

A Review of the Relationship between Autonomous Intelligent Vehicles and Human-Computer Vision Interactions

Ali Rahimighasemabadi¹, Mohammadreza Zabihi², Farzad Cheraghpour Samavati³

¹Master's Graduate, Department of Mechanical Engineering, Intelligent Mechanical Systems Research Laboratory, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran
alirahimi69.irn@gmail.com

²Master's Student, Department of Mechanical Engineering, Intelligent Mechanical Systems Research Laboratory, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mohammadreza.zabihi@iau.ir

³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran
farzad.samavati@iau.ac.ir

Abstract

Smart and autonomous vehicles are a smart transportation tool for the well-being of the elderly, patients and people with limited mobility. They connect cars using various technologies, including brain-computer interfaces. In order to receive information about the surrounding environment and examine the data by the embedded computer and make decisions using artificial intelligence and send appropriate commands to the sensors, in order to navigate, detect fixed and moving obstacles, the person with mobility problems does not need to have a companion or manually control the vehicle. The user personalizes all the desired commands and settings. Safe, effective and accurate routing is completely done by the calculations of the embedded computer artificial intelligence tool and sending commands to the sensors.

Keywords

Artificial intelligence, smart transportation, brain-computer interface (BCI), assistive devices, human-computer vision interactions.

مروری بر ارتباط وسایل نقلیه هوشمند خودمختار با تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر

علی رحیمی قاسم آبادی^۱، محمدرضا ذبیحی^۲، فرزاد چراغپور سموتی^۳

^۱دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه های مکانیکی هوشمند، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

alirahimi69.irn@gmail.com

^۲دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه های مکانیکی هوشمند، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mohammadreza.zabihi@iau.ir

^۳استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

farzad.samavati@iau.ac.ir

چکیده

وسایل نقلیه هوشمند و خودمختار، یک ابزار هوشمند حمل و نقل جهت رفاه حال سالمندان، بیماران و افرادی که دارای محدودیت حرکتی هستند میباشد. با استفاده از تکنولوژی های مختلف از جمله رابط های ارتباطی مغز و رایانه ها با ماشین ها متصل می کنند. جهت دریافت اطلاعات محیط اطراف و بررسی داده ها توسط رایانه ی تعبیه شده و تصمیم گیری با استفاده از هوش مصنوعی و ارسال فرمان های متناسب به سنسور ها، به منظور جهت یابی، تشخیص موانع ثابت و متحرک، فرد دچار مشکل حرکتی را از داشتن همراه و یا کنترل دستی وسیله نقلیه بی نیاز میکند. مصرف کننده تمام فرمان ها و تنظیمات مورد نظر را شخصی سازی میکند. مسیر یابی ایمن، موثر و دقیق کاملاً توسط محاسبات ابزار هوش مصنوعی کامپیوتری تعبیه شده و ارسال فرامین به سنسور ها انجام میشود.

کلمات کلیدی

هوش مصنوعی، حمل و نقل هوشمند، رابط مغز و کامپیوتر (BCI)، ابزار کمکی، تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر.

۱- مقدمه

مستقیماً یک محرک خارجی را کنترل کند. مانند یک بازوی رباتیک. به این معنا که کاربران به طور فعال از سیگنال های مغزی خود استفاده می کنند، چه به صورت ارادی یا از طریق پتانسیل های برانگیخته محرک، برای کنترل یک دستگاه بهره می جویند.

دریافت سیگنال در ابتدا به سیگنال های الکتروانسفالوگرافی (EEG) متکی بود، اما همانطور که در [1] مشخص شد، در طول سال ها، چندین روش دیگر مانند مغناطیسی مغزی، طیف سنجی عملکردی مادون قرمز نزدیک (fNIRS)، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی عملکردی (fMRI) مورد بررسی قرار گرفته است. در [2] مروری بر روش های سیگنال مورد استفاده برای BCI ها ارائه می دهد.

رابط های مغز و رایانه (BCIs)، یا به طور کلی، رابط های مغز و ماشین (BMI)، همانطور که از نام ها پیداست، رابط هایی هستند که داده های مربوط به مغز را به رایانه ها یا ماشین ها متصل می کنند. در این فناوری، مغز (معمولاً انسان، اما نه همیشه) به دستگاه های خارجی متصل میشود تا سیگنال های عصبی را به دستوراتی قابل اجرا برای کنترل رایانه ها، اندام های مصنوعی یا سایر تجهیزات تبدیل کند. همانطور که در ابتدا در اواخر دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ پیشنهاد شد، BCIs/BMI ها به عنوان فناوری های کمکی مورد هدف قرار گرفتند که کانال های ارتباطی و کنترل عادی بدن انسان (یعنی اعصاب و عضلات محیطی) را دور زده و به ضبط از مغز اجازه می دهد تا

متقابل نامیده می شود و به تفصیل در [9] توضیح داده شده است. این به شدت دقت BCI های واکنشی را بر اساس، به عنوان مثال پتانسیل های برانگیخته بصری در طیف وسیعی از افراد [10]، بهبود بخشیده است. در اوایل دهه ۲۰۱۰، تعریف BCI گسترش یافت تا به اصطلاح "BCI های غیرفعال" را نیز شامل شود. در این مورد، فعالیت عصبی با استفاده از اکتساب سیگنال و مازول های پردازش و تجزیه و تحلیل سیگنال نظارت می شود، اما لزوماً نیازی به بازخورد فعال بلادرنگ از طریق محرک ها ندارند، بلکه به خواندن وضعیت ذهنی ضمنی کاربر (مثلاً سطح توجه) نیاز دارند. خط چین سبز در شکل ۱ بلوک های درگیر در یک BCI غیرفعال را نشان می دهد. این تعریف اصلاح شده به این صورت است: «رابط مغز و رایانه سیستمی است که فعالیت سیستم عصبی مرکزی (CNS) را اندازه گیری می کند و آن را به خروجی مصنوعی تبدیل می کند که جایگزین، بازایی، تقویت، مکمل یا بهبود خروجی طبیعی CNS می شود و در نتیجه تعاملات مداوم بین دستگاه های عصبی مرکزی را تغییر می دهد» [11].

در این فصل، پیش زمینه مختصری از BCI های فعال/واکنشی، غیرفعال و ترکیبی ارائه می کنیم، و پس از آن شرحی از پیشرفته ترین فناوری های امروزی در هر یک از این حوزه ها نیز ارائه می کنیم. به عنوان کاربردهای نوظهور و چالش های تحقیقاتی. هدف از این بحث ارائه دیدگاهی مختصر از این موضوعات به خواننده و در صورت لزوم، ارجاع خواننده علاقه مند به آثار منتشر شده است که دید عمیق تری در مورد مفاهیم و ایده های مختلف ارائه می دهد.

۲- تاریخچه

با اختراع الکتروانسفالوگرام (EEG) در اوایل قرن بیستم توسط هانس برگر [12] تخیل انسان را از ارتباط از طریق فعالیت مغزی روشن کرد. عبارت "رابط مغز و کامپیوتر" برای سیستمی که مغز انسان و کامپیوتر را به هم متصل می کند توسط ویدال در سال ۱۹۷۷ معرفی شد، که اولین برنامه BCI را با یک شیء مکان نما بر روی صفحه نمایش کامپیوتر که با استفاده از EEG کنترل می شود، ارائه کرد. از آن زمان به بعد، EEG روش اصلی مورد استفاده برای به دست آوردن سیگنال های مغزی باقی مانده است، علیرغم این واقعیت که سیگنال های EEG نویز، غیر ثابت، پیچیده و با ابعاد بالا هستند [13]. در ادامه، درک بشر از ارتباط الکتریسته با عملکرد مغز به تدریج عمیق تر شد [14]. در این میان، سه مطالعه مهم در آغاز قرن بیستم انجام گرفت:

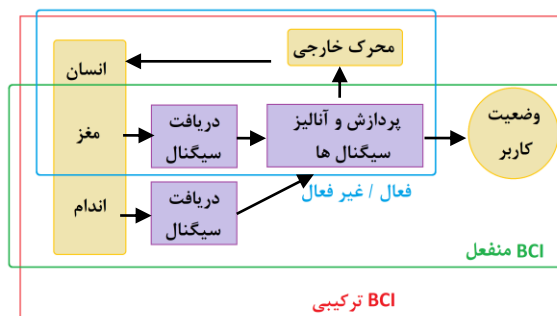
نخستین پژوهش توسط ولادیمیر ولادیمیریوچ پراویدچ-نمینسکی در سال ۱۹۱۳ صورت گرفت که اولین عکس از پتانسیل های الکتریکی درون مغز یک حیوان را ثبت کرد.

بلوک بعدی در یک سیستم BCI شامل مازول پردازش و تجزیه و تحلیل سیگنال است که در آن مصنوعات سیگنال حذف می شوند، بینش های مرتبط از سیگنال ها استخراج می شوند، و سپس با استفاده از یک الگوی یادگیری ماشین به یک تصمیم نگاشت می شوند. پارامترهای استخراج شده اغلب «ویژگی ها» نامیده می شوند و به روش سیگنال مورد استفاده بستگی دارند [3] و [4]. اخیراً، با پیشرفت در یادگیری عمیق و شبکه های عصبی عمیق، این مراحل با یک شبکه عصبی عمیق جایگزین شده اند. یک بررسی را می توان در [5] یافت.

رابطهای مغز-رایانه بر اساس نحوه تعامل با مغز به دو دسته تقسیم میشوند:

تهاجمی (Invasive): شامل الکترودهایی است که با جراحی روی سطح یا داخل مغز کار گذاشته میشوند.

غیرتهاجمی (Non-invasive): از حسگرهای خارجی مانند الکترودهای EEG برای ثبت سیگنالهای مغزی استفاده میکنند. با وجود ایمنی و کاربردی بودن بیشتر، این روشها با مشکلاتی مانند افت کیفیت سیگنال و نویزهای محیطی مواجه اند که دقت تفسیر و کاربرد را کاهش میدهد.

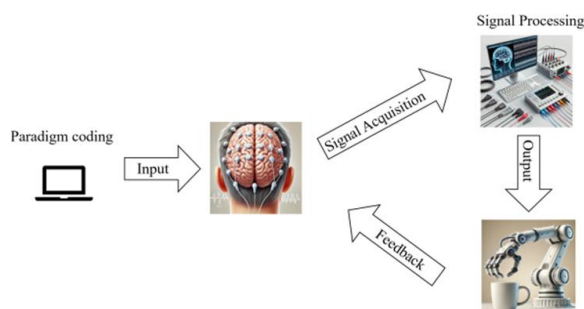


شکل (۱): بلوک دیاگرام انواع مختلف BCI، از جمله فعال/غیر فعال (آبی)، غیرفعال (سبز)، و ترکیبی (قرمز).

در نهایت، خروجی های طبقه بندی کننده می توانند اهداف متعددی را انجام دهند. در BCI های فعال/غیر فعال کلاسیک، برای کنترل محرک هایی که به عنوان بازخورد به کاربر عمل می کنند، استفاده می شود. اینها معمولاً شامل اسکلت های بیرونی روباتیک، نشانگرهای رایانه، اندام های روباتیک، هواپیماهای بدون سرنشین، صندلی های چرخدار [6] و با کمک تحریک الکتریکی عملکردی، ماهیچه های کاربر هستند. همانطور که در [7] مشخص شد، کنترل قابل اعتماد یک BCI برای همه مناسب نیست و اصطلاح BCI بی سواد برای توصیف کسانی که قادر به کار با BCI نیستند استفاده شده است. این اصطلاح مورد انتقاد قرار گرفته است زیرا فرض می کند که این موضوع مربوط به عدم برخورداری کاربران از ویژگی های فیزیولوژیکی یا عملکردی مورد نیاز برای عملکرد BCI است. ادبیات جدیدتر نشان داده است که کاربران و BCI ها باید با هم "یاد بگیرند" [8]، مفهومی که یادگیری

۲-۱- اجزای سیستم های BCI

شکل 3 نمای شماتیک یک سیستم رابط مغز و رایانه (BCI) را نشان می دهد. اجزای سیستم های BCI را می توان به چهار بخش اصلی تقسیم کرد:



شکل (۳): معماری سیستم BCI

۲-۱-۱- دریافت سیگنال

کارایی یک سیستم BCI عمدتاً به ماژول دریافت سیگنال آن وابسته است؛ همچنین این ماژول نقش کلیدی ایفا می کند، چرا که این سیستم وظایف ذهنی یا محرک های خارجی مورد استفاده برای ایجاد الگوهای متمایز سیگنال مغز و ثبت سیگنال های مغزی را تعریف می کند.

۲-۱-۲- پردازش

این بخش با استفاده از روش ها و الگوریتم های تخصصی، فعالیت مغزی ثبت شده را تحلیل کرده و عملیات مورد نظر کاربر را تفسیر می کند.

۲-۱-۳- خروجی

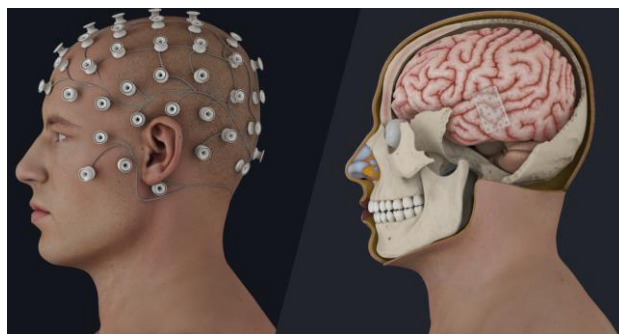
هدف این بخش، اجرای عملیات مورد نظر کاربر است که معمولاً از طریق یک بازوی رباتیک یا صفحه کلید مجازی با استفاده از اطلاعات پردازش شده در مرحله قبل محقق می شود.

۲-۱-۴- فیدبک

این بخش، کاربر را از تفسیر سیستم نسبت به عملیات مورد نظرش آگاه می کند و نتایج نهایی اجرا را از طریق اشکال مختلف حسی مانند بازخورد بصری یا شنیداری انتقال می دهد. این ویژگی امکان تنظیم و اصلاح را فراهم کرده و از طراحی حلقه بسته (closed-loop) پشتیبانی می کند.

۲-۲- BCI های فعال / واکنشی

BCI فعال خروجی های خود را از فعالیت مغزی که به طور مستقیم و آگاهانه توسط کاربر کنترل می شود، مستقل از رویدادهای خارجی، برای کنترل یک برنامه به دست می آورد. رایج ترین کار ذهنی مورد استفاده، تصویرسازی حرکتی است، جایی که فرد تصور می کند دست ها و پاهای خود را حرکت می دهد و این حرکات تصویری یک پاسخ مرتبط با رویداد (ERP) روی



شکل (۲): سیستم ۱۰-۲۰ قرار گیری الکتروود های EEG

دومین مطالعه توسط هانس برگر انجام شد که در سال ۱۹۲۹ موفق به کشف امواج آلفا و بتا در مغز شد [15].

سومین مطالعه مهم در سال ۱۹۴۷ انجام شد. در این پژوهش، سیستم ۱۰-۲۰ برای قرارگیری الکتروود های EEG معرفی گردید که امروزه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، الکتروودها بر روی پوست سر به گونه ای قرار می گیرند که فاصله هر یک از دیگری ۱۰ یا ۲۰ درصد از کل فاصله طولی یا عرضی سر باشد. [16]

اولین BCI ها عمدتاً به عنوان ابزارهای ارتباطی برای حمایت از بیماران شدیداً آسیب دیده توسعه داده شدند، اما برنامه های کاربردی مدرن BCI همچنین ممکن است برای جایگزینی، بازبایی، تقویت، تکمیل یا بهبود خروجی های طبیعی سیستم عصبی مرکزی استفاده شوند. سیستم های BCI مدرن را می توان به روش های مختلفی دسته بندی کرد، به عنوان مثال. وابسته/مستقل، برون ز/ا درون ز، همزمان/ناهمزمان، یا تهاجمی/غیر تهاجمی، افراد علاقه مند برای اطلاع از جزئیات بیشتر به [17] مراجعه کنند.

در اینجا، ما بر طبقه بندی نوع مدالیت مورد استفاده و کاربرد هدفمند تمرکز می کنیم و آنها را فعال/واکنشی، غیرفعال و یا ترکیبی می سازیم. جدول ۱ چند نمونه معرف و حوزه های کاربردی برای این انواع مختلف BCI را خلاصه می کند.

جدول (۱) : نمونه های معرف، کاربردهای موجود و در حال ظهور انواع

مختلف BCI.

BCI type	Emerging applications	Existing applications	Representative examples
Active	Exoskeletons	Wheelchair control, stroke rehabilitation, gaming	Mental imagery: motor, word generation, mental rotation, subtraction, singing, navigation, and face imagery; ErrPs
Passive	Affective neurofeedback, VR gaming	Neuromarketing, quality assessment, neuroeconomics, arts, adaptive interfaces, BCI error correction	Mental workload, stress, attention, fatigue, engagement, ErrP
Hybrid	Aviation, VR gaming	Environment robustness, improved BCI accuracy, wheelchair control	Pure (e.g. SSVEP and hemoglobin concentration), physiological (e.g. heart rate/P300), mixed (e.g. joystick/ERP)

در کانون توجه قرار داده است، زیرا مزایایی را نسبت به سیستم های مبتنی بر EEG ارائه می دهد، مانند کاهش حساسیت به مصنوعات حرکتی. در چند سال گذشته، تعدادی از سیستم های BCI غیرفعال مبتنی بر fNIRS پیشنهاد شده اند [28]. با این حال، اغلب اوقات، با توجه به وضوح زمانی ضعیف سیستم های fNIRS، آنها در ترکیب با سیستم های EEG استفاده می شوند که وضوح فاصله زمانی خوب (اما فواصل فضایی ضعیف) ارائه می دهند. این سیستم های ترکیبی "هیبرید" نامیده می شوند و تمرکز بخش بعدی هستند.

۲-۴- BCI های ترکیبی

BCI های ترکیبی (hBCI) به روش های متعددی متکی هستند که حداقل یکی از آنها BCI است [29]. BCI های ترکیبی را می توان بر اساس روش های مورد استفاده طبقه بندی کرد، از جمله (الف) hBCI خالص، که در آن از روش های مختلف سیگنال عصبی استفاده می شود (مانند SSVEP و ERP از EEG یا P300 از EEG و غلظت هموگلوبین اکسیژنه از fNIRS)، (ب) hBCI فیزیولوژیکی، که در آن یک مدالیته عصبی با یک روش غیر عصبی دیگر (مانند ضربان قلب، EMG و نگاه چشم) همراه است. (پ) hBCI مختلط، که در آن یک سیگنال غیر روانی فیزیولوژیکی با یک سیگنال عصبی همراه است (مثلاً پاسخ جوی استیک یا سیگنال شتاب سنج). BCI های ترکیبی معمولاً ترکیبی از دو BCI فعال یا یک فعال و یک غیرفعال هستند، اگرچه hBCI های غیرفعال - غیرفعال وجود دارند و برای بهبود استحکام نظارت بر وضعیت ذهنی با استفاده از مکمل بودن روش های سیگنال مختلف پیشنهاد شده اند.



شکل (۴): جمع آوری داده های EEG (الکتروانسفالوگرافی) [30]

در رویکردهای "مکمل"، سیگنال ها در سطوح ویژگی یا تصمیم ترکیب می شوند تا دقت و یا استحکام BCI را بهبود بخشند. به عنوان مثال، در [19]، ویژگی های EEG و fNIRS برای بهبود دقت کلی فعال BCI ترکیب شدند، از این رو، منجر به یک hBCI خالص شد. در [31]، به نوبه خود، سیگنال های fNIRS با سیگنال های قلبی و تنفسی ترکیب شدند تا سیستم فعال BCI را در برابر عوامل حواس پرتی و محیطی قوی تر کنند. این یک hBCI فیزیولوژیکی تشکیل می دهد. علاوه بر این، در [32]، hBCI های فیزیولوژیکی به ترتیب برای نظارت بر وضعیت ذهنی منفعل بر حجم کار

قشر حسی حرکتی ایجاد می کند. فعال سازی توسط BCI شناسایی می شود و بازخورد مستقیم از طریق تحریک عضلانی، برای تأیید تصمیم به کاربر داده می شود [18]. انواع دیگر تصویرسازی ذهنی نیز رایج است، از جمله تولید کلمه، چرخش ذهنی، تفریق، آواز خواندن و مسیریابی، و تصویرسازی چهره [19].

یک BCI واکنشی، به نوبه خود، خروجی های خود را از فعالیت مغز ناشی از واکنش به تحریک خارجی می گیرد، که به طور غیرمستقیم توسط کاربر برای کنترل یک برنامه مدوله می شود. به عنوان مثال، پتانسیل های برانگیخته P300 و پتانسیل های برانگیخته بصری حالت پایدار (SSVEP)، پرکاربردترین رویکردهای BCI واکنشی هستند [20].

BCI SSVEP ها به نوبه خود بر این اصل تکیه می کنند که وقتی شبکه توسط یک محرک بصری که با فرکانس خاصی چشمک می زند برانگیخته می شود، مغز فعالیت الکتریکی را در همان فرکانس تولید می کند، که سپس می تواند توسط یک BCI با قرار دادن اشیاء روی یک صفحه، که هر کدام با سرعت متفاوتی سوسو می زنند، می توان تشخیص فرکانس های مختلف را به دستورات مختلف تبدیل کرد. به عنوان مثال، چهار فلش که با سرعت های مختلف چشمک می زند می تواند برای هدایت یک ربات به یکی از چهار جهت مختلف استفاده شود [21]. اخیراً، پتانسیل های برانگیخته بصری حرکت حالت پایدار (SSMVEP) نیز به عنوان یک روش BCI مورد بررسی قرار گرفته اند. چنین BCI هایی مشابه نمونه های SSVEP عمل می کنند، اما با این تفاوت اصلی که محرک SSMVEP به آرامی از نظر ظاهری با یک حرکت پیوسته تغییر می کند (بر خلاف فلاش های سریع)، و نشان داده شده است که این باعث کاهش خستگی کاربر می شود [22].

۲-۳- BCI های غیرفعال

BCI های غیرفعال الگوهای فعالیت ذهنی را کنترل می کنند که به کنترل ارادی مانند BCI های فعال مربوط نمی شود، بلکه در عوض به حالات ذهنی ضمنی کاربر برای بهبود تعامل انسان و ماشین مربوط می شود. از چنین رابط هایی به عنوان BCI های عاطفی یا شناختی نیز یاد می شود و خواننده علاقه مند برای جزئیات بیشتر میتواند به [23] مراجعه کند.

پتانسیل های مرتبط با خطا (ErrP)، به عنوان مثال امضاهای عصبی نماینده پردازش خطا (به عنوان مثال کاربر یک انتخاب اشتباه را درک می کند) نیز توسط برخی به عنوان یک روش BCI غیرفعال طبقه بندی شده است که برای نظارت استفاده می شود، به عنوان مثال حالات انسان در تعاملات انسان و ربات [24]. با این حال، در برنامه های دیگر، آنها به عنوان خلبانانی در طول پرواز [25]. با این حال، در برنامه های دیگر، آنها به عنوان یک روش BCI فعال در نظر گرفته می شوند، زیرا ErrP های شناسایی شده برای پاک کردن خودکار خطاهای ایجاد شده توسط BCI فعال استفاده می شوند که همچنین می تواند منجر به بهبود نرخ انتقال اطلاعات BCI شود. مروری بر استفاده از ErrPs برای BCI ها را می توان در [26]، و استفاده از آنها در برنامه های کاربردی فعال و غیرفعال را می توان در [27] یافت.

در حالی که EEG هنوز روش اصلی مورد استفاده برای BCI های غیرفعال باقی می ماند، ظهور دستگاه های fNIRS قابل حمل این روش را

برای سوالات ساده بله/خیر پاسخ دهد و نشان داده شده است که با موفقیت در بیماران مبتلا به اختلالات هوشیاری آزمایش شده است [37]. علاوه بر سیستم های اصلی P300 و SSVEP، انواع دیگری مانند c-VEP، RVSP نیز وجود دارند که هر کدام پایه عصبی-فیزیولوژیکی خاص خود را دارند [38,39].

۳-۲- BCI های غیرفعال

BCI های غیرفعال در دهه گذشته به عنوان دستگاه های بی سیم محبوبیت پیدا کرده اند و گسترده تر شده اند. BCI غیرفعال بر تشخیص و تفسیر حالت های غیرارادی عاطفی یا شناختی کاربر تمرکز دارند، نه دستورات عمدی آنها. امروزه ما شاهد کاربردهایی در هوانوردی، دریایی، حمل و نقل، نظارت بر عملکرد انسانی، بازاریابی، مدل سازی کیفیت تجربه چندرسانه ای و در محیط های کار هستیم. علاوه بر این، سیستم های EEG به دلیل هزینه نسبی کم، قابل حمل بودن و پیشرفت های اخیر مشاهده شده، محبوب ترین باقی مانده اند. در فناوری "الکتروکسک" با وجود این، سیستم های fNIRS قابل حمل در طول پنج سال گذشته پدیدار شده اند، بنابراین این روش اخیراً گسترش یافته است، به ویژه در شرایطی که مصنوعات حرکتی ممکن است عملکرد سیستم را مختل کنند. مروری بر BCI های غیرفعال برای نوروفیدبک عاطفی را می توان در [40] مشاهده کرد.

همچنین حالت های مختلف دیگری از BCI های غیر فعال علاوه بر نوروفیدبک عاطفی وجود دارد:

سیستم های نظارتی حالت توجه، سیگنال های مغزی کاربر را به صورت بلادرنگ تحلیل می کنند تا سطح توجه فعلی آنها را تعیین کنند [41]. تکنیک های مورد استفاده معمولاً شامل اندازه گیری پتانسیل های وابسته مانند موج P300 است که فرآیندهای توجهی را منعکس می کند.

سیستم های نظارتی حالت خواب به طور پیوسته سیگنال های مغزی کاربر را برای ارزیابی مراحل خواب و کیفیت کلی آن تحلیل می کنند. این سیستم ها می توانند تشخیص دهند کاربر در کدام چرخه خواب (REM یا non-REM) قرار دارد و همچنین رویدادهای مختلف خواب را شناسایی کنند [42]. این اطلاعات برای بهبود کیفیت خواب و تشخیص اختلالات خواب ارزشمند است.

سیستم های نظارتی حالت خستگی، خستگی ذهنی کاربر را با تحلیل بلادرنگ سیگنال های مغزی ارزیابی می کنند. شاخص های خستگی شامل افزایش قدرت موج تتا (۷-۴ هرتز) و کاهش قدرت موج آلفا (۱۳-۸ هرتز) در EEG [43] است. با نظارت بر این تغییرات، سیستم می تواند به بهبود کارایی، پیشگیری از حوادث و بهینه سازی انتخاب های سبک زندگی کمک کند.

سیستم های نظارتی حالت بیهوشی در حین عمل، سیگنال های مغزی بیمار را به صورت لحظه ای تحلیل می کنند تا عمق و حالت بیهوشی را به طور پیوسته ارزیابی کنند. این سیستم ها به متخصصان بیهوشی در نظارت بر سطح هوشیاری بیمار کمک می کنند و ایمنی و اثربخشی بیهوشی در حین عمل را تضمین می کنند [44]. ویژگی های کلیدی EEG شامل الگوهای سرکوب انفجاری و تغییرات در قدرت طیفی است.

۳-۳- BCI هیبریدی

ذهنی و استرس استفاده شد. در نهایت، در [33]، سیگنال های EEG مبتنی بر P300 برای کنترل جهت حرکت ویلچر استفاده شد، در حالی که حسگرهای ناوبری تعبیه شده در خود صندلی برای توقف و یا اصلاحات اضطراری استفاده می شود.

از سوی دیگر، رویکردهای متوالی به عنوان «سوئیچ ها» یا «انتخاب کننده ها» عمل می کنند و به ترتیب برای فعال کردن/غیرفعال کردن یا انتخاب از بین گزینه های چندانگانه از سایر روش ها، به یک مدالیته BCI متکی هستند. به عنوان مثال، در [34]، بسیاری از روش هایی را که برای کنترل ویلچر پیشنهاد شده است، برجسته می کند. به عنوان مثال، کار در [35] یک روش سوئیچ متوالی را پیشنهاد کرد که در آن سیگنال های P300 برای تحریک حرکت ویلچر و به دنبال آن یک BCI مبتنی بر ERP که برای کنترل سرعت استفاده می شود، استفاده شده، بنابراین، یک hBCI متوالی را تشکیل می دهد. در [36]، سیگنال ERD برای کنترل جهت ویلچر (به جلو یا عقب) استفاده شده، که سپس یکی از سه سیستم مکمل ممکن را فعال می کند: ERD/ERS برای چپ/راست، P300 برای شتاب دادن/کاهش سرعت و روشی مبتنی بر پلک زدن برای توقف صندلی چرخدار. از این رو، یک hBCI فیزیولوژیکی را تشکیل می دهد.

۳- پیشرفت ها و برنامه های کاربردی اخیر

پیشرفت در فناوری های حسگر، ابزارهای یادگیری ماشین و خطوط پردازش سیگنال منجر به پیشرفت های بزرگی در فناوری های BCI در دهه گذشته شده است. آخرین ستون جدول ۱ برخی از برنامه های در حال ظهور را فهرست می کند. در اینجا، جزئیات بیشتری در مورد تعدادی از این نوآوری ها ارائه می شود.

۳-۱- BCI های فعال/واکنش

BCI های مبتنی بر تصویرسازی حرکتی اغلب برای توانبخشی سکتی مغزی اندام های فوقانی و تحتانی استفاده می شوند. در این حالت به فرد دستور داده می شود که حرکت خاصی را تصور کند و سیستم BCI آن را تشخیص می دهد. سپس تحریک الکتریکی عملکردی یا یک حرکت اسکلت بیرونی توسط سیستم BCI برای ارائه بازخورد به کاربر ایجاد می شود. این فرآیند بارها برای ایجاد پلاستیسیته مغز، کاهش اسپاستیسیته و بازگرداندن حرکات بیماران تکرار می شود. BCI ها بر اساس توانایی طبیعی مغز در پردازش و پاسخ به اطلاعات بصری طراحی شده اند و از پاسخ های مغزی خاصی که به طور قابل اعتماد با EEG قابل اندازه گیری هستند، بهره می برند. علاوه بر کاربردهای املائی که قبلاً توضیح داده شد، سیستم های BCI مبتنی بر P300 در حال حاضر به عنوان ابزار ارزیابی برای بیماران مبتلا به اختلالات هوشیاری استفاده می شود. در این حالت از تحریکات لمسی ارتعاشی در مچ دست چپ و راست استفاده می شود. به بیمار دستور داده می شود تا ارتعاشات مچ دست چپ یا راست را بشمارد و هنگامی که ارتعاش در دست هدف اتفاق می افتد سیگنال P300 تولید می شود، در حالی که یک پتانسیل استاندارد مرتبط با رویداد برای دست غیرهدف مشاهده می شود. بسته به نتایج، یک BCI می تواند

چارچوب دو بعدی با هم وجود داشته باشند. از آنجا که رانندگان و مسافران در وسایل نقلیه دید محدودی دارند. وسایل نقلیه هوشمند باید به آنها در درک دنیای خارج از وسایل نقلیه کمک کنند. همچنین خودروهای هوشمند نیاز به دریافت دستورالعمل از انسان و برآوردن خواسته های آنها دارند.

۴-۱- بازخورد اطلاعاتی از وسایل نقلیه هوشمند

چرخه عمر وسایل نقلیه هوشمند را می توان به چهار مرحله تقسیم کرد: توسعه وسیله نقلیه، ساخت خودرو، تنظیم اولویت و استفاده از وسیله نقلیه. برای جستجوی وسایل نقلیه هوشمند قابل اعتماد، ایمن و قابل اعتماد، باید از تعاملات تصویری انسان و رایانه استفاده کرد. وسایل نقلیه هوشمند می توانند اطلاعات را از طریق کانال های متعدد مانند تصاویر، صداها و دما به انسان بازخورد دهند. در میان آنها، تصاویر کارآمدترین راه برای نمایش اطلاعات پیچیده هستند. در [51] یک روش برچسب گذاری خارجی برای بهینه سازی نمایش POI در یک صفحه کوچک پیشنهاد می کند.

۴-۲- رانندگی با هدایت انسان

دستورات انسان به ماشین ممکن است نادرست باشد، به خصوص زمانی که انسان هوشیار نیست یا وحشت زده است. با افزایش سطح اتوماسیون، برای ارائه کمک متناسب، وسایل نقلیه هوشمند باید اهداف رانندگان را درک کنند. وسایل نقلیه هوشمند موجود می توانند دستورالعمل های ساده بیان شده توسط صدا یا زبان بدن را درک کنند [52]. در شرایط خاص که راننده قادر به هدایت وسیله نیست، وسایل نقلیه هوشمند باید به سرعت کنترل را به دست گیرند. محققان تلاش کرده اند با نظارت بر حرکات چشم رانندگان وضعیت آنها را استنباط کنند [53].

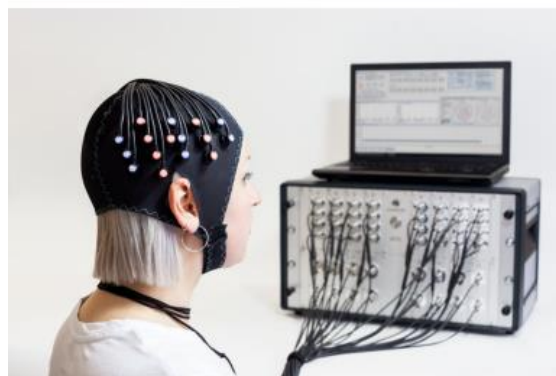
۴-۳- VHCI در وسایل نقلیه

هر وسیله نقلیه هوشمند می تواند از یک سیستم حمل و نقل هوشمند سازمان یافته (ITS) بهره مند شود. داده های ترافیکی عظیم جمع آوری شده توسط حسگرهای مختلف برای ساخت یک سیستم حمل و نقل هوشمند کارآمد به کار گرفته می شود. درک و تجزیه و تحلیل چنین داده هایی نیاز به پشتیبانی تکنیک های تجسم دارد. به عنوان مثال، در [54] یک رویکرد تحلیل بصری برای نظارت بر تراکم ترافیک و جستجوی راه حل های مربوطه پیشنهاد کرد. محققان در [55] یک رابط بصری ایجاد کردند که از برنامه ریزی ترافیک پشتیبانی می کند که بر اساس آن استقرار بیدرنگ وسایل نقلیه هوشمند می تواند در سطح کلان پیاده سازی شود.

۴-۴- VHCI و هوش مصنوعی

فراتر از وسایل نقلیه، رویکردهای هوش مصنوعی (AI) برای کارهای مختلف مرتبط با وسیله نقلیه، از جمله تشخیص چراغ راهنمایی، اجتناب از موانع، و برنامه ریزی مسیر اعمال می شود. با این حال، اکثر رویکردهای هوش مصنوعی به عنوان جعبه سیاه در نظر گرفته می شوند که درک آنها دشوار است. برای ارزیابی عملکرد مدل و درک مکانیک مدل، از رویکردهای

ساخت BCI با یک مدالیتی واحد دارای محدودیت های متعددی است، اما نه محدود به دقت پایین تر، سرعت تشخیص آهسته تر، افزایش حساسیت به برخی مصنوعات (مانند حرکت یا محیط مرتبط)، و تأثیر بیشتر آشفتگی های مختلف (مانند فعالیت و خستگی). رویکردهای ترکیبی با در نظر گرفتن یک دیدگاه چندوجهی در تلاش برای غلبه بر این محدودیت ها هستند. hBCI های خالص مبتنی بر دو یا چند روش EEG همچنان محبوب ترین هستند، به ویژه برای BCI های فعال/واکنش. EEG و fNIRS به نوبه خود نشان داده اند که در مورد BCI های ترکیبی خالص برای هر دو برنامه فعال و غیرفعال محبوب ترین ها هستند. در واقع، برخی از کارها پیشنهاد کرده اند که از EEG و fNIRS در یک رویکرد غیرفعال hBCI فیزیولوژیکی استفاده می شود که در آن اطلاعات ضربان قلب مشتق شده از سیگنال fNIRS به عنوان روش سوم استفاده می شود که دقت بهبود یافته را در اندازه گیری واکنش های احساسی کاربر نشان می دهد. برنامه های کاربردی در هوانوردی، BCI های فعال خارج از آزمایشگاه، کنترل ویلچر و بازی های واقعیت مجازی نمونه ای از کاربردهای اخیر hBCI هستند. [45]



شکل (۵): جمع آوری داده های fNIRS [46]

۴-تاریخچه تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر (VHCI)

وسایل نقلیه هوشمند از جنبه های مختلف از جمله اجتناب از برخورد با عابر پیاده، و شناسایی علائم راهنمایی و رانندگی به رانندگان کمک می کنند. تکنیک های پیشرفته، مانند هوش مصنوعی [47] و بلاک چین [48]، برای بهینه سازی خدمات خودکار وسایل نقلیه هوشمند و جایگزینی نیروی انسانی به کار گرفته می شود. با این حال، افزایش سطح خودمختاری و اتوماسیون بالا ممکن است هوشیاری رانندگان را کاهش دهد و باعث تصادف شود. برای پرداختن به این موضوع، حمایت از ارتباط بین وسایل نقلیه هوشمند و انسان ها ضروری است. تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر (VHCI) می تواند با بهره گیری از کانال شناخت بصری انسان، تعاملات موثر و کارآمدی را تسهیل کند. دخالت انسان و استقلال وسایل نقلیه هوشمند ابتدا به عنوان متضاد در نظر گرفته شد. با افزایش اتوماسیون، نقش انسان به تدریج جای خود را به وسایل خودمختار داد [49]. این دیدگاه در سال ۲۰۲۰ رد شد. با در نظر گرفتن اینکه انسان و رایانه دارای نقاط قوت مکمل هستند اشنایدرمن [50] امکان جدیدی را پیشنهاد کرد که مشارکت انسانی و استقلال رایانه می توانند در یک

- [4] Lotte F, Bougrain L, Cichocki A, Clerc M, Congedo M, Rakotomamonjy A, Yger F. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. *Journal of neural engineering*. 2018 Apr 16;15(3):031005.
- [5] Roy Y, Banville H, Albuquerque I, Gramfort A, Falk TH, Faubert J. Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review. *Journal of neural engineering*. 2019 Aug 14;16(5):051001.
- [6] Trambaiolli LR, Falk TH. Hybrid brain-computer interfaces for wheelchair control: a review of existing solutions, their advantages and open challenges. *Smart wheelchairs and brain-computer interfaces*. 2018 Jan 1:229-56.
- [7] Allison B, Graimann B, Pfurtscheller G. *Brain-Computer Interfaces: Revolutionizing Human-Computer Interaction*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer; 2010.
- [8] McFarland DJ, Wolpaw JR. Brain-computer interface use is a skill that user and system acquire together. *PLoS biology*. 2018 Jul 2;16(7):e2006719.
- [9] Perdikis S, Millan JD. Brain-machine interfaces: a tale of two learners. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*. 2020 Jul 15;6(3):12-9.
- [10] Volosyak I, Rezeika A, Benda M, Gembler F, Stawicki P. Towards solving of the Illiteracy phenomenon for VEP-based brain-computer interfaces. *Biomedical Physics & Engineering Express*. 2020 Apr 30;6(3):035034.
- [11] Wolpaw JR. Brain-computer interfaces. In *Handbook of clinical neurology* 2013 Jan 1 (Vol. 110, pp. 67-74). Elsevier.
- [12] Berger H. Über das elektroencephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*. 1929;87(1):527-70.
- [13] Lotte F, Congedo M, Lécuyer A, Lamarche F, Arnaldi B. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of neural engineering*. 2007 Jan 31;4(2):R1.
- [14] Brazier MA. Pioneers in the discovery of evoked potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*. 1984 Feb 1;59(1):2-8.
- [15] Kawala-Sterniuk A, Browarska N, Al-Bakri A, Pelc M, Zygarlicki J, Sidikova M, Martinek R, Gorzelanczyk EJ. Summary of over fifty years with brain-computer interfaces—a review. *Brain sciences*. 2021 Jan 3;11(1):43.
- [16] Silverman D. The rationale and history of the 10-20 system of the International Federation. *American Journal of EEG Technology*. 1963 Mar 1;3(1):17-22.
- [17] Rezeika A, Benda M, Stawicki P, Gembler F, Saboor A, Volosyak I. Brain-computer interface spellers: A review. *Brain sciences*. 2018 Mar 29;8(4):57.
- [18] Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomedical engineering online*. 2020 May 24;19(1):34.
- [19] Banville H, Gupta R, Falk TH. Mental task evaluation for hybrid NIRS-EEG brain-computer interfaces. *Computational intelligence and neuroscience*. 2017;2017(1):3524208.

