητότητα στη δομή και τη λειτουργία του θεωρείται ότι, μέσω του εγκεφάλου και ίσως άλλων οργάνων του ανθρώπινου οργανισμού (π.χ. το ήπαρ μέσω του μεταβολισμού Ωμέγα 3 του ιχθυελαίου, όπως συζητήθηκε στη Lindmark & Clough, 2007), σχηματίζουν το υπόβαθρο της νευροβιολογικής βάσης της ανάγνωσης.

Το κεφάλαιο αναγκαστικά κάνει αναφορά σε πολλούς τεχνικούς όρους (π.χ. συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου, βιολογικές διεργασίες), οι οποίοι είναι πιθανόν να είναι άγνωστοι στους μη-ειδικούς. Προκειμένου να ανταποκριθούμε στους περιορισμούς του χώρου ενός βιβλίου, αλλά και για να διατηρήσουμε την αφηγηματική συνοχή και ροή, δεν παρέχονται πολλές από τις περιγραφές και τους ορισμούς των τεχνικών όρων. Ωστόσο, χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με αυτούς τους όρους διατίθενται τόσο σε πηγές του διαδικτύου όσο και στις δημοσιεύσεις που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Ο αναγινώσκων εγκέφαλος

Το πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου είναι δομημένο γύρω από μια συζήτηση των μορφολογικών (τόσο νεκροτομικών όσο και *in vivo*) και των λειτουργικών (*in vivo*) ερευνών του εγκεφάλου. Για να περιγραφεί η λειτουργία του μηχανι-

σμού του εγκεφάλου που υποστηρίζει την ανάγνωση, χρησιμοποιούνται μελέτες που αποσκοπούν στην κατανόηση (1) του εγκεφάλου στο προ-αναγνωστικό και αναγνωστικό στάδιο (δηλαδή, πριν από την κατάκτηση της ανάγνωσης και/ή μετά την ολοκλήρωση της κατάκτησης της ανάγνωσης)· (2) των εγκεφάλων των τυπικών αναγνωστών σε σύγκριση με εκείνους που αντιμετωπίζουν δυσκολίες· και (3) των εγκεφάλων των φτωχών αναγνωστών τόσο πριν όσο και μετά τις προσπάθειες αποκατάστασης των δυσκολιών τους.

Η χρήση μιας ποικιλίας εργαλείων απεικόνισης, όπως η μαγνητική τομογραφία (*magnetic resonance imaging*) (*MRI*), η λειτουργική μαγνητική τομογραφία (*fMRI*), η δομική *T1*MRI, η απεικόνιση ταυστή διάχυσης (*diffusion tensor imaging*) (*DTI*), η μαγνητική φασματοσκοπία (*magnetic resonance spectroscopy*) (*MRS*), η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (*PET*), η μαγνητοεγκεφαλογραφία (*magnetoencephalography*) (*MEG*), η φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου (*NIRS*) και το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (*electroencephalography*) (*EEG*) επιτρέπει στους ερευνητές να αξιοποιήσουν τα πρώιμα ευρήματα της ανατομίας του εγκεφάλου που ελήφθησαν από μεταθανάτιες έρευνες εγκεφάλων από άτομα με αναγνωστικές δυσκολίες.

Αυτή η τεχνολογία έχει επίσης επιτρέψει τη διεξαγωγή ερευνών σχετικών με:

1. τις λειτουργικές ιδιαιτερότητες του «αναγιγνώσκοντος εγκεφάλου» (δηλαδή, πώς λειτουργεί ο εγκέφαλος όταν το άτομο διαβάζει)·
2. την ηλικία και τις αναπτυξιακές πτυχές του «αναγιγνώσκοντος εγκεφάλου» με δειγματοληψία πριν, κατά τη διάρκεια, και μετά την απόκτηση των αναγνωστικών δεξιοτήτων·
3. τη λειτουργία του εγκεφάλου των ατόμων με αναγνωστικές δυσκολίες σε σύγκριση με τυπικούς αναγνώστες· και
4. την επίδραση των θεραπευτικών παρεμβάσεων που αποσκοπούν στη βελτίωση της λειτουργίας του «αναγιγνώσκοντος εγκεφάλου» στα άτομα που αντιμετωπίζουν δυσκολίες.

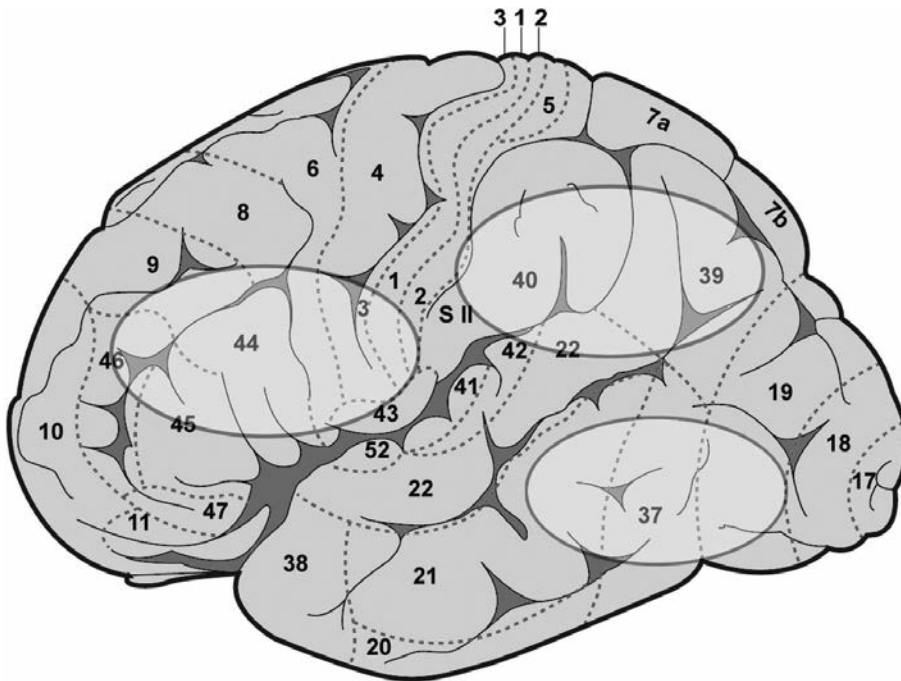
Η σημερινή συναινετική άποψη σχετικά με την ανάγνωση βεβαιώνει ότι η ανάγνωση λαμβάνει χώρα σε ένα νευρωνικό δίκτυο, το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες περιοχές του εγκεφάλου (βλ. σχήμα 3.1):

- αριστερή κάτω μετωπιαία (πρόσθια περιοχή η οποία εμπεριέχει, εν μέρει, τις περιοχές Brodmann, BA, 44, 45, και 6)·
- οπίσθια ραχιαία (*κροταφοβρεγματική* (ή *βρεγματοκροταφική*) περιοχή, η

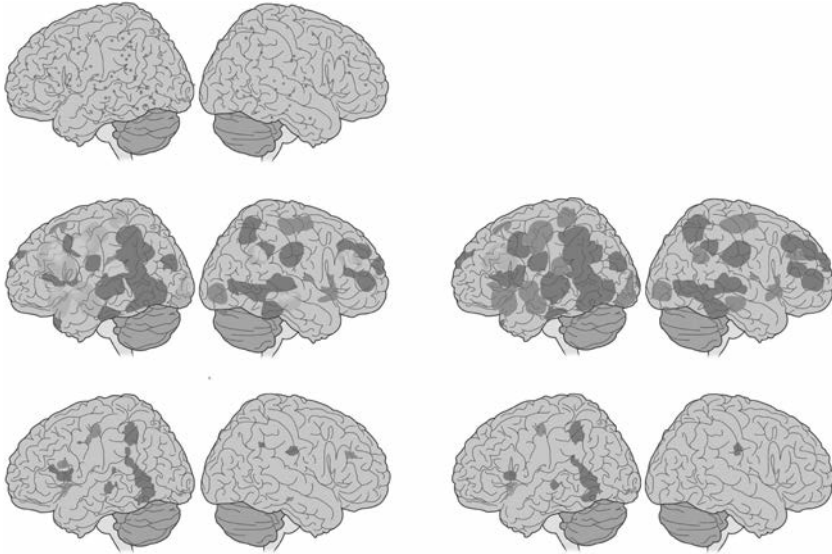
οποία ενσωματώνει τη γωνιώδη και υπερχειλία έλικα και την οπίσθια άνω κροταφική έλικα):

- οπίσθια κοιλιακή (κοιλιακή ινιακοκροταφική ή οπίσθια κάτω κροταφική περιοχή που ενσωματώνει την ατρακτοειδή και κάτω κροταφική έλικα).

