



Ενίσχυση της διάγνωσης και της πρόγνωσης του αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου μέσω εξηγήσιμης τεχνητής νοημοσύνης: Μια πολυτροπική προσέγγιση

Αγγελούσης Νικόλαος, Κοκκότης Χρήστος, Γιαννακού Ερασμία, Γιαρματζής Γεώργιος, Καραμπίνα Ευαγγελή, Γκρεκίδης Αθανάσιος

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο (ΑΕΕ) αποτελεί μία από τις κύριες αιτίες αναπηρίας και θανάτου παγκοσμίως. Η ακριβής πρόβλεψη της ανάρρωσης (πρόγνωση) και η έγκαιρη επιλογή των βέλτιστων παρεμβάσεων για την αποτελεσματικότερη κινητική αποκατάσταση αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζονται νέες προσεγγίσεις που συνδυάζουν την Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) με κλινικές και εργαστηριακές αξιολογήσεις, για την καλύτερη φροντίδα των ατόμων με ΑΕΕ. Εξηγούμε πώς τα συστήματα TN μπορούν να προβλέπουν την εμφάνιση του ΑΕΕ και να αξιολογούν την πιθανή πορεία ανάρρωσης με βάση βιοδείκτες, κλινικά δεδομένα και εμβιομηχανικές παραμέτρους της βάδισης, ως πρώιμους δείκτες κινητικών διαταραχών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σημασία της "εξηγήσιμης" τεχνητής νοημοσύνης (explainable AI), που κάνει τις αποφάσεις των υπολογιστικών συστημάτων κατανοητές για ειδικούς, ασθενείς και φροντιστές. Με την κατάλληλη χρήση αυτών των νέων εργαλείων, ανοίγεται μια ελπιδοφόρα προοπτική για περισσότερο εξατομικευμένη και αποτελεσματική φροντίδα μετά από αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο. Το άρθρο βασίζεται σε μια σειρά δημοσιευμένων ερευνών που έλαβαν χώρα στον Τομέα Εμβιομηχανικής του Εργαστηρίου Φυσικής Αγωγής και Άθλησης του Τ.Ε.Φ.Α.Α. του Δ.Π.Θ. σε συνεργασία με το Εργαστήριο Κλινικής Νευροφυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Δ.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: αποκατάσταση κινητικών διαταραχών, τεχνητή νοημοσύνη στην υγεία, προσωποποιημένη ιατρική φροντίδα, καινοτομία στην υγειονομική περίθαλψη.

Εισαγωγή

Το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο (ΑΕΕ) συμβαίνει όταν διακόπτεται η αιματική ροή σε μια περιοχή του εγκεφάλου, είτε λόγω απόφραξης ενός αγγείου (ισχαιμικό αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο) είτε λόγω αιμορραγίας (αιμορραγικό αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο). Η έλλειψη οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών προκαλεί βλάβη στα εγκεφαλικά κύτταρα και αν η διακοπή της

Διεύθυνση αλληλογραφίας:

Αγγελούσης Νικόλαος
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού
Πανεπιστημιούπολη, 69100 Κομοτηνή

E-mail:

nagelous@phyed.duth.gr

αιμάτωσης διαρκέσει για πολύ, τα κύτταρα μπορεί να νεκρωθούν. Το εγκεφαλικό μπορεί να επηρεάσει βασικές λειτουργίες του σώματος, όπως την κίνηση, την ομιλία, την όραση ή ακόμα και τη μνήμη και την κατανόηση (Feigin et al., 2021).

Η σοβαρότητα του εγκεφαλικού ποικίλλει ανάλογα με το σημείο και την έκταση της εγκεφαλικής βλάβης. Μερικοί ασθενείς μπορεί να αναρρώσουν σχεδόν πλήρως, ενώ άλλοι ενδέχεται να αντιμετωπίζουν μακροχρόνια αναπηρία (Hankey, 2017). Η κατανόηση του πώς το ΑΕΕ επηρεάζει τη δομή και λειτουργία του σώματος κάθε ασθενούς είναι το πρώτο βήμα για την πρόληψη, την έγκαιρη διάγνωση και τη σωστή αποκατάσταση. Ο χρόνος είναι ζωτικής σημασίας σε περιπτώσεις αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου. Υπάρχει μία κοινή φράση στην ιατρική: "Ο χρόνος είναι εγκέφαλος" ("Time is brain"), που σημαίνει ότι κάθε λεπτό καθυστέρησης μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια εκατομμυρίων εγκεφαλικών κυττάρων (Saver, 2006). Όσο πιο γρήγορα διαγνωστεί και αντιμετωπιστεί ένα ΑΕΕ, τόσο περισσότερες πιθανότητες έχει ο ασθενής να σωθεί και να μειώσει τη σοβαρότητα των μόνιμων επιπτώσεων. Τα σύγχρονα φάρμακα και επεμβάσεις, όπως η θρομβόλυση ή η μηχανική θρομβεκτομή, πρέπει να χορηγούνται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά το επεισόδιο (Powers et al., 2018).

Παράλληλα, η πρόληψη είναι εξίσου καθοριστική, τόσο ως πρωτογενής όσο και ως δευτερογενής (πρόληψη της επανεμφάνισης του ΑΕΕ). Πολλοί παράγοντες κινδύνου, όπως ο διαβήτης, η υπέρταση, το κάπνισμα και η παχυσαρκία, μπορούν να ελεγχθούν με έγκαιρες παρεμβάσεις. Εντοπίζοντας νωρίς τα άτομα με αυξημένο κίνδυνο, μπορούμε να προλάβουμε περίπου το 80% των αγγειακών εγκεφαλικών επεισοδίων (O'Donnell et al., 2016). Αυτό αποτελεί προνομιακό πεδίο για την τεχνητή νοημοσύνη (TN), καθώς με την ανάλυση μεγάλων όγκων ιατρικών δεδομένων, η TN μπορεί να αναγνωρίσει συνδυασμούς κινδύνων και προειδοποιητικά σημάδια που διαφορετικά ίσως περνούσαν απαρατήρητα (Kokkotis et al., 2022).

Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να επεξεργάζεται τεράστιες ποσότητες δεδομένων διαφορετικής φύσης και από διαφορετικές πηγές: ιατρικούς φακέλους, εργαστηριακές αναλύσεις, κλινικές παρατηρήσεις και κρίσιμες εμβιομηχανικές παραμέτρους κίνησης. Αντί να βλέπει κάθε παράγοντα ξεχωριστά, το σύστημα TN "μαθαίνει" πώς διαφορετικοί συνδυασμοί χαρακτηριστικών αυξάνουν ή μειώνουν τον κίνδυνο ΑΕΕ. Έτσι, μπορεί να αναγνωρίσει ακόμα και πιο ασθενείς συσχετίσεις που δεν είναι άμεσα ορατές στους γιατρούς. Για παράδειγμα, μπορεί να δει ότι ένας συγκεκριμένος συνδυασμός ηλικίας, δείκτη μάζας σώματος και συγκέντρωσης γλυκόζης αίματος είναι ιδιαίτερα επικίνδυνος, ακόμα και αν κάθε τι μόνο του φαίνεται «φυσιολογικό» (Kokkotis et al., 2022).

Επιπλέον, τα σύγχρονα εργαλεία TN δεν σταματούν μόνο στην πρόβλεψη ενός ΑΕΕ. Με τη βοήθεια τεχνικών εξήγησης όπως το SHAP (Shapley Additive Explanations), μπορούμε να δούμε και ποιοι ακριβώς παράγοντες παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο για κάθε άτομο ξεχωριστά (Kokkotis et al., 2022). Αυτό είναι τεράστιο βήμα προόδου, διότι όχι μόνο μαθαίνουμε ΠΟΙΟΣ κινδυνεύει, αλλά και ΓΙΑΤΙ, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για στοχευμένη πρόληψη και έγκαιρες παρεμβάσεις.

Η επιβίωση από ένα ΑΕΕ είναι μόνο η αρχή ενός μεγάλου ταξιδιού ανάρρωσης. Πολλοί ασθενείς αντιμετωπίζουν σημαντικές δυσκολίες στην κίνηση, στην ομιλία, στην κατάποση, στην όραση ή ακόμα και στη νόηση. Η ανάρρωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο γρήγορα ξεκινά η αποκατάσταση και από τη σοβαρότητα της αρχικής βλάβης. Κάθε ασθενής έχει διαφορετική πορεία ανάρρωσης. Κάποιοι ανακτούν τις χαμένες λειτουργίες μέσα σε λίγες εβδομάδες ή μήνες, ενώ άλλοι χρειάζονται μακροχρόνιες παρεμβάσεις και υποστήριξη (Teasell et al., 2020). Οι ειδικοί υγείας χρησιμοποιούν κλίμακες αξιολόγησης, όπως η National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS),

για να μετρήσουν τη σοβαρότητα του ΑΕΕ στην αρχή και να εκτιμήσουν την πορεία της ανάρρωσης. Η κατανόηση του τι να περιμένουμε και πώς να παρέμβουμε σωστά είναι κρίσιμη για να δώσουμε στους ασθενείς τις καλύτερες πιθανότητες για ένα καλύτερο μέλλον (Gkantzios et al., 2023).

Αν οι γιατροί και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας αποκατάστασης (φυσικοθεραπευτές, γυμναστές, εργοθεραπευτές, λογοθεραπευτές, ψυχολόγοι) μπορούν να προβλέψουν από νωρίς πόσο καλά θα αναρρώσει ένας ασθενής, μπορούν να σχεδιάσουν καλύτερα και πιο αποτελεσματικά προγράμματα αποκατάστασης (Gkantzios et al., 2023). Για παράδειγμα, αν γνωρίζουν ότι ένας ασθενής έχει αυξημένο κίνδυνο για σοβαρή αναπηρία, μπορούν να ξεκινήσουν πιο εντατικά προγράμματα άσκησης και επανεκπαίδευσης της κίνησης από την αρχή. Ταυτόχρονα, μπορούν να στηρίξουν καλύτερα την οικογένεια του ασθενούς, προετοιμάζοντάς την για τις απαιτήσεις της φροντίδας στο σπίτι.

Η ΤΝ μπορεί να παίξει και εδώ καθοριστικό ρόλο. Με την ανάλυση κατάλληλων δεδομένων μπορεί να προβλέψει την πιθανή πορεία της ανάρρωσης (Gkantzios et al., 2023). Μοντέλα εξήγησης, όπως το SHAP, βοηθούν να καταλάβουμε ποιοι ακριβώς παράγοντες επηρεάζουν τη βελτίωση ή την επιδείνωση της κατάστασης ενός ασθενή. Έτσι, η φροντίδα γίνεται περισσότερο προσωποποιημένη, και η ελπίδα για καλύτερα αποτελέσματα αυξάνεται σημαντικά.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα από την αξιοποίηση της ΤΝ στις παραπάνω κατευθύνσεις υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν, πριν την πλήρη αποδοχή των πορισμάτων της ΤΝ στην κλινική πράξη. Ειδικότερα, η ΤΝ βασίζεται στα δεδομένα που της δίνουμε για να "μάθει" και να κάνει σωστές προβλέψεις. Όμως, πολλές μελέτες στον τομέα του εγκεφαλικού βασίζονται σε σχετικά μικρά ή περιορισμένα δείγματα ασθενών. Αυτό μπορεί να περιορίσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για να λειτουργεί σωστά η ΑΙ για όλους τους ανθρώπους, χρειάζεται να εκπαιδευτεί σε πολύ μεγάλα και διαφορετικά σύνολα δεδομένων — με ασθενείς από διαφορετικές ηλικίες, φύλα, εθνικότητες και ιατρικά ιστορικά (Kokkotis et al., 2022). Επιπλέον, για να εμπιστευτούμε πλήρως την ΤΝ στην πρόληψη και αποκατάσταση του ΑΕΕ, πρέπει να ελέγχουμε συνεχώς τα μοντέλα της με νέες δοκιμές και να επαληθεύουμε τα αποτελέσματά της (Steyerberg et al., 2010). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται "εξωτερική επικύρωση" και σημαίνει ότι δοκιμάζουμε την ΑΙ σε εντελώς καινούργια δεδομένα που δεν έχει ξαναδεί. Μόνο έτσι μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι το σύστημα λειτουργεί αξιόπιστα και δεν βασίζεται σε τυχαίες συμπτώσεις ή προκαταλήψεις.

