

## پیش بینی پاسخ به درمان در نارساخوانی با استفاده از شبکه های عصبی گرافی و داده های اتصال پذیری مغز

محمد امین جاودان فر

دانشجوی دکتری روانشناسی شناختی، پژوهشکده علوم شناختی و مغز، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
[m\\_javedanfar@sbu.ac.ir](mailto:m_javedanfar@sbu.ac.ir)

مهدی صادقی

دانشجوی کارشناسی آموزش ابتدایی، گروه آموزش علوم تربیتی، دانشگاه فرهنگیان شهید باهنر، اصفهان، ایران.  
[mahdi.sadeghi.8.2007@gmail.com](mailto:mahdi.sadeghi.8.2007@gmail.com)

### چکیده

نارساخوانی به عنوان یک اختلال عصبی-رشدی پیچیده، نیاز مبرمی به راهبردهای مداخله ای شخصی سازی شده دارد. با ظهور روش های پیشرفته تصویربرداری مغزی و مدل های محاسباتی، این امکان فراهم شده است. این مرور نظام مند با هدف ارزیابی کاربرد شبکه های عصبی گرافی در پیش بینی پاسخ به درمان نارساخوانی، با تمرکز بر مداخلات واج شناختی و دیداری-فضایی، انجام شد. با پیروی از دستورالعمل های مرور نظام مند، جستجوی جامعی در پایگاه های علمی برای مطالعات منتشر شده بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ انجام گرفت. معیارهای شمول، بر مطالعاتی تمرکز داشت که از شبکه های عصبی گرافی، یادگیری ماشین یا تحلیل شبکه ای بر داده های عصبی (مانند EEG، fMRI) برای پیش بینی پیامد مداخلات نارساخوانی استفاده کرده بودند. در نهایت ۴۷ مطالعه مرتبط برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. یافته ها نشان داد که شبکه های عصبی گرافی با مدل سازی توپولوژی پیچیده شبکه های مغزی، قابلیت افزایش دقت پیش بینی پیامدهای رفتاری را دارند. اگرچه مداخلات واج شناختی کماکان محور اصلی پژوهش ها هستند، شواهد فزاینده ای از اثربخشی مداخلات دیداری-فضایی و رویکردهای ترکیبی چندوجهی حمایت می کنند. با این حال، حوزه پیش بینی پاسخ به درمان با چالش های عمده ای مواجه است، از جمله حجم کوچک و ناهمگون نمونه ها، فقدان مجموعه داده های طولی چندوجهی استاندارد، ادغام ناکافی داده های عصبی، رفتاری و ژنتیکی در معماری های پیش بینی کننده، و نبود پروتکل های مداخله ای یکسان. جهت های پژوهشی آینده باید بر ایجاد بانک های داده چندمرکزی و چندوجهی، توسعه معماری های پیش بینی کننده اختصاصی شده برای انواع مداخلات، اجرای کارآزمایی های طولی با طراحی های پیش بینی-محور، و توجه به جنبه های تفسیرپذیری مدل متمرکز شود. این تلاش های هماهنگ می تواند زمینه ساز ظهور پارادایم های درمانی دقیق و مبتنی بر پروفایل عصبی-شناختی منحصر به فرد هر فرد باشد.