Υπάρχει ευρεία συμφωνία (βλ. σχήμα 3.2) ότι υπάρχει ένα γενικό μοτίβο ενεργοποίησης του δικτύου που διαφοροποιεί τους επιδέξιους από τους φτωχούς αναγνώστες, έτσι ώστε οι πρώτοι να απασχολούν περιοχές της αριστερής πλευ-



Σχήμα 3.1 Η συναινετική άποψη του νευρικού δικτύου (neuronal network) της ανάγνωσης: αριστερή κάτω μετωπιαία (πρόσθια συστατική περιοχή που εμπεριέχει, εν μέρει, τις περιοχές Brodmann, 44, 45, και 6), η οπίσθια ραχιαία (κροταφοβρεγματική περιοχή που εμπεριέχει εν μέρει τις περιοχές Brodmann 39 και 40), και η οπίσθια κοιλιακή (κοιλιακή ινιοκροταφική περιοχή που εμπεριέχει, εν μέρει, τις περιοχές Brodmann 19, 21, και 37) περιοχή του εγκεφάλου. Προσαρμογή από Démonet, Taylor, και Chaix (2004). (Βλ. έγχρωμο σχήμα)



Σχήμα 3.2 (Επάνω αριστερά) Επιφανειακή απεικόνιση όλων των εστιών εισόδου με υποενεργοποίηση (hypo-activation) (69) σε κόκκινο και υπερενεργοποίηση (59) σε πράσινο όπως μετα-αναλύθηκαν από τους Richlan, Kronbichler, και Wimmer (2009). (Μέση αριστερά) Επικαλύψεις των χωριστών χαρτών για υποενεργοποίηση και υπερενεργοποίηση, αντίστοιχα· οι περιοχές που εμφανίζονται και στους δύο χάρτες παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα. (Μέση δεξιά) Επιφανειακή απεικόνιση της διαφοράς στον χάρτη (μετά την αφαίρεση των δεικτών υποενεργοποίησης από τους δείκτες υπερενεργοποίησης). Ο θολός χρωματισμός προκαλείται από ασύμφωνες ενεργοποιήσεις στις επιφανειακές και βαθύτερες περιοχές. (Κάτω αριστερά) Επιφανειακή απεικόνιση των μηοριοθετημένων διαφορών στον χάρτη. (Κάτω δεξιά) Επιφανειακή απεικόνιση των οριοθετημένων διαφορών στον χάρτη. Προσαρμογή από τους Richlan, Kronbichler, και Wimmer (2009) (Βλ. έγχρωμο σχήμα).

ράς του εγκεφάλου περισσότερο από ό,τι οι τελευταίοι, και οι τελευταίοι να ενεργοποιούν περιοχές της δεξιάς πλευράς περισσότερο από ό,τι οι πρώτοι (Maison et al., 2008· Richlan, Kronbichler & Wimmer, 2009), αν και πρέπει να ση-

μειωθεί ότι τα ευρήματα σχετικά με τη δεξιά πλευρά του εγκεφάλου είναι λιγότερο ισχυρά στις μετα-αναλύσεις (Richlan, Kronbichler & Wimmer, 2011). Υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τους πιθανούς μηχανισμούς αυτής της διαταραχής και είναι πιθανό ότι είτε επηρεάζεται η λειτουργικότητα αυτών των περιοχών είτε υπάρχει μία ανωμαλία στη μεταβίβαση πληροφοριών. Για παράδειγμα, αναφορικά με τον πρώτο μηχανισμό έχει διατυπωθεί η υπόθεση ότι ο φλοιός της νήσου, ως πιθανό στοιχείο ένωσης μεταξύ των οπίσθιων και μετωπιαίων γλωσσικών περιοχών, δεν λειτουργεί σωστά σε άτομα με δυσλεξία (Paulesu et al., 1996). Σε σχέση με τον δεύτερο μηχανισμό έχει προταθεί ότι η δυσλεξία μπορεί να προκύψει από μια «λειτουργική αποδιοργάνωση» των δύο οπίσθιων περιοχών του δικτύου (ραχιαίας και κοιλιακής) (Horwitz, Rumsey & Donohue, 1998· Ligges & Blanz, 2007· Pugh et al., 2000· Shaywitz et al., 2007).

Όπως αναφέρεται στο δεύτερο κεφάλαιο, η ανάγνωση είναι πλέον ευρέως αντιληπτή ως μία πολύπλοκη διεργασία συνιστωσών. Σύμφωνα με αυτήν την αντίληψη, υπάρχουν όλο και περισσότερες ενδείξεις ότι αρκετές περιοχές του εγκεφάλου, είτε μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό, υποστηρίζουν με διαφορετικό τρόπο ξεχωριστές συνιστώσες της ανάγνωσης (Katzir, Misra & Poldrack, 2005· Vigneau et al., 2006). Για παράδειγμα, η φωνολογική επεξεργασία θεωρείται ότι πραγματοποιείται στις άνω κροταφικές περιοχές, οι οποίες εκτελούν τις διεργασίες αντιστοίχισης γραφήματος-φωνήματος και στις κάτω μετωπιαίες περιοχές, οι οποίες λειτουργούν ως συστήματα φωνολογικής επανάληψης (Fiez et al., 2006· Jobard, Crivello & Tzourio-Mazoyer, 2003). Δεδομένου ότι ο αριθμός των μελετών αυξάνεται, δικαιολογείται να υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη διαφοροποίηση. Για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι οι αριστερές κροταφοβρεγματικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της υπερχειλίας έλικας, εμπλέκονται κατά κύριο λόγο στον αισθησιοκινητικό μετασχηματισμό και τη φωνολογική και σημασιολογική επεξεργασία (Shalom & Poeppel, 2008) και ότι ο μέσος άνω κροταφικός φλοιός (*temporal cortex*) είναι σημαντικός κυρίως για την ανάλυση ομιλίας-ήχου (Aylward et al., 2003· Brambati et al., 2004· Brown et al., 2001· Eckert, 2004· Paulesu et al., 2001). Η αριστερή κάτω κροταφοϊνιακή έλικα/ατρακτοειδής έλικα έχει συσχετιστεί με την ταχεία αναγνώριση οπτικής λέξης (Brambati et al., 2004· Brown et al., 2001· Kronbichler et al., 2008· Shaywitz et al., 2002· Silani et al., 2005· Simos et al., 2002· Turkeltaub et al., 2002), αν και έχει αμφισβητηθεί η συσχέτισή της όταν πρόκειται για πραγματικές λέξεις, καθώς φαίνεται να εμπλέ-

κεται στην αποκωδικοποίηση ψευδολέξεων (Jobard et al., 2003). Ωστόσο, είναι πιθανό η λειτουργική σημασία της να διαφέρει στους τυπικούς και άτυπους αναγνώστες (Wimmer et al., 2010).

Συνοψίζοντας λοιπόν, περισσότερο από τριάντα χρόνια ερευνών σχετικά με τον μηχανισμό του εγκεφάλου που διέπει την ανάγνωση, έχουν καταλήξει σε μια ευρέως αποδεκτή πολυσυστατική αναγνωστική οδό. Η θέση αυτή αναφέρεται μερικώς σε διάφορες ψυχολογικές πτυχές της ανάγνωσης (δηλαδή, τη δρομολόγηση συγκεκριμένων συστατικών της ανάγνωσης, όπως η φωνολογική επεξεργασία και η αναγνώριση λέξεων μέσα από διαφορετικές ανατομικές δομές του εγκεφάλου). Υπογραμμίζει, επίσης, την κυρίαρχη ενεργοποίηση του αριστερού ημισφαιρίου στα τυπικώς αναπτυσσόμενα άτομα. Σε αντίθεση, στους φτωχούς αναγνώστες τείνει να υποενεργοποιείται η οδός του αριστερού ημισφαιρίου κατά την ανάγνωση και να υπερενεργοποιείται η οδός του δεξιού ημισφαιρίου.

Μεταθανάτιες έρευνες

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, οι θεωρίες που συνδέουν τη σοβαρή αναγνωστική δυσκολία με τη λειτουργία του εγκεφάλου (ή, πιο συγκεκριμένα, με άγνωστες εγκεφαλικές βλάβες) διατυπώθηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα (Berlin, 1887· Hinshelwood, 1895). Ο Berlin (1887) υπήρξε ο πρώτος που υπέθεσε ότι η δυσλεξία προερχόταν από κάποιο είδος εγκεφαλικής βλάβης. Ο Hinshelwood (1895) πρότεινε ότι ο εντοπισμός αυτής της αλλοίωσης ήταν στον αριστερό ινιακό και βρεγματικό λοβό. Ο Morgan (1896) πιο συγκεκριμένα πρότεινε τη συμμετοχή τηςγωνιάδους έλικας – μια υπόθεση που τεκμηριώθηκε από τον Hinshelwood (1902) υπό το φως των ευρημάτων μίας αυτοψίας ενός ασθενούς, τον οποίο παρακολούθησε για πολλά χρόνια. Αυτές οι πρώτες θεωρήσεις αναπτύχθηκαν περισσότερο από τον Samuel Orton (Orton, 1937), ο οποίος υποστήριξε ότι, δεδομένης της πολυπλοκότητας της ανάγνωσης, οι ερευνητές θα πρέπει να σκεφτούν πέρα από τηνγωνιάδη έλικα ή ακόμα και πέρα από τον ινιακό (*parietal lobe*) και βρεγματικό λοβό (*occipital lobe*) και να κινηθούν σε άλλες περιοχές του αριστερού ημισφαιρίου του εγκεφάλου. Ο Orton (1937) εισήγαγε τη θεωρία της ελλιπούς εγκεφαλικής κυριαρχίας (*poor cerebral domi-*

nance hypothesis). Παρά το γεγονός ότι, σε γενικές γραμμές, δεν επιβεβαιώθηκε η συγκεκριμένη θεωρία του Orton, σίγουρα προσέφερε πολλές οξυδερκείς ιδέες, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι σχετίζονται με τη διαρκώς αυξανόμενη προσπάθεια κατανόησης της ανάγνωσης γενικότερα και της αναγνωστικής δυσκολίας, ειδικότερα.

