

## تحلیل فنی اقتصادی سامانه هیبریدی به صورت جدا از شبکه انرژی بادی و پیل سوختی: مطالعه موردی منطقه کوهین قزوین

کاوه حبیبی سراسکانرود<sup>۱</sup>، علیرضا زاهدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

k\_habibi@nt.iust.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

zahediar@iust.ac.ir

**چکیده:** کاهش منابع انرژی‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای روزبه‌روز نیاز به منابع پاک و تجدیدپذیر انرژی را بیشتر می‌کند. یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی بادی است که در سال‌های اخیر همواره در حال توسعه بوده است. نیروگاه‌های بادی گاهی در ساعات پیک مصرف جوابگو نیستند، لذا یک سامانه ذخیره‌سازی توان و پشتیبان برای این نیروگاه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش تلاش شده است تا یک سامانه هیبریدی برای اتصال به نیروگاه بادی متشکل از تولید هیدروژن و پیل سوختی، به‌منظور تأمین توان قابل اطمینان و همچنین تولید محصولات جانبی با ارزش ارائه گردد. در این مقاله، مطالعه موردی برای سامانه موردنظر در منطقه کوهین انجام شده است. بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سامانه فوق حاکی از آن است که در بهترین طرح (متشکل از ۳ توربین بادی)، میزان توان تولیدی سالانه سامانه هیبریدی ۱۷۹۵ مگاوات ساعت خواهد بود که از این مقدار ۱۲٪ سهم پیل سوختی است. نتایج نشان داد که سامانه هیبریدی باعث افزایش ۲/۸ درصدی ضریب ظرفیت نیروگاه بادی می‌گردد. هزینه انرژی محاسبه‌شده برای سامانه هیبریدی ۷۶ سنت و ارزش فعلی سرمایه ۵،۲۳۵،۰۶۶ دلار خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، الکترولیز، هیدروژن، پیل سوختی، ذخیره‌سازی انرژی، بهینه‌سازی اقتصادی.

\* نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

انرژی یک منبع ارزشمند و حیاتی طبیعت است. بشر از زمان خلقت همواره کوشیده است تا با به کارگیری انرژی‌های در دسترس فعالیت‌های خود را به آسانی، با بالاترین سرعت و کمترین هزینه به انجام رساند. با افزایش جمعیت جهان و به کارگیری فناوری‌های جدید، روند تقاضای انرژی رو به افزایش است و اگر الگوی جاری مصرف انرژی تغییر نیابد، مصرف انرژی با چالش‌های بزرگی روبه‌رو خواهد شد. علاوه بر این، نحوه کسب انرژی از طبیعت یا مسائل محیط زیستی یکی دیگر از چالش‌های مصرف انرژی است، به طوری که حفظ محیط زیست به یک الزام جهانی تبدیل شده است. همچنین بحران آلودگی و گرمایش جهانی ناشی از بهره‌گیری از سوخت‌های فسیلی و نیز رو به زوال بودن این منابع، استفاده و توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک منبع، انرژی پاک را به یک امر ضروری تبدیل نموده است. انرژی بادی یکی از منابع تجدیدپذیر است که در سال‌های اخیر همواره پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. تولید برق با استفاده از انرژی باد، باعث ذخیره میلیاردها بشکه نفت خام می‌شود و از آزادسازی کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای به جو جلوگیری می‌کند. برای مثال، با راه‌اندازی یک توربین بادی ۱ مگاواتی به مدت یک سال، از رها شدن ۱۵۰۰ تن دی‌اکسید کربن، ۶/۵ تن اکسید سولفور، ۳/۲ تن اکسید نیتروژن و ۲۲ کیلوگرم جیوه جلوگیری می‌شود [۱].

انرژی بادی با تمام محاسن خود ایراداتی نیز دارد که امروزه در حال برطرف شدن هستند. میزان سرعت وزش باد در ساعات و روزهای مختلف یکسان نیست و همچنین پیش‌بینی میزان وزش باد معمولاً با خطا مواجه است. مهم‌ترین مشکل استفاده از انرژی بادی در تولید پراکنده، طبیعت متغیر باد و عدم انطباق میزان تولید توان در ساعات کم‌باری و پرباری است. لذا برای افزایش قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در کاربردهای جدا از شبکه، ترکیب آن با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر ضرورت می‌یابد. مطالعات بررسی‌شده در این پژوهش را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: طراحی بهینه سامانه هیبریدی و تحلیل فنی اقتصادی این سیستم‌ها. دالتون و همکاران [۲] تحلیل امکان‌سنجی تأمین انرژی را برای یک منطقه توریستی در استرالیا و با استفاده از نرم‌افزارهای هومر<sup>۱</sup> و هیبرید<sup>۲</sup> انجام داده‌اند و بازگشت سرمایه ۳/۴ ساله را برای سامانه هیبریدی پیشنهادی محاسبه کرده‌اند. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم‌های با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰ کیلووات، اقتصادی‌تر از چندین سیستم کوچک‌تر است.

کورسینی و همکاران یک سامانه بر پایه هیدروژن به همراه آب شیرین‌کن را مورد آزمایش قرار دادند و در تمامی تحلیل‌هایشان ۶۰٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت فسیلی داشتند [۳]. اسپرو و آناگوستوپولوس درباره جزئیات طراحی بهینه و استراتژی عملکرد یک سامانه هیبریدی متشکل از آب شیرین‌کن برای تأمین آب شرب یک منطقه دورافتاده تحقیق کرده‌اند. این سامانه شامل یک واحد آب شیرین‌کن اسمز معکوس بود که توسط توان بادی و خورشیدی عمل می‌کرد [۴]. باجپای و داش مقایسه ابعادی، بهینه‌سازی، مدیریت انرژی و مدل‌سازی اجرای سامانه هیبریدی تجدیدپذیر را مرور کرده‌اند. مطالعه آنان شامل مدل‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک، سامانه‌های انرژی پشتیبان (پیل سوختی، باتری، ابرخازن و دیزل ژنراتور)، واحدهای همگام‌سازی (مبدل‌ها و شارژکننده‌های باتری) و تکنیک‌هایی برای مدیریت جریان انرژی می‌شد [۵]. پرایین و همکاران مدل‌هایی برای یک جزیره انرژی صفر ارائه کردند. هدف از پژوهش آنان، بررسی وضعیت گذشته و آینده در حالت بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بود [۶]. کومار و همکاران یک الگوریتم بهینه‌سازی برای پیش‌بینی طراحی بهینه سامانه هیبریدی انرژی بادی و خورشیدی ارائه کرده‌اند [۷].

