

مدل سازی و پیش بینی تولید برق سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی با ذخیره هیدروژنی با استفاده از یادگیری عمیق

سیدامیرحسین محمودی^۱

^۱ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی.

نام نویسنده مسئول:

سیدامیرحسین محمودی

amir.mahmoudi.2025.2024@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

چکیده

این پژوهش به بررسی و تحلیل عملکرد یک مدل یادگیری عمیق در پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی می‌پردازد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی پایدار و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی، تولید هیدروژن به عنوان یک سوخت پاک و تجدیدپذیر اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. در این مطالعه، داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورهای جوی و انرژی به منظور آموزش و ارزیابی مدل یادگیری عمیق استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر به پیش‌بینی دقیق تولید هیدروژن در شرایط مختلف جوی است، هرچند در برخی موارد انحرافات مشاهد شده. محدودیت‌های پژوهش شامل کیفیت داده‌ها، انتخاب مدل، و تأثیر متغیرهای محیطی و اجتماعی بر تولید هیدروژن می‌باشد. در نهایت، پیشنهاداتی برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و استفاده مؤثرتر از منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: یادگیری عمیق، تولید هیدروژن، سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی، انرژی تجدیدپذیر.

مقدمه

در دنیای امروز، چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، اهمیت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را دوچندان کرده است. سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی به عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای تولید انرژی، توانسته‌اند نظر بسیاری از محققان و سیاست‌گذاران را به خود جلب کنند. این سیستم‌ها با ترکیب دو منبع انرژی تجدیدپذیر، یعنی انرژی باد و انرژی خورشیدی، امکان تولید انرژی در شرایط مختلف جوی را فراهم می‌کنند. این قابلیت به ویژه در مناطقی که دارای شرایط جوی متغیر هستند، بسیار حائز اهمیت است.

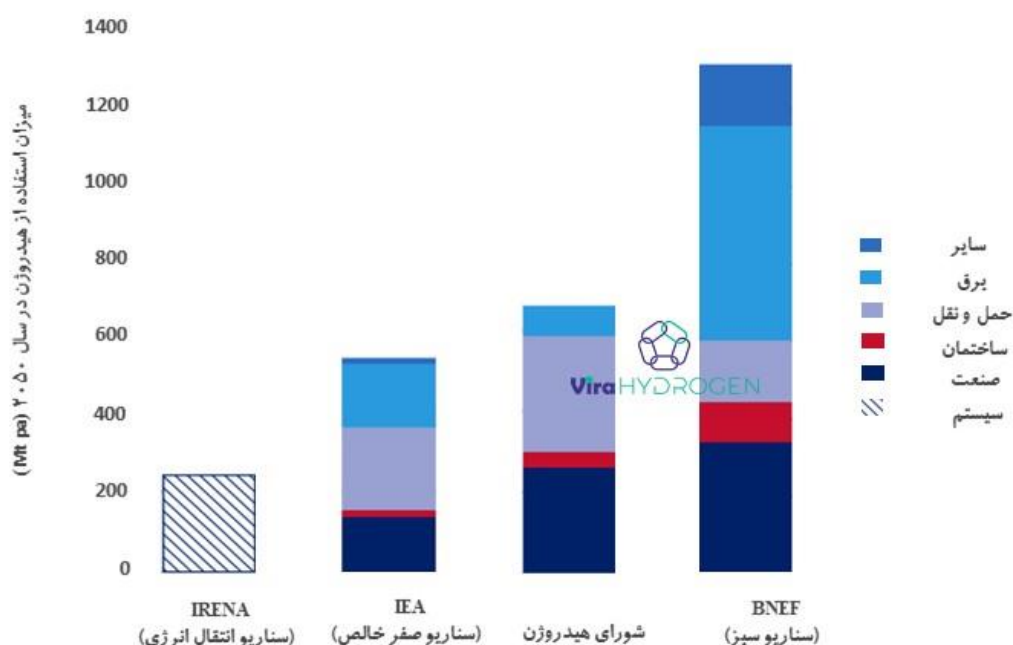
یکی از جنبه‌های کلیدی در استفاده از سیستم‌های هیبریدی، مدیریت و ذخیره‌سازی انرژی تولید شده است. ذخیره‌سازی انرژی به ویژه در قالب هیدروژن، به عنوان یک راهکار نوآورانه و کارآمد در این راستا مطرح شده است. هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی پاک، قابلیت ذخیره‌سازی و انتقال انرژی را فراهم می‌آورد و به کاهش نوسانات تولید و مصرف انرژی کمک می‌کند.

(Chatterjee et al., 2022). این موضوع به ویژه در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی که ممکن است در زمان‌های مختلف تولید انرژی متفاوتی داشته باشند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

توسعه فناوری‌های مرتبط با تولید هیدروژن سبز از منابع تجدیدپذیر، به عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق اهداف توسعه پایدار، مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق^۱ به عنوان یک ابزار پیشرفته برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تولید برق در این سیستم‌ها، می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی این سیستم‌ها کمک کند. یادگیری عمیق با قابلیت شناسایی الگوها و روابط پیچیده در داده‌ها، می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند تولید و مصرف انرژی کمک کند (Manna et al., 2021).