**واژگان کلیدی:** اتصال پذیری مغز، پیش بینی پاسخ به درمان، شبکه های عصبی گرافی، مداخله واج شناختی، نارساخوانی

## مقدمه

مطالعه در رابطه با پیش‌بینی پاسخ به درمان نارساخوانی با کمک شبکه‌های عصبی گرافی<sup>۱</sup> (GNN) اعمال شده روی داده‌های اتصال‌پذیری مغز، یک موضوع تحقیقاتی بسیار جدید و حیاتی نوظهور است. این اهمیت برگرفته از پیچیدگی مبانی عصبی - زیستی نارساخوانی و نیاز مبرم به‌کارگیری راهبردهای مداخله‌ای شخصی‌سازی‌شده برای پاسخ‌دهی بهتر به تفاوت‌های فردی است (Wen et al, 2024; Turker et al, 2023a). پیشرفت‌های اخیر در چند سال گذشته در زمینه تصویربرداری عصبی<sup>۲</sup> و یادگیری ماشین<sup>۳</sup>، مدل‌سازی دقیق‌تر از ساختارهای اتصال فردی مغز را ممکن ساخته است. اولین مطالعات بیشتر در رابطه با ویژگی‌های ساختاری و عملکردی مغز بودند که برای سنجش توانایی خواندن افراد به تحقیق در رابطه با این دو ویژگی می‌پرداختند (Beyer et al, 2022; Alkhurayyif and Sait, 2024). محققان به کمک یکپارچه‌سازی GNNها (که یک تکامل روش‌شناختی است) داده‌های گرافی، تعاملات سلسله‌مراتبی و در سطح شبکه مغزی را ثبت کردند که در ارتباط با نارساخوانی بود (Wen et al, 2024). تقریباً ۱۷-۵٪ از کودکان جهان درگیر نارساخوانی هستند که آن‌ها را با چالش‌های تحصیلی و روانی-اجتماعی مهمی درگیر می‌کند (Turker et al, 2023a; Kothapalli et al, 2024). لذا پیشرفت در تکنولوژی‌های پیش‌بینی ناتوانی و همچنین بهبود اثربخشی درمان، از اهمیت اجتماعی و بالینی بالایی برخوردار است (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025).

با وجود پیشرفت‌های علمی، پیش‌بینی دقیق پاسخ به درمان برای مداخلات نارساخوانی، به خصوص آموزش واج‌شناختی و دیداری-فضایی به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است (Harrar-Eskinazi et al, 2022; Premeti et al, 2024). پژوهش‌های موجود بیشتر نقص‌های واج‌شناختی یا دیداری-توجهی را به صورت جداگانه بررسی می‌کنند، در حالی که پژوهش‌های نوظهور نشان می‌دهد که یک مدل چندعاملی وجود دارد به گونه‌ای که این حیطه‌ها به صورت متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند و در افراد مختلف متفاوت است (Verwimp et al, 2021; O'Brien and Yeatman, 2021). همچنین، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده فعلی عمدتاً کیفیت ساخت شبکه مغزی فردی و تعامل پویای بین اتصال‌پذیری ساختاری و عملکردی را مورد نظر قرار نمی‌دهند (Wen et al, 2024; Turker et al, 2023a; Al-Naimi et al, 2023). اختلاف نظر پژوهشگران در مورد سهم نسبی نقص‌های واج‌شناختی در مقابل دیداری-فضایی و توالی یا ترکیب بهینه مداخلات، تا کنون باقی مانده است (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025; Premeti et al, 2024). عدم وجود چارچوب‌های یکپارچه که بتواند روش‌شناسی‌های پیشرفته GNN را با داده‌های جامع اتصال‌پذیری مغز ادغام کند، تعمیم‌پذیری و سودمندی بالینی پیش‌بینی‌ها را کاهش می‌دهند (Yap et al, 2025). این شکاف سبب محدودیت در توسعه برنامه‌های جبرانی متناسب و مؤثر شده و در نتیجه منجر به طولانی شدن مشکلات خواندن و پیامدهای نامطلوب مرتبط با آن شده است (Turker et al, 2023a).

این مرور بر اساس چارچوبی مفهوم‌سازی شده است که نارساخوانی را ناشی از اختلال در شبکه‌های عصبی درگیر در سیستم‌های پردازش واج‌شناختی و توجه دیداری-فضایی می‌داند (Kristjánsson and Sigurdardottir, 2023). GNN ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی این ارتباطات پیچیده بین مناطق مختلف مغز با در نظر گرفتن ویژگی‌های سطح گره و الگوهای اتصال‌پذیری چند مرحله‌ای فراهم می‌کنند (Wen et al, 2024). مداخلات واج‌شناختی و دیداری-فضایی، بسترهای عصبی متفاوت اما در تعامل را هدف قرار می‌دهند و نیازمند مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای هستند که این حوزه‌ها را برای اطلاع‌رسانی به درمان شخصی‌سازی شده ادغام کنند (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025; Premeti et al, 2024). این مدل

1. Graph Neural Networks  
2. Neuroimaging  
3. Machine Learning

مفهومی با نظریه های چندعاملی و شبکه محور نارساخوانی همسو بوده و بر نیاز به روش های محاسباتی که تفاوت های عصبی افراد را منعکس می کنند، تأکید می کند. (Verwimp et al, 2021; O'Brien and Yeatman, 2021).