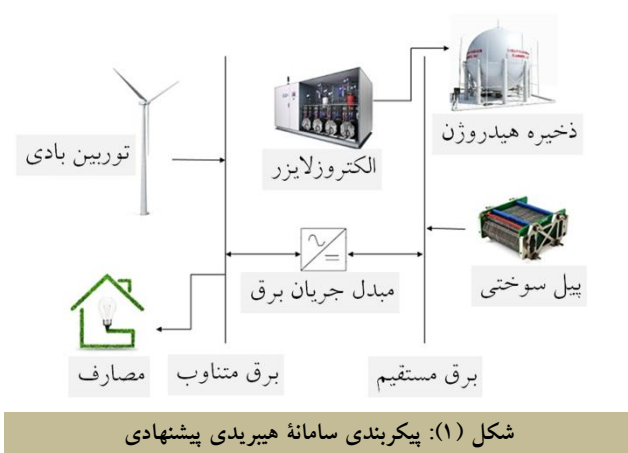
سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به خصوص در برق‌رسانی مناطق دورافتاده در حال توسعه هستند. از آنجایی که تأمین تقاضای انرژی در مناطق دور از شبکه بسیار حیاتی است، تحلیل اقتصادی نمود بیشتری می‌یابد. مطالعاتی درباره این مسئله انجام شده است. برای مثال محامد و پاپاداکیس بر روی طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی سامانه هیبریدی متشکل از توربین باد، پنل‌های فتوولتائیک و آب شیرین‌کن اسمز معکوس مطالعه کرده‌اند [۸]. در این مطالعه هزینه تولید آب شیرین ۵/۲ یورو بر مترمکعب گزارش شده بود که بالغ بر ۴۸٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌گردد. کاظیم تحلیل انرژی-اقتصادی مسوطی روی یک پیل سوختی غشاء پلیمری ۱۰ کیلوواتی در دما، فشار، ولتاژ و استوکیومتری مختلف انجام داد [۹]. زولپاس و لیمبرولوپوس تحلیل فنی-اقتصادی سامانه یکپارچه تولید هیدروژن و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در یک جزیره را انجام داده‌اند. سامانه بهینه شامل یک پنل خورشیدی ۱۵/۹ کیلوواتی، یک پیل سوختی ۸ کیلوواتی و الکترولیزکننده ۱۶ کیلوواتی می‌شد که قادر به تولید ۳/۲ مترمکعب هیدروژن در ساعت بود. همچنین ظرفیت مخزن ذخیره هیدروژن ۳۲۰ کیلوگرم هیدروژن فشرده شده تا ۳۰ اتمسفر برآورد شده بود. در طرح‌های بلندمدت، کاهش قیمت ۵۰٪ در هزینه الکترولیز و کاهش ۴۰٪ در هزینه ذخیره‌سازی هیدروژن لحاظ شده است [۱۰].

1. HOMER Software
2. HYBRIDS

سپس سامانه هیبریدی موردنظر تشریح شده و روش تحلیل، فرضیات مسئله و منطقه کوهین را مورد مطالعه قرار می‌دهد. در نهایت نتایج تحلیل‌های انجام‌شده بررسی خواهد شد.

## ۲. توصیف سیستم

سامانه هیبریدی در این پژوهش مطابق شکل (۱) متشکل از چهار جزء اصلی بود: توربین بادی، الکتروولتایزر، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی. سازوکار سامانه مذکور به این صورت بود که در ساعات کم‌باری، توان اضافی تولیدشده توسط توربین بادی وارد واحد الکتروولتایزر شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود. هیدروژن و اکسیژن تبدیل‌شده فشرده‌شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌شدند. این گازها در مواقع پیک مصرف (زمانی که توان تولیدی توسط نیروگاه بادی کمتر از میزان تقاضای شبکه بود) برای تولید برق وارد پیل سوختی می‌شوند تا تقاضای برق شبکه ارضا گردد.



## ۳. تحلیل سیستم

### ۱.۳. روش تحلیل

در این پژوهش، توان لازم برای تأمین برق ۲۵۰ خانوار در منطقه کوهین واقع در استان قزوین با استفاده از سامانه هیبریدی مبتنی بر توربین بادی و پیل سوختی تحلیل شد. در بخش دیگری از این پژوهش، مطالعه موردی برای سامانه هیبریدی موردنظر انجام شد. به منظور رسیدن به طراحی بهینه سامانه هیبریدی، نرم‌افزار هومر مورد استفاده قرار گرفت. این نرم‌افزار هم برای سامانه‌های متصل به شبکه و هم جدا از شبکه، کاربرد دارد. مهم‌ترین ورودی‌های این نرم‌افزار عبارت‌اند: از اطلاعات تقاضای برق، منابع تجدیدپذیر، مشخصات اجزای سامانه، تعداد اجزا و شاخص‌های اقتصادی اجزا. این نرم‌افزار پس از وارد نمودن اطلاعات و تحلیل‌های اولیه، طرح‌های

