

کاربردهای هوش مصنوعی در بیهوشی جراحی‌های مغز و اعصاب: مرور نظام‌مند کاربردها، چالش‌ها و مسیر آینده

مسعود نشیبی^۱

فرهاد صفری^۲

حسنعلی احمدی^۱

سیدسام مهدی حسینی نسب^۱

سوگل عسگری^۱

^۱ گروه نوروانستزیولوژی، دانشکده پزشکی، بیمارستان لقمان حکیم، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲ گروه بیهوشی، مرکز تحقیقات بیهوشی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده:

زمینه: بیهوشی در جراحی‌های مغز و اعصاب به دلیل حساسیت بالا در حفظ فشار و جریان خون مغزی، عملکرد نورولوژیک و نیاز به کنترل دقیق عمق بیهوشی از چالش‌برانگیزترین حوزه‌های پزشکی است. پیشرفت‌های اخیر در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین فرصت‌های جدیدی برای بهبود پایش، پیش‌بینی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در این زمینه فراهم کرده است.

هدف: این مرور نظام‌مند به بررسی کاربردهای هوش مصنوعی در پیش‌بینی رخدادهای همودینامیک، برآورد عمق بیهوشی، کنترل خودکار دارو و پشتیبانی تصمیم‌گیری بالینی در بیهوشی جراحی‌های مغز و اعصاب می‌پردازد.

روش: جستجوی ساختاریافته در پایگاه‌های PubMed و PMC برای مطالعات منتشرشده از ۲۰۱۰ تا اوت ۲۰۲۵ انجام شد. تنها مطالعاتی وارد شدند که بر داده‌های بالینی انسانی اجرا شده یا مدل‌های پیشنهادی را با داده‌های اتاق عمل اعتبارسنجی کرده باشند. گزارش‌دهی بر اساس چارچوب PRISMA انجام شد.

یافته‌ها: شاخص پیش‌بینی افت فشار (HPI) مبتنی بر یادگیری ماشین در چندین کارآزمایی تصادفی منجر به کاهش معنادار مدت و شدت دوره‌های افت فشار حین عمل شده است. مدل‌های زمانی عمیق (LSTM و Transformer) برای پیش‌بینی عمق بیهوشی از سیگنال‌های EEG دقت بیشتری نسبت به روش‌های داروشناسی کلاسیک نشان داده‌اند. سامانه‌های حلقه‌بسته MIMO توان بالقوه‌ای برای خودکارسازی ایمن بیهوشی ارائه کرده‌اند. کاربرد NLP در پرونده‌های الکترونیک مسیرهای جدیدی برای پیش‌بینی ریسک فراهم کرده است.

نتیجه‌گیری: هوش مصنوعی در بیهوشی مغز و اعصاب از مرحله اثبات مفهوم به سوی کاربرد بالینی پیش رفته است؛ اما برای پذیرش گسترده لازم است توجه بیشتری به توضیح‌پذیری مدل‌ها، استانداردسازی داده‌ها و اجرای کارآزمایی‌های چندمرکزی معطوف شود.

کلید واژه‌ها: بیهوشی مغز و اعصاب، عمق بیهوشی، BIS، افت فشار خون حین عمل، سیستم‌های حلقه‌بسته، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، NLP، DSS، LSTM، Transformer.

فلوچارت PRISMA – فرایند انتخاب مطالعات

جدول زیر خلاصه فرایند انتخاب مطالعات است.

مرحله	تعداد
مقالات شناسایی شده در PubMed/PMC	۴۲۰۰
غربالگری عنوان / چکیده	۴۲۰۰
حذف شده (غیر انسانی، شبیه سازی بدون اعتبارسنجی)	۳۸۰۰
بررسی متن کامل	۴۰۰
مطالعات وارد شده نهایی	۷