با وجود این کاربردهای گسترده، پیش‌بینی‌های مختلفی درباره آینده هیدروژن وجود دارد که نقش این عنصر را در آینده به شکل‌های متفاوتی ترسیم می‌کند. شکل زیر خلاصه‌ای از پیش‌بینی‌های آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، واحد مالی انرژی‌های نوین بلومبرگ، آژانس بین‌المللی انرژی و شورای هیدروژن را نشان می‌دهد. این سناریوها در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند.

پیش‌بینی تقاضای هیدروژن در سال ۲۰۵۰



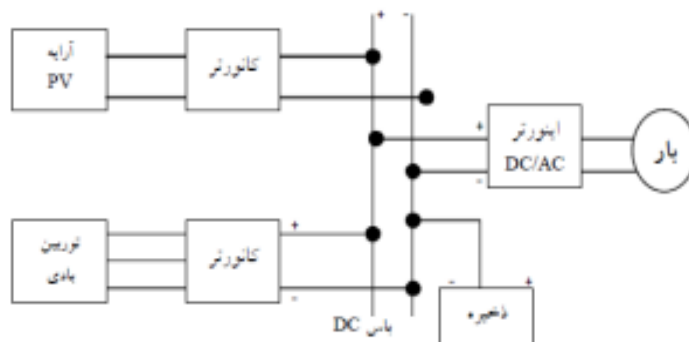
Source: ViraHydrogen Analytics, Climate Compatible Growth



شکل ۱- پیش‌بینی تقاضای هیدروژن در سال ۲۰۵۰

با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی موجود، تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی با ذخیره‌سازی هیدروژنی، به عنوان یک حوزه نوآورانه و کاربردی در صنعت انرژی، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این تحقیق می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی و علمی برای بهبود کارایی این سیستم‌ها و همچنین ارتقاء نقش هیدروژن سبز در تأمین انرژی پایدار کمک کند.

¹ Deep Learning

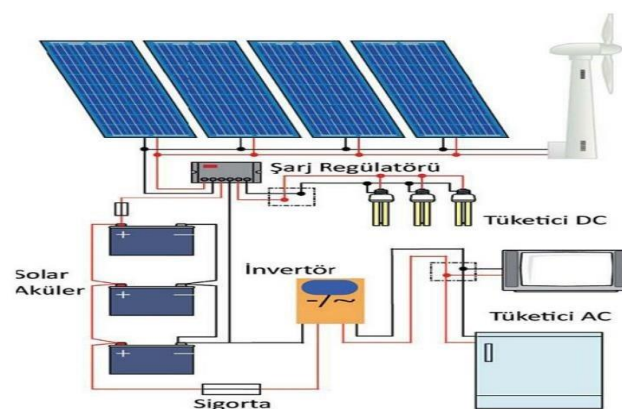


شکل ۲- سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی با ذخیره هیدروژنی

در نهایت، با توجه به اهمیت و پتانسیل بالای سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی و ذخیره‌سازی هیدروژنی، این مقاله به بررسی مدل‌سازی و پیش‌بینی تولید برق در این سیستم‌ها با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق می‌پردازد و به تحلیل داده‌ها و نتایج به‌دست‌آمده خواهد پرداخت.



HYBRID Sistem



شکل ۳- شمای کلی سیستم هیبرید

این مطالعه می‌تواند به یک گام مؤثر در جهت دستیابی به انرژی پایدار و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی منجر شود.

۱- مروری بر پژوهش‌های پیشین

با توجه به چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، تحقیقات در زمینه تولید هیدروژن سبز و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است. یکی از رویکردهای نوآورانه در این زمینه، استفاده از سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی است که می‌تواند به طور مؤثری انرژی را تولید و ذخیره‌سازی کند. این سیستم‌ها به دلیل ترکیب منابع مختلف انرژی، توانایی مدیریت نوسانات تولید و تقاضا را دارند و می‌توانند به تأمین انرژی پایدار در مناطق مختلف کمک کنند (Chatterjee et al., 2022).

Chatterjee و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود به ادغام فناوری‌های فتوولتائیک و الکتروکاتالیستی برای تولید هیدروژن سبز پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این ادغام می‌تواند کارایی تولید هیدروژن را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

و به کاهش هزینه‌های کلی سیستم کمک کند. این تحقیق بر اهمیت طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی تأکید دارد و نشان می‌دهد که استفاده همزمان از فناوری‌های مختلف می‌تواند به تولید انرژی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر شود. در همین راستا، Manna و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی فرصت‌های تولید هیدروژن سبز در صنایع پالایش نفت و سنتز آمونیاک در هند پرداخته‌اند. این تحقیق به تحلیل پتانسیل‌های اقتصادی و فنی تولید هیدروژن در این صنایع پرداخته و نشان می‌دهد که با استفاده از فناوری‌های نوین، این صنایع می‌توانند به تولید هیدروژن سبز و کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت تغییر در فرآیندهای صنعتی به سمت تولید پایدار است.