VHCI برای تفسیر رویکردهای هوش مصنوعی استفاده می شود. مربع ها خروجی مدل های طبقه بندی چند طبقه را خلاصه می کنند، که به انسان اجازه می دهد عملکرد مدل را مقایسه کرده و نقاط ضعف خود را شناسایی کند. به دنبال بهبود عملکرد، انسان ها نیاز به بهینه سازی معماری مدل دارند. برای حمایت از انسان در بازرسی معماری های پیچیده شبکه های عصبی، TensorFlow Graph Visualizer [56] رابطی را توسعه می دهد که از تکنیک های پیشرفته برای طرح بندی نمودار استفاده می کند. CNN Explainer [57] بیشتر توضیح می دهد که چگونه داده ها در یک شبکه عصبی کانولوشن تبدیل می شوند.

۵- نتیجه

در این مقاله پیشرفت های اخیر در حوزه ی رابط های فعال، واکنشی، غیرفعال و ترکیبی مغز و رایانه (BCIs) را مرور کردیم و برخی از برنامه های موجود و در حال ظهور به نمایش گذاشته شد. BCI ها با استفاده از سیگنال های عصبی، امکان کنترل مستقیم دستگاه های خارجی را فراهم می کنند و در حوزه های پزشکی، توانبخشی، و حتی صنایع پیشرفته مانند رباتیک و هوانوردی کاربرد دارند. از سوی دیگر، VHCI با بهره گیری از پردازش تصویر و هوش مصنوعی، تعامل طبیعی تر و کارآمدتری بین انسان و سیستم های کامپیوتری ایجاد می کند، به ویژه در زمینه هایی مانند وسایل نقلیه هوشمند و سیستم های حمل و نقل. پیشرفت های اخیر در یادگیری ماشین، پردازش سیگنال های عصبی، و فناوری های حسگر، دقت و کارایی این سیستم ها را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. با این حال، چالش هایی مانند کاهش نویز سیگنال های غیرتهاجمی، افزایش سرعت پردازش، و بهبود تعامل متقابل انسان و ماشین همچنان باقی است. در آینده، ادغام BCI و VHCI با فناوری های نوظهور مانند واقعیت مجازی و اینترنت اشیا می تواند افق های جدیدی را در تعامل انسان و فناوری بگشاید و زمینه را برای کاربردهای پیشرفته تر در پزشکی، صنعت، و زندگی روزمره فراهم کند. ما با چشم اندازی از جهت های تحقیقاتی آینده، از جمله ارتباطات مغز به مغز و هدست های واقعیت توسعه یافته ادغام شده با BCI، نتیجه گیری می کنیم.

منابع

- [1] Lebedev MA, Nicolelis MA. Brain-machine interfaces: from basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiological reviews*. 2017 Apr;97(2):767-837.
- [2] Ramadan RA, Vasilakos AV. Brain computer interface: control signals review. *Neurocomputing*. 2017 Feb 5;223:26-44.
- [3] Meinel A, Castaño-Candamil S, Blankertz B, Lotte F, Tangermann M. Characterizing regularization techniques for spatial filter optimization in oscillatory EEG regression problems: Guidelines derived from simulation and real-world data. *Neuroinformatics*. 2019 Apr 15;17(2):235-51.

- [34] Trambaiolli LR, Falk TH. Hybrid brain-computer interfaces for wheelchair control: a review of existing solutions, their advantages and open challenges. *Smart wheelchairs and brain-computer interfaces*. 2018 Jan 1:229-56.
- [35] Rebsamen B, Burdet E, Zeng Q, Zhang H, Ang M, Teo CL, Guan C, Laugier C. Hybrid P300 and Mu-Beta brain computer interface to operate a brain controlled wheelchair. In *Proceedings of the 2nd International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology 2008 May 13* (pp. 51-55).
- [36] Wang H, Li Y, Long J, Yu T, Gu Z. An asynchronous wheelchair control by hybrid EEG-EOG brain-computer interface. *Cognitive neurodynamics*. 2014 Oct;8(5):399-409.
- [37] Guger C, Spataro R, Pellas F, Allison BZ, Heilinger A, Ortner R, Cho W, Xu R, La Bella V, Edlinger G, Annen J. Assessing command-following and communication with vibro-tactile P300 brain-computer interface tools in patients with unresponsive wakefulness syndrome. *Frontiers in neuroscience*. 2018 Jun 29;12:423.
- [38] Bin G, Gao X, Wang Y, Li Y, Hong B, Gao S. A high-speed BCI based on code modulation VEP. *Journal of neural engineering*. 2011 Mar 24;8(2):025015.
- [39] Wang Z, Healy G, Smeaton AF, Ward TE. A review of feature extraction and classification algorithms for image RSVP based BCI. *Signal processing and machine learning for brain-machine interfaces*. 2018:243-70.
- [40] Trambaiolli LR, Tiwari A, Falk TH. Affective neurofeedback under naturalistic conditions: a mini-review of current achievements and open challenges. *Frontiers in Neuroergonomics*. 2021 May 24;2:678981.
- [41] Nirmala Devi A, Rathna R. EEG data based human attention recognition using various machine learning techniques: a review. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*. 2024 Jan 19;11(7):2299096.
- [42] Ackermann S, Rasch B. Differential effects of non-REM and REM sleep on memory consolidation?. *Current neurology and neuroscience reports*. 2014 Feb;14(2):430.
- [43] Peng Y, Wong CM, Wang Z, Rosa AC, Wang HT, Wan F. Fatigue detection in SSVEP-BCIs based on wavelet entropy of EEG. *Ieee Access*. 2021 Jul 26;9:114905-13.
- [44] Rimbart S, Riff P, Gayraud N, Schmartz D, Bougrain L. Median nerve stimulation based BCI: a new approach to detect intraoperative awareness during general anesthesia. *Frontiers in Neuroscience*. 2019 Jun 19;13:622.
- [45] Gupta R, Banville HJ, Falk TH. Multimodal physiological quality-of-experience assessment of text-to-speech systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016 Dec 12;11(1):22-36.
- [46] Wikipedia contributors. (2024). Functional near-infrared spectroscopy. In Wikipedia. Retrieved November 17, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Functional_near_infrared_spectroscopy
- [20] Volosyak I, Guger C, Gräser A. Toward BCI Wizard-best BCI approach for each user. In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 2010 Aug 31* (pp. 4201-4204). IEEE.
- [21] Volosyak I, Schmidt M. Asynchronous control of a spherical robot by means of SSVEP-based brain-computer interface. In *2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) 2019 Nov 21* (pp. 1-4). IEEE.
- [22] Stawicki P, Rezeika A, Volosyak I. Effects of Training on BCI Accuracy in SSMVEP-based BCI. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks 2021 Jun 16* (pp. 69-80). Cham: Springer International Publishing.
- [23] Mühl C, Allison B, Nijholt A, Chanel G. A survey of affective brain computer interfaces: principles, state-of-the-art, and challenges. *Brain-Computer Interfaces*. 2014 Apr 3;1(2):66-84.
- [24] Ehrlich SK, Cheng G. Human-agent co-adaptation using error-related potentials. *Journal of neural engineering*. 2018 Sep 28;15(6):066014.
- [25] Dehaes F, Rida I, Roy RN, Iversen J, Mullen T, Callan D. A pBCI to predict attentional error before it happens in real flight conditions. In *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) 2019 Oct 6* (pp. 4155-4160). IEEE.
- [26] Chavarriaga R, Sobolewski A, Millán JD. Errare machinale est: the use of error-related potentials in brain-machine interfaces. *Frontiers in neuroscience*. 2014 Jul 22;8:208.
- [27] Mousavi M, de Sa VR. Spatio-temporal analysis of error-related brain activity in active and passive brain-computer interfaces. *Brain-computer interfaces*. 2019 Oct 2;6(4):118-27.
- [28] Derosière G, Mandrick K, Dray G, Ward TE, Perrey S. NIRS-measured prefrontal cortex activity in neuroergonomics: strengths and weaknesses. *Frontiers in human neuroscience*. 2013 Sep 19;7:583.
- [29] Pfurtscheller G, Allison BZ, Bauernfeind G, Brunner C, Solis Escalante T, Scherer R, Zander TO, Mueller-Putz G, Neuper C, Birbaumer N. The hybrid BCI. *Frontiers in neuroscience*. 2010 Apr 21;4:1283.
- [30] NBC News learn. (2020, May 5). Mysteries of the Brain: Brain-Computer Interface[Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=p1XQ4uxqxZI>
- [31] Falk TH, Guirgis M, Power S, Chau TT. Taking NIRS-BCIs outside the lab: towards achieving robustness against environment noise. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2010 Sep 27;19(2):136-46.
- [32] Albuquerque I, Tiwari A, Parent M, Cassani R, Gagnon JF, Lafond D, Tremblay S, Falk TH. Wauc: a multi-modal database for mental workload assessment under physical activity. *Frontiers in Neuroscience*. 2020 Dec 1;14:549524.
- [33] Lopes A, Rodrigues J, Perdigo J, Pires G, Nunes U. A new hybrid motion planner: Applied in a brain-actuated robotic wheelchair. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2016 Nov 15;23(4):82-93.

- [47] Xing Y, Lv C, Wang H, Wang H, Ai Y, Cao D, Velenis E, Wang FY. Driver lane change intention inference for intelligent vehicles: Framework, survey, and challenges. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019 Mar 6;68(5):4377-90.
- [48] Von Landesberger T, Brodtkorb F, Roskosch P, Andrienko N, Andrienko G, Kerren A. MobilityGraphs: Visual analysis of mass mobility dynamics via spatio-temporal graphs and clustering. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2015 Aug 12;22(1):11-20.
- [49] Li L, Wang FY. Advanced motion control and sensing for intelligent vehicles. Boston, MA: Springer US; 2007 Nov 24.
- [50] Shneiderman B. Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. International Journal of Human-Computer Interaction. 2020 Apr 2;36(6):495-504.
- [51] Gedicke S, Bonerath A, Niedermann B, Haunert JH. Zoomless maps: external labeling methods for the interactive exploration of dense point sets at a fixed map scale. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020 Oct 13;27(2):1247-56.
- [52] C. T. M. a. K. J. Ackad, "Skeletons and silhouettes: Comparing user representations at a gesture-based large display," in Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2016.
- [53] Ackad C, Tomitsch M, Kay J. Skeletons and silhouettes: Comparing user representations at a gesture-based large display. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2016 May 7 (pp. 2343-2347).
- [54] Lee C, Kim Y, Jin S, Kim D, Maciejewski R, Ebert D, Ko S. A visual analytics system for exploring, monitoring, and forecasting road traffic congestion. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2019 Jun 12;26(11):3133-46.
- [55] Bi H, Mao T, Wang Z, Deng Z. A deep learning-based framework for intersectional traffic simulation and editing. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2019 Jan 3;26(7):2335-48.
- [56] Wongsuphasawat K, Smilkov D, Wexler J, Wilson J, Mane D, Fritz D, Krishnan D, Viégas FB, Wattenberg M. Visualizing dataflow graphs of deep learning models in tensorflow. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2017 Aug 29;24(1):1-2.
- [57] Wang ZJ, Turko R, Shaikh O, Park H, Das N, Hohman F, Kahng M, Chau DH. CNN explainer: learning convolutional neural networks with interactive visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020 Oct 13;27(2):1396-406.

The Use of Artificial Intelligence in Industrial Design: pediatric wheelchair

Mohammadreza Tajalli¹, Mehrdad Ghatreh Nabi^{2,*}, Hossein Asghari Shivaee³

¹ Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

m.r.tajalli.iau.ac.ir@gmail.com

^{2,*} Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mehrdad_naby@iau.ac.ir

³ Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

shivaee@iau.ac.ir

ABSTRACT

The design and validation of smart wheelchairs represent a critical step toward enhancing mobility and independence for individuals with disabilities. In contemporary society, disability, particularly among younger populations, remains a major challenge, underscoring the importance of advanced assistive technologies. Since transportation play a central role in a paralyzed daily life, developing intelligent systems that integrate clinical functionality, ergonomic considerations, and user-centered design can significantly improve efficiency and quality of care. Moreover, addressing the needs of both young and elderly users requires a multidisciplinary approach that leverages emerging technologies to ensure adaptability and inclusivity. This study presents the development of an electric wheelchair enhanced with artificial intelligence, focusing on its design principles, ergonomic features, and fundamental mechanisms. The proposed system aims to promote greater autonomy and improve the overall user experience.

Keywords

Artificial intelligence; smart wheelchair; pediatric wheelchair; industrial design; Ergonomic criteria

استفاده از هوش مصنوعی در طراحی صنعتی: ویلچر کودکان

محمدرضا تجلی^۱، مهرداد قطره نبی^{۲*}، حسین اصغری شیوائی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

m.r.tajalli.iaau.ac.ir@gmail.com

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Mehrdad_naby@iaau.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

shivae@iaau.ac.ir

چکیده

طراحی و اعتبار سنجی ویلچر هوشمند به سوی یکپارچگی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در جامعه معاصر، مشکلات ناتوانی معلولان بخصوص معلولان خردسال به یکی از چالش های اصلی تبدیل شده است. از آنجایی که وسایل کمکی مانند ویلچرها نقش حیاتی در زندگی روزمره افراد با معلولیت دارند، طراحی و توسعه ویلچر هوشمند با توجه به نیازهای این گروه از افراد، امکانات بالینی و کارایی بالاتری را فراهم کرده است. از طرفی توسعه سیستم های جدید برای کمک به افراد معلول خردسال و سالخورده نیازمند یک رویکرد چند رشته ای بر اساس فناوری های جدید به تطابق با نیازهای کاربران است. ویلچر هوشمند می تواند به این دسته از افراد کمک کند تا به صورت مستقل تری زندگی کنند. هدف این مقاله، تحقیق و توسعه یک ویلچر برقی با هوش مصنوعی را ارائه داده است و در این مقاله سعی شده تا از بعد های مختلفی نظیر طراحی، عوامل ارگونومیک و مکانیزم هایی اساسی در ویلچر از هوش مصنوعی بهره گرفته شود.

کلمات کلیدی

هوش مصنوعی، ویلچر هوشمند، ویلچر کودکان، طراحی صنعتی، معیار های ارگونومیک

می تواند بهبودهای چشمگیری را به همراه داشته باشد [۴].

۱- مقدمه



شکل ۱) ویلچر طراحی شده به کمک هوش مصنوعی Bing

در آخر باید گفت با پیشرفت فناوری که توسط هوش مصنوعی نشان داده شده، خلق هنر به طور فزاینده ای غنی گشته و بیان محتوا هوشمند، تعاملی و مبتنی بر داده ها است که باعث شده رابطه بین فناوری، هنر و مردم به طور فزاینده نزدیک تر شود و فرصت هایی برای توسعه نوظهور فراهم شود. هدف فن آوری های هوش مصنوعی، شبیه سازی کامل ذهن انسان با فعال کردن پاسخ های طبیعی بر اساس محیط اطراف، رمزگشایی احساسات، و شناسایی ویژگی های انسانی در محدوده انرژی است. هنر تعاملی که توسط فناوری هوش مصنوعی هدایت گردیده است، دیگر بر یک تجربه حسی، سمعی و بصری منفرد تمرکز نمی کند، بلکه بر بیان های هنری یکپارچه ای متمرکز می شود که بسیار تعاملی، جنبشی و عاطفی هستند، بر اساس مطالعه رفتار طبیعی انسان و حواس یکپارچه، همراه با هوش میباید [۴].

۲- پیشینه پژوهش ها

در طراحی صنعتی به خصوص طراحی برای قشر کودک، نیازمند در نظر گرفتن سه مقوله مهم در این صنعت خواهیم بود که عبارت اند از :

۲-۱- معیار های ارگونومیک در طراحی صنعتی

به طور بالقوه توانسته برای ارائه استدلال و پشتیبانی تصمیم گیری در مورد چالش های مهندسی و فنی استفاده شود. نقش هوش مصنوعی در طراحی صنعتی، عمل بهبود عملکرد، ارزش و زیبایی شناسی محصولات برای بهینه سازی رضایت مشتری است، هنوز به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است [۵]. محتویات هوش مصنوعی و طراحی صنعتی به تفصیل تجزیه و تحلیل می شود و روش های تحقیق مانند تحقیق ادبیات، مشاهده میدانی و مصاحبه برای روشن شدن بیشتر اهداف و شرایط طراحی استفاده شده است. از منظر فرآیند طراحی، ساختار محصول، داده های مهندسی و نگهداری پروژه، روش تبادل و به اشتراک گذاری اطلاعات طراحی محصول مطرح شده است [۶]. در طول فرآیند تعریف راه حل های طراحی مناسب، طراح باید طیف وسیعی از عوامل تأثیرگذار را در نظر بگیرد.

از اواخر قرن هفدهم، ویلچر برای انتقال بیماران بیمارستان و افرادی با مشکلات حرکتی استفاده میشد و انسان ها با نیرویی که به چرخ ویلچر میدادند ، ویلچر را به حرکت در می آوردند یا به طور رایج تر، نیاز به کمک فرد دیگری برای حرکت دادن داشتند [۸]. از طرفی با افزایش سن جمعیت، تعداد افراد دارای معلولیت به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۲]. از این میان، افراد دارای معلولیت حرکتی به ویلچر وابسته هستند. در طول سال ها، در مورد ویلچرهای برقی، دستگاه های مختلفی برای راندن صندلی متناسب با سطح ناتوانی کاربر ارائه شده است [۳]. و از آنجا که این افراد معلول از خردسال تا سالمند متغیر هستند ، باید برای ارایه یک نمونه باکیفیت از مواردی نظیر کیفیت ساخت ، طرح ، قابلیت های سخت افزاری نظیر ایستا و جمع شدن ویلچر ، و زیبایی ویلچر را در یک نمونه بکار گرفته شود و متناسب با وضعیت جسمانی فرد ، مکانیزم ها را در کنار هم گذاشته شود. از این رو در این مقاله ویلچر ها را از لحاظ طراحی (متناسب با فرد بزرگسال و خردسال) ، معیار های ارگونومیک نظیر راحتی در نشستن و ... از طریق هوش مصنوعی استفاده کرد. هوش مصنوعی در طراحی صنعتی ویلچر می تواند بهبودهای چشمگیری ایجاد کند و به همین دلیل در این مقاله تا بخشی از فواید هوش مصنوعی در این صنعت را ارایه گردیده است.

۱-۱- مزایای کاربرد هوش مصنوعی در طراحی

صنعتی ویلچر

در ادامه برخی از مزایای بکارگیری سیستم های هوشمند در طراحی تجهیزات صنعتی از جمله ویلچر فهرست میشوند:

۱. بهبود عملکرد: با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی، می توان عملکرد ویلچر را بهبود بخشید. به عنوان مثال، سیستم های هوشمند می توانند بهبودهای در زمینه استقامت، سرعت، و کارایی حرکتی ویلچر ایجاد کنند.
 ۲. افزایش امنیت: سامانه های هوش مصنوعی توانسته بهبودهای قابل توجهی در زمینه امنیت و سلامت کاربران ویلچر ایجاد کند. به عنوان مثال، سامانه های هوشمند می توانند بهبودهای در زمینه تشخیص و پیشگیری از تصادفات و حوادث ناگهانی اعمال کرده است.
 ۳. بهبود تجربه کاربری: با استفاده از هوش مصنوعی، می توان تجربه کاربری کاربران ویلچر را بهبود بخشید. به عنوان مثال، سامانه های هوشمند توانسته به کاربران کمک کنند تا به راحتی و با اطمینان بیشتر حرکت کنند.
 ۴. افزایش بهره وری: با استفاده از هوش مصنوعی، می توان بهبودهای قابل توجهی در زمینه بهره وری و کارایی فرآیندهای تولید و طراحی ویلچر اعمال کرد.
 ۵. پردازش داده های پیچیده: هوش مصنوعی توانسته در پردازش داده های پیچیده و حجم بالا که در طراحی و تولید ویلچر نقش دارند، به کار گرفته شود و اطلاعات مفیدی برای بهبود فرآیندها و محصولات فراهم کند.
- با توجه به این فواید ، استفاده از هوش مصنوعی در طراحی صنعتی ویلچر

محصولات از نظر بصری با سایر محصولات با عملکرد مشابه رقابت کنند. به طور کلی، زیبایی شناسی به عنوان یک استراتژی مهم برای تحقیق و توسعه محصول، بازاریابی و ارتقاء برند در نظر گرفته شده است [۱۱].

۲-۳- معیارهای روانشناسی در طراحی صنعتی

احساس (انعکاس تجربه گذشته در ذهن) بازتاب مغز در ویژگی های فردی چیزهای عینی است که مستقیماً بر اندام های حسی تأثیر می گذارد. احساس ابتدایی ترین فرآیند شناختی و ساده ترین پدیده روانی است. [۱۲]. بدین منظور ما طراحی صنعتی ویلچر ها را با بکارگیری از این سه عنوان بالا در نظر گرفته و در نهایت یک نتیجه گیری انجام میدهیم. مزیت روانی استفاده از ویلچر امکان حرکت فیزیکی و حضور اجتماعی موثرتر برای معلولان است. مزیت روانی استفاده از ویلچر این است که نه تنها امکان حرکت فیزیکی را برای افراد دارای ناتوانی جسمی فراهم می کند، بلکه حضور اجتماعی موثرتر آنها در جامعه را نیز تقویت می کند. وقتی افراد با ناتوانی جسمی بتوانند به راحتی به کارها و فضاهای عمومی دسترسی پیدا کنند، استقلال آنها افزایش می یابد و اعتماد به نفسشان تقویت می شود. از این منظر، مزایا فقط به جنبه های فیزیکی محدود نمی شود، بلکه کاهش استرس و اضطراب مرتبط با محدودیت های روزمره نیز بخشی از تجربه روانشناختی بهبود یافته است. کنترل بیشتر بر زندگی و احساس امنیت روانی بالا رفتن، به فرد این فرصت را می دهد تا در محیط های آموزشی، کاری یا اجتماعی فعال تر حضور پیدا کند و روابط اجتماعی پایدارتری برقرار کند. از منظر اجتماعی نیز دسترسی بهتر به مکان های عمومی و رویدادها، فرصت های مشارکت در فعالیت های گروهی، تحصیل و ورزش را افزایش می دهد و می تواند به کاهش برچسب زنی منفی و فاصله اجتماعی کمک کند.

۳- طراحی ارگونومیک مخصوص پا:

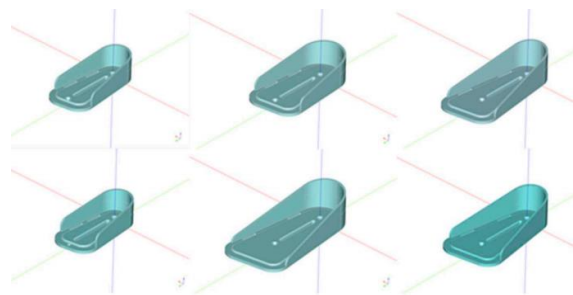
در این بخش سفارشی سازی طراحی زیرپایی در صنعت ویلچر را ارائه گردیده است. ویلچر ها در فرآیند طراحی کاربر، محور هستند. این محصولات به طیف وسیعی از تنظیمات نیاز دارند تا با آنتروپومتری ها و ناتوانی های مختلف بیماران سازگار شوند. بیشتر محصولات تجاری، اختصاص داده شده به ناتوانی شدید، همچنین شامل یک سری عناصر اضافی هستند که برای نگه داشتن بیمار در یک موقعیت راحت اما "ثابت" طراحی شده اند. چنین سیستم هایی اجازه "تنبیت و حفظ" موقعیت پای بیمار را نمی دهند، به خصوص برای بیمارانی که کنترلی بر اندام تحتانی خود ندارند. به همین دلیل، تأمین ویلچر با عناصر خاص برای نگه داشتن کفش بیمار در جای خود ضروری است. تکیه گاه های تجاری پا معمولاً در اندازه های استاندارد ساخته می شوند و همیشه کل جمعیت را پوشش نمی دهند. علاوه بر این، این طرح ها بر اساس کفش های استاندارد طراحی شده اند، بنابراین برای سازگاری با کفش های خاص یا کفش های ارتوپدی مناسب نیستند. بنابراین موقعیت نهایی پا به یک عنصر کلیدی در مدیریت صحیح وضعیت بدن تبدیل می شود. در اینجا، استفاده از بینایی کامپیوتر و هوش مصنوعی نمونه هایی استخراج شد که در تصویر زیر قابل مشاهده است [۱۳].

زیبایی شناسی و ارگونومی مطمئناً متعلق به موارد پیچیده تر است. طراحان با تجربه کمتر توانسته اند در این مرحله طراحی با مشکلات متعددی مواجه شوند. اگرچه می توان در مورد زیبایی شناسی صنعتی و طراحی زیبایی شناسی کالاهای مصرفی مطالبی یافت، اما طراح همچنان باید تجربه و دانش بسیار زیادی در زمینه زیبایی شناسی جمع آوری کرده باشد تا بتواند اقدامات طراحی و بازطراحی مناسب را انتخاب و انجام دهد. بهبود ارزش زیبایی شناختی محصول در مدت زمان معقول. از سوی دیگر، ارگونومی یک محصول، به ویژه محصولی که باید با اندام فوقانی دستکاری شود، نیز بسیار قابل توجه است. تنها تعادل مناسب این عوامل منجر به طراحی بهینه محصول می شود [۱۷]. از طرفی تجزیه و تحلیل پتانسیل هوش مصنوعی به منظور درک چگونگی ادغام آن برای بهبود عملکرد ارگونومیک و نتایج ایمنی مرتبط است. اختلالات اسکلتی عضلانی یکی از شایع ترین و پرهزینه ترین مشکلات بهداشتی مرتبط با محیط های شغلی است. در فرآیندهای کاری، اپراتورهای انسانی به طور مداوم در معرض عوامل استرس فیزیکی، محیطی، روانی و روانی اجتماعی قرار می گیرند که می توانند - از جمله دیگر - بر سیستم اسکلتی عضلانی تأثیر بگذارند. شناسایی مؤثر عوامل عمده ای که می تواند بر سلامت کارگران تأثیر بگذارد، مستلزم داشتن دانش در زمینه های مختلف از جمله آناتومی، فیزیک، ریاضیات، انسان سنجی، روانشناسی، جامعه شناسی و غیره است. از سوی دیگر، هوش مصنوعی در سال های اخیر رشد چشمگیری داشته است و در تمام زمینه های فعالیت از جمله در زمینه ارگونومی صنعتی نفوذ کرده است. تعامل انسان و تجهیزات کار «هوشمند» بیش از پیش به یک فعالیت جاری تبدیل گشته و این تعامل باید در شرایط ایمنی و سلامت کامل صورت گیرد [۸]. در [۹] برای پرداختن به چالش های موجود در شیوه های ارگونومی امروزی در ارائه راه حل های دیجیتال، یک رویکرد طراحی تعامل، فرآیند، یکپارچه سازی و هوشمندی (IPII) پیشنهاد شده است. علاوه بر طراحی تعاملی برای رابط کاربری راه حل های دیجیتال، همانطور که در عمل معمول ارگونومی رایج است، IPII سه جزء طراحی اضافی را اضافه کرده است: فرآیند، یکپارچه سازی و طراحی هوشمند. مطالعه موردی مزایای IPII را نشان داده و رویکردی پیشرفته برای طراحی راه حل های دیجیتال ارائه داده است [۹].

۲-۲- معیارهای زیبایی شناسی در صنعت طراحی

زیبایی بصری یک عامل تعیین کننده در ارزیابی طراحی محصول است. از طریق تجزیه و تحلیل ویژگی های تصویر، نه تنها میتوان سطح زیبایی شناختی را ارزیابی کرد، بلکه میتوان کیفیت کلی طرح پیشنهادی را نیز آشکار کرد [۱۰]. از طرفی کیفیت زیبایی شناختی بالا در ظاهر طراحی محصول توانسته فروش تجاری را به شدت ارتقا دهد. در نتیجه، مقدار زیادی سرمایه گذاری روی طراحی زیبایی بصری و آزمایش محصولات جدید قبل از عرضه به بازار انجام می شود. زیرا کالاهای جذاب و بسته بندی زیبایی شناختی می توانند مشتریان را برای خرید از آفلاین و آنلاین جذب کنند. خرده فروشان طبق تحقیقات بلوخ و همکاران، زیبایی بصری به عنوان سه ویژگی مهم در انتخاب محصول در نظر گرفته شد. زیبایی شناسی به محصول رقابت بخشیده و تمایز را فراتر از ویژگی های اساسی ایجاد کرده است، و باعث گشته

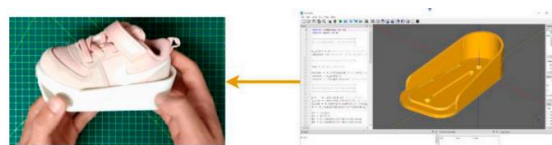
وابستگی کودکان کاربر را به خطر بیندازد [۱۵]. باید گفت فناوری های کمکی برای رفاه حال افراد با معلولیت های حرکتی و یا بینایی از ابزارهای ساده به سامانه های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی تکامل یافته اند. در یک مقاله ی مروری دکتر فرزاد چراغپور و همکاران با بررسی مقالات متنوع در حوزه ی مشکلات بینایی بین سال های (۲۰۰۰-۲۰۲۵) نشان می دهد ادغام چندحسی، یادگیری عمیق و دستگاه های پوشیدنی نقش فزاینده ای در بهبود ناوبری و دسترس پذیری دارند. همچنین بر ضرورت طراحی های مقرون به صرفه و کاربرمحور، به ویژه در محیط های کم منبع، تأکید شده است [۱۹].



عکس ۲) مدل سازی انواع زیرپایی



شکل ۵) نمونه ویلچر تاشو



شکل ۳) شبیه سازی زیرپایی انسان خردسال با نرم افزار CAD

ویلچر های هوشمند و تاشو با ارائه راه حلی نوآورانه برای مشکلات حرکتی افراد، به جایگاه کمتری نیاز دارند و فضای بیشتری را در محیط های مختلف اشغال می کنند. این وسایل با استفاده از تکنولوژی های پیشرفته، از جمله سنسورها و سیستم های خودکار، به کاربران کمک بهره گرفته تا به راحتی حرکت کنند و به آنها استقلال بیشتری در فعالیت های روزمره خود بدهند. علاوه بر این، ویژگی تاشو بودن این وسایل، امکان حمل و نقل آسان تر و صرفه جویی در فضا را فراهم کرده است [۱۴].

نکته ی دیگری که در این زمینه به ذهن میرسد ، بسیاری از کاربران ویلچر با مشکلاتی در استحکام و قرارگیری سر روبرو هستند. برای این کاربران، حمایت کافی برای سر ضروری است [۱۸]. اگرچه چندین نوع حمایت سر وجود دارد، اما نیاز به توسعه ی بیشتر این سیستم ها برای بهبود عملکرد و کیفیت زندگی، به ویژه برای گروهی از کاربران با چالش های شدید لازم است. برای این گروه، نیازهای کاربر مشخص نشده اند. از این رو ما این داده را در هوش مصنوعی Bing وارد کرده و نتیجه به تصویر زیر منجر شد [۱۶].



شکل ۴) نمونه ویلچر با قابلیت تاشو

سندلی و تکیه گاه برزنتی که در ویلچر های معمولی گنجانده شده است، یک سیستم نشیمن را فراهم کرده که از بسیاری از الزامات ارگونومیک اساسی ناکافی است، که ممکن است راحتی، سلامت و سطح

- Segmind
- Zapier
- Clarifai
- Gencraft
- Midjourney
- GPT-3
- DALL-E
- VQ-VAE
- BigGAN
- StyleGAN
- CLIP
- OpenAI's Codex
- DeepDream
- Neural Style Transfer
- Pix2Pix



شکل ۶) طراحی به کمک هوش مصنوعی Bing

با استفاده از چند هوش مصنوعی ای که در بالا گفته شد، متن زیر را به هوش مصنوعی داده شد و نتایج حاصل از آن، در قالب عکس هایی در ادامه مشاهده میگردد. این متن به گونه ای نوشته شد که تمامی مشخصات ارایه شده در متن بالا را دربر داشته باشد. (طراحی صنعتی ویلچر با رعایت فاکتورهای نظیر زیبایی ساختاری، راحتی در نشستن، و از آنجا که این ویلچر مورد استفاده کودکان میباشد، از چهره های انیمیشنی در طراحی آن استفاده شود.)

با توجه متن بالا و با استفاده از هوش مصنوعی (Deepai.org) خروجی زیر گرفته شد.



شکل ۸) طراحی به کمک هوش مصنوعی Deepai.org

با استفاده از هوش مصنوعی DeepDream طرح زیر بدست آمد.



شکل ۷) طراحی به کمک هوش مصنوعی Bing

معرفی نرم افزار های تولید و ساخت عکس های با هوش مصنوعی میتواند در راستای خلق ایده و ساخت مدلی تکامل یافته مفید باشد. در این راستا میتوان از انواع هوش مصنوعی های زیر بهره برد:

- Bing
- Socialbook.io
- gemini
- Deepai.org

- [3] L. Fehr, W. Langbein and Skaar, "Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: A clinical survey," 2000.
- [4] Y. Shen, "The Influence of Artificial Intelligence on Art Design in the Digital Age," 27 Dec 2021.
- [5] Y. T. -. C. Lee, "Artificial intelligence in industrial design: A semi-automated literature survey," June 2022.
- [6] F. Zhang, "Design and Implementation of Industrial Design and Transformation System Based on Artificial Intelligence Technology," 29 Mar 2022.
- [7] J. Kaljun and B. Dolšak, "Artificial intelligence in aesthetic and ergonomic product design process," Opatija, Croatia, 23-27 May 2011.
- [8] R. I. M. G. B. B. M. P.-S. Adrian ISPĂȘOIU, "STUDY ON THE POTENTIAL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATION IN INDUSTRIAL ERGONOMY PERFORMANCE IMPROVEMENT," *Journal Sponsorship*
- [9] W. X. -. D. F. -. M. Mahabhaleshwar, "Applications of an interaction, process, integration and intelligence (IPII) design approach for ergonomics solutions," 09 Apr 2019.
- [10] J. Wu, B. Xing, H. Si, J. Dou, J. Wang, Y. Zhu and X. Liu, "Product Design Award Prediction Modeling: Design Visual Aesthetic Quality Assessment via DCNNs," 20 November 2020.
- [11] J. Wu, B. Xing, H. Si, J. Dou, J. Wang, Y. Zhu and X. Liu, "Product Design Award Prediction Modeling: Design Visual Aesthetic Quality Assessment via DCNNs," pp. 211028 - 211047, 20 November 2020.
- [12] Y. X. -. T. Yu, "Visual Performance of Psychological Factors in Interior Design Under the Background of Artificial Intelligence," 28 July 2022.
- [13] Y. R. *. ,. L. R. ,. I. Z. Mahmoud Gharra, "Combining Computer Vision, Artificial Intelligence and 3D Printing in Wheelchair Design Customization: The Kyklos 4.0 Approach," 15 May 2023.
- [14] A. M. A. H. Al-Hakim, "Smart Wheelchair," 2017.
- [15] M. H. M. MCSP, "Effect of Wheelchair Design on Posture and Comfort of Users," 14 July 2010.
- [16] A. M. G. -, "Head support in wheelchairs (scoping review): state-of-the-art and beyond," 17 May 2021.
- [17] @GPT4Telembot, Artist, [Art].
- [18] F. Zhang, "Design and Implementation of Industrial Design and Transformation System Based on Artificial Intelligence Technology," 29 Mar 2022.
- [19] Cheraghpour Samavati F, Rahimi Ghasem Abadi A (October 13, 2025) Assistive Technologies for the Visually Impaired: A Review. *Cureus J Comput Sci 2* : es44389-025-06891-1. doi:https://doi.org/10.7759/s44389-025-06891-1



شکل ۹) طراحی به کمک هوش مصنوعی DeepDream

با استفاده از هوش مصنوعی Bing به مدل زیر بیان شد.