این مرور نظام مند، با هدف بررسی تحلیلی و نقادانه پژوهش های موجود در زمینه به کارگیری GNN ها برای بررسی داده های اتصال پذیری مغز و پیش بینی پاسخ درمانی در نارساخوانی، با محوریت مداخلات واج شناختی و دیداری-فضایی است. این مرور از طریق شناسایی نقاط قوت، محدودیت ها و شکاف های روش شناختی درصدد مشخص سازی اولویت های پژوهشی آینده است که دقت پیش بینی و قابلیت کاربرد بالینی را افزایش دهند. این مطالعه، بر ضرورت استفاده از مدل های یکپارچه تأکید دارد که می توانند راهبردهای مداخله شخصی سازی شده را هدایت کرده و اثربخشی جبرانی را بهبود بدهند (Wen et al, 2024; Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025).

### روش شناسی انتخاب ادبیات

برای انجام این مرور نظام مند، یک فرآیند جستجو و انتخاب دقیق ادبیات به کار گرفته شد. در مرحله نخست، تمرکز بر گسترش پرسش اصلی مطالعه و استراتژی جستج بود. پرسش اصلی تحقیق به چندین عبارت جستجوی هدفمند گسترش یافت. مدلهایی از این پرسش ها عبارت بودند از: "Graph Neural Network dyslexia treatment prediction"، "brain connectome intervention response dyslexia" و "phonological visuospatial training" و "neuroimaging prediction". جستجو در پایگاه های علمی معتبر از جمله PubMed، Scopus، IEEE Xplore و Web of Science برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۵ انجام شد.

در مرحله دوم، معیارهای شمول و عدم شمول، مشخص گشت و مطالعات بر اساس معیارهای زیر غربالگری شدند:

معیارهای شمول: (۱) تمرکز اصلی بر پیش بینی پیامد درمان یا پاسخ به مداخله در نارساخوانی؛ (۲) به کارگیری رویکردهای مربوط بر شبکه عصبی گرافی، یادگیری ماشین و یا تحلیل شبکه ای بر داده های عصبی؛ (۳) ارتباط داشتن با مداخلات واج شناختی یا دیداری-فضایی.

معیارهای عدم شمول: (۱) پژوهش هایی محدود به تشخیص که پیش بینی درمان را شامل نمی شدند؛ (۲) مداخلات کلی که جزئیات عصبی-شناختی خاص را در بر نمی گرفتند؛ (۳) مقالات نظری صرف که داده های تجربی ارائه نمی کردند.

در مرحله آخر، یعنی غربالگری و زنجیره استناد، از مجموع ۵۸ مقاله اولیه تفکیک شده، غربالگری عنوان و چکیده انجام شد. سپس، بر روی مقالات کلیدی، زنجیره استناد (ارجاع به عقب و جلو) اعمال شد که باعث شناسایی ۷۲ مقاله مرتبط اضافی شد. در نهایت، از مجموع ۱۳۰ مقاله کاندید، ۴۷ مقاله به عنوان بسیار مرتبط با موضوع انتخاب و در این مرور مورد بررسی دقیق قرار گرفتند.

### یافته ها

پژوهش های بررسی شده، طیف گسترده و متنوعی از روش شناسی ها مثل کارآزمایی های تصادفی سازی شده کنترل شده (RCT)، مطالعات طولی، متاآنالیزها، مطالعات مدل سازی محاسباتی و توسعه سیستم های هوش مصنوعی را شامل بود. وجوه داده شامل fMRI، EEG، sMRI، ردیابی چشم و ارزیابی های رفتاری شناختی بود. مداخلات شامل آموزش واج شناختی کامپیوتری تا نوروفیدبک، نورومدولاسیون (مانند TMS/tDCS)، بازی های جدی<sup>۴</sup> و تمرینات نوروسنسوری-حرکتی<sup>۵</sup> بودند. برای مقایسه ی تعدادی از مطالعات کلیدی در این حوزه، جدول ۱ در زیر را مشاهده کنید.