Επιπρόσθετα, το μέλλον της ΤΝ στην ιατρική αποκατάσταση πρέπει να περιλαμβάνει τη συνεργασία ανθρώπων και μηχανών (Torol, 2019). Η τεχνολογία δεν πρέπει να αντικαθιστά τους ειδικούς, αλλά να τους ενισχύει, προσφέροντας τους καλύτερη πληροφόρηση και βοηθώντας τους να πάρουν πιο σωστές και γρήγορες αποφάσεις. Οι τεχνολογίες εξήγησης (Explainable AI) και οι αυστηροί κανόνες ελέγχου οφείλουν να είναι κεντρικά εργαλεία για να χτίσουμε ένα πιο αξιόπιστο και ανθρώπινο μέλλον στην υγεία.

Σκοπός αυτού του άρθρου είναι να παρουσιάσει, τρεις σύγχρονες επιστημονικές προσεγγίσεις που υλοποιήθηκαν στον Τομέα Εμβιομηχανικής του Εργαστηρίου Φυσικής Αγωγής και Άθλησης του Τ.Ε.Φ.Α.Α. του Δ.Π.Θ. σε συνεργασία με τη Εργαστήριο Κλινικής Νευροφυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Δ.Π.Θ., και ανέδειξαν τη δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης στην διάγνωση και στην πρόγνωση του αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου. Οι επιμέρους στόχοι περιλαμβάνουν: α) τη χρήση ΤΝ για να μπορούμε να αναγνωρίσουμε έγκαιρα άτομα υψηλού κινδύνου με τη βοήθεια δεδομένων

όπως ηλικία, πίεση και ιστορικό υγείας, β) τη χρήση της TN για την υποστήριξη του σχεδιασμού εξατομικευμένων προγραμμάτων αποκατάστασης, προσδιορίζοντας από νωρίς την πιθανή εξέλιξη της νευρολογικής κατάστασης, και γ) τη χρήση της TN για τη διάγνωση κινητικών διαταραχών της βάδισης προς όφελος της ανάπτυξης εξατομικευμένων προγραμμάτων αποκατάστασης τους μετά από ΑΕΕ.

Μέθοδος

Συμμετέχοντες

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια μελέτη για την εφαρμογή της TN στη κατεύθυνση του προσδιορισμού των κυριότερων παραγόντων κινδύνου για την εμφάνιση ενός ΑΕΕ (Kokkotis et al., 2022). Το δείγμα αυτής της μελέτης αποτελούνταν από 43.400 άτομα και βασιζόταν σε ανοιχτό δημόσιο σύνολο δεδομένων από την πλατφόρμα Kaggle.

Ακολούθησε μια μελέτη για την πρόβλεψη της νευρολογικής κατάστασης στο τέλος της οξείας φάσης του ΑΕΕ, κατά την έξοδο των ατόμων με ΑΕΕ από το νοσοκομείο εισαγωγής (Gkantzi et al., 2023). Το δείγμα αυτής της μελέτης περιελάμβανε 413 ασθενείς με οξύ αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο που νοσηλεύτηκαν στο Γενικό Νοσοκομείο Κοργιαλένιο - Μπενάκειο του Ελληνικού Ερυθρού Σταυρού στην Αθήνα.

Στην τρίτη μελέτη επιχειρήθηκε εφαρμογή της TN για τη βελτίωση της διάγνωσης των κινητικών διαταραχών των ατόμων με ΑΕΕ (Apostolidis et al., 2023). Το δείγμα αποτελούνταν από 64 άτομα, εκ των οποίων 34 ήταν χρόνιοι επιζώντες εγκεφαλικού επεισοδίου και 30 υγιείς ενήλικες ηλικίας άνω των 55 ετών.

Όργανα Μέτρησης & Διαδικασία

Στην πρώτη μελέτη, η οποία είχε ως στόχο τον προσδιορισμό των κυριότερων παραγόντων κινδύνου για την εμφάνιση ενός ΑΕΕ (Kokkotis et al., 2022) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μια δημοσίως προσβάσιμη βάση δεδομένων μέσω της πλατφόρμας Kaggle. Τα δεδομένα αναφέρονταν σε 10 παράγοντες κινδύνου για εγκεφαλικό επεισόδιο, όπως ηλικία, δείκτης μάζας σώματος (ΔΜΣ), μέσο επίπεδο γλυκόζης, τύπος εργασίας, συνήθειες καπνίσματος, ύπαρξη υπέρτασης, καρδιοπάθειας και άλλων συννοσηροτήτων. Τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε προκαταρκτική επεξεργασία για την αφαίρεση ακραίων τιμών και την τυποποίησή τους σε κοινή κλίμακα. Για την αντιμετώπιση της ανισορροπίας του συνόλου (λιγότερα κρούσματα ΑΕΕ σε σχέση με τους υγιείς), εφαρμόστηκε τεχνική τυχαίας υποδειγματοληψίας με υποεκπροσώπηση (random under-sampling) συνδυασμένη με ένθετη στρωματοποιημένη διασταυρούμενη επικύρωση 10 πτυχών (nested stratified 10-fold cross-validation) για την αξιόπιστη εκπαίδευση και δοκιμή των μοντέλων.

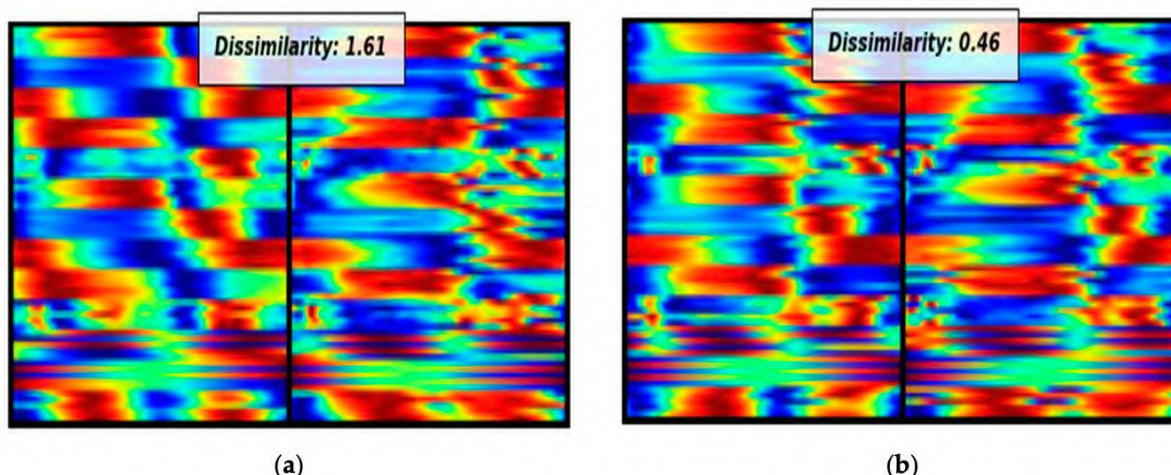
Η εκπαίδευση περιλάμβανε τη σύγκριση έξι αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (όπως MLP, Random Forest, Logistic Regression), με στόχο τη βελτίωση της πρόβλεψης εμφάνισης αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου και την ελαχιστοποίηση του ποσοστού ψευδών αρνητικών (false negatives) προβλέψεων. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν μέσω μετρικών όπως η ακρίβεια (accuracy), η ευαισθησία (sensitivity), η ειδικότητα (specificity) και ο γεωμετρικός μέσος (G-Mean), με τον MLP να υπερτερεί σε ευαισθησία (81,4%) και συνολική ισορροπία (G-Mean 75,83%). Η εξήγηση των προβλέψεων έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SHAP (Shapley Additive Explanations), η οποία ποσοτικοποίησε την επίδραση κάθε χαρακτηριστικού στο αποτέλεσμα. Το μοντέλο SHAP βασίζεται στην έννοια των τιμών Shapley από τη θεωρία συνεργατικών παιγνίων και αποδίδει τιμές

σημαντικότητας στα χαρακτηριστικά με μεγαλύτερη ακρίβεια από άλλες μεθόδους, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία οποιουδήποτε μοντέλου που παράγει μια βαθμωτή τιμή (Lundberg et al., 2020). Ο τελικός αγωγός (pipeline) αναδείχθηκε ως ισχυρό εργαλείο τόσο για πρόβλεψη όσο και για κατανόηση των αιτίων εμφάνισης ενός ΑΕΕ.

Η συλλογή των δεδομένων της δεύτερης μελέτης (Gkantzi et al., 2023) έγινε σε 413 ασθενείς με ισχαιμικό ή αιμορραγικό εγκεφαλικό στο Γενικό Νοσοκομείο Κοργιαλένιο-Μπενάκειο στην Αθήνα, μέσα σε διάστημα ενός έτους. Για κάθε ασθενή καταγράφηκαν 32 κλινικές παράμετροι μέσα στις πρώτες 72 ώρες από την εισαγωγή, όπως τιμές αρτηριακής πίεσης, γλυκόζης, ταχύτητα καθίζησης ερυθρών, καθώς και ιστορικό υπέρτασης, διαβήτη και άλλων νοσημάτων. Η σοβαρότητα του εγκεφαλικού αξιολογήθηκε μέσω της κλίμακας NIHSS κατά την εισαγωγή και την έξοδο. Η διαδικασία ανάλυσης βασίστηκε σε έναν ιεραρχικό αγωγό (pipeline) μηχανικής μάθησης: πρώτα έγινε προεπεξεργασία και συμπλήρωση ελλιπών δεδομένων με τη συχνότερη τιμή (mode imputation). Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν τα ελλιπή δεδομένα δεν είναι τυχαία, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση της υποκείμενης δομής των δεδομένων. Έπειτα, εφαρμόστηκε επιλογή χαρακτηριστικών μέσω γενετικού αλγορίθμου, σε συνδυασμό με μια στρατηγική διασταυρούμενης επικύρωσης 5-πτυχών (5-fold cross-validation), ώστε να εντοπιστούν οι 15 σημαντικότεροι παράγοντες για την πρόβλεψη μεταβολής της βαθμολογίας NIHSS. Τα επιλεγμένα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση αλγορίθμων (Random Forest, XGBoost, MLP), με το Random Forest να αποδίδει την καλύτερη ακρίβεια (91,13%). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση της μεθόδου SHAP, αναδεικνύοντας κρίσιμους δείκτες, ως παράγοντες που επιδεινώνουν τη νευρολογική εικόνα των ασθενών στο τέλος της οξείας φάσης, δηλαδή κατά την έναρξη του κλασσικού κύκλου της αποκατάστασης.