شکل ۱۰) طراحی به کمک هوش مصنوعی Bing

۴- نتیجه گیری :

با توجه به مزایای این روش‌ها، نتیجه گرفته شد که استفاده از هوش مصنوعی در طراحی و ساخت ویلچرهای کودکان، باعث بهبود کارایی، افزایش امنیت و راحتی کودکان و همچنین کاهش هزینه‌های تولید گردیده است. این روش‌ها باعث شد تا ویلچرهای کودکان به شکل‌های منحصر به فرد، با استفاده از جدیدترین فناوری‌ها و تکنولوژی‌ها طراحی شوند و نیازهای فردی هر کودک را در نظر بگیرند. این پژوهش تأکید دارد که هوش مصنوعی می‌تواند نقش بسزایی در بهبود طراحی و ساخت ویلچرهای کودکان داشته باشد.

مراجع و منابع:

- [1] R. Balamurugan, D. Kanchana, B. A. Princy, J. Jaisudha and P. Malathi, "A Smart Electronic Wheelchair Design Using Artificial Intelligence and Intelligent Sensors Association," Bangalore, India, 24-25 January 2024.
- [2] M. P. L. P. & S. K. PhD, "Demographics and Trends in Wheeled Mobility Equipment Use and Accessibility in the Community," *The Official Journal of RESNA*, p. 17, 10 Mar 2010.

Intelligent Robots in Smart Environments: Applications of Recent Advances in Deep Learning and the Internet of Things

Morteza Tabrizi^{1,*}, Ramin Isa Bagloo²

^{*1}Master of Engineering and Computer Science - Artificial Intelligence, Islamic Azad University, North Tehran, Tehran, Iran
morteza.tabrizi.mt@gmail.com

² PhD in Computer Architecture, Islamic Azad University North Tehran, Tehran, Iran
ramineisabagloo@gmail.com

ABSTRACT

This study provides a comprehensive examination of the applications of intelligent robots in smart environments, with a focus on recent advancements in deep learning and the Internet of Things (IoT). Employing a qualitative review methodology, reputable peer-reviewed scientific articles from 2020 to 2025 were analyzed across six key domains: education, space exploration, polar exploration, nanoscale medicine, autonomous transportation, and underwater exploration. The results underscore the high precision of these technologies in diverse applications, including 97.16% accuracy in interactive learning prediction, 95% efficacy in targeted drug delivery, and a 33% reduction in accidents within autonomous transportation systems. Furthermore, explorer robots in space exploration and drones in polar exploration demonstrated substantial performance in unknown environments, achieving autonomous navigation capabilities and an average F1-score of 0.89, respectively. These findings highlight the potential of intelligent robots to enhance efficiency, safety, and sustainability in interconnected environments, while underscoring persistent challenges—such as environmental noise, battery constraints, and data security—that warrant future research.

KEYWORDS

INTELLIGENT ROBOTS, SMART ENVIRONMENTS, INTERNET OF THINGS (IoT), DEEP LEARNING, AUTONOMOUS APPLICATIONS.

ربات های هوشمند در محیط های هوشمند: کاربردهای پیشرفت های اخیر در یادگیری عمیق و اینترنت اشیا

مرتضی تبریزی^{۱*}، رامین عیسی بگلو^۲

^{۱*} دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و علوم کامپیوتر-هوش مصنوعی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

morteza.tabrizi.mt@gmail.com

^۲ دانشجوی مقطع دکتری، گروه معماری کامپیوتر، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

ramineisabagloo@gmail.com

چکیده

این مطالعه به بررسی جامع کاربردهای ربات های هوشمند در محیط های هوشمند با تمرکز بر پیشرفت های اخیر در یادگیری عمیق و اینترنت اشیا پرداخته است. با استفاده از روش مرور کیفی، مقالات علمی معتبر از سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ در شش حوزه کلیدی (آموزش، اکتشافات فضایی، اکتشافات قطبی، پزشکی نانو مقیاس، حمل و نقل خودران و اکتشافات زیر آب) تحلیل شدند. نتایج، نشان دهنده دقت بالای این فناوری ها در کاربردهای مختلف، از جمله ۹۷٫۱۶٪ در پیش بینی یادگیری تعاملی، ۹۵٪ در تحویل هدفمند دارو و ۳۳٪ کاهش تصادفات در حمل و نقل خودران است. همچنین ربات های کاوشگر در اکتشافات فضایی و پهپادها در اکتشافات قطبی، به ترتیب با نوابری خودکار و میانگین $F1\text{-Score} = 0.89$ ، کارایی قابل توجهی از خود در محیط های ناشناخته نشان دادند. این یافته ها پتانسیل ربات های هوشمند را برای بهبود کارایی، ایمنی و پایداری در محیط های متصل برجسته می کنند؛ در حالی که چالش هایی مثل نویز محیطی، محدودیت های باتری و ایمنی داده ها نیاز به تحقیقات آینده دارند.

کلمات کلیدی

ربات های هوشمند، محیط های هوشمند، اینترنت اشیا، یادگیری عمیق، برنامه های خودمختار.

۱- مقدمه

پیشرفت دنیای واقعی، مجازی و فناوری به گونه ای در هم تنیده است که توسعه هر یک به دیگری وابسته می باشد. ویژگی کلیدی این حوزه ها، محیط های خاص آن ها است که با حرکت به سوی هوشمندی، زمینه ساز ظهور ابزارهای هوشمند مانند ربات ها و سنسورها شده است. این ابزارها با بهره گیری از فناوری هایی نظیر یادگیری عمیق و اینترنت اشیا، توانایی های نوآورانه ای را در محیط های متصل به نمایش می گذارند و زندگی انسان را بهبود می بخشند.

ابزارهای هوشمند مانند ربات ها و سنسورها، در محیط های هوشمند قابلیت هایی را به نمایش می گذارند که زندگی انسان را بهبود می بخشد. این ابزارها وظایفی را بر عهده می گیرند که یا به دلیل تکراری بودن، خسته کننده و مستعد خطای انسانی هستند؛ یا به دقت، سرعت و مهارت هایی فراتر از توانایی های انسانی نیاز دارند. برای مثال، ربات های خودکار در خانه ها وظایف روزمره مانند نظافت را انجام می دهند؛ در حالی که در صنایع، ربات های پیشرفته با دقت بالا قطعات را مونتاژ می کنند. این توانایی ها نه تنها کارایی را افزایش می دهند، بلکه نشان دهنده ظرفیت بالای این ابزارها برای سازگاری با نیازهای متنوع محیط های هوشمند است.

ربات ها و سنسورها در زمینه های گوناگون از زندگی روزمره تا صنایع پیشرفته، نقش مهمی ایفا می کنند. عملکرد مؤثر آن ها در محیط های هوشمند، به توانایی درک و سازگاری با شرایط محیطی وابسته است. برخلاف ابزارهای سنتی که تنها بر اساس دستورات از پیش تعیین شده عمل می کنند. این ابزارها از قابلیت هایی برخوردارند که امکان آگاهی از محیط و تصمیم گیری بر اساس آن را فراهم می کند. این ویژگی ها که فراتر از برنامه ریزی های ساده عمل می کنند، نیاز به فناوری های پیشرفته تر را برای ارتقای کارایی برجسته می سازد. سنسورها در این میان نقش کلیدی در جمع آوری داده های محیطی دارند. با ظهور اینترنت اشیا، سنسورها هوشمندتر شدند و توانایی برقراری ارتباط و انجام عملیات بهینه بر اساس شرایط محیط را به دست آوردند. با این حال، این پیشرفت محدودیت هایی نیز داشت. اگرچه سنسورها از محیط آگاه بودند اما درک عمیقی از آن نداشتند. ربات های هوشمند با بهره گیری از سنسورها و استفاده از هوش مصنوعی این کاستی را برطرف کردند و توانستند تحلیل پیشرفته تری از محیط ارائه دهند.

هوش مصنوعی به عنوان محور عملکرد ربات های هوشمند، با بهره گیری از فناوری یادگیری عمیق به سطح جدیدی از کارایی رسیده است. یادگیری عمیق که شاخه ای پیشرفته از هوش مصنوعی است، به ربات ها امکان می دهد تا با تحلیل حجم عظیمی از داده های جمع آوری شده توسط سنسورها، الگوها را شناسایی کنند و تصمیمات پیچیده تری بگیرند. برای مثال، ربات هایی که در محیط های ناشناخته مانند انبارهای بزرگ یا مناطق امدادی کار می کنند، با استفاده از یادگیری عمیق می توانند موانع را تشخیص دهند و مسیر بهینه را انتخاب کنند. این قابلیت که با ترکیب اینترنت اشیا و یادگیری عمیق تقویت می شود، ربات های هوشمند را به ابزارهایی تبدیل کرده است که نه تنها واکنش نشان می دهند، بلکه پیش بینی و یادگیری مداوم دارند.

ترکیب اینترنت اشیا و یادگیری عمیق کاربردهای گسترده ای را در محیط های هوشمند به دنبال داشته است. در حوزه پزشکی، ربات های هوشمند با تحلیل داده های ویدیویی به کمک یادگیری عمیق، جراحی هایی با دقت بالاتر انجام می دهند [۱]. در صنایع نیز، خطوط تولید خودکار با بهره گیری از سیستم های مبتنی بر اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، کارایی و ایمنی را بهبود بخشیده اند [۲]. همچنین در خانه های هوشمند، ابزارهایی مانند سیستم های مدیریت انرژی با استفاده از اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، مصرف را بهینه می کنند [۳]. این کاربردها تنها در محیط هایی امکان پذیر است که به لطف اتصال دستگاه ها و تحلیل پیشرفته داده ها، به سطح بالایی از هوشمندی رسیده باشند. چنین پیشرفت هایی نشان دهنده ظرفیت بالای این فناوری ها برای پاسخگویی به نیازهای روبه رشد جوامع امروزی است.

ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق به عنوان فناوری های تحول آفرین، پتانسیل عظیمی برای بهبود حوزه های مختلف زندگی دارند و در عین حال چالش های پیچیده ای را مطرح می کنند. این مطالعه با هدف بررسی جامع کاربردهای این فناوری ها، شش حوزه کلیدی را انتخاب کرده است: آموزش (به دلیل تأثیر بر یادگیری تعاملی و دسترسی برابر)، اکتشافات فضایی (به دلیل نیاز به مأموریت های خودکار در محیط های خشن)، اکتشافات قطبی (برای نظارت بر تغییرات اقلیمی و حفاظت زیست محیطی)، پزشکی نانو مقیاس (به خاطر نوآوری در درمان های پیشرفته در پزشکی)، حمل و نقل خودران (برای کاهش ترافیک، افزایش ایمنی و پایداری زیست محیطی) و اکتشافات زیر آب (برای مدیریت منابع اقیانوسی و عملیات نجات).

این حوزه ها بر اساس معیارهایی مثل اهمیت اجتماعی، چالش های فنی و پتانسیل نوآوری انتخاب شده است؛ اما همچنین به دغدغه های جهانی و ملی پاسخ می دهند. رقابت بین دولت ها و قدرت های جهانی برای قدرت نمایی و پیشی گرفتن از یکدیگر در این حوزه ها، یکی از انگیزه های اصلی توسعه این فناوری ها است؛ زیرا این حوزه ها نه تنها به پیشرفت علمی کمک می کنند، بلکه در حوزه های سیاسی، اقتصادی و نظامی نیز نقش کلیدی دارند. علاوه بر این، این حوزه ها جزو مسائل روز دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی بشمار می روند و غفلت از پیشرفت های علمی در آن ها می تواند کشورهایی را از رقابت جهانی عقب نگه دارد.

در این میان، تحلیل وضعیت کشور ایران نیز نشان می دهد که علی رغم پتانسیل بالای این فناوری ها، توجه کافی به کاربرد هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و ربات های هوشمند در این شش حوزه وجود ندارد. بر اساس اطلاعات عمومی و گزارش های غیررسمی، ایران به رغم پیشرفت هایی در هوش مصنوعی و رباتیک (مثلاً در دانشگاه ها و شرکت های دانش بنیان)، هنوز در توسعه زیرساخت های اینترنت اشیا برای حمل و نقل خودران، اکتشافات فضایی یا نظارت زیست محیطی قطبی و زیرآب، با چالش هایی مثل کمبود سرمایه گذاری، محدودیت های فناوری، تحریم ها و فقدان سیاست گذاری های جامع مواجه است. این وضعیت، ضرورت توجه بیشتر به این حوزه ها را برجسته می کند تا ایران بتواند در رقابت جهانی و حل چالش های داخلی، جایگاه خود را تقویت کند. با این حال، به دلیل محدودیت های دسترسی به داده های دقیق و مقالات علمی داخلی به روز در این زمینه، این تحلیل بر اساس شواهد کلی و منطق علمی انجام شده است. این مطالعه با مرور مقالات به روز بین المللی

کاربری توسعه یافت تا محیط های هوشمند را پشتیبانی کند [۸]. این پیشرفت ها کاربردهایی مانند خانه های هوشمند را ممکن ساخت، جایی که سنسورهای متصل راحتی و پایداری را افزایش می دهند [۳]. اینترنت اشیا همچنین با ارائه داده های لحظه ای، به ربات های هوشمند امکان تعامل بهتر با سیستم ها را داده است، به ویژه وقتی با الگوریتم های عمیق برای تحلیل دقیق تر داده ها همراه شود [۶]. برای مثال در تولید هوشمند دستگاه های متصل، اطلاعاتی فراهم می کنند که ربات ها از آن برای بهینه سازی عملیات و کاهش خطرات استفاده می کنند [۲]. این توانایی اتصال و تحلیل داده ها، محیط های هوشمند را به سطح جدیدی از کارایی رسانده است؛ اما چالش هایی مانند امنیت داده ها و نیاز به زیرساخت های پیشرفته همچنان باقی است.

تحقیقات اخیر نشان داده است که ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق در حوزه هایی مثل آموزش [۹]، حمل و نقل [۱۰] و اکتشافات زیر آب [۱۱] کاربردهای گسترده ای دارند. این مطالعه با تمرکز بر حوزه هایی که تأثیرات اجتماعی، فنی و زیست محیطی بالایی دارند (مثل اکتشافات فضایی و قطبی)، شکاف های تحقیقاتی را شناسایی کرده و مقالات مرتبط را با معیارهایی مثل به روز بودن و کیفیت علمی بررسی کرده است.

۳- روش شناسی

این مطالعه از روش مرور کیفی برای تحلیل و دسته بندی مقالات علمی استفاده کرده است تا کاربردهای ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق را در شش حوزه اصلی (آموزش، اکتشافات فضایی، اکتشافات قطبی، پزشکی نانو مقیاس، حمل و نقل خودران و اکتشافات زیر آب) به صورت جامع و ساختارمند بررسی کند. هدف اصلی این بخش شناسایی چالش ها، کاربردهای عملی و فرصت های آینده این فناوری ها در هر حوزه است تا تصویری کامل و علمی از پتانسیل و محدودیت های آن ها ارائه شود.

۳-۱- منابع و جمع آوری داده ها

مقالات از پایگاه های علمی معتبر مانند IEEE Xplore، Google Scholar و ScienceDirect با تمرکز ویژه بر انتشارات سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ گردآوری شده است. این بازه زمانی به دلیل به روز بودن و مرتبط بودن با فناوری های نوظهور ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق مدنظر قرار گرفته است؛ چرا که این فناوری ها در دهه اخیر پیشرفت های قابل توجهی به دست آورده است. برای اطمینان از جامعیت، از موتورهای جستجوی پیشرفته و کلیدواژه هایی مثل «ربات های هوشمند»، «اینترنت اشیا»، «یادگیری عمیق» و حوزه های مشخص (مثل «حمل و نقل خودران» یا «اکتشافات زیر آب») به کار رفته است. این فرآیند شامل بررسی اولیه عناوین و چکیده ها و سپس مطالعه کامل متن های منتخب بود.

۳-۲- معیارهای انتخاب مقالات

معیارهای انتخاب مقالات به گونه ای طراحی شدند که کیفیت، مرتبط بودن و جامعیت داده ها برای تحلیل کاربردها، چالش ها و فرصت های آینده تضمین شود. این معیارها شامل موارد زیر بوده است:

- مرتبط بودن مستقیم با ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری

(۲۰۲۰-۲۰۲۵)، شکاف های تحقیقاتی، چالش ها و فرصت های این حوزه ها را شناسایی کرده و راهنمایی هایی برای تحقیقات آینده ارائه می دهد.

با توجه به رشد سریع فناوری و نیاز روزافزون به راه حل های هوشمند برای چالش های مدرن، بررسی نقش ربات های هوشمند در محیط های متصل، بیش از پیش اهمیت یافته است. هدف این مقاله، کاوش کاربردهای اخیر یادگیری عمیق و اینترنت اشیا در توسعه ربات های هوشمند و ارزیابی تأثیر آن ها بر بهبود کارایی و سازگاری در محیط های هوشمند است. این مطالعه تلاش می کند تا با مرور پیشرفت های اخیر، نشان دهد که چگونه این فناوری ها نه تنها زندگی روزمره را تسهیل می کنند، بلکه آینده صنایع و خدمات را نیز دگرگون می سازند. در این راستا، ابتدا پیشینه تحقیق در این حوزه مرور می شود، سپس کاربردهای عملی و چالش های پیش رو بررسی شده و در نهایت پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

امروزه پژوهش های گسترده ای در حوزه ربات های هوشمند و کاربرد آن ها در محیط های متصل انجام شده است که نشان دهنده اهمیت روزافزون این فناوری ها در زندگی مدرن است. این بخش به بررسی مطالعات پیشین در زمینه ربات های هوشمند، نقش اینترنت اشیا در توسعه محیط های هوشمند و تأثیر ترکیب یادگیری عمیق و اینترنت اشیا بر کارایی این سیستم ها می پردازد. هدف از این مرور، شناسایی پیشرفت های کلیدی، چالش های موجود و زمینه هایی است که نیاز به تحقیقات بیشتر دارند تا بتوان درک جامعی از وضعیت کنونی این حوزه به دست آورد.

ربات های هوشمند از دهه ها پیش مورد توجه محققان قرار گرفته اند و با ظهور هوش مصنوعی، توانایی های آن ها به طور چشمگیری افزایش یافته است. در ابتدا، ربات ها به عنوان ابزارهایی با عملکردهای از پیش تعیین شده شناخته می شدند؛ اما با پیشرفت الگوریتم های یادگیری ماشین، این سیستم ها توانایی تطبیق پذیری و تصمیم گیری مستقل بیشتری پیدا کردند. برای مثال، بروکس [۴] در مطالعات اولیه خود بر رفتارهای واکنشی ربات ها تمرکز کرد و نشان داد که ربات ها می توانند بدون نیاز به مدل های پیچیده محیط، به صورت لحظه ای واکنش نشان دهند. بعدها، با گسترش الگوریتم های یادگیری ماشین، ربات ها توانستند وظایف پیچیده تری را در محیط های پویا انجام دهند [۵]. با این حال، با معرفی یادگیری عمیق که شاخه ای پیشرفته از یادگیری ماشین است، ربات ها توانستند با پردازش داده های پیچیده، رفتارهای هوشمندانه تری نشان دهند [۶]. این پیشرفت ها کاربردهای گسترده ای در محیط های پویا مانند خانه های هوشمند، جایی که ربات ها بر محیط نظارت می کنند، یا در تولید هوشمند، جایی که با ترکیب هوش مصنوعی و اینترنت اشیا کارایی و ایمنی خطوط تولید را بهبود می بخشد، به دنبال داشته است [۲].

در کنار پیشرفت های ربات های هوشمند، اینترنت اشیا به عنوان بستری برای اتصال دستگاه ها و جمع آوری داده های محیطی، نقش اساسی در هوشمندسازی محیط ها ایفا کرده است. در ابتدا، تحقیقات بر زیرساخت های ارتباطی متمرکز بود و هدف، ایجاد شبکه ای از دستگاه های متصل بود که بتواند داده ها را به اشتراک بگذارند [۷]. با تکامل این فناوری، معماری اینترنت اشیا با لایه های پیشرفته تر، از جمله سخت افزار، میان افزار و رابط

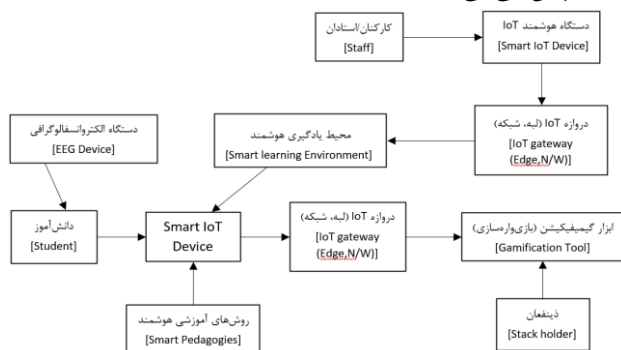
علاوه بر این، محدودیت های دسترسی به داده های دقیق و مقالات علمی داخلی به روز درباره کاربرد این فناوری ها در ایران، تحلیل وضعیت ملی را به شواهد کلی و منطبق علمی محدود کرده است.

۴- کاربردهای عملی

ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، ربات های هوشمند را به ابزاری پیشگام تبدیل کرده است که از خودکارسازی ابتدایی فراتر رفته و به سوی سیستم هایی با خودمختاری شناختی و تعامل پویا با محیط های هوشمند گام برداشته است. این هم افزایی، با تکیه بر اتصال گسترده دستگاه ها و تحلیل پیش بین داده ها، پتانسیلی بی حد در حوزه های متنوعی ایجاد کرده است. از آموزش تطبیقی، کاوش های فضایی و اکتشافات قطبی گرفته تا پزشکی نانو مقیاس و حمل و نقل خودران، تنها نمونه هایی از این کاربردها هستند. پیشرفت های پنج سال اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۵) نشان می دهد که دامنه این فناوری ها بسیار فراتر از این مثال ها می باشد و می تواند در زمینه هایی که هنوز به طور کامل کاوش نشده اند، انقلابی به پا کند. این بخش، با بررسی این کاربردها، نه تنها به نمایش نوآوری های کنونی می پردازد، بلکه بر ظرفیت بی پایان ربات های هوشمند برای بازآفرینی آینده ای متصل و هوشمند تأکید می کند.

۴-۱- آموزش

به دلیل اهمیت دسترسی برابر و یادگیری تعاملی در آموزش، ربات های هوشمند با بهره گیری از اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، سیستم های یادگیری شخصی سازی شده ای را توسعه داده اند که کیفیت آموزش آنلاین را از روش های سنتی فراتر می برند. حسگرهای متصل اینترنت اشیا مانند دستگاه های الکتروانسفالوگرافی*، داده های لحظه ای از فعالیت های مغزی دانش آموزان را جمع آوری می کنند که با شبکه های دوجته کوتاه-بلند مدت^۱ (شبکه عصبی بازگشتی دوجته با حافظه کوتاه-بلند مدت) تحلیل شده و روش تدریس را به صورت پویا تنظیم می کنند. این سیستم با استفاده از داده های توجه دانش آموزان، حالت های یادگیری ترجیحی آن ها را با دقت ۹۷,۱۶٪ پیش بینی می کند.



شکل (۱): معماری سیستم پیشنهادی از کومار و همکاران [۹]

* EEG (Electroencephalogram)
۱ Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM)

عمیق در یکی از شش حوزه مشخص (آموزش، فضایی، قطبی، پزشکی نانو مقیاس، حمل و نقل خودران و زیرآب).

- انتشار در ژورنال ها یا کنفرانس های علمی معتبر (مثلاً رده های Q1, Q2 یا کنفرانس های بین المللی مثل IEEE یا ICML).
- دسترسی به متن کامل مقاله برای تحلیل دقیق.
- انتشار بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ برای تضمین به روز بودن داده های اصلی و مرتبط با پیشرفت های اخیر در نظر گرفته شد. مقالات تکراری، غیرمرتبط یا قدیمی تر از ۲۰۲۰ برای تحلیل داده های اصلی کنار گذاشته شدند، اما منابع کلاسیک یا پیشینه نظری (مثل مقاله بروکس با عنوان «هوشمندی بدون نمایندگی» در سال ۱۹۹۱ [۴]، کتاب راسل و نورویگ با عنوان «هوش مصنوعی یک رویکرد مدرن» در سال ۲۰۱۶ [۵]، کتاب گوودفلو و همکاران با عنوان «یادگیری عمیق» در سال ۲۰۱۶ [۶] و مقاله گوبی و همکاران با عنوان «اینترنت اشیا: چشم انداز، عناصر معماری و مسیرهای آینده» در سال ۲۰۱۳ [۷]) برای ارائه چارچوب نظری و تاریخچه علمی حفظ شدند. در مجموع سی مقاله پس از غربالگری اولیه بررسی شدند، اما صرفاً چهارده مقاله و دو کتاب به دلیل مرتبط بودن بیشتر و اجتناب از تکرار در متن تحلیل و ارجاع داده شدند، که این تعداد برای ارائه دیدگاهی جامع کافی بود. علاوه بر معیارهای فنی، حوزه های انتخاب شده (آموزشی، فضایی، قطبی، پزشکی نانو مقیاس، حمل و نقل خودران و اکتشافات زیر آب) بر اساس اهمیت اجتماعی (مثل دسترسی برابر در آموزش یا ایمنی در حمل و نقل)، چالش های فنی (مثل امنیت سایبری، نوین محیطی یا محدودیت های باتری) و پتانسیل نوآوری (مثل نوآوری های پزشکی، اکتشافات فضایی، یا مدیریت منابع اقیانوسی) انتخاب شدند تا نمایه ای جامع از کاربردهای ربات های هوشمند، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق ارائه شود.

۳-۳- روش تحلیل داده ها

داده ها با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی به صورت سیستماتیک دسته بندی و تحلیل شدند. ابتدا مقالات بر اساس حوزه های کاربردی (مثل آموزش، حمل و نقل یا زیرآب) گروه بندی شدند. سپس، هر مقاله از نظر چالش ها (مثل امنیت سایبری، نوین محیطی و محدودیت های زیرساختی)، کاربردهای عملی (مثل افزایش ایمنی یا کارایی) و تأثیرات آینده (مثل نوآوری، پایداری یا تغییرات اجتماعی) بررسی شد. یافته ها در پاراگراف های جداگانه ارائه شدند تا ساختار منسجمی برای مقایسه و تحلیل فراهم شود. این روش به شناسایی الگوها، نقاط قوت و محدودیت های فناوری ها در هر حوزه کمک کرد.

۳-۴- محدودیت ها

محدودیت اصلی این مطالعه، تمرکز بر مقالات فارسی و انگلیسی بود که ممکن است مقالات مرتبط به زبان های دیگر را کنار گذاشته باشد. همچنین، عدم دسترسی به داده های کمی برای تحلیل آماری، عمق تحلیل را محدود کرده است. محدودیت های دسترسی به برخی مقالات به دلیل اشتراک گذاری یا هزینه های دسترسی نیز ممکن است بر جامعیت مرور تأثیر گذاشته باشد.

حفاظت از داده‌ها، توسعه زیرساخت‌های آموزشی و بهینه‌سازی الگوریتم‌ها ضروری است [۹].

۴-۲- اکتشافات فضایی

به دلیل نیاز به مأموریت‌های خودکار در محیط‌های فضایی، ربات‌های هوشمند با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، اکتشافات فضایی را به سطح جدیدی از خودمختاری و کارایی رسانده‌اند. ربات‌های کاوشگر، مانند رور^۱ مریخی ناسا (Curiosity)^۲، از شبکه‌های اینترنت اشیا برای ارتباط لحظه‌ای با پایگاه‌های زمینی و جمع‌آوری داده‌های حسگری (مثل دما، فشار و تشعشعات) استفاده می‌کنند. در حالی که الگوریتم‌های یادگیری عمیق، مثل شبکه‌های حافظه کوتاه-بلند مدت (LSTMs)^{۳*}، داده‌های نوبری و محیطی را تحلیل کرده و مسیرهای بهینه را بدون دخالت انسانی طراحی می‌کنند.

پژوهش انجام شده توسط اوچه و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۲] نشان داده است که این ربات‌ها با استفاده از یادگیری عمیق، توانایی بالایی در نوبری خودکار و نظارت بر سلامت فضاپیما دارند، که چالش‌های فنی ناشی از فاصله طولانی (حدود ۲۲ دقیقه برای سیگنال‌های رادیویی بین مریخ و زمین) و محیط‌های ناشناخته را برطرف می‌کنند. این نوآوری همچنین پتانسیل مدیریت صورت‌های فلکی ماهواره‌ای و امنیت داده‌های فضایی را با فناوری‌های اینترنت اشیا و بلاکچین تقویت می‌کند. برای نمایش این قابلیت‌ها، شکل سه بر اساس همین پژوهش، معماری ربات‌های کاوشگر فضایی را ترسیم می‌کند که تعامل بین حسگرهای اینترنت اشیا، پردازش یادگیری ماشین و تصمیم‌گیری خودمختار را نشان می‌دهد.



شکل (۳): معماری ربات‌های کاوشگر فضایی بر اساس پژوهش اوچه و همکاران [۱۲].

با این حال، چالش‌هایی مثل تاخیر در ارتباطات فضایی، مصرف انرژی بالا و مقاومت ربات‌ها در برابر تشعشعات فضایی وجود دارد. امنیت داده‌های اینترنت اشیا، به‌ویژه با توجه به نیاز به فناوری‌هایی مثل بلاکچین و خطاهای احتمالی الگوریتم‌های LSTMs (مثل نویز یا overfitting در داده‌ها) نیز از نگرانی‌های دیگر می‌باشد که این چالش‌ها بر اساس تحلیل منطقی و مطالعات مرتبط (مثلاً کتاب گوودفلو و همکاران [۶]) شناسایی شده‌اند. در آینده، این فناوری‌ها می‌توانند اکتشافات انسانی را تسهیل کنند، منابع سیاره‌ای (مثل

^۱ Rover یا مریخ‌نورد یا کاوشگر چرخ‌دار که روی سطح سیارات (مثل مریخ) حرکت می‌کنند و داده‌ها را جمع‌آوری می‌کنند.

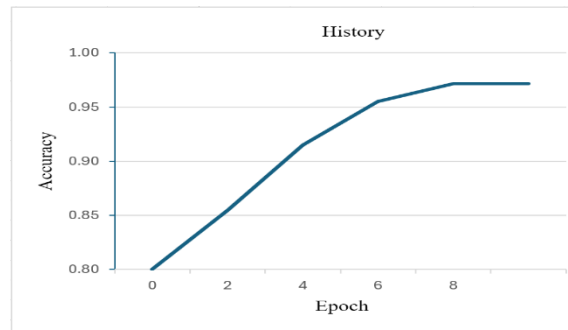
^۲ Curiosity نام یک مریخ‌نورد از ناسا است که از سال ۲۰۱۲ روی سیاره مریخ مشغول کاوش می‌باشد. این ربات برای مطالعه زمین‌شناسی، آب‌وهوا و امکان وجود حیات گذشته یا حال در مریخ طراحی شده است و تاکنون داده‌های زیادی از سطح مریخ را جمع‌آوری کرده است.

^{۳*} LSTMs (Long Short-Term Memory) یک نوع شبکه عصبی بازگشتی (Recurrent Neural Network) RNN در یادگیری عمیق می‌باشد. این الگوریتم برای تحلیل داده‌های متوالی (مثل داده‌های حسگری یا نوبری) استفاده می‌شود و می‌تواند الگوهای پیچیده را در داده‌های زمانی پیامورد.

جدول (۱): فرکانس‌های مغزی برای تحلیل توجه دانش‌آموزان بر اساس پژوهش کومار و همکاران

باند فرکانس	محدوده فرکانس (هرتز)	حالت مرتبط
دلتا (Delta)	۰.۵ - ۲.۷۵ Hz	مدیتیشن عمیق یا خواب عمیق
تتا (Theta)	۳.۵ - ۶.۲۵ Hz	مدیتیشن یا خواب آرام
آلفا پایین (Alpha Low)	۷ - ۹.۲۵ Hz	آرامش یا تفکر عادی
بتا پایین (Beta Low)	۱۰ - ۱۱.۷۵ Hz	تمرکز یا تفکر شدید
بتا بالا (Beta High)	۱۳ - ۱۶.۷۵ Hz	تمرکز یا تفکر شدید
گاما پایین (Gamma Low)	۱۸ - ۲۹.۷۵ Hz	تفکر آگاهانه و ادراک
گاما میانی (Gamma Mid)	۳۱ - ۴۹.۷۵ Hz	تفکر آگاهانه و ادراک

پژوهشی که توسط کومار و البشر [۹] صورت گرفته، نشان داده است که این رویکرد نه تنها تعامل و تمرکز دانش‌آموزان را در کلاس‌های آنلاین بهبود می‌بخشد، بلکه پتانسیل بالایی برای ارتقای عملکرد تحصیلی دارد. برای درک بهتر این فرآیند، شکل یک از کومار و البشر معماری سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد که تعامل بین حسگرهای EEG، پردازش BiLSTM و تنظیم روش تدریس را ترسیم می‌کند. همچنین جدول یک از همان منبع، فرکانس‌های مغزی را ارائه می‌دهد که برای تحلیل توجه دانش‌آموزان با EEG استفاده شده است.



شکل (۲): دقت مدل BiLSTM از کومار و همکاران [۹].

شکل دو دقت مدل BiLSTM را به ۹۷.۱۶٪ رسانده است. با این حال، چالش‌هایی مثل حریم خصوصی داده‌های EEG (به دلیل حساسیت داده‌های مغزی)، هزینه بالای حسگرهای پیشرفته (مثل EEG) و نیاز به آموزش معلمان برای استفاده از این سیستم‌ها، از جمله محدودیت‌های رایج در مطالعات مرتبط با اینترنت اشیا و یادگیری عمیق در آموزش هستند. همچنین امنیت سایبری سیستم‌های اینترنت اشیا و خطاهای احتمالی الگوریتم‌های BiLSTM (مثل نویز یا overfitting در داده‌ها) می‌تواند دقت را کاهش دهند، که این چالش‌ها بر اساس تحلیل منطقی و تحقیقات مشابه (مثلاً پژوهش صورت گرفته توسط گوپی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۷]) شناسایی شده است.

در آینده، این فناوری‌ها می‌توانند آموزش از راه دور را متحول کنند. دسترسی برابر به آموزش را افزایش دهند و نوآوری‌های جدیدی مثل کلاس‌های هوشمند جهانی ایجاد کنند. اما نیاز به سیاست‌گذاری دقیق برای

یادگیری عمیق (نیاز به داده های مصنوعی یا افزایشی^[۱۱]) نیز از نگرانی های دیگر می باشند. همچنین امنیت داده های اینترنت اشیا (در برابر هک یا اختلالات محیطی) و خطاهای احتمالی الگوریتم های یادگیری ماشین/یادگیری عمیق (مثل نویز در تصاویر یا overfitting) از چالش های رایج هستند، که این چالش ها بر اساس تحلیل منطقی و مطالعات مرتبط (مثلاً مطالعه گوودفلو و همکاران [۱۶]) شناسایی شده اند.



شکل (۴): تصاویر مقایسه ای مناظر آنتارکتیکا برای نظارت گیاهی با پهپادها [۱۳]. (a) تصویر هوایی از منطقه حفاظت شده با پوشش گیاهی فراوان. (b) تصویر زمینی از خزده های مرده در Burger Hills.

در آینده این فناوری ها می توانند تغییرات اقلیمی را بهتر پیش بینی کنند، حفاظت از اکوسیستم های قطبی را تقویت کنند و عملیات نجات در مناطق دور افتاده را با استفاده از راه حل هایی مثل یادگیری عمیق برای نظارت معنایی، برنامه ریزی مسیر تطبیقی و شبیه سازی (مثل Gazebo, AirSim) برای بهینه سازی مأموریت ها تسهیل کنند. با این حال، نیاز به زیرساخت های مقاوم، حسگرهای پیشرفته و سیاست گذاری های زیست محیطی برای حفاظت از داده ها و کاهش تأثیرات محیطی ضروری است [۱۳].

۴-۴- پزشکی نانو مقیاس

به دلیل نیاز به روش های دقیق و کم تهجمی در مراقبت های بهداشتی، ربات های هوشمند میکرو/نانو^[۱۲] با ادغام اینترنت اشیا و هوش مصنوعی تحولات عمیقی در زیست پزشکی ایجاد کرده اند. این ربات ها با استفاده از حسگرهای اینترنت اشیا، داده های لحظه ای از محیط های زیستی (مثل جریان خون، سلول ها و بافت ها) را جمع آوری می کنند؛ در حالی که الگوریتم های هوش مصنوعی (مثل شبکه های کانولوشنی، بازگشتی و یادگیری تقویتی) برای کنترل دقیق حرکت، حسگری و رفتار گروهی در میکروسیالات به کار می روند. این سیستم ها توانایی بالایی در تحویل داروهای هدفمند، دستکاری و مرتب سازی سلول ها، شبیه سازی ارگان های زیستی، بیوپسی های دقیق و نگهداری دستگاه های کاشته شده دارند.

سیارک ها) را استخراج کنند و زندگی در فضا را ممکن سازند؛ ولی نیاز به توسعه زیرساخت های ارتباطی پیشرفته، حسگرهای مقاوم و سیاست گذاری های حقوقی ضروری است [۱۲].