دیاف و همکاران پیکربندی بهینه برای تأمین نیاز یک خانوار معمولی (۳ کیلووات ساعت در روز) برای ۳ منطقه را تحلیل نموده‌اند. در مطالعه آنان، بهینه‌سازی فنی-اقتصادی یک سامانه متشکل از انرژی بادی و خورشیدی به همراه باتری انجام گرفته و ظرفیت ذخیره‌سازی به مدت دو روز به عنوان بهینه‌ترین پیکربندی با کمترین هزینه انرژی معرفی شد [۱۱]. لیو و وو برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را با استفاده از انرژی خورشیدی، بادی و جزر و مد بررسی کرده‌اند [۱۲]. همچنین سیلوا و همکاران سامانه‌ای متشکل از پنل فتوولتائیک، پیل سوختی و باتری را برای تأمین انرژی الکتریکی منطقه‌ای در آمازون ارائه کرده‌اند. هدف پژوهش آنان، تحلیل اقتصادی پایلوت سامانه مذکور بود. تحلیل‌های انجام‌شده حاکی از آن بود که هزینه اولیه بهینه، ارزش فعلی سرمایه و هزینه انرژی الکتریکی این سامانه به همراه ذخیره‌سازی هیدروژن به ترتیب ۸۷،۱۳۸ دلار، ۱۰۲،۳۲۳ دلار و ۱/۳۵۱ دلار بر کیلووات ساعت خواهد بود [۱۳]. بزمالیونویچ و همکاران تحلیلی فنی-اقتصادی را بر روی یک سامانه فتوولتائیک و پیل سوختی غشاء پلیمری انجام دادند. آنان طرح‌های مختلفی از جمله سامانه فتوولتائیک/باتری، فتوولتائیک/باتری/دیزل ژنراتور و فتوولتائیک/باتری/پیل سوختی غشاء پلیمری را بررسی کردند [۱۴]. کالینجی و همکاران تحلیل فنی-اقتصادی برای برق‌رسانی یک جزیره در ترکیه با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک، توربین بادی و ذخیره‌سازی هیدروژن انجام دادند. در پژوهش مذکور دو طرح، یکی ترکیب فتوولتائیک و توربین بادی و دیگری فقط توربین بادی در نظر گرفته شد که هزینه انرژی در طرح اول کمتر بود. همچنین ظرفیت بهینه برای تک‌تک اجزای سامانه برآورد شده بود [۱۵]. پژوهشی مشابه توسط براتی و امین‌زاده با تمرکز بر عملکرد سیستم براساس اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و منحنی تقاضای بار صورت گرفته است [۱۶].

اگرچه تحقیقات متعددی بر روی تحلیل فنی-اقتصادی سامانه‌های هیبریدی بادی صورت پذیرفته است، لیکن تاکنون برای سامانه هیبریدی بادی-الکتروولتایزر-ذخیره‌ساز-پیل سوختی تحلیلی در دنیا صورت پذیرفته است. همچنین این برای اولین بار است که در ایران برای منطقه بادخیزی همچون منطقه کوهین قزوین تحلیل فنی-اقتصادی سامانه هیبریدی بادی-پیل سوختی صورت می‌پذیرد. البته تحلیل‌های انرژی برای مناطقی نظیر ابرکوه توسط روش‌شناسان همکاران صورت گرفته است [۱۷]. پژوهش حاضر ابتدا یک نمونه سامانه هیبریدی بادی-پیل سوختی را برای منطقه کوهین مدل‌سازی کرده و میزان تولید انرژی و هزینه‌های سامانه را بررسی می‌نماید.

که  $t_{com}$  و  $t_{rem}$  به ترتیب بیانگر عمر باقیمانده در پایان پروژه و عمر تجهیزات است.

هزینه سالانه یک جزء سامانه، هزینه‌ای است که در هر سال تا پایان عمر پروژه باید صرف گردد. این فاکتور را می‌توان با ضرب ارزش فعلی سرمایه در فاکتور بازیابی سرمایه<sup>۹</sup> محاسبه کرد.

$$CRF = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (5)$$

$$AC = NPC \cdot CRF$$

همچنین هزینه سالانه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$AC_T = \sum C_{a,cap} + C_{a,rep} + C_{a,main} - C_{a,s} \quad (6)$$

در نهایت هزینه انرژی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$COE = \frac{AC_T}{E_{served}} \quad (7)$$

که در آن  $E_{served}$  بار لازم است.

### ۲.۳. فرضیات مسئله

فرضیات اولیه مسئله به صورت زیر لحاظ شد:

- سامانه مورد نظر برای تأمین برق ۲۵۰ خانوار در منطقه کوهین در نظر گرفته شد [۱۹].

- متوسط مصرف سالانه برق هر خانوار ۲۷۴۰ کیلووات ساعت فرض شد [۲۰].

- تیرماه و مردادماه به عنوان ماه‌های دارای بیشترین مصرف برق در نظر گرفته شد [۲۰].

- تحلیل اقتصادی بر مبنای قیمت انرژی و قیمت فعلی سرمایه انجام گرفت.

- عمر سامانه ۲۰ سال تعیین شد [۱۸].

- نرخ تنزیل و نرخ تعدیل بر اساس آمار بانک مرکزی به ترتیب ۶٪ و ۲٪ فرض شدند.

- توربین بادی محور افقی با عمر ۲۰ سال و ظرفیت ۳۰۰ کیلووات لحاظ شد. علت انتخاب چند توربین با ظرفیت کمتر افزایش قابلیت اطمینان در سامانه بود [۱۸].

- پیل سوختی غشاء پلیمری با عمر ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد مورد نظر قرار گرفت [۲۱].

- الکترولیزکننده غشاء پلیمری<sup>۱۰</sup> با عمر ۱۵ سال در نظر گرفته شد [۲۲].

- مخزن ذخیره هیدروژن با عمر ۲۵ سال فرض شد. ضمناً از آنجا که شروع راه‌اندازی سامانه هیبریدی به ۳۰۰ کیلوگرم هیدروژن نیاز داشت، این مقدار به عنوان ذخیره اولیه در نظر گرفته شد [۱۵].