Στην τρίτη μελέτη (Apostolidis et al., 2023) οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε ανάλυση βάρδισης στον τομέα Εμβιομηχανικής του Εργαστηρίου Φυσικής Αγωγής και Άθλησης του Τ.Ε.Φ.Α.Α. του Δ.Π.Θ. Όταν οι συμμετέχοντες εισέρχονταν στο εργαστήριο ανάλυσης βάρδισης, λάμβαναν οδηγίες σχετικά με τη διαδικασία της δοκιμής και εξοικειώνονταν με το έργο της βάρδισης. Πραγματοποιήθηκαν ανθρωπομετρικές μετρήσεις και τοποθετήθηκαν 57 σφαιρικοί ανακλαστικοί δείκτες σε ανατομικά σημεία αναφοράς και σε συγκεκριμένες περιοχές της κεφαλής, του θώρακα, της λεκάνης και των άνω και κάτω άκρων, σύμφωνα με το πρωτόκολλο Conventional Gait Model (CGM2.4). Στη συνέχεια, οι συμμετέχοντες περπατούσαν ξυπόλητοι σε διάδρομο μήκους 10 μέτρων μέσα στο εργαστήριο, στο μέσο του οποίου υπήρχε ένα ενσωματωμένο δυναμοδάπεδο (Bertec 4060–10, ΗΠΑ). Οι δοκιμές πραγματοποιούνταν μέχρι να καταγραφούν τουλάχιστον 10 πλήρεις κύκλοι βάρδισης για κάθε πόδι (αριστερό και δεξί). Τα κινηματικά δεδομένα συλλέγονταν με συχνότητα 100 Hz μέσω 10 οπτοηλεκτρονικών καμερών (Vicon, Oxford, Ηνωμένο Βασίλειο), ενώ τα κινητικά δεδομένα συλλέγονταν με συχνότητα 1000 Hz μέσω του δυναμοδαπέδου και συγχρονίζονταν με τα κινηματικά δεδομένα. Τα κινηματικά δεδομένα της ανάλυσης βάρδισης μετατράπηκαν σε πίνακες χρονικών σειρών και κατόπιν σε δισδιάστατες εικόνες χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας σήματος και κλιμάκωσης. Αυτές οι εικόνες αναλύθηκαν με χρήση ενός σιαμαίου νευρωνικού δικτύου (Siamese Neural Network), το οποίο εξήγαγε διανύσματα χαρακτηριστικών (feature vectors) και ταξινόμησε τα δείγματα ως «ΑΕΕ» ή «μη ΑΕΕ» με χρήση ευκλείδειας (Euclidean) απόστασης και υποστηρικτικών αλγορίθμων (SVM, RF). Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, όπου οι

εικόνες της ίδιας κλάσης (Σχήμα 1b) έχουν μια μικρή απόσταση ομοιότητας, ενώ εικόνες από διαφορετικές κλάσεις έχουν μεγάλη απόσταση ανομοιότητας (Σχήμα 1a).



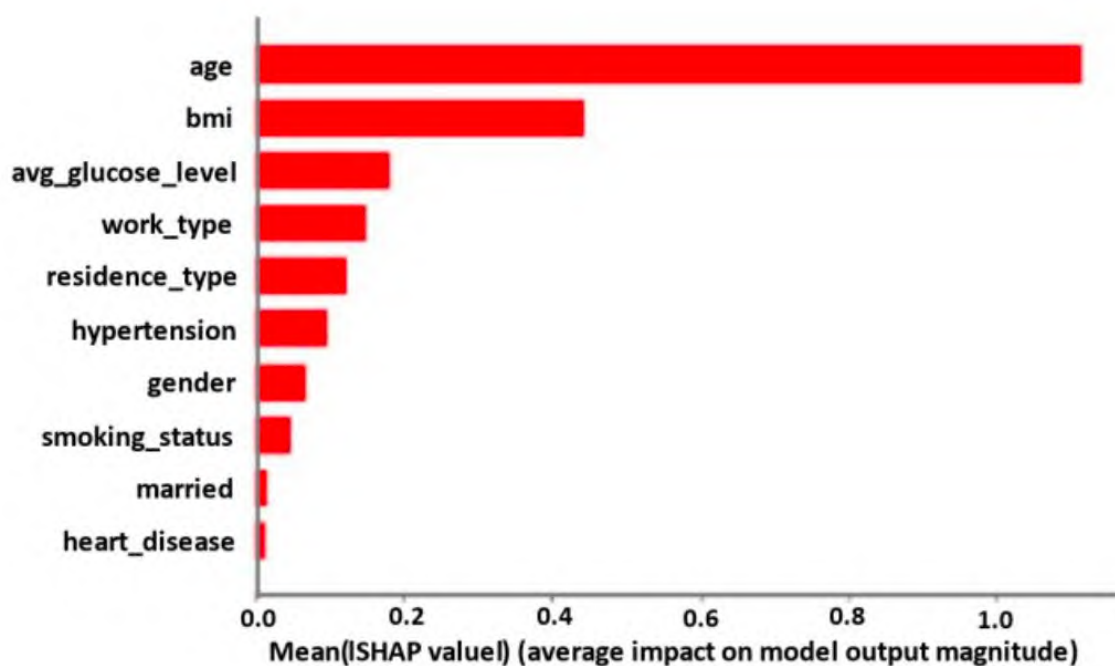
Σχήμα 1. Δισδιάστατες εικόνες κινηματικών χρονοσειρών βάδισης: (a) εικόνα ατόμου με ΑΕΕ (αριστερά) και υγιούς ατόμου (δεξιά); (b) εικόνες υγιών ατόμων (αριστερά & δεξιά) (Apostolidis et al., 2023).

Για την ερμηνεία του τρόπου λήψης αποφάσεων του μοντέλου, εφαρμόστηκε η τεχνική Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM), η οποία ανέδειξε κρίσιμες περιοχές των εικόνων βάδισης, που ευθύνονται για τη διάγνωση ενός ατόμου με ΑΕΕ.

Αποτελέσματα

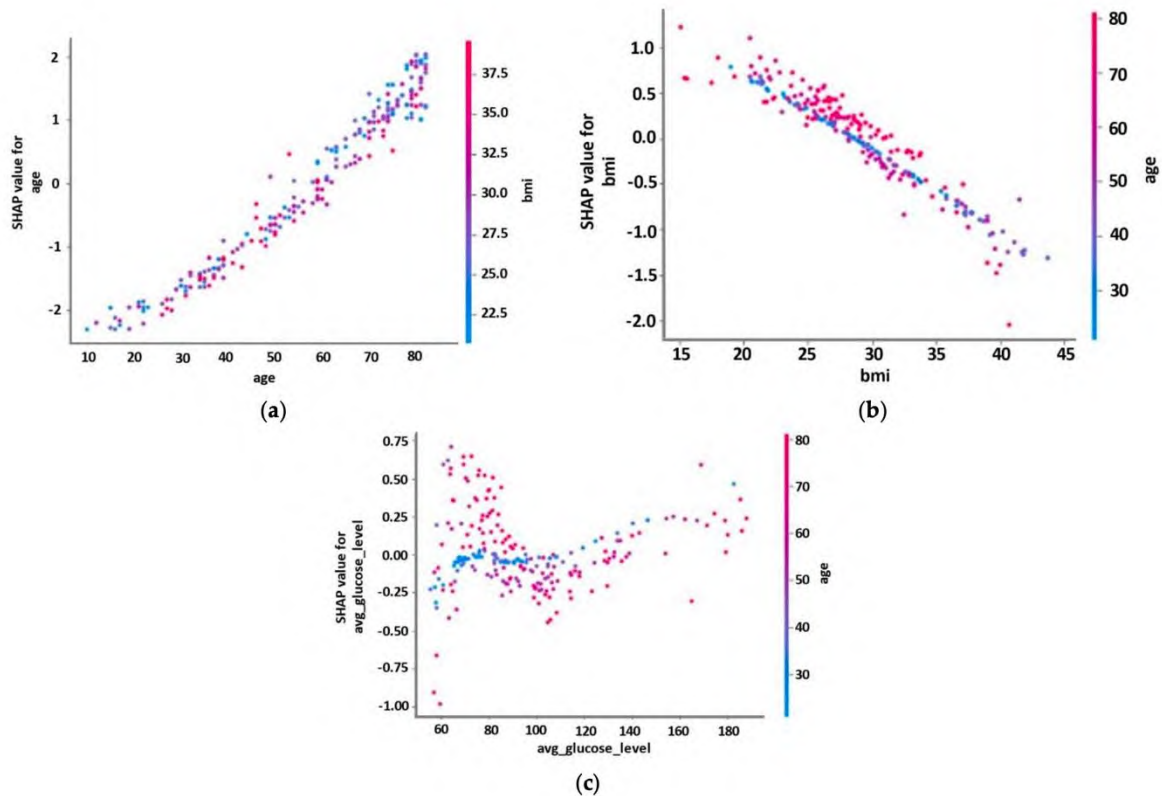
Παράγοντες κινδύνου για ΑΕΕ

Το Σχήμα 2 απεικονίζει τη μέση επίδραση κάθε παράγοντα κινδύνου στο μέγεθος της εξόδου του καλύτερου μοντέλου (MLP). Όπως παρατηρείται, οι παράγοντες ηλικία (age), ΔΜΣ (BMI) και μέσο επίπεδο γλυκόζης (avg_glucose_level) έχουν σημαντική συμβολή στην έξοδο του μοντέλου, ενώ παράγοντες όπως ο τύπος εργασίας (work_type), ο τύπος κατοικίας (residence_type), η υπέρταση (hypertension) και το φύλο (gender) έχουν μέτρια έως χαμηλή επίδραση. Αντίθετα παράγοντες όπως η έγγαμη ιδιότητα (married) και η καρδιακή νόσος (heart_disease) έχουν χαμηλή επίδραση (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Μέση επίδραση κάθε παράγοντα κινδύνου στην εμφάνιση ενός ΑΕΕ (Kokkotis et al., 2022).

Δημιουργήθηκαν επίσης διαγράμματα μερικής εξάρτησης (Σχήμα 3) για την ποσοτικοποίηση της οριακής επίδρασης των τριών σημαντικότερων παραγόντων κινδύνου στην εμφάνιση του ΑΕΕ. Αυτά τα διαγράμματα απεικονίζουν το είδος της σχέσης μεταξύ της εμφάνισης αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου και των παραγόντων κινδύνου (π.χ., μονότονη, γραμμική ή πιο σύνθετη). Στο Σχήμα 3a απεικονίζεται μια γραμμική και θετική σχέση μεταξύ της ηλικίας και της εμφάνισης ΑΕΕ. Παρατηρήθηκε επίσης μια γραμμική αλλά αρνητική σχέση μεταξύ του δείκτη μάζας σώματος (BMI) και της εμφάνισης ΑΕΕ (Σχήμα 3b). Το μέσο επίπεδο γλυκόζης είχε μικρότερη επίδραση, με τις τιμές SHAP να κυμαίνονται στο διάστημα $[-1, 0,75]$, ενώ η συσχέτισή του με την εμφάνιση ΑΕΕ αποκάλυψε μια πιο πολύπλοκη μη γραμμική σχέση (Σχήμα 3c).