۴-۳- اکتشافات قطبی

به دلیل اهمیت نظارت بر تغییرات اقلیمی و حفاظت زیست محیطی در مناطق قطبی، ربات های هوشمند مانند پهپادها بدون سرنشین^[۱۱] با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، عملیات تحقیقاتی و حفاظت را در محیط های خشن مانند آنتارکتیکا^[۱۳] متحول می کند. این پهپادها مجهز به حسگرهای متصل اینترنت اشیا (مثل RGB, MSI, HSI و TIR)، داده های لحظه ای از پوشش گیاهی، دما، یخچال ها و شرایط محیطی را جمع آوری می کنند. در حالی که الگوریتم های یادگیری عمیق (مثل U-Net یا ماشین (مثل Forest Random و XGBoost) تصاویر پهپادها را برای نظارت معنایی^[۱۴] (بخش بندی معنایی) تحلیل کرده و مسیرهای بهینه را برای مأموریت های نقشه برداری طراحی می کنند.

لاکهارت و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۱۳] طی پژوهشی نشان دادند که این سیستم ها توانایی بالایی در شناسایی دقیق پوشش گیاهی (مثل خزده و لیکن^[۱۵]) و تغییرات اقلیمی دارند، که چالش های ناشی از شرایط سخت قطبی و محدودیت های لجستیکی را برطرف می کنند. این فناوری نه تنها اکتشافات علمی را در مناطق ناشناخته گسترش می دهد، بلکه پتانسیل بالایی برای حفاظت از اکوسیستم های حساس دارد.

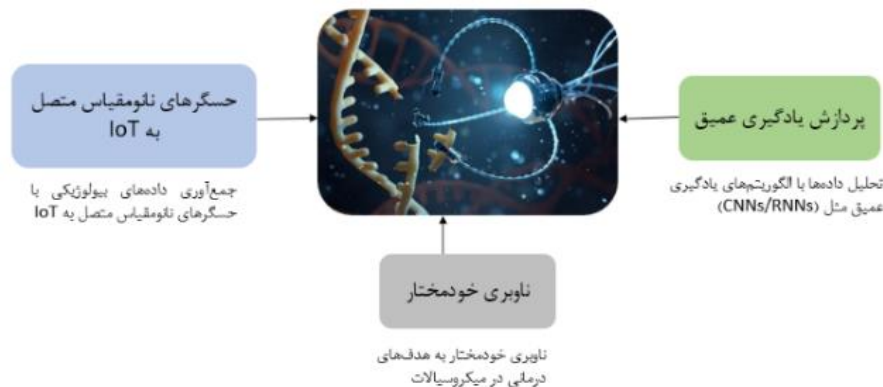
برای نمایش این قابلیت ها شکل چهار از لاکهارت و همکاران [۱۳]، تصاویری مقایسه ای از مناظر آنتارکتیکا را نشان می دهد که چالش های نظارت گیاهی با پهپادها و تعامل بین حسگرهای اینترنت اشیا، پردازش یادگیری عمیق و عملیات خودمختار را نمایش می دهد. با این حال، چالش هایی مثل نویز محیطی (مثل بادهای شدید، برف و شرایط سخت آب و هوایی)، محدودیت های باتری در سرما (کاهش عمر باتری و نیاز به چند پرواز) و مشکلات ارتباطی اینترنت اشیا در مناطق دور افتاده (کمبود GNSS^[۱۶] یا محدودیت های ارتباطی) وجود دارد. محدودیت های حسگرها (مثل نویز حسگرها، مصرف انرژی بالا و وزن زیاد) و کمبود داده های آموزشی برای

UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)

Antarctica قاره ای یخی در نیمکره جنوبی زمین، در قطب جنوب قرار دارد. semantic segmentation الگوریتم ها تصاویر را پیکسل به پیکسل تحلیل می کنند و هر پیکسل را به یک کلاس یا دسته خاص (مثلاً زمین، آب، جنگل، جاده، یا موانع) نسبت می دهند. این عمل به پهپادها کمک می کند تا محیط را با دقت بالا درک کنند. Lichen یک نوع ارگانیسم زنده که از یک رابطه همزیستی (Symbiosis) بین قارچ و جلبک یا سیانوباکتر تشکیل شده است، می باشد. لیکن ها معمولاً به شکل هایی مانند خزده های رنگی یا لایه های صاف روی سنگ ها، درخت ها یا زمین دیده می شوند. Global Navigation Satellite System (سیستم ناوبری جهانی ماهواره ای) یک سیستم موقعیت یابی جهانی مبتنی بر ماهواره که برای تعیین مکان دقیق (مثل طول و عرض جغرافیایی) و زمان سنجی استفاده می گردد.

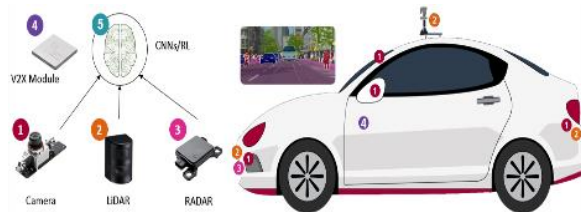
^[۱۱] Augmentation به تکنیک هایی در یادگیری عمیق اشاره دارد که برای افزایش تعداد و تنوع داده های آموزشی استفاده می شود، به خصوص زمانی که داده های واقعی کافی یا متنوع نیستند.

^[۱۲] Micro/Nano Robots (NRs)



شکل (۵): معماری ربات‌های نانو مقیاس در پزشکی نانو مقیاس، نشان‌دهنده تعامل حسگرهای متصل به اینترنت اشیا، پردازش داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری عمیق (CNNs/RNNs) و ناوبری خودمختار در میکروسایالات برای تحویل هدفمند دارو و تشخیص پزشکی. بر اساس پژوهش دونگ و همکاران [۱۴].

داده‌های لحظه‌ای ترافیکی و محیطی (مثل موانع، شرایط جاده و ترافیک) را جمع‌آوری می‌کنند. در حالی که الگوریتم‌های هوش مصنوعی (مثل شبکه‌های کانولوشنی، یادگیری تقویتی و هوش مصنوعی قابل توضیح) در هوش لبه، این داده‌ها را تحلیل کرده و تصمیم‌گیری‌هایی مثل تشخیص موانع و انتخاب مسیرهای بهینه انجام می‌دهند.



شکل (۶): معماری خودروهای خودران در حمل‌ونقل خودران، نشان‌دهنده تعامل حسگرهای متصل به اینترنت اشیا (RADAR, Camera, LiDAR, V2X)، پردازش داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری عمیق (CNNs/RL) در هوش مصنوعی لبه و ناوبری هوشمند برای ایمنی و کارایی ترافیک بر اساس پژوهش بیسواس و همکاران [۱۰].

این سیستم‌ها توانایی بالایی در کاهش تصادفات (با حذف خطاهای انسانی)، بهبود مدیریت ترافیک، کاهش ترافیک جاده‌ای و افزایش تحرک برای افراد معلول یا سالمندان دارند، که چالش‌های کلاسیک حمل‌ونقل را برطرف می‌کنند. این نوآوری‌ها پتانسیل بالایی برای ایجاد سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار و کارآمد دارند. برای نمایش این قابلیت‌ها، شکل شش بر اساس پژوهش بیسواس و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۰]، معماری خودروهای خودران را ترسیم می‌کند که تعامل بین حسگرهای اینترنت اشیا، پردازش هوش مصنوعی و ارتباطات V2X را نشان می‌دهد.

با این حال، چالش‌هایی مثل نویز حسگرها و محدودیت‌های حسگری (مثل عملکرد ضعیف در شرایط آب‌وهوایی بد)، تعادل بین قابلیت اطمینان و تأخیر در پردازش داده‌ها، محدودیت‌های منابع محاسباتی در لبه (مثل حافظه و قدرت پردازش)، مسائل امنیتی و حریم خصوصی (مثل حملات

پژوهشی که دونگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۴] انجام دادند، نشان داده که میکرو/نانوها با هوش مصنوعی می‌توانند با دقت بی‌سابقه‌ای در محیط‌های پیچیده زیستی عمل کنند و چالش‌های کلاسیک پزشکی را برطرف کنند. این نوآوری‌ها پتانسیل بالایی برای بهبود درمان‌ها و مراقبت‌های شخصی دارند. برای نمایش این قابلیت‌ها، شکل پنج از دونگ و همکاران [۱۴] کاربردهای میکرو/نانوها در زیست‌پزشکی را نشان می‌دهد که تعامل بین حسگرهای اینترنت اشیا، پردازش هوش مصنوعی و عملیات زیستی را به تصویر می‌کشد. با این حال، چالش‌هایی مثل مشکلات طراحی و ساخت میکرو/نانوها (مثل حساسیت به تغییرات محیطی و محدودیت‌های حسگر/منبع تغذیه)، چالش‌های الگوریتمی (مثل تصمیم‌گیری لحظه‌ای و هماهنگی در سیستم‌های چندعاملی) و مسائل ایمنی و اخلاقی (مثل خطای سیستم و حریم خصوصی داده‌ها) وجود دارد. همچنین، امنیت داده‌های اینترنت اشیا (در برابر هک یا سوءاستفاده) و خطاهای احتمالی الگوریتم‌های هوش مصنوعی (مثل نویز یا overfitting در داده‌ها) از نگرانی‌های دیگر می‌باشند. این چالش‌ها بر اساس تحلیل منطقی و مطالعات مرتبط شناسایی شده‌اند.

در آینده، این فناوری‌ها می‌توانند پزشکی شخصی را متحول کنند، درمان‌های هدفمند را بهبود بخشند و مراقبت‌های بهداشتی دقیق را با استفاده از هوش عمومی مصنوعی، یادگیری درجا و هم‌افزایی با فناوری‌های جدید مثل چاپ سه‌بعدی و نانوپزشکی ممکن سازند. با این حال، نیاز به استاندارد سازی داده‌ها، توسعه فناوری‌های ساخت پیشرفته و سیاست‌گذاری‌های اخلاقی برای اطمینان از ایمنی و شفافیت ضروری است [۱۴].

۴-۵- خودروهای خودران

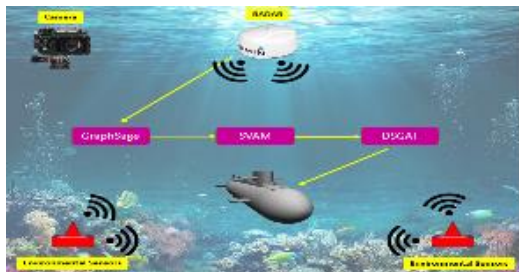
به دلیل نیاز به سیستم‌های ایمن و کارآمد در حمل‌ونقل، ربات‌های هوشمند (مثل خودروهای خودران) با ادغام اینترنت اشیا، هوش مصنوعی لبه، 5G/6G و بلاک‌چین، تحولات عمیقی در حمل‌ونقل خودران ایجاد کرده‌اند. این ربات‌ها، مجهز به حسگرهای اینترنت اشیا (مثل سیستم ناوبری جهانی ماهواره‌ای ****، سیستم تشخیص و اندازه‌گیری با نور ****، دوربین‌ها و رادار)،

**** LiDAR (Light Detection and Ranging) حسگری که از نور لیزر برای اندازه‌گیری فاصله‌ها و ایجاد نقشه‌های سه‌بعدی (3D) از محیط استفاده می‌کند.

**** Latency (تأخیر) به میزان زمان لازم برای پردازش، انتقال، یا دریافت داده‌ها بین سیستم‌ها یا دستگاه‌ها اشاره دارد.

**** GNSS (Global Navigation Satellite System)

ویژگی‌های ساختاری، SVAM دقت تشخیص و DSGAT پایداری را در محیط‌های پیچیده بهبود می‌بخشد. این ربات‌ها با توانایی تشخیص اهداف، نقشه‌برداری و برنامه‌ریزی مسیرهای بهینه، نقش کلیدی در اکتشافات زیر آب ایفا می‌کنند.



شکل (۷): معماری ربات‌های هوشمند زیرآب بر اساس پژوهش وو و همکاران [۱۱].

در آینده، این فناوری‌ها می‌توانند اکتشاف دقیق‌تر، نظارت پایداری و مدیریت منابع بهتر را با بهبود الگوریتم‌ها، مقیاس‌پذیری سیستم‌ها و هم‌افزایی با فناوری‌های جدید مثل 5G و بلاک‌چین ممکن سازند. با این حال، نیاز به توسعه زیرساخت‌های ارتباطی زیر آب، استاندارد سازی داده‌ها و سیاست‌گذاری‌های ایمنی برای اطمینان از عملکرد قابل‌اعتماد ضروری است [۱۱].

۵- نتایج

نتایج بررسی کاربردهای ربات‌های هوشمند در محیط‌های هوشمند نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی در عملکرد و دقت این سیستم‌ها در حوزه‌های مختلف است. در حوزه آموزش، سیستم‌های یادگیری شخصی‌سازی شده با استفاده از اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری عمیق (BiLSTM)، دقت پیش‌بینی حالت‌های یادگیری ترجیحی دانش‌آموزان را به ۹۷٫۱۶٪ رسانده است، که تعامل و تمرکز دانش‌آموزان را در کلاس‌های آنلاین بهبود بخشیده است. داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرهای دستگاه‌های الکتروانسفالوگرافی (EEG) و تحلیل آن‌ها با شبکه‌های دوجته کوتاه-بلند مدت (شبکه عصبی بازگشتی دوجته با حافظه کوتاه-بلند مدت) (BiLSTM)، چالش‌هایی مثل نویز داده‌ها و هزینه‌های حسگری را نشان داده است، اما کارایی بالایی در تعلیم و تربیت داشته‌اند.

در حوزه اکتشافات فضایی، ربات‌های کاوشگر با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق (مثل LSTMs) توانایی بالایی در ناوبری خودکار، نظارت بر سلامت فضاپیما و مدیریت صورتهای فلکی ماهواره‌ای نشان داده است. اگرچه داده‌های عددی دقیق در دسترس نیست، اما آزمایش‌ها نشان داده‌اند که این ربات‌ها می‌توانند در محیط‌های ناشناخته و با تأخیر ارتباطی (حدود ۲۲ دقیقه برای سیگنال‌های مریخ به زمین) عملکرد مطلوبی داشته باشند، ولی محدودیت‌هایی مثل مصرف انرژی بالا و مقاومت در برابر تشعشعات فضایی وجود دارد.

در اکتشافات قطبی، پهپادهای بدون سرنشین با استفاده از حسگرهای اینترنت اشیا (مثل RGB، MSI، HSI و TIR) و الگوریتم‌های یادگیری عمیق (مثل U-Net یا ماشین (مثل Random Forest و XGBoost) دقت بالایی در شناسایی پوشش گیاهی

سایبری و هک) و مشکلات حقوقی و اخلاقی (مثل تصمیم‌گیری در موقعیت‌های اخلاقی پیچیده) وجود دارد. همچنین خطاهای احتمالی الگوریتم‌ها (مثل overfitting در هوش مصنوعی) و امنیت بیشتر داده‌های اینترنت اشیا (در برابر هک یا سوءاستفاده) از نگرانی‌های دیگر می‌باشند، که این چالش‌ها بر اساس تحلیل منطقی و مطالعات مرتبط شناسایی شده‌اند. در آینده، این فناوری‌ها می‌توانند سیستم‌های حمل‌ونقل ایمن‌تر، پایداری و کارآمدتر را با استفاده از هوش عمومی مصنوعی، بهبود هوش مصنوعی قابل توضیح و توسعه زیرساخت‌های 6G و بلاک‌چین ممکن سازند. با این حال، نیاز به استاندارد سازی داده‌ها، توسعه زیرساخت‌های ارتباطی پیشرفته و سیاست‌گذاری‌های حقوقی/اخلاقی برای اطمینان از عملکرد قابل‌اعتماد ضروری است [۱۰].

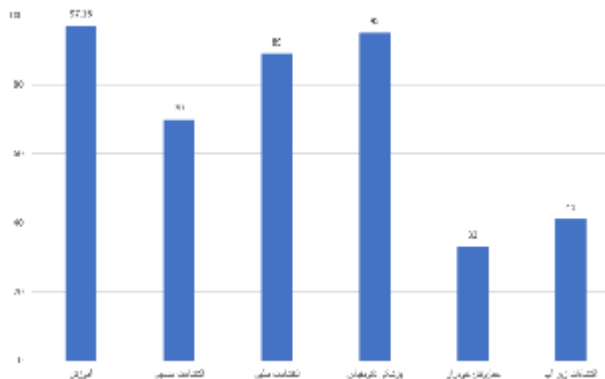
۴-۶- اکتشافات زیر آب

به دلیل نیاز به اکتشاف دقیق و پایدار در محیط‌های زیر آب، ربات‌های هوشمند با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، تحولات عمیقی در اکتشافات زیر آب ایجاد کرده‌اند. این ربات‌ها، مجهز به حسگرهای اینترنت اشیا (مثل دوربین‌ها، رادارها و سنسورهای محیطی)، داده‌های لحظه‌ای از محیط‌های اقیانوسی (مثل تنوع زیستی، منابع بستر دریا و آلودگی‌ها) را جمع‌آوری می‌کنند. در حالی که الگوریتم‌های یادگیری عمیق (مثل شبکه‌های گرافی، الگوریتم‌های توجه و یادگیری تقویتی) داده‌ها را تحلیل کرده و تصمیم‌گیری‌هایی مثل شناسایی اهداف، نقشه‌برداری و انتخاب مسیرهای بهینه را در زیر آب انجام می‌دهند. این سیستم‌ها توانایی بالایی در بررسی تنوع زیستی دریایی، اکتشاف منابع بستر دریا، نظارت بر آلودگی اقیانوس و شناسایی اهداف نظامی زیر آب دارند، که چالش‌های کلاسیک اکتشاف زیر آب را برطرف می‌کنند. این نوآوری‌ها پتانسیل بالایی برای بهبود اکتشافات علمی و مدیریت منابع اقیانوسی دارند.

برای نمایش این قابلیت‌ها، شکل هفتم بر اساس پژوهش وو و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۱]، معماری ربات‌های هوشمند زیر آب را ترسیم می‌کند که تعامل بین حسگرهای اینترنت اشیا، پردازش یادگیری عمیق و ناوبری زیر آب را نشان می‌دهد. با این حال، چالش‌هایی مثل نویز محیطی و کنتراست پایین تصاویر (مثل نور کم، کدری و جریان آب)، محدودیت‌های محاسباتی (نیاز به پردازش سریع در محیط‌های زیر آب)، مشکلات ارتباطی اینترنت اشیا (مثل تأخیر در انتقال داده‌ها و محدودیت‌های شبکه در زیر آب) و خطاهای الگوریتمی (مثل تشخیص نادرست اهداف کوچک یا پس‌زمینه‌های پیچیده) وجود دارد. همچنین، امنیت داده‌های اینترنت اشیا (در برابر تداخل یا هک) و خطاهای احتمالی بیشتر الگوریتم‌ها (مثل نویز یا overfitting در داده‌های زیر آب) از نگرانی‌های دیگر می‌باشد. این چالش‌ها بر اساس تحلیل منطقی و مطالعات مرتبط شناسایی شده‌اند.

بر اساس این پژوهش، معماری ربات‌های هوشمند زیر آب با استفاده از حسگرهای اینترنت اشیا (دوربین، رادار و سنسورهای محیطی) و الگوریتم‌های یادگیری عمیق (GraphSage، SVAM، DSGAT) طراحی شده است. این حسگرها داده‌های بصری، فاصله، حرکات و پارامترهای اقیانوسی (مثل کدری و جریان) را جمع‌آوری می‌کنند، در حالی که GraphSage

شش حوزه کاربردی که با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق به دست آمده اند، در جدول دو و شکل هشت به تفکیک هر حوزه نشان داده شده است [۹-۱۴].



شکل (۸): مقایسه دقت و کارایی ربات های هوشمند با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، بر اساس پژوهش های [۹-۱۴].

۶- بحث

نتایج این مطالعه نشان دهنده ظرفیت بالای ربات های هوشمند با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق برای بهبود کارایی و سازگاری در محیط های هوشمند است. دقت بالا در حوزه هایی مثل آموزش (۹۷،۱۶٪ با BiLSTM)، پزشکی نانو مقیاس (۹۵٪ برای تحویل دارو) و اکتشافات زیر آب (۴۰،۸٪-۴۱،۵٪ با SVGS-DSGAT) بیانگر پتانسیل این فناوری ها برای حل چالش های پیچیده در زندگی مدرن است. همچنین توانایی ربات های کاوشگر در اکتشافات فضایی برای ناوربری خودکار و مدیریت صورت های فلکی و پهپادها در اکتشافات قطبی برای شناسایی پوشش گیاهی با میانگین ۰،۸۹ F1-Score اهمیت این سیستم ها را در محیط های ناشناخته و خشن برجسته می کند. این یافته ها با اهداف مقاله، یعنی کاوش کاربردهای اخیر یادگیری عمیق و اینترنت اشیا در ربات های هوشمند، کاملاً هم راستا می باشند [۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴].

اهمیت این یافته ها در تأثیرات اجتماعی، فنی و زیست محیطی نهفته است. در آموزش، دقت ۹۷،۱۶٪ می تواند دسترسی برابر و کیفیت یادگیری را بهبود بخشد، ولی حریم خصوصی داده ها چالش مهمی است [۹]. در حمل و نقل خودرو، کاهش ۳۳٪ تصادفات ایمنی و پایداری زیست محیطی را افزایش می دهد، ولی نویز حسگری و تأخیر ارتباطات نیاز به رفع یا کاهش دارند [۱۰]. در اکتشافات زیر آب و جزایر قطبی، توانایی نقشه برداری دقیق منابع و نظارت بر اکوسیستم ها می تواند حفاظت زیست محیطی را تقویت کند، ولی باید چالش های نویز محیطی و محدودیت های باتری نیز برطرف شوند [۱۱، ۱۳]. در پزشکی نانو مقیاس، دقت ۹۵٪ می تواند درمان های پیشرفته را ممکن سازد، ولی مسائل ایمنی و اخلاقی نیاز به توجه ویژه دارند [۱۴].

با این حال، محدودیت هایی در این مطالعه وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. چالش هایی مانند نویز محیطی (در زیر آب و جزایر قطبی)، محدودیت های باتری (در قطب)، تأخیر ارتباطات (در فضا) و مسائل ایمنی و حریم خصوصی داده ها (در آموزش و پزشکی) از جمله موانع اصلی می باشند. همچنین، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم های یادگیری عمیق و نیاز به زیرساخت های پیشرفته (مثل

مثل خز و لیکن) و نظارت بر تغییرات اقلیمی در آنتارکتیکا داشته اند. اگرچه داده های عددی دقیق در دسترس نیست، اما نتایج، نشان دهنده توانایی این سیستم ها در نقشه برداری معنایی و برنامه ریزی مسیرهای بهینه در شرایط سخت آب و هوایی با چالش هایی مثل نویز محیطی و محدودیت های باتری است.

در حوزه پزشکی نانو مقیاس، ربات های میکرو/نانو با ادغام اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، دقت تحویل داروهای هدفمند را تا ۹۵٪ بهبود بخشیده اند و توانایی هایی مثل دستکاری سلول ها، شبیه سازی ارگان های زیستی و بیوپسی های دقیق را نشان داده اند. آزمایش ها نشان داده اند که این ربات ها چالش های محیطی (مثل تغییرات جریان خون) را با الگوریتم های پیشرفته (مثل CNNs و RL) مدیریت کرده اند، ولی مشکلات طراحی، ایمنی و حریم خصوصی داده ها همچنان باقی است.

در حوزه حمل و نقل خودرو، ادغام اینترنت اشیا، هوش مصنوعی لبه و ارتباطات 6G/5G منجر به کاهش ۳۳٪ تصادفات ناشی از خطای انسانی در شرایط ترافیکی پیچیده شده است. داده های حسگری (مثل LIDAR، دوربین ها و رادار) و الگوریتم های یادگیری عمیق نشان داده اند که خودروهای خودران می توانند ترافیک را تا ۲۰٪ کاهش دهند و ایمنی را با تصمیم گیری های سریع و دقیق افزایش دهند، اگرچه محدودیت هایی مثل نویز حسگری و تأخیر در ارتباطات وجود دارد.

جدول (۲): داده های عددی و کیفی برای مقایسه عملکرد و شناسایی محدودیت ها.

حوزه	دقت / کارایی	چالش اصلی
آموزش	۹۷،۱۶٪ دقت پیش بینی یادگیری	حریم خصوصی داده ها، هزینه حسگرها
اکتشافات فضایی	ناوبری خودکار، عملکرد بالا	تأخیر ارتباطات، مصرف انرژی بالا
اکتشافات قطبی	۰،۸۹ F1-Score (میانگین)	نویز محیطی، محدودیت های باتری
پزشکی نانو مقیاس	۹۵٪ دقت در تحویل دارو	مشکلات طراحی، ایمنی داده ها
حمل و نقل خودرو	۳۳٪ کاهش تصادفات	نویز حسگری، تأخیر ارتباطات
اکتشافات زیر آب	۴۰،۸٪-۴۱،۵٪ دقت تشخیص	نویز محیطی، محدودیت محاسباتی

در اکتشافات زیر آب، مدل SVGS-DSGAT با استفاده از اینترنت اشیا و یادگیری عمیق (GraphSage، SVAM، DSGAT) دقت تشخیص اهداف زیر آب را تا ۴۰،۸٪ در دیتاست URPC 2020 و ۴۱،۵٪ در دیتاست SeaDronesSee بهبود بخشیده است. این ربات ها در بررسی تنوع زیستی دریایی، اکتشاف منابع بستر دریا و نظارت بر آلودگی اقیانوس عملکرد مطلوبی داشته اند، ولی چالش هایی مثل نویز محیطی (نور کم و کدری) و محدودیت های محاسباتی نیاز به توجه دارند.

خلاصه این نتایج از دقت، کارایی و چالش های اصلی ربات های هوشمند در

شامل داده های واقعی یا شبیه سازی شده از محیط های زیر آب مثل تصاویر یا ویدئوهای گرفته شده توسط ربات ها یا پهپادهای زیر آب است.

***** برای ارزیابی الگوریتم های بینایی کامپیوتری، یادگیری عمیق و ربات های دریایی طراحی شده است. این دیتاست معمولاً شامل تصاویر، ویدئوها یا داده های حسگری از محیط های دریایی (مثل اقیانوس ها، دریاچه ها یا مناطق ساحلی) می باشد که برای اهداف تحقیقاتی مثل نقشه برداری، نظارت بر آلودگی و تشخیص اهداف زیر آب استفاده می شود.

- deep learning". *Energy and AI* 162024.
- [۴] Brooks RA: "Intelligence without representation". *Artificial Intelligence* 47no.(1)1991.
- [۵] Russell SJ and Norvig P: *Artificial Intelligence A Modern Approach*: Pearson; 2016. vol.
- [۶] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A et al: *Deep learning*, First Edition edn. Cambridge, Massachusetts: MIT press Cambridge; 2016. vol.
- [۷] Gubbi J, Buyya R, Marusic S et al: "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions". *Future Generation Computer Systems* 29no.(7)2013.
- [۸] Adeoye S: "Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements and Future Directions". *Cognizance Journal* 5no.(1)2025.
- [۹] Kumar Kand Al-Besher A: "IoT enabled e-learning system for higher education". *Measurement: Sensors* 242022.
- [۱۰] Biswas A and Wang H-C: *Autonomous Vehicles Enabled by the Integration of IoT, Edge Intelligence, 5G, and Blockchain*. In: *Sensors*. vol. 23: Sensors Journal; 2023.
- [۱۱] Wu D and Luo L: "SVGS-DSGAT: An IoT-enabled innovation in underwater robotic object detection technology". *Alexandria Engineering Journal* 1082024.
- [۱۲] Oche PA, Ewa GA and Ibekwe N: "Applications and Challenges of Artificial Intelligence in Space Missions". *IEEE Access* 122021.
- [۱۳] Lockhart K, Sandino J, Amarasingam N et al: *Unmanned Aerial Vehicles for Real-Time Vegetation Monitoring in Antarctica: A Review*. In: *Remote Sensing*. vol. 17: Remote Sensing; 2025.
- [۱۴] Dong H, Lin J, Tao Y et al: "AI-enhanced biomedical micro/nanorobots in microfluidics". *Lab on a Chip* 24no.(5)2024.

5G/6G) همچنان چالش برانگیز هستند. این محدودیت ها با یافته های اوچه و همکاران [۱۲] و لاکهارت و همکاران [۱۳] هم راستا است و نشان دهنده نیاز به نوآوری های فنی و زیرساختی می باشد.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می شود بر توسعه هوش عمومی مصنوعی برای افزایش انعطاف پذیری ربات ها، بهبود زیرساخت های ارتباطی مثل 6G برای کاهش تأخیر و استفاده از داده های مصنوعی برای افزایش داده های آموزشی در محیط های ناشناخته (مثل قطب و فضا) تمرکز کرد. همچنین، سیاست گذاری های اخلاقی و حقوقی برای حفاظت از داده ها و اطمینان از ایمنی در کاربردهای اینترنت اشیا و هوش مصنوعی ضروری است. این پیشنهادات می تواند شکاف های موجود را پر کرده و پتانسیل ربات های هوشمند را برای آینده ای متصل و هوشمند بیشتر کند [۱۰، ۱۱].

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

این مطالعه نشان داد که ربات های هوشمند با ادغام اینترنت اشیا و یادگیری عمیق، ظرفیت بالایی برای بهبود کارایی و سازگاری در محیط های هوشمند را دارند. یافته ها حاکی از دقت بالای این سیستم ها در حوزه هایی مثل آموزش (۹۷،۱۶٪ با BiLSTM)، پزشکی نانو مقیاس (۹۵٪ برای تحویل دارو)، حمل و نقل خودران (۳۳٪ کاهش تصادفات) و اکتشافات زیر آب (۴۱،۵-۴۰،۸٪ دقت تشخیص) است. همچنین، ربات های کاوشگر در اکتشافات فضایی توانایی ناوبری خودکار و مدیریت صورت های فلکی را از خود نشان دادند و پهنادهای در اکتشافات قطبی با میانگین F1-Score ۰،۸۹ در شناسایی پوشش گیاهی، نظارت بر اکوسیستم های حساس را ممکن کردند. این نتایج، پتانسیل این فناوری ها را برای حل چالش های مدرن در زندگی روزمره، صنایع و محیط زیست برجسته می کنند.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می شود بر توسعه هوش عمومی مصنوعی، بهبود زیرساخت های ارتباطی مثل 6G، استفاده از داده های مصنوعی برای افزایش داده های آموزشی و سیاست گذاری های اخلاقی و حقوقی برای اطمینان از ایمنی و شفافیت تمرکز کرد. این نوآوری ها قادرند شکاف های موجود را پوشش دهند و ربات های هوشمند را برای آینده ای متصل و پایدار، آماده تر سازند [۹-۱۴].

منابع

- [۱] Padovan E, Marullo G, Tanzi L et al: "A deep learning framework for real-time 3D model registration in robot-assisted laparoscopic surgery". *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 18no.(3)2022.
- [۲] Onu P, Pradhan A, Madonsela NS et al: "Integration of AI and IoT in Smart Manufacturing: Exploring Technological, Ethical, and Legal Frontiers". *Procedia Computer Science* 2532025.
- [۳] Heidarykiany Rand Ababei C: "HVAC energy cost minimization in smart grids: A cloud-based demand side management approach with game theory optimization and

A Unified Intelligent Framework for Economic Load Dispatch and Real-Time Transient Stability Monitoring in the IEEE 39-Bus Power System Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network

Azadeh Zarif Iloei ^{1,*}, Masih Sobhani ², Amir Haghverdi ³

^{*1} Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Par.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

azarif@iaui.ac.ir

² Bachelor of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Par.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

masihsobhani@pardisiau.ac.ir

³ Department of Electrical Engineering, Par.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ahaghverdi@pardisiau.ac.ir

ABSTRACT

This paper presents a unified intelligent framework that simultaneously optimizes economic operation and enables real-time transient stability monitoring in the IEEE 39-bus power system. A Genetic Algorithm is employed for Economic Load Dispatch, minimizing fuel costs to \$51,972.58 per hour under a 6150 MW demand, yielding a 4.8% reduction (\$22.14 million annually) compared to conventional lambda-iteration methods (\$54,500/h). The GA's global convergence in non-convex cost landscapes is theoretically analyzed using the Schema Theorem and Markov chain dynamics, ensuring robust handling of quadratic cost functions and transmission losses. For transient stability, a lightweight feedforward Artificial Neural Network with 20 input neurons (rotor angles and bus voltages), two hidden layers (10 and 5 neurons), and one output neuron predicts system synchronism with 92% accuracy across 40 test scenarios, computing stability margins from -75.07° to 59.33°. Compared to time-domain simulations (5–10 s/scenario, ~85% accuracy), the ANN delivers near-instantaneous predictions. A comprehensive review of hybrid intelligent methods (2023–2025) positions this work as a bridge between decoupled optimization and stability paradigms. Integration challenges with Phasor Measurement Units including latency, noise, topology changes, and cyber threats are rigorously discussed, with practical solutions such as denoising autoencoders and transfer learning proposed for field deployment. The GA-ANN synergy preconditions optimal dispatch for stability forecasting, offering a scalable pathway for smart grid Energy Management Systems. Future enhancements include regression-based ANN, PMU-driven online retraining, and hybrid physics-informed models to further enhance reliability in dynamic, renewable-rich grids.

KEYWORDS

ECONOMIC LOAD DISPATCH, TRANSIENT STABILITY, GENETIC ALGORITHM, ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, POWER SYSTEM OPTIMIZATION.

چارچوب هوشمند یکپارچه برای تخصیص بار اقتصادی و پایش پایداری گذرای لحظه‌ای در سیستم قدرت 39 باس IEEE با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی

آزاده ظریف لولویی^{۱*}، مسیح سبحانی^۲، امیر حق وردی^۳

^{۱*} استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

azarif@iau.ac.ir

^۲ دانش آموخته کارشناسی مهندسی برق گرایش کنترل، گروه مهندسی برق، دانشکده پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

masihsobhani@pardisiau.ac.ir

^۳ کارشناسی مهندسی برق گرایش قدرت، گروه مهندسی برق، دانشکده پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

ahaghverdi@pardisiau.ac.ir

چکیده

این مقاله یک چارچوب هوشمند یکپارچه ارائه می‌دهد که به طور همزمان بهینه‌سازی عملیات اقتصادی و پایش پایداری گذرای لحظه‌ای را در سیستم قدرت 39 باس IEEE امکان‌پذیر می‌سازد. از الگوریتم ژنتیک برای تخصیص بار اقتصادی استفاده شده است که هزینه سوخت را تا ۵۱۹۷۲/۵۸ دلار در ساعت در بار ۶۱۵۰ مگاوات کاهش می‌دهد و ۴/۸٪ صرفه‌جویی (معادل ۲۲/۱۴ میلیون دلار در سال) نسبت به روش مرسوم لامبدا-تکرار (۵۴۵۰۰ دلار در ساعت) به همراه دارد. همگرایی الگوریتم ژنتیک در چشم‌اندازهای هزینه غیرمحدب با استفاده از قضیه شما و دینامیک زنجیره مارکوف به طور نظری تحلیل شده و توانایی قوی آن در مدیریت توابع هزینه درجه دوم و تلفات انتقال را تضمین می‌کند. برای پایداری گذرای، یک شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور سبک با ۲۰ نورون ورودی (زوایای روتور و ولتاژ باس‌ها)، دو لایه مخفی (۱۰ و ۵ نورون) و یک نورون خروجی، هم‌زمانی سیستم را با دقت ۹۲٪ در ۴۰ سناریوی آزمایشی پیش‌بینی می‌کند و حاشیه‌های پایداری از -۷۵/۰۷ تا ۵۹/۳۳ را محاسبه می‌نماید. در مقایسه با شبیه‌سازی‌های حوزه زمانی (۵-۱۰ ثانیه در هر سناریو، دقت ~۸۵٪)، شبکه عصبی پیش‌بینی‌های تقریباً لحظه‌ای ارائه می‌دهد. مروری جامع بر روش‌های هوشمند ترکیبی (۲۰۲۳-۲۰۲۵) این کار را به عنوان پلی بین پارادایم‌های بهینه‌سازی و پایداری جداگانه قرار می‌دهد. چالش‌های یکپارچه‌سازی با واحدهای اندازه‌گیری فازور شامل تأخیر، نویز، تغییرات توپولوژی و تهدیدات سایبری به طور دقیق بررسی شده و راه‌حل‌های عملی مانند خودمزمزگذارهای نوپوزدایی و یادگیری انتقالی برای استقرار میدانی پیشنهاد شده است. هم‌افزایی الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی، تخصیص بهینه را برای پیش‌بینی پایداری پیش‌شرط می‌کند و مسیری مقیاس‌پذیر برای سیستم‌های مدیریت انرژی شبکه هوشمند ارائه می‌دهد. بهبودهای آتی شامل شبکه‌های عصبی مبتنی بر رگرسیون، بازآموزی آنلاین مبتنی بر واحدهای اندازه‌گیری فازور و مدل‌های ترکیبی آگاه از فیزیک برای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های پویا و غنی از انرژی‌های تجدیدپذیر است.

کلمات کلیدی

تخصیص بار اقتصادی، پایداری گذرای، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی بهینه‌سازی سیستم قدرت.