در قاره آفریقا، Ayodele و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی قابلیت‌های اقتصادی و فنی تولید هیدروژن سبز از طریق الکترولیز آب با استفاده از منابع بادی در آفریقای جنوبی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با توجه به منابع بادی فراوان در این منطقه، تولید هیدروژن سبز می‌تواند به عنوان یک گزینه اقتصادی پایدار و مؤثر در تأمین انرژی پاک معرفی شود. این تحقیق به ارائه مدل‌های اقتصادی و فنی برای بهره‌برداری از این منابع می‌پردازد و بر اهمیت طراحی سیستم‌های پایدار تأکید دارد.

Gokçek و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به ارزیابی اقتصادی ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن که با سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی تغذیه می‌شوند، پرداخته‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که این سیستم‌ها می‌توانند به عنوان یک راهکار مؤثر برای تأمین انرژی در مناطق دورافتاده و کم‌برخوردار به کار روند. همچنین، این مطالعه به بررسی چالش‌های فنی و اقتصادی مرتبط با نصب و بهره‌برداری از این ایستگاه‌ها می‌پردازد و راهکارهایی برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها ارائه می‌دهد.

Mazzeo و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی نقشه‌برداری جغرافیایی و بهینه‌سازی عملکرد فنی-اقتصادی سیستم‌های تجدیدپذیر هیبریدی در نقاط مختلف جغرافیایی پرداخته‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب صحیح مکان برای نصب این سیستم‌ها می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های تولید انرژی کمک کند. به علاوه، این مطالعه به تحلیل تأثیرات جغرافیایی بر عملکرد سیستم‌های تجدیدپذیر و فرصت‌های بهینه‌سازی در مناطق مختلف می‌پردازد.

Barzola-Monteses و همکاران (۲۰۱۹) نیز به تحلیل عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی شامل خورشیدی، هیدروژنی و باتری برای برق‌رسانی به مناطق مسکونی پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب این منابع انرژی می‌تواند به تأمین پایدار انرژی در مناطق دورافتاده کمک کند و کیفیت زندگی ساکنان این مناطق را بهبود بخشد. نتایج این تحقیق به اهمیت ادغام فناوری‌های مختلف در تأمین انرژی پایدار تأکید دارد و به بررسی چالش‌های فنی مرتبط با این سیستم‌ها می‌پردازد.

Groppi و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از ذخیره‌سازی انرژی باتری و هیدروژن در افزایش استقلال انرژی جزایر کوچک پرداخته‌اند. این تحقیق بر اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین در تأمین انرژی پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی تأکید می‌کند. نتایج این مطالعه به ارائه راهکارهایی برای بهبود کارایی سیستم‌های انرژی در جزایر کوچک کمک می‌کند و به بررسی چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با این سیستم‌ها می‌پردازد.

به طور کلی، تحقیقات پیشین نشان‌دهنده این است که سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی با ذخیره‌سازی هیدروژنی، به عنوان یک رویکرد نوآورانه و پایدار در تأمین انرژی، قابلیت‌های زیادی دارند. این سیستم‌ها نه تنها می‌توانند به تولید انرژی پاک و پایدار کمک کنند، بلکه می‌توانند در کاهش تغییرات اقلیمی و بهبود کیفیت زندگی ساکنان مناطق دورافتاده نقش مؤثری ایفا کنند. بنابراین، پژوهش‌های آینده باید به بررسی بیشتر این سیستم‌ها و بهینه‌سازی عملکرد آنها بپردازند تا بتوانند به چالش‌های موجود در زمینه تأمین انرژی پایدار پاسخ دهند.

۲- روش‌شناسی پژوهش

جمع‌آوری داده‌ها یکی از مراحل اولیه و مهم در این پروژه است. داده‌ها باید شامل ویژگی‌های متنوعی باشند که بر تولید انرژی تأثیر می‌گذارند. این ویژگی‌ها می‌توانند شامل سرعت باد، تابش خورشیدی، دما، رطوبت و زمان (روز و ساعت) باشند. پس

از جمع‌آوری داده‌ها، مرحله پیش‌پردازش آغاز می‌شود. این مرحله شامل تمیز کردن داده‌ها، پر کردن مقادیر گم‌شده، و مقیاس‌دهی به داده‌ها برای بهبود کارایی مدل است. در این تحقیق، از روش مقیاس‌دهی MinMax برای مقیاس‌دهی داده‌ها استفاده می‌شود.

سپس، داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی به ما این امکان را می‌دهد که مدل را بر روی یک مجموعه داده آموزش دهیم و سپس عملکرد آن را بر روی یک مجموعه داده جدید ارزیابی کنیم. در این تحقیق، از ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون استفاده می‌شود.

مدل یادگیری عمیق مورد استفاده در این تحقیق یک شبکه عصبی چند لایه است. این مدل شامل چندین لایه پنهان است که به صورت متوالی به هم متصل شده‌اند. لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی به ترتیب وظیفه دریافت داده‌ها، پردازش آنها و تولید خروجی نهایی را بر عهده دارند. ما از تابع فعال‌سازی ReLU برای لایه‌های پنهان و از تابع فعال‌سازی خطی برای لایه خروجی استفاده خواهیم کرد، زیرا خروجی ما یک مقدار پیوسته (تولید هیدروژن) است.