جدول ۱. مقایسه تعدادی از مطالعات کلیدی در پیش‌بینی پاسخ به درمان

مطالعه	دقت	نوع مداخله	یکپارچه‌سازی داده	قوت روش‌شناختی
(Wen et al, 2024)	دقت بالا در پیش‌بینی رفتاری با GNN دوگانه چندگامی	پیش‌بینی رفتاری عمومی (غیراختصاصی)	ادغام اتصال‌پذیری عملکردی و داده رفتاری	نمونه بزرگ، بهینه‌سازی مشترک
(Beyer et al, 2022)	دقت خوب در پیش‌بینی سواد با ترکیب ماده خاکستری و مهارت‌های پیش‌خواندن	واج‌شناختی/ساختمانی (بدون مداخله فعال)	MRI ساختمانی و داده شناختی-زبانی	اعتبارسنجی متقابل لانه‌ای
(Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025)	بهبود معنادار در روان‌خوانی با آموزش کامپیوتری چندوجهی	واج‌شناختی و دیداری-فضایی ترکیبی	داده رفتاری (فاقد تصویربرداری عصبی)	کارآزمایی تصادفی‌سازی‌شده متقاطع
(Conte et al, 2024)	بهبود سرعت خواندن با انطباق منشوری <sup>۶</sup>	دیداری-فضایی (توجه)	اقدامات رفتاری و شناختی	کارآزمایی کنترل‌شده تصادفی‌سازی‌شده
(Turker et al, 2023b)	بهبود رمزگشایی واج‌شناختی با TMS	واج‌شناختی (نورومودولاسیون)	ترکیب fMRI, TMS و داده رفتاری	طرح متقاطع، نمونه کوچک

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، رویکردهای مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی و ادغام داده‌های چندوجهی، دقت پیش‌بینی را به طور چشمگیری افزایش داده‌اند.

در ادامه، تحلیل انتقادی یافته‌ها در چند محور کلیدی ارائه می‌شود:

الف) کاربرد شبکه‌های عصبی گرافی: مطالعه (Wen et al, 2024) با معرفی چارچوب D-MHGCN نشان‌دهنده پیشرفت مهمی است. این مدل با بهبود هم‌زمان ساختار شبکه مغزی فردی و پیش‌بینی رفتاری، دیدگاهی پویا و وظیفه آگاه برای مدل‌سازی اتصال‌پذیری مغز ارائه می‌دهد. با این حال، کاربرد GNNها عمدتاً محدود به پیش‌بینی رفتار عمومی است و به ندرت به پیش‌بینی اختصاصی پاسخ به یک نوع مداخله خاص پرداخته‌اند. فقدان مجموعه‌داده‌های بزرگ و چندوجهی که شامل اسکن‌های مغزی پیش و پس از مداخلات مختلف باشند، توسعه این مدل‌ها را محدود کرده است (Kothapalli et al, 2024; Yap et al, 2025).

ب) مداخلات واج‌شناختی در مقابل دیداری-فضایی: بیشتر پژوهش‌هایی که تا به الان منتشر شدند بر میزان تأثیرگذاری مداخلات واج‌شناختی تمرکز دارند و از آن به عنوان پایه اصلی جبران نارساخوانی یاد می‌کند (Wilson et al, 2021). با این وجود، شواهد روبه‌رشدی از اثربخشی مداخلات دیداری-فضایی وجود دارد. برای نمونه، آموزش توجه دیداری-فضایی (Caldani et al, 2020)، انطباق منشوری (Conte et al, 2024)، و نوروفیدبک<sup>۷</sup> متمرکز بر شبکه‌های دیداری (Taskov and Dushanova, 2022) همگی در خواندن پیشرفت‌هایی نشان داده‌اند. مطالعه (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025) حتی بیانگر آن است که اگر قبل از آموزش واج‌شناختی، مداخله دیداری-فضایی ارائه شود، می‌تواند تأثیر بیشتری داشته باشد. این یافته‌ها از مدل چندعاملی نارساخوانی حمایت می‌کند، با این حال، تعداد کمی از مطالعات به طور مستقیم این دو حوزه را در یک چارچوب پیش‌بینی، مورد مقایسه قرار داده‌اند (Harrar-Eskinazi et al, 2022; Premeti et al, 2024).