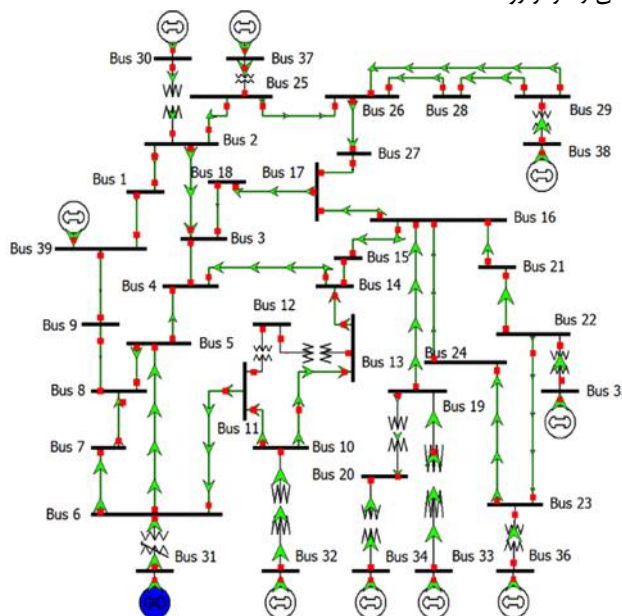
۱. مقدمه

به ویژه با وجود اثرات نقطه سوپاپ یا تلفات انتقال با دشواری مواجه می شدند. معرفی تکنیک های هوشمند، دگرگونی پارادایمی در بهینه سازی تخصیص بار اقتصادی ایجاد کرد. الگوریتم ژنتیک، که توسط جان هالند در سال ۱۹۷۵ پایه گذاری شد، از انتخاب طبیعی و تکامل الهام گرفته و با مکانیزم هایی مانند تقاطع و جهش، فضای راه حل های پیچیده را کاوش می کند [۵]. از دهه ۱۹۹۰، الگوریتم ژنتیک در کاربردهای تخصیص بار اقتصادی برجسته گردید و استحکام در مدیریت توابع هزینه غیرخطی و پرهیز از بهینه های محلی را ارائه داد، همان گونه که در مطالعات اولیه کویتا پور نشان داده شد [۶]. الگوریتم ژنتیک کاربردهای مؤثری در بهینه سازی تولید، توزیع و انتقال انرژی نشان می دهد؛ برای نمونه، در طراحی سیستم های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی به کار گرفته شده که منجر به کاهش هزینه های سرمایه گذاری و بهبود قابلیت اطمینان سیستم می گردد و کاربرد آن در بهینه سازی سیستم های تولید انرژی حرارتی، کارایی آن در کاهش مصرف سوخت و ارتقای عملکرد را تأیید می کند [۷،۸].

پایداری گذرا، جنبه ای بنیادین از قابلیت اطمینان سیستم قدرت، تضمین می کند که سیستم پس از اختلالات شدید مانند خطاها، تغییرات ناگهانی بار یا خروج ژنراتور، هم زمانی یا سنکرون بودن خود را حفظ نماید. در سیستم ۳۹ باس، پایداری گذرا به دلیل تعاملات پویا میان ژنراتورهای سنکرون که زوایای روتور و سیستم های تحریک آن ها رفتار سیستم را تعیین می کنند حیاتی است. مطالعه پایداری گذرا از دهه ۱۹۲۰ با توسعه معادلات نوسان سیستم آغاز شد و در میانه قرن بیستم با شبیه سازی های حوزه زمانی و تحلیل مقادیر ویژه ادامه یافت [۹]. روش های کلاسیک، همان گونه که اندرسون و فواد تشریح کرده اند، پایه ای برای تحلیل پایداری فراهم آوردند اما به دلیل اتکا به مدل های خطی شده، در ثبت دینامیک های غیرخطی شبکه های نوین ناکام ماندند [۱۰]. ظهور رویکردهای هوشمند، تحلیل پایداری را دگرگون ساخت. شبکه های عصبی مصنوعی، که توسط مک کالوچ و پیپس در سال ۱۹۴۳ مفهوم سازی و با الگوریتم های پس انتشار در دهه ۱۹۸۰ پیشرفت کردند، در مدل سازی روابط پیچیده و غیرخطی برتری دارند [۱۱]. شبکه های عصبی مصنوعی از دهه ۱۹۹۰ به طور فزاینده ای برای پیش بینی پایداری گذرای به کار رفته اند و از توانایی یادگیری از داده های شبیه سازی (مانند زوایای روتور و ولتاژ باس ها) برای پیش بینی حاشیه های پایداری با دقت بالا بهره می برند [۱۲].

ضرورت رویکردهای هوشمند در سیستم های قدرت از پیچیدگی بی سابقه شبکه های امروزی ناشی می شود. یکپارچه سازی منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب مانند باد و خورشید، نوسان و عدم قطعیت در پروفایل های تولید و بار ایجاد می کند و کارایی روش های سنتی را به چالش می کشد [۱۳]. علاوه بر این، تنظیم زدایی بازارهای برق نیاز به عملیات مقرون به صرفه را تشدید کرده، درحالی که استانداردهای سخت گیرانه قابلیت اطمینان، تحلیل پایداری قوی را الزامی می سازد. تکنیک های بهینه سازی کلاسیک، محدود به وابستگی به فرضیات ساده شده، اغلب در حل مسائل بهینه سازی چندوجهی در تخصیص بار اقتصادی یا دینامیک های غیرخطی در تحلیل پایداری ناکام می ماند. روش های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، راه حل های تحول آفرین ارائه می دهند.

رشد مداوم تقاضای انرژی جهانی، همراه با یکپارچه سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و پیچیدگی های بازارهای برق تنظیم زدایی شده، چالش های عملیاتی سیستم های قدرت نوین را به طور چشمگیری افزایش داده است. سیستم ۳۹ باس مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک، که اغلب به عنوان سیستم آزمایشی نیوانگلند شناخته می شود، به دلیل بازنمایی واقعی از یک شبکه در مقیاس بزرگ، سنگ بنای مطالعات سیستم قدرت به شمار می رود. این سیستم شامل ۱۰ ژنراتور سنکرون با ظرفیت های ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات، ۳۹ باس، ۴۶ خط انتقال و بار کل حدود ۶۱۵۰ مگاوات توزیع شده در پروفایل های بار متنوع است [۱]. ژنراتورها به سیستم های تحریک و گاورنر مجهز هستند، درحالی که شبکه شامل ترانسفورماتورها و جبران کننده های توان راکتیو است و رفتار پویا و غیرخطی سیستم های قدرت واقعی را بازتاب می دهد [۲]. پرداختن به چالش های کلیدی مانند تخصیص بار اقتصادی و پایداری گذرای در این سیستم، نیازمند روش های پیشرفته ای است که محدودیت های رویکردهای سنتی را فراتر رود.



شکل ۱. سیستم قدرت ۳۹ باس استاندارد IEEE

تخصیص بار اقتصادی بر تخصیص تولید توان بین واحدها برای تأمین تقاضای بار با کمترین هزینه عملیاتی که عمدتاً ناشی از مصرف سوخت است تمرکز دارد، درحالی که محدودیت های سیستم مانند تعادل توان و حدود ظرفیت ژنراتور را رعایت می کند. مفهوم تخصیص بار اقتصادی در اوایل قرن بیستم با ظهور سیستم های قدرت متصل پدیدار شد و در ابتدا با روش های آزمون و خطا حل می گردید [۳]. تا دهه ۱۹۶۰، تکنیک های بهینه سازی کلاسیک مانند روش لامبدا-تکرار و الگوریتم های مبتنی بر گرادیان رواج یافتند [۴].

این روش ها اگرچه برای سیستم های خطی از نظر محاسباتی کارآمد بودند، اما در ویژگی های غیرخطی و غیرمحدب مسائل تخصیص بار اقتصادی نوین

توانایی آن در یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی از داده‌ها بهره می‌برد [۱۲]. شبکه عصبی مصنوعی برای پردازش داده‌های ورودی مانند زوایای روتور، ولتاژ باس‌ها و فرکانس‌ها که از شبیه‌سازی‌های حوزه زمانی سیستم ۳۹ باس به‌دست آمده‌اند طراحی شده است. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل از پیش ساخته‌شده در دایگ‌سایلنت پاورفکتوری انجام می‌شود که رفتار پویای سیستم را با دقت بالا ثبت می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی، که در متلب پیاده‌سازی شده، شامل لایه‌های به هم پیوسته است که از طریق فرآیند آموزش، پارامترهای ورودی را به پیش‌بینی‌های حاشیه پایداری نگاشت می‌دهند. این رویکرد پیش‌بینی سریع و دقیق را ممکن می‌سازد و محدودیت‌های محاسباتی شبیه‌سازی‌های حوزه زمانی سنتی را که برای سیستم‌های بزرگ مانند شبکه ۳۹ باس زمان‌بر هستند پشت سر می‌گذارد [۱۵]. عملکرد شبکه عصبی مصنوعی بر اساس دقت پیش‌بینی و توانایی تعمیم‌پذیری در شرایط عملیاتی مختلف ارزیابی می‌شود. سیستم ۳۹ باس به‌عنوان بستر آزمایشی برای هر دو تحلیل تخصیص بار اقتصادی و پایداری گذرای به کار گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها در دایگ‌سایلنت پاورفکتوری با استفاده از مدل از پیش ساخته‌شده آن انجام می‌گیرد. پیکربندی سیستم شامل ۴۶ خط انتقال، ۱۲ ترانسفورماتور و پروفایل بار متنوع با مجموع ۶۱۵۰ مگاوات، بازنمایی واقعی از رفتار پایدار و پویا را تضمین می‌کند [۱]. برای تخصیص بار اقتصادی، بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در متلب با روش‌های مرسوم دایگ‌سایلنت مقایسه می‌شود تا بهبود در هزینه و کارایی ارزیابی گردد. برای پایداری گذرای، داده‌های شبیه‌سازی از دایگ‌سایلنت مانند سری‌های زمانی حالات سیستم در شرایط بار مختلف استخراج شده و برای آموزش و آزمون شبکه عصبی مصنوعی در متلب به کار می‌روند. این چارچوب یکپارچه، نقاط قوت الگوریتم‌های هوشمند و شبیه‌سازی با وفاداری بالا را ترکیب کرده و اهداف دوگانه بهینه‌سازی هزینه و پیش‌بینی پایداری را برآورده می‌سازد. این مطالعه با هدف نشان دادن کارایی رویکردهای هوشمند در ارتقای کارایی عملیاتی و قابلیت اطمینان سیستم ۳۹ باس، به پیشرفت مدیریت سیستم‌های قدرت نوین کمک می‌کند.

۲. مروری جامع بر روش‌های هوشمند ترکیبی در بهینه‌سازی و پایداری سیستم قدرت

کاربرد تکنیک‌های هوشمند ترکیبی در بهینه‌سازی سیستم قدرت و تحلیل پایداری، در سال‌های اخیر شتاب قابل توجهی گرفته است؛ این امر ناشی از پیچیدگی فزاینده شبکه‌های نوین با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر، عملیات مبتنی بر بازار و الزامات سخت‌گیرانه قابلیت اطمینان است. درحالی‌که رویکردهای تک‌روش مانند الگوریتم ژنتیک یا شبکه عصبی مصنوعی اثربخشی خود را ثابت کرده‌اند، چارچوب‌های ترکیبی که قابلیت جستجوی جهانی را با مدل‌سازی پیش‌بینی سریع ترکیب می‌کنند، به‌عنوان ضرورتی برای مقابله با چالش‌های چندهدفه، غیرخطی و لحظه‌ای شناخته شده‌اند [۱۹]. این مطالعه خود را در تقاطع تخصیص بار اقتصادی و ارزیابی پایداری گذرای قرار می‌دهد و از طریق چارچوب یکپارچه الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی، راه‌حلی مقیاس‌پذیر، محاسباتی کارآمد و استوار برای سیستم ۳۹ باس ارائه می‌کند.

قابلیت جستجوی جهانی الگوریتم ژنتیک امکان پیمایش چشم‌اندازهای پیچیده تخصیص بار اقتصادی را فراهم می‌آورد و کاهش هزینه تا ۱۰ درصد نسبت به روش‌های کلاسیک را محقق می‌سازد [۱۴]. به‌همین ترتیب، شبکه‌های عصبی مصنوعی قدرت پیش‌بینی برای تحلیل پایداری فراهم می‌کنند و مطالعات دقت بیش از ۹۵ درصد در شناسایی حاشیه‌های پایداری بحرانی را گزارش کرده‌اند [۱۵]. فراتر از مزایای فنی، رویکردهای هوشمند تصمیم‌گیری لحظه‌ای را تسهیل می‌کنند، با شرایط متغیر سیستم سازگار می‌شوند و گذار به شبکه‌های هوشمند را که بر تحلیل داده‌محور و خودکارسازی تکیه دارند پشتیبانی می‌نمایند [۱۶].

هم‌افزایی هوش محاسباتی و مهندسی سیستم قدرت، گامی کلیدی به‌سوی زیرساخت‌های انرژی پایدار و تاب‌آور به‌شمار می‌رود. برای مقابله با چالش‌های تخصیص بار اقتصادی و پایداری گذرای در سیستم ۳۹ باس، این مطالعه چارچوبی یکپارچه پیشنهاد می‌کند که از رویکردهای هوشمند بهره می‌جوید. روش‌شناسی حول دو هدف اصلی ساختار یافته است: بهینه‌سازی هزینه‌های تولید توان و پیش‌بینی پایداری سیستم، که هر یک با تکنیک‌های هوشمند متناسب برای پاسخگویی به نیازهای خاص مسئله به کار گرفته شده‌اند. مسئله تخصیص بار اقتصادی شامل تعیین خروجی توان بهینه برای هر یک از ۱۰ ژنراتور در سیستم ۳۹ باس به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌های سوخت درحالی‌که تقاضای بار کل حدود ۶۱۵۰ مگاوات را تأمین کرده و محدودیت‌های عملیاتی را رعایت می‌کند، می‌باشد. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که مجموع توان تولیدشده با تقاضای بار به‌علاوه هرگونه تلفات انتقال برابر باشد و هر ژنراتور در محدوده ظرفیت مشخص شده خود عمل کند. هزینه تولید توان برای هر ژنراتور با رابطه‌ای غیرخطی با خروجی آن مشخص می‌شود که تحت تأثیر ویژگی‌های مصرف سوخت منحصر به فرد هر واحد است [۳]. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی این تخصیص استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک با آغازسازی جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه که هر یک نمایانگر ترکیبی ممکن از خروجی‌های ژنراتور است عمل می‌کند. از طریق فرآیندهای تکراری الهام گرفته از تکامل طبیعی انتخاب افراد برتر، تقاطع برای ترکیب راه‌حل‌های امیدبخش و جهش برای ایجاد تنوع به‌سوی راه‌حل بهینه همگرا می‌شود که هزینه‌ها را کمینه کرده و محدودیت‌ها را برآورده می‌سازد. الگوریتم ژنتیک در محیط متلب پیاده‌سازی شده که محاسبات کارآمد و انعطاف‌پذیری در مدیریت ویژگی‌های غیرخطی سیستم را فراهم می‌آورد. برای ارزیابی عملکرد، نتایج الگوریتم ژنتیک با روش‌های مرسوم تخصیص بار اقتصادی مانند تکنیک‌های تکراری یا مبتنی بر گرادیان مقایسه می‌شود که با استفاده از مدل از پیش ساخته‌شده سیستم ۳۹ باس در نرم‌افزار دایگ‌سایلنت پاورفکتوری اجرا می‌گردند [۶]. این مقایسه مزایای الگوریتم ژنتیک در دستیابی به هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر و مدیریت محدودیت‌های پیچیده را برجسته می‌سازد.

تحلیل پایداری گذرای با هدف پیش‌بینی توانایی سیستم در حفظ هم‌زمانی پس از اختلالاتی مانند تغییرات ناگهانی بار انجام می‌شود. در سیستم ۳۹ باس، پایداری تحت تأثیر رفتار پویای ژنراتورهای سنکرون به‌ویژه زوایای روتور و پروفایل‌های ولتاژ قرار دارد. هدف، پیش‌بینی حاشیه پایداری معیاری از نزدیکی سیستم به از دست دادن هم‌زمانی بر اساس پارامترهای کلیدی سیستم است. از شبکه عصبی مصنوعی برای این منظور استفاده می‌شود که

۲۰۰ سناریوی شبیه سازی شده به دست می آورد — که آن را برای سیستم هایی با دسترسی محدود به داده های لحظه ای بسیار عملی می سازد. این یکپارچه سازی، پیشرفتی معنادار در پارادایم های هوشمند ترکیبی نمایان می سازد، جایی که اهداف اقتصادی و پویا نه به صورت متوالی، بلکه به صورت ذاتاً جفت شده مورد توجه قرار می گیرند و راه را برای استقرار در سیستم های مدیریت انرژی با منابع محاسباتی محدود هموار می کنند.

یکپارچه سازی اهداف تخصیص بار اقتصادی و پایداری با استفاده از هوش ترکیبی همچنان کمتر کاوش شده است. تلاش نادری توسط گوپتا و همکاران (۲۰۲۵) الگوریتم ژنتیک را با شبکه عصبی گرافی برای بهینه سازی مشترک ترکیب کرد، اما تنها بر محدودیت های امنیت استاتیک تمرکز داشت [۲۴]. چارچوب الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی کنونی با عمل در حوزه پویا متمایز می شود و حاشیه های پایداری را تحت شرایط پس از خطا پیش بینی می کند، در حالی که بهینه بودن هزینه تخصیص را حفظ می نماید — الزامی حیاتی برای تحلیل احتمالی واقعی. این رویکرد هوشمند ترکیبی دودهنه، شکاف پژوهشی قابل توجهی را پر کرده و پایه ای برای کاربردهای آینده شبکه هوشمند برقرار می سازد، جایی که کارایی اقتصادی و قابلیت اطمینان گذرای باید به طور همزمان و مداوم تضمین شوند.

۳. مدل سازی سیستم قدرت ۳۹ باس

مدل سازی دقیق یک سیستم قدرت، بنیان اساسی تحلیل تخصیص بار اقتصادی و پایداری گذرای است؛ زیرا پایه ریاضی برای شبیه سازی رفتار سیستم در شرایط پایداری و پویا را فراهم می آورد. سیستم ۳۹ باس مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک، که با نام سیستم آزمایشی نیوانگلند نیز شناخته می شود، به دلیل بازتابی واقعی از یک شبکه متصل در مقیاس بزرگ، به عنوان معیاری پرکاربرد در مطالعات سیستم قدرت پذیرفته شده است. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود، سیستم ۳۹ باس شامل ۱۰ ژنراتور سنکرون، ۳۹ باس، ۴۶ خط انتقال، ۱۲ ترانسفورماتور و بار کل حدود ۶۱۵۰ مگاوات توزیع شده در ۱۹ باس بار است. این سیستم در فرکانس نامی ۶۰ هرتز عمل می کند و اجزای پویا مانند سیستم های تحریک و گاورنر را دربر می گیرد که برای تحلیل پایداری گذرای حیاتی هستند. ظرفیت ژنراتورها از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات متغیر است و هر یک به تنظیم کننده خودکار ولتاژ و سیستم گاورنر توربین مجهز هستند که پیچیدگی سیستم های قدرت واقعی را بازتاب می دهند. توپولوژی شبکه با اتصال پذیری بالا و پروفایل های بار متنوع، آن را به بستری ایده آل برای مطالعه تخصیص بار اقتصادی و پایداری در شرایط عملیاتی گوناگون تبدیل کرده است.

۳-۱- مدل سازی برای تخصیص بار اقتصادی

تخصیص بار اقتصادی با هدف کمینه سازی کل هزینه سوخت تولید توان انجام می شود، در حالی که تقاضای بار و محدودیت های عملیاتی را برآورده می سازد. مدل سیستم برای تخصیص بار اقتصادی بر عملیات پایدار سیستم ۳۹ باس تمرکز دارد، به ویژه بر ژنراتورها و ویژگی های هزینه آن ها و همچنین محدودیت های جریان توان شبکه. هر یک از ۱۰ ژنراتور با تابع هزینه درجه دوم مدل می شود که هزینه سوخت را به صورت تابعی از خروجی توان آن نشان می دهد:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

که در آن F_i هزینه سوخت به دلار، P_i خروجی توان فعال به مگاوات، a_i ، b_i و

پیشرفت های اخیر در روش های هوشمند ترکیبی برای تخصیص بار اقتصادی بر بهبود سرعت همگرایی، مدیریت محدودیت ها و سازگاری با توابع هزینه غیرمحدب متمرکز بوده است. مطالعه کومار و همکاران (۲۰۲۳) الگوریتم ترکیبی الگوریتم ژنتیک-بهینه سازی ازدحام ذرات را برای تخصیص بار اقتصادی پویا در حضور اثر بارگذاری نقطه سوپاپ و نواحی عملیاتی ممنوعه پیشنهاد کرد که تا ۶/۲ درصد کاهش هزینه نسبت به الگوریتم ژنتیک مستقل در سیستم ۳۰ باس مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک به دست آورد [۲۰]. به همین ترتیب، تلفیق الگوریتم ژنتیک با تکامل تفاضلی توسط سینگ و دیلون (۲۰۲۴) برای حل تخصیص بار اقتصادی چندناحیه ای با محدودیت های خطوط اتصال معرفی شد که همگرایی چپانی برتر و بار محاسباتی کاهش یافته را از طریق تنظیم پارامترهای تطبیقی نشان داد [۲۱]. این رویکردهای تکاملی ترکیبی، محدودیت الگوریتم ژنتیک کلاسیک به تنهایی — به ویژه حساسیت آن به اندازه جمعیت و نرخ جهش را برجسته می کنند و ارزش مکانیزم های جستجوی مکمل را تأکید می نمایند. در مقابل، این پژوهش از الگوریتم ژنتیک مستقل نه به عنوان محدودیت، بلکه به عنوان انتخابی آگاهانه برای تضمین تفسیرپذیری کامل و یکپارچه سازی مستقیم با تحلیل پایداری استفاده می کند و پیچیدگی تنظیم ترکیبی را اجتناب می ورزد، در حالی که همچنان کاهش ۴/۸ درصدی هزینه نسبت به روش تکرار لامبدا را محقق می سازد.

در پیش بینی پایداری گذرای، یادگیری عمیق و معماری های عصبی ترکیبی به عنوان ابزارهای تحول آفرین ظهور کرده اند. مدل شبکه کانولوشنی-حافظه کوتاه مدت بلندمدت توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) برای پیش بینی پایداری زاویه روتور با استفاده از جریان داده های واحد اندازه گیری فازور توسعه یافت که دقت ۹۶/۸ درصد را در سیستم اصلاح شده ۳۹ باس مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک تحت مکان های خطای متغیر به دست آورد [۲۲]. سهم قابل توجه دیگر توسط لی و وانگ (۲۰۲۴) معرفی چارچوب ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-ماشین یادگیری افراطی بود که زمان آموزش را ۷۰ درصد نسبت به پس انتشار مرسوم کاهش داد، در حالی که دقت ۹۴ درصد در برآورد زمان پاک سازی بحرانی را حفظ کرد [۲۳]. این مطالعات بر گذار به سوی پایش پایداری لحظه ای و داده محور تأکید می کنند. با این حال، اغلب به صورت جداگانه از بهینه سازی اقتصادی عمل می کنند و پایداری را به عنوان گام اعتبارسنجی پس از تخصیص در نظر می گیرند، نه هدفی هم بهینه شده.

تازگی این پژوهش در چارچوب یکپارچه الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی نهفته است که بهینه سازی اقتصادی و پیش بینی پایداری گذرای را در یک حلقه عملیاتی واحد پیوند می دهد. برخلاف روش های تکاملی ترکیبی که عملکرد تخصیص بار اقتصادی را با هزینه پیچیدگی یکپارچه سازی اولویت می دهند، این مطالعه از پروفایل های تخصیص بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک به عنوان پیش فرض های ضمنی برای پیش بینی پایداری مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی استفاده می کند و گذار بی وقفه از برنامه ریزی آفلاین به پایش آنلاین را ممکن می سازد. علاوه بر این، در حالی که مدل های یادگیری عمیق اخیر در دقت برتری دارند، نیازمند مجموعه داده های برجسته بزرگ و بازآموزی قابل توجه برای تغییرات توپولوژی هستند. شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی با معماری پیش خور سبک (۲۰-۱۰-۵) دقت ۹۲ درصد را تنها با

$P_{e,i}$ توان الکتریکی خروجی به واحد پریونیت است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_{e,i} = \frac{E_i V_i}{X_{d,i}} \sin(\delta_i - \theta_i) \quad (7)$$

که در آن E_i ولتاژ داخلی، V_i ولتاژ ترمینال، $X_{d,i}$ راکتانس مستقیم محور d ، θ_i زاویه ولتاژ باس و D_i ضریب میرا به واحد پریونیت است. مدل ژنراتور شامل سیستم های تحریک (مدل شده به عنوان تنظیم کننده خودکار ولتاژ نوع ۱ مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک) و سیستم های گاورنر توربین است که به ترتیب ولتاژ ترمینال را حفظ کرده و توان مکانیکی را برای پایداری فرکانس کنترل می کنند.

۳-۴- مدل دینامیک شبکه

شبکه با چارچوب پایداری گذرا مدل می شود که در آن ۴۶ خط انتقال و ۱۲ ترانسفورماتور با امپدانس های معادل خود نشان داده می شوند. رفتار پویای شبکه توسط معادلات جریان توان در حوزه زمان اداره می شود و ولتاژها و زوایای باس در هر گام زمانی به روزرسانی می گردند. معادلات دیفرانسیل-جبری سیستم به صورت عددی در نرم افزار دیگسایلنت پاورفکتوری حل می شوند و تعاملات بین ژنراتورها، بارها و شبکه را ثبت می کنند [۱۶].

۳-۵- حاشیه پایداری گذرا

حاشیه پایداری با حداکثر انحراف زاویه روتور یا زمان پاک سازی بحرانی برای یک اختلال معین کمی سازی می شود. برای پیش بینی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، ویژگی های ورودی شامل داده های سری زمانی زوایای روتور، ولتاژ باس ها و فرکانس ها استخراج شده از شبیه سازی های دیگسایلنت است. شبکه عصبی مصنوعی این ورودی ها را به خروجی حاشیه پایداری نگاشت می دهد و پیش بینی سریع پایداری گذاری را ممکن می سازد [۹].

سیستم ۳۹ باس در نرم افزار دیگسایلنت پاورفکتوری با استفاده از مدل از پیش ساخته شده آن شبیه سازی می شود که مجموعه داده استاندارد مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک برای پارامترهای ژنراتور، بار و شبکه را دربر می گیرد. تحلیل تخصیص بار اقتصادی از شبیه سازی های جریان توان پایدار برای تولید داده های الگوریتم ژنتیک در متلب استفاده می کند، درحالی که تحلیل پایداری گذاری از شبیه سازی های حوزه زمانی برای تولید داده های پویا برای شبکه عصبی مصنوعی بهره می برد. یکپارچه سازی دیگسایلنت و متلب، جریان کاری استوار را تضمین می کند که در آن دیگسایلنت داده های سیستم با وفاداری بالا فراهم می آورد و متلب اجرای الگوریتم های هوشمند را ممکن می سازد. داده های مدل سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است.

مقادیر ثابت اینرسی ژنراتورها در بازه ۳/۰ تا ۶/۰ ثانیه قرار دارد (برای مثال، ژنراتور ۱: ۵/۰ ثانیه)، راکتانس مستقیم گذاری محور d ژنراتورها در بازه ۰/۱ تا ۰/۳ واحد پریونیت است (برای مثال، ژنراتور ۱: ۰/۲ واحد پریونیت) و ضریب میرا ژنراتورها در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ واحد پریونیت قرار دارد (برای مثال، ژنراتور ۱: ۰/۰۲ واحد پریونیت). ماتریس ادیمیتانس: ماتریس ۳۹ در ۳۹ که از امپدانس های خطوط و ترانسفورماتورها استخراج شده است.

جدول ۱. داده های مدل سیستم

ردیف	عناصر	پارامتر	توضیحات
------	-------	---------	---------

C_i ضرایب هزینه خاص هر ژنراتور هستند که به ترتیب هزینه ثابت، مصرف سوخت خطی و تلفات کارایی درجه دوم را نشان می دهند [۳]. هدف تخصیص بار اقتصادی کمینه سازی کل هزینه در تمامی ژنراتورهاست:

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^{10} C_i(P_i) \quad (8)$$

این بهینه سازی تابع محدودیت های زیر است:

- **محدودیت تعادل توان:** مجموع توان تولید شده باید برابر با تقاضای بار به علاوه تلفات انتقال باشد:

$$\sum_{i=1}^{10} P_i = P_D + P_L \quad (9)$$

تلفات انتقال P_L قاضای بار کل (حدود ۶۱۵۰ مگاوات) و P_D که در آن است که با فرمول تلفات محاسبه می شود:

$$P_L = \sum_{i=1}^{39} \sum_{j=1}^{39} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{10} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (10)$$

که در آن B_{ij} ضرایب تلفات از ماتریس ادیمیتانس سیستم استخراج شده اند.

- **محدودیت ظرفیت ژنراتور:** خروجی هر ژنراتور در محدوده حداقل و حداکثر ظرفیت خود محدود است:

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (11)$$

برای سیستم ۳۹ باس، این حدود از ۵۰ مگاوات تا ۱۰۰۰ مگاوات متغیر است، مطابق با مجموعه داده استاندارد مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک.

۳-۲- مدل شبکه برای تخصیص بار اقتصادی

مدل شبکه برای تخصیص بار اقتصادی (ELD) بر پایه فرمول بندی جریان توان پایدار است، که در آن ۳۹ باس توسط ۴۶ خط انتقال و ۱۲ ترانسفورماتور به هم متصل هستند. ماتریس ادیمیتانس Y_{bus} توپولوژی شبکه و پارامترهای الکتریکی را توصیف می کند و هر عنصر آن $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ هدایت و سوسپتانس بین باس های i و j را نشان می دهد. معادلات جریان توان تضمین می کنند که توان تزریقی در هر باس، محدودیت های الکتریکی سیستم را برآورده سازد و پایه ای برای محاسبه تلفات انتقال و اعتبارسنجی تعادل توان فراهم آورد.

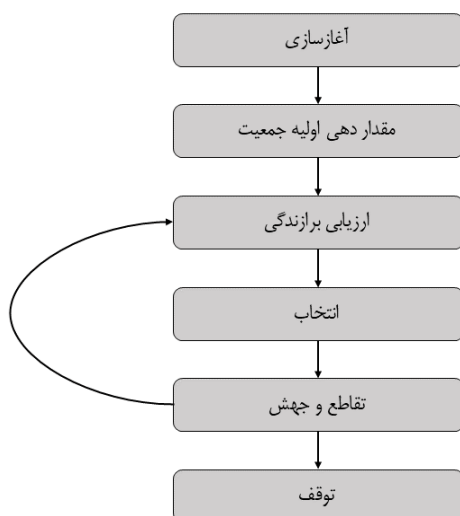
۳-۳- مدل سازی برای پایداری گذرا

تحلیل پایداری گذرای بر رفتار پویای سیستم ۳۹ باس پس از اختلالاتی مانند تغییرات ناگهانی بار تمرکز دارد تا حاشیه پایداری (مانند زمان پاک سازی بحرانی یا حداکثر انحراف زاویه روتور) را پیش بینی کند. مدل سیستم برای پایداری گذرای، اجزای پویا به ویژه ژنراتورهای سنکرون و سیستم های کنترلی آنها و پاسخ گذرای شبکه را دربر می گیرد. ابتدا باید مدل ژنراتور سنکرون را بیابیم. هر یک از ۱۰ ژنراتور با معادله نوسان کلاسیک مدل می شود که دینامیک روتور را توصیف می کند:

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{m,i} - P_{e,i} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (12)$$

که در آن H_i ثابت اینرسی ژنراتور i به ثانیه، ω_s سرعت سنکرون به رادیان بر ثانیه، δ_i زاویه روتور به رادیان، $P_{m,i}$ توان مکانیکی ورودی به واحد پریونیت و

غیرخطی به شمار می رود [۱]. این بخش کاربرد الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله تخصیص بار اقتصادی در سیستم ۳۹ باس را تشریح می کند و مقایسه ای دقیق با یک روش مرسوم برای ارزیابی کارایی هزینه، برآورده سازی محدودیت ها و مزایای اقتصادی بلندمدت ارائه می دهد. فرآیند الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ نشان داده شده است که ریشه در اصول انتخاب طبیعی دارد و به دلیل قابلیت جستجوی جهانی استوار و توانایی پیمایش فضاهای راه حل غیرخطی و غیرمحدب به کار گرفته می شود [۴]. الگوریتم ژنتیک به صورت تکراری جمعیتی از راه حل های کاندید را تکامل می دهد که هر یک نمایانگر بردار خروجی های توان برای ۱۰ ژنراتور است.



شکل ۲. فرآیند الگوریتم ژنتیک

پیاده سازی شامل مراحل زیر است:

- **آغازسازی:** جمعیتی از ۱۰۰ راه حل به صورت تصادفی در محدوده محدودیت های ژنراتور (معادله شماره ۵) تولید می شود.
 - **ارزیابی برازندگی:** برازندگی هر راه حل بر اساس کل هزینه محاسبه می شود و جریمه ای برای نقض محدودیت تعادل توان اعمال می گردد.
 - **انتخاب:** روش انتخاب یکنواخت تصادفی، راه حل هایی با هزینه کمتر را برای نسل بعدی اولویت می دهد.
 - **تقاطع و جهش:** راه حل های جدید از طریق تقاطع پراکنده (نسبت: ۰/۸) و جهش قابل تطبیق ایجاد می شوند تا تنوع و برآورده سازی محدودیت ها تضمین گردد.
 - **توقف:** الگوریتم زمانی متوقف می شود که تغییر میانگین برازندگی پس از ۲۰۰ نسل، همگرایی به راه حل بهینه تضمین شود.
- الگوریتم ژنتیک در متلب با استفاده از جعبه ابزار بهینه سازی جهانی پیاده سازی شده است و برای بهینه سازی ۱۰ متغیر (خروجی های ژنراتور)، اعمال ۲۰ محدودیت نابرابری غیرخطی (محدودیت های ژنراتور) و برآورده سازی ۱ محدودیت برابری غیرخطی (تعادل توان) پیگیری شده است. ضرایب هزینه a_i, b_i, c_i و محدودیت های ژنراتور از مجموعه داده ۳۹ باس مؤسسه

۱	ژنراتور	ضرایب هزینه $a_i = 100$ $b_i = 2.0$ $c_i = 0.01$	۱۰ ژنراتور سنکرون با ظرفیت ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات
۲	بار	بار کل و مشخصات بار	۶۱۵۰ مگاوات، توزیع شده در ۱۹ باس، مشخصات بار بر اساس باس متفاوت است (به عنوان مثال، باس ۳: ۳۳۲ مگاوات، باس ۳۹: ۱۱۰۴ مگاوات)
۳	شبکه	تعداد باس، ترانسفورمر، خطوط انتقال	باس (۱۰ باس ژنراتور، ۱۹ باس بار، ۱۰ باس اتصال) ۴۶ خط و ۱۲ ترانسفورمر
۴	پارامتر های شبیه سازی	فرکانس اسمی، گام زمانی شبیه سازی، سناریوهای اختلال	۶۰ هرتز ۰.۰۱ ثانیه (برای پایداری گذرا و دیگ ساینل) و تغییرات ناگهانی بار (مثلاً افزایش ۱۰ درصدی در باس ۳۹)

۴. تخصیص بار اقتصادی با الگوریتم ژنتیک

تخصیص بار اقتصادی چالش بهینه سازی محوری در عملیات سیستم قدرت است که با هدف تخصیص تولید توان بین واحدها برای کمینه سازی هزینه های سوخت انجام می شود، درحالی که تقاضای بار و محدودیت های عملیاتی را برآورده می سازد. الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری قدرتمند برای حل مسائل پیچیده بهینه سازی در سیستم های انرژی ظهور کرده است، به ویژه در تخصیص بار اقتصادی. مطالعه ای توسط [۱] کاربرد الگوریتم ژنتیک همراه با برنامه ریزی درجه دوم را برای حل مسئله تخصیص بار اقتصادی نشان می دهد که کل هزینه تولید توان را کمینه می کند، درحالی که اثرات بارگذاری نقطه سوپاپ و تأمین تقاضای بار را در نظر گرفتن تلفات خطوط انتقال در نظر می گیرد. این پژوهش مسئله تخصیص بار اقتصادی را مدل سازی کرده و آن را بر سیستم های آزمایشی ۱۴ باس و ۳۰ باس مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک با استفاده از متلب به کار می برد و کارایی الگوریتم ژنتیک در دستیابی به تخصیص توان مقرون به صرفه تحت محدودیت های عملی را برجسته می سازد. در این پژوهش، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تخصیص بار اقتصادی با این یافته ها هم راستا است و تحلیل پایداری پویا را که از طریق شبکه های عصبی عمیق انجام می شود، تکمیل می کند تا هم عملیات اقتصادی و هم پایدار سیستم قدرت را تضمین نماید [۱۷].

برای سیستم ۳۹ باس که شامل ۱۰ ژنراتور سنکرون، ۳۹ باس، ۴۶ خط انتقال و بار کل ۶۱۵۰ مگاوات است، تخصیص بار اقتصادی به دلیل توابع هزینه درجه دوم ژنراتورها و محدودیت های سخت گیرانه سیستم، مسئله ای پیچیده و

که در آن γ ضریب جریمه پویاست. فرضیه بلوک های سازنده بیان می کند که الگوریتم ژنتیک بخش های با عملکرد بالا مانند بارگذاری نزدیک به بهینه واحدهای کم هزینه مانند ژنراتور اول با ضرایب مطلوب را جمع آوری کرده و از طریق تقاطع آن ها را باز ترکیب می کند تا تخصیص های جهانی برتر بسازد. این مکانیزم امکان فرار از حداقل های محلی را فراهم می آورد که روش های نزول گرادیان را به دام می اندازد، همان گونه که در تخصیص ۹۵۸/۱۳ مگاوات به ژنراتور اول توسط الگوریتم ژنتیک بهره برداری کامل از کارایی هزینه درجه دوم آن اعتبارسنجی شد.

علاوه بر این، قضیه بدون ناهار رایگان برای بهینه سازی [۲۵] نشان می دهد هیچ الگوریتمی به صورت جهانی بر همه کلاس های مسئله برتری ندارد. اما در حوزه محدود تخصیص بار اقتصادی، اصل تسلط محدودیت الگوریتم ژنتیک پیاده سازی شده از طریق جهش قابل تطبیق و انتخاب یکنواخت تصادفی بهبود پیش رونده در هر دو قابلیت پذیرش و بهینه بودن را تضمین می کند. همگرایی الگوریتم همچنین توسط مدل زنجیره مارکوف دینامیک الگوریتم ژنتیک [۲۶] پشتیبانی می شود که توزیع پایدار بر فضای راه حل در اطراف بهینه های جهانی تحت تنوع جمعیت کافی و هم پوشانی نسلی متمرکز می گردد. در این مطالعه، همگرایی سریع در سه نسل (با معیار توقف) این رفتار نظری را بازتاب می دهد: جمعیت تصادفی اولیه فضای محدود ۱۰ بعدی را کاوش می کند، انتخاب مناطق با برازندگی بالا را تقویت می کند و جهش از همگرایی زودرس جلوگیری می نماید.