Παρόλα αυτά, οι απόψεις αυτές των πρώτων κλινικών γιατρών παρέμειναν ως επί το πλείστον μόνο ιδέες για πολλές δεκαετίες μέχρις ότου άρχισαν να συγκεντρώνονται τα πρώτα συστηματικά ερευνητικά στοιχεία. Έτσι, ο Drake (1968) παρουσίασε μια περίπτωση αυτοψίας ενός αγοριού με αναγνωστική δυσκολία, το οποίο πέθανε από εγκεφαλική αιμορραγία που είχε προκληθεί από μια αγγειακή δυσπλασία, και του οποίου ο εγκέφαλος περιείχε μια σειρά από αποκλίνοντες σχηματισμούς του εγκεφάλου στη φλοιώδη έλικα του κάτω αριστερά βρεγματικού λοβού. Οι δυσπλασίες αυτές περιελάμβαναν εκτοπίες – μικρές περιοχές από μη φυσιολογικές θέσεις των νευρώνων, οι οποίες προκαλούνται από φλοιώδη δυσγενεσία– στην υποφλοιώδη λευκή ουσία του εγκεφάλου. Αξιοποιώντας τα ευρήματα του Orton και τις παρατηρήσεις άλλων αυτοψιών φτωχών αναγνωστών, ο Geschwind και οι συνεργάτες του (Geschwind & Levitsky, 1968) πρότειναν ότι η παρουσία μικρών εγκεφαλικών ανωμαλιών προκαλούσε μία καθυστερημένη πλευρίωση της γλώσσας, η οποία, με τη σειρά της, οδηγούσε σε διαταραγμένη κατάκτηση της ανάγνωσης. Οι μαθητές του Geschwind (Galaburda et al., 1985) συνέχισαν με μεταθανάτιες έρευνες ατόμων με δυσλεξία και ανέφεραν την παρουσία εκτοπιών στον ακουστικό φλοιό (*auditory cortex ectopias*) (Galaburda & Kemper, 1979), τον έξω (Livingstone et al., 1991) και έσω γονάτιο πυρήνα (*geniculate nuclei*) (Galaburda, Menard & Rosen, 1994), τον πρωτογενή οπτικό φλοιό (*primary visual cortex*) (Jenner, Rosen, & Galaburda, 1999) και την παρεγκεφαλίδα (*cerebellum*) (Finch, Nicolson & Fawcett, 2002). Επιπλέον, οι ερευνητές έχουν αναφέρει ποιοτικές διαφορές σε ορισμένους νευρώνες που παρατηρούνται σε άτομα με αναγνωστικές δυσκολίες, σε σύγκριση με τους νευρώνες των τυπικών αναγνωστών. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι σε διάφορες δομές του θαλάμου, οι νευρώνες των φτωχών αναγνωστών είναι μικρότεροι, περισσότερο μεταβλητοί σε μέγεθος και σχήμα, και περισσότερο αποδιοργανωμένοι (Galaburda, Schrott & Sherman, 1996· Livingstone et al., 1991). Παρουσιάζει, επίσης, ενδιαφέρον ότι έχουν υπάρξει αναφορές για διαφορές μεταξύ των δύο φύλων στις κατανομές των εκτοπιών,

έτσι ώστε οι εγκέφαλοι των φτωχών γυναικών αναγνώστριών να έχουν λιγότερες και σε διαφορετικά σημεία μικροφλοιικές δυσπλασίες (Humphreys, Kaufmann & Galaburda, 1990).

Οι παρατηρήσεις αυτές, καθώς και η παρουσία κοινών στοιχείων από γενετικές μελέτες που αφορούν στην αναγνωστική δυσκολία, τεκμηριώνουν την υπόθεση ότι η δυσκολία αυτή σχετίζεται τουλάχιστον εν μέρει με προγεννητικές δυσγενεσίες του εγκεφάλου, οι οποίες προκαλούνται από αποκλίσεις στη διαδικασία της νευρωνικής μεταβίβασης, με αποτέλεσμα να μην καταφέρνουν οι νευρώνες να φτάσουν στον φυσιολογικό τους στόχο. Τέτοιες δυσγενεσίες με τη σειρά τους θα μπορούσαν να προκληθούν από ποικίλα περιστατικά, όπως ισχαιμικούς τραυματισμούς που προκαλούνται από αυτοάνοση βλάβη των τοιχωμάτων των αγγείων και οι οποίοι οδηγούν σε μικροτραυματισμούς του φλοιού, σε ουλές και ακανόνιστη ροή του αίματος (Galaburda et al., 1996).

Άλλη μία σειρά ερευνών που προέρχονται από μεταθανάτιες έρευνες ατόμων με σοβαρή αναγνωστική δυσκολία βασίζονται στην υπόθεση της απόκλισης από την τυπική ασυμμετρία, η οποία είναι χαρακτηριστική στον μέσο ανθρώπινο εγκέφαλο (65%) (Geschwind & Levitsky, 1968), αλλά η οποία πιστεύεται ότι χαρακτηρίζει λιγότερο έναν εγκέφαλο ατόμου με δυσλεξία (Galaburda et al., 1985· Humphreys et al., 1990). Το επίκεντρο αυτών των ερευνών ήταν το κροταφικό πεδίο (*planum temporal*) (ειδικά το αριστερό πεδίο), το οποίο θεωρείται ότι είναι σημαντικό για το σχηματισμό της γλωσσικής πλευρίωσης (Galaburda, 1993· Shapleske, Rossell & Woodruff, 1999). Οι υποστηρικτές αυτής της θεωρίας προτείνουν ότι η δυσλεξία είναι μια διαταραχή της γλωσσικής πλευρίωσης, της οποίας το βιολογικό υπόστρωμα αποτελεί μία πρόκληση του κροταφικού πεδίου (και, αντίστοιχα, μία μεταβαλλόμενη ασυμμετρία του αριστερού και του δεξιού πεδίου). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές αμφισβήτησαν την υπόθεση της έλλειψης ασυμμετρίας (*lack of asymmetry hypothesis*) (Livingstone et al., 1991) και αντιθέτως, παρέχουν στοιχεία για μια διογκωμένη αριστερόστροφη ασυμμετρία (Leonard & Eckert, 2008).

Εν ολίγοις, το πεδίο της νευροεπιστήμης του «αναγινώσκοντος εγκεφάλου» ξεκίνησε με ελάχιστες μεταθανάτιες έρευνες του εγκεφάλου (*postmortem brain function studies*) και για περισσότερο από έναν αιώνα έχει εξελιχθεί σε μια σειρά από πολύπλοκους, ερευνητικά δραστήριους και ελκυστικούς υποτομείς. Οι πρώιμες μεταθανάτιες έρευνες χαρακτηρίστηκαν από πολλές μεθοδο-

λογικές αδυναμίες (π.χ. από συμπεριφορικής απόψεως οι συμμετέχοντες δεν χαρακτηρίζονταν υγιείς· οι ίδιοι και οι εγκέφαλοί τους ήταν αρκετά ετερογενείς και το μέγεθος του δείγματος ήταν μικρό –συνήθως κυμαινόταν από ένα άτομο έως έναν αρκετά μικρό αριθμό ατόμων), έτσι ώστε καμία από αυτές τις πρώτες αναφορές δεν θα μπορούσε σήμερα να δημοσιευθεί σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και τα πορίσματά τους θα ήταν δύσκολο να αναπαραχθούν, πόσο μάλλον να γενικευθούν. Ωστόσο, οι μελέτες αυτές θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως επαναστατικές βάσει της κύριας υπόθεσής τους –όλες υπέθεταν ότι η αρχή της ανάγνωσης σε γενικές γραμμές και της αναγνωστικής δυσκολίας ειδικότερα βρίσκεται στον εγκέφαλο.

Μελέτες της ανατομικής δομής

Τα ευρήματα από τις πρώιμες μεταθανάτιες έρευνες αποτέλεσαν μια χρήσιμη πλατφόρμα για να ξεκινήσει η νευροεπιστήμη της ανάγνωσης, οπότε και αναπτύχθηκαν οι κατάλληλες *in vivo* τεχνικές, όπως η MRI. Οι νέες αυτές τεχνικές ήταν σε θέση να απεικονίσουν τη δομή του εγκεφάλου αναλύοντας μετρήσεις, όπως της μακροσκοπικής απεικόνισης είτε μέσω απεικόνισης μονάδων όγκου (*voxel*) (μορφομετρία βασισμένη σε ογκο-στοιχείο [*voxel-based morphometry*] [*VBM*]), της φλοιώδους επιφάνειας (*cortical surface*) και του πάχους της και της απεικόνισης τανυστή διάχυσης (*DTI*) της μυελώδους δομής. Τα κύρια ερωτήματα που τέθηκαν από αυτήν την ομάδα των μελετών επικεντρώνονται στο ποιες δομές του εγκεφάλου εμπλέκονται στη διαδικασία της ανάγνωσης και ποιος είναι ο βαθμός εμπλοκής τους.