5. Neuro-Sensorimotor Exercises

6. Prismatic Adaptation (PA)

7. Neurofeedback (NFB)



ج) نشانگرهای عصبی پاسخ به درمان<sup>۸</sup>: مطالعات متعدد و نوظهور، نشانگرهای عصبی را برای پاسخ به درمان معرفی کرده‌اند. برای نمونه، (Turker et al, 2023b) نشان داد که تحریک مغناطیسی فراجمجمه‌ای<sup>۹</sup> بر روی قشر گیجگاهی-آهیانه‌ای<sup>۱۰</sup> چپ باعث تقویت رمزگشایی واج‌شناختی و تغییرات در ارتباطات شبکه خواندن می‌شود. مطالعات EEG نیز تغییرات در توپولوژی شبکه (کوچک جهانی بودن) و هماهنگی عملکردی را پس از آموزش دیداری نشان داده‌اند (Taskov and Dushanova, 2020, 2021, 2024; Benli et al). بعد از آموزش، تغییرات معناداری در اتصال پذیری حالت استراحت مشاهده شد. با وجود این نشانگرها، هنوز به طور نظام‌مند در مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای هدایت انتخاب درمان تلفیق نشده‌اند.

د) یکپارچه‌سازی داده‌های چندوجهی: شکاف قابل توجهی در تلفیق عمیق داده‌های تصویربرداری عصبی (ساختاری، عملکردی)، الکتروفیزیولوژیک (EEG)، رفتاری (ردیابی چشم، عملکرد شناختی) و ژنتیکی در قالب یک چارچوب پیش‌بینی‌کننده منسجم وجود دارد. اگر چه برخی پژوهش‌ها از یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی نارساخوانی از طریق داده‌های چندوجهی استفاده کرده‌اند (Alkhurayyif and Sait, 2024)، تلفیق این اطلاعات درون معماری‌های GNN برای پیش‌بینی نتیجه یک مداخله خاص، یک حوزه نو ظهور و کمتر بررسی شده است.

ه) روش‌شناسی و چالش‌ها: دامنه وسیعی از مطالعات موردی کوچک تا کار آزمایی‌های تصادفی‌سازی شده چندمرکزی کنترل‌شده در روش‌شناسی‌ها وجود دارد. محدودیت‌های مشترک شامل حجم نمونه کوچک (به عنوان مثال، Conte et al, 2023; Darrot et al, 2024)، عدم وجود گروه کنترل فعال، پیگیری کوتاه‌مدت، و ناهمگونی در معیارهای ارزیابی نتایج است. مسائل فنی از جمله حذف آرتیفکت<sup>۱۱</sup> در داده‌های EEG، می‌توانند بر قابلیت اطمینان نشانگرهای عصبی تأثیرگذار باشند (Al-Naimi et al, 2023). این ناهمگونی، سنتز شواهد و ارائه توصیه‌های بالینی قابل اعتماد را دشوار می‌کند.

### بحث و نتیجه‌گیری

همگرایی قابل توجهی در میان مطالعات وجود دارد که نارساخوانی ماهیت چند عاملی دارد و نیاز به رویکرد درمانی شخصی‌سازی شده برای هر فرد به صورت اختصاصی می‌باشد. اکثر مطالعات موافقت می‌کنند که هر دو مداخله، یعنی هم مداخلات واج‌شناختی و هم دیداری-فضایی می‌توانند سودمند باشند، و ترکیب آن‌ها بیشترین اثر درمانی را ایجاد می‌کند (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025). همچنین اجماع رو به رشدی در رابطه با پتانسیل روش‌های محاسباتی و تصویربرداری عصبی برای کیفیت‌بخشی به این شخصی‌سازی وجود دارد.

با این وجود، واگرایی‌های اساسی نیز همچنان باقی است. اولاً، در خصوص «بهترین» ترتیب یا ترکیب مداخلات اجماعی وجود ندارد. بعضی مطالعات از شروع با مداخله دیداری-فضایی حمایت می‌کنند (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025) در حالی که گروهی دیگر، مداخلات واج‌شناختی فشرده را سودمندتر می‌دانند. دوماً، در رابطه با مرتبط‌ترین نشانگرهای عصبی جهت پیش‌بینی پاسخ به درمان، اطمینانی وجود ندارد. آیا اتصال‌پذیری حالت استراحت، پاسخ وظیفه‌ای، یا ویژگی‌های ساختاری پیش‌بینی‌کننده‌تر هستند؟ احتمالاً این بازتابی از ناهمگونی ذاتی نارساخوانی و تنوع روش‌های مطالعه است.

از دیدگاه نظری، حرکت به سمت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر GNN، موجب تقویت انتقال از نظریه‌های مربوط به «نقص هسته‌ای»<sup>۱۲</sup> به سوی چارچوب‌های «شبکه‌ای» و «چندعاملی» نارساخوانی می‌شود (Verwimp et al, 2021; )

8. Neural Biomarkers / Predictors of Treatment Response

9. Transcranial Magnetic Stimulation

10. Temporo-Parietal Cortex (TPC)

11. Artifact

12. Core Deficit Hypothesis

(O'Brien and Yeatman, 2021). این مدل ها توانایی ویژه ای در شناسایی و مدل سازی تعاملات پیچیده بین گره های مغزی در سطوح مختلف دارند.