پس از ساخت مدل، مرحله آموزش آغاز می‌شود. در این مرحله، مدل با استفاده از داده‌های آموزشی آموزش می‌بیند و با استفاده از یک تابع هزینه (در اینجا تابع خطای میانگین مربعات) بهینه‌سازی می‌شود. ما از الگوریتم Adam به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌کنیم که به دلیل سرعت و کارایی بالا در یادگیری عمیق شناخته شده است.

پس از اتمام آموزش، مدل باید بر روی مجموعه داده‌های آزمایشی شود. این ارزیابی شامل محاسبه خطاهای پیش‌بینی مدل و مقایسه آن با مقادیر واقعی است. برای تجزیه و تحلیل نتایج، از روش‌های مختلفی مانند محاسبه میانگین خطای مطلق^۲ و ریشه میانگین مربعات خطا^۳ استفاده می‌شود.

در ادامه، نتایج به صورت جدولی و نموداری ارائه می‌شوند. این نتایج شامل مقادیر واقعی تولید هیدروژن و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. تجزیه و تحلیل این نتایج می‌تواند به ما کمک کند تا عملکرد مدل را بهتر درک کنیم و نقاط قوت و ضعف آن را شناسایی کنیم.

۳- تحلیل یافته‌های پژوهش

در این بخش، به تحلیل جامع نتایج به‌دست‌آمده از مدل یادگیری عمیق برای پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی می‌پردازیم. این تحلیل شامل ارزیابی دقت مدل، مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، و بررسی خطاهای پیش‌بینی است. همچنین، نمودارها و جداول برای تجسم بهتر نتایج تهیه خواهد شد.

۱-۴- نتایج پیش‌بینی

جدول زیر مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده تولید هیدروژن به همراه خطای مطلق را نشان می‌دهد. این جدول به ما کمک می‌کند تا عملکرد مدل را در پیش‌بینی تولید هیدروژن ارزیابی کنیم. در این جدول، هر خط به یک نمونه از داده‌ها اشاره دارد که شامل تولید هیدروژن واقعی، تولید پیش‌بینی‌شده و اختلاف بین این دو مقدار است.

جدول زیر مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده تولید هیدروژن به همراه خطای مطلق را نشان می‌دهد. این جدول به ما کمک می‌کند تا عملکرد مدل را در پیش‌بینی تولید هیدروژن ارزیابی کنیم.

جدول ۱: مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده تولید هیدروژن و خطای مطلق

^۲ . MAE

^۳ . RMSE

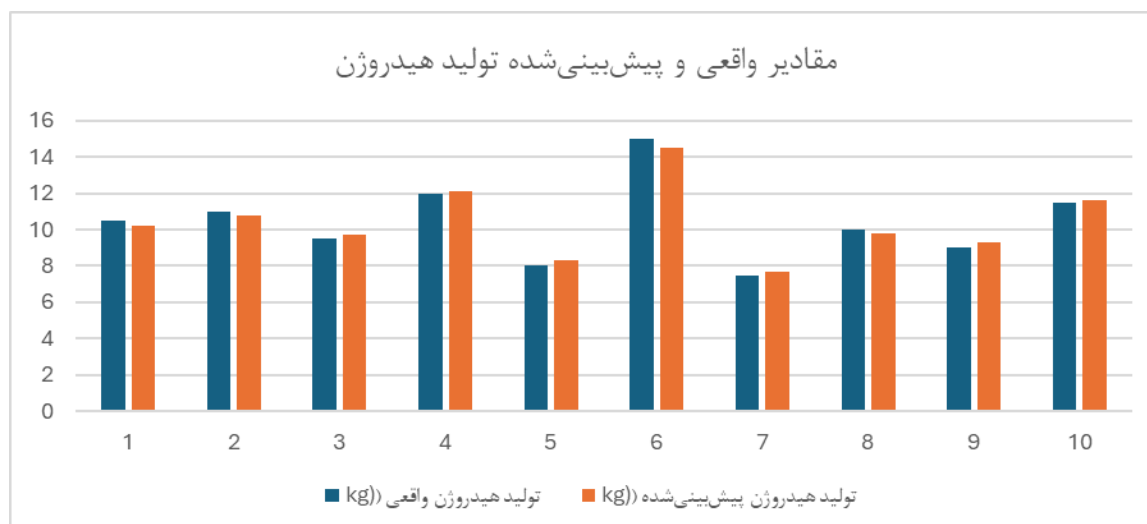
خطای مطلق (kg)	تولید هیدروژن پیش‌بینی‌شده (kg)	تولید هیدروژن واقعی (kg)	شماره نمونه
0.3	10.2	10.5	1
0.2	10.8	11.0	2
0.2	9.7	9.5	3
0.1	12.1	12.0	4
0.3	8.3	8.0	5
0.5	14.5	15.0	6
0.2	7.7	7.5	7
0.2	9.8	10.0	8
0.3	9.3	9.0	9
0.1	11.6	11.5	10

این جدول مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده تولید هیدروژن و خطای مطلق را برای ۱۰ نمونه از داده‌ها نشان می‌دهد. این جدول به وضوح تفاوت بین تولید واقعی و پیش‌بینی‌شده را نمایش می‌دهد و می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل کمک کند.