Η χρήση απεικονιστικών μελετών του «αναγιγνώσκοντος εγκεφάλου» *in vivo* επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των πρώιμων μεταθανάτιων ερευνών· αυτές έδειξαν την παρουσία ενός αριθμού ανωμαλιών σε διάφορες δομές του εγκεφάλου σε άτομα με αναγνωστική δυσκολία. Μια συνόψιση αυτών των μελετών (Leonard et al., 2001) υπογραμμίζει την παρουσία μιας εντοπισμένης δεξιόστροφης εγκεφαλικής ασυμμετρίας (*cerebral asymmetry*), μιας εντοπισμένης αριστερόστροφης ασυμμετρίας του πρόσθιου λοβού της παρεγκεφαλίδας και ενός συνδυασμού αριστερόστροφης ασυμμετρίας του πεδίου και του οπίσθιου ανιόντος κλάδου της σχισμής Sylvian και μία μεγάλη επικάλυψη της

έλικας Heschl. Πιο συγκεκριμένα, ωστόσο, οι ανωμαλίες έχουν αναφερθεί στο κροταφικό πεδίο (*corpus callosum*), το μεσολόβιο και την παρεγκεφαλίδα.

Μαγνητική Τομογραφία (MRI). Το Κροταφικό πεδίο. Ένα σημαντικό μέρος των ερευνών έχει επεκτείνει τα ευρήματα των μεταθανάτιων ερευνών του κροταφικού πεδίου. Αναφέρεται ότι το 60–70% του γενικού πληθυσμού έχει αριστερόστροφη ασυμμετρία· έχει, επίσης, σημειωθεί ότι η έλλειψη αριστερόστροφης ασυμμετρίας– ή η παρουσία δεξιόστροφης ασυμμετρίας συνδέεται με διάφορα γλωσσικά ελλείμματα (Dorsaint–Pierre et al., 2006· Foster et al., 2002). Αντίστοιχα, τα άτομα με αναγνωστική δυσκολία, ως ομάδα, τείνουν να επιδεικνύουν μικρότερη αριστερόστροφη και μεγαλύτερη δεξιόστροφη ασυμμετρία (Hynd et al., 1990· Larsen et al., 1990· Rumsey, Donohue et al., 1997). Βέβαια, δεν υποδεικνύουν όλες οι μελέτες την παρουσία συμμετρίας ή αποκλίνουσας ασυμμετρίας (Heiervang et al., 2000). Επιπλέον, υπάρχουν αναφορές ότι ενώ το δεξιό κροταφικό πεδίο μπορεί να είναι παρόμοιο, το αριστερό μπορεί να είναι μικρότερο στα άτομα με αναγνωστική δυσκολία σε σχέση με τους τυπικούς αναγνώστες (Hugdahl et al., 2003). Επιπλέον, υπήρξαν αναφορές για εκτεταμένη αριστερόστροφη ασυμμετρία του κροταφικού πεδίου (Chiarello et al., 2006). Ενδιαφέρον, επίσης, προκαλεί το γεγονός ότι σε δείγματα ατόμων με αναγνωστική δυσκολία, οι αποκλίσεις από τα μοτίβα συμμετρίας και ασυμμετρίας έχουν παρατηρηθεί όχι μόνο στο κροταφικό πεδίο, αλλά σε μια ποικιλία δομών και περιοχών του εγκεφάλου (Duara et al., 1991· Habib et al., 1995· Kushch et al., 1993).

Μεσολόβιο. Μόνο λίγες μελέτες MRI έχουν συγκρίνει το μέγεθος και το σχήμα/δομή του μεσολοβίου μεταξύ των ατόμων με και χωρίς αναγνωστική δυσκολία. Οι μελέτες αυτές ακολουθούν τουλάχιστον εν μέρει την παραδοχή ότι η επεξεργασία των φωνολογικών ερεθισμάτων απαιτεί τη μεταφορά των πληροφοριών σε αυτή τη δομή του εγκεφάλου (Badzakova–Trajkon, Hamm & Waldie, 2005). Αν και η ελλειπής δυνατότητα μεταφοράς στο μεσολόβιο έχει αναφερθεί ότι χαρακτηρίζει τους φτωχούς αναγνώστες (Fabbro et al., 2001), τα ευρήματα από διάφορες μελέτες είναι αντιφατικά (Beaton, 1997). Συγκεκριμένα, μερικοί ερευνητές έχουν αναφέρει ένα μεγαλύτερο μεσολόβιο στους φτωχούς αναγνώστες (Duara et al., 1991· Rumsey et al., 1996), ενώ άλλοι έχουν βρει ότι

είναι μικρότερο (Hynd et al., 1995· Larsen, Høien & Odegaard, 1992· von Plessen et al., 2002) ή δεν έχουν βρει καμία διαφορά (Casanova et al., 2004).

Παρεγκεφαλίδα. Παρόμοιες συγκρίσεις μεταξύ των φτωχών και των τυπικών αναγνωστών έχουν επικεντρωθεί σε διαφορές στην παρεγκεφαλίδα. Εδώ, τα αποτελέσματα φαίνεται να συγκλίνουν μεταξύ τους (Casanova et al., 2004· Eckert et al., 2003· Leonard et al., 2001· Middleton & Strick, 1997· Schmahmann & Pandya, 1997). Αυτή η συμφωνία έγκειται στο ότι στα άτομα με αναγνωστική δυσκολία, ο δεξιός πρόσθιος λοβός της παρεγκεφαλίδας, η αμφίπλευρη τριγωνική μοίρα και ο συνολικός όγκος του εγκεφάλου είναι συχνά μικρότερα (Eckert et al., 2003). Επιπλέον, τα παιδιά με αναγνωστική δυσκολία μπορεί να εμφανίσουν μικρότερη δεξιόστροφη ασυμμετρία του ημισφαιρίου της παρεγκεφαλίδας (Kibby et al., 2008).

Μορφομετρία βασισμένη σε Ογκοστοιχείο. Η Μορφομετρία βασισμένη σε Ογκοστοιχείο voxel (*VBM*) είναι μια προσέγγιση που επιτρέπει την εξέταση της φαιάς ουσίας (*gray matter*) και των περιοχών του εγκεφαλονωτιαίου υγρού (*cerebrospinal fluid*) σε όλον τον εγκέφαλο, καθώς, επίσης, και τη μέτρηση βασισμένη σε μία voxel-by-voxel ανάλυση (Mechelli et al., 2005). Η μειωμένη φαιά ουσία μπορεί να αντανακλά μια περιφερειακή μείωση στο νευρωνικό αριθμό ή στο νευροπίλημα (Selemon & Goldman-Rakic, 1999). Η αυξημένη φαιά ουσία μπορεί να αντικατοπτρίζει την κατηγοριοποίηση των δυσπλασιών και των εκτοπιών της φαιάς ουσίας (Barkovich & Kuzniecky, 2000).

Αρκετές μελέτες έχουν συγκρίνει την ποσότητα της φαιάς ουσίας (δηλαδή, το ποσό της μάζας του εγκεφάλου που παράγεται από το νευρωνικό σώμα, το νευροπίλημα, τα νευρογλοιακά κύτταρα και τα τριχοειδή αγγεία) σε άτομα με αναγνωστική δυσκολία και ομάδες ελέγχου σε δείγματα από διάφορες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Αυστραλίας, της Γαλλίας, της Γερμανίας, της Ιταλίας, της Νορβηγίας και των Ηνωμένων Πολιτειών (Peterson & Pennington, 2012). Αν και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν αποκλίνουν αρκετά μεταξύ τους, δείχνουν σταθερά κάποιες αλλαγές της φαιάς ουσίας στους φτωχούς αναγνώστες. Συγκεκριμένα, οι φτωχοί αναγνώστες φαίνεται να έχουν λιγότερη φαιά ουσία:

- στο αριστερό μηνιοειδές λοβίο της παρεγκεφαλίδας (Eckert et al., 2003)·
- στο δεξιό πρόσθιο λοβό της παρεγκεφαλίδας, στη δεξιά και αριστερή τριγωνική μοίρα, στην αριστερή και δεξιά γλωσσική έλικα, στον αριστερό κάτω βρεγματικό λοβίο, και στην παρεγκεφαλίδα (Eckert et al., 2005)·
- στον αριστερό κροταφικό λοβό και την πρόσθια περιοχή· στην αριστερή περιοχή του βρεγματικού (Hoefl et al., 2007)·
- στην αμφίπλευρη ατρακτοειδή έλικα, την αμφίπλευρη πρόσθια παρεγκεφαλίδα και τη δεξιά υπερχειλία έλικα (Kronbichler et al., 2008)·
- στους δύο λοβούς, ειδικότερα στον αριστερό κροταφικό λοβό, στη μέση και κάτω κροταφική έλικα (Steinbrink et al., 2008· Vinckenbosch, Robichon & Eliez, 2005)·
- στο κροταφικό πεδίο αμφιπλεύρως, στον κάτω κροταφικό φλοιό και στον πυρήνα της παρεγκεφαλίδας (Brambati et al., 2004)·
- στο αριστερό κροταφικό λοβό και αμφιπλεύρως στην κροταφική–βρεγματική–ινιακή συνδέσμωση, αλλά, επίσης, και στο μετωπιαίο λοβό, στον κερκοφόρο, στο θάλαμο και στην παρεγκεφαλίδα (Brown et al., 2001)· και
- στο δεξιό οπίσθιο ανώτερο βρεγματικό λοβίο, στο προσφηνοειδές και στη δεξιά συμπληρωματική κινητική περιοχή (Menghini et al., 2008). Επιπλέον, έχουν αναφερθεί μεταβαλλόμενες αναλογίες της φαιάς και της λευκής ουσίας στο αριστερό ημισφαίριο (Sandu et al., 2008), αν και αυτό το εύρημα δεν βρέθηκε στη μελέτη των Casanova et al. (2004). Τέλος, υπάρχουν, επίσης, αναφορές ότι στα άτομα με αναγνωστική δυσκολία, ορισμένες περιοχές του εγκέφαλου έχουν αυξημένη πυκνότητα φαιάς ουσίας και πιο συγκεκριμένα στην προκεντρική έλικα, αμφιπλεύρως (Frye et al., 2010· Silani et al., 2005· Vinckenbosch et al., 2005).

