



ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΥΠΕΡΗΧΟΓΡΑΦΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΤΩΝ ΑΓΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΘΗΣΕΩΝ**



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**" Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΚΡΑΝΙΑΚΟΥ DOPPLER ΣΤΑ ΟΞΕΑ ΑΓΓΕΙΑΚΑ
ΣΥΜΒΑΝΤΑ "**

υπό

ΖΗΚΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ

Ειδικευόμενη Ακτινολογίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
*«Υπερηχογραφική Λειτουργική Απεικόνιση για την πρόληψη & διάγνωση των
αγγειακών παθήσεων»*

Λάρισα, 2025

Επιβλέπων:

*Τέγος Θωμάς - Αν. Καθηγητής Νευρολογίας, Τμήμα Ιατρικής,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. *Τέγος Θωμάς - Αν. Καθηγητής Νευρολογίας, Τμήμα Ιατρικής,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
2. *Δημήτριος Καρδούλας, Ακτινολόγος, Διδάσκων του ΠΜΣ*
3. *Αθανάσιος Γιαννούκας, Καθηγητής Αγγειοχειρουργικής, Τμήμα Ιατρικής,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Τίτλος Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας στα Αγγλικά

***"THE ROLE OF TRANSCRANIAL DOPPLER IN ACUTE CEREBRAL
ACCIDENTS"***

Περιεχόμενα

ΕΞΩΦΥΛΛΟ ΚΑΙ ΣΕΛΙΔΑ ΤΙΤΛΟΥ.....	1-2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ – ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ (ABSTRACT) – ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΚΟΠΟΣ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	10
4.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας TCD.....	10
4.1.2 Φυσιολογικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ταχύτητα Ροής και τους Δείκτες.....	11
4.1.3 Τύποι συσκευών διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler.....	12
4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΚΡΑΝΙΑΚΟΥ DOPPLER	
4.2.1 Τα ακουστικά παράθυρα.....	15
4.2.2 Τεχνική εξέτασης.....	16
4.2.3 Σημεία κλινικής σημασίας και τεχνικές συστάσεις.....	17
4.2.4 Εναλλακτικές προσεγγίσεις.....	18

4.2.5	Πρωτόκολλο ταχείας διερεύνησης με διακρανιακό υπερηχογράφημα Doppler (fast-track tcd).....	19
4.2.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του διακρανιακού Doppler.....	22
4.3	ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ TCD.....	24
4.3.1	Εισαγωγή.....	24
4.3.2	Οξύ ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο.....	25
4.3.3	Έλεγχος παράπλευρου δικτύου.....	26
4.3.4	Ανίχνευση μικροεμβολών και σιωπηλών καρδιακών διαφυγών.....	27
4.3.5	Έλεγχος σε λοιμώξεις του κεντρικού νευρικού συστήματος με τη χρήση TCD.....	29
4.3.6	Ενδοκρανιακή στενωτική - απόφραξη αρτηριών.....	30
4.3.7	Αγγειόσπασμος μετά από υπαραχνοειδή αιμορραγία.....	30
4.3.8	Θρόμβωση φλεβωδών κόλπων.....	33
4.3.9	Εγκεφαλική υποάρδευση, εγκεφαλική κατάρρευση (arrest) και εγκεφαλικός θάνατος.....	34
4.3.10	Παιδιατρικός πληθυσμός: δρεπανοκυτταρική αναιμία και άλλα αιτία οξέων αγγειακών συμβάντων.....	36
4.3.11	Τεχνολογικές εξελίξεις και αυτοματισμοί στη χρήση του διακρανιακού Doppler (TCD).....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	40

Περίληψη (Ελληνικά)

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler αποτελεί μία ταχέως εξελισσόμενη απεικονιστική τεχνική με εφαρμογή στην άμεση αξιολόγηση της εγκεφαλικής

αιμάτωσης σε επείγουσες αγγειακές καταστάσεις. Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η ανάδειξη της διαγνωστικής και προγνωστικής αξίας της μεθόδου στη διαχείριση των οξέων αγγειακών εγκεφαλικών συμβάντων. Στόχος είναι η καταγραφή των τεχνικών παραμέτρων, η αξιολόγηση των κλινικών εφαρμογών της μεθόδου και η ανάδειξη των σύγχρονων τεχνολογικών εξελίξεων που ενισχύουν την ακρίβεια και τη χρηστικότητα της. Η εργασία ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, εστιάζοντας σε μελέτες που αφορούν την εφαρμογή της διακρανιακής υπερηχογραφίας σε ασθενείς με ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο, ενδοκράνια αποφρακτικά φαινόμενα και αγγειόσπασμο. Αναλύονται οι τεχνικές προσπέλασης και αξιολόγησης της αιματικής ροής, καθώς και η δυνατότητα παρακολούθησης της θεραπευτικής ανταπόκρισης. Επιπλέον, εξετάζονται οι νέες δυνατότητες που προσφέρει η εφαρμογή αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης και η ενσωμάτωση της μεθόδου σε πλατφόρμες τηλεϊατρικής. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler, ως μέσο απεικόνισης μη επεμβατικό, φορητό και επαναλήψιμο, συνιστά αξιόπιστο εργαλείο τόσο για τη διαγνωστική προσέγγιση όσο και για την προγνωστική εκτίμηση της εξέλιξης σε οξέα αγγειακά επεισόδια. Η τεχνολογική πρόοδος συμβάλλει περαιτέρω στην καθιέρωσή της ως βασικού διαγνωστικού μέσου στις σύγχρονες νευροαγγειακές δομές.

Λέξεις-κλειδιά: διακρανιακή υπερηχογραφία, οξύ εγκεφαλικό επεισόδιο, εγκεφαλική αιμάτωση, αγγειακή απόφραξη

Abstract (English)

Transcranial Doppler ultrasonography is a rapidly evolving imaging technique applied to the immediate evaluation of cerebral perfusion in acute vascular conditions. The subject of the present study is to highlight the diagnostic and prognostic value of the method in the management of acute cerebrovascular events. The objective of this study is to record the technical parameters, assess the clinical applications of the method, and present the modern technological developments that enhance its accuracy and usability. This work follows a literature review of the international scientific bibliography, focusing on studies concerning the application of transcranial ultrasonography in patients with ischemic stroke, intracranial obstructive phenomena and vasospasm. The access techniques and assessment of blood flow are analyzed, as well as the method's

capacity to monitor therapeutic response. Additionally, the new possibilities offered by the implementation of artificial intelligence algorithms and the integration of the method into telemedicine platforms are examined. The study concludes that transcranial Doppler ultrasonography, as a non-invasive, portable, and repeatable technique, constitutes a reliable tool for both the diagnostic approach and the prognostic evaluation of the progression in acute vascular events. Advances in technology further contribute to its establishment as a key diagnostic modality in modern neurovascular facilities.

Keywords: transcranial ultrasonography, acute stroke, cerebral perfusion, vascular occlusion

Κεφάλαιο 1: . Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας υπερηχογραφικής απεικόνισης έχει συμβάλει ουσιαστικά στην κατανόηση της εγκεφαλικής αιματικής ροής και στην έγκαιρη και ακριβή διάγνωση νευρολογικών παθήσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (TCD) αποτελεί μία δυναμική απεικονιστική προσέγγιση που τείνει να αξιοποιείται όλο και περισσότερο στην καθημερινή κλινική πρακτική για τη μελέτη της αιμοδυναμικής των ενδοκρανιακών αγγείων. Η TCD συνδυάζει το πλεονέκτημα της μη επεμβατικότητας με την ικανότητα συνεχούς παρακολούθησης της ροής, παρέχοντας σημαντικά στοιχεία για την εγκεφαλική κυκλοφορία σε πραγματικό χρόνο [1,2].

Από την πρώτη της εφαρμογή τη δεκαετία του 1980 από τον Aaslid και των συνεργατών του [3], το TCD έχει ενσωματωθεί στη διαγνωστική φαρέτρα, ιδιαίτερα σε καταστάσεις όπως το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο, ο αγγειόσπασμος μετά από υπαραχνοειδή αιμορραγία, η ανίχνευση δεξιο-αριστερής διαφυγής μέσω ωοειδούς τρήματος και η εκτίμηση της εγκεφαλικής αυτορρύθμισης [4–6]. Παράλληλα, με την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών, όπως οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης και η ρομποτική υποβοήθηση, η ακρίβεια και η αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων εξελίσσεται περαιτέρω, ενώ διευρύνονται ταυτόχρονα και οι διαγνωστικές εφαρμογές του TCD [7,8].

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στις εξελίξεις του TCD ως πρακτικής με σκοπό να διερευνηθεί ο ρόλος του στην πρόληψη και διάγνωση των επιπλοκών των χρόνιων

αποφρακτικών αγγειοπαθειών. Ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία εντοπίζεται στο πόσο αποτελεσματικά μπορεί η TCD να λειτουργήσει ως μέσο πρόωμης ανίχνευσης, προτού εμφανιστούν συμπτώματα ή επιπλοκές. Ερευνητικά δεδομένα ποικίλλουν, με ορισμένες μελέτες να τεκμηριώνουν υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση αγγειόσπασμου [9], ενώ άλλες υπογραμμίζουν την εξάρτηση της διαγνωστικής ακρίβειας από τον εξεταστή ή την ποιότητα του ακουστικού παραθύρου [10]. Η βασική ερευνητική ερώτηση που τίθεται αφορά την αξιοπιστία του TCD ως διαγνωστικό εργαλείο σε οξεία αγγειακά συμβάντα. Μέσω της ανασκόπησης της σχετικής βιβλιογραφίας και της αξιολόγησης των διαθέσιμων τεχνολογικών μέσων, η μελέτη αυτή επιχειρεί να καταγράψει και να αναλύσει τις δυνατότητες της μεθόδου το TCD σε σύγχρονα αγγειολογικά ζητήματα.

Κεφάλαιο 2: Σκοπός

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην ανάδειξη της διαγνωστικής και προγνωστικής αξίας της διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler (TCD) στη μελέτη των οξέων αγγειακών εγκεφαλικών συμβάντων. Εστιάζει στη δυνατότητα της μεθόδου να ανιχνεύει έγκαιρα ενδοκρανιακές αποφράξεις, να εκτιμά τη θεραπευτική ανταπόκριση και να συμβάλλει στην πρόγνωση της νευρολογικής έκβασης. Παράλληλα, εξετάζεται η συγκριτική της αποτελεσματικότητα έναντι άλλων απεικονιστικών τεχνικών και αναλύονται οι τεχνικές και τεχνολογικές παράμετροι που επηρεάζουν την αξιοπιστία της. Η μελέτη καθοδηγείται από το ερώτημα κατά πόσο η TCD μπορεί να αποτελέσει ένα λειτουργικά αυτόνομο και αξιόπιστο εργαλείο στις σύγχρονες μονάδες αναφοράς διαχείρισης ασθενών με εγκεφαλικά επεισόδια (stroke units).

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε συστηματική ανασκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας με αντικείμενο τη χρήση της διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler

(TCD) στη διάγνωση, πρόγνωση και παρακολούθηση των ενδοκρανιακών αγγειακών παθήσεων. Η συλλογή της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε στις βάσεις δεδομένων PubMed, Scopus, ScienceDirect και Google Scholar, όπου χρησιμοποιήθηκαν λέξεις-κλειδιά όπως “transcranial Doppler”, “stroke diagnosis”, “microembolic signals”, και “neurocritical care” με χρήση των τελεστών AND και OR. Η έρευνα εστιάστηκε σε άρθρα που δημοσιεύτηκαν από το 2010 και μετά, με προτεραιότητα σε εργασίες με υψηλή επιστημονική απήχηση και τεκμηρίωση.

Ως κριτήρια ένταξης ορίστηκαν πρωτογενείς ερευνητικές εργασίες, συστηματικές ανασκοπήσεις και μετα-ανάλυσεις, καθώς και επίσημες κατευθυντήριες οδηγίες ή δηλώσεις ειδικών ομάδων (όπως AHA/ASA, EAN, SVIN). Η γλώσσα των δημοσιεύσεων περιορίστηκε στα αγγλικά και τα ελληνικά. Αποκλείστηκαν άρθρα με ελλιπή περιγραφή μεθόδου, με πολύ μικρό δείγμα (<30 άτομα), καθώς και μελέτες περιορισμένης εφαρμοσιμότητας λόγω παρωχημένων τεχνολογικών δεδομένων.

Η ανάλυση των επιλεγμένων πηγών πραγματοποιήθηκε με κριτικό πρίσμα, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές προκαταλήψεις (bias), όπως η επιλογή πληθυσμού, η ετερογένεια μεθόδων ή η έλλειψη τυφλοποίησης, με στόχο την καταγραφή των πλεονεκτημάτων, περιορισμών και κλινικών εφαρμογών του TCD, όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πέραν της παρουσίασης των υπαρχουσών γνώσεων, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάδειξη ερευνητικών κενών. Παρατηρείται έλλειψη συγκριτικών μελετών μεταξύ TCD και νεότερων τεχνολογιών όπως η perfusion MRI ή η CT-perfusion, αλλά και περιορισμένος αριθμός πολυκεντρικών, προοπτικών μελετών που θα αξιολογούν την προγνωστική αξία του TCD σε δυναμικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις. Ακόμη, σημειώνεται η ανάγκη για εναρμονισμένα διεθνή πρωτόκολλα εφαρμογής του TCD, καθώς και εκτενέστερη διερεύνηση της χρήσης του στη δυναμική εκτίμηση της εγκεφαλικής αυτορρύθμισης.

Συνολικά, η μεθοδολογική πορεία που ακολουθήθηκε επιτρέπει την αντικειμενική παρουσίαση των ευρημάτων, τη σύνθεση συμπερασμάτων που βασίζονται σε τεκμηριωμένα δεδομένα και τη διατύπωση ερωτημάτων που μπορούν να λειτουργήσουν ως αφετηρία για μελλοντική έρευνα στον τομέα της λειτουργικής υπερηχογραφίας του εγκεφάλου.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

4.1 Βασικές αρχές λειτουργίας TCD

4.1.1 Το φαινόμενο Doppler και οι εφαρμογές του

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (Transcranial Doppler – TCD) βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο Doppler, το οποίο και περιγράφει τη μεταβολή της συχνότητας ενός κύματος, στην περίπτωση αυτή ήχου, όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής εκπομπής και του δέκτη. Στην υπερηχογραφία, τα κύματα που εκπέμπονται από την κεφαλή του ηχοβολέα διέρχονται από τα οστικά παράθυρα του κρανίου και ανακλώνται από τα ερυθρά αιμοσφαίρια που βρίσκονται εντός των αγγείων και κινούνται μέσα σε αυτά.

