



مروری بر سیستم‌های هیبریدی انرژی‌های تجدیدپذیر (آبی، بادی و خورشیدی) و مطالعات نوین این حوزه با تمرکز بر تولید برق در نواحی مختلف دنیا

شقایق دانه کار، حسین یوسفی^{*۲}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

*نویسنده مسئول: hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به نیاز روز افزون جمعیت جهان به تولید برق بیشتر، هزینه فزاینده تامین برق از سوخت‌های فسیلی و به موازات آن مقرون به صرفه بودن منابع آبی، خورشیدی و بادی در امر تولید، اهمیت جایگزینی انرژی‌های پاک با منابع آلاینده و سنتی روز به روز بیشتر احساس می‌شود. با این حال، توسعه سیستم‌های تجدیدپذیر نیز عاری از چالش نمی‌باشد. ماهیت متناوب و پیش‌بینی‌ناپذیر منابع بادی و خورشیدی سبب گشته است اتکای کامل به سیستم منفر تجدیدپذیر برای پوشش برق مورد نیاز در بسیاری از کشورهای دنیا امکان‌پذیر نباشد. به همین دلیل سیستم‌های هیبریدی متشکل از دو یا چند منبع تجدیدپذیر با افزایش ثبات تولیدی سیستم و کاهش هزینه‌های مربوطه، به عنوان راه حلی مطلوب در یکی دو دهه اخیر مورد توجه کارشناسان و متخصصان قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر ابتدا وضعیت تولید برق در جهان به تفکیک منابع و سپس کشورهای تولیدکننده و هزینه‌های کنونی تولید برق از منابع فسیلی در قیاس با منابع تجدیدپذیر به صورت مختصر مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس سیستم‌های هیبریدی متشکل از سه منبع اصلی تجدیدپذیر (آبی، خورشیدی و بادی) با هدف تولید برق در نقاط مختلف دنیا مرور شده و به یافته‌ها و طرح‌های نوین در مطالعات مربوط به بهینه‌سازی و امکان‌سنجی استقرار این سیستم‌ها اشاره شد.

واژگان کلیدی: سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر، سیستم‌های خودکفای تولید برق، انرژی آبی، انرژی بادی، انرژی خورشیدی



A Review on Hybrid Renewable Energy Systems (Hydro, Wind and Solar) and Related Novel Studies, Focusing on Power Generation Worldwide

Shaghayegh Danehkar¹, Hossein Yousefi^{2*}

1- M.S. in Ecohydrology, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author: hosseinyousefi@ut.ac.ir

Abstract

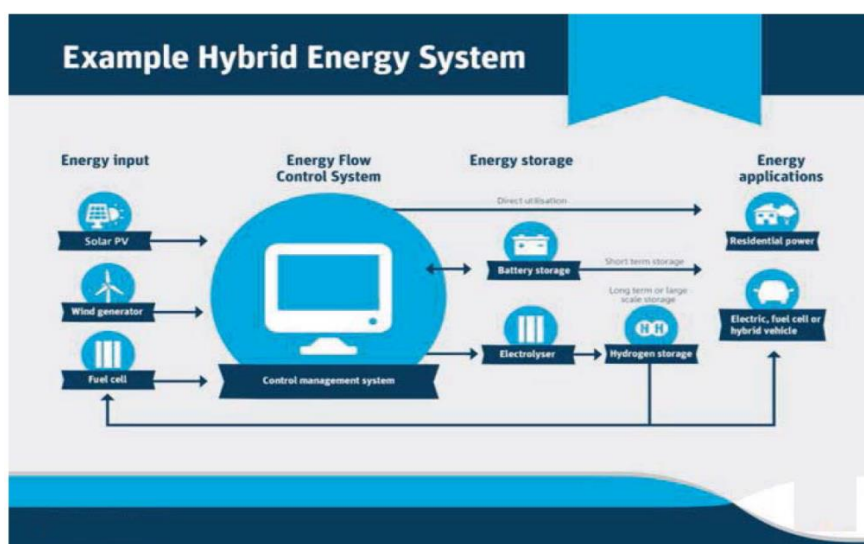
Considering the fast growing demand for electricity, increasing costs of power generation by fossil fuels and simultaneously cost-effectiveness of hydropower, solar and wind sources in electricity production, the importance of replacing conventional and high carbon sources with clean energies is increasing by day. Nevertheless, the development of renewable energy systems has its own challenges; the intermittent and unpredictable nature of wind and solar sources made it impossible to fully rely on single source renewable energy systems for power generation in many parts of the world. Thus, in the last two decades hybrid systems consisting of two or more renewable sources are drawing attention from experts and researchers as a suitable solution, due to their role in increasing production stability of the system and decreasing related costs. In the present study first, the situation of electricity production around the world based on source and country, and current costs of power generation from fossil fuels in comparison to renewable sources are briefly evaluated. Then hybrid energy systems consisting of the three main renewable sources (hydro, solar and wind) with the goal of supplying electricity worldwide are reviewed and novel finding and designs of related studies in regard of optimization and feasibility of such systems are mentioned.