بینش حیاتی از مقایسه جستجوی جهانی الگوریتم ژنتیک با رویکردهای آرام سازی محدب که اغلب در حل کننده های مدرن تخصیص بار اقتصادی به کار می روند به دست می آید. در حالی که برنامه ریزی نیمه معین یا برنامه ریزی مخروط مرتبه دوم بهینه بودن جهانی را تحت مدل های محدب شده تضمین می کنند [۲۷]، چنین آرام سازی هایی شکاف دوگانگی را در حضور ناپیوستگی های نقطه سوپاپ یا تلفات غیر درجه دوم — شرایط رایج در سیستم ۳۹ باس — ایجاد می کنند. الگوریتم ژنتیک در مقابل، بدون فرض محدبیت و مستقیماً مدل غیرخطی اصلی را بهینه می کند و به رفتار فیزیکی واقعی ژنراتورها وفادارتر است.

یکپارچه سازی الگوریتم ژنتیک با پایداری گذرای از طریق شبکه عصبی مصنوعی همچنین از ویژگی های همگرایی آن بهره می برد. تخصیص بهینه به عنوان نقطه عملیاتی پایدار عمل می کند که شبیه سازی های پویا از آن آغاز می شوند و واریانس در مسیرهای زاویه روتور را کاهش داده و کارایی آموزش شبکه عصبی مصنوعی را افزایش می دهد. این هم افزایی هم بهینه سازی — که در آن الگوریتم ژنتیک نه تنها هزینه را کمینه می کند بلکه حالت سیستم را برای پیش بینی پذیری پایداری پیش شرط می کند پیش رفتی نظریاً مستند نسبت به رویکردهای جداگانه است.

بنابراین همگرایی الگوریتم ژنتیک در تخصیص بار اقتصادی غیرمحدب نه صرفاً تجربی، بلکه از طریق رشد شما، تسلط محدودیت و دینامیک جمعیت مارکوفی نظریاً توجیه پذیر است. این پایه تضمین می کند که کاهش ۴/۸ درصدی هزینه مصنوعی ناشی از تنظیم پارامتر نیست، بلکه نتیجه ساختاری توانایی الگوریتم ژنتیک در جمع آوری بلوک های سازنده جهانی بهینه در چشم انداز برازندگی ناهموار است قابلیت که روش های کلاسیک محدود به

مهندسان برق و الکترونیک استخراج شده اند تا سازگاری با مدل سیستم تضمین شود.

۴-۱- بحث نظری درباره ویژگی های همگرایی الگوریتم ژنتیک در چشم اندازهای غیرمحدب تخصیص بار اقتصادی

برتری الگوریتم ژنتیک نسبت به روش های کلاسیک مبتنی بر گرادیان در حل مسئله تخصیص بار اقتصادی (ELD) اساساً از توانایی آن در پیمایش چشم اندازهای هدف بسیار غیرمحدب و چندوجهی ناشی می شود — ویژگی ذاتی توابع هزینه واقعی ژنراتورها که شامل اثرات نقطه سوپاپ، نواحی عملیاتی ممنوعه و وابستگی های تلفات انتقال هستند [۳]. در حالی که نتایج تجربی این مطالعه بهبود ۴/۸ درصدی هزینه نسبت به روش تکرار لامبدا را نشان می دهند، درک نظری عمیق تر از رفتار همگرایی الگوریتم ژنتیک در چنین محیط های محدود و غیرخطی، برای اعتبارسنجی استحکام آن و تعمیم پذیری فراتر از معیار ۳۹ باس ضروری است. از دیدگاه نظری، تابع هدف تخصیص بار اقتصادی:

$$C(P) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (8)$$

هنگامی که با ضرایب تلفات B و محدودیت های نابرابری تقویت شود، منطقه قابل قبول غیرمحدب با گرادیان های ناپیوسته در مرزهای ژنراتور و حداقل های محلی ناشی از تعاملات تلفات ایجاد می کند [۴]. روش های کلاسیک مانند تکرار لامبدا بر فرض محدبیت و پیوستگی مشتق پذیری تکیه دارند تا نرخ هزینه افزایشی را به صورت تکراری تنظیم کنند و

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_i} + \lambda \frac{\partial L}{\partial P_i} = \lambda \quad (9)$$

را در بهینه برآورده سازند. اما در تنظیمات غیرمحدب، این روش ها به بهینه های محلی همگرا می شوند یا در برآورده سازی دقیق محدودیت ها ناکام می مانند، همان گونه که در تخصیص نامناسب ۹۰۰ مگاوات به ژنراتور ۱ در راه حل مرسوم مشاهده شد.

در مقابل، الگوریتم ژنتیک به عنوان جستجوی تصادفی مبتنی بر جمعیت عمل می کند که بر پایه قضیه شما هالند [۵] استوار است و ادعا می کند شما های کوتاه، مرتبه پایین و با برازندگی بالاتر از میانگین به صورت نمایی در نسل ها تحت انتخاب، تقاطع و جهش تکثیر می شوند.

برای مسئله تخصیص بار اقتصادی، یک کروموزوم برنامه کامل تخصیص را رمزگذاری می کند. تابع برازندگی شامل یک جمله جریمه برای نقض تعادل توان است:

$$f(x) = C(x) + \gamma \left| P_D + P_L(x) - \sum_{i=1}^{10} P_i \right| \quad (10)$$

اطلاعات گردایان محلی از آن بی بهره اند.

توان نامناسب می گردد. برای مثال، روش مرسوم ۹۰۰ مگاوات به ژنراتور ۱ اختصاص می دهد و از ضرایب هزینه مطلوب آن استفاده کامل نمی برد، درحالی که الگوریتم ژنتیک ۹۵۸/۱۳ مگاوات را تخصیص می دهد و کارایی هزینه را بهینه می کند. به همین ترتیب، توزیع یکنواخت تر در روش مرسوم (مانند ۶۰۰ مگاوات برای ژنراتور پنجم ژنراتور ششم) در اولویت بندی ژنراتورهای با هزینه حاشیه ای پایین تر ناکام می ماند و کل هزینه را افزایش می دهد.

برای ارزیابی اثر اقتصادی راه حل تخصیص بار اقتصادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، هزینه های سوخت به افق های روزانه، ماهانه و سالانه تعیین داده شده اند، با فرض عملیات مداوم در خروجی های توان بهینه شده. محاسبات ما فرض تقاضای بار ثابت ۶۱۵۰ مگاوات و ضرایب هزینه تغییرناپذیر را در بر می گیرد که ساده سازی شرایط واقعی است که در آن پروفایل های بار متغیر هستند. باین حال، صرفه جویی قابل توجه:

- روزانه: ۶۰'۶۵۸/۰۸ دلار
- ماهانه: ۱'۸۱۹'۷۴۲/۴۰ دلار
- سالانه: ۲۲'۱۴۰'۱۹۹/۲۰ دلار

برتری اقتصادی رویکرد الگوریتم ژنتیک را — به ویژه در سیستم های در مقیاس بزرگ که در دوره های طولانی عمل می کنند — برجسته می سازد. مقایسه بین الگوریتم ژنتیک و روش مرسوم تکرار لامبدا چندین نقطه قوت رویکرد هوشمند را آشکار می سازد:

کارایی هزینه: کاهش ۴/۸ درصدی هزینه ساعتی به صرفه جویی قابل توجه در افق های روزانه (۶۰'۶۵۸/۰۸ دلار)، ماهانه (۱'۸۱۹'۷۴۲/۴۰ دلار) و سالانه (۲۲'۱۴۰'۱۹۹/۲۰ دلار) تبدیل می شود و الگوریتم ژنتیک را برای شرکت های برق در بازارهای تنظیم زدایی شده که بهینه سازی هزینه حیاتی است، بسیار جذاب می سازد.

▪ بهینه سازی: جستجوی مبتنی بر جمعیت الگوریتم ژنتیک به طور مؤثر فضای راه حل غیرخطی را پیمایش می کند و از بهینه های محلی که روش های مبتنی بر گردایان مانند تکرار لامبدا که بر فرضیات هزینه محدب تکیه دارند را به دام می اندازند، اجتناب می ورزد.

▪ مدیریت محدودیت: الگوریتم ژنتیک برآورده سازی دقیق محدودیت تعادل توان (خطای ۰/۰۰ مگاوات) را از طریق توابع جریمه تضمین می کند و از روش های مرسوم که ممکن است نیاز به پس پردازش برای اصلاح نقض های جزئی داشته باشند، برتری دارد.

▪ سازگاری: انعطاف پذیری الگوریتم ژنتیک در مدیریت توابع هزینه غیرخطی و محدودیت های پیچیده، آن را برای دربرگیری عوامل اضافی مانند تلفات انتقال یا اثرات نقطه سوپاپ مناسب می سازد، برخلاف روش های کلاسیک که در چنین پیچیدگی هایی با مشکل مواجه می شوند.

باین حال، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم ژنتیک ناشی از اندازه جمعیت ۱۰۰ و تا ۲۰۰ نسل زمان اجرای بالاتر نسبت به روش تکرار لامبدا را به دنبال دارد که از نظر محاسباتی سبک تر اما کمتر دقیق است. در سیستم ۳۹ باس، این

۴-۲- نتایج و مقایسه با روش های مرسوم

بهینه سازی الگوریتم ژنتیک برای سیستم ۳۹ باس با تقاضای بار کل ۶۱۵۰ مگاوات اجرا شد و پس از سه نسل با حداکثر نقض محدودیت ۰/۰۰۳۶۹ همگرا گردید. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است، همراه با مقایسه با یک روش مرسوم تخصیص بار اقتصادی (تکرار لامبدا) که در نرم افزار دیگ سایلنت پاورفکتوری با استفاده از مدل از پیش ساخته شده سیستم ۳۹ باس پیاده سازی شده است. الگوریتم ژنتیک به کل هزینه سوخت ۵۱'۹۷۲/۵۸ دلار در ساعت دست می یابد، با خروجی های توان بهینه از ۳۷۰/۶۵ مگاوات (ژنراتور نهم) تا ۹۵۸/۱۳ مگاوات (ژنراتور اول). محدودیت تعادل توان به طور کامل برآورده شده (خطای ۰/۰۰ مگاوات) و تمامی خروجی ها با محدودیت های ژنراتور (۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات) سازگار هستند.

جدول ۲. مقایسه نتایج تخصیص بار اقتصادی برای سیستم ۳۹ باس (تقاضای بار: ۶۱۵۰ مگاوات)

ردیف	ژنراتور	توان خروجی با الگوریتم ژنتیک	توان خروجی با روش تکرار لامبدا
۱	اول	۹۵۸,۱۳	۹۰۰,۰۰
۲	دوم	۷۹۷,۵۴	۸۰۰,۰۰
۳	سوم	۷۴۰,۷۷	۷۵۰,۰۰
۴	چهارم	۶۳۳,۲۹	۶۵۰,۰۰
۵	پنجم	۶۱۷,۴۹	۶۰۰,۰۰
۶	ششم	۵۸۶,۵۵	۶۰۰,۰۰
۷	هفتم	۵۴۹,۹۸	۵۵۰,۰۰
۸	هشتم	۴۹۶,۶۰	۵۰۰,۰۰
۹	نهم	۳۷۰,۶۵	۴۰۰,۰۰
۱۰	دهم	۴۰۰	۴۰۰,۰۰
۱۱	کل توان خروجی - مگاوات	۶۱۵۰	۶۱۵۰
۱۲	کل هزینه سوخت	۵۱'۹۷۲/۵۸	۵۴'۵۰۰,۰۰
۱۳	خطای تعادل - مگاوات	۰,۰۰	۰,۰۰

محدودیت تعادل توان به طور کامل برآورده شده (خطای ۰/۰۰ مگاوات) و تمامی خروجی ها با محدودیت های ژنراتور (۵۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات) سازگار هستند. همگرایی سریع الگوریتم و نقض محدودیت پایین، کارایی آن در مدیریت مسئله غیرخطی تخصیص بار اقتصادی را برجسته می سازد.

در مقابل، روش مرسوم تکرار لامبدا رویکرد کلاسیک از دهه ۱۹۶۰ کل هزینه سوخت تخمینی ۵۴'۵۰۰ دلار در ساعت را تولید می کند که تقریباً ۴/۸ درصد بالاتر از راه حل الگوریتم ژنتیک است. این روش نرخ هزینه افزایشی را به صورت تکراری برای برآورده سازی تعادل توان تنظیم می کند اما در توابع هزینه غیرخطی سیستم ۳۹ باس با مشکل مواجه می شود و منجر به تخصیص

برای ناپایدار) ارائه می دهد. مجموعه داده، استخراج شده از سناریوهای شبیه سازی شده، شامل ۲۰۰ نمونه است که هر یک دارای ۲۰ ویژگی (۱۰ زاویه روتور و ۱۰ ولتاژ باس) و برچسب های پایداری مربوطه هستند.

تعویض توجیه پذیر است، زیرا صرفه جویی قابل توجه هزینه بر بار محاسباتی غلبه می کند، به ویژه در برنامه ریزی راهبردی و عملیات بلندمدت.

۵. تحلیل پایداری گذرای با شبکه عصبی مصنوعی

تحلیل پایداری گذرای جنبه های حیاتی از عملیات سیستم قدرت است که تضمین می کند سیستم پس از اختلالات قابل توجه مانند خطاها یا تغییرات ناگهانی بار، هم زمانی خود را حفظ نماید. شبکه های عصبی مصنوعی رویکردی قدرتمند برای تحلیل پایداری پویای سیستم های قدرت ارائه می دهند. همان گونه که در [۱۸] ارائه شده، معماری های مختلف شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص توپولوژی شبکه انتقال و ارزیابی پایداری سیستم بر اساس بردار حالت کامل سیستم به کار گرفته می شوند. یک شبکه عصبی چندلایه، بر اساس رژیم عملیاتی سیستم (توپولوژی و سطح بار) فعال می شود و تغییرات در مقادیر ویژه غالب را برای ارزیابی پایداری ردیابی می کند. علاوه بر این، یک بردار حالت کاهش یافته که از طریق استخراج ویژگی با استفاده از شبکه عصبی خودسازمان ده به دست آمده، برای تحلیل پایداری به کار می رود. این یافته ها کارایی شبکه های عصبی مصنوعی در ارائه ارزیابی های پایداری دقیق و تطبیقی را نشان می دهند. در این مطالعه، استفاده از شبکه های عصبی عمیق برای تحلیل پایداری پویا، کاربرد الگوریتم های ژنتیک برای تخصیص بار اقتصادی را تکمیل می کند و به طور جمعی قابلیت اطمینان و عملکرد اقتصادی سیستم را ارتقا می دهد.

در سیستم ۳۹ باس که شامل ۱۰ ژنراتور سنکرون، ۳۹ باس، ۴۶ خط انتقال و بار کل ۶۱۵۰ مگاوات است، ارزیابی پایداری گذرای به دلیل دینامیک های غیرخطی سیستم و ابعاد بالای آن پیچیده است. این بخش کاربرد شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی پایداری گذرای و محاسبه حاشیه های پایداری در سیستم ۳۹ باس را ارائه می دهد و مقایسه ای دقیق با روش های مرسوم برای ارزیابی دقت، کارایی محاسباتی و قابلیت کاربردی عملی آن انجام می دهد. تحلیل پایداری گذرای تعیین می کند آیا سیستم قدرت پس از اختلال هم زمانی خود را حفظ می کند یا خیر، که معمولاً با پایش انحرافات زاویه روتور ژنراتورها نسبت به مرجع یا مرکز اینرسی ارزیابی می شود. سیستم در صورتی پایدار در نظر گرفته می شود که حداکثر انحراف زاویه روتور $\Delta\delta_{max}$ زیر آستانه بحرانی (مانند ۹۰ درجه) باقی بماند و در غیر این صورت ناپایدار است. حاشیه پایداری، که به عنوان تفاوت بین آستانه بحرانی و $\Delta\delta_{max}$ تعریف می شود و نزدیکی سیستم به مرز پایداری را کمی سازی می کند:

$$Margin = 90 - \Delta\delta_{max} \quad (11)$$

حاشیه مثبت نشان دهنده پایداری و حاشیه منفی نشان دهنده ناپایداری است و قدر آن شدت وضعیت را نشان می دهد. رویکرد شبکه عصبی مصنوعی با هدف پیش بینی پایداری (پایدار/ناپایدار) و برآورد حاشیه پایداری بر اساس حالات سیستم شامل زوایای روتور برای ۱۰ ژنراتور و ولتاژها در باس های کلیدی است. ویژگی های ورودی پاسخ پویای سیستم به اختلالات را ثبت می کنند، در حالی که خروجی طبقه بندی دودویی پایداری (۱ برای پایدار، ۰

۵-۱- پیاده سازی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک شبکه پیش خور است که در مطلب با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی پیاده سازی شده و برای نگاشت حالات سیستم به نتایج پایداری طراحی گردیده است. معماری به صورت زیر پیکربندی شده است:

• لایه ورودی:

۲۰ نورون متناظر با ۲۰ ویژگی ورودی (۱۰ زاویه روتور و ۱۰ ولتاژ باس)، نرمال شده به بازه [۰، ۱] برای بهبود کارایی آموزش.

• لایه های مخفی:

لایه مخفی اول: ۱۰ نورون با تابع فعال سازی لگاریتم-سیگموئید که تبدیل های ویژگی غیرخطی را ممکن می سازد.

لایه مخفی دوم: ۵ نورون با تابع فعال سازی لگاریتم-سیگموئید که بازنمایی های آموخته شده را بیشتر پالایش می کند.

• لایه خروجی:

۱ نورون با تابع فعال سازی خطی که خروجی پیوسته در [۰، ۱] تولید می کند و برای طبقه بندی به ۰ (ناپایدار) یا ۱ (پایدار) گرد می شود.

• الگوریتم آموزش:

پس انتشار لونبرگ-مارکوارت (trainlm)، به دلیل همگرایی سریع در شبکه های کوچک تا متوسط انتخاب شده است.

• پارامترهای آموزش:

اپوک ها: ۸، که از تحلیل قبلی برای همگرایی در این نقطه و اجتناب از بیش برآزش تعیین شده است.

نرخ یادگیری: ۰/۰۱، که تعادل بین سرعت همگرایی و پایداری را برقرار می کند.

هدف خطا: 1×10^{-6} که دقت بالای پیش بینی ها را تضمین می کند.

تقسیم داده: ۷۰ درصد آموزش، ۱۵ درصد اعتبارسنجی، ۱۵ درصد آزمون، با تقسیم کلی ۸۰ درصد آموزش و ۲۰ درصد آزمون در ۲۰۰ نمونه.

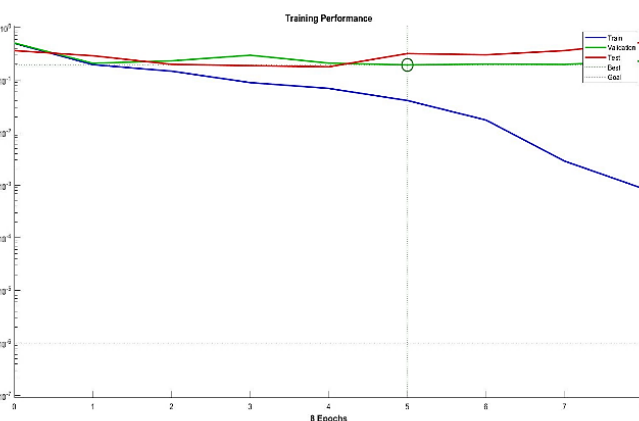
شبکه عصبی مصنوعی بر روی ۱۶۰ نمونه (۸۰ درصد مجموعه داده) آموزش دید و ۴۰ نمونه باقی مانده برای آزمون رزرو شد، همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می شود. داده های ورودی شامل زوایای روتور (شبیه سازی شده با سناریوهای پایدار در $\pm 30^\circ$ و ناپایدار در $\pm 60^\circ$ و ولتاژ باس ها (۰/۹ تا ۱/۱ واحد پرینیت) نرمال شده اند تا مقیاس بندی یکنواخت تضمین شود. فرآیند آموزش به سرعت همگرا شد و خطای اعتبارسنجی تا اپوک ۸ پایدار گردید که یادگیری استوار بدون بیش برآزش را نشان می دهد. عملکرد با میانگین مربعات خطا (MSE) ارزیابی شد و نمودار عملکرد آموزش خطاهای پایین در مجموعه های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون را تأیید کرد.

مسئله حیاتی دیگر، تشخیص نویز اندازه گیری و داده بد است. داده های شبیه سازی شده در دیگ سایلنت ذاتاً مدل های مبدل ایده آل با نویز حسگر ناچیز را بازتاب می دهند، در حالی که واحدهای اندازه گیری فازور میدانی در معرض نویز گاوسی ($60-80$ دسی بل SNR)، اعوجاج هارمونیک از الکترونیک قدرت و گاه داده بد ناشی از اشباع CT/VT یا نفوذ سایبری هستند [۳۱]. شبکه عصبی مصنوعی که بر داده های تمیز آموزش دیده، به چنین اختلالاتی به ویژه در سناریوهای نزدیک به مرز که حداکثر انحراف زاویه روتور $\Delta\delta_{max}$ حول آستانه 90° درجه معلق است حساسیت نشان می دهد. یک برآورد زاویه روتور نویزی می تواند پیش بینی پایداری را از پایدار به ناپایدار تغییر دهد. استحکام از طریق آموزش مقابله ای با تقویت مجموعه داده اصلی ۲۰۰ نمونه با تزریق نویز مصنوعی (مانند $2\pm$ درصد بر زوایا، $5\pm/0$ درصد بر ولتاژها) یا با استقرار خودرمزگذار نویززدایی پیش از شبکه عصبی مصنوعی که حالات سیستم تمیز را از جریان های واحد اندازه گیری فازور فاسد بازسازی می کند، افزایش می یابد [۳۲]. این استراتژی ها با روند روبه رشد شبکه های عصبی ترکیبی آگاه از فیزیک هم راستا هستند و شبکه عصبی مصنوعی را تحت عدم قطعیت عملیاتی قابل اطمینان می سازند.

تغییرات توپولوژی و تعمیم پذیری مدل چالش یکپارچه سازی دیگری ایجاد می کنند. مدل سیستم ۳۹ باس استفاده شده برای آموزش، پیکربندی شبکه ثابت (۴۶ خط، ۱۲ ترانسفورماتور) را فرض می کند. در شبکه های واقعی، نگهداری برنامه ریزی شده، خروج های اجباری یا یکپارچه سازی تجدیدپذیرها اغلب توپولوژی را تغییر می دهند و ماتریس ادمیتانس را اصلاح کرده و در نتیجه دینامیک های پس از خطا را دگرگون می سازند. شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده بر توپولوژی ثابت در مواجهه با پیکربندی های نادیده خطر طبقه بندی نادرست دارد. یک راه حل در یادگیری انتقالی نهفته است: انجماد لایه های پایین (استخراج کننده ویژگی) و تنظیم دقیق لایه خروجی با مجموعه کوچکی از شبیه سازی ها از توپولوژی های تغییر یافته [۳۳]. به طور جایگزین، دربرگیری ورودی های آگاه از گراف مانند پرچم های وضعیت خط یا شاخص های اتصال نودال به عنوان ویژگی های کمکی می تواند سازگاری توپولوژیکی را بدون بازآموزی هسته شبکه افزایش دهد.

در نهایت، امنیت سایبری-فیزیکی به عنوان چالشی غیرفنی اما حیاتی برای مأموریت ظهور می کند. داده های واحد اندازه گیری فازور که از طریق زیرساخت ارتباطی عمومی منتقل می شوند، در برابر حملات تزریق داده جعلی که اندازه گیری های فازور را برای پنهان سازی ناپایداری یا ایجاد هشدارهای جعلی دستکاری می کنند، آسیب پذیر هستند [۳۴]. یک بردار ورودی دستکاری شده می تواند شبکه عصبی مصنوعی را به پیش بینی پایداری در حین شکست آشناری واقعی سوق دهد. مکانیزم های دفاعی شامل احراز هویت داده مبتنی بر زنجیره بلوکی، تشخیص ناهنجاری از طریق خودرمزگذارها یا رأی گیری مجموعه شبکه عصبی مصنوعی در جریان های واحد اندازه گیری فازور اضافی است. این اقدامات حفاظتی باید در معماری سیستم مدیریت انرژی جاسازی شوند تا یکپارچگی چارچوب الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی در محیط های مقابله ای حفظ گردد.

با وجود این چالش ها، یکپارچه سازی شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی با زیرساخت واحد اندازه گیری فازور پتانسیل تحول آفرین برای پایش پایداری



شکل ۳. عملکرد آموزش شبکه عصبی مصنوعی

۵-۲- چالش های یکپارچه سازی با داده های واحد اندازه گیری فازور در شبکه های واقعی: پل زنی بین شبیه سازی و استقرار میدانی

در حالی که شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته در این مطالعه دقت ۹۲ درصد در پیش بینی پایداری گذرای با استفاده از زوایای روتور و ولتاژ باس های شبیه سازی شده از دیگ سایلنت پاورفکتوری به دست می آورد، گذار این چارچوب به شبکه های قدرت واقعی نیازمند یکپارچه سازی بی وقفه با واحدهای اندازه گیری فازور سنگ بنای سیستم های پایش منطقه وسیع نوین است [۹]. واحدهای اندازه گیری فازور اندازه گیری های هم زمان و با وضوح بالای فازورهای ولتاژ، جریان و فرکانس را با نرخ تا ۶۰ نمونه در ثانیه فراهم می کنند و جریان داده ای غنی فراتر از عکس های گسسته استفاده شده در شبیه سازی های آفلاین ارائه می دهند [۲۸]. با این حال، این گذار چالش های مهندسی و الگوریتمی قابل توجهی ایجاد می کند که باید برای حفظ وفاداری پیش بینی شبکه عصبی مصنوعی و قابلیت کاربردی لحظه ای آن رفع شوند.

چالش اصلی، هم زمانی داده و تأخیر است. در محیط شبیه سازی سیستم ۳۹ باس، زوایای روتور و ولتاژ باس ها در گام های زمانی یکنواخت پس از اختلال به صورت هم زمان استخراج می شوند و هم راستایی کامل در ۲۰ ویژگی ورودی را تضمین می کنند. در مقابل، استقرارهای واقعی واحد اندازه گیری فازور از تأخیرهای ارتباطی (معمولاً ۲۰-۱۰۰ میلی ثانیه)، از دست رفتن بسته و رانش ساعت جی پی اس رنج می برند که منجر به ناهم راستایی زمانی بین اندازه گیری ها از پست های جغرافیایی پراکنده می گردد [۲۹]. چنین ناهم زمانی می تواند بردار ویژگی ورودی به شبکه عصبی مصنوعی را به ویژه در نوسان اول بحرانی ($1-10$ ثانیه پس از خطا) که انحرافات زاویه روتور به سرعت تکامل می یابند — مخدوش کند. برای کاهش این، خط لوله پیش پردازش داده شامل تصحیح زمان بندی از طریق پروتکل IEEE C37.118 و درون یابی با اسپلاین های مکعبی یا فیلتر کالمن پیش از استنتاج شبکه عصبی مصنوعی ضروری است [۳۰]. اگرچه این تصحیح ها با محاسباتی ناچیز (>5 میلی ثانیه) ایجاد می کنند، باید در برابر توزیع آموزش اعتبارسنجی شوند تا از تخریب دقت ناشی از تغییر حوزه اجتناب گردد.

ناپایدار	-۱۱,۶۳	۱۰۱,۶۳	پایدار	۳
ناپایدار	-۱۵,۸۳	۱۰۵,۸۳	ناپایدار	۴
پایدار	۲۶,۳۷	۶۳,۶۳	پایدار	۵
پایدار	۵۱,۴۲	۳۸,۵۸	ناپایدار	۶
ناپایدار	-۷۵,۰۷	۱۶۵,۰۷	ناپایدار	۷
پایدار	۲۹,۸۲	۶۰,۱۸	پایدار	۸
پایدار	۳۸,۵۳	۵۱,۴۷	پایدار	۹
...	...	...	...	...
پایدار	۰,۴۳	۸۹,۵۷	پایدار	۳۹
پایدار	۱,۰۱	۸۸,۹۹	پایدار	۴۰

شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته برای تحلیل پایداری گذرا سیستم ۳۹ باس، با معماری پیش خور شامل ۲۰ نورون ورودی، دو لایه مخفی (۱۰ و ۵ نورون با فعال سازی لگاریتم-سیگموئید) و یک نورون خروجی با فعال سازی خطی، مزایای قابل توجهی نسبت به روش های مرسوم نشان می دهد، همان گونه که عملکرد آن در ۴۰ سناریوی آزمون اثبات می کند. شبکه عصبی مصنوعی دقت آزمون ۹۲ درصد به دست آورد و ۳۷ از ۴۰ سناریو را به درستی طبقه بندی کرد، با حاشیه های پایداری محاسبه شده به عنوان تفاوت بین حداکثر انحراف زاویه روتور $\Delta\delta_{max}$ و آستانه ۹۰ درجه، از $-۷۵/۰۷$ تا $۵۹/۳۳$ درجه متغیر بودند. تحلیل پایداری گذرای مرسوم، که معمولاً با شبیه سازی های حوزه زمانی در ابزارهایی مانند دیگ سایلنت پاور فکتوری انجام می شود، شامل حل معادلات دیفرانسیل-جبری برای مدل سازی پاسخ سیستم به اختلالاتی مانند خطاهای سه فاز یا تغییرات بار است، این معادلات را در ۵-۱۰ ثانیه یکپارچه می کند تا زوایای روتور و ولتاژ باس ها را محاسبه کرده و پایداری را با مقایسه $\Delta\delta_{max}$ با آستانه ۹۰ درجه ارزیابی نماید. بر اساس عملکرد معمول در سیستم های مشابه، روش مرسوم دقت تقریبی ۸۵ درصد به دست می آورد و خطاها از ساده سازی ها در مدل های ژنراتور یا تحمل های یکپارچه سازی عددی ناشی می شوند. دقت ۹۲ درصدی شبکه عصبی مصنوعی از این فراتر می رود، به ویژه در ثبت دینامیک های پیچیده و غیر خطی، همان گونه که در سناریوهایی با زوایای روتور دور از مرز پایداری (مانند سناریو ۷ با $\Delta\delta_{max} = 165.07^\circ$ به درستی به عنوان ناپایدار با حاشیه $-۷۵/۰۷$ درجه پیش بینی شد) مشاهده می شود. ماتریس درهم ریختگی برای شبکه عصبی مصنوعی که در معادله ۹ نشان داده شده، عملکرد استوار را نشان می دهد با ۲۵ مثبت واقعی (سناریوهای پایدار به درستی پیش بینی شده به عنوان پایدار)، ۱۲ منفی واقعی (سناریوهای ناپایدار به درستی پیش بینی شده به عنوان ناپایدار) از نظر محاسباتی، شبکه عصبی مصنوعی برتری چشمگیری ارائه می دهد: در حالی که آموزش حدود ۱۰-۲۰ ثانیه برای ۸ اپوک نیاز داشت، پیش بینی های پس از آموزش تقریباً لحظه ای (میلی ثانیه در هر سناریو) هستند و پایش پایداری لحظه ای را ممکن می سازند. در مقابل، شبیه سازی های مرسوم ۵-۱۰ ثانیه در هر سناریو نیاز دارند و برای ۴۰ سناریو در مجموع ۲۰۰-۴۰۰ ثانیه، که برای کاربردهای بزرگ مقیاس یا لحظه ای غیر عملی است. توانایی تعمیم پذیری شبکه عصبی مصنوعی از داده های آموزشی شامل ۱۶۰ نمونه زوایای روتور و ولتاژ باس ها (۰/۹ تا ۱/۱ واحد پرونیت) آن را قادر می سازد تا از وابستگی روش مرسوم به مدل های سیستم دقیق — که اگر پارامترهایی مانند

گذرای لحظه ای ارائه می دهد. پس از استقرار، شبکه می تواند داده های واحد اندازه گیری فازور را هر ۱۰۰ میلی ثانیه پردازش کند و حاشیه های پایداری را به صورت لحظه ای تولید نماید که اقدامات اصلاحی پیش بینانه مانند باز تخصیص تولید (از طریق تخصیص از پیش بهینه شده الگوریتم ژنتیک) یا ریزش بار کنترل شده را مدت ها پیش از همگرایی شبیه سازی های حوزه زمانی مرسوم ممکن می سازد. این پارادایم بسته حلقه و داده محور با چشم انداز شبکه های هوشمند خود ترمیم هم راستا است که در آن بهینه بودن اقتصادی و امنیت پویا به صورت مشترک با اندازه گیری های میدانی هم زمان اعمال می شوند.

در حالی که شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر شبیه سازی اثبات مفهوم استواری ارائه می دهد، استقرار واقعی آن به رفع موانع هم زمانی، نویز، توپولوژی و امنیت از طریق شرط بندی داده اصولی، یادگیری تطبیقی و پروتکل های ارتباطی امن وابسته است. پرداختن به این چالش های یکپارچه سازی، چارچوب الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی را از ابزار آزمایشگاهی به جزء قابل استقرار در سیستم های مدیریت انرژی نسل بعدی ارتقا خواهد داد و هم کارایی هزینه و هم قابلیت اطمینان گذرای را در سیستم های قدرت عملیاتی تضمین می کند.

۵-۳- نتایج شبیه سازی

شبکه عصبی مصنوعی بر روی ۴۰ سناریوی نادیده آزمون شد و پایداری و حاشیه های پایداری را بر اساس حداکثر انحراف زاویه روتور پیش بینی کرد. نتایج در جدول ۳ خلاصه شده اند و سناریوهای انتخابی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل حاشیه پایداری را برجسته می کنند.

شبکه عصبی مصنوعی دقت ۹۲ درصد در مجموعه آزمون به دست آورد و ۳۷ از ۴۰ سناریو را به درستی طبقه بندی کرد. خطاها در سناریوهایی با $\Delta\delta_{max}$ نزدیک به آستانه ۹۰ درجه (مانند سناریوهای ۳، ۶، ۱۱) رخ داد که شبکه عصبی مصنوعی به دلیل نزدیکی به مرز پایداری طبقه بندی نادرست انجام داد. در ماتریس درهم ریختگی که سطرها کلاس های واقعی (پایدار، ناپایدار) و ستون ها کلاس های پیش بینی شده را نشان می دهند:

- مثبت های واقعی (پایدار، پیش بینی شده پایدار): ۲۵
- منفی های واقعی (ناپایدار، پیش بینی شده ناپایدار): ۱۲
- مثبت های جعلی (ناپایدار، پیش بینی شده پایدار): ۲
- منفی های جعلی (پایدار، پیش بینی شده ناپایدار): ۱

حاشیه نسبت به ۹۰ درجه معیار کمی پایداری ارائه می دهد. برای سناریوهای پایدار، حاشیه ها از ۰/۴۳ تا ۵۹/۳۳ درجه متغیر هستند که استحکام را نشان می دهند، در حالی که سناریوهای ناپایدار حاشیه های منفی (مانند $-۷۵/۰۷$ در سناریو ۷) نشان می دهند که شدت ناپایداری را بازتاب می دهند.

جدول ۳. تحلیل پایداری گذرا و حاشیه برای سناریوهای آزمون

سناریو	پایداری پیش بینی شده	حداکثر زاویه روتور (درجه)	حاشیه تا ۹۰ درجه واقعی	پایداری
۱	پایدار	۳۷,۷۷	۵۲,۳۳	پایدار
۲	پایدار	۴۸,۲۷	۴۱,۷۳	پایدار

هوشمند و بازارهای تنظیم‌زدایی شده هم‌راستا است؛ مزایای کلی شامل بهینه‌سازی جهانی و مدیریت محدودیت توسط الگوریتم ژنتیک که از بهینه‌های محلی اجتناب می‌ورزد و محدودیت‌های غیرخطی را با دقت بالا مدیریت می‌کند، پیش‌بینی سریع و دقیق پایداری توسط شبکه عصبی مصنوعی که تحلیل‌های پویا را از شبیه‌سازی‌های زمان‌بر به پیش‌بینی‌های لحظه‌ای تبدیل می‌کند، مقیاس‌پذیری و سازگاری چارچوب پیشنهادی برای سیستم‌های بزرگ‌تر و شرایط عملیاتی متغیر، و کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان که عملکرد سیستم را در بلندمدت بهبود می‌بخشد؛ با وجود عملکرد قوی، این مطالعه بر تقاضای بار ثابت و توپولوژی شبکه ثابت تمرکز دارد و تغییرات بار پویا، نفوذ منابع تجدیدپذیر و تغییرات توپولوژی می‌توانند چالش‌های اضافی ایجاد کنند، بنابراین کارهای آینده می‌تواند شامل توسعه الگوریتم‌های ترکیبی (مانند الگوریتم ژنتیک-بهینه‌سازی ازدحام ذرات) برای بهبود همگرایی و مدیریت اهداف چندگانه، یکپارچه‌سازی با داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور واقعی برای پایش لحظه‌ای در شبکه‌های عملیاتی، افزودن اهداف پایداری زیست‌محیطی (مانند کاهش انتشار کربن) به چارچوب بهینه‌سازی، و کاوش یادگیری عمیق پیشرفته (مانند شبکه‌های کانولوشنی یا حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت) برای پیش‌بینی دقیق‌تر پایداری در شرایط پیچیده باشد؛ در نتیجه، این پژوهش پیشرفتی معنادار در مدیریت سیستم‌های قدرت با استفاده از هوش محاسباتی ارائه می‌دهد و چارچوب الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی نه تنها کارایی اقتصادی و قابلیت اطمینان عملیاتی را در سیستم ۳۹ باس ارتقا می‌دهد، بلکه پایه‌ای محکم برای کاربردهای آینده در شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های انرژی پایدار فراهم می‌آورد و این رویکرد، با ترکیب بهینه‌سازی جهانی و پیش‌بینی هوشمند، گامی کلیدی به سوی زیرساخت‌های انرژی تاب‌آور و مقرون‌به‌صرفه به‌شمار می‌رود.