Η διαφορά μεταξύ της εκπεμπόμενης και της λαμβανόμενης συχνότητας – η λεγόμενη μετατόπιση Doppler – είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας ροής του αίματος[3]. Η σχέση αυτή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (εικόνα 1):

$$F = 2f_0 \left(\frac{v}{c} \right) \cos(\theta)$$

Εικόνα 1: εξίσωση μετατόπισης συχνότητας Doppler, όπου: F η μετατόπιση συχνότητας Doppler, f_0 η συχνότητα εκπομπής από την κεφαλή υπερηχογράφου, v η ταχύτητα του κινούμενου ανακλαστήρα (π.χ., τα ερυθρά αιμοσφαίρια), c η ταχύτητα του ήχου στους ιστούς (περίπου 1540 m/s), θ η γωνία μεταξύ της ακτίνας υπερήχων και του άξονα ροής, (Αναυπόθηκε από: Radiopaedia contributors. (n.d.). Doppler shift. Radiopaedia. <https://radiopaedia.org/articles/doppler-shift>)

Δεδομένου ότι η αιματική ροή στα αγγεία είναι στρωτή, το σήμα Doppler που καταγράφεται αντιπροσωπεύει ένα φάσμα μετατοπίσεων συχνότητας, το οποίο αναλύεται φασματικά στην οθόνη της συσκευής και παρέχει πληροφορίες για την κατανομή των ταχυτήτων των μεμονωμένων κυττάρων. Μέσω αυτής της φασματικής ανάλυσης προκύπτουν μετρήσεις όπως η μέγιστη συστολική ταχύτητα (V_s), η τελοδιαστολική ταχύτητα (V_d), ο χρόνος επιτάχυνσης, ο παλμικός δείκτης (PI) και η μέση μέγιστη ταχύτητα (V_{mean}), η οποία και προβάλλεται πλέον αυτόματα από τα περισσότερα μηχανήματα που εκτελείται TCD χωρίς να είναι απαραίτητοι χειροκίνητοι υπολογισμοί (1).

Η χρήση φυσικών "οστικών παραθύρων" του κρανίου, όπως το κροταφικό, το ινιακό και το οφθαλμικό, διευκολύνει τη διείσδυση των υπερήχων και την απεικόνιση μεγάλων ενδοκρανιακών αγγείων, κυρίως του κύκλου του Willis (αναλύονται παρακάτω).

Η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται από τη γωνία με την οποία εφαρμόζεται ο ηχοβολέας (θ), καθώς το σφάλμα αυξάνεται όσο απομακρύνεται από την ιδανική γωνία των 0° , στην οποία το εκπεμπόμενο κύμα είναι παράλληλο προς τη ροή. Στην πράξη, η γωνία θ (theta) δεν είναι πάντοτε γνωστή με ακρίβεια, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την εκτίμηση της ταχύτητας ροής. Γι' αυτόν τον λόγο, οι μετρήσεις με TCD συνήθως βασίζονται σε σχετικές μεταβολές της ταχύτητας και όχι σε απόλυτες τιμές και η γωνία διατηρείται κάτω από 30° , ώστε το σφάλμα να παραμένει εντός αποδεκτών ορίων ($<15\%$) (1). Σημειώνεται επίσης ότι η υπολογιζόμενη ταχύτητα ροής προϋποθέτει σταθερή διάμετρο του αγγείου κατά τη διάρκεια της μέτρησης, αφού η διαγνωστική ακρίβεια μπορεί να μεταβάλλεται με τις παραμικρές φυσικές ή επιβαλλόμενες από τον εξεταστή μικρο-μεταβολές. Η υπερηχογραφική πρόσβαση στα ενδοκράνια αγγεία επιτυγχάνεται μέσω συγκεκριμένων «ακουστικών παραθύρων», όπως το κροταφικό, το υποϊνιακό, και το οφθαλμικό, τα οποία επιλέγονται ανάλογα με τη σχετική θέση των υπό εξέταση αγγείων (2).

4.1.2 Φυσιολογικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ταχύτητα Ροής και τους Δείκτες

Η ταχύτητα ροής του αίματος που μετράται με διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (TCD) επηρεάζεται από ποικίλες φυσιολογικές παραμέτρους, όπως η ηλικία, το φύλο, το PaCO_2 , η αρτηριακή πίεση, η θερμοκρασία σώματος, ο αιματοκρίτης και η εγκεφαλική δραστηριότητα [11,12]. Οι μετρήσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε ηρεμία, αποφεύγοντας την ομιλία ή την κινητική δραστηριότητα, ώστε να περιορίζονται εξωγενείς επιδράσεις [11].

Η ηλικία επηρεάζει σημαντικά τη μέση ταχύτητα ροής (MFV), η οποία μειώνεται προοδευτικά με την ηλικία (κατά 0,3–0,5% ετησίως από τα 20 έως τα 70 έτη),

αντανεκλώνοντας τη μείωση της μεταβολικής ζήτησης και την αγγειακή δυσκαμψία [12,13].

Το φύλο επίσης επηρεάζει τις τιμές, καθώς γυναίκες ηλικίας 20–60 ετών εμφανίζουν κατά μέσο όρο 10–15% υψηλότερες ταχύτητες, κυρίως λόγω χαμηλότερου αιματοκρίτη, ενώ μετά τα 70 η διαφορά εξαλείφεται [12].

Η μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα (PaCO_2) έχει άμεση επίδραση στην αγγειακή αντίσταση: η υπερκαπνία προκαλεί αγγειοδιαστολή και αύξηση ροής, ενώ η υποκαπνία οδηγεί σε αγγειοσύσπαση και μείωση [14]. Αντίστοιχα, αυξημένη αρτηριακή πίεση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες ταχύτητες ακόμη και υπό φυσιολογική αυτορρύθμιση, όπως συμβαίνει θεραπευτικά σε ασθενείς με υπαραχνοειδή αιμορραγία (SAH) [15].

Η επίδραση της θερμοκρασίας παραμένει αμφιλεγόμενη: ορισμένα δεδομένα δείχνουν αρνητική συσχέτιση με τη ροή, ενώ σε περιπτώσεις υποθερμίας δεν τεκμηριώνεται σταθερή σχέση [16,17].

4.1.3 Τύποι Συσκευών Διακρανιακής Υπερηχογραφίας Doppler (TCD)

Οι **μη απεικονιστικές συσκευές TCD** (Εικόνα 2) βασίζονται αποκλειστικά στη φασματική ανάλυση του Doppler για την εκτίμηση της αιματικής ροής, χωρίς ανατομική απεικόνιση. Η εντόπιση των ενδοκρανιακών αγγείων γίνεται βάσει τεχνικών παραμέτρων, όπως το βάθος, η φορά ροής, η θέση του ηχοβολέα και η ανταπόκριση σε φυσιολογικούς χειρισμούς. Η αξιοπιστία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του εξεταστή και την πιστή τήρηση διαγνωστικών κριτηρίων [19,20].

Οι **απεικονιστικές συσκευές (TCCD)** (Εικόνα 3) συνδυάζουν B-mode απεικόνιση με παλμικό Doppler, προσφέροντας άμεση οπτικοποίηση των αγγείων. Η χρήση χρωματικής Doppler απεικόνισης και η δυνατότητα μέτρησης της γωνίας πρόσπτωσης επιτρέπει τον υπολογισμό της πραγματικής ταχύτητας ροής, μειώνοντας τα σφάλματα και αυξάνοντας τη διαγνωστική ακρίβεια [21,22].

Η τεχνολογία **Power Motion-mode Doppler (PMD/TCD)** επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή της ροής σε πολλαπλά βάθη, διευκολύνοντας την αναγνώριση της

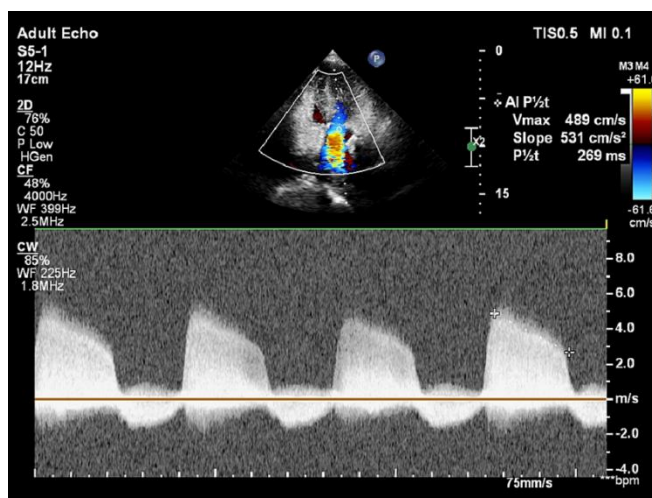
αγγειακής αρχιτεκτονικής και των εμβολικών φαινομένων (Εικόνα 4). Έχει αποδειχθεί χρήσιμη στη διάγνωση αγγειοσπασμού και σε περιπτώσεις με φτωχό ακουστικό παράθυρο [18,23].

Τέλος, ο **ρομποτικά υποβοηθούμενος TCD** διαθέτει σύστημα στήριξης που ακινητοποιεί τον ηχοβολέα, επιτρέποντας παρατεταμένη και σταθερή παρακολούθηση της εγκεφαλικής ροής (Εικόνα 5). Η τεχνολογία αυτή ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από τον χειριστή και χρησιμοποιείται σε πρωτόκολλα νευροπαρακολούθησης και δοκιμασίες φυσαλίδων.

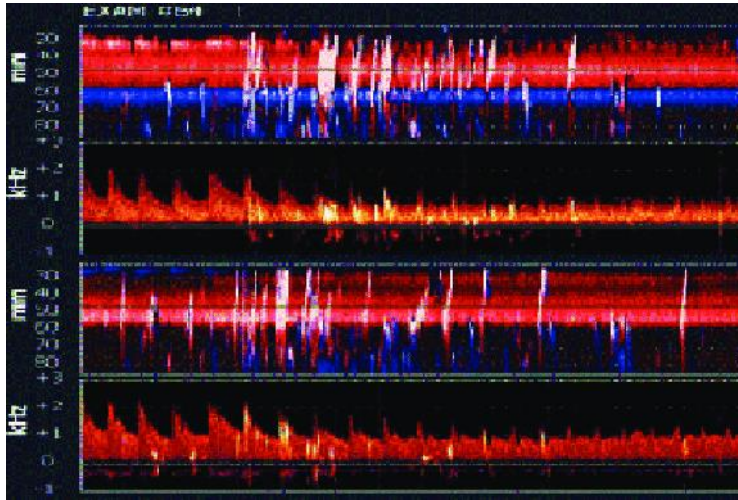


Εικόνα 2^η: Μη απεικονιστική συσκευή διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler (TCD). Η συσκευή βασίζεται αποκλειστικά στη φασματική ανάλυση του Doppler για την εκτίμηση της αιματικής ροής, χωρίς ταυτόχρονη ανατομική απεικόνιση.

(Ανατύπωση από: Rimed Ltd. Διαθέσιμο στο: <https://rimed.com/>)

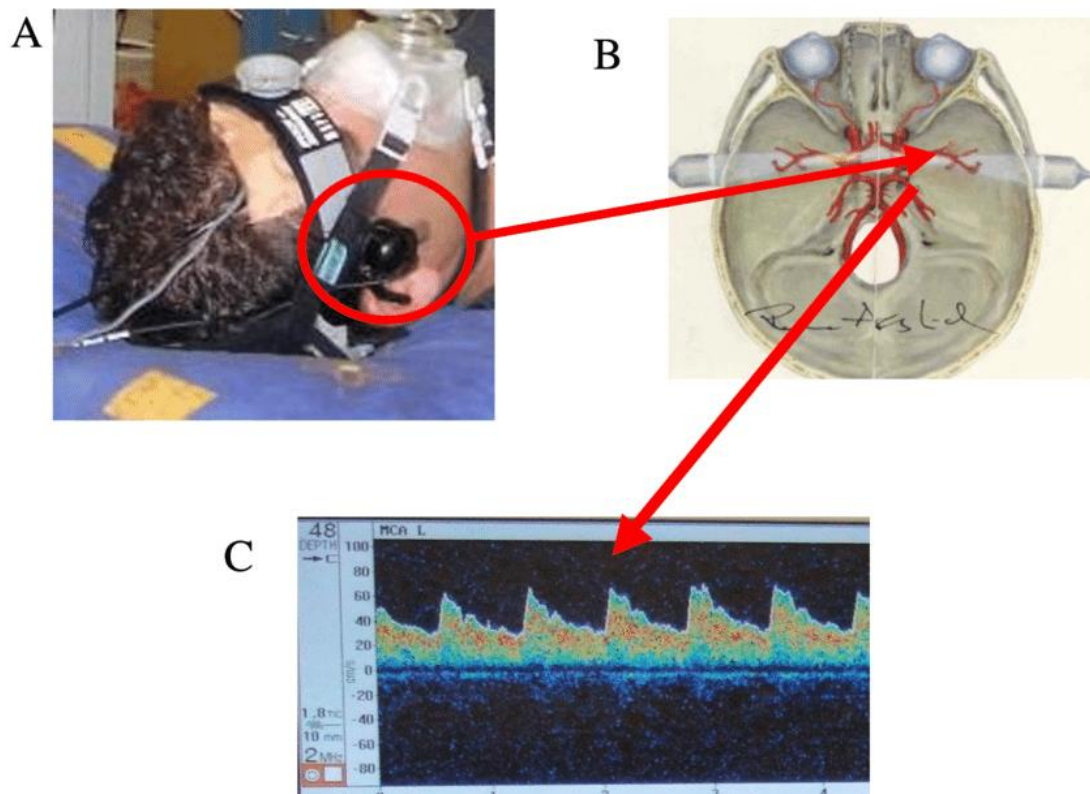


Εικόνα 3^η: Συσσκευή απεικονιστικής διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler με συνδιασμό B-mode και έγχρωμης Doppler απεικόνισης. Επιτρέπει την ταυτόχρονη οπτικοποίηση των εγκεφαλικών αγγείων και τη μέτρηση της αιματικής ροής.



Εικόνα 4^η: Power Motion-mode Doppler (PMD-TCD) σε ασθενή με ανοιχτό ωοειδές τρήμα. Οι λοξές λευκές γραμμές υποδεικνύουν μικροεμβολικά σήματα που διέρχονται από τις έγχρωμες ζώνες της ροής, με ταυτόχρονη καταγραφή της αιματικής ροής σε διαφορετικά βάθη και δυναμική ανίχνευση εμβολικών φαινομένων.

(Ανατύπωση από: Desai AJ, et al. *Patent foramen ovale and cerebrovascular diseases*. ResearchGate. Διαθέσιμο στο: <https://www.researchgate.net/figure/6912805>)



Εικόνα

5η:

(Α) Ηχοβολέας υπερηχογραφίας διακρανιακού Doppler (TCD) τοποθετημένος και σταθεροποιημένος με ειδική στήριξη στην κροταφική περιοχή. (Β) Πρόσθια απεικόνιση της υπερηχογραφικής διείσδυσης προς τη μέση εγκεφαλική αρτηρία. (Γ) Κυματομορφή ταχύτητας ροής της μέσης εγκεφαλικής αρτηρίας, με καταγραφή του φάσματος.

(Ανατύπωση από: Smirl JD, et al. Transcranial Doppler Ultrasound: Practical Considerations for Research Use. ResearchGate. Διαθέσιμο στο: <https://www.researchgate.net/figure/277990092>)

4.2 Μέθοδος Εξέτασης του Διακρανιακού Doppler

4.2.1 Τα ακουστικά παράθυρα

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (TCD), όπως εισήχθη από τον Rune Aaslid, παρέχει μια μη επεμβατική προσέγγιση για την εκτίμηση της ενδοκράνιας αιματικής ροής μέσω τριών κύριων ακουστικών παραθύρων: του κροταφικού, του οφθαλμικού, και του ινιακού [3]. Συμπληρωματικά, η υπογνάθια προσπέλαση εφαρμόζεται για τη μελέτη της εξωκρανιακής μοίρας της ICA.