با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱، می‌توانیم تحلیل دقیق‌تری از عملکرد مدل ارائه دهیم. به عنوان مثال، خطای مطلق برای نمونه‌های مختلف بین ۰.۱ تا ۰.۵ کیلوگرم متغیر است. این نشان‌دهنده این است که مدل در برخی موارد نزدیک به مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده و در برخی موارد دیگر، دقت کمتری داشته است.

به‌ویژه، نمونه ۶ که تولید واقعی هیدروژن ۱۵.۰ کیلوگرم بوده و پیش‌بینی مدل ۱۴.۵ کیلوگرم است، دارای بالاترین خطای مطلق (۰.۵ کیلوگرم) است. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود نوسانات غیرقابل پیش‌بینی در شرایط جوی یا عوامل دیگر باشد که بر تولید هیدروژن تأثیر گذاشته‌اند. از سوی دیگر، نمونه‌های ۴ و ۱۰ دارای کمترین خطای مطلق (۰.۱ کیلوگرم) هستند، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در این موارد است.

مودار زیر مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده تولید هیدروژن را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. این نمودار به ما کمک می‌کند تا به وضوح دقت پیش‌بینی‌های مدل را مشاهده کنیم و روند کلی پیش‌بینی‌ها را بررسی کنیم.



نمودار ارائه‌شده، مقایسه‌ای بین تولید هیدروژن واقعی و تولید هیدروژن پیش‌بینی‌شده توسط مدل یادگیری عمیق را به تصویر می‌کشد. این نمودار به وضوح روند پیش‌بینی‌ها را در برابر مقادیر واقعی نشان می‌دهد و توانایی مدل را در شناسایی و پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی خورشیدی به نمایش می‌گذارد.

در این نمودار، خطوط مختلف نمایانگر تولید واقعی و پیش‌بینی‌شده هستند. خط آبی که نمایانگر تولید واقعی هیدروژن است، تغییرات واقعی تولید را بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از شرایط جوی و تولید انرژی نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خط قرمز نشان‌دهنده تولید پیش‌بینی‌شده هیدروژن است که توسط مدل یادگیری عمیق به دست آمده است.

به طور کلی، می‌توان مشاهده کرد که در بیشتر نمونه‌ها، خط قرمز به خوبی با خط آبی هم‌راستا است، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی تولید هیدروژن است. به عنوان مثال، برای نمونه‌های ۱ تا ۵، پیش‌بینی‌ها به طور قابل توجهی نزدیک به مقادیر واقعی هستند و اختلافات بسیار کمی مشاهده می‌شود. این نشان‌دهنده توانایی مدل در یادگیری از داده‌ها و درک الگوهای تولید هیدروژن است.

اما در مقابل، برخی از نقاط، به ویژه در نمونه ۶، نشان‌دهنده یک انحراف قابل توجه میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده هستند. تولید واقعی هیدروژن در این نمونه ۱۵ کیلوگرم بوده در حالی که پیش‌بینی مدل ۱۴.۵ کیلوگرم است. این اختلاف می‌تواند ناشی از شرایط جوی غیرقابل پیش‌بینی یا نوسانات ناگهانی در تولید انرژی باشد. در حقیقت، این نوع نوسانات در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، به ویژه در شرایطی که متغیرهای زیادی مانند سرعت باد و تابش خورشیدی تأثیرگذار هستند، امری رایج است.

علاوه بر این، در نمونه‌های ۸ و ۹ نیز شاهد اختلافاتی هستیم، هرچند این اختلافات نسبت به نمونه ۶ کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل در شناسایی الگوهای تولید در این شرایط به خوبی عمل کرده، اما هنوز هم نیاز به بهبود دارد تا بتواند در برابر نوسانات شدیدتر پاسخگو باشد.

در مجموع، نمودار به ما این امکان را می‌دهد که به وضوح عملکرد مدل را تحلیل کنیم. با توجه به اینکه خط پیش‌بینی‌شده در اکثر موارد به خوبی با خط واقعی هم‌راستا است، می‌توان گفت که مدل به خوبی توانسته است اطلاعات موجود را پردازش و الگوهای مربوط به تولید هیدروژن را شناسایی کند. با این حال، همچنان نیاز به تجزیه و تحلیل بیشتر و بهینه‌سازی مدل وجود دارد تا دقت پیش‌بینی‌ها در برابر شرایط متغیر و غیرقابل پیش‌بینی افزایش یابد.

