



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ: ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ: ΛΟΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΚΡΑΝΙΑΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΕΘΙΣΜΟΥ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΣ
ΡΕΥΜΑ (tDCS) ΣΤΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΨΕΥΔΟ)ΡΗΜΑΤΩΝ:
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΑΟΡΙΣΤΟΥ ΣΕ ΥΓΙΕΙΣ ΕΝΗΛΙΚΕΣ**

ΜΠΕΛΛΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 1458

ΜΑΝΤΕΒΑ- ΣΟΥΛΑΚΟΥΔΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ 1441

ΝΙΚΟΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ 1462

Επιβλέπων: Νάσιος Γρηγόριος

Νευρολόγος, Καθηγητής Τμήματος Λογοθεραπείας

Ιωάννινα, Σεπτέμβριος, 2026



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ: ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ: ΛΟΓΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΚΡΑΝΙΑΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΕΘΙΣΜΟΥ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΣ
ΡΕΥΜΑ (tDCS) ΣΤΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΨΕΥΔΟ)ΡΗΜΑΤΩΝ:
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΑΟΡΙΣΤΟΥ ΣΕ ΥΓΙΕΙΣ ΕΝΗΛΙΚΕΣ**

ΜΠΕΛΛΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ 1458

ΜΑΝΤΕΒΑ- ΣΟΥΛΑΚΟΥΔΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ 1441

ΝΙΚΟΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ 1462

Επιβλέπων: Νάσιος Γρηγόριος

Νευρολόγος, Καθηγητής Τμήματος Λογοθεραπείας

Ιωάννινα, Σεπτέμβριος, 2026

**THE EFFECT OF TRANSCRANIAL DIRECT CURRENT STIMULATION (tDCS)
ON THE MORPHOLOGICAL PROCESSING OF (PSEUDO)VERBS: A STUDY
OF AORIST PRODUCTION IN HEALTHY ADULTS**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Ιωάννινα, Σεπτέμβριος, 2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Μπέλλου, Αικατερίνη Παρασκευή

Υπογραφή

Μαντέβα- Σουλακούδη, Βασιλική

Υπογραφή

Νικολάκης, Παύλος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής πτυχιακής εργασίας δεν σηματοδοτεί για εμάς το τέλος μιας διαδρομής, αλλά έναν σημαντικό σταθμό σε αυτήν. Είναι η αρχή μιας βαθύτερης ενασχόλησης με το αντικείμενο που μελετήσαμε, θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω ερευνητική εμβάθυνση και μελλοντικές ακαδημαϊκές μας αναζητήσεις. Όλα όμως αυτά είναι εφικτά με την πολύτιμη συμβολή και υποστήριξη των ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μας όλο αυτό το διάστημα.

Αρχικά θέλουμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μας, κύριο Γρηγόριο Νάσιο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υπομονή και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μας. Οι συμβουλές του υπήρξαν πραγματικά καθοριστικές για την ολοκλήρωσή της. Επιπλέον, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τις κυρίες Νεφέλη Γεωργοπούλου και Νεφέλη Δημητρίου, συνεργάτιδες και μέλη της ερευνητικής ομάδας του κυρίου Νάσιου, για την πολύτιμη βοήθειά τους και τις πολύτιμες κατευθύνσεις που συνέβαλαν για την ολοκλήρωση της εργασίας μας. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά επίσης την κυρία Μαρία Μαρτζούκου, Νευρογλωσσολόγου- Ψυχογλωσσολόγου, για την πολύτιμη βοήθειά της στην συγγραφή του πρωτοκόλλου της έρευνας μας. Ακόμη θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το τμήμα Λογοθεραπείας και το Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων για την παροχή των απαραίτητων χώρων και μέσων που διευκόλυναν την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την υπομονή τους και τη συνεχή υποστήριξη τους. Επιπλέον τους φίλους, συμφοιτητές μας καθώς και όλους τους συμμετέχοντες, για την συμμετοχή τους, την ενθάρρυνση και την υπομονή που συνέβαλαν απόλυτα στην ολοκλήρωση αυτής της έρευνας.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
Abstract	10
1 ^ο Κεφάλαιο: Γλώσσα, Μνήμη και Ρηματικοί Κανόνες Αορίστου	11
1.1 Θεωρίες παραγωγής μορφολογίας	11
1.1.1 Τι είναι μορφολογία	11
1.1.2 Κλιτική μορφολογία και κλιτικοί τύποι.....	11
1.2 Χρήση μνήμης και ρηματικών κανόνων στην Ελληνική γλώσσα.....	12
1.2.1 Συνδετιστικά μοντέλα απλού μηχανισμού.....	12
1.2.2 Μοντέλο διπλού μηχανισμού.....	12
1.2.3 Μοντέλα κανόνων	13
1.2.4 Ανάλυση προηγούμενων ερευνητικών μελετών	13
1.3 Ρήματα και ψευδορήματα ως πειραματικό μοντέλο	15
1.3.1 Η χρήση της συνοπτικής όψης.....	15
1.3.2 Τι είναι τα ψευδορήματα και γιατί χρησιμοποιούνται σε πειραματικές μελέτες	15
2 ^ο Κεφάλαιο: Νευρωνικά Υποστρώματα της Γλώσσας και Νευροπλαστικότητα	17
2.1 Λειτουργική τοπογραφία της γλώσσας	17
2.1.1 Περιοχή Broca	18
2.1.2 Περιοχή Wernicke	19
2.1.3 Τοξοειδής δεσμίδα	19
2.2 Δίκτυα Γλωσσικής Παραγωγής	20
2.2.1 Μοντέλο Διπλής Ροής	22
2.3 Νευροπλαστικότητα Ορισμός & Μηχανισμοί.....	24
2.3.1 Γενικοί Μοριακοί και Κυτταρικοί Μηχανισμοί Νευροπλαστικότητας	25
2.3.2 Συναπτική Πλαστικότητα.....	26
2.3.3 Δομική Πλαστικότητα	26
2.3.4 Λειτουργική Αναδιοργάνωση.....	26
3 ^ο Κεφάλαιο: Βασικές Αρχές μη Επεμβατικής Νευροδιέγερσης	28
3.1 Μέθοδοι Νευροδιέγερσης	28
3.2 tDCS: Μηχανισμός, Εφαρμογές, Ασφάλεια	30

3.2.1 Μηχανισμός Δράσης.....	30
3.2.2 Εφαρμογές	31
3.2.3 Ασφάλεια	32
3.3 Εφαρμογές του tDCS στη Γλωσσική Λειτουργία	33
3.3.1 Εφαρμογές σε άτομα με αφασία	33
3.3.2 Εφαρμογές σε υγιείς ενήλικες	35
3.4 Σύγκριση των μεθόδων ως προς την επίδραση στη γλωσσική και γνωστική επεξεργασία.....	36
4° Κεφάλαιο: Μεθοδολογία	39
4.1 Σχεδιασμός της μελέτης.....	39
4.2 Πρωτόκολλο tDCS	39
4.3 Διαδικασία.....	39
4.4 Στατιστική ανάλυση	40
5° Κεφάλαιο: Αποτελέσματα.....	42
5.1 Δημογραφικά χαρακτηριστικά του δείγματος	42
5.2 Κατανομή των συμμετεχόντων στις συνθήκες διέγερσης ανά φύλο και ηλικιακή ομάδα	45
5.3 Περιγραφικά αποτελέσματα των γλωσσικών δοκιμασιών	46
5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των γλωσσικών δοκιμασιών μεταξύ ενεργής και εικονικής διέγερσης	47
6° Κεφάλαιο: Συζήτηση και Συμπεράσματα.....	51
6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και σύγκριση με προηγούμενες έρευνες	51
6.2 Περιορισμοί της έρευνας	55
6.3 Πρακτικές επιπτώσεις της έρευνας.....	56
6.4 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.....	57
6.5 Συμπεράσματα.....	57
Βιβλιογραφία:	59

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Διακρανιακός Ηλεκτρικός Ερεθισμός με Συνεχές Ρεύμα (tDCS) είναι μία ασφαλής μη επεμβατική μέθοδος διέγερσης του εγκεφαλικού φλοιού που πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροδίων, τα οποία τοποθετούνται στο τριχωτό της κεφαλής. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος έντασης 1-2 mA (Chase et al., 2019). Η συγκεκριμένη μέθοδος προάγει τη νευροπλαστικότητα και αλλαγές στη δραστηριότητα μεμονωμένων νευρώνων. Η εφαρμογή του έχει επιφέρει ευεργετικά αποτελέσματα τόσο σε άτομα με νευρολογικές διαταραχές όσο και σε υγιή άτομα (Fregni et al., 2015).

Η χρήση του tDCS τα τελευταία χρόνια βρίσκεται στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος στον τομέα της γνωστικής νευροεπιστήμης. Ένας σημαντικός αριθμός μελετών διερευνά την επίδραση του σε γλωσσικές λειτουργίες όπως η κατονομασία, η παραγωγή λόγου και η ανάκληση λέξεων. Ορισμένα ερευνητικά πρωτόκολλα έχουν αναφέρει ότι ο tDCS μπορεί να επηρεάσει τη γλωσσική επεξεργασία και την ανάκληση λέξεων μέσω της τροποποίησης των μετωπιαίων και κροταφικών γλωσσικών δικτύων (Price et al., 2015).

Ο σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης του tDCS στην ταχύτητα ανάκλησης πραγματικών ρημάτων και ψευδορημάτων κατά τη μετατροπή τους από τον ενεστώτα στον αόριστο. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν δεδομένα από τριανταδύο συμμετέχοντες, οι οποίοι κατανεμήθηκαν σε δύο ηλικιακές ομάδες: 20 – 30 ετών και 50 – 70 ετών.

Λέξεις κλειδιά: Μορφολογία, κλιτική μορφολογία, κλίση, ρήματα, ψευδορήματα, κλιτική επεξεργασία, ψυχογλωσσολογικές θεωρητικές προσεγγίσεις, γλώσσα, περιοχή Broca, περιοχή Wernicke, τοξοειδής δεσμίδα, δίκτυα γλωσσικής παραγωγής, μοντέλο διπλής ροής, νευροπλαστικότητα, μη επεμβατική νευροδιέγερση (NIBS), Διακρανιακή Διέγερση με Συνεχές Ρεύμα (tDCS), Διακρανιακή Μαγνητική Διέγερση (TMS), νευροαποκατάσταση και γλωσσική αποκατάσταση.

Abstract

Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) is a safe, non invasive method of cortical stimulation developed through electrodes placed on the scalp. Typically, two electrodes are used to deliver an electrical current of 1-2 mA (Chase et al., 2019). This method promotes neuroplasticity and induces changes in the activity of individual neurons. The application of tDCS has yielded beneficial effects in both individuals with neurological disorders and healthy individuals (Fregni et al., 2015).

In recent years, the use of tDCS has attracted considerable research interest in the field of cognitive neuroscience. A substantial number of studies have investigated its effects on language functions, such as naming, speech production and word retrieval. Several research studies have reported that tDCS may influence language processing and word retrieval through the modulation of frontal and temporal language networks (Price et al., 2015).

The aim of present study is to investigate the effect of tDCS on the speed of retrieval of real verbs and pseudoverbs during their transformation from the present tense to the past tense. For these purpose, data were collected from thirtytwo participants who were divided into two age groups: 20 – 30 years and 50 – 70 years.

Key words: Morphology, inflectional morphology, infection, verbs, pseudoverbs, inflectional processing, psycholinguistic theoretical approaches, language, Broca's area, Wernicke's area, arcuate fasciculus, language production networks, dual-stream model, neuroplasticity, Non – Invasive Brain Stimulation (NIBS), Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS), Transcranial Magnetic Stimulation (TMS), neurohabilitation and language rehabilitation.

1^ο Κεφάλαιο: Γλώσσα, Μνήμη και Ρηματικοί Κανόνες Αορίστου

1.1 Θεωρίες παραγωγής μορφολογίας

1.1.1 Τι είναι μορφολογία

Η μορφολογία αποτελεί βασικό κλάδο της γλωσσολογίας και μελετάει τη δομή των λέξεων και την μορφολογική τους οργάνωση. Ειδικότερα, αντικείμενο της μορφολογίας αποτελεί η μελέτη της εσωτερικής δομής των λέξεων. Κεντρική έννοια στη μορφολογία αποτελεί το μόρφημα, δηλαδή η μικρότερη γλωσσική μονάδα που έχει λειτουργία. Τα μορφήματα συνδυάζονται μεταξύ τους και συμβάλλουν στη διαμόρφωση της μορφής και της σημασίας της λέξης. Η μορφολογική ανάλυση εξετάζει επομένως, τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται τα μορφήματα, καθώς και τον τρόπο που αυτά συνδυάζονται για τον σχηματισμό διαφορετικών μορφολογικών τύπων. Τα μορφολογικά στοιχεία μπορούν να εκφράζουν είτε λεξική σημασία είτε γραμματικές πληροφορίες. Ένα άλλο σημαντικό αντικείμενο της μορφολογίας είναι ο σχηματισμός των λέξεων. Μέσω τριών βασικών μορφολογικών διαδικασιών δημιουργούνται νέες λέξεις. Αυτές οι μορφολογικές διαδικασίες είναι: η κλίση, η παραγωγή και η σύνθεση.

(Ralli, 2003), (Lieber, 2021), (Booij, 2012), (Haspelmath & Sims, 2013), (Aronolf & Fudeman, 2011)

1.1.2 Κλιτική μορφολογία και κλιτικοί τύποι

Η κλιτική μορφολογία αποτελεί κλάδο της μορφολογίας που μελετά τις μορφολογικές μεταβολές των λέξεων. Οι μεταβολές αυτές, πραγματοποιούνται προκειμένου να εκφραστούν διαφορετικές γραμματικές κατηγορίες και γραμματικά χαρακτηριστικά, μέσω των κλιτικών προσφυμάτων. Η διαδικασία μέσω της οποίας πραγματοποιούνται οι συγκεκριμένες μεταβολές ονομάζεται κλίση. Μέσω της κλίσης, οι κλιτές λέξεις αποκτούν διαφορετικούς μορφολογικούς τύπους, οι οποίοι αντανakλούν τις μορφοσυντακτικές τους ιδιότητες. Με αυτό τον τρόπο οι λέξεις μπορούν να εντάσσονται σε διαφορετικά γραμματικά περιβάλλοντα, χωρίς να μεταβάλλεται η βασική λεξική τους σημασία. Στην Ελληνική γλώσσα, η κλίση μπορεί να εκφράζει, ανάλογα με τη γραμματική κατηγορία της λέξης, χαρακτηριστικά όπως το γένος, ο αριθμός και η πτώση στα ονόματα, καθώς και το πρόσωπο, τον αριθμό, τη φωνή, τον χρόνο, την όψη και την έγκλιση στα ρήματα. Επομένως, η κλιτική μορφολογία και η κλίση αποτελούν βασικούς μηχανισμούς για τον σχηματισμό και την επεξεργασία του κλιτού τμήματος της λέξης.

(Stump, 2015, 2017), (Holton, Mackridge & Philippaki-Warbuton, 1997), (Booij, 2012), (Haspelmath & Sims, 2013), (Aronolf & Fudeman, 2011)

1.2 Χρήση μνήμης και ρηματικών κανόνων στην Ελληνική γλώσσα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τρία ψυχολinguιστικά μοντέλα για την επεξεργασία της κλιτικής μορφολογίας. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται με βάση α) τον ρόλο που αποδίδουν στα μορφήματα στις γλωσσικές αναπαραστάσεις και στην επεξεργασία και β) τους μηχανισμούς που θεωρούν ότι εμπλέκονται στην επεξεργασία των κλιτών λέξεων, σύμφωνα με την Σουκαλοπούλου (2021). Ειδικότερα, η ενότητα αυτή εστιάζεται στα συνδυαστικά μοντέλα απλού μηχανισμού, στα μοντέλα διπλού μηχανισμού και στα μοντέλα κανόνων απλού μηχανισμού.

1.2.1 Συνδυαστικά μοντέλα απλού μηχανισμού

Τα συνδυαστικά μοντέλα αποτελούν υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία έχουν βασιστεί στην αρχιτεκτονική του εγκεφάλου και στα νευρωνικά δίκτυα και τις συνδέσεις. Η συνδυαστική προσέγγιση αποτελεί μια γενικότερη μελέτη της νόησης, ωστόσο στο παρών κεφάλαιο εστιάζουμε στην επεξεργασία της γλώσσας και της κλιτικής μορφολογίας. Στη βιβλιογραφία το συνδυαστικό μοντέλο αναφέρεται και ως μοντέλο απλού μηχανισμού, καθώς για την διαχείριση της επεξεργασίας των λέξεων προτείνει ότι η επεξεργασία πραγματοποιείται μέσω ενός ενιαίου μηχανισμού, την μνήμη, σε αντίθεση με άλλα μοντέλα που υποστηρίζουν την ύπαρξη διαφορετικών μηχανισμών.

(Protopapas, 2021)

Το συνδυαστικό μοντέλο απορρίπτει την κλασική έννοια του νοητικού λεξικού. Οι προσεγγίσεις αυτές στηρίζονται στην έννοια της μάθησης. Ο όρος νοητικό λεξικό αναφέρεται στη νοητική αναπαράσταση και οργάνωση της λεξικής γνώσης. Συγκεκριμένα, αφορά τον νοητικό χώρο στον οποίο αποθηκεύονται οι λέξεις και οι πληροφορίες, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο είναι προσβάσιμες κατά την παραγωγή του λόγου. Είναι σημαντικό ότι οι καταχωρίσεις των λέξεων δεν είναι απλά αποθηκευμένες στην σειρά, αντίθετα συνδέονται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Το κυριότερο ίσως που είναι σημαντικό να αναφερθεί για το νοητικό λεξικό είναι ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένες νοητικές αναπαραστάσεις λέξεων ή μορφημάτων. Οι λεξικές αναπαραστάσεις είναι απλές μονάδες μορφής και σημασίας. Το συνδυαστικό μοντέλο επίσης, υποστηρίζει την θέση ότι η γλωσσική επεξεργασία δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ενός εγγενούς γλωσσικού μηχανισμού, όπως και ότι δεν υφίσταται η έννοια των γραμματικών κανόνων για την παραγωγή και την επεξεργασία πολύπλοκων μορφολογικών λέξεων. Οι λέξεις προκύπτουν από χαρακτηριστικά όπως η συχνότητα και η σύνδεση απλών δομών φωνολογίας και σημασιολογίας.

(Σουκαλοπούλου, 2021), (Παπαδοπούλου & Ρεβυθιάδου, 2023)

1.2.2 Μοντέλο διπλού μηχανισμού

Ένα ακόμη θεωρητικό πρότυπο που έχει προταθεί για την ερμηνεία της μορφολογικής επεξεργασίας είναι το μοντέλο του διπλού μηχανισμού, το οποίο συνδέεται κυρίως με

την προσέγγιση των « λέξεων και κανόνων ». Βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι η επεξεργασία των μορφολογικά σύνθετων λέξεων βασίζεται στη λειτουργία δύο διακριτών μηχανισμών: του νοητικού λεξικού, το οποίο στηρίζεται στη μνήμη και στην αποθήκευση λεξικών αναπαραστάσεων και του γραμματικού μηχανισμού, ο οποίος επιτρέπει τον συνδυασμό γλωσσικών στοιχείων μέσω κανόνων. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το νοητικό λεξικό περιλαμβάνει αποθηκευμένες πληροφορίες σχετικά με τις λέξεις και τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένων μορφών που δεν μπορούν να προβλεφθούν αποκλειστικά από έναν γραμματικό κανόνα. Η πρόσβαση στις αναπαραστάσεις πραγματοποιείται μέσω ενός συνδετιστικού συστήματος μνήμης. Επομένως, οι ανώμαλες κλιτικές μορφές μπορούν να ανακαλούνται από το νοητικό λεξικό ως αποθηκευμένες λεξικές αναπαραστάσεις. Η γραμματική επεξεργασία βασίζεται στην εφαρμογή συμβολικών κανόνων. Με τον μηχανισμό αυτόν, κάθε λεξική βάση μπορεί να συνδυαστεί με ένα κατάλληλο μόρφημα και να παραχθεί ένας νέος μορφολογικός τύπος. Συνολικά, το μοντέλο του διπλού μηχανισμού προτείνει ότι η μορφολογική επεξεργασία προκύπτει από την αλληλεπίδραση λεξικής μνήμης και γραμματικών κανόνων.

(Σουκαλοπούλου, 2021), (Παπαδοπούλου & Ρεβυθιάδου, 2023)

1.2.3 Μοντέλα κανόνων

Μια ακόμα προσέγγιση για την επεξεργασία της κλιτικής μορφολογίας αποτελεί το μοντέλο των κανόνων. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, η επεξεργασία τόσο των ομαλών όσο και των μη ομαλών ρηματικών τύπων πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής μορφοφωνολογικών κανόνων. Στο πλαίσιο του μοντέλου των κανόνων, οι μη ομαλοί ρηματικοί τύποι δεν αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες εξαιρέσεις αποθηκευμένες στην μνήμη. Αντίθετα, οργανώνονται σε επιμέρους κατηγορίες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες μορφοφωνολογικές εναλλαγές. Κάθε κατηγορία συνδέεται με έναν συγκεκριμένο κανόνα, έτσι ο ομιλητής αναγνωρίζει την αντίστοιχη εναλλαγή και σχηματίζει τον κατάλληλο συνοπτικό ρηματικό τύπο. Επομένως, αξιοποιείται η γνώση ενός γενικότερου μορφοφωνολογικού κανόνα και εφαρμόζεται σε μια συγκεκριμένη ομάδα ρημάτων.

(Παπαδοπούλου & Ρεβυθιάδου, 2023), (Σουκαλοπούλου, 2021)

1.2.4 Ανάλυση προηγούμενων ερευνητικών μελετών

Οι θεωρητικές προσεγγίσεις σχετικά με την επεξεργασία της κλιτικής μορφολογίας έχουν αποτελέσει αντικείμενο πειραματικής διερεύνησης, με βασικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανισμών που χρησιμοποιούν οι ομιλητές κατά την παραγωγή ομαλών και μη ομαλών μορφολογικών τύπων. Η Ελληνική γλώσσα παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς έχει πλούσια κλιτική μορφολογία και ο σχηματισμός του συνοπτικού χρόνου βοηθάει στην διερεύνηση των διαφορετικών μοντέλων μορφολογικής επεξεργασίας.