مختلف را بر اساس هزینه انرژی<sup>۱</sup> و ارزش فعلی سرمایه<sup>۲</sup> اولویت‌بندی نمود. ضمن آنکه تحلیل حساسیت را نسبت به پارامترهای ورودی نرم‌افزار انجام داد. برای مثال اثر تغییرات بازده الکترولیز در خروجی کل سیستم مورد تحلیل قرار گرفت. هدف از مدل‌سازی سامانه مورد نظر تأمین توان قابل اطمینان و کمینه نمودن هزینه‌های سامانه بود. بدین منظور از نرم‌افزار هومر با روش ارزش فعلی سرمایه و هزینه سالانه<sup>۳</sup> استفاده شد. ارزش فعلی سرمایه یک سامانه انرژی، ارزش فعلی تمام هزینه‌هایی که در طول عمر سیستم صرف می‌شود منهای کل درآمدهای کسب‌شده آن است [۱۸]. این هزینه‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه‌های سوخت مصرفی می‌باشد. بدیهی است که به علت عدم استفاده از منابع فسیلی، سوختی مصرف نخواهد شد. ارزش فعلی سرمایه کل را می‌توان با جمع کردن تمام جریان نقدی پروژه با در نظر گرفتن نرخ تنزیل در هر سال محاسبه نمود. نرخ تنزیل نیز نسبتی است که برای محاسبه ارزش فعلی یک جریان نقدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ تنزیل<sup>۴</sup> به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$f_d = \frac{i}{(1+i)^N} \quad (1)$$

که در آن  $i$  و  $N$  به ترتیب نرخ سود سالانه واقعی و تعداد سال‌های مورد محاسبه در پروژه است. به منظور محاسبه نرخ سود سالیانه واقعی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$i = \frac{i'f}{1+f} \quad (2)$$

که در آن  $i'$  و  $f$  به ترتیب نرخ سود نامی و نرخ تورم سالیانه است. با استفاده از  $f_d$  ارزش فعلی سرمایه به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$NPC = \sum_{n=1}^{N=t} f_{d,n} (C_{cap} + C_{rep} + C_{main} - C_s) \quad (3)$$

که در آن  $t$  طول عمر پروژه و  $C_{cap}$ ،  $C_{rep}$ ،  $C_{main}$  و  $C_s$  به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری<sup>۵</sup>، هزینه جایگزینی تجهیزات<sup>۶</sup>، هزینه تعمیر و نگهداری<sup>۷</sup> و هزینه فروش تجهیزات<sup>۸</sup> پس از عمر پروژه است [۱۸]. هزینه فروش تجهیزات پس از عمر پروژه به طور مستقیم متناسب با عمر باقیمانده تجهیزات بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_s = C_{rep} \frac{t_{rem}}{t_{com}} \quad (4)$$

1. Cost of Energy (COE)
2. Net Present Cost (NPC)
3. Annual Cost (AC)
4. Discount Factor
5. Capital Cost
6. Replacement Cost
7. Operating Cost
8. Salvage Cost

9. Capital Recovery Factor (CRF)  
10. Polymer Membrane Electrolyzer

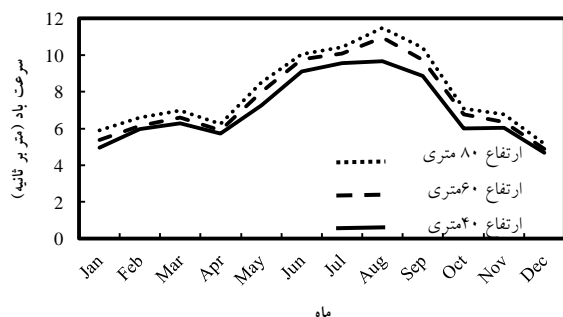
متوسط ۲۷۴۰ کیلووات ساعت در سال مصرف برق دارند و اوج مصرف برق در سال مربوط به ماه مرداد است. به عبارت دیگر مصرف کل برق ۱۸۷۶ کیلووات ساعت در روز تعیین شد.

یکی از دکل‌های بادنسجی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در مجاورت محل موردنظر قرار دارد. دکل بادنسجی در قسمت شرقی سایت با فاصله ۳/۵ کیلومتر، در مختصات ۴۹/۷۱۰۰ شمالی و ۳۶/۳۳۷۵ شرقی در ارتفاع ۱۴۴۷ متر بالاتر از سطح دریا بنا شده است. سنسورهای فنجان‌ی در سه ارتفاع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری از سطح نصب شده‌اند. علاوه بر آن، دو بادنا هم در ارتفاع‌های ۶۰ و ۷۸ متری قرار دارد. سنسورها نیز بر اساس استانداردهای بین‌المللی کالیبره شده‌اند. اطلاعات خروجی از دکل بادنسجی با دقت ۹۰ درصد به بالا در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای ثبت شده و داده‌های خروجی از تاریخ ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۳ تا ۷ خرداد ۱۳۹۵ در این پژوهش استفاده شد که خلاصه‌ای از آن در جدول (۲) قابل مشاهده است [۲۳].

جدول (۲): میانگین سرعت باد ارتفاعات ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری کوهین

ارتفاع سنسور (متر)	میانگین سرعت (متر بر ثانیه)
۴۰	۷/۳۱
۶۰	۷/۸۷
۸۰	۸/۱۸

سرعت متوسط باد به تفکیک ماه‌های سال در سه ارتفاع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، بیشترین سرعت وزش باد در تابستان (ماه‌های ژوئن تا سپتامبر) است. همچنین در شکل (۴) نمودار سرعت متوسط روزانه باد در ارتفاع‌های ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان وزش باد در ساعات شب رخ می‌دهد. طبق این نمودار نتیجه می‌شود که سرعت باد در تمام ساعات شبانه‌روز بیشتر از ۶ متر بر ثانیه بوده و همچنین سرعت باد در ارتفاعات بالاتر، بیشتر است.



شکل (۳): میانگین ماهانه سرعت باد

همچنین فرضیات مربوط به هزینه‌های اولیه هر یک از اجزای سامانه، هزینه جایگزینی، هزینه تعمیر و نگهداری و عمر آن‌ها در جدول (۱) آمده است. این موارد به‌عنوان پیش‌فرض از نرم‌افزار هومر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (۱): هزینه‌های اجزای سامانه

اجزا	هزینه اولیه (\$/kW)	هزینه جایگزینی (\$/kW)	هزینه نگهداری (سال)	عمر
توربین بادی	۱۵۰۰	۱۲۶۰	۱۶	۲۰
مبدل	۳۰۰	-	-	۱۵
الکترولیزر	۲۰۰۰	۲۰۰۰	-	۱۵
مخزن هیدروژن	۵۰۰	۵۰۰	-	۲۵
پیل سوختی	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۷	۴۰۰۰ ساعت

### ۳.۳. منطقه نمونه

منطقه کوهین که در استان قزوین به‌عنوان یکی از مناطق بادخیز ایران و در امتداد کریدور بادی نشست‌گرفته از رشته‌کوه البرز شناخته می‌شود، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. محل سایت پیشنهادی در مجاورت شمالی روستای کوهین در نظر گرفته شد (شکل ۲). این منطقه در بخش شمالی ایران و در استان قزوین، در ۳۱ کیلومتری غرب شهرستان قزوین و در ۱۷۰ کیلومتری شمال غرب پایتخت ایران، تهران قرار دارد. ارتفاع متوسط این ساختگاه از سطح دریا ۱۴۲۰ تا ۱۵۱۰ متر است. سایت موردنظر در مختصات ۳۶/۳۳ درجه شمالی و ۴۹/۶۶ درجه شرقی قرار گرفته است.