از دیدگاه علمی، اجرای موفق سیستم های کامپیوتری (Ziegler and Harrar-Eskinazi, 2025)، بازی های جدی (Vonthron et al, 2022)، و مداخلات بازتوانی از راه دور<sup>۱۳</sup> (Cancer et al, 2021)، راه را برای ابزارهای مقیاس پذیر و در دسترس هموار می سازد. پیش بینی پاسخ به درمان می تواند به بهینه سازی تخصیص منابع، افزایش رضایت بیماران و جلوگیری از صرف زمان بر روی مداخلات کم اثر، کمک کند. با این وجود، تبدیل مدل های پیچیده GNN به ابزارهای بالینی قابل استفاده برای کاربران غیر فنی، همچنان به عنوان یک مشکل باقی مانده است. مهمترین محدودیت های ادبیات پژوهش عبارتند از:

(الف) ناهمگونی و حجم نمونه کوچک: اکثر مطالعات، مخصوصاً آن هایی که شامل تصویربرداری عصبی پرهزینه هستند، از نظر آماری قدرت کمتری دارند (Conte et al, 2024; Darrot et al, 2023).

(ب) کمبود مطالعات طولی با طراحی پیش بینی: موضوع بیشتر مطالعات اثر بخشی به صورت گروهی است، نه پیش بینی پاسخ فردی در طول زمان.

(ج) فقدان استاندارد سازی: تنوع گسترده در پروتکل های مداخله، معیارهای سنجش نتایج و روش های تحلیل عصبی، امکان مقایسه و تکرارپذیری یافته ها را دشوار می سازد.

(د) ادغام ناکافی چند وجهی: پتانسیل کامل مدل های GNN برای ادغام داده های چند وجهی شامل تصویربرداری، داده های رفتاری و اطلاعات ژنتیکی، هنوز به طور کامل محقق نشده است.

(ه) تمرکز محدود بر زیرگروه ها: تعداد محدودی از مطالعات به طور مستقیم به پیش بینی پاسخ درمانی برای زیرگروه های نارساخوانی (مانند نارساخوانی دیداری در مقابل واج شناختی) یا در افراد هم ابتلا (مانند ADHD) پرداخته اند. شکاف ها و جهت های تحقیقاتی آینده را می توان به شرح زیر بیان کرد:

(الف) توسعه مجموعه داده های چند وجهی و طولی: ایجاد کنسرسیوم های پژوهشی برای گردآوری مجموعه داده های بزرگ شامل تصویربرداری مغز قبل و بعد از اعمال مداخله، ارزیابی های رفتاری جامع و داده های ژنتیکی، برای زیر گروه های مختلف نارساخوانی امری ضروری است.

(ب) طراحی مدل های GNN برای پیش بینی اختصاصی درمان: در آینده پژوهش ها باید بر توسعه معماری های GNN متمرکز شوند که به طور اختصاصی برای پیش بینی پیامد مداخلات مشخص (مانند آموزش واج شناختی در مقابل آموزش توجه دیداری) بر اساس پروفایل اتصال پذیری اولیه هر شخص طراحی شده اند.

(ج) مطالعات کارآزمایی تصادفی سازی شده کنترل شده با طراحی پیش بینی: انجام RCT هایی که در آن شرکت کنندگان بر اساس پیش بینی های مدل پایه به گروه های مداخله مختلف تخصیص داده می شوند (طراحی مطالعات «پیش بینی-تخصیص») تا اثربخشی رویکرد شخصی سازی شده را بیازمایند.

(د) ادغام نورومودولاسیون و مدل سازی پیش بینی: بررسی نحوه ادغام داده های نورومودولاسیون (مثل TMS/tDCS) در مدل های GNN به منظور پیش بینی و بهینه سازی پارامترهای تحریک برای دستیابی به بیشترین سود فردی ضروری است.