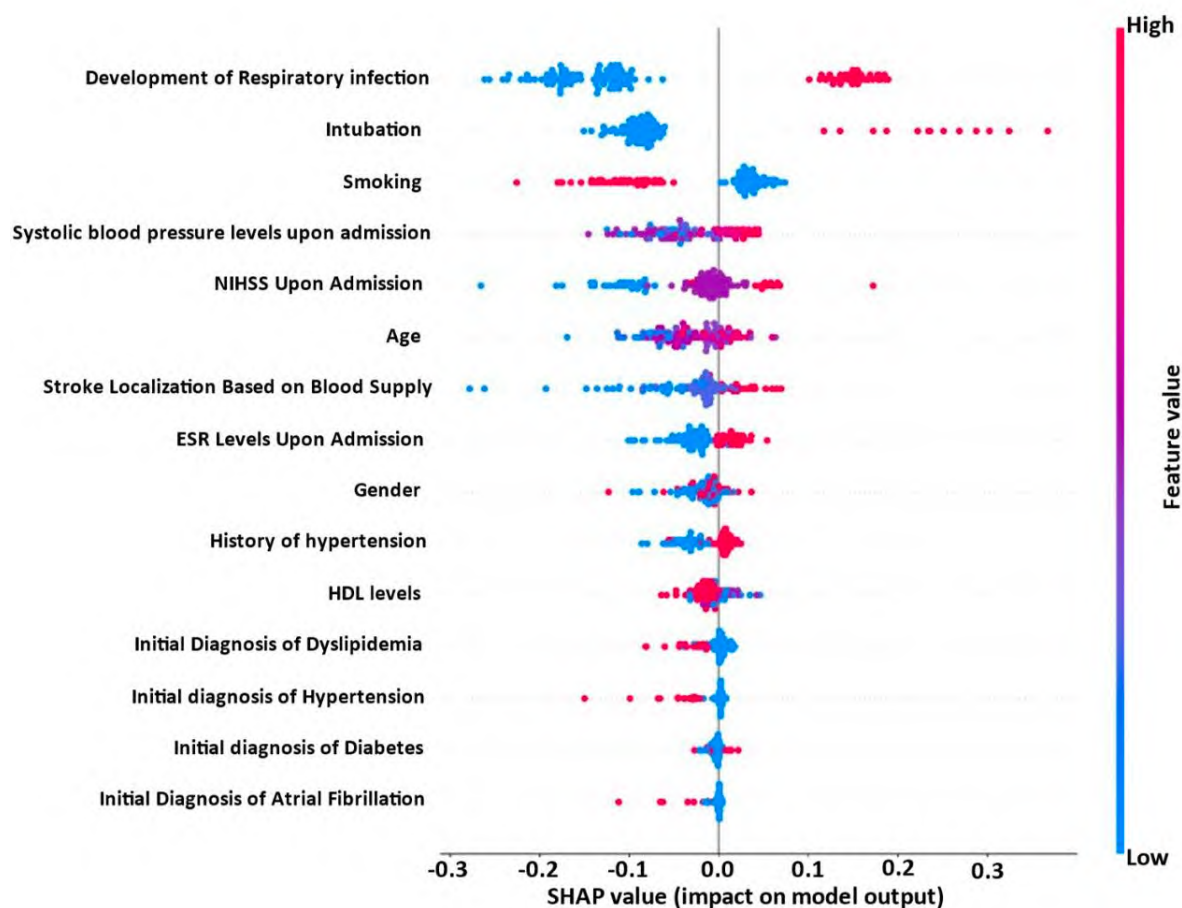
Σχήμα 3. Διαγράμματα εξάρτησης SHAP τριών αντιπροσωπευτικών παραγόντων κινδύνου: (a) ηλικία, (b) ΔΜΣ, (c) μέσο επίπεδο γλυκόζης (Kokkotis et al., 2022).

Πρόγνωση της νευρολογικής κατάστασης στην έξοδο από το νοσοκομείο, με βάση την κατάσταση κατά την εισαγωγή

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η επίδραση των 15 σημαντικότερων βιοδεικτών και παραμέτρων στην έξοδο του καλύτερου μοντέλου μηχανικής μάθησης (Random Forest - RF). Οι επιδραστικότεροι βιοδείκτες και παράμετροι παρουσιάζονται σε φθίνουσα σειρά. Το χρώμα υποδηλώνει το επίπεδο του παράγοντα κινδύνου για κάθε άτομο, με το κόκκινο να δείχνει υψηλή τιμή και το μπλε χαμηλή τιμή. Για παράδειγμα, η εμφάνιση αναπνευστικής λοίμωξης σε ασθενείς μετά από εγκεφαλικό επεισόδιο αποτελεί σημαντικό παράγοντα κινδύνου που συμβάλλει στην επιδείνωση της προόδου της βαθμολογίας NIHSS, ενώ τα υψηλά επίπεδα HDL μειώνουν την πιθανότητα επιδείνωσης της νευρολογικής κατάστασης κατά τη νοσηλεία.

Πιο αναλυτικά, η εκδήλωση αναπνευστικής λοίμωξης (development of respiratory infection) υποδεικνύει μεγαλύτερη πιθανότητα οι ασθενείς να εμφανίσουν επιδεινούμενη βαθμολογία στην κλίμακα NIHSS κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο νοσοκομείο. Επιπλέον, υψηλές τιμές συστολικής αρτηριακής πίεσης κατά την εισαγωγή (systolic blood pressure levels upon admission), η αξιολόγηση NIHSS κατά την εισαγωγή, η ηλικία (age), υψηλή ταχύτητα καθίζησης ερυθρών κατά την εισαγωγή (ESR levels upon admission), καθώς και ιστορικό υπέρτασης (history of hypertension), η διασωλήνωση (intubation) και η εντόπιση του ΑΕΕ (stroke localization based on blood supply) έχουν θετική επίδραση στην επιδείνωση της εξέλιξης της βαθμολογίας NIHSS κατά τη νοσηλεία. Αντίθετα, το κάπνισμα (smoking) και τα επίπεδα HDL (HDL levels) σχετίζονται αρνητικά με την επιδείνωση της βαθμολογίας NIHSS κατά την παραμονή στο νοσοκομείο. Οι υπόλοιποι παράγοντες

όπως οι διαγνώσεις κατά την εισαγωγή για δυσλιπιδαιμία (dyslipidemia), υπέρταση (hypertension), διαβήτη (diabetes) και κοιλική μαρμαρυγή (atrial fibrillation) είχαν ουδέτερη επίδραση.



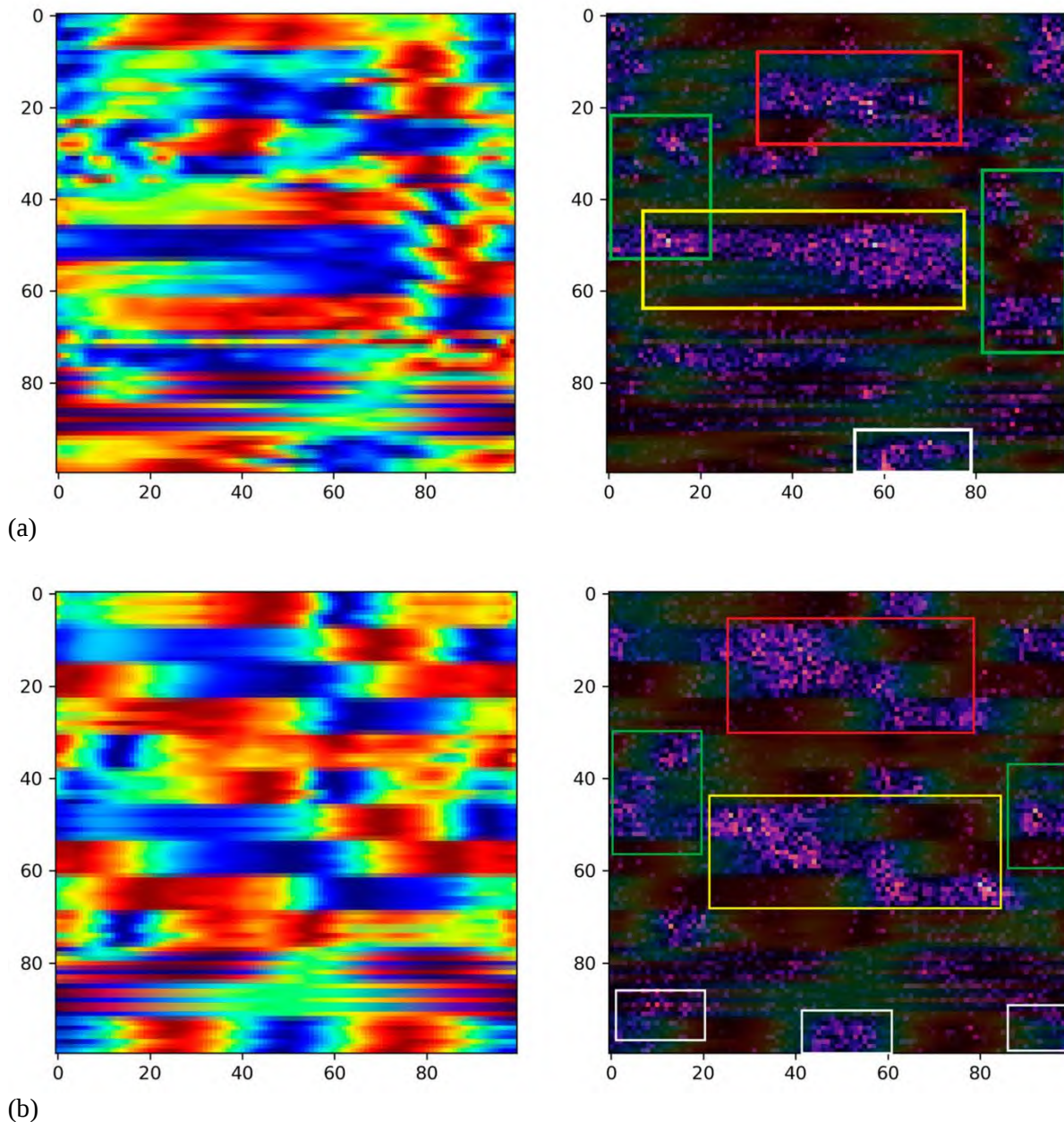
Σχήμα 4. Επίδραση των 15 σημαντικότερων βιοδεικτών και παραμέτρων στην έξοδο του καλύτερου μοντέλου μηχανικής μάθησης (Random Forest - RF) για την πρόγνωση της νευρολογικής κατάστασης κατά την έξοδο από το νοσοκομείο (Gkantzi et al., 2023).