Κάθε ακουστικό παράθυρο προσφέρει πρόσβαση σε συγκεκριμένα τμήματα του ενδοκρανιακού αγγειακού δικτύου (εικόνα 6^η) με αποτέλεσμα μια πλήρης εξέταση να

απαιτεί αξιολόγηση από όλα τα παράθυρα για τη σφαιρική καταγραφή της αιμοδυναμικής του κύκλου του Willis [2].

4.2.2 Τεχνική Εξέτασης

Η εξέταση πραγματοποιείται με ηχοβολέα χαμηλής συχνότητας (2 MHz), ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής διείσδυση υπερηχητικών κυμάτων μέσω των λεπτότερων τμημάτων του κρανίου — τα λεγόμενα ακουστικά παράθυρα. Το διακροταφικό παράθυρο αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη προσπέλαση, ιδίως για την αξιολόγηση της μέσης, πρόσθιας και οπίσθιας εγκεφαλικής αρτηρίας, καθώς και του τελικού τμήματος της έσω καρωτίδας (ICA) [19].

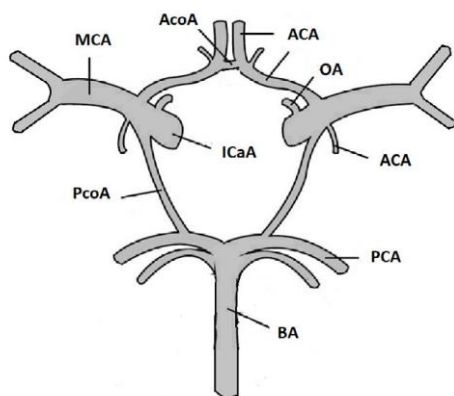
Η αναγνώριση των ενδοκρανιακών αγγείων βασίζεται σε τέσσερα κύρια κριτήρια:

1. Την κατεύθυνση προσέγγισης του υπερήχου.
2. Τη φορά ροής του αίματος σε σχέση με τον ηχοβολέα.
3. Το βάθος ηχοβόλησης.
4. Την αιμοδυναμική απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η πίεση επί της καρωτίδας, σε αμφίβολες περιπτώσεις.

Κατά την εκτέλεση της φασματικής TCD, ο εξεταστής πρέπει να:

- Παρακολουθεί την πορεία της ροής αίματος σε όλους τους κύριους κλάδους του κύκλου του Willis.
- Βελτιστοποιεί και καταγράφει το φασματικό κύμα σε τουλάχιστον δύο σημεία ανά αρτηρία.
- Καταγράφει τις μέγιστες ταχύτητες ροής στα κεντρικά σημεία κάθε αρτηρίας.

Η MCA (τμήμα M1) εντοπίζεται αρχικά σε βάθος 45–55mm μέσω του διακροταφικού παραθύρου, με τη ροή να κατευθύνεται προς τον ηχοβολέα. Περιφερικά, διακρίνεται ο κλάδος M2, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος (60–65mm) εμφανίζεται ο διχασμός της ICA, με χαρακτηριστική αμφίδρομη ροή. Η ACA απεικονίζεται με ροή απομακρυνόμενη από τον ηχοβολέα και βάθος περίπου 75mm, ενώ η PCA (τμήμα P1) εντοπίζεται σε 60–75mm με ροή προς τον ηχοβολέα και πορεία που σχηματίζει οξεία γωνία με τη δέσμη υπερήχων (Εικόνα 6).



Εικόνα 6^η: Ανατομική απεικόνιση του Κύκλου του Willis και των βασικών ενδοκρανιακών αρτηριών. Απεικονίζονται οι έσω καρωτίδες αρτηρίες (ICaA), οι πρόσθιες εγκεφαλικές αρτηρίες (ACA), η πρόσθια αναστομωτική αρτηρία (AcoA), οι μέσες εγκεφαλικές αρτηρίες (MCA), οι οπίσθιες αναστομωτικές αρτηρίες (PcoA), οι οπίσθιες εγκεφαλικές αρτηρίες (PCA), η βασική αρτηρία (BA) καθώς και η οφθαλμική αρτηρία (OA), η οποία εξασφαλίζει την εναλλακτική αιμάτωση του εγκεφάλου σε περιπτώσεις απόφραξης ή υποάρδευσης. Ανατύπωση από: Netter FH. *Atlas of Human Anatomy*. 6th ed. Philadelphia: Elsevier; 2014. p. 129. [92]

4.2.3 Σημεία Κλινικής Σημασίας και Τεχνικές Συστάσεις

Για αξιόπιστα και αναπαραγώγιμα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler, είναι απαραίτητη η τήρηση συγκεκριμένων τεχνικών παραμέτρων. Πρώτον, θα πρέπει να αποφεύγεται τόσο η υπερβολική γωνίωση όσο και η κάθετη τοποθέτηση του ηχοβολέα, καθώς τέτοιες αποκλίσεις μπορεί να αλλοιώσουν την καταγραφή της αιματικής ροής. Η προσπάθεια εντοπισμού της μέγιστης ταχύτητας θα πρέπει να συνεχίζεται ακόμη και όταν το φασματικό σήμα είναι λιγότερο έντονο, δεδομένου ότι η ανίχνευση της μέγιστης ροής αποτελεί θεμελιώδες διαγνωστικό κριτήριο.

Παράλληλα, είναι σημαντικό να διατηρείται σταθερή απεικόνιση του αγγείου, με ήπιες και ελεγχόμενες αλλαγές στη γωνία πρόσπτωσης, καταγράφοντας με ακρίβεια τόσο το βάθος όσο και τη φορά της ροής. Αυτές οι πληροφορίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη μελλοντική σύγκριση ή την επαναξιολόγηση του ίδιου αγγείου. Ο ηχοβολέας δεν πρέπει να απομακρύνεται έως την πλήρη ολοκλήρωση της εξέτασης, ώστε να διευκολύνεται η επανατοποθέτηση σε περίπτωση επανάληψης της μέτρησης.

Επιπλέον, η υπερβολική αύξηση της ενίσχυσης (gain) καλό είναι να αποφεύγεται, εκτός αν αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες σήματος. Σε περιπτώσεις ασθενούς ή θορυβώδους σήματος, είναι προτιμότερο να εφαρμοστεί αύξηση του όγκου δείγματος (sample volume) και ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας σάρωσης, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της φασματικής απεικόνισης.

Η εξέταση πρέπει να περιλαμβάνει πλήρη καταγραφή όλων των κύριων ενδοκρανιακών αρτηριών, με υπολογισμό της μέσης ταχύτητας ροής, του δείκτη παλμικότητας (PI), καθώς και της φοράς της ροής. Τέλος, η αξιοπιστία των μετρήσεων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την εμπειρία και την κατάλληλη εκπαίδευση του εξεταστή, γεγονός που αναδεικνύεται επανειλημμένα στη διεθνή βιβλιογραφία.

4.2.4 Εναλλακτικές Προσεγγίσεις

Υπάρχουν τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις που υποβοηθούν τον έλεγχο της ενδοκράνιας κυκλοφορίας σ ασθενείς οι οποίοι παρουσιάζουν δυσκολίες στον έλεγχο της ανατομίας τους (είτε λόγω αυξημένου πάχους του κροταφικού οστού, είτε λόγω έτερων ανατομικών παραλλαγών, όπως για παράδειγμα η δόλιχος πορεία της έσω καρωτίδας).

Πρώτων, χρησιμοποιείται το οφθαλμικό παράθυρο, στο οποίο ο γραμμικός ηχοβολέας εφαρμόζεται στο άνω βλέφαρο με χαμηλή ενέργεια (Εικόνα 7B). Αναγνωρίζεται η οφθαλμική αρτηρία (OA) σε βάθος 40–60mm, με φυσιολογική ροή προς τον ηχοβολέα. Σε περιπτώσεις αναστροφής ροής, ενδέχεται να υπάρχει σύστοιχη ICA απόφραξη. Το τμήμα της ICA στο καρωτιδικό σιφώνιο κόλπο απεικονίζεται σε βάθος 60–75mm, με μεταβλητή φορά ροής.

Δεύτερον, χρησιμοποιείται το ινιακό παράθυρο (Εικόνα 7Δ), όπου ο ασθενής βρίσκεται σε κάμψη. Εντοπίζεται η βασική αρτηρία (BA) σε 90–120mm και οι σπονδυλικές αρτηρίες (VA) σε 65–85mm. Φυσιολογικά, οι VA και BA εμφανίζουν ροή προς τον ηχοβολέα.

Εν συνεχεία, ο έλεγχος μπορεί να συνεχιστεί και από το υπογνάθιο παράθυρο, μέσω του οποίου επιτρέπεται η απεικόνιση της εξωσκληρίδιας μοίρας της ICA σε βάθος 30–60mm. Διακρίνεται από την ECA βάσει της υψηλής διαστολικής ταχύτητας.



Εικόνα 7η:

(Α) Τύποι υπερηχογραφικών ηχοβολέων και παραθύρων . Στο αριστερό άκρο (μπλε βέλος) κεφαλή για συμβατική χρήση TCD, ενώ στο δεξί άκρο (κίτρινο βέλος) αντιστοιχεί κεφαλή έγχρωμης διακρανιακής υπερηχογραφίας (TCCD). (Β), (C) και (D): οι κύριες υπερηχογραφικές ακουστικές προσπελάσεις για διακρανιακή

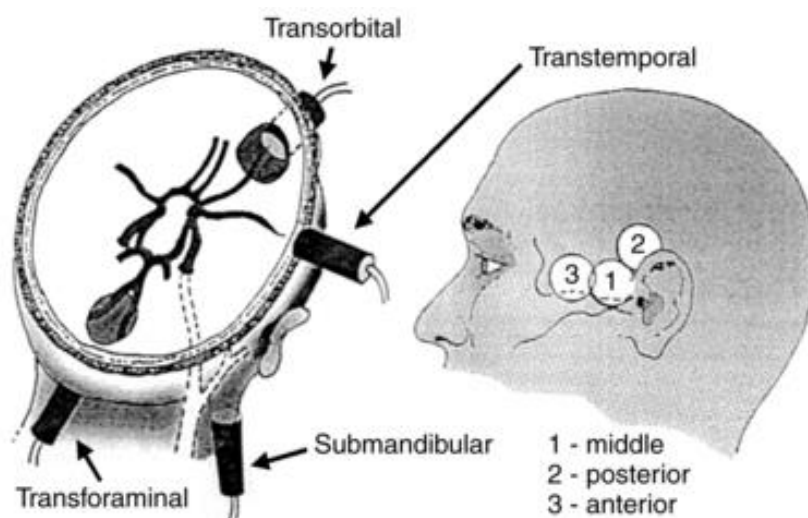
διερεύνηση: διακογχική, υπονιακή και διακροταφική, αντίστοιχα. (Ανατύπωση από: Bathala L, Mehndiratta MM, Sharma VK. Transcranial Doppler: technique and common findings (Review). Ann Indian Acad Neurol. 2013;16(2):174–179).

Αρτηρία	Ακ. Παράθυρο	Βάθος (mm)	Φορά Ροής	Σχόλια
Μέση Εγκεφαλική Αρτηρία (MCA)	Διακροταφικό	30–65	Προς τον ηχοβολέα	Εντοπίζεται εύκολα, σταθερό σήμα, κύριο αγγείο παρακολούθησης
Πρόσθια Εγκεφαλική Αρτηρία (ACA)	Διακροταφικό	60–80	Μακριά από τον ηχοβολέα	Εντοπίζεται κεντρικά μετά τον διχασμό της ICA
Οπίσθια Εγκεφαλική Αρτηρία (PCA)	Διακροταφικό	60–75	Προς (P1) ή μακριά (P2) από τον ηχοβολέα	Εξαρτάται από τον κλάδο και τη γωνία πρόσπτωσης
Τελικό τμήμα Έσω Καρωτίδας (ICA)	Διακροταφικό	55–65	Αμφίδρομη ροή	Φαινόμενο διχασμού, εμφανίζεται με αμφίδρομο σήμα
Οφθαλμική Αρτηρία (OA)	Οφθαλμικό	40–60	Προς τον ηχοβολέα	Αν η ροή είναι αντίστροφη → ένδειξη απόφραξης ICA
Καρωτιδικό σιφώνιο	Οφθαλμικό	60–75	Προς ή μακριά από τον ηχοβολέα	Πιο βαθιά από την OA, ενίοτε δύσκολος εντοπισμός
Σπονδυλικές Αρτηρίες (VA)	Ινιακό	65–85	Προς τον ηχοβολέα	

Πίνακας 1:

Τεχνικά χαρακτηριστικά και υπερηχογραφικά δεδομένα των κύριων ενδοκρανιακών αρτηριών στη διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler. Καταγράφονται το συνιστώμενο ακουστικό παράθυρο, το βάθος διερεύνησης, η φορά ροής σε σχέση με τον ηχοβολέα, καθώς και ιδιαίτερα σχόλια για τον εντοπισμό και τη λειτουργική αξιολόγηση κάθε αγγείου.

Ανατύπωση από: Groschel K, Harrer JU, Schminke U, Stegemann E, Allendorfer J. Ultrasound assessment of brain supplying arteries (extracranial). *Ultraschall Med.* 2024;45(1):14–35.



Εικόνα 8η. Τα ακουστικά παράθυρα της διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler. Στο αριστερό σκέλος απεικονίζονται τα βασικά ενδοκρανιακά αγγεία και οι προσβάσεις μέσω των παραθύρων: διακογχικό (transorbital), διακροταφικό (transtemporal), υπογνάθιο (submandibular) και διατρηματικό (transforaminal). Στο δεξί σκέλος παρουσιάζεται η διαίρεση του κροταφικού παραθύρου σε τρεις θέσεις ηχοβολήσης: (1) μέση, (2) οπίσθια και (3) πρόσθια. (Ανατύπωση από: Alexandrov AV. Transcranial Doppler Ultrasonography. University of Texas Medical School, Houston, 1998.)

4.2.5 Πρωτόκολλο ταχείας διερεύνησης με διακρανιακό υπερηχογράφημα Doppler (Fast-track TCD)

Σε περιπτώσεις ασθενών που προσέρχονται με οξύ ισχαιμικό αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο και εξετάζονται για πιθανή θρομβόλυση, ο παράγοντας χρόνος είναι καθοριστικός. Το «fast-track» πρωτόκολλο διακρανιακού υπερηχογραφήματος Doppler (TCD) μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω του συνδυασμού του με μία ταχεία υπερηχογραφική αξιολόγηση των τραχηλικών αγγείων, όπως προτείνεται από τους Chernyshev και συνεργάτες [24].

Η ταχεία εκτίμηση της εγκεφαλικής κυκλοφορίας με TCD είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται από έμπειρους χειριστές, οι οποίοι διαθέτουν γνώση της κλινικής κατάστασης του ασθενούς. Η κλινική εντόπιση της ισχαιμίας καθοδηγεί τη σειρά των εικόνων που λαμβάνονται. Η εξέταση ξεκινά από την υγιή πλευρά, με έμφαση στη μέση εγκεφαλική αρτηρία (MCA), ώστε να επιβεβαιωθεί η διαθεσιμότητα και η ποιότητα του κροταφικού ακουστικού παραθύρου, καθώς και τα χαρακτηριστικά ροής της MCA [25, 26].