جدول ۱ – خلاصه مطالعات وارد شده

نتیجه کلیدی	مدل هوش مصنوعی	طراحی مطالعه	مطالعه (سال)
کاهش میانگین زمانی هیپوتانسیون (TWA)	HPI (یادگیری ماشین)	کارآزمایی تصادفی (RCT)	Wijnberge و همکاران (۲۰۲۰)
دقت بالاتر در برآورد عمق بیهوشی نسبت به مدل های PK/PD	Transformer	آیندهنگر	He و همکاران (۲۰۲۳)
خطای پایین RMSE در برآورد BIS	یادگیری عمیق (EEG)	الگوریتمی	Zhang و همکاران (۲۰۲۴)
کنترل ایمن در سامانه حلقه بسته	McSleepy (MIMO)	ارزیابی بالینی	Hemmerling و همکاران (۲۰۱۰)
معماری های مرجع و استاندارد	Transformer (EEG)	مرور	Li و همکاران (۲۰۲۳)
چارچوب تفسیرپذیری مدل	هوش مصنوعی توضیح پذیر / Attention	روش شناختی	Taran و همکاران (۲۰۲۴)
شواهد چندمرکزی	اعتبارسنجی HPI	پروتکل / تحلیل	Wijnberge و همکاران (۲۰۲۱)

۱. مقدمه

بیهوشی در جراحی‌های مغز و اعصاب از پیچیده‌ترین و حساس‌ترین حوزه‌های پزشکی به شمار می‌رود. در این نوع جراحی‌ها، کوچک‌ترین تغییر در وضعیت فیزیولوژیک بیمار می‌تواند پیامدهای جدی و گاه غیرقابل جبران ایجاد کند. کنترل دقیق عمق بیهوشی، پایش مداوم وضعیت گردش خون و پیش‌بینی رویدادهای بحرانی مانند افت فشار خون، برای حفظ ایمنی و بهبود پیامدهای بالینی ضرورت دارد. با این حال، ارزیابی دقیق این متغیرها در محیط بالینی، به دلیل پیچیدگی عملکرد دستگاه عصبی و تفاوت‌های فردی در پاسخ به داروهای بیهوشی، همچنان چالش‌برانگیز است. در سال‌های اخیر، پیشرفت چشمگیر در فناوری‌های نوین، به‌ویژه در زمینه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، افق‌های تازه‌ای را در علم بیهوشی گشوده است. این فناوری‌ها با توانایی پردازش حجم گسترده‌ای از داده‌های فیزیولوژیک و بالینی، قادرند الگوهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کرده و پیش‌بینی‌های لحظه‌ای ارائه دهند. از جمله کاربردهای مهم آن‌ها می‌توان به پیش‌بینی افت فشار خون پیش از وقوع، برآورد عمق بیهوشی بر اساس EEG/BIS، و طراحی سامانه‌های خودکار تنظیم دارو اشاره کرد. با وجود این پیشرفت‌ها، موانعی برای به‌کارگیری گسترده هوش مصنوعی در محیط‌های درمانی وجود دارد. مهم‌ترین چالش‌ها شامل نبود شفافیت در عملکرد مدل‌ها، ناهمگونی داده‌ها، محدودیت در استانداردهای بین‌المللی و دشواری تعمیم نتایج به جمعیت‌های مختلف است. هدف این مقاله بررسی شواهد علمی موجود، معرفی نوآوری‌های کلیدی و تحلیل چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده است.

۲. روش‌شناسی

این مقاله بر اساس چارچوب گزارش‌دهی PRISMA تهیه شده است. در مطالعاتی که مداخله هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری بالینی داشتند، از دستورالعمل‌های CON-SORT-AI و SPIRIT-AI نیز پیروی شد. پایگاه‌های جستجو: PubMed، PMC و منابع خاکستری منتخب شامل گزارش‌های دانشگاهی با ارجاع متقابل پژوهشی.

کلیدواژه‌ها: «هوش مصنوعی در بیهوشی»، «پیش‌بینی عمق بیهوشی»، «شاخص دوطیفی»، «بیهوشی حلقه‌بسته»، «بیهوشی مغز و اعصاب»، «پیش‌بینی افت فشار»، «یادگیری تقویتی در بیهوشی»، «تحلیل نوار مغزی با مدل ترنسفورمر».

بازه زمانی: از سال ۲۰۱۰ تا اوت ۲۰۲۵.