Διάγνωση κινητικών διαταραχών βάδισης

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις χρήσης του αλγόριθμου Grad-CAM, την κύρια καινοτομία της εν λόγω μελέτης, σε εικόνες ατόμου με ΑΕΕ και υγιούς ατόμου. Οι φωτεινές περιοχές δείχνουν πού «κοιτάζει» το μοντέλο για να εξάγει το αντίστοιχο διάγνωση χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, οι Εικόνες 5a και 5b δείχνουν ότι ο αλγόριθμος Grad-CAM εντοπίζει και αναδεικνύει αποτελεσματικά τις διαφοροποιημένες περιοχές μεταξύ ατόμων με και χωρίς ΑΕΕ. Ιδιαίτερα, οι πιο έντονες διαφορές συγκεντρώνονται στα κάτω άκρα, ειδικά στο πάσχον (παρετικό) κάτω άκρο.

Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις έντασης. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελούν οι κινήσεις κάμψης/έκτασης του γόνατος και κάμψης/έκτασης του ισχίου (που σημειώνονται με κόκκινα πλαίσια), οι οποίες εμφανίζουν πιο σταθερές τιμές στα υγιή άτομα, ενώ στα άτομα με ΑΕΕ παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Ένα άλλο παράδειγμα αφορά την απαγωγή/προσαγωγή του ισχίου και την εσωτερική/εξωτερική στροφή του ισχίου (που σημειώνονται με πράσινα πλαίσια). Στα άτομα με ΑΕΕ, η απαγωγή/προσαγωγή του ισχίου ξεκινάει από μηδενική

τιμή, ενώ στα υγιή άτομα διατηρείται σε μη μηδενικές τιμές. Επιπλέον, στις εικόνες Grad-CAM, η κίτρινη επισημασμένη περιοχή δείχνει ενεργοποίηση που σχετίζεται με την κάμψη/έκταση του γόνατος και του ισχίου του μη πάσχοντος κάτω άκρου. Αυτή η ενεργοποίηση υποδεικνύει τις περιοχές ενδιαφέροντος που συμβάλλουν σημαντικά στη διαδικασία λήψης απόφασης του μοντέλου. Τέλος, η παρουσία λευκών πλαισίων υποδηλώνει ότι και η κίνηση του κέντρου μάζας στον κατακόρυφο άξονα διαδραματίζει ρόλο στις αποφάσεις του μοντέλου, όπως αναδεικνύεται από αυτές τις περιοχές (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Grad-CAM σε επιζώντα από AEE (a) και υγιές άτομο (b). Τα πλαίσια επισημαίνουν τα κρίσιμα σημεία σύμφωνα με τον αλγόριθμο Grad-CAM (Apostolidis et al., 2023).

Συζήτηση

Παράγοντες κινδύνου για ΑΕΕ

Οι γιατροί εδώ και δεκαετίες γνωρίζουν ότι ορισμένοι παράγοντες αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο να πάθει κάποιος εγκεφαλικό. Αυτοί οι παράγοντες κινδύνου περιλαμβάνουν την υπέρταση (χρονίως υψηλή πίεση), τον σακχαρώδη διαβήτη, τη χοληστερίνη, το κάπνισμα και την παχυσαρκία, (O'Donnell et al., 2016). Επιπλέον, όσο μεγαλώνουμε, αυξάνεται σημαντικά η πιθανότητα να εμφανίσουμε αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο (Feigin et al., 2021). Έτσι, οι γιατροί συλλέγουν ιατρικό ιστορικό, κάνουν κλινικές εξετάσεις, και συχνά χρησιμοποιούν ειδικές φόρμες ή «πίνακες κινδύνου» για να υπολογίσουν την πιθανότητα ενός ΑΕΕ στα επόμενα χρόνια. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση κινδύνου δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση. Πολλοί άνθρωποι μπορεί να έχουν συνδυασμούς παραγόντων που να μην είναι άμεσα εμφανείς. Για παράδειγμα, ένας μέτρια αυξημένος διαβήτης μαζί με ελαφριά υπέρταση μπορεί να κρύβει μεγαλύτερο κίνδυνο από ό,τι φαινομενικά πιστεύουμε (Mozaffarian et al., 2015). Η τεχνητή νοημοσύνη, με την ανάλυση πολλών διαφορετικών στοιχείων ταυτόχρονα, μπορεί να εντοπίσει κρυμμένα μοτίβα που ξεπερνούν την ανθρώπινη διαίσθηση και εμπειρία όσον αφορά την πρόληψη του ΑΕΕ.

Στο πλαίσιο της πρώτης μελέτης (Kokkotis et al., 2022), αναδείχθηκαν οι παράγοντες κινδύνου που διαμόρφωσαν καθοριστικά την προβλεπτική ικανότητα του βέλτιστου μοντέλου μηχανικής μάθησης. Μέσω της εφαρμογής της μεθοδολογίας SHAP, η ηλικία, ο δείκτης μάζας σώματος (ΔΜΣ) και το μέσο επίπεδο γλυκόζης αναδείχθηκαν ως οι πλέον ισχυροί προγνωστικοί δείκτες κινδύνου για την εμφάνιση αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου (ΑΕΕ). Οι υπόλοιποι παράγοντες κινδύνου παρουσίασαν χαμηλή ή οριακή συμβολή (Σχήμα 2). Η σχετική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει την κεντρική σημασία της ηλικίας ως τον πλέον καθοριστικό μη τροποποιήσιμο παράγοντα κινδύνου για την εκδήλωση ΑΕΕ (Yousufuddin & Young, 2019). Αναπόφευκτα, η γήρανση αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης ΑΕΕ στο μέσο πληθυσμό.

Η σχέση μεταξύ ηλικίας και εμφάνισης αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου (ΑΕΕ) αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης, με την ηλικία να αναγνωρίζεται σταθερά ως ισχυρός μη τροποποιήσιμος παράγοντας κινδύνου (Yousufuddin & Young, 2019). Ωστόσο, η φυσική κατάσταση φαίνεται να παίζει έναν σημαντικό ρόλο στη μετρίαση αυτού του κινδύνου, ιδιαίτερα σε άτομα μεγαλύτερης ηλικίας. Πιο συγκεκριμένα, τα άτομα υψηλής φυσικής κατάστασης (high-fit individuals) φαίνεται να παρουσιάζουν μειωμένο κίνδυνο εμφάνισης εγκεφαλικού σε σύγκριση με συνομηλίκους τους χαμηλής φυσικής κατάστασης (low-fit individuals), και στις μεγαλύτερες ηλικιακές ομάδες. Σε μια πρόσφατη μελέτη διαπιστώθηκε μια σημαντική αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ καρδιοαναπνευστικής ικανότητας και εμφάνισης μη θανατηφόρου ΑΕΕ κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Επίσης βρέθηκε ότι υψηλότερα επίπεδα δύναμης του άνω κορμού θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσφέρουν κάποια προστασία έναντι του κινδύνου για εμφάνιση ΑΕΕ σε άτομα ηλικίας 65 έως 80 ετών (Farrell et al., 2024).

Ο ΔΜΣ αναδείχθηκε ως δεύτερος σε βαρύτητα παράγοντας κινδύνου για ΑΕΕ, εμφανίζοντας μάλιστα αρνητική γραμμική σχέση με την εμφάνιση ενός ΑΕΕ (Σχήμα 3). Παρόλο που ίσως ξενίζει η άποψη ότι ο μεγάλος ΔΜΣ μπορεί να σχετίζεται με μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης ΑΕΕ, αρκετές μελέτες, όπως αυτή των Park και συν. (2019), υποδεικνύουν ότι η παχυσαρκία ενδέχεται να συσχετίζεται με μειωμένο κίνδυνο αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου. Επιπλέον, άλλες μελέτες

υποστηρίζουν ότι άτομα με χαμηλότερο ΔΜΣ εμφανίζουν υψηλότερη θνητότητα μετά από ΑΕΕ συγκριτικά με υπέρβαρα ή παχύσαρκα άτομα (Elagizi et al., 2018).

Επιπλέον, το μέσο επίπεδο γλυκόζης αναγνωρίστηκε ως σημαντικός παράγοντας κινδύνου, σε συμφωνία με άλλες μελέτες που τεκμηριώνουν επίσης τη στενή του σύνδεση με την εμφάνιση ισχαιμικού ΑΕΕ (Zheng et al., 2021). Η υψηλή μέση γλυκόζη λειτουργεί τόσο ως άμεσος επιβαρυντικός παράγοντας για τα εγκεφαλικά αγγεία, όσο και ως ενισχυτής άλλων παραγόντων κινδύνου. Ειδικότερα, η χρόνια υπεργλυκαιμία προκαλεί βλάβη στα ενδοθηλιακά κύτταρα των αγγείων, με αποτέλεσμα την αγγειακή δυσκαμψία και την ευκολότερη δημιουργία αθηρωματικών πλακών, οι οποίες αποτελούν προϋπόθεση για ισχαιμικά εγκεφαλικά επεισόδια. Παράλληλα, η γλυκοζυλίωση των πρωτεϊνών και των λιπιδίων ευνοεί την εναπόθεση λιπιδίων στο ενδοθήλιο και την προσέλκυση φλεγμονωδών κυττάρων. Αυτό επιταχύνει τη δημιουργία αθηρωματικής πλάκας σε αρτηρίες που τροφοδοτούν τον εγκέφαλο (π.χ., καρωτίδες). Επίσης, τα υψηλά επίπεδα γλυκόζης επηρεάζουν αρνητικά τη ρεολογία του αίματος και αυξάνουν την τάση για θρόμβωση, μέσω αυξημένων επιπέδων ινωδογόνου, ενεργοποίησης αιμοπεταλίων και μείωσης της ινωδόλυσης (Ferrari, Moretti & Villa, 2022). Αυτό ενισχύει την πιθανότητα απόφραξης εγκεφαλικών αρτηριών. Επιπρόσθετα, η υπεργλυκαιμία συνδέεται συχνά με παράγοντες όπως μεταβολικό σύνδρομο, υπέρταση και δυσλιπιδαιμία, που με τη σειρά τους ενισχύουν τον καρδιοεγκεφαλικό κίνδυνο (Ferrari, Moretti & Villa, 2022). Αυτή η πολυπαραγοντική επίδραση της υπεργλυκαιμίας εξηγεί γιατί τα μοντέλα μηχανικής μάθησης την αναγνωρίζουν συχνά ως σημαντικό προγνωστικό δείκτη για την εμφάνιση εγκεφαλικού.

Αντιθέτως, το είδος της εργασίας, ο τόπος διαμονής, η υπέρταση, το φύλο και το κάπνισμα παρουσίασαν μικρότερη επίδραση στην εμφάνιση ΑΕΕ στο παρόν μοντέλο. Αναφορικά με αυτούς τους παράγοντες ίσως προκαλεί έκπληξη η χαμηλή σχετική επίδραση στο παρόν μοντέλο της υπέρτασης, η οποία αναγνωρίζεται ως ισχυρός αιτιολογικός παράγοντας ισχαιμικού ΑΕΕ σε πολλές μελέτες (Wajngarten & Silva, 2019). Η πιθανότερη αιτία γι' αυτό είναι η αλληλεξάρτηση με άλλους παράγοντες. Ειδικότερα, η υπέρταση μπορεί να συσχετίζεται έντονα με παράγοντες όπως ηλικία ή ο ΔΜΣ που ήδη συμπεριλήφθηκαν ως σημαντικοί. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο μπορεί να αποδώσει το κύριο βάρος σε αυτούς και όχι στην υπέρταση, λόγω πολυγραμμικότητας, θεωρώντας ότι η υπέρταση "αντιπροσωπεύεται έμμεσα" μέσω της ηλικίας ή του ΔΜΣ.