Απεικόνιση Τανυστή Διάχυσης. Η Απεικόνιση Τανυστή Διάχυσης (*DTI*) είναι μια τεχνική μαγνητικής τομογραφίας που επιτρέπει την απεικόνιση και τον χαρακτηρισμό της λευκής ουσίας (δηλαδή, τους νευράξονες στον εγκέφαλο). Η *DTI* μπορεί να παράσχει μοναδικές πληροφορίες σχετικά με την ακεραιότητα των σχηματισμών της λευκής ουσίας (ανισοτροπία) και τη συνδεσιμότητα (παρακολούθηση ινών) στον ανθρώπινο εγκέφαλο (Feldman et al., 2010). Επιπλέον, με τη χρήση *DTI* είναι δυνατόν να ληφθούν ποσοτικές μετρήσεις (δηλαδή, η μέση διαχυτότητα και η κλασματική ανισοτροπία (*fractional anisotropy*)), οι

οποίες αντανακλούν ιδιότητες των υποκείμενων ιστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατασκευή δεικτών τόσο της τυπικής όσο και των χαρακτηριστικών της άτυπης ωρίμανσης του εγκεφάλου (Lim & Helpert, 2002).

Αποτελώντας μια σχετικά πρόσφατη μεθοδολογική εξέλιξη, η DTI δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στον τομέα της αναγνωστικής δυσκολίας, αν και συνεχώς αναφέρονται όλο και περισσότερες σχετικές μελέτες (Hasan et al., 2012· Lebel et al., 2013· Van–dermosten et al., 2012· Yeatman et al., 2012). Η DTI έχει χρησιμοποιηθεί τόσο για τη δημιουργία όσο και για την ποσοτικοποίηση της σύνδεσης μεταξύ των ατομικών διαφορών στην μικροδομή της λευκής ουσίας και των ατομικών διαφορών σε διάφορους δείκτες ανάγνωσης. Σε γενικές γραμμές, οι μελέτες αυτές έχουν δείξει μία συσχέτιση μεταξύ μίας χαμηλότερης συλλογικής ανισοτροπίας και μίας χαμηλότερης επίδοσης σε διάφορες δοκιμασίες ανάγνωσης τόσο στους τυπικούς όσο και στους φτωχούς αναγνώστες (Beaulieu et al., 2005· Deutsch et al., 2005· Klingberg et al., 1999· Niogi & McCandliss, 2006).

Οι μελέτες DTI έχουν σκιαγραφήσει τις κύριες οδούς της λευκής ουσίας, οι οποίες φαίνονται να είναι σημαντικές για την απόκτηση των αναγνωστικών δεξιοτήτων –τον ανώτερο ακτινωτό στέφανο, το μεσολόβιο (Hasan et al., 2012) και την ανώτερη επιμήκη δεσμίδα (*superior longitudinal fasciculus*) (SLF) (Ben–Shachar, Dougherty & Wandell, 2007). Επιπλέον, σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου βρέθηκαν χαμηλότερες τιμές κλασματικής ανισοτροπίας στις αμφίπλευρες οδούς της λευκής ουσίας στο μετωπιαίο, κροταφικό, ινιακό και βρεγματικό λοβό (δηλαδή, στον όλο εγκέφαλο) των φτωχών αναγνωστών (Richards et al., 2008· Steinbrink et al., 2008). Υπήρξαν, επίσης, προσπάθειες να συνδυαστεί η ιχνογράφηση (*tractography*) (μια τεχνική οπτικής μοντελοποίησης) με αναλύσεις περιοχών–ενδιαφέροντος (*region–of–interest analyses*) για τον εντοπισμό συγκεκριμένων θερμών σημείων στον εγκέφαλο που μπορεί να κατευθύνουν τις συσχετίσεις μεταξύ της κλασματικής ανισοτροπίας και των ειδικών αναγνωστικών δεξιοτήτων. Για παράδειγμα, μια μελέτη έχει συσχετίσει τα αποτελέσματα της αναγνώρισης μεμονωμένων λέξεων με τους δείκτες κλασματικής ανισοτροπίας του ανώτερου ακτινωτού στεφάνου (Beaulieu et al., 2005). Αν και αυτό το εύρημα είναι ενδιαφέρον, έχει αμφισβητηθεί από δύο μελέτες περίπτωσης (Keller & Just, 2009· Yeatman et al., 2009), οπότε απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να αποσαφηνιστεί αυτή η ασυμφωνία.

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, υπήρξαν σχετικά λίγες DTI έρευνες στην αναγνωστική δυσκολία και τα ευρήματά τους έχουν αποδειχθεί εν μέρει ασυνεπή (για παράδειγμα, σε μία μελέτη [Andrews et al., 2010], βρέθηκε μια θετική συσχέτιση μεταξύ της κλασματικής ανισοτροπίας του μεσολοβίου και των αποτελεσμάτων στην αναγνωστική επίδοση, αλλά σε μια άλλη μελέτη [Dougherty et al., 2007], η σχέση αυτή αποδείχθηκε αρνητική). Ωστόσο, η εικόνα που προκύπτει από αυτές τις έρευνες φανερώνει ότι η αναγνωστική δυσκολία είναι μια νευροαναπτυξιακή κατάσταση που αφορά στην αποσύνδεση της εγκεφαλικής δομής και της λειτουργίας. Ωστόσο, φαίνεται ότι η διεργασία αυτή είναι ευμετάβλητη, καθώς η ανάπτυξη και η μυελίνωση της λευκής ουσίας φαίνεται να είναι ευαίσθητες στην εμπειρία: δηλαδή, μπορούν να αλλάξουν, όπως και ορισμένα μουσικά κομμάτια ακούγονται σε υψηλές (ή υψηλότερες) συχνότητες και ένταση (Fields, 2008· Mattson, 2002). Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μια μελέτη στην οποία καταγράφηκαν μικρές αλλαγές στην λευκή ουσία (συγκεκριμένα αυξήθηκε σημαντικά η κλασματική ανισοτροπία σε μια περιοχή του αριστερού πρόσθιου ημιωοειδούς κέντρου) σε φτωχούς αναγνώστες, ηλικίας μεταξύ 8 και 10 ετών, των οποίων οι δεξιότητες φωνολογικής αποκωδικοποίησης είχαν βελτιωθεί μετά από 100 ώρες εντατικής ενισχυτικής διδασκαλίας (Keller & Just, 2009).

Εν συντομία, οι μελέτες DTI γενικώς παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές κλασματικής ανισοτροπίας στην αριστερή κροταφοβρεγματική και μετωπιαία περιοχή στους φτωχούς αναγνώστες. Ο εντοπισμός αυτών των περιοχών αποτελεί αντικείμενο συζήτησης, με τις περισσότερες μελέτες να τις τοποθετούν στην αριστερή SLF και τον ακτινωτό στέφανο και τις λιγότερες εξ αυτών, στο οπίσθιο μέρος του μεσολοβίου ή στην κοιλιακή δεσμίδα, όπως η κατώτερη επιμήκης δεσμίδα ή η κατώτερη μετωπο-νιακή δεσμίδα (Vandermosten et al., 2012). Ερμηνεύοντας τα ευρήματα της DTI, ο Gabrieli (2009) πρότεινε ότι στην περίπτωση της αναγνωστικής δυσκολίας υπάρχει μια έλλειψη ισορροπίας στις οδούς της λευκής ουσίας που υποστηρίζουν την ανάγνωση: στην πραγματικότητα, φαίνεται να μην προεκτείνονται πολύ στο δίκτυο πρωτογενούς ανάγνωσης (γι' αυτό υπάρχει υποενεργοποίηση των συνιστωσών του δικτύου στο αριστερό ημισφαίριο), ενώ αντίθετα υπερεξέχουν πολύ μεταξύ των ημισφαιρίων (γι' αυτό υπάρχει υπερενεργοποίηση των συνιστωσών του δικτύου στο δεξιό ημισφαίριο).