Στη συνέχεια, εξετάζεται η πάσχουσα πλευρά, ξεκινώντας από το μέσο τμήμα της M1-MCA σε βάθος 50–60mm. Σε περίπτωση φυσιολογικής ροής, προχωρούμε στην αξιολόγηση της περιφερικής MCA και του διχασμού της έσω καρωτίδας. Εάν απουσιάζει η ροή στη MCA, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίπλευρη κροταφική πύλη για διασταυρούμενη ηχοτόμηση, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το ακουστικό παράθυρο της πάσχουσας πλευράς είναι ακατάλληλο [27]

Η εξέταση της οφθαλμικής αρτηρίας (OA) πραγματοποιείται από τον οφθαλμικό υπερηχογραφικό παράθυρο στην πάσχουσα πλευρά, σε βάθος 50–58mm. Ακολουθεί η διερεύνηση του καρωτιδικού σιφωνίου (ICA siphon) σε μεγαλύτερο βάθος (60–64mm) και, τέλος, η εξέταση της βασικής αρτηρίας (BA), με σκοπό την ανίχνευση αντιρροπιστικών αυξήσεων της ταχύτητας ροής ή πιθανής στένωσης [28,29]

Η συστηματική εφαρμογή αυτού του πρωτοκόλλου στο προσκέφαλο του ασθενούς από εξειδικευμένους ιατρούς, σε συνδυασμό με τα κλινικά ευρήματα, επιτρέπει τη γρήγορη και τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στη διαχείριση οξέων εγκεφαλικών επεισοδίων. Η TCD αξιολόγηση μπορεί επίσης να αναδείξει την παρουσία ενδοκρανιακών παράπλευρων κυκλοφοριών, αποφρακτικών βλαβών, αυθόρμητης λύσης του θρόμβου και επαναπόφραξης [26,27].

4.2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του Διακρανιακού Doppler

Το διακρανιακό Doppler (TCD) συντελεί αποτελεσματικά στη νευροαπεικόνιση, ειδικά στο πλαίσιο της οξείας εγκεφαλικής ισχαιμίας. Η άμεση εφαρμογή του TCD στην οξεία φάση του αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου καθιστά δυνατή την έγκαιρη ανίχνευση αγγειακών αποφράξεων, την αξιολόγηση της απάντησης του ασθενούς στη θρομβόλυση και τη συνεχή παρακολούθηση της εγκεφαλικής αιμάτωσης με υψηλή χρονική ανάλυση [28–30].

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής περιλαμβάνουν επίσης τη φορητότητα, την ευκολία χρήσης σε μονάδες εντατικής θεραπείας και άλλα επείγοντα τμήματα, καθώς και το χαμηλό κόστος σε σύγκριση με άλλες απεικονιστικές μεθόδους. Το TCD είναι το μοναδικό μέσο με δυνατότητα ανίχνευσης μικροεμβολικών σημάτων, τα οποία έχουν υψηλή διαγνωστική και προγνωστική αξία σε ασθενείς με καρδιοεμβολικό κίνδυνο ή μετά από αγγειακές επεμβάσεις [31]. Επιπλέον, επιτρέπει την εκτίμηση της εγκεφαλικής αυτορρύθμισης και της αντιδραστικότητας των εγκεφαλικών αγγείων στο CO₂, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες σε συνθήκες αιμοδυναμικής αστάθειας [32, 33].

Ωστόσο, η διαγνωστική αυτή πρακτική παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, σχετιζόμενους τόσο με την τον τρόπο πραγματοποίησης της εξέτασης όσο και με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η αξιοπιστία και η ποιότητά της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία επαρκών ακουστικών παραθύρων, τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το φύλο, την ηλικία και την ανατομία του κρανίου. Σε ποσοστό έως και 20% του πληθυσμού, ιδίως σε ηλικιωμένες γυναίκες, η διείσδυση του υπερηχητικού σήματος μέσω του κροταφικού παραθύρου είναι ανεπαρκής [34]. Επιπρόσθετα, ο έλεγχος με TCD δεν παρέχει ανατομική απεικόνιση των αγγειακών τοιχωμάτων, περιορίζοντας την ικανότητα ανίχνευσης μορφολογικών αλλοιώσεων όπως αθηρωματικές πλάκες ή ανευρύσματα [35]. Τέλος, σε μη εξειδικευμένες μονάδες το απεικονιστικό αυτό μέσο καθίσταται μη διαθέσιμο λόγω της ανάγκης ειδικά καταρτισμένου προσωπικού για την ερμηνεία των φασματικών κυματομορφών που παράγονται.

Σε κλινικό επίπεδο, το μεγαλύτερο μέρος των TCD επικεντρώνεται στη μέση εγκεφαλική αρτηρία (MCA), λόγω της υψηλής συμβολής της στη συνολική αιμάτωση του εγκεφαλικού ημισφαιρίου, της παράλληλης πορείας της προς τη δέσμη υπερήχων και της σταθερής της διαμέτρου, που συνεισφέρει στην ευνοϊκότερη λήψη σήματος [36]. Εντούτοις, ακόμη και στην MCA, παροδικές μεταβολές των ροών μπορούν να επηρεαστούν από συστηματικούς ή ενδοκρανιακούς παράγοντες, γεγονός που απαιτεί προσεκτική εκτίμηση και σύγκριση με φυσιολογικά πρότυπα [37].

Η βελτιστοποίηση της τεχνικής του TCD είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση αξιόπιστων μετρήσεων. Η έναρξη της εξέτασης με μέγιστη ισχύ και ευρύ βάθος σάρωσης μπορεί να επιταχύνει την ανεύρεση του κατάλληλου ακουστικού παραθύρου, μειώνοντας συνολικά την έκθεση του ασθενούς στους υπερήχους, παρά την αρχική αντίφαση με την αρχή ALARA [3]. Η κατάλληλη ρύθμιση της κλίμακας Doppler και της βασικής γραμμής σε περιπτώσεις υψηλής ταχύτητας ροής είναι αναγκαία για την αποφυγή aliasing, ενώ η ρύθμιση του gain πρέπει να επιτυγχάνει ισορροπία ανάμεσα στην καταστολή του θορύβου και την ανάδειξη αδύναμων σημάτων [38,39].

Σε περιπτώσεις φτωχής ακουστικής διαπερατότητας – όπως λόγω αυξημένου πάχους του κροταφικού οστού – οι σαρώσεις μεγαλύτερης διάρκειας επιτρέπουν βελτιστοποίηση της θέσης του ηχοβολέα και των γωνιών πρόσπτωσης [40], ενώ τεχνικές όπως η αργή σάρωση και η αυξημένη ενίσχυση βοηθούν στην ανάδειξη σημάτων υψηλής ταχύτητας [41]. Ο ποιοτικός έλεγχος του σήματος με εργαλεία όπως

ο ανιχνευτής περιγράμματος κύματος και ο waveform follower ενισχύουν την ακρίβεια των μετρήσεων, αλλά σε ασθενή σήματα απαιτείται χειροκίνητη ρύθμιση [42].

Η διαρκής τεχνολογική εξέλιξη του TCD έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση τεχνολογιών φασματικής και έγχρωμης απεικόνισης υψηλής ανάλυσης, που διευκολύνουν τον εντοπισμό παθολογικών περιοχών [43]. Η χρήση πολυκαναλικών, αυτόματων συστημάτων αναγνώρισης στόχου και η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης για την ανάλυση κυματομορφών μειώνουν την εξάρτηση από την εμπειρία του χειριστή και ενισχύουν τη διαχρονική παρακολούθηση. Επιπλέον, η ανάπτυξη φορητών, ασύρματων συστημάτων με δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης επί 24ώρου βάσεως έχει επεκτείνει σημαντικά τη χρησιμότητα της τεχνικής σε ΜΕΘ και σε κλινικές μελέτες [44].

4.3 ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ TCD:

4.3.1 Εισαγωγή

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (Transcranial Doppler - TCD) έχει εξελιχθεί σε ένα πολυδύναμο εργαλείο νευροαγγειακής απεικόνισης με πληθώρα κλινικών εφαρμογών σε οξείες, υποξείες και χρόνιες νευρολογικές καταστάσεις. Η μέθοδος επιτρέπει τη μη επεμβατική καταγραφή της αιμοδυναμικής κατάστασης των ενδοκρανιακών αγγείων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για τη διάγνωση, την πρόγνωση και τη θεραπευτική παρακολούθηση. Οι κλινικές εφαρμογές του TCD επεκτείνονται από την άμεση εκτίμηση αγγειακής απόφραξης σε οξέα ισχαιμικά εγκεφαλικά επεισόδια μέχρι την ανάδειξη σιωπηλών διαφυγών καρδιακής προέλευσης, αλλά και την αξιολόγηση της εγκεφαλικής αυτορρύθμισης

4.3.2 Οξύ Ισχαιμικό Εγκεφαλικό Επεισόδιο

Το οξύ ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο (ΟΙΕΕ) προκαλείται από αιφνίδια απόφραξη μιας εγκεφαλικής αρτηρίας, οδηγώντας σε εστιακή εγκεφαλική ισχαιμία και σοβαρά

νευρολογικά ελλείμματα. Εκτιμάται ότι ~15% των ασθενών πεθαίνουν εντός του πρώτου μήνα από το πρώτο επεισόδιο, ενώ 30-40% επιβιώνουν με σοβαρή αναπηρία [45]. Το διακρανιακό Doppler θεωρείται βασική μέθοδος για τη διαχείριση των ΟΙΕΕ, δίνοντας τη δυνατότητα δυναμικής και επαναλαμβανόμενης εκτίμησης της ενδοκρανιακής αιματικής ροής σε αντίθεση με τις καθιερωμένες τεχνικές απεικόνισης (CTA, MRA, DSA). Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η χρήση της κλίμακας TIBI (Thrombolysis In Brain Ischemia) Score, η οποία κατατάσσει το φάσμα Doppler σε έξι βαθμίδες (0–5), από πλήρη απόφραξη έως φυσιολογική ροή, εκτιμώντας τόσο τη σοβαρότητα της αρχικής απόφραξης όσο και της ανταπόκρισης σε θρομβολυτική ή επεμβατική θεραπεία [50,56]. Η αύξηση των βαθμίδων TIBI μετά θεραπεία συνδέεται με καλύτερη νευρολογική έκβαση και μειωμένη θνητότητα [50].

Το TCD παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία (>90%) και ειδικότητα στην ανίχνευση οξέων αποφράξεων της μέσης εγκεφαλικής αρτηρίας (MCA), ενώ στην οπίσθια κυκλοφορία (σπονδυλικές, βασική αρτηρία) η ευαισθησία κυμαίνεται μεταξύ 70-90%, με εξαιρετική ειδικότητα και αρνητική προγνωστική αξία (>90%) [45]. Επιπλέον, το TCD επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ αγγειακής στένωσης και εγκεφαλικής εμβολής με ακρίβεια έως 90-95% ακόμα και χωρίς πιο πολύπλοκες απεικονιστικές μεθόδους [46,47]. Υψηλές ταχύτητες ροής υποδηλώνουν αυξημένο κίνδυνο απόφραξης λόγω εμβόλου, ενώ η απουσία ή σημαντική μείωση της ροής υποδεικνύει πιθανή μόνιμη αγγειακή απόφραξη [47].

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler έχει χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την παρακολούθηση της επιτυχίας θρομβολυτικών θεραπειών, ώστε να εντοπιστούν διακυμάνσεις στην κυκλοφορία και κατά συνέπεια πιθανές επαναποφράξεις μετά τη θεραπεία [48]. Τα σύγχρονα μοντέλα υπερήχων αξιοποιούν δεδομένα TCD για την πρόβλεψη αποτυχημένης θρομβόλυσης και τη διαχείριση κινδύνων σε επαναλαμβανόμενους εμβολισμούς [49].

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η μέθοδος της ηχοθρομβόλυσης (sonothrombolysis) η οποία συνδυάζει τη συνεχή υπερηχογραφική απεικόνιση με τη χορήγηση tPA. Όπως αποδείχθηκε στην πολυκεντρική μελέτη Clotbust (2004) τα ποσοστά επανασηραγοποίησης με sonothrombolysis έφταναν το 83%, έναντι 50% με χρήση μόνο tPA [55]. Ο μηχανισμός αυτού του φαινομένου πρωτίστως οφείλεται στη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του θρόμβου, με μερική αποδόμηση της ινικής και σχηματισμό μικρο-κοιλοτήτων (cavitation), οδηγώντας σε αύξηση της διαπερατότητας

του θρόμβου στον ενεργοποιητή πλασμινογόνου, χωρίς αύξηση των χορηγούμενων φαρμάκων [51-54]. Ωστόσο το sonothrombolysis προδιαθέτει σε εγκεφαλικές αιμορραγίες.

Πέραν της διαγνωστικής και θεραπευτικής του χρήσης, το TCD παρέχει και σημαντικές προγνωστικές πληροφορίες. Η ανίχνευση ενδοκρανιακής απόφραξης με TCD κατά την οξεία φάση συνδέεται με δυσμενέστερη έκβαση στις 90 ημέρες, ενώ φυσιολογικά ευρήματα προμηνύουν ταχύτερη αποκατάσταση [45]. Στην ίδια μελέτη, σε περίπου 17% των ασθενών τα ευρήματα του TCD οδήγησαν σε τροποποίηση θεραπευτικών αποφάσεων ακόμα και μετά τη χρήση CTA εγκεφάλου και τραχήλου.

Σε επιλεγμένες περιπτώσεις, μετά από χρήση TCD απετράπη η διενέργεια DSA, εξοικονομώντας χρόνο, κόστος και αυξάνοντας την ασφάλεια των ασθενών. Σε μετανάλυση του 2023 επιβεβαιώνεται η υψηλή διαγνωστική ακρίβεια του TCD για αποφράξεις της MCA, με ευαισθησία έως 95,6% και ειδικότητα έως 96,2% [46]. Αντίθετα, η ευαισθησία στην οπίσθια κυκλοφορία υπολείπεται (π.χ. 57,1%), παρά τη διατήρηση υψηλής ειδικότητας. Παρότι η CTA υπερέχει στην ανάδειξη στενώσεων, ειδικά απομακρυσμένων ή υποκλινικών βλαβών [47] το TCD μπορεί υπό προϋποθέσεις να παρουσιάζει συνολικά καλύτερη ακρίβεια [48,49].

4.3.3 Έλεγχος Παράπλευρου Δικτύου

Η γνώση των προτύπων παροχής κυκλοφορίας μέσω των βασικών αρτηριών του εγκεφάλου έχει σημαντικές κλινικές επιπτώσεις στην κλινική αξιολόγηση και πρόγνωση ασθενών με απόφραξη των εγκεφαλικών αγγείων. Ο βαθμός ενεργοποίησης του παράπλευρου κυκλοφορικού δικτύου σχετίζεται άμεσα με τον τελικό όγκο του ισχαιμικού εμφράκτου και την κλινική έκβαση, υπογραμμίζοντας τη σημασία του στην παθοφυσιολογία του οξέος αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου [57,58].