Πρόγνωση της νευρολογικής κατάστασης στην έξοδο από το νοσοκομείο, με βάση την κατάσταση κατά την εισαγωγή.

Παρά τη διαθεσιμότητα πολυάριθμων θεραπευτικών επιλογών για το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο, είναι συχνό το φαινόμενο οι επιζώντες από ΑΕΕ να αντιμετωπίζουν σημαντικού βαθμού αναπηρία. Η βαρύτητα του αρχικού ΑΕΕ αποτελεί σημαντικό προγνωστικό παράγοντα για τη λειτουργική εξάρτηση και τη θνησιμότητα μετά από ΑΕΕ, αλλά οι τελευταίες επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες. Η συνεκτίμηση όλων των παραγόντων για την βέλτιστη πρόγνωση της εξέλιξης της νευρολογικής κατάστασης του ατόμου με ΑΕΕ μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη εξατομικευμένων προγραμμάτων αποκατάστασης. Ωστόσο, η πρόβλεψη της έκβασης των ασθενών, ιδίως στα πρώιμα στάδια μετά την εισαγωγή, παραμένει ιδιαίτερα απαιτητική (Bacchi et al., 2020).

Στο πλαίσιο της δεύτερης μελέτης (Gkantzi et al., 2023) επιχειρήσαμε την ανάπτυξη ενός εξηγούμενου μοντέλου μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη της εξέλιξης της βαθμολογίας των

ασθενών στην κλίμακα αξιολόγησης της νευρολογικής κατάστασης NIHSS κατά τη διάρκεια της νοσηλείας, ειδικότερα από την εισαγωγή έως το εξιτήριο. Μεταξύ των 15 χαρακτηριστικών με τον υψηλότερο βαθμό πληροφoρίας, αρκετοί παράγοντες εμφάνισαν θετική συσχέτιση με την επιδείνωση της κλινικής σοβαρότητας, όπως αποτυπώνεται από την εξέλιξη της βαθμολογίας στην κλίμακα NIHSS.

Αυτοί οι παράγοντες περιλάμβαναν την εμφάνιση αναπνευστικής λοίμωξης, τα αυξημένα επίπεδα συστολικής αρτηριακής πίεσης κατά την εισαγωγή, τη βαθμολογία NIHSS κατά την εισαγωγή, την προχωρημένη ηλικία, τα αυξημένα επίπεδα ταχύτητας καθίζησης ερυθρών (ΤΚΕ) κατά την εισαγωγή, καθώς και το ιστορικό υπέρτασης, τη διασωλήνωση και τον εντοπισμό του ΑΕΕ. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αντιπροσωπεύουν είτε τη βιολογική βαρύτητα της νόσου (π.χ. ηλικία, υπέρταση, φλεγμονή), είτε τη σοβαρότητα του ΑΕΕ στην έναρξη της οξείας φάσης (π.χ. συστολική πίεση, βαθμολογία NIHSS, λοίμωξη, διασωλήνωση, εντοπισμός βλάβης), εξηγώντας έτσι την θετική τους συσχέτιση με την επιδείνωση της κλινικής εικόνας, όπως αυτή αποτυπώνεται με την εξέλιξη της NIHSS.

Αντίθετα, η κατάσταση καπνίσματος και τα επίπεδα HDL συσχετίστηκαν αρνητικά με την επιδείνωση της κλινικής σοβαρότητας, όπως αποτυπώνεται από την εξέλιξη της NIHSS. Οι πέντε υπόλοιποι παράγοντες, ήτοι το φύλο, η αρχική διάγνωση υπέρτασης, διαβήτη, δυσλιπιδαιμίας και κολπικής μαρμαρυγής, φαίνεται να έχουν ουδέτερη επίδραση στην εξέλιξη της βαθμολογίας στην κλίμακα NIHSS.

Οι λόγοι για τους οποίους ορισμένοι παράγοντες συμβάλλουν στην επιδείνωση της νευρολογικής κατάστασης κατά την οξεία φάση του ΑΕΕ είναι πιθανόν οι εξής:

- *Ηλικία:* Η προχωρημένη ηλικία συνδέεται με μειωμένη νευροπλαστικότητα, επιβαρυνόμενη αγγειακή υγεία και υψηλότερη συχνότητα συνοδών νοσημάτων (π.χ. αθηροσκλήρωση, διαβήτη). Οι ηλικιωμένοι ασθενείς παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα αποκατάστασης μετά από εγκεφαλικό και συχνά μεγαλύτερο όγκο βλάβης και σοβαρότερη λειτουργική επιβάρυνση.
- *Συστολική αρτηριακή πίεση κατά την εισαγωγή:* Η αυξημένη συστολική αρτηριακή πίεση κατά την οξεία φάση του εγκεφαλικού αντανakλά αγγειακή υπερφόρτωση, πιθανή αύξηση της ενδοκράνιας πίεσης ή συνεχιζόμενη ισχαιμική βλάβη. Παράλληλα, η υψηλή πίεση προδιαθέτει σε επέκταση αιματώματος ή εμφάνιση εγκεφαλικού οιδήματος (Pezzini et al., 2010).
- *Βαθμολογία NIHSS κατά την εισαγωγή:* Υψηλή βαθμολογία NIHSS στην εισαγωγή υποδηλώνει σοβαρότερη αρχική νευρολογική βλάβη και εκτενέστερη εγκεφαλική προσβολή. Οι σοβαρές αρχικές βλάβες συνδέονται με χειρότερη πρόγνωση, περισσότερες επιπλοκές και μειωμένο δυναμικό ανάνηψης.
- *Ταχύτητα καθίζησης ερυθρών (ΤΚΕ) κατά την εισαγωγή:* Η αυξημένη ΤΚΕ αποτελεί δείκτη συστηματικής φλεγμονής. Μετά από εγκεφαλικό, η φλεγμονώδης απόκριση επιδεινώνει τη δευτερογενή εγκεφαλική βλάβη, προκαλώντας αγγειακή δυσλειτουργία και διαταραχή του αιματοεγκεφαλικού φραγμού (Chamorro, 2004).
- *Εμφάνιση αναπνευστικής λοίμωξης:* Οι λοιμώξεις του αναπνευστικού συστήματος, ιδιαίτερα η πνευμονία μετά από εγκεφαλικό, είναι από τις συχνότερες επιπλοκές και συνδέονται με

αυξημένη θνησιμότητα και σοβαρή λειτουργική επιδείνωση. Οι λοιμώξεις επιφέρουν συστηματική φλεγμονή, υποξία και ανάγκη για εντατική υποστήριξη (Vermeij et al., 2009).

- *Ιστορικό υπέρτασης*: Η χρόνια υπέρταση προκαλεί αγγειακές αλλοιώσεις, μικροαγγειοπάθεια και δυσλειτουργία της αυτορρύθμισης της εγκεφαλικής αιμάτωσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά αυξάνουν την έκταση της βλάβης και δυσχεραίνουν την ανάνηψη μετά από εγκεφαλικό (Jamrozik, 2002).
- *Διασωλήνωση (ανάγκη μηχανικής υποστήριξης αναπνοής)*: Η ανάγκη για διασωλήνωση υποδηλώνει σοβαρή νευρολογική επιδείνωση (π.χ. διαταραχή επιπέδου συνείδησης, αναπνευστική ανεπάρκεια). Συνήθως υποδηλώνει μεγάλης έκτασης βλάβη ή προσβολή κρίσιμων εγκεφαλικών περιοχών, όπως ο προμήκης μυελός (Robba et al., 2019).
- *Εντοπισμός του ΑΕΕ*: Ο εντοπισμός του ΑΕΕ επηρεάζει καθοριστικά τη βαρύτητα της κλινικής εικόνας. Βλάβες στο κυρίαρχο ημισφαίριο, στον εγκέφαλο ή σε μεγάλες αγγειακές περιοχές (π.χ. μέση εγκεφαλική αρτηρία, βασική αρτηρία) οδηγούν σε πιο σοβαρά και μόνιμα νευρολογικά ελλείμματα (Cheng et al., 2014).

Επιπλέον, οι λόγοι για τους οποίους ορισμένοι παράγοντες συμβάλλουν αρνητικά στην επιδείνωση της νευρολογικής κατάστασης στην οξεία φάση του ΑΕΕ, υποδηλώνοντας μια υποθετική προστατευτική δράση είναι:

- *Κατάσταση καπνίσματος*: Αν και το κάπνισμα αποτελεί αναγνωρισμένο παράγοντα κινδύνου για την εμφάνιση ΑΕΕ, ορισμένες μελέτες έχουν παρατηρήσει το φαινόμενο που αποκαλείται "παράδοξο του καπνιστή" (smoker's paradox). Συγκεκριμένα, μεταξύ ατόμων που υπέστησαν ΑΕΕ, οι καπνιστές φαίνεται να παρουσιάζουν μικρότερη έκταση ισχαιμικής βλάβης και καλύτερη ανταπόκριση σε θρομβολυτική θεραπεία. Οι μηχανισμοί πίσω από αυτό δεν είναι πλήρως κατανοητοί, αλλά πιθανολογείται ότι σχετίζονται με διαφορετικό προφίλ θρόμβων (πιο μικροί ή πιο ευδιάλυτοι) ή διαφορετική αγγειακή αντίδραση στη θεραπεία. Έτσι, σε επιλεγμένα περιστατικά, η κατάσταση καπνίσματος μπορεί να συνδέεται με ηπιότερη επιδείνωση της νευρολογικής κατάστασης, αν και δεν παύει να αποτελεί παράγοντα κινδύνου για το αρχικό συμβάν (Ali et al., 2013).
- *Επίπεδα HDL χοληστερόλης*: Η HDL ("καλή" χοληστερόλη) έχει γνωστές αντιφλεγμονώδεις, αντιοξειδωτικές και αντιαθηρογόνες ιδιότητες. Υψηλότερα επίπεδα HDL προστατεύουν το ενδοθήλιο, εμποδίζουν τον σχηματισμό αθηρωματικών πλακών και προάγουν τη σταθερότητα των υπαρχουσών πλακών. Επιπλέον, η HDL συμβάλλει στην αναστολή της συσσώρευσης αιμοπεταλίων και στη βελτίωση της μικροκυκλοφορίας. Συνεπώς, τα αυξημένα επίπεδα HDL μπορούν να περιορίσουν τη σοβαρότητα της ισχαιμικής βλάβης και να διευκολύνουν την αποκατάσταση, οδηγώντας σε μικρότερη επιδείνωση της NIHSS κατά τη διάρκεια της νοσηλείας (Yaghi & Elkind, 2015).