Μελέτες εγκεφαλικής λειτουργίας

Η Λειτουργική απεικόνιση είναι ένας τύπος απεικόνισης του εγκεφάλου που στοχεύει στην ανίχνευση ή την καταγραφή αλλαγών στον μεταβολισμό, τη ροή αίματος ή την περιφερειακή χημική σύσταση. Σε αντίθεση με τη δομική απεικόνιση, όπως συζητήθηκε νωρίτερα, η λειτουργική απεικόνιση αποκαλύπτει τις in-vivo αλλαγές του εγκεφάλου που προκαλούνται από συγκεκριμένους πειραματικούς χειρισμούς (π.χ. εισάγοντας μια σειρά γνωστικών δοκιμασιών), τις αλλαγές μοντελοποίησης που ασκούνται από τον εγκέφαλο, καθώς αυτός ενεργοποιείται σε συγκεκριμένες γνωστικές δραστηριότητες (π.χ. κατά την ανάγνωση) σε πραγματικές συνθήκες. Υπάρχουν πολλά είδη λειτουργικής απεικόνισης και μόνο μερικά από αυτά μπορούν να συζητηθούν εδώ. Παρά το γεγονός ότι αυτά βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες και διαφορετικές παραδοχές, αυτές οι μέθοδοι διερευνούν δύο βασικά ερωτήματα: (1) πώς λειτουργούν οι σχετιζόμενες με την ανάγνωση ανατομικές δομές του εγκεφάλου, ώστε να υποστηρίξουν την ανάγνωση και (2) πώς καθορίζονται από τον εγκέφαλο οι διάφορες γνωστικές διεργασίες που συμβάλλουν στην ανάγνωση.

Η λειτουργική απεικόνιση ελκύει ιδιαίτερα τους ερευνητές που ασχολούνται με την ανάγνωση, λόγω της δυνατότητάς της να συνεισφέρει πολύτιμα δεδομένα στις συζητήσεις σχετικά με τις θεωρίες της αναγνωστικής δυσκολίας. Σε αυτό το κομμάτι, εξετάζονται οι παράγοντες που σχετίζονται με τις φωνολογικές, οπτικές και θεωρίες της παρεγκεφαλίδας.

Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, το κεντρικό σημείο των φωνολογικών θεωριών της αναγνωστικής δυσκολίας εντοπίζεται στο ότι το κεντρικό έλλειμμα σχετίζεται με την ποιότητα των φωνημικών πληροφοριών ή/και την πρόσβαση σε αυτές (Ramus, 2004), καθώς η επεξεργασία τους και η αποθήκευσή τους λαμβάνει χώρα στον αριστερό άνω κροταφικό και κάτω μετωπιαίο φλοιό (Dufor et al., 2007) ή ίσως ακόμη και σε ολόκληρη την κροταφοβρεγματική περιοχή συμπεριλαμβανομένης της οπίσθιας κροταφικής περιοχής (Hoeft, προσωπικό σχόλιο, 2011). Συγκεκριμένα, πολλές μελέτες έχουν επισημάνει μία διαταραχή των αριστερών οπίσθιων συστημάτων του εγκεφάλου (*left posterior brain system*) που είναι γνωστό ότι εμπλέκονται στη διαισθητηριακή ενσωμάτωση των ακουστικών και οπτικών πληροφοριών και ως εκ τούτου επηρεάζουν την πραγματοποίηση συνδέσεων μεταξύ των ινιοκροταφικών και των κροτα-

φοβρεγματικών κυκλωμάτων (Shaywitz & Shaywitz, 2008). Όταν οι φτωχοί αναγνώστες εκτελούν φωνολογικές δοκιμασίες, τα οπίσθια συστήματα συχνά παρουσιάζουν μειωμένη ή ανύπαρκτη ενεργοποίηση. Αυτά τα ελλειμματικά περιγράμματα ενεργοποίησης θα μπορούσε είτε να είναι γνήσια, δηλαδή, ελλείμματα πρώτης τάξης ή παράγωγα, δηλαδή, ελλείμματα δεύτερης τάξης που προκύπτουν από διαταραχές στην ακουστική επεξεργασία, η οποία θα μπορούσε να εμποδίσει την απόκτηση των φωνηματικο-γραφημικών αντιστοιχίσεων, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη ορθών και αποτελεσματικών αναγνωστικών δεξιοτήτων.

Όπως έχει εκτενώς συζητηθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, η κεντρική παραδοχή των πιο δημοφιλών οπτικών θεωριών της αναγνωστικής δυσκολίας στηρίζεται στην προϋπόθεση της ύπαρξης οπτικών διαταραχών πρωτογενούς επιπέδου, οι οποίες σχετίζονται με ελλείμματα στο θαλαμικό μεγαλοκυτταρικό σύστημα. Αυτά εμφανίζονται ως αυξημένα όρια στην αντίληψη συχνοτήτων χαμηλής αντίθεσης, χαμηλών χωρικών ή υψηλότερων χρονικών συχνοτήτων, ανεπαρκούς ευαισθησίας στην οπτική αντίληψη της κίνησης και αμφίβολης ικανότητας για κατεύθυνση της προσοχής, εκτελώντας οφθαλμικές κινήσεις, και πραγματοποίηση οπτικής αναζήτησης (Livingstone et al., 1991· Lovegrove et al., 1980· Stein & Walsh, 1997). Μελέτες που ερευνούν διάφορες πτυχές της οπτικής επεξεργασίας στην αναγνωστική δυσκολία έχουν επισημάνει την ανάμειξη του θαλάμου (έξω γονατώδης πυρήνας) στα πρωτογενούς επιπέδου πρωτεύοντα ελλείμματα, του πρωτεύοντος οπτικού φλοιού, των ραχιαίων οπτικών περιοχών που λαμβάνουν μεγαλοκυτταρικά ερεθίσματα (Demb et al., 1998· Demb, Boynton, & Heeger, 1998)· και, για τα δευτερεύοντα ελλείμματα υψηλού επιπέδου, την ανάμειξη του κάτω κροταφικού φλοιού, της γωνιώδους / υπερχειλίας έλικας και της κάτω μετωπιαίας έλικας (Hoefl et al., 2007· Paulesu et al., 2001· Pugh et al., 2000).

Η βασική ιδέα στην οποία βασίζεται η θεωρία της παρεγκεφαλίδας (*cerebellar hypothesis*) είναι ότι η δυσλεξία είναι ένα είδος γενικής μαθησιακής διαταραχής που χαρακτηρίζεται από διαταραχή της αυτοματοποίησης των αισθησιοκινητικών διαδικασιών, οι οποίες είναι αποφασιστικής σημασίας τόσο στην ανάγνωση όσο και στη γραφή (Nicolson, Fawcett & Dean, 2001a, 2001b). Το νευρωνικό υπόστρωμα αυτών των ελλειμμάτων σχετίζεται με την ανώμαλη λειτουργία της πλευρικής παρεγκεφαλίδας (Doyon et al., 2002).

Οι μελέτες λειτουργικής απεικόνισης του εγκεφάλου του «αναγιγνώσκοντος εγκεφάλου» συνδέονται στενά με δομικές προσεγγίσεις, επεκτείνοντας το ερώτημα του τι (δηλαδή, ποιες ανατομικές δομές) στο πώς (δηλαδή, πώς αυτές οι δομές πραγματώνουν την ανάγνωση), καθώς και με τις γνωστικές θεωρίες της αναγνωστικής δυσκολίας. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο με τη διερεύνηση των γνωστικών διεργασιών που θεωρούνται σημαντικές για την αναγνωστική δυσκολία μέσω συγκεκριμένων πειραματικών δοκιμασιών, όσο και με τη στόχευση συγκεκριμένων περιοχών του εγκεφάλου που φαίνονται να αποτελούν υποστρώματα αυτών των διεργασιών.

Τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων. Τα ερευνητικά αποτελέσματα που χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (*positron emission tomography*) (*PET*) υποστηρίζουν, επίσης, την άποψη ότι τα περιγράμματα ενεργοποίησης του εγκεφάλου των φτωχών αναγνωστών είναι διαφορετικά σε σύγκριση με αυτά της ομάδας ελέγχου. Για παράδειγμα, σε μελέτες ατόμων με αναγνωστική δυσκολία έχει αναφερθεί υποενεργοποίηση στην αριστερή κροταφοβρεγματική περιοχή (Rumsey et al., 1992), τον αριστερό νησιωτικό φλοιό (Paulesu et al., 1996), την αριστερή ινιοκροταφική περιοχή (McCrory et al., 2005) και τις μετωπιαίες και βρεγματικές περιοχές του αριστερού ημισφαιρίου (Dufor et al., 2007). Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι όταν ενεργοποιούνταν ο δεξιός μετωπιαίος φλοιός, οι ενεργοποιημένες περιοχές ήταν μεγαλύτερες από ό,τι στην ομάδα ελέγχου (Dufor et al., 2007).