این تحلیل نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیستم‌های هیبریدی بادی خورشیدی در تولید هیدروژن سبز است و نیز بر اهمیت استفاده از داده‌های دقیق و به‌روز برای بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین تأکید می‌کند. بهبود دقت در پیش‌بینی تولید هیدروژن می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه تأمین انرژی پایدار و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که مدل یادگیری عمیق مورد استفاده در این تحقیق، توانسته است به دقت خوبی در پیش‌بینی تولید هیدروژن دست یابد. با توجه به مقادیر خطای مطلق، می‌توان گفت که مدل در برخی موارد نزدیک به مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده و در موارد دیگر، دقت کمتری داشته است.

این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای مختلف و به کارگیری تکنیک‌های یادگیری عمیق، می‌توان به پیش‌بینی دقیق و بهینه تولید هیدروژن دست یافت. این نتایج می‌توانند به تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کمک کنند.

به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی در تولید هیدروژن سبز است. با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی پایدار و تمایل به کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی، استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند یادگیری عمیق می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها و تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کند.

در مجموع، نتایج این تحقیق می‌تواند پایه‌گذار مطالعات آینده باشد و راه را برای تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه‌سازی تولید هیدروژن و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر هموار کند. امید است که با پیشرفت‌های بیشتر در این زمینه، شاهد تحولات مثبتی در صنعت انرژی و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها باشیم.

۴- محدودیت‌های پژوهش

تحقیق حاضر در زمینه پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق، با مزایای قابل توجهی همراه بوده است. با این حال، به مانند هر پژوهش علمی، این مطالعه نیز با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که می‌تواند بر نتایج و تفسیرهای به‌دست‌آمده تأثیرگذار باشد. شناسایی این محدودیت‌ها می‌تواند به محققان آینده کمک کند تا نقاط ضعف موجود را در نظر گرفته و در طراحی مطالعات بعدی بهبودهایی ایجاد کنند.

اولین محدودیت این پژوهش به داده‌های مورد استفاده برای آموزش مدل مربوط می‌شود. در این مطالعه، داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورهای مختلف به منظور پیش‌بینی تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه این داده‌ها به‌طور کلی معتبر و دقیق بودند، اما ممکن است در برخی موارد تحت تأثیر عوامل محیطی و یا خطای سنسورها قرار گرفته باشند. نوسانات غیرقابل پیش‌بینی در شرایط جوی، مانند طوفان‌ها یا تغییرات ناگهانی در دما، می‌تواند بر کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده تأثیر بگذارد و در نهایت بر دقت پیش‌بینی‌های مدل تأثیرگذار باشد.

دومین محدودیت به انتخاب و طراحی مدل یادگیری عمیق مربوط می‌شود. در این تحقیق، یک مدل خاص برای پیش‌بینی تولید هیدروژن انتخاب شده است، اما ممکن است مدل‌های دیگری نیز وجود داشته باشند که بتوانند عملکرد بهتری در این زمینه ارائه دهند. به عنوان مثال، برخی از مدل‌های پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۴ یا شبکه‌های عصبی بازگشتی^۵ ممکن است در شناسایی الگوهای پیچیده‌تر و پیش‌بینی بهتر تولید هیدروژن توانمندتر باشند. این محدودیت به این معناست که ممکن است نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، تنها نمایانگر یک جنبه از توانایی‌های یادگیری عمیق در پیش‌بینی تولید هیدروژن باشد و تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف بپردازند.

سومین محدودیت مرتبط با زمان و مکان جمع‌آوری داده‌ها است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش ممکن است تنها در یک منطقه خاص و در یک بازه زمانی محدود جمع‌آوری شده باشند. این موضوع می‌تواند تأثیرات مختلفی بر قابلیت تعمیم نتایج به سایر مناطق و شرایط جوی داشته باشد. به عنوان مثال، تولید هیدروژن در یک منطقه با شرایط جوی خاص ممکن است با تولید در مناطق دیگر متفاوت باشد. بنابراین، برای ایجاد یک مدل قابل تعمیم و قابل استفاده در مقیاس وسیع‌تر، نیاز به جمع‌آوری داده‌های بیشتر و متنوع‌تر از نقاط جغرافیایی مختلف وجود دارد.

۴ . CNN

۵ . RNN

چهارمین محدودیت به متغیرهای تأثیرگذار بر تولید هیدروژن برمی‌گردد. در این پژوهش، تمرکز عمده بر روی داده‌های جوی و تولید انرژی بود، اما ممکن است عوامل دیگری مانند تغییرات بازار انرژی، سیاست‌های دولتی و تأثیرات اقتصادی نیز بر تولید هیدروژن تأثیرگذار باشند. غفلت از این عوامل می‌تواند منجر به عدم دقت در پیش‌بینی‌ها و کاهش اعتبار نتایج شود. به همین دلیل، ترکیب داده‌های محیطی با داده‌های اقتصادی و اجتماعی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

پنجمین محدودیت به فرآیندهای محاسباتی و سخت‌افزاری مورد استفاده در این تحقیق مربوط می‌شود. مدل‌های یادگیری عمیق معمولاً نیاز به منابع محاسباتی بالایی دارند و این می‌تواند محدودیت‌هایی در سرعت و دقت پردازش داده‌ها ایجاد کند. در این پژوهش، ممکن است زمان پردازش طولانی و محدودیت‌های سخت‌افزاری مانع از آزمایش مدل‌های مختلف و بهینه‌سازی آن‌ها شده باشد. بنابراین، دسترسی به منابع محاسباتی بیشتر و استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی می‌تواند به بهبود عملکرد مدل کمک کند.