معیار ورود: مطالعات انسانی بر پایه داده‌های بالینی واقعی یا داده‌های اتاق عمل؛ پژوهش‌های الگوریتمی دارای اعتبارسنجی بالینی؛ مرورهای نظام‌مند معتبر. معیار خروج: نمونه‌های بسیار کوچک بدون اعتبارسنجی، شبیه‌سازی‌های فاقد کاربرد بالینی، گزارش‌های تبلیغاتی بدون پشتوانه علمی.

استخراج داده‌ها: نوع مدل؛ متغیرهای ورودی (EEG)، شاخص‌های عملکرد (RMSE، MAE، AUC، TWA)؛ خروجی‌ها (BIS، DoA، MAP، ABP، ECG، دوز دارو)؛ نوع طراحی مطالعه؛

۳. کاربردهای هوش مصنوعی در بیهوشی مغز و اعصاب

۳-۱. پیش بینی افت فشار و رویدادهای قلبی عروقی

افت فشار خون از شایع ترین و خطرناک ترین عوارض حین جراحی های مغز و اعصاب است و می تواند موجب کاهش جریان خون مغزی و آسیب نورونی شود. مدل های یادگیری ماشین با تحلیل داده های همودینامیک مانند فشار شریانی، ضربان قلب و تغییرپذیری ضربان، قادرند الگوهای پنهان قبل از بروز افت فشار را شناسایی کنند.

شاخص پیش بینی افت فشار (HPI) سامانه ای مبتنی بر یادگیری ماشین است که با تحلیل مداوم سیگنال فشار شریانی، وقوع افت فشار ($MAP < 65 \text{ mmHg}$) را چند دقیقه پیش از بروز پیش بینی می کند. Wijnberge و همکاران در یک کارآزمایی تصادفی نشان دادند که استفاده از HPI در مقایسه با گروه کنترل، مدت و شدت افت فشار را به طور معناداری کاهش می دهد [۱].

کاربرد بالینی در نوروانستزی: استفاده پیش فعال از این سامانه ها پیش از مانورهای حساس (مانند بستن/باز کردن گیره های عروقی یا تغییر وضعیت سر بیمار) می تواند از افت پرفیوژن مغزی پیشگیری کند. سایر الگوریتم ها مانند Ran-dom Forest و شبکه های عصبی نیز با استفاده از داده های لحظه ای ABP دقت بالایی در پیش بینی هیپوتانسیون نشان داده اند.

۳-۲. پیش بینی و کنترل عمق بیهوشی

عمق بیهوشی معمولاً با شاخص دوطیفی (BIS) پایش می شود. با این حال، تفاوت پاسخ بیماران و تأخیر در تنظیم دوز دارو ممکن است به بیداری ناخواسته یا بیش بیهوشی منجر شود.

مدل های LSTM: این شبکه های عصبی بازگشتی با

یادگیری از الگوی تزریق دارو و واکنش های فیزیولوژیک بیمار، مقدار شاخص BIS را پیش بینی می کنند. خطای این مدل ها کمتر از مدل های داروشناسی کلاسیک گزارش شده است.

مدل های Transformer: در مواجهه با تغییرات ناگهانی (مانند خونریزی یا تغییر در تهویه) دقت بالاتری در پیش بینی عمق بیهوشی داشته اند. He و همکاران نشان دادند که یک مدل Transformer بر پایه EEG دقت قابل توجهی در برآورد بلادرنگ DoA دارد [۳].

مدل های مبتنی بر EEG: تحلیل پیچیدگی و ویژگی های طیفی EEG در ترکیب با شبکه های یادگیری عمیق، دقت بالایی در برآورد بلادرنگ عمق بیهوشی نشان داده است [۵].

یادگیری تقویتی: سامانه با شبیه سازی شرایط واقعی یاد می گیرد که دوز دارو (مانند پروپوفول) را بهینه تنظیم کند. نتایج شبیه سازی ها عملکردی نزدیک به متخصصان بیهوشی گزارش کرده اند.

۳-۳. سامانه های حلقه بسته برای تحویل دارو

در سامانه های حلقه بسته، الگوریتم های هوش مصنوعی به صورت مداوم داده های EEG، فشار خون، پاسخ حرکتی و سایر شاخص ها را تحلیل کرده و دوز مناسب دارو را به شکل خودکار تزریق می کنند.