Διάγνωση κινητικών διαταραχών βάδισης

Το ΑΕΕ μπορεί να επηρεάσει τα κέντρα ελέγχου της κίνησης στον εγκέφαλο, οδηγώντας σε αδυναμία, αδεξιότητα ή δυσκαμψία. Πολλοί επιζώντες μετά από ΑΕΕ παρουσιάζουν προβλήματα βάδισης («σέρνουν» το ένα πόδι, περπατούν αργά ή/και ακανόνιστα) ή έχουν αστάθεια. Αυτές οι διαταραχές οφείλονται κυρίως στη μυϊκή αδυναμία, την απώλεια αίσθησης, ή στη δυσκολία του εγκεφάλου να συντονίσει σωστά την κίνηση. Η αδυναμία στην μία πλευρά του σώματος (ημιπληγία) είναι μία από τις πιο συχνές αιτίες των διαταραχών βάδισης (Balaban & Tok, 2014). Εξαιτίας αυτής

της ανισορροπίας, πολλοί ασθενείς αναπτύσσουν αντισταθμιστικές κινήσεις, δηλαδή αλλάζουν τον τρόπο που περπατούν για να διατηρήσουν την ισορροπία τους. Αυτές οι αλλαγές όμως μπορεί να προκαλέσουν περαιτέρω προβλήματα, όπως πόνο στις αρθρώσεις ή αυξημένο κίνδυνο πτώσεων. Γι' αυτό η αξιολόγηση του τρόπου βάδισης είναι κρίσιμη στην αποκατάσταση του εγκεφαλικού.

Η σύγχρονη τεχνολογία μας δίνει τη δυνατότητα να καταγράφουμε λεπτομερώς το πώς κινείται το σώμα ενός ανθρώπου κατά το περπάτημα. Με τη βοήθεια ειδικών αισθητήρων ή καμερών ανάλυσης κίνησης (motion capture), μπορούμε να παρακολουθούμε την κίνηση κάθε άρθρωσης — από την ποδοκνημική και το γόνατο έως το ισχίο και τον κορμό (Mohan et al., 2021). Αυτά τα δεδομένα είναι εξαιρετικά πολύτιμα, γιατί μας δείχνουν με ακρίβεια πού υπάρχει πρόβλημα, ποια μέρη του σώματος εργάζονται περισσότερο ή λιγότερο και πώς αλλάζει η ισορροπία κατά τη βάδιση. Με τις νέες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, μπορούμε πλέον να μετατρέψουμε αυτά τα δεδομένα κίνησης σε εικόνες, τις οποίες τα έξυπνα συστήματα αναλύουν για να αναγνωρίσουν κρυφά σημάδια εγκεφαλικού. Η τεχνική αυτή έχει μεγάλη δυναμική, ειδικά για την ταχύτερη διάγνωση ή για την παρακολούθηση της προόδου στην αποκατάσταση. Ακόμη και μικρές διαφορές στο πώς κινείται το ένα πόδι σε σχέση με το άλλο μπορούν να εντοπιστούν έγκαιρα, επιτρέποντας έτσι πιο στοχευμένες και αποτελεσματικές θεραπείες (Buckley et al., 2019).

Στην τρίτη μελέτη (Apostolidis et al., 2023) λοιπόν, παρουσιάσαμε μία νέα υβριδική μεθοδολογία που συνδυάζει τη μετατροπή εμβιομηχανικών χρονοσειρών σε οπτικές αναπαραστάσεις με την επεξηγήσιμη μηχανική μάθηση για την υποστήριξη της διάγνωσης των διαταραχών της βάδισης σε άτομα με ΑΕΕ. Στόχος μας ήταν να αντιμετωπίσουμε δύο βασικές προκλήσεις: (i) τη περιορισμένη διαθεσιμότητα μεγάλων συνόλων δεδομένων σε προκαταρκτικές κλινικές μελέτες και (ii) την ανάγκη για ερμηνεύσιμα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης που να υποβοηθούν τη λήψη κλινικών αποφάσεων. Ο παραγόμενος αλγόριθμος πέτυχε εξαιρετική απόδοση ταξινόμησης, με ακρίβεια 100% σε όλα τα μοντέλα. Το εντυπωσιακό αυτό αποτέλεσμα αποδίδεται κυρίως στην καινοτόμο μετατροπή των εμβιομηχανικών σημάτων σε οπτικές μορφές πληροφορίας, και όχι στην πολυπλοκότητα των ίδιων των ταξινομητών.

Η ανάλυση μέσω της τεχνικής Grad-CAM ανέδειξε αρκετές βασικές εμβιομηχανικές παραμέτρους ως σημαντικές για τις προβλέψεις του μοντέλου. Αυτές περιλαμβάνουν την πελματιαία/ραχιαία κάμψη της ποδοκνημικής, την κάμψη/έκταση του γονάτου και την κάμψη/έκταση του ισχίου και στα δύο κάτω άκρα (παρετικό και μη παρετικό). Επιπλέον, η απαγωγή/προσαγωγή του ισχίου και η έσω/έξω στροφή του ισχίου, ειδικά στο παρετικό κάτω άκρο, καθώς και οι μεταβολές στη θέση του κέντρου μάζας στον κατακόρυφο άξονα αναδείχθηκαν ως καθοριστικοί παράγοντες στη λήψη απόφασης του μοντέλου. Εντοπίστηκαν, επίσης, σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των ατόμων με ΑΕΕ και υγιών συμμετεχόντων στα κινητικά μοτίβα κατά τη φάση της αιώρησης στη βάδιση, γεγονός που υποδεικνύει τη μεγάλη ευαισθησία της συγκεκριμένης φάσης στις κινητικές διαταραχές.

Οι διαταραχές στην πελματιαία/ραχιαία κάμψη της ποδοκνημικής, στην κάμψη/έκταση του γονάτου και του ισχίου μπορεί να διαταράξουν σοβαρά τον κύκλο της βάδισης, μειώνοντας τον συντονισμό και την κινητικότητα και προκαλώντας αντισταθμιστικές στρατηγικές. Η απαγωγή και προσαγωγή του ισχίου είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της πλάγιας σταθερότητας κατά τη βάδιση, και οι διαταραχές σε αυτές τις κινήσεις μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ισορροπία και τη συμμετρία. Παρόμοια, οι περιορισμοί στην έσω και έξω στροφή του ισχίου υποδεικνύουν

ελλείμματα στον μυϊκό έλεγχο ή δυσκαμψία της άρθρωσης. Επιπλέον, η συμμετοχή του κέντρου μάζας, ειδικά στον κάθετο άξονα, αντικατοπτρίζει προβλήματα ισορροπίας και κατανομής βάρους.

Οι επιζώντες από ΑΕΕ συχνά εμφανίζουν διαταραχές στην ικανότητα στήριξης και στον έλεγχο της στάσης του σώματος, επηρεάζοντας το συνολικό πρότυπο της βάδισης. Η φάση της αιώρησης, η οποία απαιτεί ακριβή ακολουθία κινήσεων και μυϊκής σύσπασης για την ανύψωση και προώθηση του άκρου, φάνηκε ιδιαίτερα ευαίσθητη στις κινητικές ανεπάρκειες μετά από ΑΕΕ. Οι μεταβολές στα κινητικά μοτίβα σε αυτή τη φάση πιθανώς αντικατοπτρίζουν προσαρμοστικούς μηχανισμούς αντιστάθμισης λόγω αδυναμίας ή διαταραχής του κινητικού ελέγχου (Knarr et al., 2013).

Η αναγνώριση αυτών των κρίσιμων εμβιομηχανικών παραμέτρων αναδεικνύει βασικές περιοχές δυσλειτουργίας στη βάδιση μετά από αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο και παρέχει στους κλινικούς ιατρούς πιο σαφή κατανόηση των υποκείμενων κινητικών διαταραχών. Μέσω της αξιοποίησης αυτών των ευρημάτων, μπορούν να αναπτυχθούν εξατομικευμένες στρατηγικές αποκατάστασης που στοχεύουν συγκεκριμένα ελλείμματα, βελτιώνοντας το πρότυπο βάδισης, τη λειτουργικότητα και τη συνολική ποιότητα ζωής των ασθενών μετά από αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο.

Συμπεράσματα

Η παρούσα σύνοψη ερευνών επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση και σύνθεση ευρημάτων από τρεις πρόσφατες μελέτες που αξιοποιούν προηγμένες τεχνικές μηχανικής μάθησης και εξηγήσιμης τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη της έκβασης ασθενών με αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο και τη διάγνωση κινητικών διαταραχών. Παρά τις διαφορετικές προσεγγίσεις – από την πρόβλεψη της λειτουργικής ανάνηψης μέσω βιοδεικτών, μέχρι την ανάλυση της εξέλιξης της νευρολογικής σοβαρότητας και τη χρήση οπτικοποιημένων εμβιομηχανικών δεδομένων βάδισης – οι μελέτες καταδεικνύουν τη μεγάλη προγνωστική αξία της εξηγήσιμης τεχνικής νοημοσύνης στην κλινική πράξη.

Τα βασικά συμπεράσματα όπως προέκυψαν από τις τρεις μελέτες είναι:

- Η εξηγήσιμη τεχνητή νοημοσύνη ανέδειξε την ηλικία, τον δείκτη μάζας σώματος και το μέσο επίπεδο γλυκόζης ως τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου για την εμφάνιση αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου.
- Τα εξηγήσιμα μοντέλα μηχανικής μάθησης βασισμένα σε πρώιμα κλινικά και βιοχημικά δεδομένα μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τη λειτουργική έκβαση επιζώντων εγκεφαλικού κατά την έξοδο από το νοσοκομείο, επιτρέποντας πιο εξατομικευμένες στρατηγικές αποκατάστασης.
- Η οπτικοποίηση εμβιομηχανικών δεδομένων βάδισης σε συνδυασμό με εξηγήσιμη μηχανική μάθηση παρέχει μια ισχυρή και διαφανή μέθοδο για την ακριβή διάγνωση κινητικών διαταραχών μετά από αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο.

Τα συμπεράσματα αυτά ενισχύουν την ανάγκη για ανάπτυξη επικυρωμένων, αξιόπιστων και διαφανών αλγορίθμων που μπορούν να ενισχύσουν την έγκαιρη λήψη κλινικών αποφάσεων και να προωθήσουν εξατομικευμένες στρατηγικές αποκατάστασης. Η ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων προϋποθέτει την υλοποίηση παρόμοιων ερευνών με τις τρεις που αναφέρονται στο εν λόγω άρθρο, σε μεγαλύτερο αριθμό ασθενών και επιζώντων μετά από ΑΕΕ και ενδεχομένως με τη χρήση περισσότερων κλινικών και κυρίως εργαστηριακών παραμέτρων.