(ه) توجه به تفسیرپذیری و اخلاق: توسعه روش هایی برای افزایش تفسیرپذیری مدل های GNN ("رویکردهای جعبه شفاف") و رسیدگی به چالش های اخلاقی مربوط به حریم خصوصی داده ها، سوگیری الگوریتمی و دسترسی عادلانه به ابزارهای پیش بینی پیشرفته، ضروری است (Yap et al, 2025).

این مرور نشان می‌دهد که حوزه پیش‌بینی پاسخ به درمان در نارساخوانی در مسیر تحولی قابل توجه قرار دارد. پیدایش GNN ها و دسترسی فزاینده به داده‌های اتصال‌پذیری مغز، ظرفیت‌های چشمگیری را برای عبور از الگوهای درمانی یکسان برای همه، به سوی رویکردهای شخصی‌سازی شده فراهم می‌کند. شواهد موجود، بر کارآمدی هر دو مداخله واج‌شناختی و دیداری-فضایی را تأیید کرده و ضرورت به کارگیری رویکردهای چندوجهی و شخصی را برجسته می‌کند. با این وجود، تحقق کامل قابلیت پیش‌بینی پاسخ به درمان، نیازمند غلبه بر چالش‌های گسترده روش‌شناختی است: حجم نمونه کوچک، ناهمگونی پروتکل‌ها، و نبودن مدل‌های محاسباتی یکپارچه که داده‌های چند وجهی را برای پیش‌بینی‌های اختصاصی درمان ترکیب کنند. راهبردهای پیش رو باید بر ایجاد زیرساخت‌های داده همکارانه، گسترش معماری‌های GNN نوآورانه و انجام کارآزمایی‌های اعتبارسنجی قوی متمرکز شوند. فقط با چنین فعالیت‌های منسجمی است که می‌توانیم به سمت یک پارادایم منحصر به فرد و شخصی‌سازی شده برای درمان نارساخوانی حرکت کنیم که در آن زمان‌بندی و انتخاب مداخلات باید بر اساس پروفایل عصبی-شناختی اختصاصی هر فرد هدایت شود.

#### منابع

- Alkhurayyif, Y., & Sait, A. R. W. (2024). **Multi-modal dyslexia detection model via swin transformer with closed-form continuous time networks**. IEEE Access, 12, 127580–127591. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3454795>
- Al-Naimi, T. M., Naidu, S. C. S., Sha'ameri, A. Z., Safri, N. M., & Samah, N. A. (2023). **Enhancing PDC functional connectivity analysis for subjects with dyslexia using artifact cancellation techniques**. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 20 (4), 283–292. <https://doi.org/10.15598/aeec.v20i4.4525>
- Benli, Ş. G., İçer, S., Demirci, E., Karaman, Z. F., Ak, Z., Acer, İ., Sağır, G. R., Aker, E., & Sertkaya, B. (2024). **Data-driven exploratory method investigation on the effect of dyslexia education at brain connectivity in Turkish children: A preliminary study**. Brain Structure & Function. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s00429-024-02820-5>
- Beyer, M., Liebig, J., Sylvester, T., Braun, M., Heekeren, H. R., Froehlich, E., Jacobs, A. M., & Ziegler, J. C. (2022). **Structural gray matter features and behavioral preliterate skills predict future literacy – A machine learning approach**. Frontiers in Neuroscience, 16, 920150. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.920150>
- Caldani, S., Gerard, C., Peyre, H., & Bucci, M. P. (2020). **Visual attentional training improves reading capabilities in children with dyslexia: An eye tracker study during a reading task**. Brain Sciences, 10 (8), 558. <https://doi.org/10.3390/BRAINS10080558>
- Cancer, A., Sarti, D., De Salvatore, M., Granocchio, E., Chieffo, D., & Antonietti, A. (2021). **Dyslexia telerehabilitation during the COVID-19 pandemic: Results of a rhythm-based intervention for reading**. Children, 8 (11), 1011. <https://doi.org/10.3390/CHILDREN8111011>
- Conte, G., Quadrana, L., Zotti, L., Di Garbo, A., & Oliveri, M. (2024). **Prismatic adaptation coupled with cognitive training as novel treatment for developmental dyslexia: A randomized controlled trial**. Scientific Reports, 14 (1), 9154. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57499-9>
- Darrot, G., Gros, A., Manera, V., De Cara, B., Faure, S., Corveleyn, X., & Harrar-Eskinazi, K. L. (2023). **Effects of a developmental dyslexia remediation protocol based on the training of audio-phonological cognitive processes in dyslexic children with high intellectual potential: Study protocol for a multiple-baseline single-case experimental design**. BMC Pediatrics, 23, 425. <https://doi.org/10.1186/s12887-023-04189-6>
- Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J. C., & Faure, S. (2022). **Multimodal intervention in 8- to 13-year-old French dyslexic readers: Study protocol for a randomized multicenter controlled crossover trial**. BMC Pediatrics, 22 (1), 558. <https://doi.org/10.1186/s12887-022-03701-8>
- Kothapalli, P. K. V., Raghuram, C., & Krishna, B. L. S. R. (2024). **Enhancing dyslexia detection and intervention through deep learning: A comprehensive review and future directions**. In Handbook of Artificial Intelligence in Education. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003529231-39>