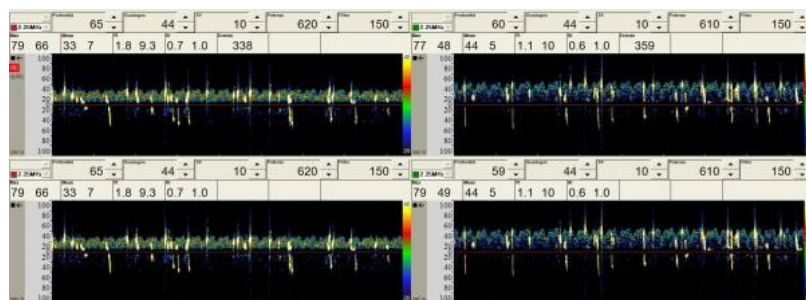
Η χρήση της συγκεκριμένης απεικονιστικής μεθόδου υπερτερεί καθώς επιτυγχάνει την ανίχνευση λειτουργικών παραπλεύρων οδών σε πραγματικό χρόνο, όπως και την εκτίμηση τόσο της κατεύθυνσης όσο και της ταχύτητας ροής του αίματος στα ενδοκρανιακά αγγεία. Σε καταστάσεις οξείας ή χρόνιας στένωσης ή απόφραξης των εγκεφαλικών αρτηριών, ενεργοποιούνται φυσιολογικά κυκλοφορικές παρακάμψεις, η πορεία των οποίων καθορίζει τον δότη και τον αποδέκτη του αιματικού φορτίου [59].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα ενδοκρανιακής παράπλευρης ροής που αναγνωρίζονται με τη βοήθεια του TCD περιλαμβάνουν την αναστροφή ροής της οφθαλμικής αρτηρίας, η οποία υποδηλώνει παλινδρομη ροή μέσω της εξωκράνιας κυκλοφορίας. Έτερο παράπλευρο δίκτυο παρατηρείται σε περίπτωση αναστροφής ροής στην πρόσθια εγκεφαλική αρτηρία (ACA), η οποία και καταδεικνύει τη μεταφορά αίματος από το αντίθετο ημισφαίριο μέσω της πρόσθιας αναστομωτικής αρτηρίας ACom. Συχνά επίσης μπορεί να παρατηρηθεί με το TCD ενίσχυση της ροής μέσω της οπίσθιας αναστομωτικής αρτηρίας (PCom), γεγονός που υποδηλώνει την ενεργοποίηση του κύκλου του Willis ως μέσο αναπλήρωσης της αιμάτωσης [60].

Η συστηματική αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων συμβάλλει ουσιαστικά στην εκτίμηση της επάρκειας της παράπλευρης κυκλοφορίας και μπορεί να κατευθύνει τη θεραπευτική στρατηγική, ιδίως σε ασθενείς υψηλού κινδύνου για εξέλιξη ισχαιμικής βλάβης.

4.3.4 Ανίχνευση Μικροεμβόλων και Σιωπηλών Καρδιακών Διαφυγών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το διακρανιακό Doppler (TCD) αποτελεί τη μοναδική μη επεμβατική τεχνική που επιτρέπει την ανίχνευση μικροεμβόλων στον



εγκέφαλο σε πραγματικό χρόνο, είτε πρόκειται για στερεά είτε για αέρια έμβολα. Το πρωτόκολλο ελέγχου

βασίζεται στην ανάκλαση των υπερηχητικών κυμάτων από τα έμβολα καθώς διέρχονται από το εξεταζόμενο αγγείο, προκαλώντας χαρακτηριστικά σήματα υψηλής έντασης (high-intensity transient signals - HITS) στο φάσμα Doppler [61]. Τα μικροεμβολικά σήματα (microembolic signals - MES) είναι τυχαία παραγόμενα, υψηλής συχνότητας, σχετικά υψηλής έντασης (>3 dB πάνω από το βασικό σήμα της αιματικής ροής), βραχείας διάρκειας (<10ms) και μονής κατεύθυνσης (Εικόνα 9). Είναι ακουστά και από το ανθρώπινο αυτί, συνεπώς και διευκολύνεται η ταυτοποίησή τους [62].

Εικόνα 9 Καταγραφή μικροεμβολικών σημάτων (MES) με χρήση TCD, με διπλή τοποθέτηση δειγματοληπτικών όγκων (double sampling boxes) πάνω από τις δύο MCAs. Η συμμετρική απεικόνιση των εμβολικών σημάτων στα φάσματα των δύο πλευρών ενισχύει τη διαγνωστική αξιοπιστία για ανίχνευση δεξιοαριστερής διαφυγής. (Ανατύπωση από: Ringelstein EB et al. MES from TCD obtained with double sampling boxes placed over the two middle cerebral arteries. ResearchGate. Διαθέσιμο από: https://www.researchgate.net/figure/MES-from-TCD-obtained-with-double-sampling-boxes-placed-over-the-two-middle-cerebral_fig2_23241123)

Η ανίχνευση των HITS εφαρμόζεται τόσο στη διαστρωμάτωση κινδύνου για ισχαιμικό αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο (ΑΕΕ) όσο και στην παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας θεραπευτικών παρεμβάσεων, όπως κατά τη διάρκεια ενδαρτηρεκτομής καρωτίδας ή σε περιπτώσεις εμφάνισης εμβολών από μηχανικές καρδιακές βαλβίδες [63,64]. Αρκεί ακόμη και η ανίχνευση ενός μόνο MES εντός 40 λεπτών για να θεωρηθεί το εύρημα κλινικά σημαντικό [65]. Η αξιοπιστία της μεθόδου έχει βελτιωθεί με τη χρήση σταθεροποιημένων ηχοβολέων και συστημάτων συνεχούς καταγραφής, τα οποία διευκολύνουν την παρατεταμένη και αναπαραγώγιμη παρακολούθηση συγκεκριμένων εγκεφαλικών αγγείων κατά τη διάρκεια του ελέγχου [66]. Σε μελέτη 111 ασθενών με $\geq 60\%$ στένωση της καρωτίδας, η παρουσία MES στα TCD υπερηχογραφήματα συσχετίστηκε σημαντικά με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης ισχαιμικών εγκεφαλικών επεισοδίων κατά την παρακολούθηση. Ο προσαρμοσμένος λόγος πιθανοτήτων (OR) για τα ισχαιμικά συμβάντα στους ασυμπτωματικούς ασθενείς ήταν 8,10 [67]. Παρόμοια ευρήματα έχουν αναδειχθεί σε μελέτες ασθενών με κολπική μαρμαρυγή, εν τω βάθει φλεβική θρόμβωση επί παρουσίας ανοικτού ωοειδούς τρήματος και άλλες καταστάσεις με αυξημένο εμβολικό φορτίο [68,69].

4.3.5 Έλεγχος σε λοιμώξεις του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος με τη χρήση TCD

Τα βιβλιογραφικά δεδομένα για την εν λόγω χρήση του διακρανιακού Doppler είναι αρκετά πρόσφατα και περιορισμένα σε αριθμό, ωστόσο μελέτες σε περιπτώσεις ιογενούς εγκεφαλίτιδας, έχουν δείξει μεταβολές στο δείκτη παλμικότητας (PI-

pusatility index) στον M1 κλάδο της MCA οι οποίες και είναι ενδεικτικές προσβολής από νόσο Κεντρικού Νευρικού συστήματος (ΚΝΣ). Οι μεταβολές αυτές πιθανολογείται ότι σχετίζονται με παροδική αύξηση της ενδοκράνιας πίεσης (ICP), πρωτίστως λόγω διαταραχής του αιματοεγκεφαλικού φραγμού στα πλαίσια γενικευμένης φλεγμονώδους απόκρισης [70–71]. Σε μελέτες, οι τιμές PI άνω του 1.2–1.4 συσχετίστηκαν με αυξημένη ICP >20mmHg σε ποσοστό άνω του 80% των ασθενών [70]. Επιπλέον, η σταδιακή επάνοδος του PI σε φυσιολογικές τιμές (0.6–1.0) έχει συσχετιστεί με κλινική βελτίωση και υποχώρηση των νευρολογικών συμπτωμάτων, καθιστώντας τον δείκτη δυνητικά χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης της θεραπευτικής ανταπόκρισης [70]. Σε περιστατικά βακτηριακής ή μυκητιασικής μηνιγγίτιδας —με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη φυματιώδη μηνιγγίτιδα— οι συσχετίσεις μεταξύ των παραγόντων PI και ICP είναι πιο περίπλοκες, γεγονός που αντανακλά την πολύπλοκη παθοφυσιολογία της νόσου. Έχουν καταγραφεί δυναμικές και σταδιακές μεταβολές τόσο στον PI όσο και στη μέση ταχύτητα ροής (MFV), ανάλογα με το στάδιο της νόσου και τη βαρύτητα της φλεγμονώδους βλάβης στον αγγειακό ενδοθήλιο [72,73,74]. Σε μελέτες σε παιδιά με υδροκέφαλο λόγω φυματιώδους μηνιγγίτιδας, καταγράφηκε μείωση της MFV σε επίπεδα <30 cm/s και αύξηση του PI >1.4, εύρημα που σχετίστηκε με επιδείνωση της ICP και κακή πρόγνωση [72]. Στο 60–70% των περιστατικών βακτηριακής μηνιγγίτιδας, το TCD ανέδειξε παθολογικές μεταβολές ήδη από τις πρώτες 24–48 ώρες της νόσου [73,74]. Συνολικά, η ευαισθησία του TCD στην ανίχνευση αυξημένης ICP σε λοιμώξεις ΚΝΣ κυμαίνεται μεταξύ 70–85%, με ειδικότητα έως και 90% όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλες τιμές αποκοπής του PI και της MFV [70,74]. Παρά τους περιορισμούς, το TCD αναδεικνύεται ως ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του εξειδικευμένου ιατρού, ιδίως όταν εφαρμόζεται επαναλαμβανόμενα και σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους παρακολούθησης.

4.3.6 Ενδοκρανιακή Στένωση-Απόφραξη Αρτηριών

Η ενδοκρανιακή αθηροσκλήρωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου για ισχαιμικά εγκεφαλικά επεισόδια και παροδικά ισχαιμικά επεισόδια (TIA), ευθύνεται για περίπου το 10% αυτών των συμβάντων [75]. Το

διακρανιακό Doppler μπορεί να ανιχνεύσει στένωση και απόφραξη σχεδόν σε όλα τα ενδοκράνια αγγεία [76]. Η διάγνωση της στένωσης μεγαλύτερης του 50% βασίζεται σε τέσσερα κριτήρια. Αρχικά, στην επιτάχυνση της ταχύτητας ροής στο στενωτικό τμήμα. Δεύτερον, στη μείωση της ταχύτητας ροής κάτω από το στενωτικό τμήμα (μεταστενωτική διαστολή). Τρίτον και σε διαφορές στην μέση ταχύτητα ροής από πλευρά σε πλευρά. Τέταρτον, σε διαταραχές στη ροή, όπως αναταράξεις και θορύβους. Η διάγνωση της απόφραξης τίθεται όταν παρατηρείται απουσία ροής στη φυσιολογική θέση και βάθος του συγκεκριμένου αγγείου, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκές «ηχητικό παράθυρο» και άλλες αρτηρίες στην περιοχή είναι ορατές [77,78].

Το TCD έχει υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα για την ανίχνευση στένωσης και απόφραξης στην πρόσθια κυκλοφορία, ενώ στην οπίσθια κυκλοφορία η ανίχνευση είναι πιο δύσκολη λόγω ύπαρξης ανατομικών παραλλαγών των αγγείων [79], αν και πρόσφατα δεδομένα υποδεικνύουν ότι η χρήση διακρανιακού υπερήχου παραμένει ένα σημαντικό εργαλείο και στη διάγνωση παθολογίας σε αυτή την αγγειακή περιοχή [80].

Σε περίπτωση ενδοκρανιακής απόφραξης, μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση της ταχύτητας ροής σε άλλες ενδοκρανιακές αρτηρίες, λόγω ενεργοποίησης επικουρικών αγγείων που αναλαμβάνουν τη ροή του αίματος [79]. Η παρακολούθηση της ροής αίματος με TCD σε ασθενείς με ενδοκρανιακή στένωση ή απόφραξη αποτελεί κρίσιμη διαδικασία για την έγκαιρη διάγνωση των επικείμενων εγκεφαλικών επεισοδίων και την αξιολόγηση της ανάγκης για θεραπευτικές παρεμβάσεις [81].

4.3.7 Αγγειόσπασμος μετά από Υπαραχνοειδή Αιμορραγία

Ο εγκεφαλικός αγγειόσπασμος (VSP), που ορίζεται ως η ελάττωση της διαμέτρου των εγκεφαλικών αρτηριών, εμφανίζεται συνήθως 2–4 ημέρες μετά από υπαραχνοειδή αιμορραγία (ΥΑΑ) και μπορεί να διαρκέσει έως και 21 ημέρες. Παρατηρείται σε περίπου τα δύο τρίτα των ασθενών με ανευρύσματα και υπαραχνοειδή αιμορραγία (SAH), με το ήμισυ αυτών να είναι συμπτωματικοί [85]. Η παθοφυσιολογία του σχετίζεται άμεσα με την εμφάνιση όψιμης εγκεφαλικής ισχαιμίας (DCI) και δευτεροπαθών νευρολογικών ελλειμμάτων (DIND). Υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ της σοβαρότητας του αγγειόσπασμου και των ταχυτήτων ροής στις εγκεφαλικές αρτηρίες, αν και ανατομικοί και τεχνικοί παράγοντες ενδέχεται να επηρεάζουν σε

συγκεκριμένες αγγειακές περιοχές τη συσχέτιση αυτή, ενώ φαίνεται πως η μέθοδος παρουσιάζει τη μέγιστη ακρίβεια σε μετρήσεις που αφορούν την MCA και την BA.

Η αύξηση της μέσης ταχύτητας εγκεφαλικής αιματικής ροής (CBFV) αποτελεί βασικό δείκτη αγγειόσπασμου. Σύστηματική ανασκόπηση 26 μελετών συνέκρινε το TCD με την αγγειογραφία και έδειξε ότι μέση ταχύτητα ροής αίματος (CBFV) στη MCA μεγαλύτερη των 120cm/sec μέσω TCD σχετίζεται με ειδικότητα 99% και ευαισθησία 67% για την ανίχνευση αγγειογραφικά επιβεβαιωμένου αγγειόσπασμου $\geq 25\%$ [88], ενώ σε τιμές $>200\text{cm/sec}$ προκύπτει ειδικότητα 98% και θετική προγνωστική αξία 87% για VSP $\geq 33\%$. Ιδιαίτερη διαγνωστική αξία αποδίδεται και στη δυναμική παρακολούθηση των μεταβολών της CBFV. Αύξηση της ταχύτητας $\geq 50\text{cm/sec}$ σε διάστημα 24 ωρών θεωρείται προγνωστικός δείκτης αυξημένου κινδύνου DCI, με την μέγιστη ευαισθησία να καταγράφεται την 8η ημέρα από την αιμορραγία.

Εκ παραλλήλου, βασικό εργαλείο για τη διαφοροδιάγνωση μεταξύ VSP και υπεραιμίας αποτελεί ο δείκτης Lindegaard (LR) ο οποίος εισήχθη πρώτη φορά το 1988 και υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης ταχύτητας ροής στην MCA προς τη μέση ταχύτητα ροής στην έσω καρωτίδα (ICA). Τιμές LR >6 υποδηλώνουν σοβαρό αγγειόσπασμο, ενώ LR <3 συνηγορεί υπέρ υπεραιμίας. Φυσιολογικές τιμές κυμαίνονται από 1,1 έως 2,3, με μέση τιμή 1,7 τις πρώτες ημέρες από την αιμορραγία [89].