Μια από τις πρώτες μελέτες είναι αυτή της Σουκαλοπούλου (2021) που διερευνά τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές ομάδες ομιλητών της Ελληνικής επεξεργάζονται την πραγμάτωση της συνοπτικής μορφολογίας, εξετάζοντας παράλληλα τις σχετικές προβλέψεις των μοντέλων που αναλύθηκαν παραπάνω. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές μελέτες, μια με δοκιμασία διατροφικής προέγερσης με λεξική απόφαση και μια εκμαίευσης. Στην έρευνα συμμετείχαν 51 ενήλικες φυσικοί ομιλητές της Ελληνικής, 54 μονόγλωσσα ελληνόφωνα παιδιά και 57 δίγλωσσα παιδιά με Γ1 την Τουρκική. Υπήρχαν τρεις συνθήκες ρημάτων στις μελέτες: (α) η συνθήκη S, δηλαδή ρήματα που στον συνοπτικό σχηματίζονται με τον δείκτη /-s/ και προβλέψιμες φωνολογικά εναλλαγές, (β) η συνθήκη ENΛΓ _ ΘΕΜ όπου τα ρήματα σχηματίζονται χωρίς τον δείκτη /-s/ και με μη προβλέψιμες φωνολογικές εναλλαγές και (γ) η συνθήκη ENΛΓ _ ΘΕΜ _S στην οποία τα ρήματα σχηματίζονται με τον δείκτη /-s/ και με μη προβλέψιμες φωνολογικές εναλλαγές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ενήλικες αναλύουν τα συνοπτικά θέματα στα μορφολογικά τους συστατικά. Τα μονόγλωσσα παιδιά παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο επεξεργασίας με τους ενήλικες στις συνθήκες S και ENΛΓ _ ΘΕΜ _S, σε αντίθεση με τη συνθήκη ENΛΓ _ ΘΕΜ που παρουσίαζαν ελλείμματα στη μορφολογική επεξεργασία των ρημάτων. Τα δίγλωσσα παιδιά τέλος, παρουσίασαν κοινές αναπαραστάσεις με τα μονόγλωσσα παιδιά στη συνθήκη S, ενώ διαφοροποιήθηκαν στις συνθήκες εναλλαγής θέματος, οι οποίες φαίνεται να εξαρτώνται περισσότερο από το αναπτυσσόμενο λεξικό.

Στην μελέτη των Agathoroulou & Papadouroulou (2009) οι συγγραφείς μελέτησαν την αναπαράσταση και την επεξεργασία της μορφολογίας της Ελληνικής, με στόχο να εξετάσουν κατά πόσο τα ευρήματα υποστηρίζουν το μοντέλο διπλού μηχανισμού. Στην έρευνα συμμετείχαν ενήλικες φυσικοί ομιλητές της Ελληνικής και ενήλικες ομιλητές της Ελληνικής ως δεύτερη γλώσσα. Χρησιμοποιήθηκαν ομαλά/σιγματικά ψευδορήματα και μη ομαλά/μη σιγματικά ψευδορήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο οι φυσικοί ομιλητές όσο και οι μη φυσικοί ομιλητές γενίκευσαν τη χρήση του /-s/ για τον σχηματισμό του συνοπτικού, το οποίο υποστηρίζει τις υποθέσεις του μοντέλου διπλού μηχανισμού. Η ομοιότητα των ψευδορημάτων με υπαρκτά ρήματα δεν επηρέασε τις απαντήσεις των συμμετεχόντων ούτε στα σιγματικά ούτε στα μη σιγματικά ψευδορήματα. Ωστόσο, για τα μη σιγματικά ψευδορήματα με τα χαρακτηριστικά -ln ή -rn στο θέμα, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι μπορεί να σχηματίζονται σύμφωνα με μορφοφωνολογικούς κανόνες και να μην αποθηκεύονται στο νοητικό λεξικό.

Η μελέτη των Stavrakaki & Clahsen (2009) διερευνά τις μορφολογικές αναπαραστάσεις στον συνοπτικό χρόνο της Ελληνικής, εξετάζοντας παράλληλα τις υποθέσεις του μοντέλου διπλού μηχανισμού. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με δύο δοκιμασίες, προφορική εκμαίευση και δοκιμασία κρίσης αποδεκτότητας. Στην έρευνα συμμετείχαν ενήλικες φυσικοί ομιλητές της Ελληνικής, αλλά και παιδιά. Τα ερεθίσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ψευδορήματα που διακρίνονταν ανάλογα με την ομοιότητά τους σε πραγματικά ρήματα, αλλά και σε σιγματικά και μη σιγματικά. Στα σιγματικά

ψευδορήματα υπήρχαν κατηγορίες με προβλέψιμες και μη προβλέψιμες φωνολογικές εναλλαγές και στα μη σιγματικά ψευδορήματα κατηγορίες με μη προβλέψιμες φωνολογικές εναλλαγές και τύποι υποκατάστασης. Σύμφωνα με τους ερευνητές, οι ομιλητές υπεργενίκευσαν τη χρήση του /-s/ για τον σχηματισμό του συνοπτικού σε όλες τις κατηγορίες, ενώ για τα μη σιγματικά ψευδορήματα οι απαντήσεις γενικεύτηκαν μόνο όταν έμοιαζαν με μη σιγματικά ρήματα. Επομένως, τα ευρήματα αυτά, υποστηρίζουν τους μηχανισμούς που προβλέπει το μοντέλο διπλού μηχανισμού για την μορφολογική επεξεργασία του συνοπτικού.

1.3 Ρήματα και ψευδορήματα ως πειραματικό μοντέλο

1.3.1 Η χρήση της συνοπτικής όψης

Στο ρηματικό σύστημα της Ελληνικής, η όψη αποτελεί τη γραμματική κατηγορία που αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο ο ομιλητής αντιλαμβάνεται και παρουσιάζει μια κατάσταση, ανεξάρτητα από τη χρονική στιγμή κατά την οποία αυτή πραγματοποιείται. Η όψη διακρίνεται βασικά σε δύο κατηγορίες, τη συνοπτική και τη μη συνοπτική. Η συνοπτική όψη παρουσιάζει ένα γεγονός ως ενιαίο και συνολικό, ενώ η μη συνοπτική όψη παρουσιάζει το γεγονός από την εσωτερική οπτική, εστιάζοντας στη διάρκεια ή στην εξέλιξή του. Η επιλογή συνοπτικών ρηματικών τύπων σε πειραματικές μελέτες είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την διερεύνηση της μορφολογικής επεξεργασίας, καθώς η παραγωγή τους προϋποθέτει μορφολογικές μεταβολές στο ρηματικό θέμα και στο κλιτικό μέρος του ρήματος, όπως σε συγκεκριμένες κατηγορίες ρημάτων με την προσθήκη του συνοπτικού /-s/. Συνεπώς, η χρήση συνοπτικών τύπων μπορεί να επιτρέψει στους ερευνητές να εξετάσουν πειραματικά την επεξεργασία της κλιτικής μορφολογίας, τους μηχανισμούς που εμπλέκονται σε αυτήν, καθώς και τη σχέση του ρηματικού θέματος και των κλιτικών μορφημάτων.

(Holton, Mackridge & Philippaki-Warbuton, 1997)

1.3.2 Τι είναι τα ψευδορήματα και γιατί χρησιμοποιούνται σε πειραματικές μελέτες

Τα ψευδορήματα αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό πειραματικό εργαλείο στην ψυχολinguιστική έρευνα, και ιδιαίτερα στην μελέτη της μορφολογικής επεξεργασίας και της κλιτικής μορφολογίας. Ως ψευδορήματα μπορεί να οριστεί μια μη υπαρκτή ρηματική μορφή, η οποία δεν αποτελεί μέρος του λεξιλογίου της γλώσσας και δεν διαθέτει λεξική αναπαράσταση. Παρά το γεγονός ότι δεν αποτελεί πραγματική λέξη, ένα ψευδορήμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να ακολουθεί τους φωνοτακτικούς, ορθογραφικούς και μορφολογικούς κανόνες της γλώσσας. Η δημιουργία των ψευδορημάτων δεν πραγματοποιείται τυχαία. Συγκεκριμένα, στις περισσότερες πειραματικές έρευνες η κατασκευή των ψευδορημάτων βασίζεται στην αντικατάσταση ορισμένων μορφημάτων

ή ενός συμπλέγματος, κυρίως στην αρχή της λέξης, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη φωνοτακτική δομή της λέξης. Οι ψευδολέξεις πρέπει να είναι συμβατές με τους κανόνες της γλώσσας, όμως πέρα από αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει και ο βαθμός ομοιότητας των ψευδολέξεων με τις υπαρκτές λέξεις. Ο βαθμός ομοιότητας των ψευδολέξεων εξετάζεται με δύο τρόπους, είτε με την εκτίμηση των φυσικών ομιλητών της γλώσσας, είτε μέσω ερωτηματολογίων. Στις ερευνητικές μελέτες τα ψευδορήματα χρησιμοποιούνται ως πειραματικά ερεθίσματα μέσω των οποίων μπορεί να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο οι ομιλητές χρησιμοποιούν και σχηματίζουν την μορφολογική δομή μιας λέξης. Οι μορφολογικές δομές που σχηματίζουν οι ομιλητές από τα ψευδορήματα δεν ερμηνεύονται ως σωστές ή λανθασμένες. Το είδος της απόκρισης παρέχει στους ερευνητές πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό που πιθανώς να ακολουθούν. Το βασικό σημείο της χρήσης των ψευδορημάτων είναι ότι επιτρέπουν την εξέταση της μορφολογικής επεξεργασίας, χωρίς όμως άλλοι παράγοντες όπως η συχνότητα ή η σημασία να επιδρούν σε αυτή.

Παπαδοπούλου & Ρεβυθιάδου (2023), (Martínez-Tomás, Bacierno, Lázaro & Hinojosa, 2025)

2^ο Κεφάλαιο: Νευρωνικά Υποστρώματα της Γλώσσας και Νευροπλαστικότητα

Το νευρικό σύστημα αποτελεί την κύρια πηγή επικοινωνίας στον άνθρωπο. Το εξαιρετικά προηγμένο σύστημα προφορικής και νοηματικής γλώσσας αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τον άνθρωπο από τα υπόλοιπα είδη. Η δυνατότητα αυτή είναι το αποτέλεσμα ενός συνόλου περίπλοκων μηχανισμών του νευρικού συστήματος που αναπτύχθηκαν εντός του ανθρώπινου εγκεφάλου μέσω μιας σειράς σημαντικών εξελικτικών μεταβολών. Κατά τη διάρκεια χιλιάδων ετών, δημιουργήθηκε στον ανθρώπινο εγκέφαλο μια νέα αναπαράσταση και οργάνωση των νευρικών δομών και διεργασιών, η οποία είχε ως αποτέλεσμα αυτό που ονομάζουμε σήμερα ανθρώπινο επικοινωνιακό νευρικό σύστημα.

Σύμφωνα με τη σύγχρονη νευροεπιστημονική προσέγγιση, οι ανθρώπινες γλώσσες, παρότι συχνά αντιμετωπίζονται ως συστήματα επικοινωνίας που εξελίχθηκαν κατά τη διάρκεια χιλιάδων ετών και μεταβιβάστηκαν από γενιά σε γενιά, είναι ορθότερο να θεωρούνται ένα υπολογιστικό σύστημα του εγκεφάλου. Το σύστημα αυτό επιτελεί τον μετασχηματισμό μεταξύ των νοητικών αναπαραστάσεων (ιδέες, επιθυμίες κλπ.) και του ακουστικού σήματος, καθιστώντας δυνατή τόσο την παραγωγή όσο και την κατανόηση του λόγου. Η επιτέλεση των λειτουργιών αυτών βασίζεται στη συντονισμένη δράση πολλών εξειδικευμένων εγκεφαλικών περιοχών, οι οποίες συγκροτούν το λειτουργικό σύστημα της γλώσσας (Hickock 2009; Fedorenko et al., 2024).

2.1 Λειτουργική τοπογραφία της γλώσσας

Το νευρικό σύστημα, το οποίο ελέγχει την ομιλία είναι πολύπλοκο και δεν είναι εντελώς κατανοητό. Ωστόσο, ορισμένες αρχές είναι χρήσιμες για τη διαμόρφωση μιας γενικής εικόνας του νευρικού ελέγχου της ομιλίας. Οι αρχές αυτές είναι η πλευρίωση, η ετερόπλευρη νεύρωση και ο εντοπισμός (Anderson & Shames, 2013).

Η πλευρίωση αναφέρεται στη λειτουργική εξειδίκευση του αριστερού και του δεξιού ημισφαιρίου για την επιτέλεση διαφορετικών λειτουργιών. Συγκεκριμένα στους περισσότερους δεξιόχειρες το αριστερό ημισφαίριο είναι το κυρίαρχο ημισφαίριο για αρκετές γλωσσικές λειτουργίες. Η άποψη αυτή είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες, ιδίως λόγω των παρατηρήσεων, ότι η βλάβη στο αριστερό ημισφαίριο τείνει να προκαλεί διαταραχές του λόγου (π.χ. αφασία), σε σχέση με μία βλάβη στο δεξί ημισφαίριο. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι το δεξί ημισφαίριο δεν συμβάλλει στην ομιλία. Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι το δεξί ημισφαίριο εκτελεί ορισμένα είδη γλωσσικής επεξεργασίας καλύτερα από ότι το αριστερό. Ένα από τα πιθανά πλεονεκτήματα του είναι η επεξεργασία του επιτονισμού της γλώσσας (Anderson & Shames, 2013).

Με βάση τις αρχές της πλευρίωσης και του εντοπισμού, έχουν περιγραφεί συγκεκριμένες φλοιώδεις περιοχές που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη γλωσσική λειτουργία. Οι κυριότερες από αυτές είναι η περιοχή Broca (το κέντρο κινητικής ομιλίας), η περιοχή Wernicke (το κέντρο αισθητηριακής ομιλίας) και η τοξοειδής δεσμίδα (AF), η οποία συνδέει τις δύο παραπάνω φλοιώδεις περιοχές. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό έχει αναθεωρηθεί με βάση τα σύγχρονα δεδομένα της νευροεπιστήμης και σήμερα πιστεύεται ότι η γλώσσα υποστηρίζεται από ένα ευρύτερο δίκτυο μετωπιαίων, κροταφικών και βρεγματικών περιοχών, οι οποίες συνεργάζονται για την παραγωγή και κατανόηση του λόγου. Παρότι οι όροι «περιοχή Broca» και «περιοχή Wernicke» εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στην επιστημονική κοινότητα, αναγνωρίζεται πλέον ότι οι περιοχές αυτές δεν αποτελούν τα μοναδικά γλωσσικά κέντρα του εγκεφάλου αλλά εντάσσονται σ' ένα ευρύτερο λειτουργικό γλωσσικό δίκτυο (Chang et al., 2015).

Η ετερόπλευρη νεύρωση είναι η αρχή ότι η μία πλευρά του εγκεφάλου ελέγχει την αντίθετη πλευρά του σώματος. Εν ολίγοις, οι αισθητηριακοί υποδοχείς και οι μύες της δεξιάς πλευράς του σώματος είναι κυρίως συνδεδεμένοι με το αριστερό εγκεφαλικό ημισφαίριο και το αντίστροφο (Anderson & Shames, 2013).

2.1.1 Περιοχή Broca

Η παραγωγή προφορικού λόγου είναι θεμελιώδης για την ανθρώπινη επικοινωνία. Ο Paul Broca ήταν ο πρώτος που συσχέτισε την παραγωγή του λόγου με μια φλοιώδη περιοχή του αριστερού μετωπιαίου λοβού, την οπίσθια κάτω μετωπιαία έλικα (IFG), η οποία έκτοτε αναφέρεται ως «περιοχή Broca». Η ανακάλυψη αυτή αποτέλεσε ορόσημο για τον τομέα της φλοιώδους εξειδίκευσης και η περιοχή Broca εξακολουθεί να υποστηρίζει τη παραγωγή ομιλίας (Flinker et al., 2015).

Η περιοχή του Broca συμμετέχει στην επιλογή των κατάλληλων λέξεων, στο συντονισμό των κινήσεων της ομιλίας και στο προγραμματισμό της ακολουθίας των μυϊκών συσπάσεων που απαιτούνται για την παραγωγή καταληπτών ήχων και λέξεων. Επιπλέον, συμμετέχει στον συνδυασμό των γλωσσικών στοιχείων για τον σχηματισμό ολοκληρωμένων προτάσεων (Waxman 2021).

Ανατομικά η περιοχή Broca εντοπίζεται στα πεδία Brodmann 44 (pars opercularis, IFGop) και 45 (pars triangularis, IFGtri) προς τα εμπρός του κινητικού φλοιού (Waxman 2021). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές συμπεριλαμβάνουν και το πεδίο του Brodmann 47 (pars orbitalis, IFGorb) ως μέρος του ευρύτερου συμπλέγματος του Broca (Hagoort, 2005a; Xiang et al., 2010). Η περιοχή αυτή έχει συνδεθεί με ποικίλες γλωσσικές λειτουργίες, μεταξύ των οποίων η γραμματική επεξεργασία (σύνταξη και κλιτική μορφολογία), η λεξιλογική και φωνολογική επεξεργασία (Santi & Grodzinsky, 2007; Bulut, 2022b; Laine et al., 1999; Tyler et al., 2005; Green D. 1999; Müller et al., 2003; Zhu et al., 2010; Heim et al., 2003; Matsuo et al., 2010).

Νεότερες μελέτες έχουν προτείνει λειτουργική διαφοροποίηση στο εσωτερικό της περιοχής. Συγκεκριμένα το pars opercularis (IFGop) συνδέεται περισσότερο με συντακτικές λειτουργίες ενώ το pars triangularis (IFGtri) και σε ορισμένες περιπτώσεις και το pars orbitalis (IFGorb) εμπλέκονται κυρίως σε σημασιολογικές διεργασίες (Dapretto & Bookheimer, 1999; Goucha & Friederici, 2015; Hagoort & Indefrey, 2014; Newman 2003; Zaccarella et al., 2017).

2.1.2 Περιοχή Wernicke

Η περιοχή Wernicke εντοπίστηκε και μελετήθηκε πρώτη φορά από τον Γερμανό νευρολόγο Carl Wernicke στα τέλη του 19ου αιώνα. Θεωρείται κρίσιμη για την επεξεργασία οπτικών και ακουστικών ερεθισμάτων, συμβάλλοντας στην ενσωμάτωση φωνολογικών, λεξιλογικών και σημασιολογικών πληροφοριών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της γλώσσας και την ουσιαστική επικοινωνία.

Ανατομικά η περιοχή Wernicke εκτείνεται σε τμήματα των κροταφικών και βρεγματικών λοβών. Παρότι τα ακριβή της όρια ποικίλουν από άτομο σε άτομο, γενικά περιλαμβάνει το οπίσθιο τμήμα της άνω κροταφικής έλικας (STG) καθώς και τις παρακείμενες κροταφοβρεγματικές περιοχές. Συχνά επεκτείνεται στην υπερμετωπιαία έλικα καθώς και στη γωνιώδη έλικα του βρεγματικού λοβού (Wani, 2024).

Σύμφωνα με τις σύγχρονες προσεγγίσεις, η περιοχή Wernicke δεν αποτελεί μία ενιαία λειτουργική περιοχή αλλά συμμετέχει κυρίως σε φωνολογικές διεργασίες και στην αντιστοίχιση ήχου – σημασίας. Οι ευρύτερες σημασιολογικές λειτουργίες υποστηρίζονται από πιο εκτεταμένα κροταφικά και κροταφοβρεγματικά δίκτυα (Wani, 2024).

2.1.3 Τοξοειδής δεσμίδα

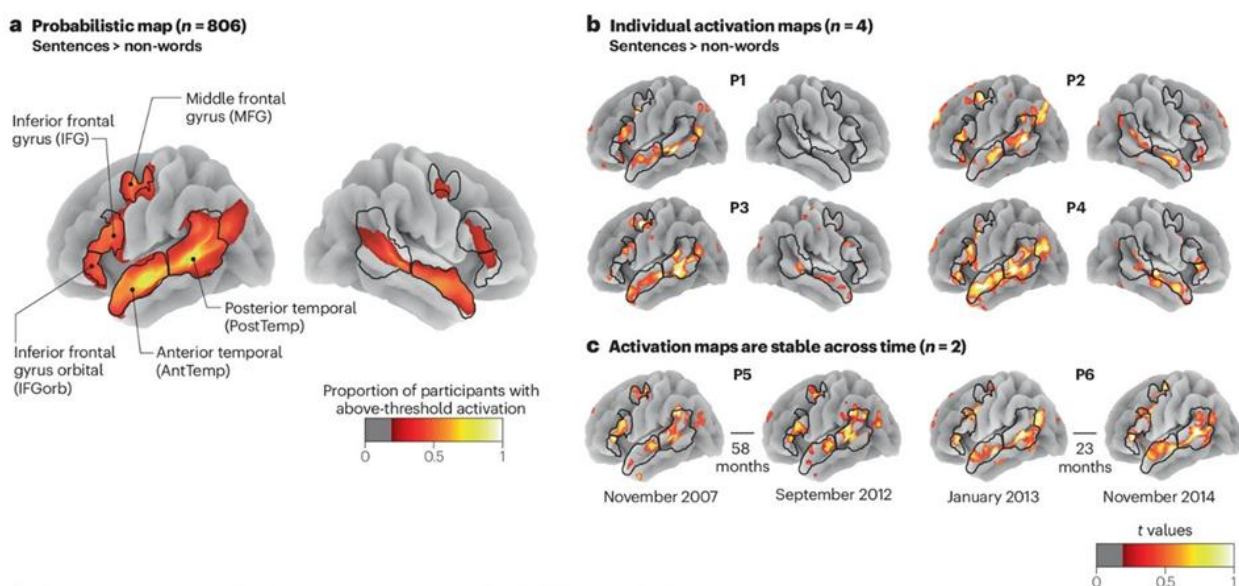
Η τοξοειδής δεσμίδα είναι μία κρίσιμη συνειρμική οδός εντός της λευκής ουσίας των εγκεφαλικών ημισφαιρίων που συνδέει τη περιοχή Broca με τη περιοχή Wernicke (Waxman 2021). Είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση πληροφοριών που σχετίζονται με τη γλώσσα, διευκολύνοντας το μετασχηματισμό των ακουστικών ερεθισμάτων σε αρθρωτική ομιλία. Η βλάβη στη τοξοειδή δεσμίδα μπορεί να οδηγήσει σε αφασία αγωγής, στην οποία εκδηλώνεται δυσκολία στην επανάληψη της προφορικής γλώσσας παρά τις άθικτες ικανότητες της κατανόησης και παραγωγής (Wani, 2024).

Σύμφωνα με τα σύγχρονα επιστημονικά δεδομένα, η τοξοειδής δεσμίδα αποτελεί την κύρια συνδετική οδό του ραχιαίου γλωσσικού ρεύματος και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη φωνολογική επεξεργασία και στην επανάληψη του λόγου. Επιπλέον, νεότερες μελέτες αποδεικνύουν ότι διαφορετικά τμήματα της τοξοειδούς δεσμίδας σχετίζονται με διαφορετικές γλωσσικές λειτουργίες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συμβολή της είναι πολύ πιο σύνθετη από ότι περιγράφει το κλασικό μοντέλο Broca – Wernicke (Janssen et al., 2023).