شکل (۲): موقعیت منطقه مورد مطالعه

همان‌گونه که در فرضیات مسئله اشاره شد، تقاضای برق برابر با تقاضای ۲۵۰ خانوار در منطقه کوهین لحاظ شد که هر خانوار به‌طور

#### ۴. نتایج و بحث

به منظور تأمین برق منطقه کوهین از سامانه هیبریدی رسیدن به سیستم بهینه اقتصادی نیازمند بررسی طرح‌های مختلف بود. از همین رو برای هریک از اجزای سامانه، ظرفیت‌های مختلفی در نظر گرفته شده و سیستم موردنظر بر طبق آن‌ها شبیه‌سازی گردید. ظرفیت‌های در نظر گرفته شده برای سامانه در جدول (۴) نشان داده شده است. برای نیل به سامانه بهینه دقیقاً ۱۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد که از این تعداد، ۱۲۳ طرح برای تأمین تقاضا امکان‌پذیر بودند. علت انتخاب ۳ و ۴ عدد توربین بادی مبتنی بر این فرضیه بود که ۹۰۰ یا ۱۲۰۰ کیلووات از برق منطقه توسط توربین بادی و مابقی توسط پیل سوختی مهیا شد.

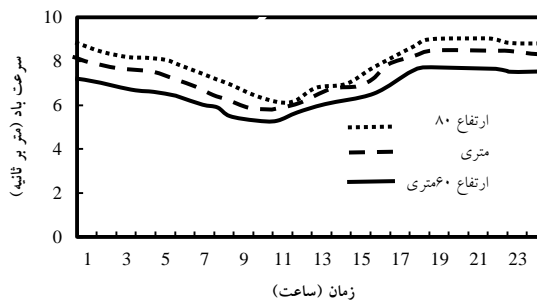
جدول (۴): ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای اجزای سامانه

جزء سامانه	واحد	ظرفیت‌های در نظر گرفته شده
توربین بادی	تعداد	۴، ۳
پیل سوختی	کیلووات	۱۰۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۲۰۰
الکترولیزر	کیلووات	۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰
مخزن هیدروژن	کیلوگرم	۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰
میدل	کیلووات	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰

طبق اطلاعات بادیسنجی منطقه کوهین، توربین بادی ۳۰۰ کیلوواتی با کارکرد سالانه ۲۲۴۵ ساعت به‌طور متوسط خروجی معادل با ۲۳۴/۵۵ کیلووات دارند [۲۳]. از طرف دیگر، طبق پژوهش زاهدی و همکاران [۲۴] توان خروجی متوسط سالانه پیل سوختی غشاء پلیمری مورد استفاده ۴۴ کیلووات محاسبه گردید. بازده پیل معادل ۰/۴ بود. لذا استفاده از پیل سوختی با توانی بالاتر از ۱۰۰ کیلووات ضروری به نظر می‌رسید. سامانه به‌گونه‌ای راه‌اندازی شد که سه یا چهار توربین بادی به‌همراه یک پیل سوختی و الکترولیز تأمین‌کننده هیدروژن برق منطقه را تأمین کنند.

#### ۱.۴. تحلیل اقتصادی

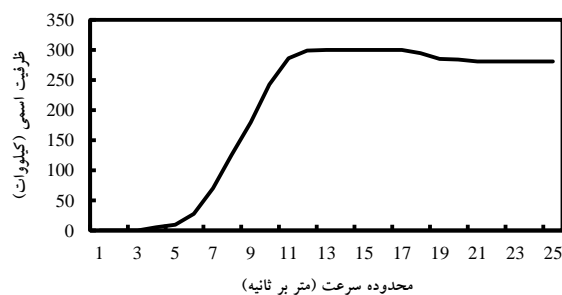
در شبیه‌سازی حاضر، دو طرح برتر از نظر کمینه‌سازی هزینه انرژی و هزینه فعلی سرمایه با در نظر گرفتن ۳ و ۴ توربین بادی برای سامانه معرفی شدند. با در نظر گرفتن ۳ توربین بادی برای تأمین برق منطقه کوهین هزینه انرژی ۰/۷۵۹۹ دلار بر کیلووات ساعت و هزینه فعلی سرمایه ۵،۲۳۵،۰۶۶ دلار محاسبه شد. در حالی که با در نظر گرفتن ۴ توربین بادی این شاخص‌های اقتصادی به ترتیب ۰/۷۸۵۴ دلار بر کیلووات ساعت و ۵،۴۱۱،۱۶۲ دلار خواهند بود. جزئیات این دو طرح برتر در جدول (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): میانگین روزانه سرعت باد

جدول (۳): مشخصات فنی توربین بادی NTK300

مشخصات	واحد	مقدار
توان نامی	kW	۳۰۰
قطر روتور	m	۲۸
ارتفاع هاب	m	۳۱
بازه سرعت	m/s	۴-۲۵
تعداد پره	-	۳



شکل (۵): منحنی توان توربین بادی NTK300

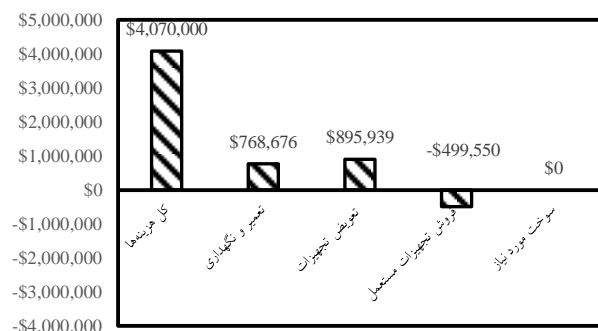
توربین بادی در نظر گرفته شده در این پژوهش، توربین ۳۰۰ کیلوواتی نوردتانک<sup>۱</sup> (NTK) دارای ژنراتور شرکت برق سراسری سوئدی براون-بوری<sup>۲</sup> (ABB) بود که مشخصات فنی آن در جدول (۳) و منحنی توان آن در شکل (۵) آمده است. علت استفاده از توربین‌های ۳۰۰ کیلوواتی به جای توربین‌های بادی ۶۶۰ کیلوواتی، تناسب بیشتر ظرفیت این توربین‌ها با تأمین برق همه خانوارهای منطقه کوهین به‌همراه تأمین برق الکترولیزر تولیدکننده هیدروژن پیل سوختی بود. ضمن اینکه انتخاب چند توربین با ظرفیت کمتر سبب افزایش قابلیت اطمینان در سامانه می‌شد [۱۸].