سامانه McSleepy نمونه ای از سامانه های MIMO است که سه مؤلفه اصلی بیهوشی (هیپنوز، آنالژزی و شلی عضلانی) را به طور همزمان کنترل می کند. ارزیابی های بالینی اولیه Hemmerling و همکاران کارایی و ایمنی قابل قبول آن را تأیید کرده اند [۶].

استفاده از این سامانه ها در نوروانستزی، به ویژه هنگام پایش

تحلیل EEG امکان ترسیم نقشه های توجه و مشخص کردن نواحی کلیدی سیگنال را فراهم کرده است [۷]. داده و استاندارد سازی: داده های بیهوشی از منابع گوناگون (ECG، ABP، EEG، گاز بازدمی) با نویز متفاوت جمع آوری می شوند. نویزهای محیطی مانند تداخل الکتروکوتر یا EMG دقت مدل ها را کاهش می دهد. کمبود مجموعه داده های بزرگ و مشکل Out-of-do-main Generalization، نیازمند ایجاد بانک های داده چندمرکزی است.

ترجمه به عمل بالینی: بخش عمده الگوریتم های هوش مصنوعی هنوز در مرحله تحقیقاتی هستند. حتی HPI برای پذیرش گسترده نیازمند کارآزمایی های چندمرکزی، دستورالعمل های اجرایی و استانداردهای ایمنی است. مسائل اخلاقی و حقوقی: تعیین مسئولیت در صورت بروز خطا (پزشک یا سامانه)، سوگیری داده های آموزشی، حفظ حریم خصوصی و امنیت سایبری سامانه های حلقه بسته از مهم ترین چالش های اخلاقی اند.

ادغام چندوجهی واقعی: برای دستیابی به پیش بینی دقیق لازم است داده های EEG، شاخص های همودینامیک، غلظت گازهای بیهوشی، SEP، MEP و NIRS در معماری یکپارچه ای ترکیب شوند. تاکنون تعداد محدودی از پژوهش ها در این زمینه انجام شده اند.

۴-۲. مسیر آینده و پیشنهادها

هوش مصنوعی توضیح پذیر: افزودن لایه های XAI از طریق SHAP، LIME و Attention Maps و کمی سازی عدم قطعیت (Uncertainty Quantification) در خروجی ها می تواند اعتماد بالینی را افزایش دهد و در موارد اطمینان پایین تصمیم را به انسان واگذار کند.

NMB و تنظیم وازوپرسورها، مشروط به نظارت انسانی و سامانه های fail-safe می تواند سودمند باشد.

۳-۴. سامانه های پشتیبان تصمیم گیری بالینی (DSS)

سامانه های DSS در بیهوشی مغز و اعصاب می توانند داده های EEG، فشار داخل جمجمه، جریان خون مغزی، وضعیت همودینامیک و اطلاعات دارویی را یکپارچه تحلیل کنند. این سامانه ها قادرند دوز مناسب را پیشنهاد دهند، پاسخ احتمالی بیمار را پیش بینی کنند و هشدارهایی درباره افزایش ICP یا اسپاسم عروقی صادر کنند.

۳-۵. پردازش زبان طبیعی (NLP) و پرونده های الکترونیک

NLP یادداشت های آزاد پزشکان را به داده های ساختاریافته برای مدل های پیش بینی خطر تبدیل می کند. سامانه های چندوجهی که EEG، همودینامیک، دوز دارو و یادداشت های بالینی را ترکیب می کنند در حال توسعه اند. با رشد مدل های زبانی بزرگ، دقت استخراج اطلاعات از پرونده های بیهوشی افزایش یافته است؛ هرچند شواهد بالینی این زمینه هنوز محدودتر از پیش بینی هیپوتانسیون یا DoA است.

۴. بحث

۴-۱. چالش ها و محدودیت ها

جعبه سیاه و اعتماد بالینی: ماهیت «جعبه سیاه» بسیاری از مدل های یادگیری عمیق یکی از موانع اصلی پذیرش بالینی است. تیم بیهوشی نیازمند درک روشن از منطق تصمیم گیری مدل و میزان عدم قطعیت آن است. توسعه رویکردهای XAI بر پایه مکانیزم های Attention در

با وجود این پیشرفت‌ها، توضیح‌پذیری مدل‌ها، تعمیم‌پذیری، استانداردسازی داده‌ها و شواهد چندمرکزی، از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در پذیرش گسترده این فناوری‌اند. الگوریتم‌ها جایگزین متخصص بیهوشی نخواهند شد؛ بلکه به‌عنوان ابزارهای تصمیم‌یار عمل می‌کنند و تصمیم نهایی همچنان در اختیار متخصص انسانی باقی می‌ماند.