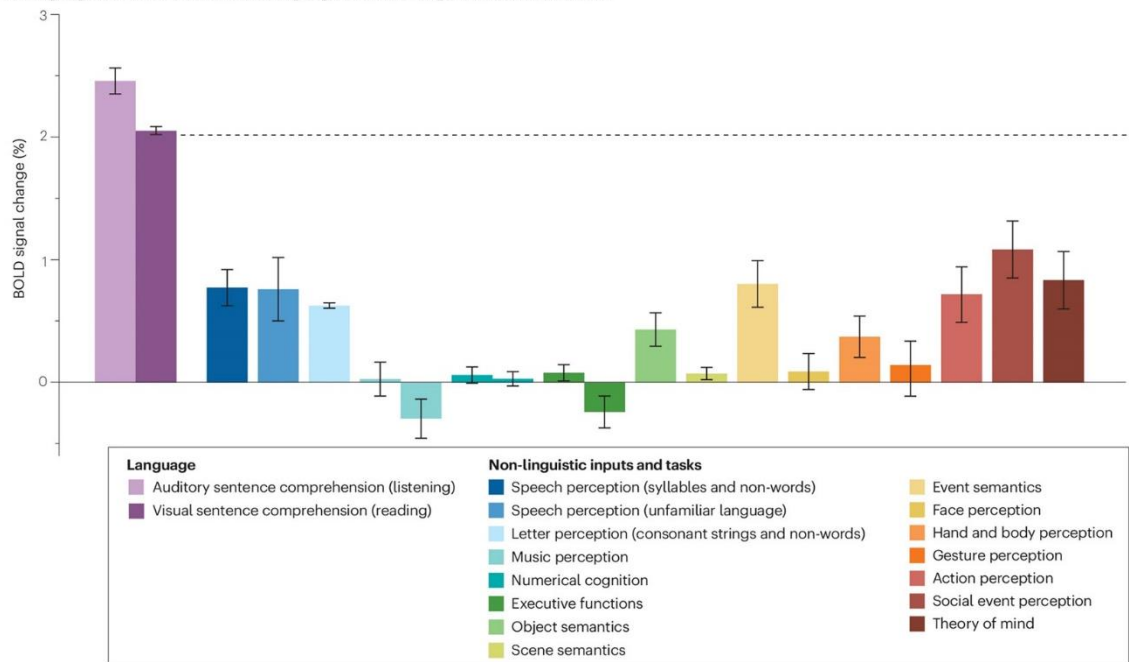
2.2 Δίκτυα Γλωσσικής Παραγωγής

Τα τελευταία χρόνια, η μελέτη της νευρωνικής οργάνωσης της γλώσσας έχει μετατοπιστεί από την αντίληψη των μεμονωμένων γλωσσικών κέντρων προς την κατανόηση της γλώσσας ως λειτουργίας ενός εκτεταμένου νευρωνικού δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό διαμορφώθηκε το Μοντέλο Διπλής Ροής (Dual Stream Model), σύμφωνα με το οποίο η επεξεργασία της γλώσσας οργανώνεται σε δύο λειτουργικές οδούς: τη ραχιαία (dorsal system), η οποία υποστηρίζει τη φωνολογική επεξεργασία και την μετατροπή των γλωσσικών πληροφοριών σε αρθρωτικές κινήσεις και την κοιλιακή (ventral system), η οποία σχετίζεται κυρίως με τη σημασιολογική επεξεργασία και την κατανόηση του λόγου (Fridriksson et al., 2016; Hickock, 2022).

Ένας τυπικός εγκέφαλος ενός ενήλικα περιλαμβάνει ένα σύνολο περιοχών οι οποίες είναι εξειδικευμένες για τη γλώσσα. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές λειτουργικές ιδιότητες των γλωσσικών περιοχών και απεικονίζεται ο σχηματισμός ενός ολοκληρωμένου δικτύου.



d The language areas are selective for language over non-linguistic inputs and tasks



Σχήμα 1. Η τοπογραφία του γλωσσικού δικτύου, η μεταβλητότητα και η σταθερότητα του μεταξύ των ατόμων με την πάροδο του χρόνου και η εξειδίκευση του για τη γλώσσα σε σχέση με μη γλωσσικά ερεθίσματα και δοκιμασίες.

Σημείωση: Αναπαραγωγή από The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain, των E. Fedorenko, A. A. Ivanova και T. I. Regev (2024), *Nature Reviews Neuroscience*, 25, 289–312.

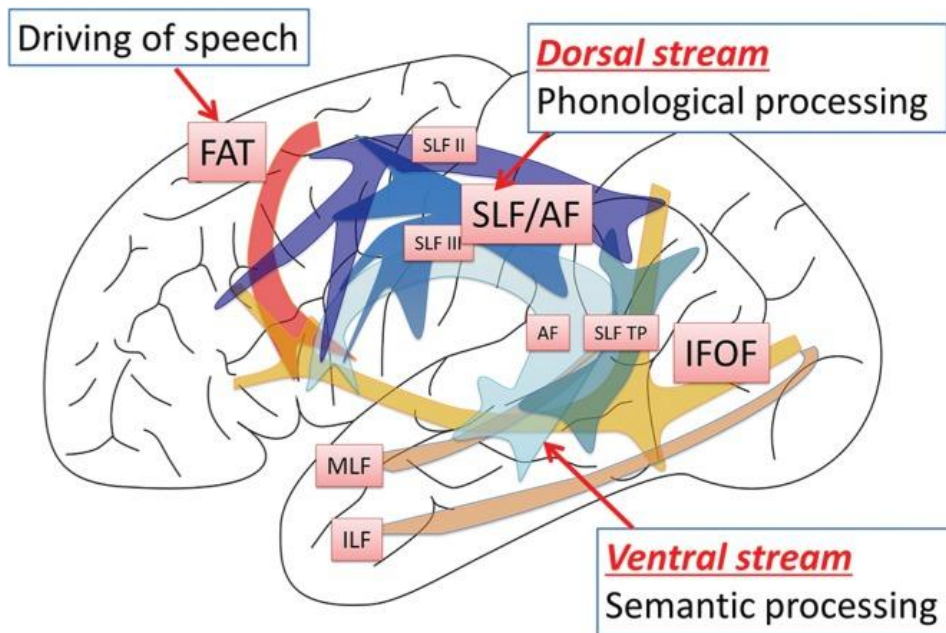
- Το σχήμα 1^a παρουσιάζει έναν πιθανολογικό χάρτη ενεργοποίησης του γλωσσικού δικτύου, ο οποίος δημιουργήθηκε από δεδομένα λειτουργικής μαγνητικής τομογραφίας (fMRI) ενός μεγάλου αριθμού συμμετεχόντων για μία μελέτη εντοπισμού του γλωσσικού δικτύου (Fedorenko et al., 2024). Η χαρτογράφηση βασίστηκε στη σύγκριση της ανάγνωσης ή της ακρόασης προτάσεων με την επεξεργασία αντιληπτικά παρόμοιων αλλά ακατανόητων ερεθισμάτων (π.χ. λίστα ψευδολέξεων). Ο χάρτης δείχνει ότι οι γλωσσικές αποκρίσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις αριστερές μετωπιαίες και κροταφικές περιοχές, αναδεικνύοντας τη βάση του γλωσσικού δικτύου.
- Το σχήμα 1^b απεικονίζει τους ενδεικτικούς χάρτες ενεργοποίησης από τέσσερις διαφορετικούς συμμετέχοντες κατά την ίδια γλωσσική δοκιμασία. Παρότι η γενική κατανομή της ενεργοποίησης είναι παρόμοια, οι ακριβείς θέσεις, το μέγεθος και το σχήμα των γλωσσικών περιοχών διαφέρουν μεταξύ των ατόμων. Αυτή η παρατήρηση καταδεικνύει μεγάλη διατομική μεταβλητότητα της λειτουργικής οργάνωσης της γλώσσας και επισημαίνει τη σημασία του λειτουργικού εντοπισμού των γλωσσικών περιοχών σε ατομικό επίπεδο.

- Το σχήμα 1^c παρουσιάζει τους χάρτες ενεργοποίησης δύο ατόμων που εξετάστηκαν δύο φορές με χρονική απόσταση δύο έως πέντε ετών. Σε αντίθεση με τη μεταβλητότητα που παρατηρείται μεταξύ διαφορετικών ατόμων, η κατανομή της ενεργοποίησης παραμένει σχεδόν αμετάβλητη στο ίδιο άτομο με τη πάροδο του χρόνου. Το εύρημα αυτό αποδεικνύει ότι το γλωσσικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από υψηλή ατομική σταθερότητα, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της λειτουργικής χαρτογράφησης των γλωσσικών περιοχών.
- Το σχήμα 1^d απεικονίζει τις αποκρίσεις του γλωσσικού δικτύου όπως καταγράφηκαν με λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI) κατά την επεξεργασία γλωσσικών και μη γλωσσικών ερεθισμάτων. Παρατηρείται ότι η ενεργοποίηση των γλωσσικών περιοχών είναι σημαντικά ισχυρότερη κατά την επεξεργασία προφορικού ή γραπτού λόγου συγκριτικά με άλλες γνωστικές διεργασίες. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι το γλωσσικό δίκτυο παρουσιάζει υψηλή λειτουργική εξειδίκευση και δεν ενεργοποιείται στον ίδιο βαθμό κατά την εκτέλεση μη γλωσσικών δοκιμασιών. Επιπλέον, οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι άλλα μεγάλης κλίμακας γνωστικά δίκτυα, όπως το δίκτυο πολλαπλών απαιτήσεων και το δίκτυο θεωρίας του νου, εμφανίζουν διαφορετικά πρότυπα ενεργοποίησης, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι το γλωσσικό δίκτυο αποτελεί ένα διακριτό και εξειδικευμένο λειτουργικό σύστημα του ανθρώπινου εγκεφάλου (Fedorenko et. al., 2024).

2.2.1 Μοντέλο Διπλής Ροής

Το μοντέλο διπλής ροής όπως προτάθηκε από τους Hickock et al., περιγράφει τη νευρωνική βάση της γλώσσας ως ένα εκτεταμένο δίκτυο φλοιωδών περιοχών και δεσμίδων λευκής ουσίας, υπερβαίνοντας το κλασικό μοντέλο, το οποίο περιοριζόταν στις περιοχές Broca, Wernicke και στην τοξοειδή δεσμίδα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η γλωσσική επεξεργασία οργανώνεται σε δύο κύριες λειτουργικές οδούς: τη ραχιαία και την κοιλιακή. Η ραχιαία οδός υποστηρίζει κυρίως τη φωνολογική επεξεργασία και τη μετατροπή των ακουστικών γλωσσικών πληροφοριών σε αρθρωτικές κινήσεις, με κύριο ανατομικό υπόστρωμα την Άνω Διαμήκη Δεσμίδα (SLF) και την Τοξοειδή Δεσμίδα (AF). Η κοιλιακή οδός σχετίζεται περισσότερο με τη σημασιολογική επεξεργασία και τη κατανόηση του λόγου και περιλαμβάνει δεσμίδες όπως η Κάτω Μετωποϊνιακή Δεσμίδα (IFOF), η Κάτω Διαμήκης Δεσμίδα (ILF) και η Μέση Διαμήκης Δεσμίδα (MdLF).

Εκτός από τις δύο κύριες οδούς, νέα δεδομένα υποδεικνύουν ότι και άλλες δεσμίδες λευκής ουσίας συμβάλλουν στη γλωσσική λειτουργία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Μετωπιαία Λοξή Δεσμίδα (FAT), η οποία συνδέει περιοχές του μετωπιαίου λοβού και φαίνεται πως συμμετέχει στην έναρξη, στην ευχέρεια και στον αυθορμητισμό της ομιλίας.



Σχήμα 2: Μοντέλο διπλής ροής της νευρωνικής βάσης της γλώσσας.

Σημείωση: Αναπαραγωγή από The neural basis of language: An overview for neurosurgeons, των K. O. Nakajima, T. Sugiyama και T. Sakai, 2016, Neurologia Medico-Chirurgica, 56(7), 394–402.

2.2.1.1 Ραχιαία οδός

Η ραχιαία οδός αποτελεί ένα από τα δύο κύρια συστήματα του μοντέλου διπλής ροής και συνδέει τις οπίσθιες κροταφικές με τις μετωπιαίες και βρεγματικές περιοχές που συμμετέχουν στην παραγωγή του λόγου (Ries et al., 2019). Στους κύριους φλοιώδεις κόμβους της περιλαμβάνονται η Οπίσθια Άνω κροταφική έλικα (pSTG) και η Υπερμετωπιαία Έλικα (STG) καθώς και τμήματα της Κάτω Μετωπιαίας Έλικας, όπως η pars triangularis, η pars opercularis και το Μέσο – Κάτω τμήμα της Προκεντρικής Έλικας. Οι περιοχές αυτές συνδέονται μεταξύ τους μέσω των υποσυστατικών της Άνω Διαμήκου Δεσμίδας (SLF) και της Τοξοειδούς Δεσμίδας (AF) (Gupta & Srivastava, 2020).

Η SLF αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία συνδέουν διαφορετικές περιοχές του μετωπιαίου, βρεγματικού και κροταφικού φλοιού. Ιδιαίτερη σημασία για τη γλωσσική επεξεργασία αποδίδεται στη SLF – III και στην κροταφοβραγματική μοίρα της (SLF – tp) ενώ η τοξοειδής δεσμίδα βρίσκεται βαθύτερα και συνδέει τον μετωπιαίο με τον οπίσθιο κροταφικό φλοιό. Με αυτό τον τρόπο, οι συγκεκριμένες οδοί λευκής ουσίας συμβάλλουν στη λειτουργική επικοινωνία μεταξύ των περιοχών που συμμετέχουν στη γλωσσική επεξεργασία (Gupta & Srivastava, 2020).

Σε λειτουργικό επίπεδο, η ραχιαία οδός εμπλέκεται κυρίως στην ακουστικοκινητική ολοκλήρωση, δηλαδή στη μετατροπή των ακουστικών αναπαραστάσεων της ομιλίας σε αρθρωτικές αναπαραστάσεις. Με άλλα λόγια, συμβάλλει στην αντιστοίχιση του ήχου της ομιλίας με τις κινήσεις που απαιτούνται για την παραγωγή του. Συνεπώς, η ραχιαία οδός

κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τη φωνολογική επεξεργασία και τη παραγωγή προφορικού λόγου (Ries et al., 2019).

2.2.1.2 Κοιλιακή οδός

Η κοιλιακή οδός αποτελεί το δεύτερο κύριο σύστημα του μοντέλου διπλής ροής και σχετίζεται κυρίως με τη σημασιολογική επεξεργασία και τη κατανόηση του λόγου. Οι Κύριοι Φλοιώδεις Κόμβοι της περιλαμβάνουν περιοχές του Κροταφικού και του Κάτω Βρεγματικού Φλοιού, όπως τον Κροταφικό Πόλο, την Πρόσθια και Οπίσθια Μέση Κροταφική Έλικα (MTG), την Κάτω Κροταφική Έλικα (ITG) και τη Γωνιώδη Έλικα (AG). Η Κάτω Μετωπιαία Έλικα συμμετέχει επίσης στη σημασιολογική επεξεργασία (Gupta & Srivastava, 2020).

Οι περιοχές αυτές συνδέονται μέσω διαφόρων οδών λευκής ουσίας, μεταξύ των οποίων είναι η Μέση Διαμήκης Δεσμίδα (MLF), η Κάτω Διαμήκης Δεσμίδα (ILF) και η Κάτω Μετωποϊνιακή Δεσμίδα (IFOF). Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη IFOF, η οποία συνδέει των Κάτω Μετωπιαίο Φλοιό με κροταφικές και ινιακές περιοχές και έχει συσχετιστεί με τη σημασιολογική επεξεργασία. Ο ρόλος της Αγκιστρωτής Δεσμίδας (UF) στη σημασιολογική επεξεργασία παραμένει λιγότερο σαφής, λόγω αντικρουόμενων αναφορών στη βιβλιογραφία (Gupta & Srivastava, 2020).

Σε λειτουργικό επίπεδο, η κοιλιακή οδός συνδέει τον ήχο και το νόημα, αντιστοιχίζοντας τις ακουστικές αναπαραστάσεις της ομιλίας με τις κατανεμημένες εννοιολογικές αναπαραστάσεις. Με αυτό τον τρόπο, συμβάλλει στην αναγνώριση και κατανόηση των γλωσσικών ερεθισμάτων (Gupta & Srivastava, 2020).

2.3 Νευροπλαστικότητα Ορισμός & Μηχανισμοί

Η νευροπλαστικότητα είναι ένας γενικός όρος που αναφέρεται στην ικανότητα του εγκεφάλου να αναδιοργανώνεται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του ατόμου ως απόκριση στις διάφορες αλλαγές της μάθησης, του περιβάλλοντος και των εμπειριών. Ο εγκέφαλος αποτελεί ένα δυναμικό όργανο, ικανό να ανταποκρίνεται σε πλούσια ή φτωχά σε ερεθίσματα περιβάλλοντα, δραστηριότητες και περιστάσεις. Οι αλλαγές αυτές κυμαίνονται από το επίπεδο της γονιδιακής έκφρασης και της απελευθέρωσης νευροδιαβιβαστών καθώς και νεοτροπικών παραγόντων έως την κυτταρική αναδιοργάνωση και τον επαναπρογραμματισμό της λειτουργικής συνδεσιμότητας. Ο ρυθμός των νευροπλαστικών αλλαγών ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ζωής, γεγονός που δημιουργεί περισσότερες προκλήσεις τόσο στη κατανόηση όσο και στο χειρισμό αυτών των διεργασιών, με στόχο τη βελτίωση του κινητικού ελέγχου, της μάθησης, της μνήμης και της νευρικής αναδιαμόρφωσης μετά από τραυματισμό (Milbocker et al., 2024).

Η ηλικία αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εξαρτώμενη από την εμπειρία φλοιώδη πλαστικότητα. Οι κυριότερες δομικές και

λειτουργικές μεταβολές παρατηρούνται κυρίως κατά τα πρώτα στάδια της ζωής, όταν ο εγκέφαλος δεν βρίσκεται σε περιόδους αυξημένης πλαστικότητας, οι οποίες είναι γνωστές ως «κρίσιμες περίοδοι» (Voss et al., 2017).

Οι έρευνες μονοφθάλμιας οπτικής στέρησης των Wiesel και Hubel (1963) που διεξήχθησαν σε ποντίκια, απέδειξαν ότι η φλοιώδης πλαστικότητα είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε συγκεκριμένες αναπτυξιακές περιόδους, κατά τις οποίες η εμπειρία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία και την οργάνωση του εγκεφάλου. Αντίστοιχες ευαίσθητες περίοδοι έχουν παρατηρηθεί και στον άνθρωπο, ειδικά κατά την αποκατάσταση της ακοής μετά από προγλωσσική κώφωση και κατά την απόκτηση της γλώσσας. Τα διαθέσιμα στοιχεία υποδεικνύουν ότι ο βέλτιστος χρόνος για την πραγματοποίηση της κοχλιακής εμφύτευσης είναι πριν από την ηλικία των 4 ετών ενώ αυτές που πραγματοποιούνται μετά την ηλικία των 7 ετών είναι λιγότερο πιθανό να οδηγήσουν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα (Kral and Sharma, 2012).

2.3.1 Γενικοί Μοριακοί και Κυτταρικοί Μηχανισμοί Νευροπλαστικότητας

Οι μοριακοί και κυτταρικοί μηχανισμοί που διέπουν τη νευροπλαστικότητα αποτελούν εδώ και πολλά χρόνια θέμα μελέτης. Η εξέλιξη της τεχνολογίας πάνω στην *in vivo* εξέταση της δομής και της λειτουργίας του εγκεφάλου, ενίσχυσε την πληροφόρηση της επιστημονικής κοινότητας σχετικά με τους μηχανισμούς της νευροπλαστικότητας.

Η αερόβια άσκηση έχει αποδειχθεί ένας ισχυρός ρυθμιστής της νευροπλαστικότητας. Ορισμένες μελέτες (Stillman et al., 2016; Gutierrez et al., 2018) αποδεικνύουν ότι η αερόβια άσκηση αυξάνει το επίπεδο των νεοτροφινών, συμπεριλαμβανομένων του Νευρικού Αυξητικού Παράγοντα (NGF), του Εγκεφαλικού Νεοτροφικού Παράγοντα (BDNF), του Αγγειακού Ενδοθηλιακού Αυξητικού Παράγοντα (VEGF) και του Ινσουλινοειδούς Αυξητικού Παράγοντα 1 (IGF-1). Οι παράγοντες αυτοί, προκαλούν διάφορες κυτταρικές αλλοιώσεις στον εγκέφαλο. Αρχικά, η αύξηση της συγκέντρωσης του γαλακτικού οξέος στο αίμα σε συνδυασμό με την αυξημένη ενεργοποίηση των υποδοχέων στα επιθηλιακά κύτταρα της εγκεφαλικής μικροαγγείωσης συνδέονται με την αυξημένη παραγωγή των VEGF, BDNF και IGF-1 (Fabel K. et al., 2003; Morland C. et al., 2017) καθώς και με την ενίσχυση της συναπτικής λειτουργίας και της εγκεφαλικής αιματικής ροής. Εν ολίγοις, η αυξημένη απελευθέρωση νεοτροφινών και η ενισχυμένη λειτουργία του νευρωνικού κυκλώματος προάγουν τη σπιννογένεση, την αύξηση της δενδρικής πολυπλοκότητας και τελικά τη συναπτογένεση. Η παρατεταμένη παραγωγή νεοτροφινών προάγει επίσης τη νευρογένεση, τη γλοιογένεση και την αγγειογένεση. Η νευρογένεση στον ενήλικο εγκέφαλο πραγματοποιείται σε δύο συγκεκριμένες περιοχές ενώ η γλοιογένεση εμφανίζεται ευρύτερα. Συνολικά, οι κυτταρικές αυτές μεταβολές συνδράμουν στην αύξηση του όγκου τόσο της λευκής όσο και της φαιάς ουσίας (Milbocker et al., 2024).

2.3.2 Συναπτική Πλαστικότητα

Η συναπτική πλαστικότητα θεωρείται ένας από τους βασικότερους μηχανισμούς νευροπλαστικότητας που ενισχύει τη μάθηση και τη μνήμη. Οι μορφές της συναπτικής πλαστικότητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορους τύπους, μεταξύ των οποίων είναι η συναπτική πλαστικότητα Hebbian¹, η οποία βασίζεται στη συσχετιζόμενη συνεργασία μεταξύ των συνδεδεμένων νευρώνων. Ωστόσο, έχουν προταθεί και άλλες μορφές συναπτικής πλαστικότητας, οι οποίες ενσωματώνουν περισσότερα στοιχεία, όπως τα διδακτικά σήματα, επιτρέποντας πιο κατευθυνόμενες μεταβολές στις συναπτικές συνδέσεις (Magee & Grienberger, 2020).

Πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα περιέγραψαν μία νέα μορφή συναπτικής πλαστικότητας στον ιππόκαμπο του εγκεφάλου, η οποία συνδυάζει χαρακτηριστικά διαφορετικών μορφών πλαστικότητας και υπερβαίνει την κλασική Hebbian προσέγγιση. Συνεπώς, οι διαφορετικές μορφές συναπτικής πλαστικότητας καταδεικνύουν την ικανότητα των νευρωνικών συνδέσεων να προσαρμόζονται, συμβάλλοντας στην προσαρμοστική λειτουργία των νευρωνικών κυκλωμάτων (Magee & Grienberger, 2020).

¹Σύμφωνα με τη συναπτική πλαστικότητα του Hebb, η αποτελεσματικότητα των συνάψεων προσαρμόζεται μέσα σε δευτερόλεπτα ή λεπτά μετά την έναρξη της νευρωνικής ενεργοποίησης που προκαλείται από ένα ερέθισμα (Fauth & Tetzlaff, 2016).

2.3.3 Δομική Πλαστικότητα

Η δομική πλαστικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του εγκεφάλου να αναδιοργανώνεται και να σχηματίζει νέες νευρωνικές συνδέσεις. Θεωρείται μία κρίσιμη μορφή πλαστικότητας για την ανάρρωση μετά από μία επίκτητη εγκεφαλική βλάβη. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δένδρική αναδιαμόρφωση, αξονική βλάστηση και νευρογένεση, οι οποίες αντικαθιστούν τις νευρικές συνδέσεις και αντισταθμίζουν τις χαμένες λειτουργίες (Rajan RK., 2025).

Ο Εγκεφαλικός Νεοτροφικός Παράγοντας (BDNF) κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στη νευρογένεση και στην ανάπτυξη των δένδριτών, γεγονός που τον καθιστά πιθανό θεραπευτικό στόχο για την επιδιόρθωση του εγκεφάλου. Επιπλέον, η νευροφλεγμονή και τα αντιδραστικά αστροκύτταρα συμβάλλουν στην επιδιόρθωση των ιστών. Οι στρατηγικές αποκατάστασης που στοχεύουν στην ενεργοποίηση αυτών των προσαρμοστικών αλλαγών μπορούν να ενισχύσουν τη νευροπλαστικότητα και να προάγουν τη λειτουργική αποκατάσταση (Rajan, 2025).

2.3.4 Λειτουργική Αναδιοργάνωση

Η λειτουργική αναδιοργάνωση είναι μία απαραίτητη διαδικασία για την ανάρρωση των ασθενών με αφασία καθώς αναδιοργανώνονται οι επιζήσασες εγκεφαλικές περιοχές και αναλαμβάνουν νέους ρόλους στην επεξεργασία της γλώσσας (Hartwigsen & Saur, 2019 ;

Turkeltaub, 2019 ; Stefaniak, Halai, & Lambon Ralph, 2020). Η λειτουργική αναδιοργάνωση ενός δικτύου μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη θέση, τα χαρακτηριστικά και το χρόνο έναρξης της εγκεφαλικής βλάβης. Επίσης, η συγκεκριμένη διαδικασία εξελίσσεται με τη πάροδο του χρόνου μετά τη βλάβη. Οι τεχνικές νευροαπεικόνισης συνέβαλαν σημαντικά στη μελέτη των λειτουργικών αυτών μεταβολών, επιτρέποντας την παρακολούθηση της αναδιοργάνωσης του γλωσσικού δικτύου (Pasquini et al., 2022).

3^ο Κεφάλαιο: Βασικές Αρχές μη Επεμβατικής Νευροδιέγερσης

Η μη επεμβατική νευροδιέγερση (Non-Invasive Brain Stimulation, NIBS) περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών που επιτρέπουν τη μεταβολή της εγκεφαλικής δραστηριότητας χωρίς χειρουργική επέμβαση ή εμφύτευση ηλεκτροδίων. Οι τεχνικές αυτές έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, τόσο στο πλαίσιο της γνωστικής νευροεπιστήμης όσο και στον τομέα της νευροαποκατάστασης, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της λειτουργίας του εγκεφάλου αλλά και ως συμπληρωματικές παρεμβάσεις σε διάφορες νευρολογικές και ψυχιατρικές διαταραχές (Woods et al., 2016). Μέσω της προσωρινής τροποποίησης της διεγερσιμότητας συγκεκριμένων εγκεφαλικών περιοχών και δικτύων, οι μέθοδοι NIBS μπορούν να συμβάλουν στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ εγκεφαλικής λειτουργίας και γνωστικών διεργασιών, ενώ παράλληλα εξετάζεται η θεραπευτική τους αξιοποίηση.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μη επεμβατικής νευροδιέγερσης, με έμφαση στη διακρανιακή διέγερση με συνεχές ρεύμα (transcranial Direct Current Stimulation, tDCS), η οποία αποτελεί τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στο ερευνητικό μέρος της παρούσας εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες τεχνικές νευροδιέγερσης (Ενότητα 3.1). Στη συνέχεια, εξετάζονται αναλυτικότερα ο μηχανισμός δράσης, οι εφαρμογές και η ασφάλεια του tDCS (Ενότητα 3.2). Στην Ενότητα 3.3 παρουσιάζονται οι εφαρμογές της μεθόδου στη γλωσσική λειτουργία, τόσο σε άτομα με αφασία (υποενότητα 3.3.1) όσο και σε υγιείς ενήλικες, με έμφαση σε ευρήματα που σχετίζονται με τη γλωσσική επεξεργασία (υποενότητα 3.3.2). Τέλος, στην Ενότητα 3.4 γίνεται συγκριτική αποτίμηση των διαφορετικών μεθόδων νευροδιέγερσης ως προς την επίδρασή τους στη γλωσσική και γνωστική λειτουργία.

3.1 Μέθοδοι Νευροδιέγερσης

Οι τεχνικές μη επεμβατικής νευροδιέγερσης (NIBS) περιλαμβάνουν διαφορετικές μεθόδους, οι οποίες διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν τη νευρωνική δραστηριότητα. Δύο από τις βασικότερες κατηγορίες είναι η διακρανιακή μαγνητική διέγερση (Transcranial Magnetic Stimulation, TMS), η οποία βασίζεται στη χρήση μαγνητικών πεδίων, και η διακρανιακή ηλεκτρική διέγερση (transcranial Electrical Stimulation, tES), η οποία χρησιμοποιεί ασθενή ηλεκτρικά ρεύματα που εφαρμόζονται μέσω ηλεκτροδίων στο τριχωτό της κεφαλής. Στην κατηγορία της tES περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η διακρανιακή διέγερση με συνεχές ρεύμα (transcranial Direct Current Stimulation, tDCS), η διακρανιακή διέγερση με εναλλασσόμενο ρεύμα (transcranial Alternating Current Stimulation, tACS) και η διακρανιακή διέγερση με τυχαίο θόρυβο (transcranial Random Noise Stimulation, tRNS) (Woods et al., 2016).

Ο TMS αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ένα πηνίο τοποθετείται πάνω από το κρανίο και παράγει ένα ταχέως μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο διαπερνά το κρανίο και επάγει ηλεκτρικό πεδίο στον υποκείμενο εγκεφαλικό φλοιό. Όταν η διέγερση έχει επαρκή ένταση, μπορεί να μεταβάλει τη δραστηριότητα των νευρώνων και, σε κατάλληλες συνθήκες, να προκαλέσει δυναμικά ενέργειας. Ανάλογα με τις παραμέτρους της διέγερσης, ο TMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διευκόλυνση ή την αναστολή της φλοιϊκής δραστηριότητας. Η επαναλαμβανόμενη μορφή του (repetitive TMS, rTMS) έχει αξιοποιηθεί τόσο στην έρευνα όσο και στην κλινική πράξη και αποτελεί θεραπευτική επιλογή για ορισμένες παθήσεις, μεταξύ των οποίων και η μείζων καταθλιπτική διαταραχή, σε συγκεκριμένες κλινικές ενδείξεις.

Σε αντίθεση με τον TMS, οι τεχνικές tES χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής έντασης και, στις συνήθεις παραμέτρους εφαρμογής τους, δεν προκαλούν άμεσα δυναμικά ενέργειας. Το tDCS εφαρμόζει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο τριχωτό της κεφαλής. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται μεταβάλλει τη διαμεμβρανική τάση των νευρώνων και μπορεί, ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος, να αυξήσει ή να μειώσει την πιθανότητα νευρωνικής πυροδότησης. Η επίδραση αυτή συνδέεται με τη μεταβολή της φλοιϊκής διεγερσιμότητας και όχι με την άμεση πρόκληση δυναμικών ενέργειας (Nitsche & Paulus, 2000; Woods et al., 2016).

Το tACS, αντίθετα, εφαρμόζει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Βασικός στόχος της μεθόδου είναι η αλληλεπίδραση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου ρεύματος με τις ενδογενείς νευρωνικές ταλαντώσεις, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τον συγχρονισμό και τη δυναμική της νευρωνικής δραστηριότητας.

Το tRNS αποτελεί μια διαφορετική μορφή tES, κατά την οποία εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα με τυχαία μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά και χωρίς σταθερή πολικότητα. Για τον λόγο αυτό, σε αντίθεση με το tDCS, δεν γίνεται η κλασική διάκριση μεταξύ ανοδικής και καθοδικής διέγερσης. Οι επιδράσεις του tRNS έχουν συσχετιστεί, μεταξύ άλλων, με μεταβολές στη νευρωνική διεγερσιμότητα και με μηχανισμούς όπως η στοχαστική αντήχηση (stochastic resonance), αν και οι ακριβείς μηχανισμοί δράσης του εξακολουθούν να διερευνώνται (Woods et al., 2016; Potok et al., 2022).

Εκτός από τις μη επεμβατικές τεχνικές, υπάρχουν και επεμβατικές μέθοδοι νευροδιέγερσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εν τω βάθει εγκεφαλική διέγερση (Deep Brain Stimulation, DBS), κατά την οποία ηλεκτρόδια εμφυτεύονται χειρουργικά σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου. Η DBS χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση ορισμένων σοβαρών κινητικών διαταραχών, όπως η νόσος του Parkinson, και διαφέρει ουσιαστικά από τις τεχνικές NIBS ως προς την επεμβατικότητα και το προφίλ κινδύνου. Για τον λόγο αυτό, η DBS δεν εντάσσεται στις μεθόδους μη επεμβατικής νευροδιέγερσης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Οι διαφορετικές τεχνικές NIBS παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με τον τρόπο εφαρμογής και τη φυσιολογική τους δράση. Ο TMS μπορεί, υπό κατάλληλες συνθήκες, να προσφέρει μεγαλύτερη χωρική εστίαση από τις συμβατικές διατάξεις tES, αν και ο βαθμός εστίασης εξαρτάται από την περιοχή του εγκεφάλου και τη γεωμετρία του φλοιού. Αντίθετα, το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται με τις συμβατικές διατάξεις tDCS είναι περισσότερο διάχυτο και επηρεάζει ευρύτερες περιοχές του εγκεφάλου (Woods et al., 2016). Το tDCS, ωστόσο, παρουσιάζει σημαντικά πρακτικά πλεονεκτήματα, καθώς ο εξοπλισμός είναι σχετικά απλός και φορητός, ενώ η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί παράλληλα με γνωστικές ή γλωσσικές δραστηριότητες. Επιπλέον, η χρήση πρωτοκόλλων εικονικής διέγερσης (sham stimulation) επιτρέπει τον σχεδιασμό ελεγχόμενων μελετών στις οποίες αξιολογείται η ειδική επίδραση της διέγερσης.

Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν συμβάλει στην ευρεία χρήση του tDCS σε μελέτες που εξετάζουν τη γλωσσική και γνωστική λειτουργία, τόσο σε κλινικούς όσο και σε υγιείς πληθυσμούς. Δεδομένου ότι το tDCS αποτελεί τη μέθοδο νευροδιέγερσης που χρησιμοποιείται στο ερευνητικό μέρος της παρούσας εργασίας, οι αρχές λειτουργίας, οι εφαρμογές και τα δεδομένα σχετικά με την αποτελεσματικότητα και την ασφάλειά του εξετάζονται αναλυτικότερα στις επόμενες ενότητες.

3.2 tDCS: Μηχανισμός, Εφαρμογές, Ασφάλεια

3.2.1 Μηχανισμός Δράσης

Ο μηχανισμός δράσης του tDCS βασίζεται στην εφαρμογή ασθενούς συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο τριχωτό της κεφαλής. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια, ένα ανοδικό (θετικό) και ένα καθοδικό (αρνητικό), τα οποία τοποθετούνται με βάση την περιοχή του εγκεφάλου που αποτελεί στόχο της διέγερσης και την επιθυμητή κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Το ρεύμα που εφαρμόζεται δεν είναι, υπό τις συνήθεις συνθήκες tDCS, αρκετά ισχυρό ώστε να προκαλέσει άμεσα δυναμικά ενέργειας. Αντίθετα, μεταβάλλει υποκατωφλιακά την πόλωση της νευρωνικής μεμβράνης και, κατά συνέπεια, τη διεγερσιμότητα των νευρώνων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μεταβληθεί η πιθανότητα ένας νευρώνας να ανταποκριθεί σε εισερχόμενη συναπτική δραστηριότητα (Nitsche & Paulus, 2000, 2001).

Στις αρχικές μελέτες του tDCS, στον κινητικό φλοιό παρατηρήθηκε ότι η ανοδική διέγερση μπορούσε να αυξήσει τη φλοιϊκή διεγερσιμότητα, ενώ η καθοδική διέγερση μπορούσε να την μειώσει. Η επίδραση αυτή αποτέλεσε τη βάση για το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο σύμφωνα με το οποίο η ανοδική διέγερση συνδέεται με αποπόλωση και αύξηση της διεγερσιμότητας, ενώ η καθοδική με υπερπόλωση και μείωση της διεγερσιμότητας. Η σχέση αυτή, ωστόσο, δεν είναι απόλυτη: μπορεί να

επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ένταση και η διάρκεια της διέγερσης, η θέση και η μορφολογία των ηλεκτροδίων, καθώς και τα χαρακτηριστικά της εγκεφαλικής περιοχής που διεγείρεται. Ιδιαίτερα σε γνωστικές λειτουργίες, τα αποτελέσματα της πολικότητας εμφανίζονται περισσότερο ετερογενή και δεν ακολουθούν πάντοτε το απλό πρότυπο «ανοδική διέγερση – καθοδική αναστολή» (Jacobson et al., 2012).

Οι πρώτες πειραματικές μελέτες έδειξαν επίσης ότι οι επιδράσεις του tDCS δεν περιορίζονται απαραίτητα στη διάρκεια εφαρμογής του ρεύματος. Μετά το τέλος της διέγερσης μπορούν να παρατηρηθούν μεταβολές στη φλοιϊκή διεγερσιμότητα, γνωστές ως μετα-διεγερτικές επιδράσεις (after-effects). Στον κινητικό φλοιό, οι Nitsche και Paulus (2001) ανέφεραν ότι η διεγερσιμότητα αυξήθηκε περίπου κατά 150% σε σχέση με την αρχική τιμή και ότι η επίδραση μπορούσε να διατηρηθεί έως και 90 λεπτά μετά το τέλος της διέγερσης. Η διάρκεια και το μέγεθος των after-effects εξαρτώνται, μεταξύ άλλων, από τις παραμέτρους της διέγερσης, όπως η ένταση και η διάρκεια εφαρμογής του ρεύματος (Nitsche & Paulus, 2000, 2001). Οι παρατεταμένες αυτές επιδράσεις έχουν συνδεθεί με μηχανισμούς νευροπλαστικότητας.

Ένας ακόμη μηχανισμός που έχει προταθεί αφορά τον εγκεφαλικής προέλευσης νευροτροφικό παράγοντα (Brain-Derived Neurotrophic Factor, BDNF). Οι Fritsch et al. (2010) έδειξαν ότι η διέγερση με συνεχές ρεύμα μπορεί να ενισχύσει μορφές συναπτικής πλαστικότητας που εξαρτώνται από τον BDNF, εύρημα που συνδέθηκε με τη δυνατότητα αξιοποίησης του tDCS στη μελέτη της κινητικής μάθησης. Τα ευρήματα αυτά παρέχουν μια πιθανή βιολογική βάση για τη σύνδεση του tDCS με μηχανισμούς νευροπλαστικότητας, χωρίς όμως να σημαίνουν ότι ο ίδιος μηχανισμός έχει αποδειχθεί με τον ίδιο τρόπο για όλες τις γνωστικές ή γλωσσικές λειτουργίες (Fritsch et al., 2010).

Τα ευρήματα αυτά, στο σύνολό τους, υποστηρίζουν την άποψη ότι το tDCS λειτουργεί κυρίως ως τροποποιητής της νευρωνικής δραστηριότητας και όχι ως άμεσος μηχανισμός ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης νευρώνων. Η επίδρασή του εξαρτάται από την κατάσταση του εγκεφάλου κατά τη διάρκεια της διέγερσης, καθώς και από τις παραμέτρους εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός του tDCS με συμπεριφορικές παρεμβάσεις, όπως η γνωστική ή γλωσσική εξάσκηση: η ταυτόχρονη εφαρμογή διέγερσης και εξάσκησης έχει προταθεί ως τρόπος αξιοποίησης της νευροπλαστικότητας και ενίσχυσης των επιδράσεων της εκπαίδευσης. Η αρχή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, καθώς το ερευνητικό της πρωτόκολλο συνδυάζει τη διέγερση με γλωσσική δραστηριότητα.

3.2.2 Εφαρμογές

Η μέθοδος έχει μελετηθεί σε διαφορετικούς τομείς της νευροαποκατάστασης και της κλινικής νευροεπιστήμης, μεταξύ άλλων στην αποκατάσταση κινητικών και γνωστικών λειτουργιών έπειτα από ΑΕΕ (αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο), καθώς και σε

νευροψυχιατρικές και νευροεκφυλιστικές διαταραχές (Bikson et al., 2016). Παράλληλα, το tDCS έχει διερευνηθεί σε παθήσεις όπως η κατάθλιψη, η νόσος του Parkinson και άλλες νευρολογικές διαταραχές, με τα αποτελέσματα να ποικίλλουν ανάλογα με την υπό μελέτη λειτουργία, την κλινική κατάσταση των συμμετεχόντων και τις παραμέτρους της διέγερσης. Η εφαρμογή του tDCS στις συγκεκριμένες διαταραχές δεν θα πρέπει, συνεπώς, να θεωρείται ενιαία ή δεδομένη θεραπευτική πρακτική, αλλά αντικείμενο έρευνας με διαφορετικό βαθμό τεκμηρίωσης ανά περίπτωση.

Για την παρούσα εργασία, ιδιαίτερη βαρύτητα έχει η εφαρμογή του tDCS στη γλωσσική λειτουργία. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί τόσο σε πληθυσμό με κάποια ασθένεια, κυρίως σε άτομα με αφασία μετά από ΑΕΕ, όσο και σε υγιείς ενήλικες, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασής της σε επιμέρους γλωσσικές λειτουργίες, όπως η κατονομασία, η λεκτική ευχέρεια και η παραγωγή λόγου. Οι εφαρμογές αυτές εξετάζονται αναλυτικότερα στην Ενότητα 3.3.

3.2.3 Ασφάλεια

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του tDCS είναι το σχετικά καλό προφίλ ασφάλειας που έχει καταγραφεί στις μέχρι σήμερα μελέτες, ιδιαίτερα όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σύμφωνα με τα καθιερωμένα πρωτόκολλα και τις κατάλληλες τεχνικές προδιαγραφές. Η ανασκόπηση των Bikson et al. (2016), η οποία συγκέντρωσε δεδομένα από περισσότερες από 33.000 συνεδρίες tDCS, συμπεριλαμβανομένων μελετών σε διαφορετικούς πληθυσμούς, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος παρουσιάζει χαμηλή συχνότητα σοβαρών ανεπιθύμητων ενεργειών όταν χρησιμοποιείται εντός των παραμέτρων που έχουν μελετηθεί. Τα δεδομένα αυτά έχουν συμβάλει στην ευρεία χρήση του tDCS σε ερευνητικά πρωτόκολλα και στην περαιτέρω διερεύνηση των κλινικών εφαρμογών του (Bikson et al., 2016).

Οι ανεπιθύμητες ενέργειες που αναφέρονται συχνότερα είναι συνήθως ήπιες και παροδικές. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο κνησμός ή το αίσθημα μυρμηκίασης στην περιοχή εφαρμογής των ηλεκτροδίων, ο ερεθισμός ή η ερυθρότητα του δέρματος και ένα παροδικό αίσθημα καύσου. Σε μικρότερο βαθμό μπορεί να αναφερθούν πονοκέφαλος, κόπωση, ζάλη ή ναυτία (Brunoni et al., 2011). Τα συμπτώματα αυτά εμφανίζονται συνήθως κατά τη διάρκεια της συνεδρίας ή λίγο μετά το τέλος της και, στις περισσότερες περιπτώσεις, υποχωρούν χωρίς ειδική αντιμετώπιση. Η εμφάνιση αρκετών από αυτές τις ήπιες ενοχλήσεις έχει αναφερθεί, μάλιστα, και κατά τη διάρκεια sham διέγερσης, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία του κατάλληλου ελέγχου placebo στον σχεδιασμό μελετών tDCS (Bikson et al., 2016).

Παρά το ευνοϊκό προφίλ ασφάλειας, η εφαρμογή του tDCS απαιτεί την τήρηση συγκεκριμένων προφυλάξεων. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται σε άτομα με ιστορικό επιληψίας, καθώς και σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν μεταλλικά ή ηλεκτρονικά εμφυτεύματα στην περιοχή της κεφαλής ή του αυχένα, ανάλογα με τη θέση και το είδος

του εμφυτεύματος. Η εφαρμογή των ηλεκτροδίων σε ερεθισμένο ή τραυματισμένο δέρμα θα πρέπει επίσης να αποφεύγεται. Για ορισμένους πληθυσμούς, όπως οι έγκυες γυναίκες, τα διαθέσιμα δεδομένα παραμένουν περιορισμένα και επομένως απαιτείται αυξημένη προσοχή κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας συμμετοχής σε πρωτόκολλα tDCS (Woods et al., 2016).

Η σωστή εφαρμογή της μεθόδου είναι επίσης σημαντική για την αποφυγή τοπικών δερματικών αντιδράσεων. Η κατάλληλη προετοιμασία του δέρματος, η σωστή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων και η επαρκής ενυδάτωση των σπόγγων, όταν χρησιμοποιείται συμβατικός εξοπλισμός με σπογγώδη ηλεκτρόδια, συμβάλλουν στη σωστή κατανομή του ρεύματος και περιορίζουν τον κίνδυνο ερεθισμού ή εγκαύματος. Παράλληλα, η ένταση, η διάρκεια και η συνολική δόση της διέγερσης θα πρέπει να καθορίζονται σύμφωνα με το πρωτόκολλο και τις τεχνικές προδιαγραφές της μεθόδου (Woods et al., 2016).