1. Nordtank Energy Group (NTK)  
2. ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) Brown Boveri (ABB)

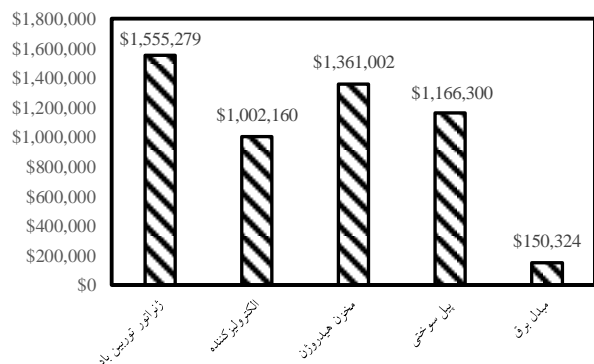
جدول (۵): نتایج دو طرح برتر اقتصادی

قیمت	توربین بادی	پیل سوختی (کیلووات)	الکترولیزر (کیلووات)	مخزن هیدروژن (کیلوگرم)	مبدل (کیلووات)	ارزش فعلی (کیلووات)	انرژی (کیلووات)
۳	۱۲۰	۴۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰	۳۰۰۰	۵,۲۳۵,۰۶۶	۰/۷۵۹۹
۴	۱۲۰	۳۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰	۳۰۰۰	۵,۴۱۱,۱۶۲	۰/۷۸۵۴

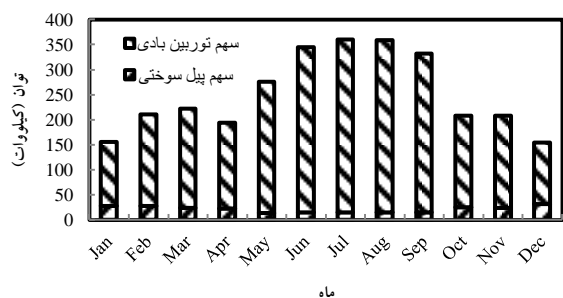
انرژی سالیانه و توان اسمی است. نتیجتاً فاکتور ظرفیت سامانه بدون پیل سوختی برابر ۲۶٪ و در صورت حضور پیل سوختی این عدد به ۲۸/۸٪ افزایش یافت. در این صورت با در نظر گرفتن فرض برقرسانی ۲۵۰ خانوار، این سامانه قادر به تأمین کامل و قابل اطمینان تقاضای برق این خانوارها از طریق منابع کاملاً تجدیدپذیر بود. شکل (۸) نشانگر سهم تولید توربین بادی و پیل سوختی در ماه‌های مختلف است. این نمودار دو نتیجه مهم به دست می‌دهد: اولاً در آذر و دی که وزش باد در منطقه در کمترین میزان خود در سال قرار دارد، میزان تولید توان توسط پیل سوختی بیشتر از ماه‌های دیگر است. ثانیاً در ماه‌های تابستان که از یک سو تقاضای برق بیشتر بوده و از سوی دیگر وزش باد در وضعیت بسیار مطلوبی قرار دارد، عمده تولید توسط توربین‌های بادی انجام گرفته و تمام تقاضا برآورده می‌گردد.



شکل (۶): هزینه‌های تنزیل شده کل پروژه به تفکیک انواع هزینه‌ها



شکل (۷): هزینه‌های کل به تفکیک اجزای سامانه



شکل (۸): سهم تولید توربین بادی و پیل سوختی در ماه‌های مختلف

پس از تعیین هزینه‌های اولیه، با جایگزینی و نگهداری هریک از اجزای سامانه، جریان نقدینگی پروژه برای طول عمر آن قابل ترسیم بود. جریان نقدینگی هزینه اولیه در ابتدای پروژه انجام شد و مقدار آن برابر با ۴,۰۷۰,۰۰۰ دلار گردید. هزینه جایگزینی وابسته به عمر تجهیزات است. کمترین عمر در بین تجهیزات مورد استفاده در این سامانه مربوط به پیل سوختی با ۴۰,۰۰۰ ساعت کارکرد بود. همچنین با در نظر گرفتن طول پروژه به مدت ۲۰ سال، الکترولیزکننده و مبدل نیز باید در سال ۱۵م تعویض می‌گردند (این موارد به عنوان پیش‌فرض نرم‌افزار لحاظ شدند). تحت این شرایط هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر نگهداری توربین بادی به ترتیب ۱,۳۵۰,۰۰۰ دلار و ۲۰۵,۲۷۹ محاسبه شده و کل هزینه تعمیر و نگهداری در ۲۰ سال معادل ۷۶۸,۶۷۶ دلار تخمین زده شد. در حالی که هیچ‌گونه هزینه سوختی وجود نخواهد داشت. در شکل (۶) تمام هزینه‌های تنزیل شده اجزای سامانه نشان داده شده است.

شکل (۷) نیز بیانگر هزینه‌های کل به تفکیک اجزای سامانه است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیشترین هزینه صرف توربین بادی و مخازن ذخیره هیدروژن می‌شود. کمترین هزینه نیز مربوط به مبدل بود.