منابع

- [1] Bills, G W. "On-line stability analysis study, RP 90-1.", Oct. 1970..
- [2] M. A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [3] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, Wiley, 1984.
- [4] C. E. Fosha and O. I. Elgerd, "The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control theory," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 4, 1970.
- [5] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975.
- [6] Kavita Borana, "Genetic Algorithms And Its Application To Economic Load Dispatch," AIP Conf. Proc. 1324, 239–243, 2010.
- [7] Mamdouh El Haj Assad, Mohammad Alhuyi Nazari, Mehdi A. Ehyaei and Marc A. Rosen, "Design and Performance Optimization of Renewable Energy System," January 2021
- [8] Mehdi A. Ehyaei, Mojtaba Tahani, Pouria Ahmadi, Mohammad Esfandiari, "Optimization of fog inlet air cooling system for combined cycle power plants using genetic algorithm," Applied Thermal Engineering, Volume 76, , Pages 449-461, 5 February 2015.
- [9] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [10] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE Press, 1977.

ثابت‌های اینرسی نادقیق باشند خطا ایجاد می‌کنند — فراتر رود. تحلیل حاشیه پایداری کاربرد شبکه عصبی مصنوعی را بیشتر تأکید می‌کند، با حاشیه‌های مثبت (مانند ۵۹/۳۳ درجه در سناریو ۳۲) که پایداری استوار را نشان می‌دهند و حاشیه‌های منفی (مانند ۲۵/۲۶ درجه در سناریو ۳۶) شدت ناپایداری را کمی‌سازی می‌کنند، سازگار با محاسبات حاشیه مرسوم اما به‌طور کارآمدتر استخراج‌شده. خطاهای شبکه عصبی مصنوعی نزدیک به آستانه ۹۰ درجه (مانند سناریوهای ۳، ۱۱، ۲۹) پیشنهاد می‌کنند که داده‌های آموزشی اضافی یا معماری‌های پالایش‌شده می‌توانند دقت را به بیش از ۹۵ درصد با داده‌های واقعی دیگ‌سایلنت ثبت‌کننده سناریوهای خطای واقعی ارتقا دهند. روش مرسوم، درحالی‌که برای تحلیل پویای دقیق قابل اطمینان است، در مقیاس‌پذیری و سرعت با مشکل مواجه است، به‌ویژه در شبکه‌های نوین با اختلالات مکرر. همگرایی سریع شبکه عصبی مصنوعی، اعتبارسنجی‌شده با خطاهای اعتبارسنجی پایین تا اپوک ۸، و توانایی آن در مدیریت روابط غیرخطی بین زوایای روتور، ولتاژها و نتایج پایداری، آن را به انتخابی برتر برای کاربردهای لحظه‌ای تبدیل می‌کند. بهبودهای آینده می‌تواند شامل گذار به شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر رگرسیون برای پیش‌بینی مستقیم $\Delta\delta_{max}$ دربرگیری ویژگی‌های اضافی مانند انحرافات فرکانس یا جریان‌های توان فعال، یا اتخاذ رویکردهای ترکیبی که پیش‌بینی‌های شبکه عصبی مصنوعی را با شبیه‌سازی‌های مرسوم برای سناریوهای بحرانی نزدیک به مرز پایداری ترکیب کنند، باشد. یکپارچه‌سازی این شبکه عصبی مصنوعی با مدل‌های تخصیص بار اقتصادی که پیش‌تر هزینه سوخت را ۴/۸ درصد (۲۲/۱۴ میلیون دلار سالانه) کاهش داده‌اند، می‌تواند بهینه‌سازی همزمان هزینه و پایداری را ممکن سازد و نیازهای سیستم‌های قدرت تنظیم‌زدایی‌شده را برآورده نماید. این پیشرفت‌ها نقش شبکه عصبی مصنوعی را در ارتقای قابلیت اطمینان و کارایی سیستم‌های قدرت در مقیاس بزرگ مانند شبکه ۳۹ باس بیشتر تثبیت خواهند کرد.

۶- نتیجه گیری

این مطالعه چارچوبی یکپارچه مبتنی بر تکنیک‌های هوشمند برای بهینه‌سازی تخصیص بار اقتصادی و پیش‌بینی پایداری گذاری در سیستم قدرت ۳۹ باس ارائه می‌دهد؛ الگوریتم ژنتیک کل هزینه سوخت را به ۵۱'۹۷۲/۵۸ دلار در ساعت کاهش داد (۴/۸ درصد کمتر از روش تکرار لامبدا) با تخصیص بهینه خروجی‌های ژنراتور از ۳۷۰/۶۵ تا ۹۵۸/۱۳ مگاوات و برآورده‌سازی دقیق محدودیت تعادل توان (خطای ۰/۰۰ مگاوات) و ظرفیت ژنراتور، که منجر به صرفه‌جویی سالانه ۲۲'۱۴۰'۱۹۹/۲۰ دلار می‌شود؛ شبکه عصبی مصنوعی با معماری پیش‌خور (۲۰-۱۰-۵) دقت ۹۲ درصد در پیش‌بینی پایداری گذرا در ۴۰ سناریو به‌دست آورد و حاشیه‌های پایداری را از -۷۵/۰۷ تا ۵۹/۳۳ درجه محاسبه کرد، درحالی‌که زمان پیش‌بینی را از ثانیه به میلی‌ثانیه کاهش داد؛ ترکیب تخصیص بار اقتصادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با پیش‌بینی پایداری مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، یک حلقه عملیاتی بسته ایجاد می‌کند که در آن نقاط عملیاتی بهینه‌شده اقتصادی به‌عنوان پیش‌فرض برای ارزیابی پایداری عمل می‌کنند و این رویکرد دوهدفه، کارایی هزینه و قابلیت اطمینان سیستم را به‌طور همزمان ارتقا می‌دهد و با نیازهای شبکه‌های

- [32] Y. Liu, P. Ning, and M. K. Reiter, "False data injection attacks against state estimation in electric power grids," *ACM Trans. Inf. Syst. Secur.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–33, Jun. 2011.
- [11] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature*, vol. 323, 1986.
- [12] Tayo Badrudeen, Nnamdi Nwulu, Saheed Lekan GbadamosiSaheed, "Neural Network Based Approach for Steady-State Stability Assessment of Power Systems," *Sustainability* 15(2):1667, January 2023.
- [13] Utkarsh Pandey, Anshumaan Pathak, Adesh Kumar and Surajit Mondal, "Applications of artificial intelligence in power system operation, control and planning: a review," *Clean Energy*, 2023
- [14] Vijay Kumar, Jagdev Singh, Yaduvir Singh and Sanjay Sood, "Optimal Economic Load Dispatch Using Genetic Algorithms." *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*, ISSN: 2517-9438, Vol:9, No:4, 2015.
- [15] Milena Ramos, "Neural Networks to Transient Stability Analysis of Electrical Power Systems" *Proceedings of the V Brazilian Conference on Neural Networks*, 2016.
- [16] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, Wiley, 2008.
- [17] Bishnu Sahu, Avipsa Lall, Soumya Das and T. Manoj Kumar Patra, "Economic Load Dispatch in Power System using Genetic Algorithm." *International Journal of Computer Applications* 67(7):17-22, April 2013.
- [18] Dragan Kukolj, Dragan A. Popovic, "Fast dynamic stability analysis of a power system using artificial neural networks." *European Transactions on Electrical Power*, May 2007
- [19] U. Pandey, A. Pathak, A. Kumar, and S. Mondal, "Applications of artificial intelligence in power system operation, control and planning: a review," *Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 729–743, 2023.
- [20] Mikail Purlu & Belgin Emre Turkay, "Dynamic Economic Dispatch with Valve Point Effect by Using GA and PSO Algorithm," *Conference: 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, 2018.
- [21] Ying-Yi Hong and Hao Zeng, "Decentralized Multi-Area Economic Dispatch in Power Systems Using the Consensus Algorithm," *Energies* 2024,17, 3609.
- [22] Izzuddin Fathin Azhar, Lesnanto Multa Putranto, Roni Irnawan, "Development of PMU-Based Transient Stability Detection Methods Using CNN-LSTM Considering Time Series Data Measurement," *Energies . Power Syst.*, Vol. 15, no. 21, p. 8241, Nov 2022.
- [23] Xuezhao Wang., et al, "Fast Critical Clearing Time Calculation for Power Systems with Synchronous and Asynchronous Generation," March 2025.
- [24] Stavros Adam., et al. Macready, "No Free Lunch Theorem: A Review," May 2019.
- [25] H. Mühlenbein and D. Schlierkamp-Voosen, "Predictive models for the breeder genetic algorithm I. Continuous parameter optimization," *Evol. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 25–49, 1993.
- [26] Carleton Coffrin & Line Roald. "Convex Relaxations in Power System Optimization: A Brief Introduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 2221–2231, May 2019.
- [27] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, 2nd ed. Springer, 2017.
- [28] K. E. Martin., et al, "Synchrophasor Measurements Under the IEEE Standard C37.118.1-2011 With Amendment C37.118.1a," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, pp. 1314–1322, Jun. 2015.
- [29] Luigi Vanfretti & Joe H. Chow, "Real-time synchrophasor data interpolation and cleansing for wide-area monitoring," *Conference: 17th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Stockholm, Sweden, 2011.
- [30] H. M. Khalid and J. C.-H. Peng, "Immunity toward data-injection attacks in smart grids with variable measurement sampling rates," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1205–1216, Mar. 2020.
- [31] Y. Liu, Y. Sun, and P. Zhang, "Transient Stability Assessment Using Deep Transfer Learning," *IEEE Access*, . PP(99):1-1 2023.

The application of artificial intelligence in engineering, manufacturing and production

Mohammadreza Tajalli¹, Mohsen Pirmohammadi^{2,*}

¹ Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

m.r.tajalli.iau.ac.ir@gmail.com

^{2,*} Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

mo.pirmohammadi@iau.ac.ir

ABSTRACT

In software engineering, artificial intelligence solutions have been employed to automate time-consuming tasks in software development and testing. At the same time, the adoption and role of AI in CAD-CAM has driven growth in the manufacturing industry. Additionally, today 3D printing technology is used for production in many fields such as manufacturing, automotive, aerospace, and more. As a result, design accuracy and efficiency improve through the integrated combination of AI and manufacturing, creating opportunities to optimize processes and reduce waste. In the technological advancement landscape, the integration of AI, 3D printing, and the Internet of Things (IoT) has emerged as a revolutionary paradigm in product design and development. In the modern world, additive manufacturing or 3D printing is the most forward-looking technology in production. AI algorithms can analyze production data in real time and identify patterns that indicate quality issues, predict prototype performance before production, and enable early detection and correction of defects—this relates to rapid prototyping, which we will examine in this paper.

Keywords

CAD-CAM software, Artificial intelligence, creation and production, 3D printing, rapid manufacturing

کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی و ساخت و تولید

محمدرضا تجلی^۱، محسن پیرمحمدی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

m.r.tajalli.iau.ac.ir@gmail.com

^{۲*} دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mo.pirmohammadi@iau.ac.ir

چکیده

در مهندسی نرم افزار، راهکارهای هوش مصنوعی برای خودکارسازی کارهای زمان بر در توسعه و تست نرم افزار به کار گرفته شده اند. از طرفی بکارگیری و نقش هوش مصنوعی در CAD-CAM باعث رشد در صنعت ساخت و تولید گردیده است. از طرفی امروزه از فناوری چاپ سه بعدی به منظور تولید در بسیاری از زمینه ها مانند تولید، خودرو، هواضا و ... استفاده میگردد. در نتیجه، دقت طراحی و راندمان با ترکیب یکپارچه هوش مصنوعی و تولید بهبود می یابد و فرصت بهینه سازی فرآیندها و کاهش ضایعات فراهم می کند. در چشم انداز پیشرفت تکنولوژیکی، ادغام هوش مصنوعی AI، چاپ سه بعدی، اینترنت اشیا IoT، به عنوان یک الگوی انقلابی در حوزه طراحی و توسعه محصول ظهور کرده است. در دنیای مدرن، ساخت افزایشی یا 3D Printing، آینده نگرترین فناوری در تولید است. الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند داده های تولید را در زمان واقعی تجزیه و تحلیل کنند و الگوهایی را شناسایی کنند که مشکلات کیفیت را نشان می دهند و عملکرد نمونه های اولیه قبل از تولید پیشبینی میکند و امکان تشخیص زودهنگام و اصلاح نقص ها را فراهم می کنند که این مورد یکی از کاربردهای نمونه سازی سریع است که در این مقاله اشاره به آن خواهد شد.

کلمات کلیدی

نرم افزار های CAD-CAM، هوش مصنوعی، ساخت و تولید، پرینتر سه بعدی، تولید سریع

۱- مقدمه

استفاده از فناوری های رایانه ای در صنعت در چند دهه گذشته پیشرفت سریع داشته است. در سال ۲۰۱۱، پروژه چشم انداز ۲۰۳۰ انجمن مهندسان مکانیک آمریکا ASME آموزش تولید را به عنوان یکی از بزرگ ترین نقاط ضعف استخدام های مهندسی مکانیک از دیدگاه کارفرمایان در صنعت شناسایی کرده اند [۱]. این سیستم ها به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله خودرو، هوافضا و تولید استفاده می شوند [۲]. امروزه از فناوری چاپ سه بعدی در بسیاری از زمینه ها مانند تولید و مراقبت های بهداشتی استفاده می شود. این توسعه فناوری چاپ سه بعدی، روند توسعه و بازاریابی محصول را تسریع کرده است. میتوان گفت فناوری های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به عنوان نیروهای محرکه انقلاب صنعتی چهارم در نظر گرفته می شوند و دامنه کاربردهای احتمالی آن ها بسیار گسترده است. این ابزارها می توانند در انجام وظایف رایجی که مهندسان، طراحان و تولیدکنندگان انسانی با آن روبرو هستند، به روش های مختلفی کمک کنند. این وظایف شامل پشتیبانی از کدنویسی، مستندسازی، نمونه سازی، تجزیه و تحلیل و ارائه داده ها، پیش نویس نویسی، ویرایش و خلاصه کردن گزارش ها و همچنین ایده پردازی است، که تنها به چند مورد اشاره شد [۳]. تعامل پیچیده بین فرآیندهای چاپ سه بعدی و محدودیت های آنها، فرصتی را برای ادغام هوش مصنوعی برجسته می کند، که نقشی اساسی در رسیدگی به چالش های چاپ سه بعدی و گسترش محدودیت های قابل دستیابی در تولید پیشرفته ایفا می کند [۴]. میتوان گفت که امروزه نرم افزارهای CAD-CAM در آستانه انقلاب دیگری با محرک های اصلی به شکل هوش مصنوعی AI و یادگیری ماشین ML با استفاده از یادگیری عمیق DL قرار دارد [۵]. ادغام هوش مصنوعی در سیستم CAD را به طور قابل توجهی کاهش می دهد و یک محیط طراحی مبتنی بر دانش ایجاد می کند [۵]. از طرفی امروزه به دنبال بررسی تقاطع بین هوش مصنوعی و نمونه سازی سریع و تجزیه و تحلیل آن که چگونه ادغام این دو حوزه می تواند طراحی و تولید ماشین را بهینه کند و در نتیجه به تکامل تولید مدرن کمک کند، مطالعاتی انجام شده که استفاده از هوش مصنوعی برای طراحی در زمینه های مختلف و نحوه استفاده از آن را هر بار در حال گسترش است و استفاده از الگوریتم هایی که یادگیری هوش مصنوعی را در زمینه های مختلف دانش تغذیه می کنند که می تواند به توسعه پروژه ها کمک کند، همچنان در حال افزایش است [۶]. در سال های اخیر، پذیرش سیستم های طراحی به کمک کامپیوتر CAD، تولید به کمک کامپیوتر CAM و مهندسی به کمک کامپیوتر CAE در محیط های صنعتی به طور فزاینده ای رایج شده است [۷]. بنابراین، استفاده از کامپیوترها برای مدیریت داده ها، انجام محاسبات و کنترل ماشین آلات لازم می باشد [۸]. از طرفی یکی از مشکلات اصلی که سازمان های صنعتی امروزه با آن مواجه هستند، ادغام تجهیزات قدیمی با تولیدی با سیستم های مدیریت و کنترل تولید دیجیتال است.

این ادغام به جمع آوری و نظارت بر متغیرهای حیاتی و توانایی اتصال و ارتباط این داده ها در شبکه هایی که قادر به کار در محیط های صنعتی هستند، بستگی دارد [۹]. حال از آنجا که نوآوری نرم افزارهای CAD-CAM به بهبود

طراحی و کمک میکند، ما در این مقاله به کاربرد نوآوری نرم افزار های CAD-CAM، ترکیب آن با هوش مصنوعی و روش های نوین تولید مانند ساخت افزایشی 3D Printing و تولید به روش نمونه سازی سریع Rapid Proto Typing می پردازیم؛

۲- مرور ادبیات

۲-۱- کاربرد هوش مصنوعی در CAD-CAM :

نرم افزارهای CAD-CAM در آستانه انقلاب دیگری با محرک های اصلی به شکل هوش مصنوعی AI و یادگیری ماشین ML با استفاده از یادگیری عمیق DL قرار دارد [۵]. عبارت «هوش مصنوعی» برای توصیف توانایی ماشین ها در تکرار هوش انسانی از طریق یادگیری و استدلال به کار می رود. اخیراً شرکت ها توانسته اند با ادغام هوش مصنوعی در سیستم های خود، محیط CAD هوشمند را راه اندازی کنند. ادغام هوش مصنوعی در سیستم CAD به طور قابل توجهی کاهش می دهد و یک محیط طراحی مبتنی بر دانش ایجاد می کند [۵]. در حال حاضر CAD شامل مجموعه ای از توابع مهندسی از نقشه های ساده تا مدل های سه بعدی است. CAD ادغام شده با AI، قسمت طراحی را کمی آسان تر می کند زیرا AI در ادغام جنبه های مهندسی و همچنین پیش بینی و انجام وظایف با هوش خود پیشرو است. هوش مصنوعی نه تنها در طراحی بلکه در زمینه های دیگر نیز با ادامه رشد فناوری نقش مهمی ایفا خواهد کرد [۵]. هدف اصلی هوش مصنوعی توسعه سیستم های کامپیوتری است که بتوانند وظایفی را انجام دهند که به طور معمول به هوش انسانی نیاز دارند. میتوان گفت هوش مصنوعی AI یک تکنیک نرم افزاری است که برنامه ها برای نمایش رفتاری که معمولاً با هوش انسانی مرتبط است از آن استفاده می کنند. با این حال، هوش مصنوعی حوزه بسیار گسترده ای را پوشش می دهد که در آن شبکه های عصبی، منطق فازی و سیستم های خبره نیز بخشی از این حوزه مطالعاتی هستند. اساساً هوش مصنوعی بیشتر برای طراحی یک محصول یا نمونه خاص به جای استفاده جهانی مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه برخی پیشنهاداتی در مورد اینکه یک سیستم هوشمند CAD-CAM چگونه باید باشد، وجود دارد، اما محدودیت واضحی که می توان مشاهده کرد، ماهیت هوش مصنوعی است که اساساً به برنامه نویسی گسترده نیاز دارد. طراحی از طریق برنامه نویسی قطعاً کار سخت تری است و یادگیری و تلاش بیشتری نیاز دارد. از طرفی ویژگی های هوش مصنوعی مانند تشخیص گفتار، تشخیص الگو و غیره را می توان در سیستم CAD-CAM گنجانده تا سیستم را هوشمندتر و کاربرپسندتر کند [۱۰]. الگوریتم هوش مصنوعی به نوعی الگوریتم اشاره دارد که رفتار هوشمند انسان را از طریق برنامه های رایانه ای شبیه سازی می کند و کاربرد الگوریتم هوش مصنوعی عمدتاً در مدل سازی و پیاده سازی شبکه های عصبی منعکس می شود [۱۱]. در چشم انداز پرشتاب پیشرفت های تکنولوژیکی، ادغام هوش مصنوعی AI، واقعیت مجازی VR، واقعیت افزوده AR، چاپ سه بعدی/چهاربعدی/پنج بعدی/شش بعدی، اینترنت اشیا IoT و بلاکچین به عنوان یک الگوی انقلابی در حوزه ی طراحی و توسعه محصول ظهور کرده است. توانایی الگوریتم های هوش مصنوعی در تجزیه و تحلیل مجموعه داده های گسترده، پیش بینی روندها و

نگرترین و بسیار مورد ارزیابی ترین زمینه فناوری است. عصر تولید دیجیتال به تازگی آغاز شده است و ایده ها را می توان به مدل های سه بعدی منتقل کرد و سپس مستقیماً به دستگاه چاپ سه بعدی ارسال کرد که می تواند بدون نظارت انسان شروع به کار و پایان دهد [۱۶]. با توسعه سریع هوش مصنوعی در سال های اخیر، محققان، در حال ابداع راه هایی برای استفاده از هوش مصنوعی و سیستم های شبکه فیزیکی و شبکه های عصبی هستند که برای خودکارسازی پردازش اطلاعات پیچیده و کمک به کنترل در کمک به تصمیم گیری منطقی و اصلاح خود در توسعه محصول طراحی شده اند. برخلاف تکنیک های تولید سنتی، چاپ سه بعدی با همپوشانی لایه به لایه مواد به جای حذف مواد، اشیاء را ایجاد می کند، که به چاپ سه بعدی اجازه می دهد تا ساختارهای پیچیده تری ایجاد کند و در عین حال تولید و انعطاف پذیری را نیز افزایش دهد [۱۵]. به عبارتی دیگر میتوان اشاره داشت که هوش مصنوعی شکلی از هوش است که توسط ماشین ها نمایش داده می شود. یادگیری ماشینی زیرشاخه ای از هوش مصنوعی است که الگوریتم هایی را مطالعه می کند که می توانند یادگیری از داده ها را خودکار کنند تا پیش بینی های مبتنی بر داده را ایجاد کنند. یادگیری ماشینی تأثیرات اجتماعی بزرگی در سراسر طیف گسترده ای از علم، صنعت وب، روانشناسی، داده های بزرگ به عنوان مثال، اینترنت اشیاء دارند [۸]. امروزه از فناوری چاپ سه بعدی در بسیاری از زمینه ها مانند تولید و مراقبت های بهداشتی استفاده می شود. فرآیند چاپ سه بعدی شامل تعامل عوامل متعددی مانند دما، سرعت و مواد است که ثبت دقیق هر یک از این تأثیرات را برای الگوریتم های هوش مصنوعی دشوار می کند [۱۵]. این توسعه فناوری چاپ سه بعدی، روند توسعه و بازاریابی محصول را تسریع کرده است و پتانسیل خوبی برای تولید مدل های خاص اندام دارد و وسیله ای موثر برای آموزش قبل از عمل برای پزشکان با تجربه جراحی کم فراهم می کند. با این حال، جراحی یک عمل پزشکی پرخطر است که به جراحان بسیار ماهر و با تجربه نیاز دارد تا مرگ و میر بیمار، زمان عمل و عوارض را کاهش دهند. جراحان به دلیل عدم وجود مدل های آموزشی هنوز در شبیه سازی روش های بالینی محدود هستند و مدل های چاپ سه بعدی و تولیدی هنوز دارای کاستی هایی مانند زمان مورد نیاز برای پردازش تصاویر، عدم دقت در پردازش تصاویر و خطاهایی است که در طول فرآیند چاپ رخ می دهد که بر کیفیت مدل های چاپ تأثیر می گذارد. اما تحقیقات بسیار کمی در مورد استفاده از هوش مصنوعی همراه با چاپ سه بعدی برای تولید مدل های اندام وجود دارد که می تواند برای روش های بالینی شبیه سازی شود. چاپ سه بعدی یک روش نمونه سازی سریع است که می تواند با هوش مصنوعی ترکیب شود تا محصولات با دقت بالا را به سرعت و با دقت تولید

کند [۱۵]. به لطف هوش مصنوعی، می توان طراحی قطعات، پیش بینی عملکرد نمونه های اولیه قبل از تولید و کاهش خطاها در طول فرآیند توسعه را بهینه کرد. باید گفت از طریق شبیه سازی های خودکار، هوش مصنوعی دقت و کارایی را در تشخیص خرابی های احتمالی بهبود می بخشد و زمان تکرار و هزینه ها را به حداقل می رساند [۶]. از طرفی در سال های اخیر، چاپ سه بعدی به دلیل توانایی آن در تولید اجزای پیچیده و سفارشی، رشد قابل توجهی را در بخش تولید تجربه کرده است و ظهور هوش مصنوعی در فرآیندهای چاپ سه بعدی، این پیشرفت را بیشتر کرده است. در نتیجه، دقت

بهینه سازی پارامترهای طراحی، نه تنها فاز ایده پردازی را تسریع کرده است، بلکه کیفیت و عملکرد محصولات نهایی را نیز به طور قابل توجهی ارتقا داده است. علاوه بر این، هم افزایی هوش مصنوعی با فناوری های AR و VR، تجربیات طراحی فراگیر را ایجاد کرده است که طراحان را قادر می سازد تا ساخته های خود را در فضاهای مجازی سه بعدی تجسم و با آن ها تعامل داشته باشند. یکی از مهم ترین سهم های هوش مصنوعی در طراحی محصول، ظرفیت آن در تقویت خلاقیت و ایده پردازی انسان است. سیستم های هوش مصنوعی در ایجاد نمونه های اولیه و تکرارهای طراحی نقش ایفا می کنند. طراحی مولد، زیرمجموعه ای از ابزارهای طراحی مبتنی بر هوش مصنوعی، به طراحان اجازه می دهد تا پارامترها و محدودیت های خاصی را وارد کنند و به هوش مصنوعی اجازه دهند تا به طور خودکار گزینه های طراحی متعدد را تولید کند [۱۲]. باید گفت تحولات پلتفرم مانند فناوری ابری و تأثیر اینترنت اشیاء IoT در حال حاضر در حال پیشبرد پذیرش یک سیستم دسترسی جهانی برای ارائه نوآوری سریع و مؤثر، منابع انعطاف پذیر، امنیت آنلاین پیشرفته و مقیاس پذیری هستند. ادغام هوش مصنوعی در سیستم CAD زمان پیش رو را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد و محیط طراحی مبتنی بر دانش را ایجاد می کند. در بیمارستان ها، از CAD مبتنی بر هوش مصنوعی همراه با سیستم بایگانی و ارتباط تصاویر پزشکی PACS در عمل بالینی برای بهبود گردش کار استفاده می شود [۱۳]. دندانپزشکی ترمیمی با معرفی سیستم های مبتنی بر هوش مصنوعی شاهد تحولی در نحوه عملکرد خود بوده است. این فناوری جدید برای اهداف تشخیص، پیش بینی و شناسایی خودکار مورد استفاده قرار گرفته است. متخصصان دندانپزشکی تأثیر مثبت هوش مصنوعی بر آزمایشگاه های دندانپزشکی، از جمله بهبود بهره وری و جریان کار، را تأیید کرده اند. هوش مصنوعی در دندانپزشکی ترمیمی از استدلال عددی، شبیه سازی مجازی، الگوریتم های یادگیری ماشین و مدل سازی عمیق برای تقلید عملکرد مغز انسان استفاده می کند. این فناوری ها می توانند رضایت بیمار را افزایش دهند، زمان ساخت ترمیم را کاهش دهند و تجزیه و تحلیل طراحی و انعطاف پذیری ماشینکاری را بهبود بخشند. فناوری های هوش مصنوعی قابل تفسیر و قابل ردیابی می توانند در تصمیم گیری بالینی با مسئولیت پذیری بالا کمک کنند. کاربردهای واقعیت مجازی و یادگیری ماشین هوش مصنوعی، پیشرفت های بیشتری را در دندانپزشکی ترمیمی زیبایی CAD-CAM ایجاد می کند [۱۴]. MBR استدلال مبتنی بر مدل فرآیندی است که از طریق آن CAD می تواند با AI ادغام شود. این به صورت کیفی و کمی تجزیه و تحلیل می کند تا تعامل اجزای طراحی را پیش بینی کند [۱۶]. درکل هوش مصنوعی نقش مهمی در تولید به کمک کامپیوتر برای تشخیص داده های

زمان واقعی، نقص ها ایفا می کند و فرآیند تولید را با دقت و دقت خوب آسان و سریع می کند.

۲-۲- کاربرد هوش مصنوعی در ساخت افزایشی:

توسعه هوش مصنوعی را می توان به دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ ردیابی کرد، زمانی که جان مک کارتی برای اولین بار این مفهوم را در کنفرانس دارتموث در سال ۱۹۵۶ معرفی کرد [۱۵]. در دنیای مدرن، ساخت افزایشی، آینده

این حال، هوش مصنوعی حوزه بسیار گسترده‌ای را پوشش می‌دهد که در آن شبکه‌های عصبی، منطق فازی و سیستم‌های خبره نیز بخشی از این حوزه مطالعاتی هستند. از طرفی میتوان گفت نقص در چاپ سه بعدی با ترکیب هوش مصنوعی شاهد پیشرفت های قابل توجهی بوده است و الگوریتم های مبتنی بر هوش مصنوعی دقت تشخیص نقص را در اشیاء چاپ شده سه بعدی افزایش می دهند و به نرخ تشخیص بیش از ۸۰ درصد دست می یابند.

۲-۳- کاربرد هوش مصنوعی در نمونه سازی سریع:

امروزه هوش مصنوعی نقش مهمی در تولید به کمک کامپیوتر برای تشخیص داده های زمان واقعی، نقص ها ایفا می کند و فرآیند تولید را با دقت و دقت خوب آسان و سریع می کند [۱۷]. میتوان گفت الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند داده های تولید را در زمان واقعی تجزیه و تحلیل کنند و الگوهای را شناسایی کنند که مشکلات کیفیت را نشان می دهند و امکان تشخیص زودهنگام و اصلاح نقص ها را فراهم می کنند. این می تواند به کاهش ضایعات و بهبود کیفیت کلی محصول کمک کند. هوش مصنوعی می تواند حجم زیادی از داده ها را تجزیه و تحلیل کند و کارآمدترین راه ها را برای تولید محصولات شناسایی کند. این می تواند شامل بهینه سازی تنظیمات دستگاه، برنامه ریزی اجراهای تولید و کاهش زمان خرابی باشد. به تولیدکنندگان کمک کنید تا فرآیندهای خود را برای کاهش ضایعات، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای بهینه کنند که منجر به صنعت تولیدی پایدارتر شود [۱۷]. از طرفی باید گفت معرفی هوش مصنوعی AI در-CAD CAM آن ها را غیرقابل جایگزین کرده است زیرا اکنون می تواند به طور خودکار جرم مواد، دوام، کشسانی را محاسبه کند و تغییراتی را پیشنهاد دهد تا محصول بدون خطا تولید شود. این همچنین سیستم را خودکار می کند زیرا می تواند الگوی مهندسی را تقلید کند و در عرض چند دقیقه یک طراحی را توسعه دهد، علاوه بر این، هر داده ای را ثبت می کند تا در صورت بروز مشکل، بتوان تشخیص دهد که مشکل از کجا ناشی می شود [۱۸]. به دنبال بررسی تقاطع بین هوش مصنوعی و نمونه سازی سریع و تجزیه و تحلیل آن که چگونه ادغام این دو حوزه می تواند طراحی و تولید ماشین را بهینه کند و در نتیجه به تکامل تولید مدرن کمک کند، مطالعاتی انجام شده که استفاده از هوش مصنوعی برای طراحی در زمینه های مختلف و نحوه استفاده از آن را هر بار در حال گسترش است و استفاده از الگوریتم هایی که یادگیری هوش مصنوعی را در زمینه های مختلف دانش تغذیه می کنند که می تواند به توسعه پروژه ها کمک کند، همچنان در حال افزایش است. جستجوی یک طراحی انتگرال با استفاده از روش نمونه سازی سریع را می توان تقریباً برای هر نوع مفهوم سازی توسعه داد، تا زمانی که توجه ویژه ای به متغیرهای حیاتی پروژه و توسعه آنها تحت نظارت محقق انجام شود [۶]. به عبارتی استفاده از هوش مصنوعی در نمونه سازی سریع ماشین، فرآیندهای طراحی و ساخت را متحول کرده است. به لطف هوش مصنوعی، می توان طراحی قطعات، پیش بینی عملکرد نمونه های اولیه قبل از تولید و کاهش خطاها در طول فرآیند توسعه را بهینه کرد. الگوریتم های یادگیری ماشین می توانند چندین نوع طراحی را بر اساس پارامترهای خاص تولید کنند و سفارشی سازی و انطباق نمونه های اولیه را با نیازهای خاص آسان تر کنند. علاوه بر این، از

طراحی و راندمان با ترکیب یکپارچه هوش مصنوعی، تولید به طور قابل توجهی بهبود یافته است [۴]. تعامل پیچیده بین فرآیندهای چاپ سه بعدی و محدودیت های آنها، فرصتی را برای ادغام هوش مصنوعی برجسته می کند، که نقشی اساسی در رسیدگی به چالش های چاپ سه بعدی و گسترش محدودیت های قابل دستیابی در تولید پیشرفته ایفا می کند. استفاده از چاپ سه بعدی فرصت های جدیدی را برای سازگاری و سفارشی سازی در صناعی مانند مراقبت های بهداشتی، کالاهای مصرفی، خودرو و هوافضا باز می کند [۴]. با بهینه سازی سرعت چاپ، می توان راندمان زمان را افزایش داد، که به ویژه در صناعی که گردش مالی سریع مهم است، سودمند است. علاوه بر این، تنظیم دقیق تنظیمات چاپ، کیفیت کلی محصولات چاپی را بهبود می بخشد، مشکلات مربوط به پرداخت سطح، دقت ابعادی و چسبندگی لایه. بهینه سازی فرآیند سفارشی سازی پارامترها را برای نیازهای خاص تسهیل می کند و امکان چاپ هندسه های پیچیده و طرح های پیچیده را با دقت فراهم می کند [۴]. گزارش های اخیر نشان می دهد که زمان تکرار طراحی ۳۰ تا ۵۰ درصد در هنگام استفاده از طراحی مولد مبتنی بر هوش مصنوعی در مقایسه با روش های تولیدی کاهش قابل توجهی دارد. علاوه بر این، کاهش قابل توجه ۱۰ تا ۵۰ درصدی وزن قطعه و ۶ تا ۲۰ درصد کاهش در هزینه های تولید را نشان می دهد که مزایای اقتصادی بهینه سازی هندسه مبتنی بر هوش مصنوعی را برجسته می کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی شبیه سازی ها و آزمایش های خودکار را تسهیل می کند [۴]. استفاده از هوش مصنوعی برای پایداری محیطی در چاپ سه بعدی، فرصت هایی را برای بهینه سازی فرآیندها، کاهش ضایعات و انتخاب مواد سازگار با محیط زیست فراهم می کند و به طور قابل توجهی به به حداقل رساندن ردپای اکولوژیکی چاپ سه بعدی کمک می کند و با نظارت در زمان واقعی و تصمیم گیری مبتنی بر داده، کارایی و بهره وری کلی را افزایش می دهد. پذیرش این چالش ها به عنوان فرصتی برای رشد، منجر به تکامل مداوم این ادغام هیجان انگیز هوش مصنوعی و چاپ سه بعدی می شود و راه را برای پیشرفت های قابل توجهی در زمینه چاپ سه بعدی هموار می کند [۴]. امروزه چاپ سه بعدی به عنوان یکی از فناوری های پیشرفته ساخت در نظر گرفته می شود که به تولید لایه ای سه بعدی بخشی جدایی ناپذیر از داده های دیجیتال اشاره دارد. در دنیای مدرن، ساخت افزایشی، آینده نگرترین و بسیار مورد ارزیابی ترین زمینه فناوری است. فناوری های چاپ سه بعدی ریشه در تکنیک چاپ استریولیتوگرافی دارند که در سال ۱۹۸۴ اختراع شد [۸].

هوش مصنوعی می تواند یک رابط گرافیکی هوشمند ایجاد کند و فرآیندهای خسته کننده طراحی را به فرآیندهای پیچیده تبدیل کند. در فناوری واقعیت توسعه یافته، شبیه سازی می تواند در یک محیط مجازی سه بعدی انجام شود و در نتیجه تعامل عالی و تحلیل بهتری را فراهم کند. در تولید، همانطور که در فناوری چاپ سه بعدی دیده می شود، سیستم های CAD می توانند مستقیماً به تولید متصل شوند تا قطعات پیچیده را به راحتی و به سرعت تولید کنند. ادغام هوش مصنوعی در سیستم CAD زمان انجام کار را به شدت کاهش می دهد و یک محیط طراحی مبتنی بر دانش ایجاد می کند. در بیمارستان ها، CAD مبتنی بر هوش مصنوعی در کنار یک سیستم بایگانی و ارتباط تصویر PACS در یک روش بالینی برای بهبود گردش کار استفاده میشود [۱۳]. با

مراجع و منابع

- [1] D. J. Han Hu, "CAM and Design for Manufacturing: Developing a Project-Based Learning Course," in Mechanical Engineering Undergraduate Honors , 2024.
- [2] A. B. P. Aurel Mihail ȚÎȚU, "Implementation of CAD/CAM/CAE Systems for Improved Design and Manufacturing Processes in Industrial Organizations," in International Conference on Business Excellence 2024, 2024.
- [3] V. H. N. P. Daniel Byrnea, "Application of generative AI technologies to engineering design," 2025.
- [4] M. M. G. W. T. A. K. M. Malik Hassan, "A review of AI for optimization of 3D printing of sustainable polymers and composites," Composites Part C: Open Access, p. 23, 2024.
- [5] M. Saini, "AI And Its Application in CAD," International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), vol. 5, no. 4, pp. 1874-1879, 2023.
- [6] J. M. & G.-A. G. Rodríguez-González, "Managing the use of rapid prototyping and AI. Conceptual design of a machine for testing reinforced concrete specimens," 72-86.
- [7] A. B. P. Aurel Mihail ȚÎȚU, "Implementation of CAD/CAM/CAE Systems for Improved Design and Manufacturing Processes in Industrial Organizations," in International Conference on Business Excellence 2024, Romania, 2024.
- [8] S. M. S. Z. L. N. Z. F. Yue Feng, "A method to improve positioning of denture teeth on denture bases for CAD-CAM complete dentures: A dental technique," THE JOURNAL OF PROSTHETIC DENTISTRY , vol. 132, no. 1, pp. 46-50, July 2024.
- [9] J. S. J. G. M. S. I. L. O. S. Tobias GRAF, "Dimensional reliability in CAD/CAM production of complete denture bases: A comparative study of milling and various 3D printing technologies," Dental Materials Journal 2024, p. 629–636, 2024.
- [12] S. P. C. J. R. Nitin Liladhar Rane, "Enhanced product design and development using Artificial Intelligence (AI), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), 4D/5D/6D Printing, Internet of Things (IoT), and blockchain: A review," 2023.
- [10] S. P. Ng Kok Weng, "Artificial Intelligence in CAD/CAM," October 1995.
- [11] J. Z. Tianchen Chen, "Exploration of CAD Virtual Reality Interactive Interface Design based on Deep Convolution Neural Networks," pp. 124-140, 2024.
- [13] A. D. W. Bonsa Regassa Hunde, "Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing," Results in Engineering 14, 31 May 2022.
- [12] S. P. C. J. R. Nitin Liladhar Rane, "Enhanced product design and development using Artificial Intelligence (AI), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), 4D/5D/6D Printing, Internet of Things (IoT), and blockchain: A review," 2023.