Αύξηση του PI (δείκτης παλμικότητας) υποδεικνύει VSP σε απομακρυσμένο αγγειακό κλάδο. Η παρακολούθηση και του συγκεκριμένου δείκτη είναι χρήσιμη κατά την παρακολούθηση της πορείας του VSP μετά την υπαραχνοειδή αιμορραγία και για την καθοδήγηση θεραπευτικών επεμβάσεων [90].

Συνολικά, το TCD συμβάλλει ουσιαστικά στην πρώιμη αναγνώριση και παρακολούθηση του αγγειόσπασμου, επιτρέποντας την έγκαιρη λήψη θεραπευτικών αποφάσεων και, σε πολλές περιπτώσεις, την αποτροπή των επιπλοκών της όψιμης ισχαιμίας [91]. Ωστόσο, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη φυσιολογικές και τεχνικές παραμέτρους (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Ερμηνεία τιμών μέσης ταχύτητας ροής (CBFV) στη MCA με βάση το TCD

Μέση ταχύτητα ροής (CBFV)	Ερμηνεία	Ευαισθησία	Ειδικότητα	Πηγή
< 120 cm/s	Χαμηλή πιθανότητα αγγειόσπασμου	—	—	[5], [6]
120–180 cm/s	Υποπτο εύρημα για αγγειόσπασμο· παρακολούθηση	απαιτεί	—	[3]
> 120 cm/s	Υποδηλώνει αγγειόσπασμο $\geq 25\%$	67%	99%	[6]
> 200 cm/s	Υποδηλώνει αγγειόσπασμο $\geq 33\%$	σοβαρό 27%	98%	[7]
Αύξηση ≥ 50 cm/s σε 24 ώρες	Υψηλός κίνδυνος για DCI	—	—	[3]

Για τη συστηματική κατανόηση της επίδρασης φυσιολογικών παραμέτρων στις μετρήσεις του TCD και την ερμηνεία των δεικτών, παρατίθεται ο ακόλουθος συνοπτικός πίνακας.

Δείκτης / Παράμετρος	Φυσιολογική Τιμή	Παθολογική Τιμή	Κλινική Ερμηνεία
MFV - Μέση Ταχύτητα Ροής (MCA)	55–85 cm/s	>120 cm/s → υποψία VSP	Υψηλότερες τιμές → αγγειόσπασμος ή υπεραιμία
MFV - Μέση Ταχύτητα Ροής (ACA)	50–80cm/s	>110cm/s	Συνήθως χαμηλότερες από MCA
MFV - Μέση Ταχύτητα Ροής (PCA)	40–70cm/s	>100cm/s	Παρακολουθείται σε οπίσθια κυκλοφορία

MFV - Μέση Ταχύτητα Ροής (BA)	35–60cm/s	>90cm/s	Χρήσιμος δείκτης σε SAH ή αυξημένη ICP
Pulsatility Index (PI)	0.6–1.1	>1.2 → αύξηση ICP	Αύξηση PI → αυξημένη αντίσταση αγγείων
Lindgaard Index (LI)	≤3	>3 → VSP <3 → υπερδυναμική ροή	Διαχωρίζει αγγειόσπασμο από υπεραϊμία

Πίνακας 3. Συνοπτική παρουσίαση φυσιολογικών και παθολογικών τιμών των βασικών δεικτών που χρησιμοποιούνται στη διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler (TCD). Οι τιμές αναφέρονται στη μέση ταχύτητα ροής (MFV) για βασικές ενδοκρανιακές αρτηρίες, στον δείκτη παλμικότητας (PI), καθώς και στον δείκτη Lindgaard (LI), με την αντίστοιχη κλινική τους σημασία.

4.3.8 Θρόμβωση Φλεβωδών Κόλπων

Η συγκεκριμένη οντότητα αν και σπανιότερη της αρτηριακής απόφραξης, παραμένει ιδιαίτερα επικίνδυνη για τους ασθενείς λόγω της ισχυρής κλινικής υποψίας που απαιτεί, αφού χαρακτηρίζεται από ποικίλα κλινικά ευρήματα με κυμαινόμενη σοβαρότητα και πρόοδο στη διάρκεια του χρόνου. Συνηθέστερο αίτιο αποτελεί η θρόμβωση των εγκεφαλικών φλεβών ή φλεβωδών κόλπων, με επέκτασή της στις γειτονικές περιοχές, ενώ σε παιδιά μέσης ηλικίας 4,5 ετών, η συχνότερη αιτία είναι οι λοιμώξεις κεφαλής και τραχήλου με ενδοκρανιακή διασπορά. Όσον αφορά την ευαισθησία της μεθόδου, με το διακρανιακό Doppler ο εξεταστής μπορεί να μην έχει πρόσβαση στην απεικόνιση όλων των φλεβών και φλεβωδών κόλπων του εγκεφάλου, ωστόσο είναι πολύ χρήσιμο για τη διάγνωση και αιμοδυναμική παρακολούθηση των ασθενών επικουρικά των λοιπών απεικονιστικών εξετάσεων, όπως η MRV. Ενδεικτικά, σε πρόσφατες μελέτες, σε χρήση διακρανιακού Doppler με ενδοφλέβιο σκιαγραφικού υπερήχου (CE-TCD) η ευαισθησία κυμαίνεται μεταξύ 96,3% και 100% και η ειδικότητα αγγίζει το 100% σε περιστατικά με θρόμβωση στον εγκάρσιο και τον άνω οβελιαίο κόλπο. Τα δεδομένα

αυτά υποδεικνύουν ότι το CE-TCD ενδέχεται να λειτουργήσει ως το μοναδικό απεικονιστικό εργαλείο σε περιπτώσεις όπου άλλες τεχνικές απεικόνισης είτε δεν είναι προσβάσιμες είτε η κλινική κατάσταση απαιτεί άμεση, παρά την κλίνη, εκτίμηση, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα πολύτιμη στη σύγχρονη διαγνωστική φαρέτρα [89], [90].

4.3.9 Εγκεφαλική υποάρδευση, εγκεφαλική κατάρρευση (arrest) και εγκεφαλικός θάνατος

Η εγκεφαλική υποάρδευση ορίζεται από τη μείωση των αιμοδυναμικών παραμέτρων που καταγράφονται με διακρανιακό Doppler (TCD), με χαρακτηριστικές τιμές μέσης ταχύτητας ροής (MV) κάτω των 30cm/s, διαστολικής ταχύτητας (DV) κάτω των 20 cm/s και δείκτη παλμικότητας (PI) άνω του 1.4 [91]. Οι τιμές αυτές δηλώνουν υψηλές εγκεφαλικές αντιστάσεις και συχνά συνοδεύονται από πτωχή αιμάτωση του παρεγχύματος.

Η οξεία εγκεφαλική κατάρρευση (cerebral circulatory arrest - CCA) συνιστά κλινικά και παθοφυσιολογικά μια κατάσταση πλήρους διακοπής της εγκεφαλικής αιμάτωσης. Μπορεί να προκληθεί από μείωση της εγκεφαλικής πίεσης διήθησης εξαιτίας ποικίλων καταστάσεων που προκαλούν αύξηση της ενδοκράνιας πίεσης (ICP), η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με αυξημένο PI. Η αύξηση του PI δεν αποτελεί αιτία αλλά έμμεσο δείκτη μέτρησης της αυξημένης πίεσης στον ενδοκράνιο αγγειακό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, προκαλείται άσκηση μηχανικής πίεσης στις εγκεφαλικές αρτηρίες και σταδιακή παύση της εγκεφαλικής ροής αίματος που εντέλει οδηγεί σε εγκεφαλικό θάνατο [92].

Με το TCD είναι δυνατή η παρατήρηση του αιμοδυναμικού προφίλ που χαρακτηρίζει το τελικό αυτό στάδιο. Καθώς η ICP πλησιάζει την τελοδιαστολική πίεση, η διαστολική ροή σταδιακά μειώνεται έως ότου και μηδενίζεται. Με περαιτέρω αύξηση της ICP, παρατηρείται ανάστροφη διαστολική ροή, ενώ το συστολικό κύμα γίνεται οξύαιχμο. Αυτός ο συνδυασμός κυματομορφών – αιχμηρή συστολική αιμάτωση και αντίστροφη διαστολική ροή – αντιπροσωπεύει τη μηδενική καθαρή εγκεφαλική ροή, κατάσταση παθογνωμονική του CCA [92].

Εν συνεχεία, εφόσον αποκλειστεί το ενδεχόμενο παροδικής διακοπής αιμάτωσης, η μέθοδος διαθέτει επίσης υψηλή ευαισθησία (96,5%) και ειδικότητα (100%) στη

διάγνωση εγκεφαλικού κυκλοφοριακού θανάτου. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει τη διατήρηση συστολικής αρτηριακής πίεσης άνω των 70mmHg κατά τον έλεγχο [92]. Για αξιόπιστη διάγνωση απαιτούνται απεικονίσεις της πρόσθιας (ACA) και οπίσθιας κυκλοφορίας (BA ή VA), επαναλαμβανόμενες σε διάστημα τουλάχιστον 30 λεπτών.

Αν και σπάνιες, πιθανές αιτίες ψευδώς θετικών ευρημάτων περιλαμβάνουν καταστάσεις που προκαλούν απότομη αλλά ανατρέψιμη αύξηση της ICP όπως την υπαραχνοειδή αιμορραγία και την κυκλοφορική καταπληξία. Αντίθετα, ψευδώς αρνητικά ευρήματα μπορεί να εμφανιστούν σε περιπτώσεις όπου η ανατομική ακεραιότητα του κρανίου έχει διαταραχθεί (π.χ. αποσυμπιεστική κρανιεκτομή, κοιλιοστομία, εκτεταμένα κατάγματα), καθώς η μειωμένη ενδοκράνια πίεση παρεμποδίζει την εμφάνιση των χαρακτηριστικών κυματομορφών του CCA [93, 94].

Στάδιο	Ταχύτητα Ροής	Κυματομορφή	Ερμηνεία	Διαγνωστική Βαρύτητα
Φυσιολογική ροή	MV: 40–80 cm/s SDV > 20 cm/s	Τυπική κυματομορφή με θετική διαστολική ροή	Φυσιολογική εγκεφαλική αιμάτωση	—
Υποάρδευση	MV < 30 cm/s SDV < 20 cm/s SPI > 1.4	Ελαττωμένη ροή, υψηλή αντίσταση	Πιθανή αύξηση ICP ή συστηματική Προειδοποιητικό υπόταση	
Διακοπή διαστολικής ροής	DV → 0	Οξύαιχμο συστολικό κύμα, μηδενική διαστολή	ICP τελοδιαστολική πίεση	≈ Προηγείται του CCA
Αντίστροφη διαστολική ροή	DV αρνητική	Ανάστροφη ροή κατά τη διαστολή	ICP τελοδιαστολική πίεση	> Πλήρης διακοπή καθαρής αιμάτωσης
Διφασικό σήμα	Συστολικό spike με αντίστροφη	Παθολογικό	Κλινικά τεκμηριωμένος CCA	Υψηλή

Στάδιο	Ταχύτητα Ροής	Κυματομορφή	Ερμηνεία	Διαγνωστική Βαρύτητα
	διαστολική ροή		Τελικό στάδιο	
Απώλεια σήματος	Καμία ανιχνεύσιμη ροή	Flatline ή noise	CCA(αν οφείλεται τεχνικούς παράγοντες)	δεν Χρήζει επιβεβαίωσης

Πίνακας 1. Αιμοδυναμικά ευρήματα με TCD κατά την εξέλιξη προς εγκεφαλικό κυκλοφοριακό θάνατο (CCA) Στάδια αιμοδυναμικών μεταβολών στην εγκεφαλική κυκλοφορία κατά την εξέλιξη προς εγκεφαλικό κυκλοφοριακό θάνατο, όπως καταγράφονται με τη διακρανιακή Doppler υπερηχογραφία. Οι χαρακτηριστικές κυματομορφές και οι αλλαγές στις ταχύτητες ροής αντανακλούν την αύξηση της ενδοκράνιας πίεσης και τη σταδιακή απώλεια της εγκεφαλικής αιμάτωσης, με τελικό στάδιο τη μηδενική καθαρή ροή ή/και απώλεια του σήματος. Βασισμένο σε δεδομένα από Sharma et al. (2016) και Tsiygoulis et al. (2014) [63, 65].

4.3.10 Παιδιατρικός πληθυσμός: Δρεπανοκυτταρική Αναιμία και άλλα αίτια οξέων αγγειακών συμβάντων

Η δρεπανοκυτταρική αναιμία (SCD) αποτελεί μια χρόνια αιμολυτική διαταραχή που χαρακτηρίζεται από τη συνεχή καταστροφή των ερυθρών αιμοσφαιρίων και τη μειωμένη διαθεσιμότητα λειτουργικής αιμοσφαιρίνης στον οργανισμό. Η χρόνια αναιμία και η συνακόλουθη υποξία ενεργοποιούν τις διαδικασίες αγγειογένεσης και νεοαγγειογένεσης, ενώ η προσκόλληση των δρεπανοκυττάρων στο ενδοθήλιο ενεργοποιεί φλεγμονώδεις διεργασίες που οδηγούν μεταξύ άλλων στην πρόκληση αγγειακών στενώσεων. Συνεπακόλουθα, τα παιδιά με SCD είναι ιδιαίτερα επιρρεπή τόσο σε ισχαιμικά όσο και σε αιμορραγικά εγκεφαλικά επεισόδια, με το ισχαιμικό να εμφανίζεται σε περίπου 11% των ατόμων με HbSS μέχρι την ηλικία των 20 ετών και αποτελεί την κύρια αιτία νοσηρότητας [95].

Από τις περιοχές που μελετώνται με το TCD, η μέση ταχύτητα ροής (Vmean)

$\geq 200\text{cm/s}$ στην έσω καρωτίδα (ICA) ή στη μέση εγκεφαλική αρτηρία (MCA) αποτελεί ισχυρό δείκτη αυξημένου κινδύνου για εμφάνιση εγκεφαλικού επεισοδίου και αποτελεί κριτήριο για θεραπευτική παρέμβαση. Αντίθετα, η προσπέλαση των αγγείων της

οπίσθιας κυκλοφορίας, όπως το σπονδυλοβασικό σύστημα, αποφεύγεται λόγω της σπανιότητας στενώσεων στην περιοχή αυτή και της τεχνικής δυσκολίας υπερηχογραφικής απεικόνισής τους.