Λειτουργική μαγνητική τομογραφία. Η λειτουργική μαγνητική τομογραφία (*fMRI*) αποτελεί έναν εξειδικευμένο υπότυπο της μαγνητικής τομογραφίας και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αλλαγών στη ροή του αίματος που σχετίζονται με την εγκεφαλική νευρική δραστηριότητα. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η *fMRI* κυριαρχεί γενικότερα στον τομέα της χαρτογράφησης του εγκεφάλου, και ειδικότερα στον τομέα της ανάγνωσης, ιδιαίτερα λόγω της σχετικά χαμηλής διεισδυτικότητας, της σχετικά υψηλής διαθεσιμότητας, της απουσίας έκθεσης σε ακτινοβολία και της έλλειψης αναγκαιότητας για χορήγηση ειδικών χημικών παρακολούθησης.

Η *fMRI* έχει χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία μελετών που έχουν ως αντικείμενο την ανάγνωση. Καταρχήν, έχει χρησιμοποιηθεί στην αξιολόγηση υποθέσεων

σχετικά με τον φλοιώδη μηχανισμό που τεκμηριώνει την τυπική ανάγνωση (Schlaggar & McCandliss, 2007). Δεύτερον, έχει επιτρέψει τη σύγκριση αυτού του μηχανισμού στους τυπικούς και τους φτωχούς αναγνώστες, ώστε να διαφωτιστεί περαιτέρω η ιδιαιτερότητα επεξεργασίας αναγνωστικών ερεθισμάτων στην αναγνωστική δυσκολία (Corina et al., 2001· Eden et al., 1996· Georgiewa et al., 1999· Hoefft et al., 2006· Temple et al., 2001). Τρίτον, έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή πληροφοριών σχετικά με την πλαστικότητα του εγκεφάλου (*brain plasticity*). Η πλαστικότητα αυτή έχει αξιολογηθεί σε σχέση με (1) τις τυπικές αναπτυξιακές αλλαγές (δηλαδή, καθ' όλη τη διεργασία της κατάκτησης της ανάγνωσης) και (2) τις αλλαγές που προκύπτουν από την εισαγωγή εξειδικευμένων προγραμμάτων παρέμβασης (McCandliss & Noble, 2003· Simos et al., 2002).

Σε σχέση με την τυπική ανάπτυξη, η fMRI έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες με μορφωμένους ενήλικες για να καταγραφεί και να καθοριστεί η συμμετοχή του ανώτερου κροταφικού φλοιού (άνω κροταφική έλικα / άνω κροταφική αύλακα) και του ακουστικού φλοιού (η αύλακα Heschl / το κροταφικό πεδίο) στην αφομοίωση των γραμμάτων και των ήχων της ομιλίας (Raij, Utela, & Hari, 2000· van Attevelde, Formisano, Goebel & Blomert, 2004). Στη συνέχεια, τα ευρήματα αυτά επεκτάθηκαν με τη συμμετοχή ενηλίκων με αναγνωστική δυσκολία, οι οποίοι θεωρητικά διέφεραν από την ομάδα ελέγχου στην αφομοίωση γραμμάτων-ήχων (*letter-sound integration*) (Blau, van Attevelde, Ekkebus, Goebel & Blomert, 2009). Σε συμφωνία με τη θεωρία αυτή, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στους φτωχούς αναγνώστες υποενεργοποιείται η άνω κροταφική έλικα στην αφομοίωση των ερεθισμάτων γραμμάτων-λεκτικών ήχων, όταν παρουσιάζονται με παθητικό τρόπο. Συμπεριφορολογικά, αυτή η μειωμένη αφομοίωση σχετιζόταν άμεσα με μειωμένη ακουστική επεξεργασία των λεκτικών ήχων, η οποία με τη σειρά της συσχετίστηκε με χειρότερη επίδοση στις φωνολογικές δοκιμασίες (Blau et al., 2009). Σε σύγκριση με τον αριθμό των μελετών που έχουν διεξαχθεί με τη συμμετοχή ενηλίκων, εξακολουθούν να υπάρχουν σχετικά λίγες μελέτες fMRI που περιλαμβάνουν παιδιά (Richlan et al., 2011). Ωστόσο, τα ευρήματα από τις μελέτες αυτές δείχνουν σταθερά ότι, για τα παιδιά με αναγνωστική δυσκολία, υπάρχουν ενδείξεις υποενεργοποίησης στον περισιλούειο φλοιό και στην ινιοκροταφική έλικα (Cao et al., 2006· Shaywitz et al., 2002· Temple et al., 2001) και, πιο συγκεκριμένα, στο κροταφικό πεδίο/την αύλακα Heschl και την άνω κροταφική αύλακα (Blau et al., 2010). Αυτό συνδέεται, σε

πολλές αλλά όχι όλες τις περιπτώσεις, με αποκλίνοντα περιγράμματα ενεργοποίησης του μετωπιαίου φλοιού (Gabrieli, 2009· Maisog et al., 2008). Επιπλέον, μία ανάλυση του όλου εγκεφάλου (Blau et al., 2010) των μονοαισθητηριακών οπτικών και ακουστικών διαφορών των ομάδων αποκάλυψε μειωμένες μονοαισθητηριακές ανταποκρίσεις στα γράμματα στην ατρακτοειδή έλικα παιδιών με αναγνωστική δυσκολία, καθώς και μειωμένη δραστηριότητα στην επεξεργασία ομιλίας στην πρόσθια άνω κροταφική έλικα, το κροταφικό πεδίο/την αύλακα Heschl και την άνω κροταφική αύλακα. Αυτά τα αποτελέσματα είναι στατιστικά σημαντικά και ουσιαστικά· οι δείκτες της νευρικής αφομοίωσης των γραμμάτων και ήχων στο κροταφικό πεδίο/την αύλακα Heschl και οι δείκτες της νευρικής ανταπόκρισης στα γράμματα στην ατρακτοειδή έλικα εξηγεί συλλογικά σχεδόν το 40% της διακύμανσης της αναγνωστικής επίδοσης των παιδιών που συμμετέχουν. Αυτά τα ευρήματα φαίνεται να υποστηρίζουν την άποψη ότι η αφομοίωση γράμματος-ήχου αποτελεί ένα αναπόσπαστο χαρακτηριστικό της μάθησης της ανάγνωσης, το οποίο αναπτύσσεται ανεπαρκώς στους φτωχούς αναγνώστες.

Υπάρχουν επί του παρόντος δεκάδες fMRI μελέτες με αντικείμενο την ανάγνωση, η πλειοψηφία των οποίων, εκτός και εάν έχουν δημοσιευθεί από την ίδια ομάδα, δεν χαρακτηρίζεται από σύμπτωση απόψεων αναφορικά με τις θεωρητικές τους πλατφόρμες, την κατηγοριοποίηση των ομάδων σε τυπικούς και φτωχούς αναγνώστες, τις πειραματικές τους δοκιμασίες και τα εργαλεία ανάλυσής τους. Ωστόσο, ανεξάρτητα από τις μεθοδολογικές και θεωρητικές τους διαφορές, οι μελέτες σε παιδιά και ενήλικες παρέχουν σταθερές ενδείξεις ότι τα άτομα με αναγνωστικές δυσκολίες, ανεξάρτητα από το πώς αυτές ορίζονται και πώς ποσοτικοποιούνται, παρουσιάζουν ένα ελλιπές λειτουργικό προφίλ του αριστερού οπίσθιου συστήματος του εγκεφάλου. Η αιτία αυτής της ανεπάρκειας είναι ασαφής, αλλά θα μπορούσε να αντικατοπτρίζει τις διαταραχές είτε στη δομή είτε στις συνδέσεις μεταξύ της ραχιαίας και της κοιλιακής οδού στην ανάγνωση (Brunswick et al., 1999· Démonet, Taylor & Chaix, 2004· Helenius et al., 1999· Paulesu et al., 2001· Salmelin et al., 1996· Shaywitz et al., 1998· Simos, Breier, Fletcher et al., 2000· Simos, Breier, Wheless et al., 2000). Αξίζει να σημειωθεί ότι, ως ομάδα, τα άτομα με αναγνωστική δυσκολία χαρακτηρίζονται από μια αλλαγή στο μοτίβο των δραστηριοτήτων, οι οποίες, σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε μελέτης, μπορεί να χαρακτηριστούν ότι υπερκαλύπτουν

την πρόσθια αριστερή περιοχή ή τη δεξιά κροταφική και την περισιλούεια περιοχή του εγκεφάλου (Brunswick et al., 1999· Démonet et al., 2004· Georgiewa et al., 2002· B. Shaywitz et al., 2002· S. Shaywitz et al., 1998· Simos, Breier, Fletcher et al., 2000).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία των fMRI μελετών για την αναγνωστική δυσκολία αντλεί στοιχεία από τη θεωρία του φωνολογικού ελλείμματος. Ο αριθμός των μελετών, και ιδιαίτερα με δείγμα παιδιών, οι οποίες βασίζονται σε θεωρητικές προσεγγίσεις που αξιάνουν την παρουσία του οπτικού μεγαλοκυτταρικού ελλείμματος και/ή του ρυθμού ακουστικής επεξεργασίας και των ελλειμμάτων της παρεγκεφαλίδας, είναι περιορισμένος.