Τα διαθέσιμα δεδομένα, στο σύνολό τους, υποστηρίζουν ότι το tDCS παρουσιάζει ευνοϊκό προφίλ ασφάλειας όταν εφαρμόζεται με κατάλληλες παραμέτρους και σύμφωνα με τις προβλεπόμενες διαδικασίες. Η ασφάλεια, ωστόσο, δεν θα πρέπει να θεωρείται ανεξάρτητη από τις παραμέτρους της διέγερσης ή τα χαρακτηριστικά του συμμετέχοντα: η τήρηση των σχετικών πρωτοκόλλων, η κατάλληλη επιλογή των συμμετεχόντων και η παρακολούθηση πιθανών ανεπιθύμητων ενεργειών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή εφαρμογή της μεθόδου. Το προφίλ αυτό καθιστά το tDCS κατάλληλο για τη διεξαγωγή ελεγχόμενων ερευνητικών μελετών σε υγιείς ενήλικες, όπως η παρούσα πτυχιακή εργασία.

3.3 Εφαρμογές του tDCS στη Γλωσσική Λειτουργία

3.3.1 Εφαρμογές σε άτομα με αφασία

Το tDCS έχει μελετηθεί εκτενώς ως συμπληρωματικό μέσο στη γλωσσική αποκατάσταση ατόμων με αφασία μετά από ΑΕΕ, συνήθως σε συνδυασμό με λογοθεραπευτική παρέμβαση. Δύο κύριες θεωρητικές προσεγγίσεις έχουν καθοδηγήσει την επιλογή της περιοχής-στόχου: (1) αφενός η ανοδική διέγερση αριστερών μετωπιαίων περιοχών, με στόχο την ενίσχυση της δραστηριότητας του εναπομείναντος γλωσσικού δικτύου του αριστερού ημισφαιρίου και (2) αφετέρου η καθοδική (ανασταλτική) διέγερση ομόλογων περιοχών του δεξιού ημισφαιρίου, με βάση την υπόθεση ότι η υπερδραστηριότητα του δεξιού ημισφαιρίου μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να λειτουργεί ανασταλτικά για την ανάκαμψη (Otal et al., 2015).

Σε μία από τις πρώτες σχετικές μελέτες, οι Baker, Rorden και Fridriksson (2010) εφάρμοσαν ανοδική διέγερση σε περιοχή του αριστερού μετωπιαίου φλοιού παράλληλα με θεραπεία κατονομασίας σε άτομα με χρόνια μετεγκεφαλική αφασία και ανέφεραν

βελτίωση της ακρίβειας κατονομασίας σε σύγκριση με την εικονική διέγερση. Η μετα-ανάλυση ατομικών δεδομένων ασθενών (individual patient data) των Rosso et al. (2018), η οποία εξέτασε επαναλαμβανόμενες συνεδρίες tDCS σε συνδυασμό με θεραπεία κατονομασίας, κατέληξε επίσης σε θετική συνολική επίδραση της ανοδικής διέγερσης του αριστερού ημισφαιρίου στην απόδοση κατονομασίας. Αντίστοιχα, η μετα-ανάλυση των Otal et al. (2015), εστιασμένη στην ανασταλτική διέγερση ομόλογων δεξιών περιοχών, παρείχε ενδείξεις θετικής επίδρασης ως συμπληρωματικής παρέμβασης στη λογοθεραπεία, αν και οι συγγραφείς επεσήμαναν την ανάγκη για μεγαλύτερα και πιο τυποποιημένα δείγματα μελετών.

Δεν συμφωνεί ωστόσο το σύνολο της βιβλιογραφίας ως προς το μέγεθος και τη σταθερότητα αυτών των επιδράσεων. Η συστηματική ανασκόπηση με δικτυακή μετα-ανάλυση των Elsner, Kugler και Mehrholz (2020), η οποία αξιολόγησε το σύνολο των διαθέσιμων τυχαιοποιημένων ελεγχόμενων δοκιμών tDCS σε αφασία μετά από ΑΕΕ, κατέληξε σε χαμηλή έως πολύ χαμηλή βεβαιότητα τεκμηρίωσης και δεν εντόπισε σαφή υπεροχή του tDCS έναντι της εικονικής διέγερσης σε επίπεδο ομάδας, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μεθοδολογικά ισχυρότερες μελέτες μεγαλύτερης κλίμακας. Η ασυμφωνία αυτή μεταξύ επιμέρους μελετών και συστηματικών ανασκοπήσεων αντανακλά, εν μέρει, τη σημαντική μεθοδολογική ετερογένεια του πεδίου (διαφορετικές φάσεις αφασίας, πρωτόκολλα διέγερσης, περιοχές-στόχους και συνοδά θεραπευτικά σχήματα).

Πέρα από την αφασία έπειτα από ΑΕΕ, το tDCS έχει διερευνηθεί και σε προοδευτικές μορφές γλωσσικής διαταραχής. Ο Byeon (2020) διεξήγαγε μετα-ανάλυση για την επίδραση του tDCS στην κατονομασία ηλικιωμένων ατόμων με πρωτοπαθή προοδευτική αφασία (primary progressive aphasia, PPA) και ανέφερε θετική συνολική επίδραση. Παρόμοια, η διερευνητική μετα-ανάλυση των Nissim, Moberg και Hamilton (2020) εξέτασε την αποτελεσματικότητα της μη επεμβατικής νευροδιέγερσης (tDCS ή TMS), σε συνδυασμό με γλωσσική θεραπεία, σε άτομα με PPA και παρείχε προκαταρκτικές, αλλά ενθαρρυντικές, ενδείξεις οφέλους, επισημαίνοντας παράλληλα τον περιορισμένο αριθμό διαθέσιμων μελετών.

Τέλος, η επίδραση της διέγερσης της αριστερής κάτω μετωπιαίας έλικας (left Inferior Frontal Gyrus, IFG) στην παραγωγή λόγου δεν περιορίζεται στην αφασία. Οι Chesters, Möttönen και Watkins (2018) έδειξαν ότι η ανοδική διέγερση της αριστερής IFG βελτίωσε τη ροή του λόγου σε ενήλικες με τραυλισμό, εύρημα που ενισχύει τον ρόλο της συγκεκριμένης περιοχής σε ευρύτερες πτυχές της παραγωγής λόγου, πέρα από τη γλωσσική διαταραχή έπειτα από ΑΕΕ.

Στο σύνολό της, η βιβλιογραφία για την εφαρμογή του tDCS στην αφασία παρέχει ενθαρρυντικές αλλά όχι ομόφωνες ενδείξεις οφέλους, ιδίως όταν η διέγερση συνδυάζεται με στοχευμένη γλωσσική θεραπεία. Η ετερογένεια στον σχεδιασμό των μελετών, στις περιοχές-στόχους και στα κλινικά χαρακτηριστικά των συμμετεχόντων

αποτελεί βασικό παράγοντα που περιορίζει, προς το παρόν, τη διατύπωση οριστικών κλινικών συστάσεων.

3.3.2 Εφαρμογές σε υγιείς ενήλικες

Πέρα από τις πιθανές κλινικές εφαρμογές του, το tDCS έχει μελετηθεί και ως μέθοδος διερεύνησης και τροποποίησης γλωσσικών λειτουργιών σε υγιείς ενήλικες. Στο ερευνητικό αυτό πλαίσιο, η εφαρμογή του επιτρέπει τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο η μεταβολή της διεγερσιμότητας συγκεκριμένων φλοιϊκών περιοχών μπορεί να επηρεάσει επιμέρους γλωσσικές διεργασίες. Παράλληλα, έχει διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησής του ως συμπληρωματικού μέσου για τη διευκόλυνση της γλωσσικής μάθησης ή της απόδοσης σε συγκεκριμένες γλωσσικές δοκιμασίες.

Σημαντικό μέρος της σχετικής έρευνας έχει εστιαστεί στην αριστερή IFG περιοχή. Στις μελέτες αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικά πρωτόκολλα διέγερσης και διαφορετικές γλωσσικές δοκιμασίες, όπως η κατονομασία, η λεκτική ευχέρεια, η εκμάθηση νέου λεξιλογίου και η επεξεργασία γλωσσικών κανόνων. Ορισμένα ευρήματα έχουν αναφέρει βελτιώσεις της απόδοσης μετά από ανοδική διέγερση περιοχών του αριστερού μετωπιαίου φλοιού, γεγονός που έχει συμβάλει στο ενδιαφέρον για τη χρήση του tDCS στη μελέτη της γλωσσικής επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα μεταξύ διαφορετικών μελετών, ωστόσο, δεν είναι πάντοτε συνεπή, και η σχέση μεταξύ της πολικότητας της διέγερσης και της γλωσσικής απόδοσης δεν μπορεί να θεωρηθεί μονοσήμαντη (Jacobson et al., 2012).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κεντρικό ρόλο διαδραματίζουν οι μελέτες που εξετάζουν τη γλωσσική μάθηση και την επεξεργασία μορφολογικών και γραμματικών κανόνων. Η αριστερή IFG περιοχή έχει συνδεθεί με διαφορετικές πτυχές της γλωσσικής επεξεργασίας και, ειδικότερα, με διεργασίες που υπερβαίνουν την απλή ανάκτηση ήδη αποθηκευμένων λεξικών αναπαραστάσεων. Για τον λόγο αυτό αποτελεί εύλογη περιοχή-στόχο σε ερευνητικά πρωτόκολλα που εξετάζουν την επεξεργασία και παραγωγή ρηματικών τύπων και τη χρήση μορφολογικών κανόνων. Η διερεύνηση της επίδρασης του tDCS σε κανονικά ρήματα και ψευδορήματα παρουσιάζει, επομένως, ιδιαίτερη θεωρητική σημασία, καθώς επιτρέπει τη μελέτη γλωσσικών διαδικασιών στις οποίες εμπλέκονται τόσο αποθηκευμένες γλωσσικές αναπαραστάσεις όσο και διαδικασίες εφαρμογής κανόνων.

Η βιβλιογραφία σχετικά με τις επιδράσεις του tDCS στη γλωσσική και γενικότερα στη γνωστική απόδοση υγιών ενηλίκων παραμένει, ωστόσο, ετερογενής. Η ποσοτική ανασκόπηση των Horvath et al. (2015), η οποία εξέτασε επιδράσεις μεμονωμένης συνεδρίας tDCS σε υγιείς πληθυσμούς, δεν εντόπισε αξιόπιστες ενδείξεις σταθερής γνωστικής βελτίωσης στις εξεταζόμενες κατηγορίες. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει ότι τα αποτελέσματα μιας μεμονωμένης συνεδρίας tDCS δεν είναι πάντοτε σταθερά ή

εύκολα στην αναπαραγωγή και ότι απαιτείται προσεκτική ερμηνεία των θετικών ευρημάτων μεμονωμένων μελετών.

Πέρα από βασικότερες γλωσσικές δοκιμασίες, το tDCS έχει διερευνηθεί και σε πιο σύνθετες μορφές γλωσσικής παραγωγής. Η Matar et al. (2020), σε πιλοτική μελέτη με 14 υγιείς ηλικιωμένους, εξέτασαν την επίδραση ανοδικής διέγερσης της αριστερής και της δεξιάς IFG περιοχής στην παραγωγή αφηγηματικού λόγου. Οι συνθήκες διέγερσης των περιοχών αυτών παρουσίασαν περισσότερες σημαντικές βελτιώσεις εντός της ομάδας σε επιμέρους δείκτες παραγωγής λόγου σε σύγκριση με την εικονική διέγερση, χωρίς όμως να καταγραφούν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ενεργών συνθηκών. Τα ευρήματα αυτά παρέχουν προκαταρκτικές ενδείξεις ότι η παραγωγή πιο σύνθετου προφορικού λόγου μπορεί να επηρεάζεται από τη διέγερση περιοχών που συμμετέχουν σε ευρύτερα γλωσσικά δίκτυα και ότι ο ρόλος του δεξιού ημισφαιρίου αξίζει περαιτέρω διερεύνηση. Λόγω του μικρού μεγέθους του δείγματος και του πιλοτικού χαρακτήρα της μελέτης, ωστόσο, τα αποτελέσματα θα πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή (Matar et al., 2020).

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία, στο σύνολό της, παρέχει ενδείξεις ότι το tDCS μπορεί, υπό ορισμένες συνθήκες, να τροποποιήσει την απόδοση σε επιμέρους γλωσσικές δοκιμασίες σε υγιείς ενήλικες. Η σημαντική ετερογένεια των ευρημάτων, ωστόσο, δεν επιτρέπει τη διατύπωση γενικών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου ως μέσου «ενίσχυσης» της γλωσσικής λειτουργίας. Η επίδραση του tDCS φαίνεται να εξαρτάται από παράγοντες όπως η περιοχή-στόχος, οι παράμετροι και ο χρόνος της διέγερσης, η φύση της γλωσσικής δραστηριότητας και τα χαρακτηριστικά των συμμετεχόντων. Απαιτούνται, συνεπώς, περαιτέρω μεθοδολογικά αυστηρές μελέτες, ώστε να αποσαφηνιστούν οι συνθήκες υπό τις οποίες η μέθοδος μπορεί να επιφέρει αξιόπιστες και αναπαραγώγιμες επιδράσεις στη γλωσσική επεξεργασία υγιών πληθυσμών.

3.4 Σύγκριση των μεθόδων ως προς την επίδραση στη γλωσσική και γνωστική επεξεργασία

Η σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών μη επεμβατικής νευροδιέγερσης ως προς την επίδρασή τους στη γλωσσική και γνωστική επεξεργασία παρουσιάζει ιδιαίτερο θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου σε ερευνητικό ή κλινικό πλαίσιο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων ο μηχανισμός δράσης της κάθε τεχνικής, η χωρική και χρονική ακρίβεια της διέγερσης, η διάρκεια των επιδράσεων, καθώς και πρακτικά χαρακτηριστικά όπως η ευκολία εφαρμογής, το κόστος και η ανοχή των συμμετεχόντων.

Ως προς τη χωρική εστίαση, ο TMS παρουσιάζει γενικά πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών διατάξεων tES, καθώς η χρήση κατάλληλων πηνίων επιτρέπει την όλο και

περισσότερο εστιασμένη διέγερση συγκεκριμένων περιοχών του φλοιού. Αντίθετα, στις συμβατικές εφαρμογές tDCS, το ηλεκτρικό πεδίο κατανέμεται σε σχετικά ευρύτερη περιοχή του εγκεφάλου, γεγονός που περιορίζει την ανατομική ακρίβεια της διέγερσης. Η περιορισμένη αυτή ακρίβεια εστίασης του tDCS αποτελεί έναν από τους παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς η πραγματική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τη θέση, το μέγεθος και τη διάταξη των ηλεκτροδίων, αλλά και από την ανατομική μορφολογία του κάθε ατόμου. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές διατάξεις ηλεκτροδίων με στόχο τον καλύτερο έλεγχο και την αυξημένη ακρίβεια εστίασης της διέγερσης.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα στη γλωσσική αποκατάσταση, η σύγκριση μεταξύ TMS και tDCS δεν οδηγεί σε ένα απόλυτα σαφές συμπέρασμα ως προς την υπεροχή μίας από τις δύο μεθόδους. Σε μετα-ανάλυση ασθενών με αφασία μετά από αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο, οι Bucur και Paragno (2019) ανέφεραν μέτρια έως μεγάλη επίδραση για τον rTMS και μικρή έως μέτρια επίδραση για το tDCS ως προς την κατονομασία, με υψηλότερο επίπεδο τεκμηρίωσης για τον rTMS. Διαφορετικές συγκριτικές μετα-αναλύσεις, ωστόσο, έχουν αναφέρει παρόμοια μεγέθη επίδρασης μεταξύ των δύο μεθόδων, υποδεικνύοντας ότι η σχετική αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από παράγοντες όπως η φάση της αφασίας, ο σχεδιασμός της μελέτης, η θέση διέγερσης και ο συνδυασμός της νευροδιέγερσης με γλωσσική θεραπεία (Bucur & Paragno, 2019).

Εξίσου σημαντική είναι η διάκριση μεταξύ των επιδράσεων μιας μεμονωμένης συνεδρίας και εκείνων που προκύπτουν μετά από επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του tDCS. Σε υγιείς ενήλικες, η ποσοτική ανασκόπηση των Horvath et al. (2015) δεν εντόπισε αξιόπιστες βελτιώσεις στις εξεταζόμενες γνωστικές λειτουργίες μετά από μία μόνο συνεδρία tDCS. Το εύρημα αυτό αφορούσε τόσο γνωστικές όσο και γλωσσικές δοκιμασίες και υποδεικνύει ότι οι επιδράσεις μιας μεμονωμένης συνεδρίας δεν είναι απαραίτητα σταθερές ή αναπαραγώγιμες στον υγιή πληθυσμό.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία σχετικά με επαναλαμβανόμενες συνεδρίες, ιδιαίτερα όταν το tDCS συνδυάζεται με στοχευμένη συμπεριφορική ή γλωσσική εξάσκηση, παρέχει ενδείξεις για μεγαλύτερες και πιο μόνιμες επιδράσεις σε ορισμένες συνθήκες. Το μέγεθος και η διάρκεια των αποτελεσμάτων, ωστόσο, φαίνεται να εξαρτώνται σημαντικά από το πρωτόκολλο διέγερσης, τη λειτουργία που εξετάζεται και τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού. Τα ευρήματα αυτά είναι συμβατά με την άποψη ότι το tDCS λειτουργεί κυρίως ως τροποποιητής της νευρωνικής διεγερσιμότητας και της πλαστικότητας και όχι ως αυτόνομος μηχανισμός άμεσης βελτίωσης της γνωστικής ή γλωσσικής επίδοσης. Η αποτελεσματικότητά του φαίνεται να επηρεάζεται από την κατάσταση του εγκεφάλου κατά τη διάρκεια της διέγερσης και από τη συμπεριφορική δραστηριότητα με την οποία αυτή συνδυάζεται· ο συνδυασμός tDCS με στοχευμένη

γλωσσική ή γνωστική εξάσκηση αποτελεί, για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερα σημαντική προσέγγιση τόσο στην έρευνα όσο και στη νευροαποκατάσταση.

Σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, το tDCS παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του TMS. Ο σχετικά απλός και φορητός εξοπλισμός, το χαμηλότερο κόστος και η δυνατότητα εφαρμογής της διέγερσης κατά τη διάρκεια γνωστικών ή γλωσσικών δραστηριοτήτων καθιστούν τη μέθοδο ιδιαίτερα κατάλληλη για ερευνητικά πρωτόκολλα που απαιτούν επαναλαμβανόμενες συνεδρίες. Επιπλέον, η δυνατότητα χρήσης πρωτοκόλλων sham διέγερσης διευκολύνει τον σχεδιασμό ελεγχόμενων μελετών. Τα πλεονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται, ωστόσο, από τη μικρότερη ακριβή χωρική εστίαση και από τη σημαντική μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μελετών και συμμετεχόντων.

Καμία από τις διαθέσιμες τεχνικές NIBS, συνολικά, δεν μπορεί να θεωρηθεί καθολικά ανώτερη για τη μελέτη της γλωσσικής ή γνωστικής επεξεργασίας. Ο TMS προσφέρει ακριβέστερη χωρική εστίαση και ισχυρή δυνατότητα άμεσης τροποποίησης της φλοιϊκής δραστηριότητας, ενώ οι τεχνικές tES, και ιδιαίτερα το tDCS, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την πρακτικότητα, το κόστος και τη δυνατότητα συνδυασμού με συμπεριφορικές παρεμβάσεις. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου θα πρέπει, ως εκ τούτου, να βασίζεται στο ερευνητικό ερώτημα, στον πληθυσμό που μελετάται και στο επιθυμητό πρότυπο νευροτροποποίησης.

4^ο Κεφάλαιο: Μεθοδολογία

4.1 Σχεδιασμός της μελέτης

Η παρούσα έρευνα ήταν ποσοτική πειραματική μελέτη με δύο ανεξάρτητες, παράλληλες ομάδες, η οποία εξέτασε την επίδραση της διακρανιακής διέγερσης με συνεχές ρεύμα (tDCS) στη μορφολογική επεξεργασία ρημάτων σε υγιείς ενήλικες. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ ενεργής διέγερσης (active) και εικονικής διέγερσης (sham). Κάθε συμμετέχων εξετάστηκε σε μία μόνο συνθήκη. Το δείγμα αποτελούνταν από 32 άτομα. Τα κριτήρια συμμετοχής αφορούσαν ενήλικες φυσικούς/μονόγλωσσους ομιλητές της ελληνικής γλώσσας, χωρίς μαθησιακό ή νευρολογικό πρόβλημα. Η κύρια μεταβλητή έκβασης ήταν ο χρόνος απόκρισης κατά τη μετατροπή ψευδορημάτων από τον ενεστώτα στον αόριστο. Συμπληρωματικά καταγράφηκαν ο χρόνος απόκρισης στα πραγματικά ρήματα και τα σφάλματα ή άλλα ζητήματα που σημειώθηκαν κατά την εκτέλεση των δοκιμασιών.

4.2 Πρωτόκολλο tDCS

Η πειραματική παρέμβαση περιλάμβανε δύο συνθήκες εφαρμογής tDCS. Στην ομάδα ενεργής διέγερσης εφαρμόστηκε πραγματική ηλεκτρική διέγερση, ενώ η ομάδα εικονικής διέγερσης αποτέλεσε τη συνθήκη ελέγχου. Οι συμμετέχοντες και των δύο ομάδων εκτέλεσαν την ίδια γλωσσική δοκιμασία, η οποία περιλάμβανε παραγωγή αορίστου πραγματικών ρημάτων και ψευδορημάτων. Η συνθήκη διέγερσης καταγράφηκε για κάθε συμμετέχοντα και χρησιμοποιήθηκε ως μεταβλητή ομαδοποίησης στη στατιστική ανάλυση. Η σύγκριση αφορούσε διαφορετικούς συμμετέχοντες στις δύο ομάδες και δεν περιλάμβανε διαδοχική εξέταση του ίδιου ατόμου υπό ενεργό και εικονική διέγερση. Ο κατασκευαστής της συσκευής διακρανιακής ηλεκτρικής διέγερσης είναι η εταιρεία PlatoScience. Το ενεργό ηλεκτρόδιο (ανόδιο) τοποθετήθηκε πάνω από τον αριστερό ραχιοπλάγιο προμετωπιαίο φλοιό και το ηλεκτρόδιο αναφοράς (καθόδιο) στην ετερόπλευρη (δεξιά) περιοχή. Το μέγεθος των ηλεκτροδίων είναι 4x5cm (20cm²) και η ένταση ήταν 2mA. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε σύστημα διπλής τυφλοποίησης, δηλαδή οι συμμετέχοντες αλλά και οι ερευνητές δεν ήξεραν σε ποιον συμμετέχοντα εφαρμόστηκε active ή sham διέγερση.