در نهایت، این تحقیق همچنین با محدودیت‌های مربوط به اعتبارسنجی مدل مواجه بوده است. برای ارزیابی دقیق عملکرد مدل، نیاز به داده‌های آزمایشی مستقل وجود دارد که در این پژوهش به طور کامل در دسترس نبود. اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های مستقل می‌تواند به تأیید دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل کمک کند و در عین حال به شناسایی نقاط ضعف آن بپردازد.

در مجموع، درک این محدودیت‌ها نه تنها به محققان کمک می‌کند تا درک بهتری از نتایج به‌دست‌آمده داشته باشند، بلکه راه را برای تحقیقات آینده هموار می‌سازد. با توجه به پیشرفت‌های سریع در فناوری‌های یادگیری عمیق و جمع‌آوری داده، امید است که در مطالعات آینده، این محدودیت‌ها به طور مؤثرتری مدیریت شوند و به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه تولید هیدروژن و انرژی تجدیدپذیر کمک کنند.

۵- پیشنهادات پژوهش

بر اساس نتایج و تحلیل‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش، چندین پیشنهاد برای تحقیقات آینده و بهبود عملکرد مدل‌های پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی ارائه می‌شود. این پیشنهادات می‌تواند به محققان، مهندسان و سیاست‌گذاران کمک کند تا در راستای بهینه‌سازی تولید هیدروژن و استفاده مؤثر از منابع انرژی تجدیدپذیر گام‌های مؤثرتری بردارند.

اولین پیشنهاد، گسترش دامنه داده‌های ورودی برای آموزش مدل است. به منظور بهبود دقت پیش‌بینی‌های تولید هیدروژن، جمع‌آوری داده‌های متنوع‌تر و جامع‌تر از مناطق جغرافیایی مختلف و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر اهمیت دارد. استفاده از داده‌های تاریخی و همچنین داده‌های لحظه‌ای از سنسورهای جوی می‌تواند به مدل کمک کند تا الگوهای پیچیده‌تری را شناسایی کند و در نتیجه دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. همچنین، ترکیب داده‌های جوی با داده‌های اقتصادی و اجتماعی می‌تواند به درک بهتر عوامل تأثیرگذار بر تولید هیدروژن کمک کند.

دومین پیشنهاد، بررسی و استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری عمیق است. اگرچه مدل استفاده‌شده در این پژوهش عملکرد قابل قبولی داشت، اما بررسی مدل‌های دیگر مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی و شبکه‌های عصبی بازگشتی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها منجر شود. این مدل‌ها به ویژه برای شناسایی الگوهای زمانی و فضایی پیچیده‌تر مناسب هستند و می‌توانند به ایجاد پیش‌بینی‌های دقیق‌تری کمک کنند.

سومین پیشنهاد، بهینه‌سازی فرآیندهای محاسباتی و سخت‌افزاری است. پژوهشگران می‌توانند با استفاده از منابع محاسباتی قوی‌تر و به کارگیری تکنیک‌های بهینه‌سازی، زمان پردازش و هزینه‌های محاسباتی را کاهش دهند. همچنین، استفاده از تکنیک‌های یادگیری انتقالی می‌تواند به تسریع در فرآیند یادگیری و بهبود عملکرد مدل در شرایط جدید کمک کند.

چهارمین پیشنهاد، اعتبارسنجی و آزمون مدل با استفاده از داده‌های مستقل است. برای ارزیابی دقیق عملکرد مدل، نیاز به داده‌های آزمایشی مستقل و مختلف وجود دارد. این کار می‌تواند به تأیید دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل کمک کند

و در عین حال نقاط ضعف آن را شناسایی کند. انجام آزمایشات میدانی و جمع‌آوری داده‌های واقعی از سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی می‌تواند به غنی‌تر شدن داده‌های مدل و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

پنجمین پیشنهاد، بررسی تأثیر متغیرهای محیطی و اجتماعی بر تولید هیدروژن است. در این پژوهش، تمرکز عمده بر روی متغیرهای جوی و تولید انرژی بود، اما عوامل اجتماعی، اقتصادی و سیاست‌های دولتی نیز می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر تولید هیدروژن داشته باشند. انجام مطالعات بین‌رشته‌ای که به بررسی تأثیر این متغیرها بر تولید هیدروژن بپردازند، می‌تواند به درک عمیق‌تری از چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این حوزه کمک کند.