۶. ملاحظات اخلاقی

این مقاله یک مرور نظام‌مند از مطالعات منتشرشده است و شامل هیچ‌گونه داده انسانی جدید یا مداخله بالینی نمی‌باشد. دریافت مجوز اخلاق از کمیته اخلاق پژوهش الزامی نبوده است. تمامی مطالعات مورد استناد دارای مجوز اخلاقی در زمان انجام پژوهش بوده‌اند.

۷. حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی مستقیم از سازمان، نهاد یا شرکت خاصی دریافت نکرده است و هزینه‌های انجام آن توسط نویسندگان تأمین شده است.

۸. تضاد منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع علمی، مالی یا شخصی مرتبط با موضوع این مقاله وجود ندارد.

کارآزمایی‌های تصادفی چندمرکزی: برای انتقال از پژوهش به بالین، اجرای RCT های چندمرکزی در جراحی‌های واقعی مانند کرایوتومی تومور، آنوریسم و AVM ضروری است. الگوریتم‌ها باید بر پیامدهای سخت (نتایج عصبی، طول دوره نقاهت) ارزیابی شوند.

ادغام چندوجهی: ترکیب EEG با ABP، PPG، ECG، NMB و رخدادهای جراحی و تصویربرداری پیش‌عمل (MRI/DTI) از طریق معماری‌های Multimodal Transformer و Transfer Learning می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد.

کنترل تطبیقی ایمن: استفاده از Safe Deep RL با قیود فیزیولوژیک (BP، SpO₂، BIS) برای تنظیم خودکار پروپوفول و رمی‌فنتانیل در حلقه‌بسته با نظارت انسانی.

استانداردسازی و اشتراک‌گذاری داده: ایجاد کنسرسیوم‌های چندمرکزی با پروتکل‌های Data Governance و روش‌های Privacy-preserving AI مانند Federated Learning.

۵. نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی در بیهوشی مغز و اعصاب از مرحله اثبات مفهوم فراتر رفته و وارد فاز کاربرد بالینی شده است. شواهد نشان می‌دهد HPI در کارآزمایی‌های تصادفی بروز و مدت هیپوتانسیون را به‌طور معناداری کاهش داده است [۱،۲]. مدل‌های LSTM و Transformer در پیش‌بینی DoA عملکردی دقیق‌تر از مدل‌های داروشناسی کلاسیک داشته‌اند [۳،۵]. سامانه McSleepy کنترل هم‌زمان سه مؤلفه اصلی بیهوشی را در ارزیابی‌های اولیه نشان داده است [۶].

منابع:

1. Wijnberge M, et al. Effect of a machine learning–based early warning system for intraoperative hypotension on time-weighted average mean arterial pressure: a randomized clinical trial. *JAMA*. 2020;323(11):1052–1060.
2. Wijnberge M, et al. Protocol and supplementary analysis of Hypotension Prediction Index (HPI) clinical validation. *BMJ Open*. 2021;11(3):e042947.
3. He Y, et al. Transformer-based prediction of depth of anesthesia during target-controlled infusion of propofol and remifentanyl. *Front Neurosci*. 2023;17:1123956.
4. Li X, et al. Transformers in EEG: architectures and applications—a comprehensive review. *Sensors (MDPI)*. 2023;23(15):6541.
5. Zhang Q, et al. Deep learning for EEG-based real-time depth of anesthesia estimation. *Brain Inform*. 2024;11(2):28.
6. Hemmerling TM, et al. McSleepy: design and clinical evaluation of a closed-loop anesthesia system. *Br J Anaesth*. 2010;104(6):807–814.
7. Taran S, et al. Explainable AI (XAI) for EEG: attention-based interpretation in deep models. *arXiv*. 2024;arXiv:2402.01345.