#### ۲.۴. میزان تولید انرژی سامانه

محاسبات نشان داد که در سامانه هیبریدی مورد نظر با در نظر گرفتن طرح اول، سالانه به میزان ۱۷۹۵ مگاوات ساعت برق تولید می‌شود که از این مقدار ۸۸٪ معادل ۱۵۸۰ مگاوات ساعت سهم توربین‌های بادی و ۱۲٪ معادل ۲۱۶ مگاوات ساعت سهم پیل سوختی بود. به منظور به دست آوردن فاکتور ظرفیت سامانه مذکور، فرض شد توربین‌های بادی به تنهایی در تمام ساعات شبانه‌روز سال با ظرفیت نامی خود در حال تولید توان هستند.

$$CF = \frac{AEP(kWh)}{8760(h) \times NP(kW)} \quad (8)$$

که در آن  $CF$ ،  $AEP$  و  $NP$  به ترتیب ضریب ظرفیت، میزان تولید

با توجه به موارد بالا بر طبق طرح اول خواهیم داشت:  
 $1,579,928 \text{ kW/year} = 234/55 \times 6736$ : تولید برق توربین های بادی  
 $44 \times 4901 = 215,644 \text{ kW/year}$ : تولید برق پیل سوختی  
 $1,795,572 \text{ kW/year}$  = مجموع تولید سالانه برق  
 $250 \times 2740 = 685,000 \text{ kW/year}$ : مصرف برق منطقه کوهین  
 $1,075,726 \text{ kW/year} = 46/41 \times 5/7 \times 4901$ : مصرف برق الکترولیزر  
 $1,760,726 \text{ kW/year}$  = مجموع مصرف سالانه برق  
 همان طور که ملاحظه می شود، این سامانه قادر به تأمین کامل و قابل اطمینان تقاضای برق خانوارهای منطقه کوهین از طریق منابع کاملاً تجدیدپذیر خواهد بود.

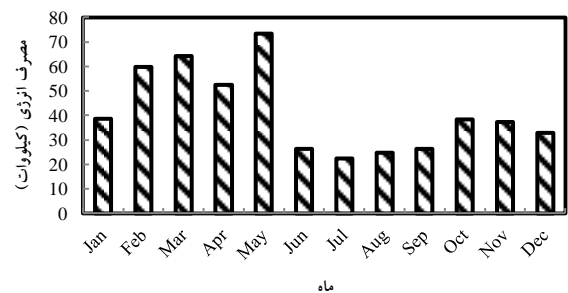
### ۵. نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش یک سامانه هیبریدی برای اتصال به نیروگاه بادی، جهت تأمین توان قابل اطمینان با تولید هیدروژن معرفی شد. سامانه هیبریدی که در این پژوهش معرفی شد، متشکل از چهار جزء اصلی بود: توربین بادی، الکترولیزکننده، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی. سازوکار سامانه مذکور به این صورت است که در ساعات کم‌باری، توان اضافی تولیدشده توسط توربین بادی وارد واحد الکترولیز شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌گردد. هیدروژن و اکسیژن تبدیل شده فشرده شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌گردند. این گازها در ساعات پیک مصرف (زمانی که توان تولیدی توسط نیروگاه بادی کمتر از میزان تقاضای شبکه است) برای تولید برق وارد پیل سوختی می‌گردند تا تقاضای برق شبکه ارضا گردد. در این پژوهش سامانه هیبریدی مذکور برای تأمین برق ۲۵۰ خانوار تحلیل شده و مطالعه موردی برای سامانه موردنظر در منطقه کوهین انجام شد. بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سامانه فوق حاکی از آن بود که در بهترین طرح (متشکل از ۳ توربین بادی)، میزان توان تولیدی سالانه سامانه هیبریدی ۱۷۹۵ مگاوات خواهد بود که از این مقدار ۱۲٪ سهم پیل سوختی است. سامانه هیبریدی باعث افزایش ضریب ظرفیت نیروگاه بادی به میزان ۲/۸٪ می‌شود. هزینه انرژی محاسبه‌شده برای سامانه هیبریدی ۰/۷۵۹۹ دلار و ارزش فعلی سرمایه ۵,۲۳۵,۰۶۶ دلار خواهد بود.

طبق محاسبات برآورد شد که در این سامانه، توربین بادی به‌طور متوسط خروجی معادل با ۲۳۴/۵۵ کیلووات دارد. این سه توربین سالانه ۶۷۳۶ ساعت در کار هستند. در نتیجه هزینه هم‌تراز شده برای توربین های بادی معادل ۰/۰۶ دلار بر کیلووات ساعت اندازه‌گیری شد. از طرف دیگر طبق شکل (۸)، پیل سوختی سالانه ۴۹۰۱ ساعت در کار بوده و به‌طور متوسط توان خروجی ۴۴ کیلوواتی خواهد داشت.

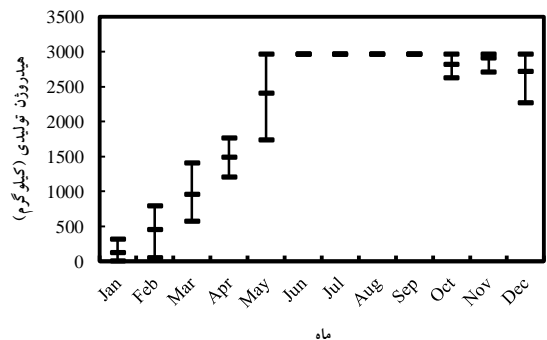
### ۳.۴. میزان تولید هیدروژن

سامانه هیبریدی این پژوهش سالانه ۱۴۸۶۸ کیلوگرم معادل ۲۱۰۰۵۵ لیتر گاز هیدروژن تولید می‌کند. شکل (۹) بیانگر مصرف برق الکترولیزر برای تولید هیدروژن در ماه‌های مختلف سال است.



شکل (۹): هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزکننده ر در ماه‌های مختلف

الکترولیزکننده این سامانه انرژی با سالانه ۴۰۴۹ ساعت کارکرد، به‌طور متوسط هر ساعت ۵/۷۰ کیلوگرم و در حالت ماکزیمم در هر ساعت ۸/۶۲ کیلوگرم گاز هیدروژن تولید می‌کند. این الکترولیزکننده به‌طور میانگین برای تولید هر کیلوگرم گاز هیدروژن ۴۶/۴۱ کیلووات ساعت انرژی صرف می‌کند [۲۴]. ظرفیت در نظر گرفته‌شده برای مخزن هیدروژن طبق طرح برتر ۳۰۰۰ کیلوگرم بود که ۱۰٪ آن معادل ۳۰۰ کیلوگرم ظرفیت پرشده ابتدایی مخزن است. این مقدار در انتهای سال هیدروژن موردنیاز برای اول سال بعد را تأمین می‌کند. شکل (۱۰) بیانگر میزان هیدروژن موجود در مخزن در ماه‌های مختلف سال است.