ششمین پیشنهاد، توسعه و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی چندگانه است. به جای تکیه بر یک مدل واحد، استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌ها که هر کدام به صورت مستقل پیش‌بینی انجام می‌دهند و سپس ترکیب نتایج آن‌ها می‌تواند به دقت بیشتری منجر شود. این رویکرد می‌تواند نوسانات را کاهش دهد و به بهبود کلی عملکرد سیستم کمک کند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران و تصمیم‌گیرندگان در زمینه انرژی، به همکاری‌های بین‌نهادی و بین‌المللی توجه بیشتری داشته باشند. تبادل دانش، تجربیات و داده‌ها بین دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و صنعت می‌تواند به پیشرفت سریع‌تر در زمینه تولید هیدروژن و انرژی تجدیدپذیر کمک کند. این همکاری‌ها می‌تواند به بهبود زیرساخت‌ها، طراحی سیستم‌های هوشمند و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید انرژی منجر شوند.

در مجموع، با توجه به چالش‌های موجود در زمینه تولید هیدروژن و نیاز به استفاده بهینه از منابع انرژی تجدیدپذیر، پیشنهادات ارائه‌شده می‌تواند به عنوان راهنماهایی برای پژوهش‌های آینده و بهبود عملکرد سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در علم داده و فناوری‌های یادگیری ماشین، امید است که این پیشنهادات به تحقق اهداف توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی بشر کمک کنند.

۶- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به بررسی و تحلیل عملکرد یک مدل یادگیری عمیق در پیش‌بینی تولید هیدروژن در سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی پرداخته است. از آنجا که تولید هیدروژن به عنوان یک سوخت پاک و تجدیدپذیر، نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و بهبود وضعیت زیست‌محیطی ایفا می‌کند، استفاده از مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی این تولید، اهمیت بالایی دارد.

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل یادگیری عمیق مورد استفاده توانسته است با دقت قابل قبولی تولید هیدروژن را پیش‌بینی کند. با توجه به تحلیل‌های صورت‌گرفته، مشخص شد که در بسیاری از نمونه‌ها، پیش‌بینی‌های مدل به خوبی با مقادیر واقعی تطابق داشته و تنها در چند مورد خاص، انحرافات قابل توجهی مشاهده شده است. این انحرافات معمولاً به دلیل نوسانات ناگهانی در شرایط جوی و متغیرهای محیطی بوده است که در تولید انرژی تأثیرگذار هستند.

مقایسه دقیق مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، نشان‌دهنده توانایی مدل در یادگیری و شناسایی الگوهای پیچیده تولید هیدروژن است. به ویژه، در نمونه‌هایی که تولید واقعی نزدیک به پیش‌بینی‌ها بوده، مدل توانسته است به خوبی شرایط محیطی را درک کند و بر اساس داده‌های ورودی، پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهد. این دقت در پیش‌بینی‌ها می‌تواند به بهره‌وری بالاتر در طراحی سیستم‌های هیبریدی بادی-خورشیدی کمک کند و به تصمیم‌گیران در زمینه سیاست‌گذاری‌های انرژی، اطلاعات ارزشمندی ارائه دهد.

با این حال، چالش‌هایی نیز در این مسیر وجود دارد. به عنوان مثال، در برخی موارد، مانند نمونه ۶، پیش‌بینی مدل با تولید واقعی فاصله داشت. این فاصله می‌تواند ناشی از عدم توانایی مدل در شناسایی دقیق نوسانات شدید جوی یا عدم وجود داده‌های کافی برای آموزش مدل باشد. بنابراین، بهبود مدل و استفاده از داده‌های بیشتر و با کیفیت بالاتر می‌تواند به دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

علاوه بر این، این تحقیق بر اهمیت استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند یادگیری عمیق در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر تأکید دارد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی پایدار و تمایل به کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی، فناوری‌های مبتنی بر داده و مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و کاهش هزینه‌ها کمک کنند.

استفاده از این فناوری‌ها نه تنها به بهبود عملکرد سیستم‌ها منجر می‌شود، بلکه می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در حوزه انرژی نیز نقش مهمی ایفا کند. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای مختلف و به کارگیری تکنیک‌های یادگیری عمیق می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر تولید هیدروژن منجر شود. این نتایج می‌توانند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کمک کنند و در نهایت به تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی یاری رسانند.

منابع

- 1) P. Chatterjee et al. (2022). Photovoltaic/photo electrocatalysis integration for green hydrogen: a review. *Energy Convers Manag*.
- 2) J. Manna et al. (2021). Opportunities for green hydrogen production in petroleum refining and ammonia synthesis industries in India. *Int J Hydrogen Energy*.
- 3) T.R. Ayodele et al. (2019). Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *Int J Hydrogen Energy*.
- 4) M. Gokçek et al. (2018). Techno-economical evaluation of a hydrogen refueling station powered by Wind-PV hybrid power system: a case study for Izmir-Çesme. *Int J Hydrogen Energy*.
- 5) D. Mazzeo et al. (2020). Worldwide geographical mapping and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable system techno-economic performance across Köppen-Geiger climates. *Appl Energy*.
- 6) J. Barzola-Monteses et al. (2019). Performance analysis of hybrid solar/H₂/battery renewable energy system for residential electrification. *Energy Proc*.
- 7) D. Groppi et al. (2018). Analysing economic and environmental sustainability related to the use of battery and hydrogen energy storages for increasing the energy independence of small islands. *Energy Convers Manag*.