4.3 Διαδικασία

Η γλωσσική δοκιμασία βασίστηκε στην ακουστική παρουσίαση προτάσεων και στην προφορική συμπλήρωσή τους με τον κατάλληλο ρηματικό τύπο. Πριν από την κύρια δοκιμασία υπήρχε επεξήγηση των οδηγιών και παρουσίαση τριών παραδειγμάτων

εξοικείωσης, τα οποία δεν αποτελούσαν μέρος των 20 πειραματικών προσπαθειών. Οι συμμετέχοντες καλούνταν να συμπληρώνουν τις προτάσεις όσο το δυνατόν ταχύτερα.

Κατά την κύρια διαδικασία παρουσιάστηκαν αρχικά 10 ηχητικά ερεθίσματα με πραγματικά ρήματα. Το υλικό περιλάμβανε πέντε ομαλά και πέντε ανώμαλα ρήματα. Σε κάθε προσπάθεια, ο συμμετέχων άκουγε μία πρόταση με το ρήμα στον ενεστώτα και στη συνέχεια την αρχή μιας δεύτερης πρότασης, με χρονικό πλαίσιο που απαιτούσε παραγωγή αορίστου. Για παράδειγμα, μετά την πρόταση «Η Άννα σήμερα βήχει όλη μέρα», ακολουθούσε η έναρξη «Η Άννα χτες μόνο μια φορά...», την οποία ο συμμετέχων καλούνταν να συμπληρώσει προφορικά.

Ακολούθησαν 10 επιπλέον ηχητικά ερεθίσματα με ψευδορήματα, δηλαδή μη υπαρκτούς ρηματικούς τύπους που έμοιαζαν με ανώμαλα ρήματα της ελληνικής. Η διαδικασία παρέμεινε ίδια, με ζητούμενο την παραγωγή ενός τύπου αορίστου. Δεν υπήρχε μία προκαθορισμένη σωστή ή λανθασμένη απάντηση και ζητούνταν η πρώτη συνέχεια που ερχόταν στο μυαλό του συμμετέχοντα. Για κάθε προσπάθεια καταγράφηκαν το ερέθισμα, η παραγόμενη απόκριση, ο χρόνος απόκρισης σε δευτερόλεπτα και τυχόν σφάλμα ή ζήτημα κατά την εκτέλεση. Οι σχετικές παρατηρήσεις περιλάμβαναν, μεταξύ άλλων, απουσία απάντησης και επανάληψη του ακουστικού ερεθίσματος. Συνολικά συγκεντρώθηκαν 640 καταγραφές, οι οποίες αντιστοιχούσαν σε 20 προσπάθειες για καθέναν από τους 32 συμμετέχοντες.

4.4 Στατιστική ανάλυση

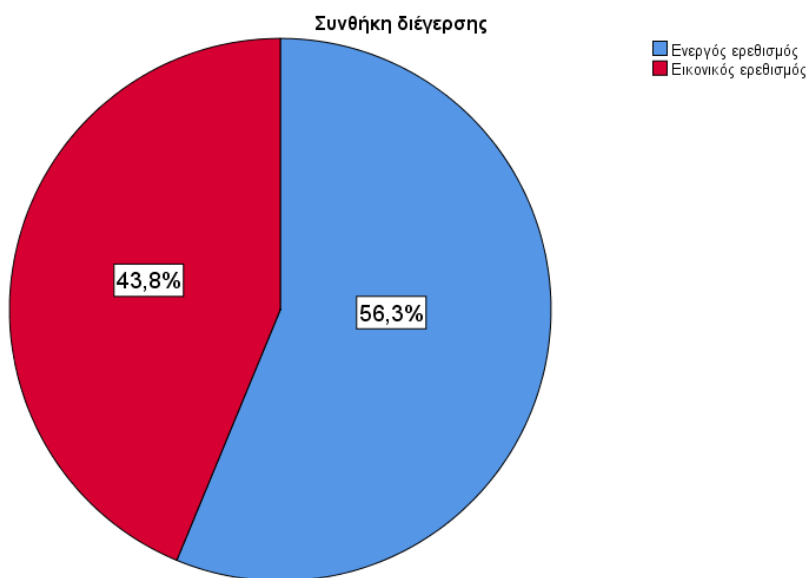
Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα IBM SPSS Statistics (έκδοση 25). Αρχικά, εφαρμόστηκε περιγραφική στατιστική για την παρουσίαση των δημογραφικών χαρακτηριστικών και της επίδοσης των συμμετεχόντων. Οι κατηγορικές μεταβλητές παρουσιάστηκαν με απόλυτες συχνότητες και ποσοστά, ενώ οι ποσοτικές μεταβλητές περιγράφηκαν με μέσους όρους, τυπικές αποκλίσεις, διαμέσους και ενδοτεταρτημοριακά εύρη. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν πίνακες διασταύρωσης της συνθήκης διέγερσης με το φύλο και την ηλικιακή ομάδα, για την παρουσίαση της κατανομής των συμμετεχόντων στις δύο συνθήκες με απόλυτες συχνότητες και ποσοστά εντός κάθε φύλου και ηλικιακής ομάδας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της κανονικότητας της κατανομής των ποσοτικών μεταβλητών με τους ελέγχους Kolmogorov-Smirnov και Shapiro-Wilk. Καθώς δεν πληρούνταν η προϋπόθεση της κανονικής κατανομής, χρησιμοποιήθηκαν μη παραμετρικοί έλεγχοι. Ειδικότερα, εφαρμόστηκε ο έλεγχος Mann-Whitney για να εξεταστεί αν οι δύο ομάδες διέφεραν ως προς τον χρόνο απόκρισης κάθε συμμετέχοντα στα ψευδορήματα μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης και της ομάδας εικονικής διέγερσης. Ο ίδιος έλεγχος χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση του μέσου χρόνου απόκρισης στα πραγματικά ρήματα και του πλήθους των καταγεγραμμένων σφαλμάτων

στα ψευδορήματα μεταξύ των δύο ομάδων. Επιπλέον, για κάθε συμμετέχοντα υπολογίστηκε η διαφορά του μέσου χρόνου απόκρισης στα ανώμαλα μείον τον αντίστοιχο χρόνο στα ομαλά πραγματικά ρήματα και συγκρίθηκε μεταξύ των δύο συνθηκών διέγερσης με τον έλεγχο Mann-Whitney. Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίστηκε σε $p < 0,05$.

5^ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα

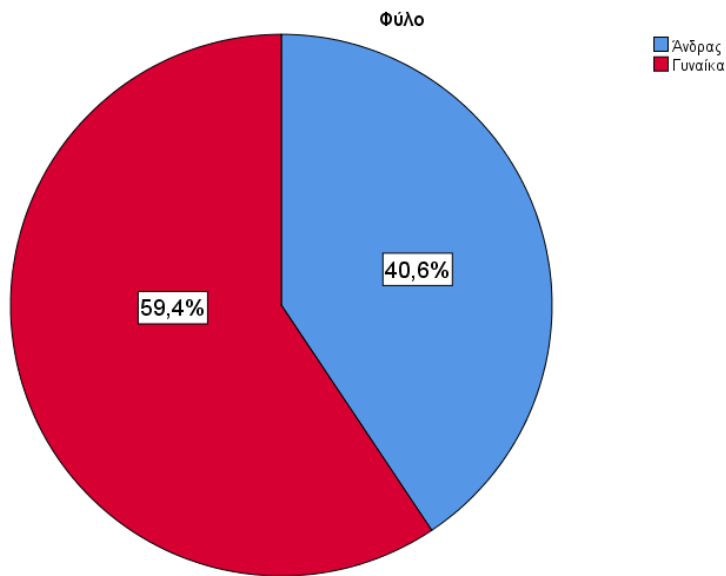
5.1 Δημογραφικά χαρακτηριστικά του δείγματος

Στην έρευνα συμμετείχαν συνολικά 32 άτομα. Το 56,3% (n=18) εξετάστηκε υπό συνθήκη ενεργής διέγερσης, ενώ το 43,8% (n=14) υπό συνθήκη εικονικής διέγερσης (Διάγραμμα 1).



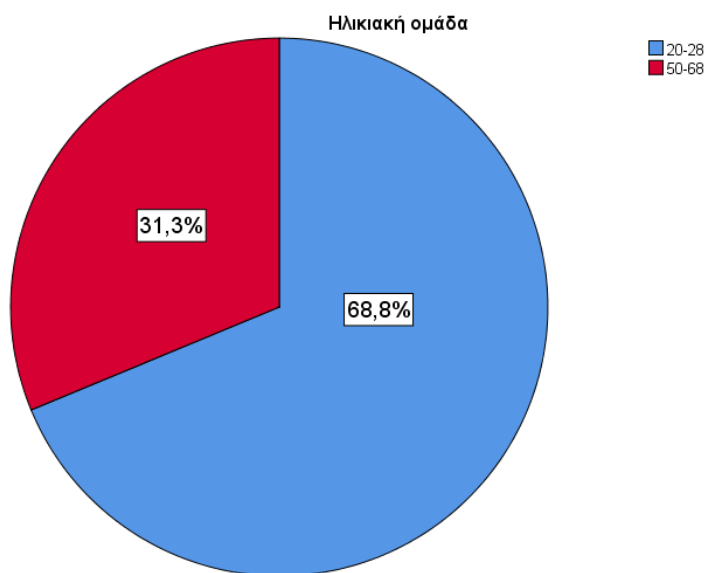
Διάγραμμα 1. Συνθήκη διέγερσης

Ως προς το φύλο, το 59,4% (n=19) ήταν γυναίκες και το 40,6% (n=13) άνδρες (Διάγραμμα2).



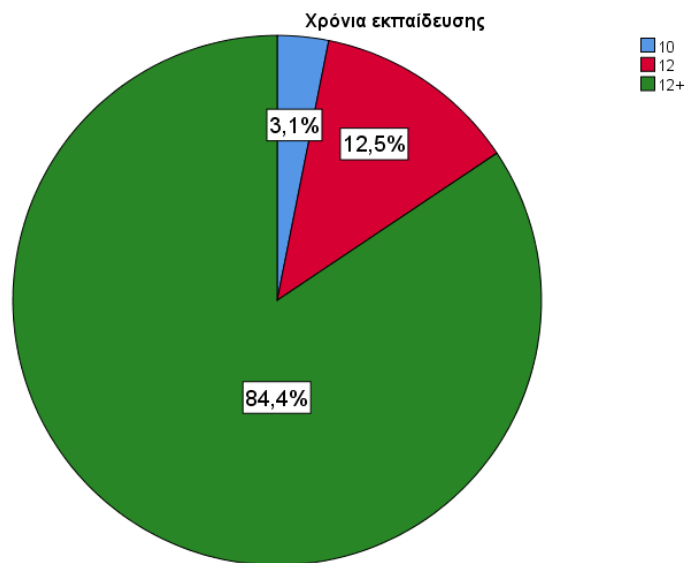
Διάγραμμα 2. Φύλο

Η ηλικία των συμμετεχόντων κυμαινόταν μεταξύ 20 και 68 ετών ($M=33,28$, $SD=17,13$). Συγκεκριμένα, το 68,8% ($n=22$) ανήκε στην ηλικιακή ομάδα των 20–28 ετών, ενώ το 31,3% ($n=10$) στην ομάδα των 50–68 ετών (Διάγραμμα 3).



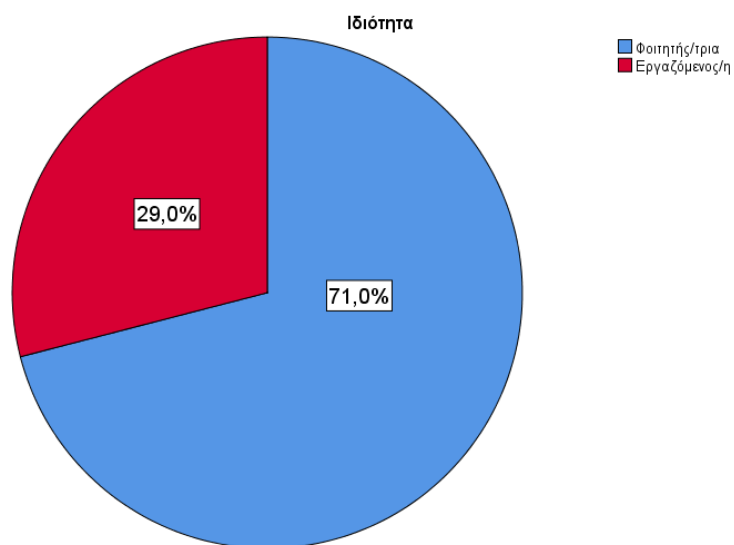
Διάγραμμα 3. Ηλικιακή ομάδα

Αναφορικά με τα χρόνια εκπαίδευσης, το 84,4% ($n=27$) είχε περισσότερα από 12 έτη εκπαίδευσης, το 12,5% ($n=4$) είχε 12 έτη και το 3,1% ($n=1$) είχε 10 έτη (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4. Χρόνια εκπαίδευσης

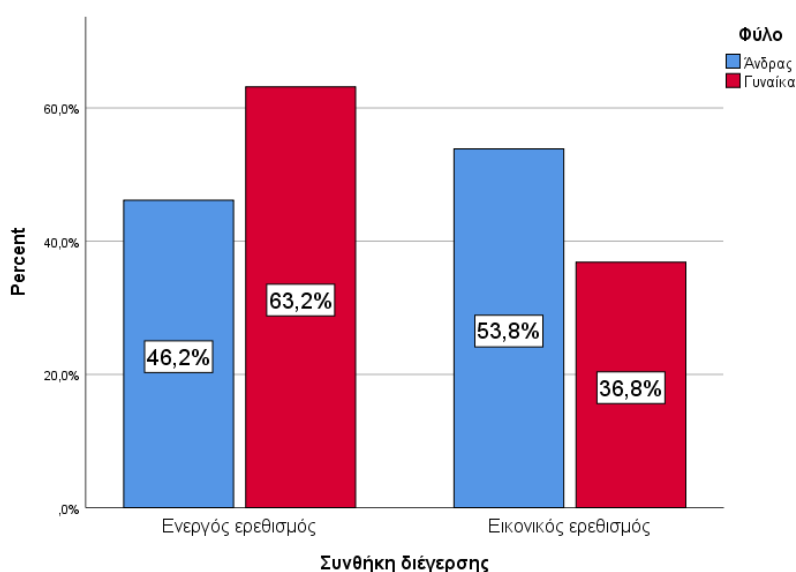
Ως προς την ιδιότητα, το 71,0% (n=22) ήταν φοιτητές/τριες και το 29,0% (n=10) εργαζόμενοι/ες (Διάγραμμα 5).



Διάγραμμα 5. Ιδιότητα

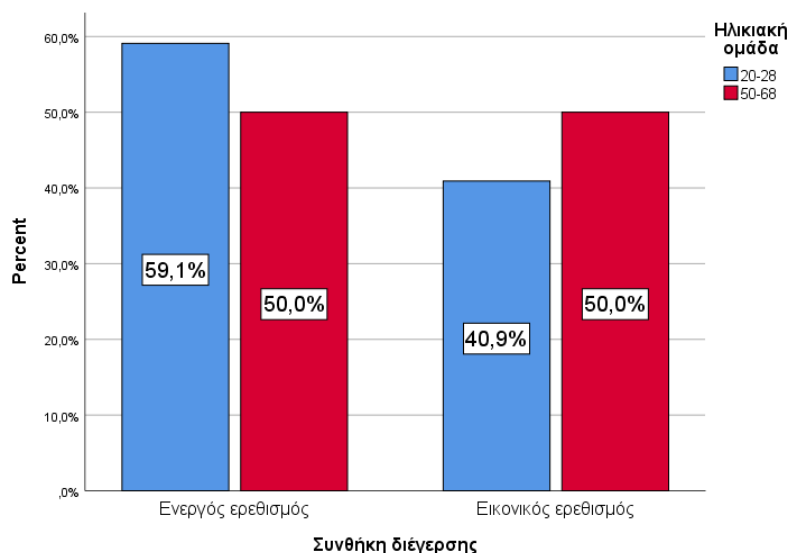
5.2 Κατανομή των συμμετεχόντων στις συνθήκες διέγερσης ανά φύλο και ηλικιακή ομάδα

Από το σύνολο των ανδρών, το 46,2% (n=6) συμμετείχε στη συνθήκη ενεργής διέγερσης και το 53,8% (n=7) στη συνθήκη εικονικής διέγερσης. Αντίστοιχα, από το σύνολο των γυναικών, το 63,2% (n=12) συμμετείχε στη συνθήκη ενεργής διέγερσης και το 36,8% (n=7) στη συνθήκη εικονικής διέγερσης (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6. Ποσοστιαία κατανομή των συμμετεχόντων στις συνθήκες διέγερσης ανά φύλο

Στην ηλικιακή ομάδα των 20-28 ετών, το 59,1% (n=13) συμμετείχε στη συνθήκη ενεργής διέγερσης και το 40,9% (n=9) στη συνθήκη εικονικής διέγερσης. Στην ηλικιακή ομάδα των 50-68 ετών, οι συμμετέχοντες κατανεμήθηκαν ισόποσα στις δύο συνθήκες, με το 50,0% (n=5) να συμμετέχει στην ενεργό διέγερση και το 50,0% (n=5) στην εικονική διέγερση (Διάγραμμα 7).



Διάγραμμα 7. Ποσοστιαία κατανομή των συμμετεχόντων στις συνθήκες διέγερσης ανά ηλικιακή ομάδα

5.3 Περιγραφικά αποτελέσματα των γλωσσικών δοκιμασιών

Ο μέσος χρόνος απόκρισης στα πραγματικά ρήματα κυμάνθηκε από ,51 έως 2,11 δευτερόλεπτα, με μέση τιμή 1,08 (SD=,36, Mdn=,99, IQR=,21). Στα ψευδορήματα, ο μέσος χρόνος απόκρισης κυμάνθηκε από ,54 έως 2,08 δευτερόλεπτα, με μέση τιμή 1,35 (SD=,43, Mdn=1,32, IQR=,47) (Πίνακας 1).

Το πλήθος των αποκρίσεων ψευδορημάτων που συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του μέσου χρόνου κυμάνθηκε από 5 έως 10 ανά συμμετέχοντα (M=9,41, SD=1,26, Mdn=10,00, IQR=,25) (Πίνακας 1). Για το 75,0% (n=24) των συμμετεχόντων, στον υπολογισμό του μέσου χρόνου απόκρισης στα ψευδορήματα συμπεριλήφθηκαν και οι 10 αποκρίσεις. Για το 9,4% (n=3) συμπεριλήφθηκαν 9 αποκρίσεις και για το 6,3% (n=2) συμπεριλήφθηκαν 8. Αντίστοιχα, 5, 6 και 7 αποκρίσεις συμπεριλήφθηκαν για έναν συμμετέχοντα σε κάθε περίπτωση, με ποσοστό 3,1% (n=1) ανά κατηγορία.

Το πλήθος των καταγεγραμμένων σφαλμάτων στα ψευδορήματα κυμάνθηκε από 0 έως 10 (M=4,16, SD=4,14, Mdn=2,50, IQR=9,00) (Πίνακας 1). Πιο συγκεκριμένα, το 34,4% (n=11) των συμμετεχόντων δεν παρουσίασε κανένα καταγεγραμμένο σφάλμα. Ένα σφάλμα καταγράφηκε για το 9,4% (n=3), ενώ 2 και 3 σφάλματα καταγράφηκαν για το 6,3% (n=2) ανά κατηγορία. Επιπλέον, το 3,1% (n=1) είχε 6 καταγεγραμμένα σφάλματα, ενώ 7 και 9 σφάλματα καταγράφηκαν για το 12,5% (n=4) ανά κατηγορία. Τέλος, το 15,6% (n=5) είχε 10 καταγεγραμμένα σφάλματα.

Πίνακας 1. Περιγραφικά στατιστικά των χρόνων απόκρισης στα πραγματικά ρήματα και στα ψευδορήματα, του πλήθους των αποκρίσεων που συμπεριλήφθηκαν στον μέσο χρόνο και των καταγεγραμμένων σφαλμάτων στα ψευδορήματα

	Min	Max	M	SD	Mdn	IQR
Μέσος χρόνος απόκρισης στα πραγματικά ρήματα (σε δευτ.)	,51	2,11	1,08	,36	,99	,21
Μέσος χρόνος απόκρισης στα ψευδορήματα (σε δευτ.)	,54	2,08	1,35	,43	1,32	,47
Πλήθος αποκρίσεων ψευδορημάτων που συμπεριλήφθηκαν στον μέσο χρόνο	5	10	9,41	1,26	10,00	,25
Πλήθος καταγεγραμμένων σφαλμάτων στα ψευδορήματα	0	10	4,16	4,14	2,50	9,00

5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των γλωσσικών δοκιμασιών μεταξύ ενεργής και εικονικής διέγερσης

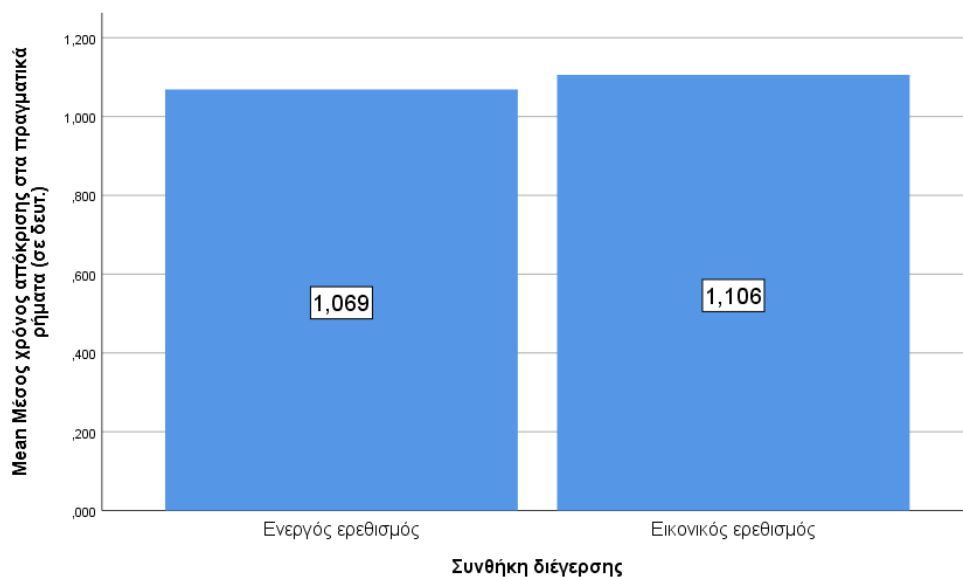
Για τη διερεύνηση διαφορών μεταξύ ενεργής και εικονικής διέγερσης εφαρμόστηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Whitney U. Δεν διαπιστώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε καμία από τις εξεταζόμενες μεταβλητές (Πίνακας 2).