Βιβλιογραφία

- Ali, S.F., Smith, E.E., Bhatt, D.L., Fonarow, G.C., & Schwamm, L.H. (2013). Paradoxical Association of Smoking with In-Hospital Mortality Among Patients Admitted with Acute Ischemic Stroke. *Journal of the American Heart Association*, 2, e000171.
- Apostolidis, K., Kokkotis, C., Karakasis, E., Karampina, E., Moustakidis, S., Menychtas, D., Giarmatzis, G., Tsiptsios, D., Vadikolias, K., & Aggelousis, N. (2023). Innovative Visualization Approach for Biomechanical Time Series in Stroke Diagnosis Using Explainable Machine Learning Methods: A Proof-of-Concept Study. *Information*, 14(10), 559.
- Bacchi, S., Oakden-Rayner, L., Menon, D.K., Jannes, J., Kleinig, T., & Koblar, S. (2020). Stroke prognostication for discharge planning with machine learning: A derivation study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 79, 100–103.
- Balaban, B. & Tok, F. (2014). Gait Disturbances in Patients with Stroke. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 6, 635–642.
- Buckley, C., Alcock, L., McArdle, R., Rehman, R.Z.U., Del Din, S., Mazzà, C., Yarnall, A.J., & Rochester, L. (2019). The Role of Movement Analysis in Diagnosing and Monitoring Neurodegenerative Conditions: Insights from Gait and Postural Control. *Brain Sciences*, 9, 34.
- Chamorro, Á. (2004). Role of Inflammation in Stroke and Atherothrombosis. *Cerebrovascular Diseases*, 17, 1–5.
- Cheng, B., Forkert, N.D., Zavaglia, M., Hilgetag, C.C., Golsari, A., Siemonsen, S., Fiehler, J., Pedraza, S., Puig, J., & Cho, T.-H. (2014). Influence of Stroke Infarct Location on Functional Outcome Measured by the Modified Rankin Scale. *Stroke*, 45, 1695–1702.
- Elagizi, A., Kachur, S., Lavie, C.J., Carbone, S., Pandey, A., Ortega, F.B., & Milani, R.V. (2018). An Overview and Update on Obesity and the Obesity Paradox in Cardiovascular Diseases. *Prog. Cardiovascular Diseases*, 61, 142–150.
- Farrell, S.W., Leonard, D., Li, Q., Barlow, C.E., Shuval, K., Berry, J.D., Pavlovic, A., & DeFina, L.F. (2024). Association between baseline levels of muscular strength and risk of stroke in later life: The Cooper Center Longitudinal Study. *Journal of Sport Health Science*, 13(5), 642–649.
- Feigin, V.L., & GBD 2019 Stroke Collaborators. (2021). Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Neurology*, 20(10), 795–820.
- Ferrari, F., Moretti, A., & Villa, R.F. (2022). Hyperglycemia in acute ischemic stroke: physiopathological and therapeutic complexity. *Neural Regeneration Research*, 17(2), 292–299.
- Gkantzi, A., Kokkotis, C., Tsiptsios, D., Moustakidis, S., Gkartzonika, E., Avramidis, T., Tripsianis, G., Iliopoulos, I., Aggelousis, N., & Vadikolias, K. (2023). From Admission to Discharge: Predicting National Institutes of Health Stroke Scale Progression in Stroke Patients Using Biomarkers and Explainable Machine Learning. *Journal of Personalized Medicine*, 13(9), 1375.
- Hankey, G.J. (2017). Stroke. *Lancet*, 389(10069), 641–654.
- Jamrozik, K. (2002). Age-specific relevance of usual blood pressure to vascular mortality: A meta-analysis of individual data for one million adults in 61 prospective studies. *Lancet*, 360, 1903–1913.

- Knarr, B.A., Reisman, D.S., Binder-Macleod, S.A., & Higginson, J.S. (2013). Understanding Compensatory Strategies for Muscle Weakness during Gait by Simulating Activation Deficits Seen Post-Stroke. *Gait & Posture*, 38, 270–275.
- Kokkotis, C., Giarmatzis, G., Giannakou, E., Moustakidis, S., Tsatalas, T., Tsiptsios, D., Vadikolias, K., & Aggelousis, N. (2022). An Explainable Machine Learning Pipeline for Stroke Prediction on Imbalanced Data. *Diagnostics*, 12(10), 2392.
- Lundberg, S.M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J.M., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N., & Lee, S.I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence*, 2, 56–67.
- Mohan, D.M., Khandoker, A.H., Wasti, S.A., Ismail Ibrahim Ismail Alali, S., Jelinek, H.F., & Khalaf, K. (2021). Assessment Methods of Post-Stroke Gait: A Scoping Review of Technology-Driven Approaches to Gait Characterization and Analysis. *Frontiers in Neurology*, 12, 650024.
- Mozaffarian, D., Benjamin, E.J., Go, A.S., Arnett, D.K., Blaha, M.J., Cushman, M., de Ferranti, S., Després, J.P., Fullerton, H.J., Howard, V.J., Huffman, M.D., Judd, S.E., Kissela, B.M., Lackland, D.T., Lichtman, J.H., Lisabeth, L.D., Liu, S., Mackey, R.H., Matchar, D.B., McGuire, D.K., Mohler, E.R. 3rd, Moy, C.S., Muntner, P., Mussolino, M.E., Nasir, K., Neumar, R.W., Nichol, G., Palaniappan, L., Pandey, D.K., Reeves, M.J., Rodriguez, C.J., Sorlie, P.D., Stein, J., Towfighi, A., Turan, T.N., Virani, S.S., Willey, J.Z., Woo, D., Yeh, R.W., Turner, M.B., & American Heart Association Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee. (2015). Heart disease and stroke statistics--2015 update: a report from the American Heart Association. *Circulation*, 131(4), e29-322. Erratum (2015) in: *Circulation*, 131(24), e535. Erratum (2016) in: *Circulation*, 133(8), e417.
- O'Donnell, M.J., Chin, S.L., Rangarajan, S., Xavier, D., Liu, L., Zhang, H., Rao-Melacini, P., Zhang, X., Pais, P., Agapay, S., Lopez-Jaramillo, P., Damasceno, A., Langhorne, P., McQueen, M.J., Rosengren, A., Dehghan, M., Hankey, G.J., Dans, A.L., Elsayed, A., Avezum, A., Mondo, C., Diener, H.C., Ryglewicz, D., Czlonkowska, A., Pogosova, N., Weimar, C., Iqbal, R., Diaz, R., Yusuf, K., Yusufali, A., Oguz, A., Wang, X., Penaherrera, E., Lanus, F., Ogah, O.S., Ogunniyi, A., Iversen, H.K., Malaga, G., Rumboldt, Z., Oveisgharan, S., Al Hussain, F., Magazi, D., Nilanont, Y., Ferguson, J., Pare, G., Yusuf, S., & INTERSTROKE investigators. (2016). Global and regional effects of potentially modifiable risk factors associated with acute stroke in 32 countries (INTERSTROKE): a case-control study. *Lancet*, 388(10046), 761-75.
- Park, H., Lee, H.W., Yoo, J., Lee, H.S., Nam, H.S., Kim, Y.D., & Heo, J.H. (2019). Body Mass Index and Prognosis in Ischemic Stroke Patients with Type 2 Diabetes Mellitus. *Frontiers in Neurology*, 10, 563.
- Pezzini, A., Grassi, M., Del Zotto, E., Volonghi, I., Giossi, A., Costa, P., Cappellari, M., Magoni, M., & Padovani, A. (2010). Influence of acute blood pressure on short- and mid-term outcome of ischemic and hemorrhagic stroke. *Journal of Neurology*, 258, 634–640.
- Powers, W.J., Rabinstein, A.A., Ackerson, T., Adeoye, O.M., Bambakidis, N.C., Becker, K., Biller, J., Brown, M., Demaerschalk, B.M., Hoh, B., Jauch, E.C., Kidwell, C.S., Leslie-Mazwi, T.M., Ovbiagele, B., Scott, P.A., Sheth, K.N., Southerland, A.M., Summers, D.V., Tirschwell, D.L., & American Heart Association Stroke Council. (2018). Guidelines for the Early Management of Patients with Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, 49(3), e46-e110.

- Robba, C., Bonatti, G., Battaglini, D., Rocco, P.R.M., & Pelosi, P. (2019). Mechanical ventilation in patients with acute ischaemic stroke: From pathophysiology to clinical practice. *Critical Care*, 23, 388.
- Saver, J.L. (2006). Time is brain quantified. *Stroke*, 37(1), 263-266.
- Steyerberg, E.W., Vickers, A.J., Cook, N.R., Gerds, T., Gonen, M., Obuchowski, N., Pencina, M.J., & Kattan, M.W. (2010). Assessing the performance of prediction models: a framework for traditional and novel measures. *Epidemiology*, 21(1), 128-38.
- Teasell, R., Salbach, N.M., Foley, N., Mountain, A., Cameron, J.I., Jong, A., Acerra, N.E., Bastasi, D., Carter, S.L., Fung, J., Halabi, M.L., Iruthayarajah, J., Harris, J., Kim, E., Noland, A., Pooyania, S., Rochette, A., Stack, B.D., Symcox, E., Timpson, D., Varghese, S., Verrilli, S., Gubitz, G., Casaubon, L.K., Dowlatshahi, D., & Lindsay, M.P. (2019). Canadian Stroke Best Practice Recommendations: Rehabilitation, Recovery, and Community Participation following Stroke. Part One: Rehabilitation and Recovery Following Stroke; 6th Edition Update 2019. *International Journal of Stroke*, 15(7), 763-788.
- Topol, E.J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25, 44–56 (2019).
- Vermeij, F.H., Reimer, W.J.S.O., de Man, P., van Oostenbrugge, R.J., Franke, C.L., de Jong, G., de Kort, P.L., & Dippel, D.W. (2009). Stroke-Associated Infection Is an Independent Risk Factor for Poor Outcome after Acute Ischemic Stroke: Data from the Netherlands Stroke Survey. *Cerebrovascular Diseases*, 27, 465–471.
- Wajngarten, M., & Silva, G.S. (2019). Hypertension and Stroke: Update on Treatment. *European Cardiology Reviews*, 14, 111–115.
- Yaghi, S. & Elkind, M.S. (2015). Lipids and Cerebrovascular Disease. *Stroke*, 46, 3322–3328.
- Yousufuddin, M. & Young, N. (2019). Aging and ischemic stroke. *Aging*, 11, 2542–2544.
- Zheng, L., Wen, L., Lei, W., & Ning, Z. (2021). Added value of systemic inflammation markers in predicting pulmonary infection in stroke patients: A retrospective study by machine learning analysis. *Medicine*, 100, e28439.



Enhancing the diagnosis and prognosis of stroke through explainable artificial intelligence: A multimodal approach

Aggelousis Nikolaos, Kokkotis Christos, Giannakou Erasmia, Giarmatzis Georgios, Karampina Evangelia, Gkrekidis Athanasios

Democritus University of Thrace, Department of Physical Education and Sport Science

ABSTRACT

Stroke is one of the leading causes of disability and death worldwide. Accurate prediction of recovery (prognosis) and timely selection of optimal interventions for more effective motor rehabilitation are critical elements in improving patients' quality of life. This article presents novel approaches that combine Artificial Intelligence (AI) with clinical and laboratory assessments to enhance the care of individuals with stroke. We explain how AI systems can predict stroke occurrence and assess potential recovery trajectories based on biomarkers, clinical data, and biomechanical gait parameters, which serve as early indicators of motor impairment. Special emphasis is placed on the importance of "explainable" artificial intelligence, which makes the decisions of computational systems understandable to professionals, patients, and caregivers. With the proper use of these new tools, a promising outlook emerges for more personalized, and effective post-stroke care. The article is based on a series of published studies conducted by the Biomechanics Division of the Laboratory of Physical Education and Sport at the Department of Physical Education and Sport Science of Democritus University of Thrace, in collaboration with the Laboratory of Clinical Neurophysiology of the Medical School of Democritus University of Thrace.

Key words: motor impairment rehabilitation, artificial intelligence in health, personalized medical care, innovation in healthcare

Corresponding address:

Aggelousis Nikolaos
Democritus University of Thrace
Department of Physical Education and Sport Sciences
University Campus, 69100 Komotini

E-mail:

nagelous@phyed.duth.gr