- Kristjánsson, Á., & Sigurdardottir, H. M. (2023). **The role of visual factors in dyslexia**. *Journal of Cognition*, 6 (1), 31. <https://doi.org/10.5334/joc.287>
- O'Brien, G., & Yeatman, J. D. (2021). **Bridging sensory and language theories of dyslexia: Toward a multifactorial model**. *Developmental Science*, 24 (3), e13039. <https://doi.org/10.1111/DESC.13039>
- Premeti, A., Isel, F., & Bucci, M. P. (2024). **Visuo-attentional and phonological deficits explored in French students with dyslexia: Eye movements recorded during a phonological lexical decision task**. *Neurology International*, 16 (2), 312–326. <https://doi.org/10.3390/neurolint16020022>
- Taskov, T., & Dushanova, J. (2020). **Reading-network in developmental dyslexia before and after visual training**. *Symmetry*, 12 (11), 1842. <https://doi.org/10.3390/SYM12111842>
- Taskov, T., & Dushanova, J. (2021). **Small-world propensity in developmental dyslexia after visual training intervention**. In A. Lintas (Ed.), *Advances in Cognitive Neurodynamics (VII)* (pp. 145–151). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80129-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80129-8_18)
- Taskov, T., & Dushanova, J. (2022). **Improving functional connectivity in developmental dyslexia through combined neurofeedback and visual training**. *Symmetry*, 14 (2), 369. <https://doi.org/10.3390/sym14020369>
- Turker, S., Kuhnke, P., Cheung, V. K., Weise, K., & Hartwigsen, G. (2023b). **Neurostimulation improves reading and alters communication within reading networks in dyslexia**. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/7a43n>
- Turker, S., Kuhnke, P., Jiang, Z., & Hartwigsen, G. (2023a). **Disrupted network interactions serve as a neural marker of dyslexia**. *Communications Biology*, 6, 1124. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05499-2>
- Verwimp, C., Tijms, J., Snellings, P., Haslbeck, J. M. B., & Wiers, R. W. (2021). **A network approach to dyslexia: Mapping the reading network**. *Development and Psychopathology*, 1–15. <https://doi.org/10.1017/S0954579421000365>
- Vonthron, F., Begel, V., Yuen, A., Pellerin, H., Cohen, D., & Grossard, C. (2022). **Mila-Learn, a serious game to train rhythmic abilities in children with dyslexia: Feasibility and usability study**. *JMIR Serious Games*, 10 (4), e42733. <https://doi.org/10.2196/42733>
- Wen, X., Cao, Q., Zhao, Y., Wu, X., & Zhang, D. (2024). **D-MHGCN: An end-to-end individual behavioral prediction model using dual multi-hop graph convolutional network**. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 28 (10), 6134–6145. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2024.3420134>
- Wilson, A., Ahmed, H., Mead, N., Noble, H., Richardson, U., Wolpert, M. A., & Goswami, U. (2021). **Neurocognitive predictors of response to intervention with GraphoGame Rime**. *Frontiers in Education*, 6, 639294. <https://doi.org/10.3389/FEDUC.2021.639294>
- Yap, J. R., Aruthanan, T., & Chin, M. (2025). **Rewriting the script: A scoping review of the role of artificial intelligence in dyslexia research and education**. *IEEE Access*, 13, 155727–155745. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3526189>
- Ziegler, J. C., & Harrar-Eskinazi, K. L. (2025). **Back on track: An efficient computer-assisted multi-componential remediation program for dyslexic readers**. *PsyArXiv*. [https://doi.org/10.31234/osf.io/s6j74\\_v1](https://doi.org/10.31234/osf.io/s6j74_v1)