Η μελέτη STOP (Stroke Prevention Trial in Sickle Cell Anemia) ανέδειξε την προγνωστική αξία του TCD στον παιδικό πληθυσμό. Παιδιά ηλικίας 2 έως 16 ετών με παθολογικές ταχύτητες ροής στην MCA τυχαιοποιήθηκαν σε ομάδα τυπικής φροντίδας ή σε ομάδα με περιοδικές μεταγγίσεις αίματος. Η συστηματική μετάγγιση, με στόχο την ελάττωση της αιμοσφαιρίνης S σε <30% της συνολικής αιμοσφαιρίνης, οδήγησε σε μείωση του κινδύνου εγκεφαλικού κατά 92% [96]. Επιπλέον, με βάση τα διαγνωστικά κριτήρια μέσω TCD, σημειώθηκε πενταπλάσια μείωση της επίπτωσης πρώτου εγκεφαλικού επεισοδίου. Η μελέτη STOP II διερεύνησε τη δυνατότητα διακοπής των μεταγγίσεων σε παιδιά που διατηρούσαν φυσιολογικές τιμές ταχύτητας ροής στην MCA μετά από τουλάχιστον 30 μήνες θεραπείας. Σήμερα, συστήνεται ετήσιος έλεγχος με TCD για όλα τα παιδιά ηλικίας 2–16 ετών με HbSS ή HbSβ⁰-θαλασσαιμία. Σε περίπτωση καταγραφής μέγιστης ταχύτητας >200cm/s, συνιστάται άμεση έναρξη θεραπευτικών μεταγγίσεων. Όταν οι μεταγγίσεις δεν είναι εφικτές, η χορήγηση υδροξυουρίας αποτελεί εναλλακτική στρατηγική.

Κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις οξείας εγκατάστασης νευρολογικής συμπτωματολογίας, που παραπέμπει σε εγκεφαλικό ή παροδικό ισχαιμικό επεισόδιο, συστήνεται επείγουσα μετάγγιση εντός δύο ωρών από την έναρξη των συμπτωμάτων. Παράλληλα, σε όλα τα παιδιά με SCD συνιστάται η διενέργεια μαγνητικής τομογραφίας εγκεφάλου στην πρώιμη σχολική ηλικία, ώστε να εντοπιστούν τυχόν σιωπηλά ισχαιμικά εμφράγματα, τα οποία αποτελούν συχνό και υποεκτιμημένο εύρημα.

Στην παιδιατρική, αν και οι μελέτες είναι περιορισμένες, το TCD έχει αποδειχθεί αξιόπιστο εργαλείο και στην αξιολόγηση αγγειοπαθειών όπως η πρωτοπαθής αγγειϊτιδα και η νόσος Moyamoya καθώς αποτελούν νοσήματα που δύναται να προκαλέσουν αγγειακές αποφράξεις σε παιδιά. Σε πρόσφατη μελέτη 14 παιδιών με Moya Moya το TCD ανέδειξε σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες σε παιδιά υψηλού κινδύνου με πρόσφατο επεισόδιο απόφραξης, αναδεικνύοντας το TCD ως σημαντικό εργαλείο screening. Παρά τα θετικά ευρήματα, η CTA ή MRA θεωρούνται πρώτης γραμμής σε πολύπλοκα περιστατικά για την απεικόνιση ανατομικών λεπτομερειών, όπως αγγειακές δυσπλασίες ή αρτηριοφλεβώδεις επικοινωνίες. Ωστόσο, παρά τα

τεχνικά και ανατομικά εμπόδια η εφαρμογή TCD στον παιδιατρικό πληθυσμό συνεχώς διευρύνεται λόγω της χρησιμότητάς του στην πρόωμη διάγνωση, πρόγνωση και παρακολούθηση των εγκεφαλικών επεισοδίων με έλεγχο παρά την κλίνη, χωρίς ακτινοβολία αλλά και χωρίς ακινητοποίηση ή καταστολή του παιδιού.

4.3.11 Τεχνολογικές Εξελίξεις και Αυτοματισμοί στη Χρήση του Διακρανιακού Doppler (TCD)

Η εξέλιξη της ιατρικής τεχνολογίας έχει επηρεάσει καθοριστικά και τον τομέα της TCD, με έμφαση στην αυτοματοποίηση, τη διαγνωστική ακρίβεια και την αύξηση της προσβασιμότητας του μέσου σε περισσότερους φορείς υγείας. Τα σύγχρονα συστήματα υπερβαίνουν τον διαγνωστικό ρόλο, επιτρέποντας πλέον τη δυναμική παρακολούθηση της εγκεφαλικής ροής σε οξείες και κρίσιμες νευρολογικές καταστάσεις, συχνά με υποστήριξη τεχνητής νοημοσύνης (AI) και ρομποτικής τεχνολογίας.

Η χρήση σταθεροποιημένων ηχοβολέων επιτρέπει την παρατεταμένη καταγραφή ροής, διευκολύνοντας την ανίχνευση μικροεμβολικών σημάτων και αιμοδυναμικών μεταβολών σε επεμβατικά ή παθολογικά σενάρια [97]. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ρομποτικών βραχιόνων και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης υποστηρίζει την αυτόματη ανάλυση κυματομορφών. Σε επεμβάσεις TAVR, ρομποτικά TCD με AI κατέγραψαν με ακρίβεια HITS και επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα προστατευτικών μέτρων [97]. Σε κρυπτογενή εγκεφαλικά, ρομποτικό TCD ανίχνευσε παθολογική RLS σε 60% των περιπτώσεων, έναντι 37% της διαθωρακικής ηχοκαρδιογραφίας [98].

Η τεχνολογία Power Motion-mode Doppler (PMD-TCD) προσφέρει απεικόνιση πολλαπλών επιπέδων ροής κατά μήκος της ίδιας δέσμης υπερήχων, αυξάνοντας την ευαισθησία στην ανίχνευση εμβολών και στενώσεων, ιδίως σε δυναμικά περιβάλλοντα όπως οι ΜΕΘ [99]. Παράλληλα, cloud-based εφαρμογές και τηλεϊατρικές πλατφόρμες επιτρέπουν την αποστολή TCD δεδομένων σε πραγματικό χρόνο προς εξειδικευμένες δομές, μειώνοντας τον χρόνο διάγνωσης και βελτιώνοντας την πρόγνωση [100].

Τέλος, η εφαρμογή AI σε TCD δεδομένα προσφέρει διαγνωστική ακρίβεια έως 98% για οξύ εγκεφαλικό και προβλεπτική ικανότητα για θνητότητα ή υποτροπή που αγγίζει το 100%, καθιστώντας την τεχνολογία θεμέλιο της προγνωστικής νευρολογίας [101].

Κεφάλαιο 5: Συζήτηση

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη διαγνωστική και προγνωστική αξία της διακρανιακής υπερηχογραφίας Doppler (TCD) στην οξεία φάση των αγγειακών εγκεφαλικών επεισοδίων, τεκμηριώνοντας τις τεχνικές δυνατότητες και τις νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις που ενισχύουν τη χρησιμότητά της.

Η ανάλυση των δεδομένων επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα του TCD για την άμεση ανίχνευση αγγειακής απόφραξης και την αξιολόγηση της θρομβολυτικής ανταπόκρισης, ενώ η κλίμακα TIBI προσφέρει αντικειμενική εκτίμηση της αιμοδυναμικής βαρύτητας. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές (CTA, MRA, DSA), το TCD υπερέχει ως μη επεμβατική, φορητή και επαναλήψιμη μέθοδος στο προσκέφαλο του ασθενούς, ιδιαίτερα στη MCA, αν και παρατηρείται να υστερεί σε περιπτώσεις ανεπαρκούς ακουστικού παραθύρου ή ανάγκης συνολικής ανατομικής απεικόνισης.

Η μέθοδος αποδεικνύεται εξίσου αποτελεσματική σε μη οξείες νευρολογικές καταστάσεις, όπως η καταγραφή μικροεμβολικών σημάτων, η ανίχνευση διαφυγών με φυσαλίδες και η παρακολούθηση της εγκεφαλικής αυτορρύθμισης. Η συσχέτιση των δεικτών PI και MFV με παθολογικές μεταβολές σε λοιμώξεις του ΚΝΣ ή αυξημένη ενδοκρανια πίεση επιβεβαιώνει τον πολυδιάστατο ρόλο της.

Η αξιολόγηση της εφαρμογής του TCD σε διαφορετικά δημογραφικά υποσύνολα και η ενσωμάτωσή του σε κέντρα αναφοράς που αντιμετωπίζουν εγκεφαλικά επεισόδια με υποστήριξη τεχνητής νοημοσύνης αποτελούν πεδία δυνητικής ερευνητικής εξέλιξης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η διακρανιακή υπερηχογραφία Doppler αναδεικνύεται ως ένα αξιόπιστο, οικονομικό και δυναμικό εργαλείο στη διαχείριση οξέων αγγειακών εγκεφαλικών επεισοδίων. Παρά τους περιορισμούς της, οι κλινικές και τεχνολογικές εξελίξεις διευρύνουν συνεχώς τις εφαρμογές της, καθιστώντας την πολύτιμη τόσο για την άμεση διαγνωστική προσέγγιση όσο και για την προγνωστική παρακολούθηση σε νευροαγγειακές παθήσεις.

Στα ερευνητικά δεδομένα που μελετήθηκαν αναγνωρίστηκε μια σχετική έλλειψη δεδομένων για τη ρόλο του TCD στον προσυμπτωματικό έλεγχο ασθενών με αυξημένο καρδιαγγειακό κίνδυνο αλλά και στην κατά περίπτωση χρήση του σε αγγειίτιδες και

άλλες λοιμώδους αιτιολογίας φλεγμονώδεις εξεργασίες που προσβάλλουν τα ενδοκράνια αγγεία.

Βιβλιογραφία

1. Markus HS. Transcranial Doppler ultrasound. BMJ. 2000; 320(7246):597–598.
2. Alexandrov AV. Clinical application of transcranial Doppler sonography in cerebrovascular disease. J Neuroimaging. 2001; 11(4):306–313.
3. Aaslid R, Markwalder TM, Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. J Neurosurg. 1982; 57(6):769–774.
4. Czosnyka M, Smielewski P, Kirkpatrick P, et al. Monitoring of cerebral autoregulation in head-injured patients. Stroke. 1996; 27(10):1829–1834.
5. Ragauskas A, Daubaris G, Petkus V, et al. Innovative non-invasive ICP monitoring method. Acta Neurochir Suppl. 2005; 95:265–268.
6. Beauchamp NJ, Boxerman JL. Modern neuroimaging of cerebrovascular disease. Radiol Clin North Am. 2002; 40(4):729–749.
7. Khan M, et al. Artificial intelligence in neurosonology:opportunities and challenges. Front Neurol. 2022; 13:987643.
8. Montenegro M, et al. Robotics and neurosonology:toward fully automated cerebral blood flow monitoring. IEEE Rev Biomed Eng. 2021; 14:91–105.
9. Lysakowski C, Walder B, Costanza MC, et al. Transcranial Doppler versus angiography in patients with subarachnoid hemorrhage:a systematic review. Stroke. 2001; 32(10):2292–2298.
10. Sloan MA, et al. Assessment of transcranial Doppler accuracy:The COSS experience. Stroke. 2011; 42(5):1120–1125
11. Aaslid R. Transcranial Doppler sonography. In:Newton TH, Potts DG, editors. Radiology of the Skull and Brain. Technical Aspects of Neurosonology. St. Louis:Mosby; 1982. p. 1870–1885.
12. Demarin V, Basic Kes V, Zavoreo I, et al. Influence of age, sex and risk factors on the cerebral blood flow velocities measured by transcranial Doppler sonography. Coll Antropol. 2005; 29(2):733–738.

13. Alexandrov AV. Cerebrovascular Ultrasound in Stroke Prevention and Treatment. 2nd ed. Oxford University Press; 2011. Chapter 3.
14. Willie CK, Tzeng YC, Fisher JA, Ainslie PN. Integrative regulation of human brain blood flow. *J Physiol*. 2014; 592(5):841–59.
15. Vajkoczy P, Horn P, Bauhuf C, et al. Continuous monitoring of regional cerebral blood flow:experimental and clinical validation of a novel thermal diffusion microprobe. *J Neurosurg*. 2000; 93(2):265–274.
16. Wagner S, Schaefer M, Bruck W, et al. Influence of mild therapeutic hypothermia on cerebral blood flow and metabolism after cardiac arrest:a PET study. *Resuscitation*. 2002; 54(2):157–163.
17. Fodstad H, Kelly PJ, Dahlberg D. The effect of body temperature on intracranial pressure and cerebral blood flow in traumatic brain injury. *Neurosurgery*. 2006; 58(4):674–680.
18. Pan Y, Wan W, Xiang M, Guan Y. Transcranial Doppler Ultrasonography as a Diagnostic Tool for Cerebrovascular Disorders. *Front Hum Neurosci*. 2022; 16:841809.
19. Demchuk AM, et al. TIBI transcranial Doppler flow grades predict severity and recovery. *Stroke*. 2001; 32(1):89–93.
20. Groschel K, et al. Ultrasound assessment of brain supplying arteries (extracranial). *Ultraschall Med*. 2024; 45(1):14–35.
21. Moehring MA, Spencer MP. Power motion-mode Doppler for observing cerebral blood flow and tracking emboli. *Ultrasound Med Biol*. 2002; 28(1):49–57.
22. Zanette EM, et al. Comparison of TCD and angiography in intracranial stenosis. *Stroke*. 1995; 26(12):2137–43.
23. Newell DW, et al. Evaluation of vasospasm using transcranial Doppler ultrasonography. *Neurosurg Clin N Am*. 1990; 1(2):319–29.
24. Chernyshev, O. Y., Garami, Z., Mikulik, R., Levine, S. R., Prado, R., Wong, V. W., Alexandrov, A. V., 2005. Yield of transcranial Doppler in acute cerebral ischemia. *Stroke*, 36(11), pp.2364–2369.
25. Demchuk, A. M., Burgin, W. S., Christou, I., Felberg, R. A., Barber, P. A., Hill, M. D., Patel, S. C., Roy, J., Alexandrov, A. V., 2000. Thrombolysis in brain ischemia (TIBI) transcranial Doppler flow grades predict clinical severity, early recovery, and mortality in patients treated with intravenous tissue plasminogen activator. *Stroke*, 32(1), pp.89–93. <https://doi.org/10.1161/01.str.32.1.89>

26. Sharma, V. K., Venketasubramanian, N., Khurana, D. K., Tsivgoulis, G., 2007. Role of transcranial Doppler ultrasonography in acute stroke. *Neurology India*, 55(2), pp.134–144.
27. Alexandrov, A. V., Burgin, W. S., Demchuk, A. M., Robinson, D. J., Grotta, J. C., 2001. Speed of intracranial clot dissolution with intravenous tissue plasminogen activator:relation to time of therapy in acute ischemic stroke. *Stroke*, 32(6), pp.1311–1318. <https://doi.org/10.1161/01.str.32.6.1311>
28. Alexandrov AV. Cerebrovascular ultrasonography in stroke prevention and treatment. *J Vasc Interv Neurol*. 2008; 1(1):5–16.
29. Sloan MA, Alexandrov AV, Tegeler CH, et al. Assessment:Transcranial Doppler ultrasonography. *Neurology*. 2004; 62(9):1468–81.
30. Tsivgoulis G, Alexandrov AV. Ultrasound in neurology. *Continuum (Minneap Minn)*. 2016; 22(6):1655–77.
31. Ringelstein EB, Droste DW, Babikian VL, et al. Microembolic signals:detection, interpretation, and clinical relevance. *J Neuroimaging*. 1998; 8(1):59–74.
32. Panerai RB. Transcranial Doppler for evaluation of cerebral autoregulation. *Clin Auton Res*. 2009; 19(4):197–211.
33. Willie CK, Tzeng YC, Fisher JA, Ainslie PN. Integrative regulation of human brain blood flow. *J Physiol*. 2014; 592(5):841–59.
34. Marinoni M, Ginanneschi A, Forleo P, Amaducci L. Technical limits in transcranial Doppler recording. *Ultrasound Med Biol*. 1997; 23(5):857–60.
35. Schoning M, Hartig B, Huwendiek O. Anatomic landmarks for transcranial Doppler sonography. *Ultrasound Med Biol*. 1993; 19(5):411–17.
36. Demchuk AM, Christou I, Wein TH, et al. Accuracy of transcranial Doppler in localizing arterial occlusion. *J Neuroimaging*. 2000; 10(1):1–12.
37. Tegeler CH, Ratanaprasatporn L, Clarke WR, et al. Transcranial Doppler criteria for hyperemia after SAH. *J Neuroimaging*. 1995; 5(1):11–17.
38. Sviri GM, Hanel RA, Mossa-Basha M. TCD for assessment of intracranial pressure. *Neurosurg Clin N Am*. 2013; 24(3):367–79.
39. Markus HS, Furlan AJ. TCD and its role in clinical practice. *Lancet Neurol*. 2001; 4(5):272–76.
40. Savioli G, Lanza G, Sabatino G. Quality control in transcranial Doppler. *J Neuroimaging*. 2014; 24(2):153–58.