Συγκεκριμένα, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στον μέσο χρόνο απόκρισης στα πραγματικά ρήματα μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης (Mean Rank=15,56) και της ομάδας εικονικής διέγερσης (Mean Rank=17,71), καθώς $U=109,000$, $Z=-,646$, $p=,518$. Αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στον μέσο χρόνο απόκρισης στα ψευδορήματα μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης (Mean Rank=18,00) και της ομάδας εικονικής διέγερσης (Mean Rank=14,57), καθώς $U=99,000$, $Z=-1,026$, $p=,305$.

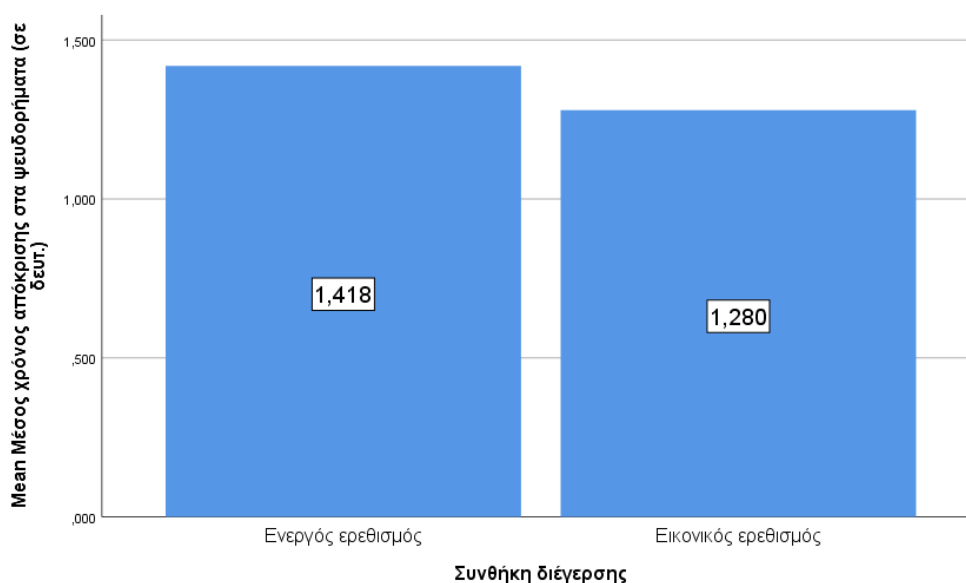
Επίσης, δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στο πλήθος των αποκρίσεων ψευδορημάτων που συμπεριλήφθηκαν στον μέσο χρόνο μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης (Mean Rank=16,75) και της ομάδας εικονικής διέγερσης (Mean Rank=16,18), καθώς $U=121,500$, $Z=-,225$, $p=,822$. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στο πλήθος των καταγεγραμμένων σφαλμάτων στα ψευδορήματα μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης (Mean Rank=15,58) και της ομάδας εικονικής διέγερσης (Mean Rank=17,68), καθώς $U=109,500$, $Z=-,643$, $p=,520$.

Πίνακας 2. Σύγκριση των χρόνων απόκρισης, του πλήθους των αποκρίσεων που συμπεριλήφθηκαν στον μέσο χρόνο και των καταγεγραμμένων σφαλμάτων μεταξύ ενεργής και εικονικής διέγερσης

	Συνθήκη διέγερσης	Mean Rank	U	Z	p
Μέσος χρόνος απόκρισης στα πραγματικά ρήματα (σε δευτ.)	Ενεργός ερεθισμός	15,56	109,000	-,646	,518
	Εικονικός ερεθισμός	17,71			
Μέσος χρόνος απόκρισης στα ψευδορήματα (σε δευτ.)	Ενεργός ερεθισμός	18,00	99,000	-1,026	,305
	Εικονικός ερεθισμός	14,57			
Πλήθος αποκρίσεων ψευδορημάτων που συμπεριλήφθηκαν στον μέσο χρόνο	Ενεργός ερεθισμός	16,75	121,500	-,225	,822
	Εικονικός ερεθισμός	16,18			
Πλήθος καταγεγραμμένων σφαλμάτων στα ψευδορήματα	Ενεργός ερεθισμός	15,58	109,500	-,643	,520
	Εικονικός ερεθισμός	17,68			



Διάγραμμα 8. Μέσος χρόνος απόκρισης στα πραγματικά ρήματα ανά συνθήκη διέγερσης (σε δευτερόλεπτα)



Διάγραμμα 9. Μέσος χρόνος απόκρισης στα ψευδορήματα ανά συνθήκη διέγερσης (σε δευτερόλεπτα)

Για τη διερεύνηση διαφορών μεταξύ ενεργής και εικονικής διέγερσης ως προς τη διαφορά του μέσου χρόνου απόκρισης στα ανώμαλα και στα ομαλά πραγματικά ρήματα εφαρμόστηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann-Whitney. Δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στη διαφορά του μέσου χρόνου απόκρισης μεταξύ ανώμαλων και ομαλών πραγματικών ρημάτων μεταξύ της ομάδας ενεργής διέγερσης (Mean

Rank=16,66) και της ομάδας εικονικής διέγερσης (Mean Rank=16,28), καθώς $U=123,000$, $Z=-0,094$, $p=,924$ (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Σύγκριση της διαφοράς χρόνου απόκρισης μεταξύ ανώμαλων και ομαλών πραγματικών ρημάτων ανά συνθήκη διέγερσης

	Συνθήκη διέγερσης	Mean Rank	U	Z	p
Διαφορά στο μέσο χρόνο απόκρισης μεταξύ ομαλών- ανώμαλων ρημάτων	Ενεργός ερεθισμός	16,66	123,000	-,094	,924
	Εικονικός ερεθισμός	16,28			

6^ο Κεφάλαιο: Συζήτηση και Συμπεράσματα

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και σύγκριση με προηγούμενες έρευνες

Η παρούσα μελέτη εξέτασε εάν η ενεργητική διακρανιακή διέγερση συνεχούς ρεύματος (tDCS) επηρέασε τους χρόνους απόκρισης κατά την παραγωγή μορφών παρελθοντικού χρόνου, με ιδιαίτερη έμφαση στα ψευδορήματα. Τα αποτελέσματα δεν αποκάλυψαν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ ενεργητικής και ψεύτικης διέγερσης στους χρόνους απόκρισης ψευδορημάτων. Ομοίως, δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές για τους χρόνους απόκρισης πραγματικών ρημάτων, τον αριθμό των απαντήσεων ψευδορημάτων που συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του μέσου χρόνου απόκρισης ή τα καταγεγραμμένα σφάλματα ψευδορημάτων. Η σύγκριση της διαφοράς χρόνου απόκρισης μεταξύ ανώμαλων και κανονικών πραγματικών ρημάτων ήταν επίσης μη σημαντική. Αυτά τα ευρήματα δεν υποστηρίζουν ένα συμπεριφορικό πλεονέκτημα της ενεργητικής διέγερσης στις εξεταζόμενες γλωσσικές δοκιμασίες.

Τα ευρήματα συμφωνούν με πειραματικές μελέτες που δεν έχουν εντοπίσει αξιόπιστες βελτιώσεις στην παραγωγή γλώσσας μετά από tDCS σε υγιείς συμμετέχοντες. Σε τέσσερα πειράματα που αφορούσαν την ονομασία εικόνων και την ανάγνωση λέξεων, οι Westwood et al. (2017) δεν έλαβαν αξιόπιστη διευκόλυνση από μετωπική ή χρονική διέγερση. Αν και αυτές οι εργασίες διαφέρουν από την παραγωγή σε παρελθοντικό χρόνο, μοιράζονται κοινές απαιτήσεις για την πρόσβαση σε γλωσσικές αναπαραστάσεις και την προετοιμασία προφορικών απαντήσεων. Τα παρόντα αποτελέσματα επεκτείνουν αυτή τη σύγκριση στην μορφολογική παραγωγή: ούτε η ανάκτηση και η παραγωγή γνωστών ρηματικών μορφών ούτε η δημιουργία παρελθοντικών μορφών για ψευδορήματα έδειξαν σημαντικό πλεονέκτημα χρόνου απόκρισης υπό ενεργητική διέγερση.

Ένα παρόμοιο μοτίβο αναφέρθηκε από τους Payne και Tainturier (2018), οι οποίοι εξέτασαν την ονομασία εικόνων μετά από διέγερση στην αριστερή κάτω μετωπική ή οπίσθια άνω κροταφική περιοχή. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν βελτιώσεις που σχετίζονται με την επανάληψη, αλλά κανένα πρόσθετο όφελος ονομασίας που να αποδίδεται στην ενεργή tDCS. Υπό μία πειραματική συνθήκη, η κατώτερη μετωπική διέγερση συσχετίστηκε με βραδύτερες απαντήσεις. Στην παρούσα μελέτη, ο μέσος χρόνος απόκρισης ψευδορημάτων ήταν αριθμητικά υψηλότερος στην ενεργή συνθήκη, στα 1,418 δευτερόλεπτα, από ό,τι στην εικονική συνθήκη, στα 1,280 δευτερόλεπτα. Παρόλα αυτά, η μη σημαντική σύγκριση δεν

αποδεικνύει ένα φαινόμενο επιβράδυνσης που προκαλείται από διέγερση. Η σχετική ομοιότητα μεταξύ των μελετών είναι η απουσία ενός συνεπούς φαινομένου διευκόλυνσης, παρά η απόδειξη ότι η ενεργητική διέγερση διαταράσσει απαραίτητα την παραγωγή γλώσσας.

Τα στοιχεία από άλλες γλωσσικές δοκιμασίες υποστηρίζουν επίσης μια προσεκτική ερμηνεία της tDCS ως γενικού ενισχυτή γλώσσας. Οι Bongaerts et al. (2022) εξέτασαν την παρεγκεφαλιδική διέγερση κατά τη διάρκεια της λεκτικής ευχέρειας, της λεξιλογικής απόφασης και της κατανόησης προτάσεων. Οι αναλύσεις τους δεν κατέδειξαν τις προβλεπόμενες βελτιώσεις στην γλωσσική απόδοση. Αν και η παρεγκεφαλιδική διέγερση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως άμεσα ισοδύναμη με άλλες προσεγγίσεις διέγερσης, αυτά τα ευρήματα δείχνουν ότι μηδενικές συμπεριφορικές επιδράσεις εμφανίζονται σε διαφορετικές γλωσσικές δοκιμασίες και στόχους διέγερσης. Η παρούσα απουσία σημαντικού οφέλους εντάσσεται επομένως σε ένα ευρύτερο εμπειρικό πρότυπο στο οποίο η ενεργητική διέγερση δεν βελτιώνει σταθερά την απόδοση σε υγιείς ομιλητές.

Άλλες μελέτες, ωστόσο, έχουν αναφέρει ταχύτερη γλωσσική παραγωγή μετά από tDCS. Οι Sparing et al. (2008) βρήκαν βελτιωμένη απόδοση ονομασίας εικόνων μετά από ανοδική διέγερση της αριστερής οπίσθιας κροταφικής περιοχής. Ομοίως, οι Fertoni et al. (2010) ανέφεραν διευκόλυνση ονομασίας μετά από ανοδική διέγερση του αριστερού ραχιοπλάγιου προμετωπιαίου φλοιού. Αυτά τα ευρήματα έρχονται σε αντίθεση με τα παρόντα αποτελέσματα πραγματικών ρημάτων, στα οποία ο αριθμητικά μικρότερος χρόνος απόκρισης υπό ενεργό διέγερση, στα 1,069 δευτερόλεπτα σε σύγκριση με 1,106 δευτερόλεπτα υπό εικονική διέγερση, δεν αντιστοιχούσε σε στατιστικά σημαντική διαφορά.

Ένα περαιτέρω παράδειγμα παρέχεται από τους Holland et al. (2011), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η διέγερση του αριστερού κάτω μετωπιαίου φλοιού διευκόλυνε την ονομασία εικόνων και συνοδεύτηκε από αλλαγές στην εγκεφαλική δραστηριότητα που σχετίζεται με την δοκιμασία. Τα ευρήματά τους καταδεικνύουν ότι η διευκόλυνση της συμπεριφοράς μπορεί να συμβεί παράλληλα με μετρήσιμη νευρωνική διαμόρφωση. Παρόλα αυτά, η ονομασία εικόνων και η παραγωγή παρελθοντικού χρόνου επιβάλλουν διαφορετικές γλωσσικές απαιτήσεις. Η ονομασία εικόνων απαιτεί την επιλογή μιας λέξης που αντιστοιχεί σε μια οπτική αναφορά, ενώ η παρούσα δοκιμασία απαιτούσε από τους συμμετέχοντες να επεξεργαστούν ένα ακουστικό ερέθισμα και να παράγουν ένα κατάλληλα μετασχηματισμένο ρήμα. Κατά συνέπεια, η αντίθεση μεταξύ των ευρημάτων αφορά διαφορετικές μορφές παραγωγής γλώσσας και δεν αποτελεί άμεση αντίφαση υπό πανομοιότυπες πειραματικές συνθήκες.

Διαφορές μεταξύ των δοκιμασιών είναι επίσης εμφανείς στην έρευνα για τη λεκτική ευχέρεια. Οι Cattaneo et al. (2011) ανέφεραν βελτιώσεις στη φωνημική και σημασιολογική ροή μετά από διέγερση στην περιοχή Broca. Αντίθετα, οι Westwood και Romani (2018) δεν διαπίστωσαν βελτίωση της μνήμης εργασίας ή της λεκτικής ροής μετά από ανοδική διέγερση της κάτω μετωπιαίας έλικας. Αυτά τα αντικρουόμενα ευρήματα είναι σχετικά επειδή η παραγωγή μιας κλιτής απόκρισης περιλαμβάνει τη διατήρηση του ερεθίσματος και την επιλογή μιας εξόδου, αλλά η εμπλοκή αυτών των διαδικασιών δεν υπονοεί ότι η διέγερση θα τις βελτιώσει. Τα παρόντα αποτελέσματα δεν παρέχουν συμπεριφορικά στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι οποιαδήποτε τροποποίηση αυτών των υποστηρικτικών διαδικασιών μεταφράζεται σε ταχύτερη παραγωγή ψευδορρημάτων.

Τα ανάμεικτα ευρήματα των μεμονωμένων πειραμάτων αντικατοπτρίζονται σε ποσοτικές ανασκοπήσεις. Οι Price et al. (2015) ανέφεραν μια σημαντική συγκεντρωτική επίδραση της ανοδικής tDCS στις γλωσσικές μετρήσεις, με ενδείξεις οφέλους, ιδιαίτερα σε μελέτες που αξιολογούν την απόδοση μετά από διέγερση. Αντίθετα, η μετα-ανάλυση των Westwood και Romani (2017), η οποία επικεντρώθηκε στην ονομασία εικόνων και την ανάγνωση λέξεων σε υγιείς συμμετέχοντες, δεν διαπίστωσε σημαντική συνολική επίδραση. Αυτές οι ανασκοπήσεις ασχολήθηκαν με επικαλυπτόμενες αλλά διαφορετικές συλλογές εργασιών και πειραματικών συνθηκών. Τα παρόντα αποτελέσματα είναι πιο συνεπή με το τελευταίο μοτίβο απουσίας αξιόπιστης διευκόλυνσης, ενώ η ευρύτερη βιβλιογραφία δείχνει ότι συνυπάρχουν θετικά και μηδενικά ευρήματα.

Η έρευνα για την εκμάθηση γλωσσών προσφέρει μια άλλη σχετική σύγκριση. Οι Fiori et al. (2018) διαπίστωσαν ότι η tDCS διευκόλυνε την εκμάθηση ρημάτων και άλλαξε την αποτελεσματική συνδεσιμότητα εντός των δικτύων που υποστήριζαν την απόδοση. Αυτή η μελέτη είναι ιδιαίτερα σχετική επειδή περιελάμβανε ρήματα, αλλά η απόκτηση νέων συσχετίσεων ρημάτων διαφέρει από την παραγωγή του παρατατικού χρόνου ενός οικείου ή επινοημένου ρήματος. Στην παρούσα μελέτη, οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να δημιουργήσουν μια απάντηση χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα γλωσσική τους γνώση. Δεν μάθαιναν μια επανειλημμένα παρουσιαζόμενη μορφή-στόχο για κάθε ψευδορήμα. Η απουσία ταχύτερης παραγωγής ψευδορήματος μπορεί επομένως να συνυπάρχει με στοιχεία που αποδεικνύουν ότι η tDCS διευκολύνει την απόκτηση νέου λεκτικού υλικού.

Μια σχετική διάκριση ισχύει για τη γραμματική μάθηση. Οι De Vries et al. (2010) ανέφεραν ότι η διέγερση της περιοχής Broca ενίσχυσε την έμμεση εκμάθηση μιας τεχνητής γραμματικής. Τα ευρήματά τους αφορούν την απόκτηση κανονικοτήτων μέσω της έκθεσης, ενώ η παρούσα εργασία απαιτούσε την εφαρμογή γνώσεων που ήταν ήδη διαθέσιμες σε φυσικούς ομιλητές της ελληνικής γλώσσας. Η εκμάθηση ενός νέου γραμματικού

συστήματος και η επέκταση υπάρχοντων μορφολογικών μοτίβων σε ένα νέο στοιχείο είναι σχετικές αλλά διακριτές δραστηριότητες.

Στο παρόν δείγμα, οι απαντήσεις των ψευδορρημάτων ήταν περιγραφικά πιο αργές από τις απαντήσεις των πραγματικών ρημάτων, με συνολικούς μέσους όρους 1,35 και 1,08 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα. Αυτό το μοτίβο είναι συμβατό με πρόσθετες απαιτήσεις επεξεργασίας όταν ένας ομιλητής πρέπει να κατασκευάσει μια απάντηση για μια άγνωστη μορφή. Ένα οικείο ρήμα μπορεί να ενεργοποιήσει καθιερωμένες λεξιλογικές και μορφολογικές πληροφορίες, ενώ ένα ψευδορήμα απαιτεί από τον ομιλητή να επεκτείνει την υπάρχουσα γνώση σε ένα νέο στοιχείο. Ωστόσο, η περιγραφική διαφορά από μόνη της δεν καθορίζει μια στατιστικά σημαντική επίδραση της λεξιλογικής κατάστασης, ούτε προσδιορίζει τον συγκεκριμένο μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για τους μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης.

Η ελληνική μορφολογική έρευνα παρέχει ένα χρήσιμο πλαίσιο για την ερμηνεία αυτής της διάκρισης. Οι Stavrakaki και Clahsen (2009) εξέτασαν την παραγωγή συντελεσμένου παρατατικού χρησιμοποιώντας υπάρχοντα και νέα ρήματα σε παιδιά και ενήλικες φυσικούς ομιλητές. Διαπίστωσαν ότι οι σιγματικές μορφές γενικεύονταν ευρέως σε νέα ρήματα, ενώ η επέκταση των μη σιγματικών μορφών εξαρτιόταν περισσότερο από την ομοιότητα με υπάρχοντα μη σιγματικά ρήματα. Τα ευρήματά τους ερμηνεύτηκαν ως συμβατά με μια διάκριση μεταξύ παραγωγικών μορφολογικών λειτουργιών και διαδικασιών που περιλαμβάνουν αποθηκευμένες λεξιλογικές πληροφορίες. Εφαρμοσμένο στην παρούσα εργασία, αυτό το πλαίσιο υποδηλώνει ότι η δημιουργία ενός ψευδορήματος στον παρατατικό χρόνο μπορεί να περιλαμβάνει παραγωγική γενίκευση, αναλογία με γνωστά ρήματα ή συνεισφορές και από τα δύο.

Η πρόσθετη ανάλυση των πραγματικών ρημάτων εξέτασε το κατά πόσον η διέγερση συσχετίστηκε με διαφορετική αντίθεση χρόνου απόκρισης μεταξύ ομαλών και ανώμαλων μορφών. Η απουσία σημαντικής διαφοράς μεταξύ ομάδων σε αυτήν την αντίθεση υποδηλώνει ότι η ενεργητική διέγερση δεν προκάλεσε ανιχνεύσιμη αλλαγή στο σχετικό μοτίβο χρόνου απόκρισης. Αυτό το εύρημα δεν αποδεικνύει ότι τα ομαλά και τα ανώμαλα ρήματα επεξεργάζονται με τον ίδιο τρόπο. Αντίθετα, δείχνει ότι η παρούσα σύγκριση συμπεριφοράς δεν υποστήριξε επιλεκτική διαμόρφωση που ευνοεί τη μία κατηγορία έναντι της άλλης. Η διάκριση είναι σημαντική επειδή τα στοιχεία σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο αναπαρίστανται δύο κατηγορίες ρημάτων διαφέρουν από τα στοιχεία σχετικά με το κατά πόσον η διέγερση αλλάζει τη διαφορά συμπεριφοράς μεταξύ τους.

Τα καταγεγραμμένα σφάλματα ψευδορρημάτων δεν έδειξαν επίσης στατιστικά σημαντική διαφορά ανάλογα τις συνθήκες διέγερσης. Παράλληλα με τα ευρήματα του χρόνου απόκρισης, αυτό το αποτέλεσμα δεν παρέχει καμία ένδειξη πλεονεκτήματος ενεργητικής

διέγερσης σε κανένα από τα μετρούμενα αποτελέσματα. Επίσης, δεν καθορίζει μια αντιστάθμιση ταχύτητας-ακρίβειας, καθώς η αριθμητική διαφορά στον χρόνο απόκρισης δεν συνοδεύτηκε από μια αποδεδειγμένη διαφορά στα καταγεγραμμένα σφάλματα. Επιπλέον, το μέτρο σφάλματος και η μορφολογική μορφή που επέλεξε ένας συμμετέχων αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πτυχές της απόδοσης. Μια κανονικοποιημένη ψευδορηματική απάντηση και μια ανώμαλη αναλογία δεν μπορούν να ερμηνευθούν αυτόματα ως σωστές και λανθασμένες εναλλακτικές λύσεις, ιδιαίτερα σε μια εργασία που περιλαμβάνει νέες μορφές.

Η θεωρητική ερμηνεία επομένως βασίζεται στον διαχωρισμό της ταχύτητας απόκρισης από τη γλωσσική δομή της απόκρισης. Τα τρέχοντα ευρήματα αφορούν τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή μιας απάντησης και τα καταγεγραμμένα μέτρα απόδοσης. Δεν καταδεικνύουν ότι η ενεργητική διέγερση μετατόπισε τους συμμετέχοντες προς σχηματισμό που βασίζεται σε κανόνες ή στη μνήμη. Ομοίως, η απουσία σημαντικού οφέλους στον χρόνο απόκρισης δεν ευνοεί καμία από τις δύο ερμηνείες της μορφολογικής επεξεργασίας. Η συμβολή της μελέτης είναι το εύρημα ότι η ενεργητική διέγερση δεν συσχετίστηκε με στατιστικά ανιχνεύσιμο πλεονέκτημα στην παραγωγή ψευδορημάτων ή με μια ανιχνεύσιμη αλλαγή στο σχετικό μοτίβο χρόνου απόκρισης των κανονικών και ανώμαλων πραγματικών ρημάτων.