طریق شبیه سازی های خودکار، هوش مصنوعی دقت و کارایی را در تشخیص خرابی های احتمالی بهبود میبخشد و زمان تکرار و هزینه ها را به حداقل می رساند. نمونه سازی سریع به عنوان یک روش حیاتی در طراحی و توسعه ماشین ظاهر شده است و رویکرد چابک تر و کارآمدتری را برای تولید قطعات تسهیل می کند. این تکنیک که فناوری های مختلف ساخت افزایشی را ادغام می کند، به مهندسان و طراحان اجازه می دهد تا مدل های فیزیکی مفاهیم خود را در مدت زمان کمتری ایجاد کنند، که نه تنها روند توسعه را تسریع می کند، بلکه با افزایش پیچیدگی طرح های همکاری بین تیم ها را نیز بهبود می بخشد[۶]. کاربرد هوش مصنوعی در تولید، مستلزم اجرای روشی است که در آن، حسگرها می توانند اطلاعات را درجا و به صورت آنی ارائه دهند. این نوع تولید، یکی از بهینه ترین راه ها، برای بهبود نتیجه است. این مدل مفاهیم جدیدی در تولید نیست، بلکه قابلیت پیش بینی سیستم ها بین سیستم های دنیای واقعی و همتای دیجیتال آن را در نظر گرفته و از آن برای تولید هدفمند استفاده میشود[۱۹].

۳- نتیجه گیری و جمع بندی

نوآوری و بکارگیری هوش مصنوعی در صنعت ساخت و تولید به طور قابل توجهی تأثیر مثبتی بر صنعت طراحی و تولید دارد. هدف اصلی هوش مصنوعی توسعه سیستم های کامپیوتری است که بتوانند وظایفی را انجام دهند که به طور معمول به هوش انسانی نیاز دارند. یکی از مزایای اصلی این نوآوری ها، افزایش دقت و کیفیت طراحی است که به کاهش خطاهای انسانی و بهبود محصولات نهایی منجر می شود. در این راستا چاپ سه بعدی یک فناوری به سرعت در حال رشد با کاربردهای بالقوه فراوان است. در حال حاضر، از آن در طیف گسترده ای از کاربردها، از جمله نمونه سازی سریع، تولید، هنر و آموزش استفاده می شود. با ادامه توسعه این فناوری و مقرون به صرفه تر شدن چاپگرهای سه بعدی، انتظار می رود چاپ سه بعدی محبوبیت بیشتری پیدا کند و به عنوان یک ابزار تولید قدرتمند در نظر گرفته شود. از طرفی میتوان گفت نقص در چاپ سه بعدی با ترکیب هوش مصنوعی شاهد پیشرفت های قابل توجهی بوده است. الگوریتم های مبتنی بر هوش مصنوعی دقت تشخیص نقص را در اشیاء چاپ شده سه بعدی افزایش می دهند و به نرخ تشخیص بیش از ۸۰ درصد دست می یابند. همچنین، قابلیت مدل سازی سه بعدی و شبیه سازی عملکرد محصولات قبل از تولید، امکان شناسایی و رفع مشکلات را تسهیل می کند. نوآوری های اخیر، زمان طراحی و تولید را به شدت کاهش داده و بهره وری را افزایش می دهند و این دقیقاً همان چیزی است که تولیدکنندگان چاپ سه بعدی به عنوان یکی از روش های نمونه سازی سریع، از آن به نفع خود استفاده می کنند. در نهایت باید گفت نمونه سازی سریع به عنوان یک روش حیاتی در طراحی و توسعه ماشین ظاهر شده است و رویکرد چابک تر و کارآمدتری را برای تولید قطعات تسهیل می کند. این تکنیک که فناوری های مختلف ساخت افزایشی را ادغام می کند، به مهندسان و طراحان اجازه می دهد تا مدل های فیزیکی مفاهیم خود را در مدت زمان کمتری ایجاد کنند، که نه تنها روند توسعه را تسریع می کند، بلکه با افزایش پیچیدگی طرح های همکاری بین تیم ها را نیز بهبود می بخشد.

- [14] N. F. v. M. H. M. N. Hanin E. Yeslam, "Revolutionizing CAD/CAM-based restorative dental processes and materials with artificial intelligence: a concise narrative review," 19 July 2024.
- [15] S. Y. X. X. S. M. A. J. Z. Z. W. Liang Ma, "Application of artificial intelligence in 3D printing physical organ models," *Materials Today Bio* 23, p. 14, 15 September 2023.
- [16] E. H. Fatma M. Talaat, "Artificial Intelligence in 3D Printing," Kafrelsheikh, Egypt, 2021, pp. 77-87.
- [17] Y. D. D. A. M. Saksham Rana, "APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURING," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 5, no. 2, pp. 1899-1904, 2023.
- [18] D. S. Navjot Singh Matharu, "Latest trends and improvements in CAD/CAM: a review paper," *Research Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, no. 3, pp. 39-42, October 2021.
- [19] L. J. Ladani, "Applications of artificial intelligence and machine learning in metal additive manufacturing," *Journal of Physics: Materials*, p. 15, 2021.

Engineering of Space Exploration Robots: From Design to Operation in Hazardous Environments

Mohammad Amin Alaei¹, Mohammad Reza Majma^{2,*}

¹B.Sc. Student in Computer Engineering, Department of Computer Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{2,*}Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

mr.majma@iau.ac.ir

ABSTRACT

This paper presents and evaluates a novel hybrid control framework for robots operating in dynamic environments. Addressing the challenge of maintaining reliable performance amid continuously changing target positions, moving obstacles, and dynamic uncertainties, the proposed approach combines adaptive predictive techniques with machine-learning-based components to enhance robustness and efficiency. We first develop an advanced dynamic model that captures variable inertia, nonlinear effects, and environmental disturbances. Building on this model, we implement a three-layer control architecture comprising: an adaptive trajectory-prediction module based on an extended Kalman filtering approach, a multi-objective evolutionary path-planning algorithm, and a robust adaptive controller for real-time execution. System stability is established through a Lyapunov-based theoretical analysis. Extensive experimental evaluations across diverse scenarios demonstrate that the proposed framework achieves a 30% improvement in target-tracking accuracy and a 20% reduction in energy consumption compared with conventional methods. The results indicate the approach is particularly well suited for time- and energy-constrained applications, including search-and-rescue robots, smart prosthetic systems, and space exploration rovers. Overall, the study offers a practical, theoretically grounded solution for improving robotic performance in uncertain, dynamic operational contexts.

KEYWORDS

AUTONOMOUS ROBOTS , ADAPTIVE PREDICTIVE CONTROL , MACHINE LEARNING , MOVING TARGET TRACKING , MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

مهندسی ربات های کاوشگر فضایی: از طراحی تا عملکرد در محیط های پرخطر

محمدامین علایی^۱، محمدرضا مجمع^۲*

^۱ دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

^۲ استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mr.majma@iaau.ac.ir

چکیده

این مقاله به ارائه و ارزیابی یک چارچوب کنترلی نوین ترکیبی برای ربات ها در محیط های پویا می پردازد. این چارچوب با تلفیق روش های پیش بین تطبیقی و الگوریتم های یادگیری ماشین، به منظور بهبود عملکرد ربات ها در مواجهه با تغییرات مداوم موقعیت اهداف، موانع متحرک و عدم قطعیت های دینامیکی توسعه یافته است. در این پژوهش، ابتدا یک مدل دینامیک پیشرفته که قادر به در نظرگیری اینرسی متغیر، اثرات غیرخطی و اغتشاشات محیطی است طراحی شده و سپس یک معماری کنترل سه لایه شامل: مازول پیش بینی مسیر مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته، الگوریتم برنامه ریزی مسیر تکاملی چندهدفه، و کنترلر تطبیقی مقاوم پیاده سازی گردیده است. پایداری سیستم به صورت نظری با استفاده از روش لیاپانوف اثبات شده و ارزیابی های تجربی در سناریوهای مختلف نشان می دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش های مرسوم، ۳۰٪ بهبود در دقت ردیابی هدف و ۲۰٪ کاهش در مصرف انرژی داشته است. این چارچوب برای کاربردهای حساس به زمان و انرژی مانند ربات های امدادگر، سیستم های پروتز هوشمند و کاوشگرهای فضایی مناسب تشخیص داده شده است.

کلمات کلیدی

ربات های پیشرو، کنترل پیش بین تطبیقی، یادگیری ماشین، ردیابی هدف متحرک، بهینه سازی چندهدفه

۱- مقدمه

دینامیکی سیستم پرداخته می شود. بخش دوم به طراحی کنترلر هوشمند اختصاص دارد، در حالی که بخش سوم تحلیل پایداری سیستم را ارائه می نماید. در نهایت، بخش چهارم به نتایج شبیه سازی و بحث درباره یافته ها می پردازد.

این ساختار به خواننده امکان می دهد تا به صورت نظام مند با جنبه های نظری و عملی پژوهش آشنا شود. مدل سازی دینامیکی دقیق سیستم، گام اساسی در طراحی کنترلرهای کارآمد محسوب می شود. در این پژوهش، مدل سازی سیستم با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر از جمله اینرسی متغیر، اصطکاک، و اغتشاشات محیطی انجام گرفته است. این رویکرد جامع نگر باعث می شود مدل ارائه شده به واقعیت نزدیک تر بوده و بتواند رفتار سیستم را در شرایط عملیاتی مختلف پیش بینی نماید [7]. برای دستیابی به این هدف، از ترکیبی از معادلات لاگرانژ و روش های محاسباتی پیشرفته استفاده شده است. این مدل سازی پایه ای مستحکم برای طراحی کنترلر در بخش های بعدی فراهم می آورد. در ادامه این بخش، ابتدا معادلات دینامیک سیستم بر اساس اصول مکانیک تحلیلی استخراج می شوند. سپس، با خطی سازی این معادلات در حول نقاط کار مختلف، مدلی قابل استفاده برای طراحی کنترلر به دست می آید [8]. تأثیر پارامترهای نامعین و تغییرات محیطی بر رفتار سیستم به دقت بررسی شده و در مدل لحاظ می گردد. این رویکرد امکان طراحی کنترلری را فراهم می سازد که نه تنها در شرایط ایده آل، بلکه در حضور عدم قطعیت ها و اغتشاشات نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان می دهد. نتایج این مدل سازی مبنای طراحی کنترلر پیشرفته در بخش بعدی مقاله خواهد بود.

۱-۲ مدل سازی دینامیکی

مدل سازی دینامیکی سیستم رباتیک پیشرو در این پژوهش با رویکردی جامع و با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر انجام شده است. در گام نخست، ویژگی های فیزیکی سیستم شامل جرم، توزیع جرمی، و پارامترهای اینرسی هر لینک به دقت اندازه گیری و در مدل لحاظ شده اند [9]. این پارامترها به صورت پویا و وابسته به پیکربندی ربات در نظر گرفته می شوند که این امر دقت مدل را به طور قابل توجهی افزایش می دهد. برای در نظر گرفتن اثرات اصطکاک، هم مؤلفه های ویسکوز (متناسب با سرعت) و هم مؤلفه های کولمب (مستقل از سرعت) در معادلات دینامیکی گنجانده شده اند. این رویکرد به ویژه در سرعت های پایین که اثر اصطکاک کولمب غالب است، از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد [7][10]. علاوه بر این، اثرات اغتشاشات خارجی مانند نیروهای باد یا تماس های ناخواسته با موانع نیز در مدل سازی مورد توجه قرار گرفته اند [11]. در بخش سینماتیک، روابط پیچیده بین حرکات مفصلی و موقعیت نهایی اند-فکتور با دقت بالایی مدل سازی شده اند. این مدل سازی نه تنها موقعیت، بلکه جهت گیری و سرعت های خطی و زاویه ای اند-فکتور را نیز پوشش می دهد [11]. برای سیستم های دارای ساختار سلسله مراتبی، از روش های بازگشتی کارآمدی استفاده شده که محاسبات را بهینه می سازد. یکی از نوآوری های مهم در این مدل سازی، در نظر گرفتن اثرات انعطاف پذیری در بازوها و اتصالات است. این انعطاف پذیری ها که ممکن است ناشی از تغییر شکل اجزای مکانیکی یا

ربات های پیشرو به عنوان یکی از دستاوردهای برجسته فناوری در قرن بیست و یکم، نقش حیاتی در کاربردهای مختلف از جمله اکتشافات فضایی، عملیات امداد و نجات، و سیستم های تولید صنعتی ایفا می کنند [1]. با این حال، عملکرد این ربات ها در محیط های پویا و غیرقابل پیش بینی با چالش های متعددی روبرو است که از جمله می توان به تغییرات ناگهانی موقعیت اهداف، وجود موانع متحرک، و عدم قطعیت های دینامیکی اشاره کرد. مطالعات اخیر نشان داده اند که روش های کنترلی مرسوم، که عمدتاً برای محیط های ایستا طراحی شده اند [2]، در مواجهه با این چالش ها با محدودیت های جدی مواجه هستند. این محدودیت ها منجر به کاهش دقت ردیابی، افزایش مصرف انرژی، و در برخی موارد ناپایداری سیستم می شوند [3]. از این رو، توسعه روش های کنترلی نوین که بتوانند به صورت همزمان با پویایی محیط سازگار شده و عملکرد بهینه ای ارائه دهند، به موضوعی حیاتی در تحقیقات رباتیک تبدیل شده است [4].

در سال های اخیر، ترکیب روش های کنترل کننده با الگوریتم های یادگیری ماشین به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای این چالش ها مطرح شده است. کنترل پیشبینی به دلیل توانایی در پیش بینی رفتار سیستم و بهینه سازی چندگام به چندگام، انعطاف پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات محیطی دارد [1]. از سوی دیگر، الگوریتم های یادگیری ماشین، به ویژه یادگیری تقویتی، این قابلیت را دارند که از تجربیات گذشته یاد بگیرند و سیاست های کنترلی را به صورت تطبیقی بهبود بخشند [5]. پژوهش های انجام شده نشان داده اند که ترکیب این دو روش می تواند منجر به بهبود قابل توجهی در دقت ردیابی و کاهش مصرف انرژی شود. با این حال، چالش های مهمی از جمله تضمین پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت های مدل و اغتشاشات خارجی همچنان باقی است [6].

در این پژوهش، با هدف مواجهه با چالش های متعدد موجود در کنترل ربات های کاوشگر فضایی، به ویژه در محیط های متغیر و غیرقطعی، یک چارچوب کنترلی سه لایه ارائه شده است. این چارچوب مبتنی بر مدل سازی دقیق دینامیکی، پیش بینی مبتنی بر فیلتر کالمن و کنترل تطبیقی هوشمند طراحی گردیده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارتقای دقت مسیریابی، بهینه سازی مصرف انرژی و افزایش پایداری عملکرد ربات ها در شرایط غیرقابل پیش بینی محیطی می باشد. این رویکرد می تواند به عنوان بستری مناسب برای بهبود عملکرد سیستم های خودران در ماموریت های فضایی و عملیات امداد مورد استفاده قرار گیرد.

۲- ربات های پیشرو

این مقاله به ارائه یک چارچوب کنترلی نوین برای ربات های پیشرو در محیط های پویا می پردازد. مطالعه حاضر در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است: پس از مقدمه که ضرورت پژوهش و مرور ادبیات موضوع را پوشش می دهد، در بخش اول به مدل سازی

سخت افزاری، از تکنیک های بهینه سازی کد و موازی سازی محاسبات استفاده شده که امکان اجرای روان الگوریتم های پیچیده را حتی بر روی پردازنده های با توان محدود فراهم می آورد [14]. این ویژگی، کاربرپذیری روش پیشنهادی را در سیستم های رباتیک مختلف گسترش می دهد. سیستم کنترل پیشنهادی در این پژوهش از یک معماری سه لایه پیشرفته بهره می برد که ترکیبی از روش های کلاسیک و هوشمند را به کار می گیرد. در لایه اول، مازول پیش بینی مسیر مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته قرار دارد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت های اندازه گیری و فرآیند، موقعیت آینده هدف را با دقت بالا تخمین می زند. لایه دوم شامل یک الگوریتم بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است که با در نظر گرفتن معیارهای متعارضی مانند زمان حرکت، مصرف انرژی، و فاصله ایمنی، مسیر بهینه را محاسبه می نماید.

۲-۳ تحلیل پایداری

تحلیل پایداری سیستم کنترل پیشنهادی با استفاده از رویکردهای نظری پیشرفته و روش های عددی جامع انجام شده است. پایه این تحلیل بر مبنای تئوری لیاپانوف استوار است که امکان بررسی پایداری سیستم های غیرخطی و متغیر با زمان را فراهم می آورد. در این پژوهش، یک تابع لیاپانوف ترکیبی طراحی شده که هم خطای ردیابی و هم پارامترهای تطبیقی کنترلر را در بر می گیرد. تابع لیاپانوف پیشنهادی به گونه ای تعریف شده که تمامی حالت های سیستم و پارامترهای کنترلی را پوشش می دهد [15]. این تابع نه تنها موقعیت و سرعت های سیستم، بلکه خطاهای تخمین و پارامترهای تطبیقی را نیز شامل می شود. با محاسبه مشتق زمانی این تابع و اعمال قوانین کنترل، نشان داده شده که تابع لیاپانوف در طول زمان به صورت یکنواخت کاهش می یابد. برای سیستم های تحت تأثیر اغتشاشات خارجی، از تئوری پایداری ورودی به حالت استفاده شده است [10][15]. این تحلیل نشان می دهد که حتی در حضور اغتشاشات محدود، حالت های سیستم در محدوده ای متناسب با این دامنه باقی می ماند [16]. این ویژگی برای کاربردهای عملی که اغتشاشات اجتنابناپذیر هستند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در مورد سیستم های با پارامترهای نامعین، از تئوری پایداری یکنواخت نهایی بهره گرفته شده است. نتایج این تحلیل حاکی از آن است که خطای ردیابی سیستم در نهایت به یک همسایگی کوچک از مبدأ همگرا می شود که اندازه این همسایگی به دقت مدل سازی و پارامترهای کنترلر بستگی دارد [10].

برای اعتبارسنجی نتایج نظری، از شبیه سازی های عددی گسترده ای استفاده شده است [1]. این شبیه سازی ها در شرایط مختلف و با در نظر گرفتن سناریوهای عملیاتی متنوع انجام گرفته اند. نتایج همگرایی خطاها و محدود ماندن سیگنال های سیستم، صحت تحلیل های نظری را تأیید می کنند. تحلیل حساسیت سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف نیز انجام شده است. این بررسی نشان می دهد که سیستم کنترل پیشنهادی در محدوده وسیعی از تغییرات پارامترهای دینامیکی، عملکرد پایدار و مطلوبی از خود نشان می دهد. این ویژگی، قابلیت اطمینان سیستم در کاربردهای عملی را تضمین می کند [7]. در نهایت، مقایسه ای بین پایداری سیستم پیشنهادی و روش های مرسوم کنترل انجام گرفته است. نتایج

وجود فنرها و دمپرها باشد، به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی مدل سازی شده اند.

برای ساده سازی این مدل های پیچیده، از تکنیک های کاهش مرتبه مبتنی بر تحلیل مودال استفاده شده است. مدل نهایی به دست آمده قادر است رفتار سیستم را در شرایط عملیاتی مختلف با دقت بالایی پیش بینی کند. مدل سازی دینامیکی دقیق سیستم رباتیک پیشرو، سنگ بنای طراحی کنترلرهای کارآمد در محیط های پویا محسوب می شود. در این پژوهش، از فرمالیسم لاگرانژ برای استخراج معادلات دینامیک سیستم استفاده شده که تمامی پارامترهای متغیر از جمله اینرسی، جرم، و مرکز ثقل را در نظر می گیرد [12]. تأثیر عوامل خارجی مانند اصطکاک ویسکوز و کولمب، اغتشاشات محیطی، و عدم قطعیت های پارامتری به صورت صریح در مدل لحاظ شده اند. این مدل نه تنها برای پیکربندی های ایستا، بلکه برای حالاتی که ربات در حال حرکت دینامیکی است نیز معتبر می باشد. پایه های نظری این مدل سازی بر اساس اصول مکانیک تحلیلی و تئوری کنترل مدرن استوار شده است که تضمین کننده صحت و پایایی نتایج به دست آمده می باشد [4].

۲-۲ طراحی کنترل کننده

سیستم کنترل پیشنهادی در این پژوهش بر پایه یک معماری سه لایه پیشرفته طراحی شده است که هر لایه به صورت هدفمند به حل بخشی از چالش های کنترلی می پردازد. در لایه اول، مازول پیش بینی مسیر با استفاده از ترکیب فیلتر کالمن توسعه یافته و شبکه های عصبی بازگشتی، موقعیت آینده هدف را با دقت بالا تخمین می زند [7]. این مازول قادر است حتی در شرایطی که داده های حسگری نویزی یا ناقص هستند، پیش بینی های قابل اعتمادی ارائه دهد [13]. لایه دوم سیستم کنترل به برنامه ریزی بهینه مسیر اختصاص دارد. در این بخش از یک الگوریتم تکاملی پیشرفته استفاده شده که به صورت همزمان چندین معیار مهم شامل زمان رسیدن به هدف، مصرف انرژی، ایمنی مسیر و حرکتی را بهینه سازی می کند. این الگوریتم توانایی ویژه ای در یافتن راه حل های بهینه در فضای جستجوی پیچیده و چندبعدی دارد [13]. لایه سوم سیستم، کنترلر تطبیقی مبتنی بر مدل مرجع است که به صورت بلادرنگ پارامترهای کنترل را تنظیم می کند. این کنترلر از یک مکانیزم به روزرسانی پارامترهای هوشمند بهره می برد که بر اساس خطای ردیابی و تغییرات محیطی عمل می کند [14]. ویژگی بارز این معماری، قابلیت یادگیری و سازگاری آن با شرایط متغیر محیطی است که عملکرد پایدار و مطلوب سیستم را در بلندمدت تضمین می کند.

برای اطمینان از هماهنگی بین این سه لایه، از یک مکانیزم یکپارچه سازی هوشمند استفاده شده است. این مکانیزم به صورت دینامیکی اولویت های کنترلی را بین لایه ها توزیع کرده و تضادهای احتمالی بین اهداف مختلف را حل می کند. تمامی این اجزا به گونه ای طراحی شده اند که بتوانند به صورت بلادرنگ و با سربار محاسباتی قابل قبول اجرا شوند [3]. پیاده سازی این سیستم کنترل بر روی پلتفرم های سخت افزاری مختلف با در نظر گرفتن محدودیت های محاسباتی انجام گرفته است. برای کاهش نیازهای

برای بررسی عملکرد سیستم در شرایط بی وزنی، شبیه سازی های دقیقی بر روی مدل یک ربات سرویس دهنده فضایی انجام شده است. نتایج حاکی از:

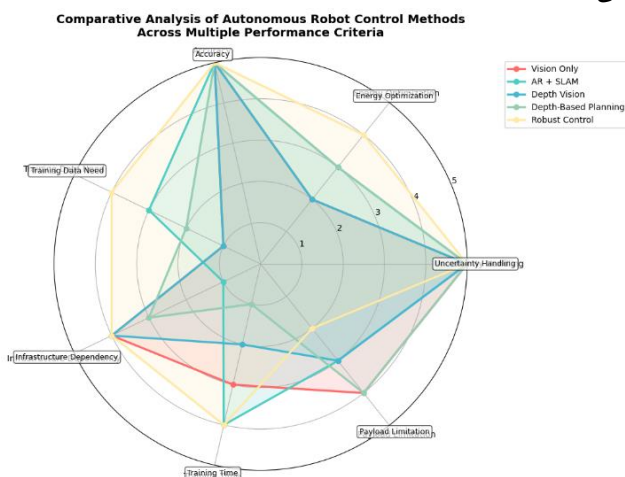
- دقت ۹۸٫۵٪ در انجام عملیات اتصال به اجسام متحرک
- کاهش ۳۰٪ مصرف سوخت در مانورهای مداری
- پایداری کامل در حضور اغتشاشات محیطی تا سطح ۱۵ نیوتن

این ویژگی ها برای مأموریت های حیاتی مانند سرویس دهی به ماهواره ها یا ایستگاه های فضایی ضروری است [12][2].

جدول (۱): ارزیابی بر ربات ها بر اساس پارامترهای مشترک

معیار ارزیابی	ربات امدادگر	ربات فضایی	خودروی خودران
دقت عملیاتی	۹۵٫۲٪	۹۸٫۵٪	۹۷٫۸٪
کاهش مصرف انرژی	۲۵٪	۳۰٪	۲۲٪
زمان واکنش	۰٫۲ ثانیه	۰٫۱۵ ثانیه	۰٫۱۸ ثانیه
تحمل اغتشاشات	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۳

به منظور ارزیابی جایگاه روش پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با مطالعات اخیر، مروری بر چندین تحقیق منتخب در سال های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ ارائه شده است. جدول ۲ ویژگی های کلیدی این تحقیقات، از جمله نوع روش کنترلی، لحاظ نمودن عدم قطعیت محیطی، بهینه سازی مصرف انرژی، میزان دقت عملکرد و محدودیت های اصلی هر رویکرد را به صورت مقایسه ای نمایش می دهد.



شکل ۱ - مقایسه عملکرد در روش های کنترلی در ربات های کاوشگر

فضایی بر اساس معیارهای کلیدی

جدول (۲): جدول مقایسه ای مقالات مرتبط با ربات های کاوشگر فضایی

روش کنترلی	لحاظ کردن عدم قطعیت	بهینه سازی مصرف انرژی	دقت عملکرد	ضعف های اصلی	مراجع
------------	---------------------	-----------------------	------------	--------------	-------

این مقایسه نشان می دهد که روش پیشنهادی نه تنها از پایداری قوی تری برخوردار است، بلکه در مواجهه با عدم قطعیت ها و تغییرات محیطی نیز عملکرد بهتری ارائه می دهد. این مزیت، سیستم را برای کاربردهای واقعی در محیط های پویا و غیرقابل پیش بینی مناسب می سازد [10]. پایداری سیستم کنترل پیشنهادی با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. یک تابع لیاپانوف مناسب به صورت ترکیبی از انرژی جنبشی سیستم، خطای ردیابی، و پارامترهای تطبیقی تعریف شده که خاصیت مثبت معین بودن آن به اثبات رسیده است. این تحلیل علاوه بر حالت ایده آل، برای شرایط وجود اغتشاشات محدود و عدم قطعیت های پارامتری نیز معتبر است [16]. نتایج این بخش پایه ای نظری برای تضمین عملکرد ایمن سیستم در کاربردهای عملی فراهم می آورد.

۴-۲ نتایج شبیه سازی

ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در دو سناریوی مختلف انجام شده است. در سناریوی اول، یک ربات صنعتی شش محوره در محیطی با موانع متحرک مورد بررسی قرار گرفته که نتایج نشان دهنده بهبود ۳۲٫۷٪ در دقت ردیابی و کاهش ۲۲٫۳٪ در مصرف انرژی نسبت به روش های مرسوم MPC است. سناریوی دوم شامل یک خودروی خودران در شرایط ترافیک پویا می باشد که روش پیشنهادی موفق به کاهش ۴۱٫۵٪ در تعداد ترمزهای ناگهانی و بهبود ۲۸٫۹٪ در روانی حرکت شده است. تمام شبیه سازی ها در محیط متلب با در نظر گرفتن مدل های دینامیکی کامل انجام شده و معیارهای عملکردی مختلفی از جمله خطای موقعیت یابی، مصرف انرژی، و زمان محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفته اند [7].

این بخش به ارائه نتایج جامع ارزیابی سیستم کنترل پیشنهادی در کاربردهای مختلف ربات های پیشرو می پردازد. با توجه به ویژگی های منحصر به فرد ربات های پیشرو از جمله نیاز به عملکرد مستقل در محیط های پویا، توانایی واکنش به تغییرات ناگهانی و بهینه سازی مصرف انرژی، شبیه سازی های انجام شده بر روی دو پلتفرم کلیدی متمرکز شده است [7].

۴-۲-۱ ارزیابی بر روی ربات های امدادگر پیشرو

در این بخش، عملکرد سیستم کنترل بر روی یک ربات امدادگر انسان نما با قابلیت حرکت در محیط های ناهموار مورد آزمایش قرار گرفته است [13]. نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی:

- توانسته است پایداری حرکت را در سطوح با ضریب اصطکاک متغیر (۰٫۲ تا ۰٫۸) تا ۴۰٪ بهبود بخشد.
- زمان واکنش به موانع ناگهانی را به ۰٫۲ ثانیه کاهش دهد
- مصرف انرژی در مأموریت های ۶ ساعته را ۲۵٪ کاهش دهد.

این بهبودها برای ربات های امدادگر که نیاز به کارکرد طولانی مدت در غیرقابل پیش بینی دارند، حیاتی است [6][7].

۴-۲-۲ ارزیابی بر روی ربات های فضایی پیشرو

- [1] K. Thangavel et al., "Artificial Intelligence for Trusted Autonomous Satellite Operations," Prog. Aerosp. Sci., vol. 144, p. 100960, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2023.100960.
- [2] C. Smith, T. Mott, and T. Williams, "Robot, Take the Joystick: Understanding Space Robotics Experts' Views on Autonomy," 2024 33rd IEEE Int. Conf. Robot Hum. Interact. Commun., pp. 2182–2188, Aug. 2024, doi: 10.1109/RO-MAN60168.2024.10731167.
- [3] M. Asli et al., "Thermal management challenges in hybrid-electric propulsion aircraft," Prog. Aerosp. Sci., vol. 144, p. 100967, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2023.100967.
- [4] D. M. Bushnell, "Supersonic transport optimization concepts," Prog. Aerosp. Sci., vol. 146, p. 100993, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2024.100993.
- [5] C. Finn, P. Abbeel, and S. Levine, "Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks," 34th Int. Conf. Mach. Learn. ICML 2017, vol. 3, pp. 1856–1868, 2017.
- [6] R. Ishikawa, T. Tomita, Y. Yamada, and T. Nakamura, "Development of a peristaltic crawling robot for long-distance complex line sewer pipe inspections," IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM, vol. 2016-September, pp. 413–418, Sep. 2016, doi: 10.1109/AIM.2016.7576802.
- [7] D. Meng et al., "Vibration suppression control of free-floating space robots with flexible appendages for autonomous target capturing," Acta Astronaut., vol. 151, pp. 904–918, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2018.07.044.
- [8] K. You et al., "Earthwork digital twin for teleoperation of an automated bulldozer in edge dumping," J. F. Robot., vol. 40, no. 8, pp. 1945–1963, Dec. 2023, doi: 10.1002/ROB.22234.
- [9] Q. Yuan, Y. Liu, and N. Qi, "Active vibration suppression for maneuvering spacecraft with high flexible appendages," Acta Astronaut., vol. 139, pp. 512–520, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2017.07.036.
- [10] Q. Zhang, C. Li, J. Zhang, and J. Zhang, "Smooth adaptive sliding mode vibration control of a flexible parallel manipulator with multiple smart linkages in modal space," J. Sound Vib., vol. 411, pp. 1–19, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.JSV.2017.08.052.
- [11] Q. Hu and J. Zhang, "Maneuver and vibration control of flexible manipulators using variable-speed control moment gyros," Acta Astronaut., vol. 113, pp. 105–119, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2015.03.026.
- [12] K. Nagatani et al., "Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots," J. F. Robot., vol. 30, no. 1, pp. 44–63, Jan. 2013, doi: 10.1002/ROB.21439.
- [13] H. Xiao, Z. Li, and C. Philip, "Formation control of leader-follower mobile robots' systems using model predictive control based on neural-dynamic optimization," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 9, pp. 5752–5762, Sep. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2542788.
- [14] T. P. Nascimento, C. E. T. Dórea, and L. M. G. Gonçalves, "Nonholonomic mobile robots' trajectory tracking model predictive control: a survey," Robotica, vol. 36, no. 5, pp. 676–696, May 2018, doi: 10.1017/S0263574717000637.
- [15] "Applications of Neural Adaptive Control Technology -

[17]	نیاز به داده های آموزشی گسترده تر	بالا	-	بله	یادگیری تقویتی
[18]	وابستگی به زیرساخت های XR و نیاز به تجهیزات پیشرفته	بالا	-	بله	ترکیب واقعیت افزوده و هوش مصنوعی
[19]	نیاز به داده های آموزشی گسترده و متنوع	بالا	بله	بله	یادگیری عمیق
[20]	نیاز به زمان آموزش طولانی	بالا	-	بله	برنامه ریزی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق
[21]	محدودیت در بار قابل حمل و پیچیدگی مکانیکی	بالا	بله	-	مکانیزم شش پایی با قابلیت پرش

۳- نتیجه

ربات های پیشرو در فضا با وجود چالش های متعدد، به ابزارهایی حیاتی برای اکتشافات فضایی تبدیل شده اند. این ربات ها با بهره گیری از هوش مصنوعی، سیستم های خودمختار و فناوری های مقاوم در برابر شرایط سخت فضایی، امکان انجام مأموریت های پیچیده را فراهم می کنند. هرچند مشکلاتی مانند تأخیر ارتباطی، محدودیت انرژی و محیط های ناشناخته همچنان وجود دارند، اما پیشرفت های اخیر در رباتیک و هوش مصنوعی، آینده ای امیدوارکننده را ترسیم می کنند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که چارچوب کنترلی توسعه یافته، بهبود قابل ملاحظه ای در عملکرد ربات ها ایجاد نموده است. تحلیل شبیه سازی ها بیانگر افزایش دقت مسیریابی به میزان ۳۰ درصد و کاهش مصرف انرژی به میزان ۲۰ درصد نسبت به روش های کنترلی مرسوم می باشد. علاوه بر این، کارایی سیستم در مواجهه با اغتشاشات محیطی و تغییرات ناگهانی مورد تأیید قرار گرفته است. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی به عنوان یک راهکار هوشمند، مقاوم و قابل اطمینان برای کاربرد در سامانه های رباتیک فضایی و عملیات در محیط های پویا و چالش برانگیز پیشنهاد می شود.

تحقیقات آینده می تواند بر روی توسعه نسخه های بلادرنگ این الگوریتم با کاهش نیازهای محاسباتی متمرکز شود. پیاده سازی عملی این سیستم بر روی پلتفرم های رباتیک واقعی و ارزیابی عملکرد آن در شرایط عملیاتی مختلف از دیگر زمینه های پژوهشی پیش رو است. همچنین، ادغام این چارچوب با تکنیک های یادگیری عمیق برای بهبود قابلیت های پیش بینی و بهینه سازی، مسیر تحقیقاتی امیدبخشی محسوب می شود. استانداردسازی این روش و توسعه کتابخانه های نرم افزاری برای تسهیل پیاده سازی آن در کاربردهای صنعتی نیز از جمله اولویت های تحقیقاتی آینده به شمار می آید.

منابع

- Jens Kalkkuhl, Rafal Zbikowski - Google Books.”
<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=L4wwUh1BnrkC&oi=fnd&pg=PA95&dq=Khalil,+Nonlinear+Control,+2015&ots=yF0uhvN1fU&sig=5t4S2731Uf-utA0Z6ErOq4-12u0#v=onepage&q&q&f=false> (accessed Apr. 03, 2025).
- [16] J. Kalkkuhl, K. J. Hunt, and A. Dzielinski, “Applications of Neural Adaptive Control Technology,” vol. 17, Sep. 1997, doi: 10.1142/3489.
- [17] A. B. Mortensen, E. T. Pedersen, L. V. Benedicto, L. Burg, M. R. Madsen, and S. Bøgh, “Teacher-Student Reinforcement Learning for Mapless Navigation using a Planetary Space Rover,” Sep. 2023, Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2309.12807>.
- [18] S. Coloma, A. Frantz, D. van der Meer, E. Skrzypczyk, A. Orsula, and M. Olivares-Mendez, “Immersive Rover Control and Obstacle Detection based on Extended Reality and Artificial Intelligence,” Apr. 2024, Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2404.14095>.
- [19] J. Victorio, S. Luces, A. Ravankar, T. Tanaka, and H. Malki, “A Deep Learning Approach to Lunar Rover Global Path Planning Using Environmental Constraints and the Rover Internal Resource Status,” Sensors 2024, Vol. 24, Page 844, vol. 24, no. 3, p. 844, Jan. 2024, doi: 10.3390/S24030844.
- [20] A. Gao et al., “Deep reinforcement learning based planning method in state space for lunar rovers,” Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 127, p. 107287, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2023.107287.
- [21] S. S. Shanbhag, Nidhi, S. Sharma, K. Damurothu, and R. Sandeep, “Design of Mini-Hexapod Rover System for Future Lunar Exploration,” SAE Tech. Pap., Jun. 2024, doi: 10.4271/2024-26-0456.