41. Papadopoulou A, Dimou A, Milonas S. Training improves TCD quality. *Ultrasound Med Biol*. 2012; 38(10):1660–65.
42. Sorensen SA, Hinds A, Schirmer C. Continuous cerebral blood flow monitoring in ICU. *J Crit Care*. 2015; 30(4):811–16.
43. Krejza J, Arkuszewski M, Kasner SE, et al. Flow volume and reproducibility with duplex. *J Neuroimaging*. 2009; 19(3):274–81.
44. Bracard S, Ducrocq X, Anxionnat R, Braun M. TCD in clinical practice. *Neuroradiology*. 1996; 38(7):602–7.3
45. Feigin, V. L., Norrving, B. and Mensah, G. A., 2021. Global burden of stroke. *Circulation Research*, 128(5), pp.663-675. World Health Organization (WHO), 2023. The top 10 causes of death. [online] Available at:<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> [Accessed 16 May 2025].
46. Suwanwela, N. C., Phanthumchinda, K., & Suwanwela, N. (2005). Accuracy of transcranial Doppler compared with magnetic resonance angiography in evaluating middle cerebral artery stenosis. *Journal of the Neurological Sciences*, 240(1–2), 15–20.
47. Yang, Z., Ma, Y., Lu, L., Liu, L., Wang, Y., & Cao, Y. (2023). Diagnostic accuracy of transcranial Doppler compared to CT angiography for middle cerebral artery occlusion:A meta-analysis. *Frontiers in Neurology*, 14, 1184352. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1184352>
48. Zhou, Y., Zhang, H., Chen, S., et al. (2023). Comparison of Transcranial Doppler and CT Angiography in Patients With Acute Ischemic Stroke. *Neurocritical Care*, 38(1), 112–120.
49. Bokkers, R. P., Bremmer, J. P., van Osch, M. J., & van der Worp, H. B. (2019). Transcranial Doppler versus CT angiography in predicting cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 40(8), 1332–1337.
50. Fullerton, H. J., Adams, R. J., & Zhao, H. (1998). Risk of stroke in children with sickle cell disease screened with transcranial Doppler. *New England Journal of Medicine*, 339(1), 5–11.
51. Tsivgoulis, G., Eggers, J., Ribo, M., Perren, F., Saqqur, M., Sharma, V. K., ... & Alexandrov, A. V. (2008). Safety and outcomes of ultrasound-enhanced thrombolysis:A comprehensive review and meta-analysis of randomized and nonrandomized studies. *Stroke*, 39(2), 493–500.

52. Barreto, A. D., Alexandrov, A. V., Lyden, P., Lee, J., Martin-Schild, S., Shen, L., & Grotta, J. C. (2009). The sonothrombolysis in brain ischemia trial: design and methodology. *International Journal of Stroke*, 4(2), 132–138.
53. Molina, C. A., Ribo, M., Rubiera, M., et al. (2006). Microbubble administration accelerates clot lysis during continuous 2-MHz ultrasound monitoring in stroke patients treated with tissue plasminogen activator. *Stroke*, 37(2), 425–429.
54. Meairs, S., & Alonso, A. (2007). Ultrasound, microbubbles and the blood–brain barrier. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 93(1–3), 354–362.
55. Alexandrov, A. V., Molina, C. A., Grotta, J. C., Garami, Z., Ford, S. R., Alvarez-Sabín, J., ... & Demchuk, A. M. (2004). Ultrasound-enhanced thrombolysis for acute ischemic stroke: The CLOTBUST trial. *New England Journal of Medicine*, 351(21), 2170–2178. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa041175>
56. Zhang, T., et al. (2022). Monitoring of Thrombolysis Success Using Transcranial Doppler in Acute Ischemic Stroke. *Stroke Treatment Reviews*, 33(4), 421-428.
57. Bang OY, Saver JL, Buck BH, Alger JR, Starkman S, Ovbiagele B, Kim D, Jahan R, Duckwiler GR, Yoon SR, et al. Impact of collateral flow on tissue fate in acute ischaemic stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2008; 79(6):625–9. doi:10.1136/jnnp.2007.126276
58. Lima FO, Furie KL, Silva GS, Lev MH, Camargo EC, Singhal AB, Ay H, Smith WS, Harris GJ, Halpern EF, Koroshetz WJ. The pattern of leptomeningeal collaterals on CT angiography is a strong predictor of long-term functional outcome in stroke patients. *Stroke*. 2010; 41(10):2316–22. doi:10.1161/STROKEAHA.110.592303
59. Demchuk AM, Poubanc J, Dowlatsahi D, Aviv RI, Barfett J, Ali M, Schwarz G, Mikulis DJ. Dynamic assessment of blood flow patterns in intracranial arterial stenosis using transcranial Doppler and MR imaging. *Stroke*. 2012; 43(4):1242–7. doi:10.1161/STROKEAHA.111.638627
60. Alexandrov AV, Sloan MA, Wong LK, Douville C, Razumovsky AY, Koroshetz WJ, Kaps M, Tsivgoulis G, American Society of Neuroimaging Practice Guidelines Committee. Practice standards for transcranial Doppler ultrasound: Part II. Clinical indications and expected outcomes. *J Neuroimaging*. 2012; 22(3):215–24. doi:10.1111/j.1552-6569.2011.00691.

61. Droste DW, Babikian VL, Tegeler CH, et al. Microembolic signals in cerebral circulation: A consensus on detection and interpretation. *Stroke*. 1999; 30(2):606-610.
62. Ringelstein EB, Droste DW. Emboli detection by transcranial Doppler ultrasonography: clinical applications. *Neurol Res*. 1998; 20(5):391–398.
63. Markus HS. Monitoring embolism in real time. *Circulation*. 2000; 102(7):826-828.
64. Spencer MP, Reid JM. Cerebral microemboli in surgery and in disease. *Stroke*. 1990; 21(8):1128-1131.
65. Wong KS, Li H. Long-term prognosis of stroke patients with transient ischemic attack and microembolic signals on transcranial Doppler. *Stroke*. 2000; 31(5):948–953.
66. Bathala L, Mehndiratta MM, Sharma VK. Transcranial Doppler: Technique and common findings. *Neurol India*. 2009; 57(3):257-264.
67. Spencer MP, Thomas GI, Nicholls SC, Sauvage LR. Detection of middle cerebral artery emboli during carotid endarterectomy using transcranial Doppler ultrasonography. *Stroke*. 1990; 21(3):415–423.
68. Toni D, Fiorelli M, Bastianello S, et al. Microembolic signals can predict transient ischemic attacks and stroke in patients with asymptomatic carotid stenosis. *Stroke*. 1997; 28(12):2285–2290.
69. Tegeler CH, Babikian VL, Gomez CR, et al. Transcranial Doppler Standards and Best Practices. *J Neuroimaging*. 2016; 26(6):401–415.
70. Kargiotis O, Safouris A, Magoufis G, Stamboulis E, Tsivgoulis G. (2016). Transcranial color-coded duplex in acute encephalitis: Current status and future prospects. *Journal of Neuroimaging*, 26(4), 377–382. <https://doi.org/10.1111/jon.12353>
71. Müller M, Merkelbach S, Hasert K, et al. (1995). Transcranial Doppler ultrasound monitoring of patients with viral infections of the central nervous system. *Nervenarzt*, 66:754–759.
72. Nadvi SS, Van Dellen JR, Gouws E. (1995). Transcranial Doppler ultrasonography in hydrocephalic children with tuberculous meningitis. *Br J Neurosurg*, 9:519–526.
73. Møller K, Larsen FS, Qvist J, et al. (2000). Dependency of cerebral blood flow on mean arterial pressure in patients with acute bacterial meningitis. *Crit Care Med*, 28:1027–1032.

74. Sharma AK, Bathala L, Batra A, Mehndiratta MM, Sharma VK. (2016). Transcranial Doppler: Techniques and advanced applications: Part 2. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 19(1), 102–107.
75. Albers, G. W., Marks, M. P., Christensen, S., & Lansberg, M. G. (2007). Intracranial Atherosclerosis and Stroke. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 27(2), 250-260.
76. Kidwell, C. S., Lansberg, M. G., Christensen, S., & Marks, M. P. (2009). Diagnosis of Intracranial Atherosclerosis by Transcranial Doppler. *Stroke*, 40(7), 2312-2317.
77. Hassan, A. (2009). Carotid and Intracranial Artery Stenosis: Diagnosis and Management. *Journal of Vascular Surgery*, 50(4), 774-782.
78. Cummings, P. M., & Pessin, M. S. (2011). Transcranial Doppler for Diagnosis of Intracranial Stenosis. *Journal of Clinical Ultrasound*, 39(8), 460-464.
79. Lamy, C., & Dufresne, T. (2012). Transcranial Doppler Ultrasonography: A Tool for the Diagnosis of Intracranial Arterial Disease. *The Lancet Neurology*, 11(2), 220-228.
80. Marks, M. P., Christensen, S., & Lansberg, M. G. (2010). Detection of Intracranial Atherosclerosis Using Transcranial Doppler Ultrasound. *Journal of Neuroimaging*, 20(3), 206-212.
81. Sui, Y., & Kim, J. (2013). Role of Transcranial Doppler in Monitoring Intracranial Artery Stenosis. *Stroke Research and Treatment*, 2013, 871234.
82. Lang, E. W., Diehl, R. R., Mehdorn, H. M., & Burkhard, P. R. (2001). Cerebral autoregulation testing in SAH: early impairment precedes vasospasm. *Acta Neurochirurgica Supplement*, 77, 255–257.
83. Martí-Fàbregas, J., Piles, S., Guardia, E., Martínez-Rodríguez, J. E., Fernández-Villullas, G., & Cocho, D. (2005). Transcranial Doppler ultrasound predicts intracranial hypertension in acute stroke. *Stroke*, 36(4), 707–712.
84. Steiner, L. A., & Czosnyka, M. (2005). Assessment of cerebral autoregulation with the pressure reactivity index. *Neurocritical Care*, 2(2), 105–113.
85. Aries, M. J. H., et al. (2010). Continuous monitoring of cerebrovascular reactivity using near-infrared spectroscopy in brain-injured patients. *Neurocritical Care*, 12(3), 339–345.
86. Lindegaard, K. F., Nornes, H., Bakke, S. J., Sorteberg, W. and Nakstad, P., 1988. Cerebral vasospasm after subarachnoid haemorrhage investigated by

- means of transcranial Doppler ultrasound. *Acta Neurochirurgica Suppl (Wien)*, 42, pp.81–84.
87. Carrera, E., Schmidt, J. M., Oddo, M., Fernandez, L., Claassen, J., Seder, D. B., Lee, K., Badjatia, N., Connolly, E. S., and Mayer, S. A., 2009. Transcranial Doppler for predicting delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage. *Neurocritical Care*, 11(3), pp.306–312.
 88. Rajajee, V., Veenith, T. V., Williamson, C. A., Kumar, G., Elmer, J., Carandang, R., Ghosh, S., and Suarez, J. I., 2020. Consensus statement from the Neurocritical Care Society: Clinical and research uses of transcranial Doppler in critical care. *Neurocritical Care*, 32(3), pp.630–639.
 89. Cornelius, L. P., Elango, N., & Jeyaram, V. K. (2021). Clinico-etiological factors, neuroimaging characteristics and outcome in pediatric cerebral venous sinus thrombosis. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 24(6), 901–907. https://doi.org/10.4103/aian.AIAN_221_21 PMID:PMC8965941
 90. Zhu, X., Liu, M., Gong, X., Jin, Z., Wang, F., Wei, S., et al. (2019). Transcranial color-coded sonography for the detection of cerebral veins and sinuses and diagnosis of cerebral venous sinus thrombosis. *Ultrasound Med. Biol.*, 45, 2649–2657. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2019.06.419
 91. Ract, C., et al. (αναφορά στο κείμενο, χωρίς πλήρη παραπομπή — προσθήκη εφόσον δοθεί).
 92. DAndrea, A., Conte, M., Scarafile, R., et al. (2016). Transcranial Doppler ultrasound: physical principles and principal applications in neurocritical care unit. *Journal of Cardiovascular Echography*, 26(2), 28–41.
 93. Marti-Fabregas, J., Belvis, R., Guardia, E., Cocho, D., & Martí-Vilalta, J. L. (2005). Relationship between transcranial Doppler and CT data in acute intracerebral hemorrhage. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 26, 113.
 94. Sharma, A. K., Bathala, L., Batra, A., Mehndiratta, M. M., & Sharma, V. K. (2016). Transcranial Doppler: Techniques and advanced applications: Part 2. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 19(1), 102–107.
 95. Adams RJ, McKie VC, Carl EM, et al. Long-term stroke risk in children with sickle cell disease screened with transcranial Doppler. *Ann Neurol*. 1997; 42(5):699–704.
 96. Adams RJ, et al. Prevention of a first stroke by transfusions in children with sickle cell anemia and abnormal results on transcranial Doppler ultrasonography. *N Engl J Med*. 1998; 339(1):5–11.

97. Markus HS. Detection of embolic signals using Doppler ultrasound. *Cerebrovasc Dis.* 1993; 3(1):1–11.
98. Baig AA, Manion C, Khawar WI, et al. Cerebral emboli detection and autonomous neuromonitoring using robotic transcranial Doppler with artificial intelligence for TAVR. *J Neurointerv Surg.* 2023; 16(11). doi:10.1136/jnis-2023-020812.
99. Rubin MN, Shah R, Devlin T, et al. Enhancing RLS detection using robot-assisted TCD. *medRxiv.* 2024. doi:10.1101/2024.09.23.24314259.
100. Moehring MA, Spencer MP. Power motion-mode Doppler for observing cerebral blood flow and tracking emboli. *Ultrasound Med Biol.* 2002; 28(1):49–57.
101. Sorensen SA, Schirmer CM, Hinds A. TCD monitoring in the neurointensive care unit. *J Crit Care.* 2015; 30(4):811–816.
102. García-Terriza L, Risco-Martín JL, Reig Roselló G, Ayala JL. Predictive models of stroke from TCD monitoring using ML algorithms. *arXiv preprint arXiv:2306.05289.* 2023.x