6.2 Περιορισμοί της έρευνας

Τα ευρήματα θα πρέπει να ερμηνευθούν υπό το πρίσμα ορισμένων περιορισμών. Το δείγμα αποτελούνταν από 32 συμμετέχοντες, με τους 18 να λαμβάνουν ενεργητική διέγερση και τους 14 να λαμβάνουν εικονική διέγερση. Αυτό το μέγεθος δείγματος περιόρισε τη στατιστική ισχύ ανίχνευσης μικρών διαφορών μεταξύ των συνθηκών. Η κατανομή ηλικίας ήταν επίσης άνιση, με τους περισσότερους συμμετέχοντες να ανήκουν στην νεότερη ηλικιακή ομάδα. Οι αναλύσεις επίσης δεν έλαβαν υπόψη τις διαφορές μεταξύ μεμονωμένων ερεθισμάτων, όπως η εξοικείωση, η φωνολογική πολυπλοκότητα ή η ομοιότητα με υπάρχοντα ρήματα, οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν συμβάλει στη διακύμανση των χρόνων απόκρισης. Ένας ακόμη περιορισμός αφορά την ερμηνεία των απαντήσεων στα ψευδορήματα. Η καταγραφή των σφαλμάτων δεν διέκρινε συστηματικά τους ομαλούς σχηματισμούς, τους σχηματισμούς κατ' αναλογία με ανώμαλα ρήματα και τους υπόλοιπους τύπους απαντήσεων. Παράλληλα, η εργαζόμενη μνήμη και άλλες γνωστικές ικανότητες που ενδέχεται να εμπλέκονται στη δοκιμασία δεν αξιολογήθηκαν. Τέλος, δεν εξετάστηκαν οι συσχετίσεις των δημογραφικών χαρακτηριστικών με τους χρόνους απόκρισης και το πλήθος των καταγεγραμμένων σφαλμάτων στις γλωσσικές δοκιμασίες.

6.3 Πρακτικές επιπτώσεις της έρευνας

Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η εφαρμογή της tDCS για την ενίσχυση της γλωσσικής απόδοσης σε υγιείς ενήλικες θα πρέπει να παραμείνει προσεκτική και βασισμένη σε στοιχεία. Δεδομένου ότι η ενεργητική διέγερση δεν κατέδειξε πλεονέκτημα έναντι της εικονικής διέγερσης στα εξεταζόμενα αποτελέσματα, η παρούσα μελέτη δεν δικαιολογεί τη σύσταση της ρουτίνας χρήσης του για την επιτάχυνση της παραγωγής ρημάτων. Σε περιβάλλοντα όπου αξιολογείται η tDCS, τα οφέλη του θα πρέπει να αξιολογούνται μέσω σαφώς καθορισμένων γλωσσικών αποτελεσμάτων και όχι να υποτίθενται από την παροχή ενεργητικής διέγερσης.

Για την αξιολόγηση της γλώσσας, συνιστάται να εξετάζονται ξεχωριστά τα πραγματικά ρήματα και τα ψευδορήματα και να διακρίνονται τα κανονικά από τα ανώμαλα πραγματικά ρήματα. Αυτές οι διακρίσεις επιτρέπουν στους επαγγελματίες να περιγράψουν την απόδοση σε γνωστές μορφές και νέους σχηματισμούς με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι χρόνοι απόκρισης θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη παράλληλα με τις απαντήσεις που παράγονται, έτσι ώστε οι ταχύτερες απαντήσεις να μην ερμηνεύονται αυτόματα ως καλύτερη απόδοση.

Μια περαιτέρω πρακτική σύσταση αφορά την καταγραφή των απαντήσεων ψευδορημάτων. Οι αξιολογητές θα πρέπει να τεκμηριώνουν τις πραγματικές μορφές που παράγονται και να χρησιμοποιούν σαφή γλωσσικά κριτήρια για να διακρίνουν τους κανονικούς σχηματισμούς, τις αναλογίες με ανώμαλα ρήματα και τις απαντήσεις που δεν πληρούν τις απαιτήσεις της εργασίας. Αυτή η προσέγγιση θα υποστήριζε μια πιο ενημερωτική αξιολόγηση από μια γενική καταμέτρηση σφαλμάτων, ιδιαίτερα όταν περισσότεροι από ένας σχηματισμοί είναι γλωσσικά εύλογοι.

Όταν ο σκοπός μιας αξιολόγησης περιλαμβάνει την κατανόηση των γνωστικών διεργασιών που υποστηρίζουν την παραγωγή ρημάτων, οι γλωσσικές δοκιμασίες μπορούν να συμπληρωθούν από κατάλληλες μετρήσεις της εργαζόμενης μνήμης. Τέτοιες πληροφορίες θα μπορούσαν να βοηθήσουν τους επαγγελματίες να περιγράψουν την ατομική απόδοση πιο ολοκληρωμένα, χωρίς να αντιμετωπίζουν την ταχύτητα απόκρισης μόνο ως απόδειξη εξάρτησης από τη μνήμη ή τους γραμματικούς κανόνες. Αυτές οι συστάσεις αξιολόγησης θα πρέπει να διακρίνονται από μια σύσταση για θεραπευτική χρήση της tDCS, η οποία δεν υποστηρίζεται από τα παρόντα ευρήματα σε υγιείς συμμετέχοντες.

6.4 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διερευνήσει εάν η tDCS έχει διαφορετικές επιδράσεις στην εκμάθηση νέων μορφολογικών προτύπων και στην εφαρμογή υπάρχουσας γλωσσικής γνώσης. Η σύγκριση της επαναλαμβανόμενης εκπαίδευσης σε άγνωστες μορφές ρημάτων με την άμεση παραγωγή μορφών παρελθοντικού χρόνου θα βοηθούσε να διευκρινιστεί εάν η διέγερση είναι πιο σχετική με την απόκτηση γλωσσικής γνώσης παρά με την ταχύτητα πρόσβασης ή εφαρμογής της. Οι αξιολογήσεις μετά την εκπαίδευση θα μπορούσαν επίσης να εξετάσουν εάν τυχόν οφέλη αφορούν τη διατήρηση ή τη γενίκευση σε μη εκπαιδευμένα ρήματα, παρά την απόδοση μόνο κατά τη διάρκεια της διέγερσης.

Μια άλλη κατεύθυνση θα ήταν να συγκριθεί η διέγερση που παρέχεται πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την γλωσσική εξάσκηση. Αυτές οι συγκρίσεις θα μπορούσαν να διαπιστώσουν εάν η σχέση μεταξύ διέγερσης και μαθησιακής διαδικασίας επηρεάζει τα συμπεριφορικά αποτελέσματα. Η έρευνα θα μπορούσε επίσης να εξετάσει εάν η διέγερση αλληλεπιδρά με τον τύπο της παρεχόμενης πρακτικής, όπως η σαφής διδασκαλία μορφολογικών κανόνων έναντι της έκθεσης σε παραδείγματα χωρίς άμεση εξήγηση των υποκείμενων προτύπων.

Τέλος, ο συνδυασμός συμπεριφορικών εργασιών με μετρήσεις της εγκεφαλικής δραστηριότητας θα μπορούσε να εξετάσει εάν οι αλλαγές που σχετίζονται με την διέγερση στην επεξεργασία της γλώσσας συμβαίνουν χωρίς αντίστοιχες αλλαγές στον χρόνο απόκρισης. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να βοηθήσει στη διάκριση των αλλαγών στις νευρωνικές διεργασίες που υποστηρίζουν την απόδοση από τις μετρήσιμες βελτιώσεις στις προφορικές απαντήσεις. Αντί να εστιάζουν αποκλειστικά στο κατά πόσον οι συμμετέχοντες ανταποκρίνονται ταχύτερα, τέτοιες μελέτες θα μπορούσαν να διερευνήσουν πώς η διέγερση επηρεάζει τις διαδικασίες μέσω των οποίων επιλέγεται και παράγεται μια απάντηση.

6.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη δεν βρήκε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της ενεργής και της εικονικής tDCS στους χρόνους απόκρισης για πραγματικά ρήματα και ψευδορήματα ή σε καταγεγραμμένα σφάλματα ψευδορημάτων μεταξύ υγιών ενηλίκων. Η ενεργητική διέγερση δεν συσχετίστηκε επίσης με σημαντική αλλαγή στη διαφορά χρόνου απόκρισης μεταξύ ομαλών και ανώμαλων πραγματικών ρημάτων. Αυτά τα ευρήματα δεν υποστηρίζουν μια διευκολυντική επίδραση της ενεργής tDCS στις πτυχές της μορφολογικής παραγωγής που εξετάστηκαν, χωρίς να καθιερωθεί ισοδυναμία μεταξύ των δύο συνθηκών διέγερσης.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα δεν καθορίζουν εάν ο σχηματισμός ψευδορημάτων βασίζεται κυρίως σε διαδικασίες που βασίζονται στη μνήμη ή στην εφαρμογή γραμματικών κανόνων, καθώς οι χρόνοι απόκρισης από μόνοι τους δεν μπορούν να διακρίνουν αυτούς τους μηχανισμούς.

Βιβλιογραφία:

- Martínez-Tomás, C., Baciero, A., Lázaro, M., & Hinojosa, J. A. (2025). What do pseudowords tell us about word processing? An overview. *Frontiers in Language Sciences*, 4, 1504770.
- Rajan RK. A comprehensive review on adaptive plasticity and recovery mechanisms post-acquired brain injury. *Neuroprotection*. (2025); 3: 226-252.
- Wani P. D. (2024). From Sound to Meaning: Navigating Wernicke's Area in Language Processing. *Cureus*, 16(9), e69833.
- Fedorenko, E., Ivanova, A. A., & Regev, T. I. (2024). The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain. *Nature reviews. Neuroscience*, 25(5), 289–312.
- Milbocker, K. A., Smith, I. F., & Klintsova, A. Y. (2024). Maintaining a dynamic brain: A review of empirical findings describing the roles of exercise, learning, and environmental enrichment in neuroplasticity from 2017–2023. *Brain Plasticity*, 9(1–2), 75–95.
- Αβου-Χαλίλ, Ρ., & Webb, W. G. (2024). Νευρολογία για λογοθεραπευτές: Εγχειρίδιο βασικών κλινικών νευροεπιστημών επικοινωνίας (Γ. Νάσιος, Επιμ. ελληνικής έκδοσης). Κωνσταντάρας Ιατρικές Εκδόσεις.
- Παπαδοπούλου, Δ., & Ρεβυθιάδου, Α., (2023). Εισαγωγή στη μορφολογία: Θεωρία και πειραματικές εφαρμογές. Θεσσαλονίκη: Ινστιτούτο Νεοελληνικών Σπουδών (Ιδρυμα Μανόλη Τριανταφυλλίδη).
- Bulut, T. (2023). Domain-general and domain-specific functional networks of Broca's area underlying language processing. *Brain and Behavior*, 13, e3046.
- Shao, Z. D., Gong, Y. J., Ren, J., & Wang, J. (2023). Exploring the arcuate fasciculus from a clinical perspective. *Frontiers in neuroscience*, 17, 1307834.
- Bongaerts, F. L. P., Schutter, D. J. L. G., & Klaus, J. (2022). Cerebellar tDCS does not modulate language processing performance in healthy individuals. *Neuropsychologia*, 169, 108206.
- Pasquini, L., Di Napoli, A., Rossi-Espagnet, M. C., Visconti, E., Napolitano, A., Romano, A., Bozzao, A., Peck, K. K., & Holodny, A. I. (2022). Understanding Language Reorganization With Neuroimaging: How Language Adapts to Different Focal Lesions and Insights Into Clinical Applications. *Frontiers in human neuroscience*, 16, 747215.
- Lieber, R. (2021). Εισαγωγή στη μορφολογία . Cambridge University Press.
- Σουκαλοπούλου, Μ. (2021). Η Όψη στην Ελληνική ως Γ1/Γ2: Πειραματική διερεύνηση και εφαρμογές για τη διδακτική πρακτική (Doctoral dissertation,

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Φιλοσοφική. Τμήμα Φιλολογίας).

- Protopapas, A. (2021). Εισαγωγή στη Θεωρία και Μεθοδολογία της Γνωσιακής Επιστήμης.
- Nissim, N. R., Moberg, P. J., & Hamilton, R. H. (2020). Efficacy of noninvasive brain stimulation (tDCS or TMS) paired with language therapy in the treatment of primary progressive aphasia: An exploratory meta-analysis. *Brain Sciences*, 10(9), 597.
- Gupta, A., & Padma Srivastava, M. V. (2020). Newer Paradigms in Language Neurobiology. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 23(Suppl 2), S73–S81.
- Jeffrey C. Magee, Christine Grienberger. (2020). Synaptic Plasticity Forms and Functions. *Annual Review of Neuroscience* 43:95-117.
- Byeon, H. (2020). Meta-analysis on the effects of transcranial direct current stimulation on naming of elderly with primary progressive aphasia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1095.
- Elsner, B., Kugler, J., & Mehrholz, J. (2020). Transcranial direct current stimulation (tDCS) for improving aphasia after stroke: A systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17, 88.
- Matar, S. J., Sorinola, I. O., Newton, C., & Pavlou, M. (2020). Transcranial direct-current stimulation may improve discourse production in healthy older adults. *Frontiers in Neurology*, 11, 935.
- Friedrich, P., Anderson, C., Schmitz, J., Schlüter, C., Lor, S., Stacho, M., ... Ocklenburg, S. (2019). Fundamental or forgotten? Is Pierre Paul Broca still relevant in modern neuroscience? *Laterality*, 24(2), 125–138.
- Bucur, M., & Papagno, C. (2019). Are transcranial brain stimulation effects long-lasting in post-stroke aphasia? A comparative systematic review and meta-analysis on naming performance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 102, 264–289.
- Chesters, J., Möttönen, R., & Watkins, K. E. (2018). Transcranial direct current stimulation over the left inferior frontal cortex improves speech fluency in adults who stutter. *Brain*, 141(4), 1161–1171.
- Rosso, C., Arbizu, C., Dhennain, C., Lamy, J.-C., & Samson, Y. (2018). Repetitive sessions of tDCS to improve naming in post-stroke aphasia: Insights from an individual patient data (IPD) meta-analysis. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 36(1), 107–116.
- Fiori, V., Kunz, L., Kuhnke, P., Marangolo, P., & Hartwigsen, G. (2018). Transcranial direct current stimulation (tDCS) facilitates verb learning by altering effective connectivity in the healthy brain. *NeuroImage*, 181, 550–559.

- Payne, J. S., & Tainturier, M.-J. (2018). tDCS facilitation of picture naming: Item-specific, task general, or neither? *Frontiers in Neuroscience*, 12, 549.
- Westwood, S. J., & Romani, C. (2018). Null effects on working memory and verbal fluency tasks when applying anodal tDCS to the inferior frontal gyrus of healthy participants. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 166.
- Westwood, S. J., & Romani, C. (2017). Transcranial direct current stimulation (tDCS) modulation of picture naming and word reading: A meta-analysis of single session tDCS applied to healthy participants. *Neuropsychologia*, 104, 234–249.
- Westwood, S. J., Olson, A., Miall, R. C., Nappo, R., & Romani, C. (2017). Limits to tDCS effects in language: Failures to modulate word production in healthy participants with frontal or temporal tDCS. *Cortex*, 86, 64–82.
- Voss P, Thomas ME, Cisneros-Franco JM and de Villers-Sidani É (2017) Dynamic Brains and the Changing Rules of Neuroplasticity: Implications for Learning and Recovery. *Front. Psychol.* 8:1657.
- Stump, G. T. (2017). Inflection. *The handbook of morphology*, 11-43.
- Woods, A. J., Antal, A., Bikson, M., Boggio, P. S., Brunoni, A. R., Celnik, P., Cohen, L. G., Fregni, F., Herrmann, C. S., Kappenman, E. S., Knotkova, H., Liebetanz, D., Miniussi, C., Miranda, P. C., Paulus, W., Priori, A., Reato, D., Stagg, C. J., Wenderoth, N., & Nitsche, M. A. (2016). A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, 127(2), 1031–1048.
- Clahsen, H., & Veríssimo, J. (2016). Dual Morphology in the mental lexicon: Experimental evidence from the acquisition and processing of Greek and Portuguese. *Acquisition of Romance languages: Old acquisition challenges and new explanations from a generative perspective*, 41-64.
- Fujii, M., Maesawa, S., Ishiai, S., Iwami, K., Futamura, M., & Saito, K. (2016). Neural Basis of Language: An Overview of An Evolving Model. *Neurologia medico-chirurgica*, 56(7), 379–386.
- Fridriksson, J., Yourganov, G., Bonilha, L., Basilakos, A., Den Ouden, D. B., & Rorden, C. (2016). Revealing the dual streams of speech processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(52), 15108–15113.
- Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C., Zannou, A. L., Jiang, J., Adnan, T., Mourdookoutas, A. P., Kronberg, G., Truong, D., Boggio, P., Brunoni, A. R., Charvet, L., Fregni, F., Fritsch, B., Gillick, B., Hamilton, R. H., Hampstead, B. M., Jankord, R., Kirton, A., Knotkova, H., ... Woods, A. J. (2016). Safety of transcranial direct current stimulation: Evidence-based update 2016. *Brain Stimulation*, 9(5), 641–661.

- Woods, A. J., Antal, A., Bikson, M., Boggio, P. S., Brunoni, A. R., Celnik, P., Cohen, L. G., Fregni, F., Herrmann, C. S., Kappenman, E. S., Knotkova, H., Liebetanz, D., Miniussi, C., Miranda, P. C., Paulus, W., Priori, A., Reato, D., Stagg, C. J., Wenderoth, N., & Nitsche, M. A. (2016). A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, 127(2), 1031–1048.
- Price, A. R., McAdams, H., Grossman, M., & Hamilton, R. H. (2015). A meta-analysis of transcranial direct current stimulation studies examining the reliability of effects on language measures. *Brain Stimulation*, 8(6), 1093–1100.
- Flinker, A., Korzeniewska, A., Shestyuk, A. Y., Franaszczuk, P. J., Dronkers, N. F., Knight, R. T., & Crone, N. E. (2015). Redefining the role of Broca's area in speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(9), 2871–2875.
- Horvath, J. C., Forte, J. D., & Carter, O. (2015). Quantitative review finds no evidence of cognitive effects in healthy populations from single-session transcranial direct current stimulation (tDCS). *Brain Stimulation*, 8(3), 535–550.
- Otal, B., Olma, M. C., Flöel, A., & Wellwood, I. (2015). Inhibitory non-invasive brain stimulation to homologous language regions as an adjunct to speech and language therapy in post-stroke aphasia: A meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 236.
- Haspelmath, M., & Sims, A. (2013). *Understanding morphology*. Routledge.
- Booij, G. (2012). *The grammar of words: An introduction to linguistic morphology*. Oxford University Press.
- Jacobson, L., Koslowsky, M., & Lavidor, M. (2012). tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: A meta-analytical review. *Experimental Brain Research*, 216(1), 1–10.
- Holland, R., Leff, A. P., Josephs, O., Galea, J. M., Desikan, M., Price, C. J., Rothwell, J. C., & Crinion, J. (2011). Speech facilitation by left inferior frontal cortex stimulation. *Current Biology*, 21(16), 1403–1407.
- Aronoff, M., & Fudeman, K. A. (2011). *What is morphology? (Vol. 8)*. Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Brunoni, A. R., Amadera, J., Berbel, B., Volz, M. S., Rizzerio, B. G., & Fregni, F. (2011). A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 14(8), 1133–1145.
- Cattaneo, Z., Pisoni, A., & Papagno, C. (2011). Transcranial direct current stimulation over Broca's region improves phonemic and semantic fluency in healthy individuals. *Neuroscience*, 183, 64–70.

- Clahsen, H., Martzoukou, M., & Stavrakaki, S. (2010). The perfective past tense in Greek as a second language. *Second Language Research*, 26(4), 501-525.
- Baker, J. M., Rorden, C., & Fridriksson, J. (2010). Using transcranial direct-current stimulation to treat stroke patients with aphasia. *Stroke*, 41(6), 1229-1236.
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K., Schambra, H. M., Ji, Y., Cohen, L. G., & Lu, B. (2010). Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: Potential implications for motor learning. *Neuron*, 66(2), 198-204.
- de Vries, M. H., Barth, A. C. R., Maiworm, S., Knecht, S., Zwieterlood, P., & Flöel, A. (2010). Electrical stimulation of Broca's area enhances implicit learning of artificial grammar. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(11), 2427-2436.
- Fertonani, A., Rosini, S., Cotelli, M., Rossini, P. M., & Miniussi, C. (2010). Naming facilitation is induced by transcranial direct current stimulation. *Behavioural Brain Research*, 208(2), 311-318.
- Agathopoulou, E., & Papadopoulou, D. (2009). Regularity patterns of the Greek past perfective: A psycholinguistic study. In *Proceedings from the 8th International Conference on Greek Linguistics*. Ioannina (pp. 1-13).
- Stavrakaki, S., & Clahsen, H. (2009). The perfective past tense in Greek child language. *Journal of Child Language*, 36(1), 113-142.
- Stavrakaki, S., & Clahsen, H. (2009). The perfective past tense in Greek child language. *Journal of Child Language*, 36(1), 113-142.
- Sparing, R., Dafotakis, M., Meister, I. G., Thirugnanasambandam, N., & Fink, G. R. (2008). Enhancing language performance with non-invasive brain stimulation—A transcranial direct current stimulation study in healthy humans. *Neuropsychologia*, 46(1), 261-268.
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M. S., Umarova, R., Musso, M., Glauche, V., Abel, S., Huber, W., Rijntjes, M., Hennig, J., & Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(46), 18035-18040.
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M. S., Umarova, R., Musso, M., Glauche, V., Abel, S., Huber, W., Rijntjes, M., Hennig, J., & Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(46), 18035-18040.
- Ralli, A. (2003). Morphology in Greek linguistics: The state of the art. *Journal of Greek Linguistics*, 4(1), 77-129.
- Nitsche, M. A., Fricke, K., Henschke, U., Schlitterlau, A., Liebetanz, D., Lang, N., Henning, S., Tergau, F., & Paulus, W. (2003). Pharmacological modulation of cortical

excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans. *The Journal of Physiology*, 553(1), 293–301.

- Tsapkini, K., Jarema, G., & Kehayia, E. (2002). Regularity revisited: Evidence from lexical access of verbs and nouns in Greek. *Brain and Language*, 81(1-3), 103-119.
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2001). Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology*, 57(10), 1899–1901.
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, 527(3), 633–639.
- Holton, D., Mackridge, P., & Philippaki-Warbuton, I. (1997). Ελληνικά: Μια ολοκληρωμένη γραμματική της σύγχρονης γλώσσας . Psychology Press.