Ο συνδυασμός PET και fMRI. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες μετα-ανάλυσης προκειμένου να παρουσιάσουν μία εμπεριστατωμένη ανασκόπηση των μελετών με PET και fMRI σε αναγνώστες με ή χωρίς αναγνωστική δυσκολία. Οι Richlan, Kronbichler, και Wimmer (2009) διεξήγαγαν μία μετα-ανάλυση 17 μελετών λειτουργικής απεικόνισης (5 μελέτες με PET και 12 με fMRI). Η επιλογή προήλθε από ένα σύνολο μελετών στον τομέα της ανάγνωσης μέχρι το 2008, οι οποίες χρησιμοποίησαν λειτουργική απεικόνιση και ακολούθησαν συγκεκριμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού. Συμπεριλήφθηκαν εκείνες οι μελέτες όπου η ανάγνωση ή οι αναγνωστικές δοκιμασίες εμπειρείχαν οπτικά ερεθίσματα και τα αποτελέσματα ανέφεραν συντεταγμένες εγκεφάλου για τις διαφορές των ομάδων, αναφορικά με το μοτίβο τόσο της υποόσο και της υπερνεργοποίησης. Η πλειοψηφία (9) αυτών των μελετών πραγματοποιήθηκε με Άγγλους αναγνώστες (Booth et al., 2007· Cao et al., 2006· Hoeft et al., 2006· Hoeft et al., 2007· McCrory et al., 2005· Meyler et al., 2007· Paulesu et al., 1996· Rumsey, Nace et al., 1997· Temple et al., 2001). Σε τέσσερις δημοσιευμένες μελέτες (Georgiewa et al., 1999· Grünling et al., 2004· Kronbichler et al., 2006· Schulz et al., 2008) και μία αδημοσίευτη έρευνα (Richlan et al., 2009) συμμετείχαν Γερμανοί αναγνώστες. Σε άλλες μελέτες χρησιμοποιήθηκε δείγμα Ιταλών (Brambati et al., 2006) και Σουηδών (Ingvar et al., 2002)· μία μελέτη (Paulesu et al., 2001) συμπεριέλαβε δείγμα αναγνωστών της αγγλικής, γαλλικής και ιταλικής γλώσσας.

Αυτές οι μελέτες συμπεριελάμβαναν μια σειρά από πειραματικές δοκιμασίες: αντιστοίχιση οπτικού γράμματος και αντιστοίχιση γραμμής, αναγνώριση

ζεύγους ομοιοκατάληκτων γραμμάτων, διαμόρφωση φωνολογικών λεξιλογικών επιλογών, αναγνώριση ομοιοκατάληκτων ψευδολέξεων, αναγνώριση ομοιοκατάληκτων λέξεων, ανάγνωση λέξεων και κατονομασία εικόνων, αναγνώριση σημασιολογικών συσχετίσεων, σιωπηλή ανάγνωση, «φωναχτή» ανάγνωση, σιωπηλή ανάγνωση (*silent reading*) των προτάσεων με σημασιολογικά σύμφωνες ή ασύμφωνες καταλήξεις και κατανόηση πρότασης. Σε αυτήν τη μετα-ανάλυση, οι 17 μελέτες περιείχαν συνολικά 128 εστιασμένα σημεία στις περιοχές του εγκεφάλου με υπο- και υπερενεργοποίηση σε άτομα με αναγνωστική δυσκολία (βλ. σχήμα 3.2).

Από αυτή τη μετα-ανάλυση προέκυψαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Πρώτον, σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την οδό τριών συστημάτων ανάγνωσης (βλ. την αρχή αυτού του κεφαλαίου) που περιλαμβάνει το ραχιαίο (κροταφοβρεγματικό), το κοιλιακό (ινιοκροταφικό) και το πρόσθιο (κάτω μετωπιαίο) σύστημα. Δεύτερον, ο εντοπισμός αυτών των συστημάτων σε συγκεκριμένες ανατομικές δομές του εγκεφάλου αντιστοιχεί σε μεγάλο βαθμό με το συμπέρασμα των «αφηγηματικών» βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων (Démonet et al., 2004· Grigorenko, 2001· Habib, 2000· Heim & Keil, 2004· McCandliss & Noble, 2003· Pugh et al., 2000· Sandak et al., 2004· Shaywitz & Shaywitz, 2005· Temple, 2002). Ωστόσο, η αντιστοίχιση δεν ήταν ακριβής και τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης οδήγησαν σε ερωτήματα σχετικά με κάποιες από τις περιοχές που θεωρούνταν ζωτικής σημασίας στον τομέα της ανάγνωσης για πολλά χρόνια (π.χ. η γωνιώδης έλικα) και συγχρόνως παρουσιάστηκε η πιθανότητα νέων περιοχών (π.χ. υπερενεργοποιημένη γλωσσική έλικα). Τρίτον, τα αποτελέσματα σχηματοποίησαν τις περιοχές με τα υψηλότερα επίπεδα ενεργοποίησης. Συγκεκριμένα, η μέγιστη υποενεργοποίηση βρέθηκε στην κάτω βρεγματική, την άνω κροταφική, τη μεσαία και κάτω κροταφική και την ατρακτοειδή περιοχή του αριστερού ημισφαιρίου. Επιπλέον, η μέγιστη υποενεργοποίηση σχετικά με τις αριστερές μετωπιαίες ανωμαλίες τοποθετήθηκαν στην κάτω μετωπιαία έλικα, η οποία συνοδεύτηκε από υπερενεργοποίηση του πρωτεύοντος κινητικού φλοιού και του πρόσθιου νησιωτικού φλοιού. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μετα-ανάλυση δεν εντόπισε συγκεκριμένες πηγές ενεργοποίησης στο δεξιό ημισφαίριο ή την παρεγκεφαλίδα, οι οποίες να διαφοροποιούν τις ομάδες των φτωχών και τυπικών αναγνωστών· αυτό όμως, μπορεί να εξηγηθεί από ειδικές τεχνικές δυσκολίες που σχετίζονται με την fMRI του

όλου εγκεφάλου (Hoefl, προσωπικό σχόλιο, 2011). Οι αναλύσεις αποκάλυψαν μια σειρά από υπερενεργοποιημένες εστίες του δεξιού ημισφαιρίου, αλλά αυτές οι εστίες ήταν διάσπαρτες και οι αναλύσεις δεν μπορούν να οδηγήσουν σε μία ερμηνεύσιμη και αξιόπιστη ομαδοποίηση.

Ηλεκτροφυσιολογικές μελέτες (*electrophysiological studies*). Οι μελέτες που χρησιμοποιούν ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα (*EEG*) επιτρέπουν τη συλλογή σημαντικών στοιχείων, αφού διερευνούν τη χρονική διάσταση των γνωστικών διεργασιών, όταν χειρίζονται γραπτά σύμβολα. Στο πλαίσιο αυτό, το φάσμα του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος έχει μελετηθεί και έχει συγκριθεί τοπογραφικά σε σχέση με το μέσο εύρος κάθε μίας από τις πέντε ζώνες του EEG (δέλτα, θήτα, άλφα, αργή βήτα και γρήγορη βήτα) μεταξύ των ομάδων των ατόμων με αναγνωστική δυσκολία και ομάδων ελέγχου. Έχει αναφερθεί ότι τα πολλαπλά πρότυπα δραστηριότητας σε πολλαπλές περιοχές διακρίνουν τα άτομα με και χωρίς αναγνωστική δυσκολία. Έτσι, τα παιδιά με προβλήματα ανάγνωσης δείχνουν αυξημένη αργή δραστηριότητα (δέλτα και θήτα) στην πρόσθια και δεξιά κροταφική περιοχή (Arns et al., 2007). Οι τυπικοί αναγνώστες παρουσίασαν μεγαλύτερη θήτα και βήτα ενεργοποίηση στην αριστερή μετωπιαία εστία, ενώ τα άτομα με αναγνωστική δυσκολία εμφάνισαν περισσότερο δεξιόπλευρη ενεργοποίηση (Spironelli, Penolazzi & Angrilli, 2008).

Ένας τύπος μελετών EEG, τα εγκεφαλικά προκλητά δυναμικά (*event-related potentials*) (*ERP*), είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό με μελέτες fMRI, έχουν προσφέρει βαθιά γνώση αναφορικά με το συγχρονισμό και τη χρησιμοποίηση των διαφόρων δομών του εγκεφάλου κατά την αναγνωστική διαδικασία (Duncan et al., 1994). Οι περισσότερες μελέτες ERP επικεντρώνονται στα ηλεκτροφυσιολογικά επεισόδια (δηλαδή, συγκεκριμένα συστατικά EEG) όπως P300, N400 ή μη προσαρμοσμένη αρνητική κυματομορφή (*MMN*) που θεωρούνται κατατοπιστικά στην κατανόηση της υφής του εγκεφάλου στην αναγνωστική δυσκολία. Οι μελέτες αυτές είναι ογκώδεις και συχνά διαφέρουν ως προς τα ευρήματά τους. Ωστόσο, φαίνεται ότι μάλλον συγκλίνουν σε σχέση με τις ακόλουθες δύο παρατηρήσεις. Τα πρότυπα ενεργοποίησης του εγκεφάλου στα άτομα με αναγνωστική δυσκολία χαρακτηρίστηκαν από μια διαφορετική χρονική πορεία ενεργοποίησης του δικτύου σε σχέση με τους τυπικούς αναγνώστες (Grünling et al., 2004· Ligges et al., 2010). Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η