شکل (۱۰): هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزر در ماه‌های مختلف



## فهرست علائم

هزینه جایگزینی تجهیزات	$C_{rep}$	ارزش فعلی سرمایه	$NPC$
هزینه تعمیر و نگهداری	$C_{main}$	قیمت انرژی	$COE$
هزینه فروش تجهیزات (اتمام پروژه)	$C_s$	هزینه سالانه	$AC$
عمر باقی مانده در پایان پروژه	$t_{rem}$	نرخ تنزیل	$f_d$
عمر تجهیزات	$t_{com}$	سود سالانه واقعی	$i$
ضریب ظرفیت	$CF$	سود نامی	$i'$
میزان تولید انرژی سالیانه	$AEP$	نرخ تورم سالیانه	$f$
توان اسمی	$NP$	تعداد سال‌های پروژه	$N$
		هزینه سرمایه‌گذاری	$C_{cap}$

## مراجع

- [1] Hasan N. S., Hassan M. Y., Majid M. S., and Rahman H. A., "Review of Storage Schemes for Wind Energy Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 237-247, 2013.
- [2] Dalton G., Lockington D., and Baldock T., "Feasibility Analysis of Stand-Alone Renewable Energy Supply Options for a Large Hotel," *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1475-1490, 2008.
- [3] Corsini A., Rispoli F., Gamberale M., and Tortora E., "Assessment of H 2-and H 2 O-Based Renewable Energy-Buffering Systems in Minor Islands," *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 279-288, 2009.
- [4] Spyrou I. D. and Anagnostopoulos J. S., "Design Study of a Stand-Alone Desalination System Powered by Renewable Energy Sources and a Pumped Storage Unit," *Desalination*, Vol. 257, pp. 137-149, 2010.
- [5] Bajpai P. and Dash V., "Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation in Stand-Alone Applications: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 2926-2939, 2012.
- [6] Praene J. P., David M., Sinama F., Morau D., and Marc O., "Renewable Energy: Progressing Towards a Net Zero Energy Island, the Case of Reunion Island," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 426-442, 2012.
- [7] Kumar R., Gupta R., and Bansal A. K., "Economic Analysis and Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic Hybrid Energy System Using Biogeography Based Optimization Algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 8, pp. 33-43, 2013.
- [8] Mohamed E. S. and Papadakis G., "Design, Simulation and Economic Analysis of a Stand-Alone Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by Wind Turbines and Photovoltaics," *Desalination*, Vol. 164, pp. 87-97, 2004.
- [9] Kazim A., "Economic and Environmental Assessments of Proton Exchange Membrane Fuel Cells in Public Buildings," *Energy conversion and management*, Vol. 42, pp. 763-772, 2001.
- [10] Zoulias E. and Lymberopoulos N., "Techno-Economic Analysis of the Integration of Hydrogen Energy Technologies in Renewable Energy-Based Stand-Alone Power Systems," *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 680-696, 2007.
- [11] Diaf S., Belhamel M., Haddadi M., and Louche A., "Technical and Economic Assessment of Hybrid Photovoltaic/Wind System with Battery Storage in Corsica Island," *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 743-754, 2008.
- [12] Liu H.-Y. and Wu S.-D., "An Assessment on the Planning and Construction of an Island Renewable Energy System—a Case Study of Kinmen Island," *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 2723-2731, 2010.
- [13] Silva S., Severino M., and De Oliveira M., "A Stand-Alone Hybrid Photovoltaic, Fuel Cell and Battery System: A Case Study of Tocantins, Brazil," *Renewable Energy*, Vol. 57, pp. 384-389, 2013.
- [14] Bezmalinović D., Barbir F., and Tolj I., "Techno-Economic Analysis of Pem Fuel Cells Role in Photovoltaic-Based Systems for the Remote Base Stations," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 417-425, 2013.
- [15] Kalinci Y., Hepbasli A., and Dincer I., "Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Renewable Energy System with Hydrogen Production and Storage Options," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 7652-7664, 2015.
- [16] Barati H. and Aminzadeh H., "Load Power and Frequency Control Based on Modified Droop Method in Hybrid Systems-Wind Turbine/ Photovoltaic/ Fuel Cell in Autonomous Stand-Alone Micro-Grids," *Energy: Engineering & Management*, Vol. 6, pp. 28-39, 2016.
- [17] Roshandel r., ahmadi s., and rezaie mirghaed m., "Modeling of a Combined Wind Turbine-Fuel Cell Hybrid Power System and Contribution of Fuel Cell Electrical Supply Demand in Case Study," *Energy: Engineering & Management*, Vol. 2, pp. 12-19, 2012.
- [18] Duffy A., Rogers M., and Ayompe L., *Renewable Energy and Energy Efficiency: Assessment of Projects and Policies*: Wiley, 2015.
- [19] «سرشماری عمومی نفوس و مسکن ایران»، مرکز آمار ایران ۱۳۹۵.
- [20] «آمار سالانه شبکه توزیع برق»، شرکت توزیع برق استان قزوین ۱۳۹۵.
- [21] Avadikyan A., Cohendet P., and Héraud J. A., *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies*: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [22] Engineering N. A., Council N. R., Sciences D. E. P., Systems B. E. E., and Use C. A. S. F. H. P., *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*: National Academies Press, 2004.

[۲۳] «اسناد کالیبراسیون سنسورهای سرعت سنج منطقه کوهین»، سازمان

انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، ۱۳۹۵.

[24] Zahedi A., Amirklili S. A., and Ghaffari Nejad A., "*Lab Scale Production of Wind Power-Fuel Cell Hybrid Systems by Use of Electrolysis Process and Study of Technical Analysis*," Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, pp. 425-432, 2016.