Keywords: hybrid renewable systems, autonomous power generating systems, hydropower, wind energy, solar energy

۱- مقدمه

امروزه، اهمیت و ضرورت توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر و فواید متعدد آنها بر کسی پوشیده نیست. با در نظرگیری تقلیل سریع و فزاینده سوخت‌های فسیلی، افزایش قیمت این منابع، رشد بی‌رویه جمعیت جهان و نیازهای انرژی-محور آن، و مهم‌تر از همه، تهدیدهای زیست‌محیطی مختلفی که به سبب استفاده دیرینه انسان‌ها از منابع فسیلی، اقلیم، اکوسیستم‌ها و زیست‌بوم‌های گوناگون را در نقاط مختلف دنیا درگیر خود ساخته است، همگی بر لزوم و ضرورت جایگزینی فراگیر منابع تجدیدپذیر و پاک با منابع سنتی‌تر تامین انرژی دلالت می‌کنند. در این میان سیستم‌های هیبریدی و چندگانه انرژی‌های تجدیدپذیر حوزه‌ای به نسبت تازه‌تر و برخوردار از پتانسیل‌های فراوان در پاسخگویی به تقاضا برای انرژی می‌باشند.

به طور کلی این سیستم‌ها به آن دسته از فناوری‌هایی اطلاق می‌شود که از تلفیق و یکپارچگی دو یا چند منبع تجدیدپذیر (و گاهی سنتی) و بهره‌برداری همزمان از آنها حاصل گشته‌اند. ادغام منابع انرژی همچون خورشیدی، بادی، آبی، زمین گرمایی و غیره، در کنار واحدهای ذخیره ساز مناسب، این قابلیت را دارد که در تامین برق مورد نیاز و به هنگام پیک‌سای، نسبت به سیستم‌هایی که تنها از یک منبع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند کارایی بالاتر، مقرون به صرفه‌تر و سازگارتری را با محیط‌زیست به نمایش بگذارد [۱]. به طور خاص کارکرد آنها در برطرف‌سازی بهینه‌تر ویژگی تناوبی منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی قابل‌ملاحظه می‌باشد [۲]. گرچه این سیستم‌ها هم در اتصال با شبکه سراسری توزیع برق و هم به صورت مستقل و خودکفا قابلیت بهره‌برداری و تولید برق را فراهم ساخته‌اند، امروزه توسعه و استفاده از آنها به عنوان مورد دوم (بالاخص در تلفیق با باتری‌های ذخیره‌ساز) به عنوان راهکاری قابل‌اتکا برای تامین برق منابع دورافتاده مورد توجه قرار گرفته‌است [۳-۴]. در این راستا، انتخاب نوع مناسب این دسته از سیستم‌های هیبریدی بر حسب فراوانی منابع تجدیدپذیر و میزان دسترسی به آنها، محدودیت‌های فنی-اقتصادی و پیش‌نیازهای لازم برای استقرار باثبات سیستم، صورت می‌پذیرد [۵]. شکل ۱، نشان‌دهنده نمای کلی یک سیستم هیبریدی می‌باشد.



شکل (۱) شماتیک کلی یک سیستم هیبریدی متشکل از واحدهای فتوولتائیک خورشیدی، توربین‌های بادی و سلول‌های سوختی به عنوان تامین کنندگان انرژی [۶]

چنانچه اشاره شد به کارگیری این سیستم‌ها در نواحی دور و خارج از پوشش شبکه برق سراسری در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران و کارشناسان حوزه انرژی واقع شده و مطالعات گوناگونی پیرامون ارزیابی کارکرد این دسته از سیستم‌ها، بهینه‌سازی آنها

و جایگذاری این تولید کنندگان نوین برق در مدل‌های اقتصادی مختلف انجام گرفته است. برای مثال ساول^{۱۰} همکاران در سال ۲۰۱۸، به ارزیابی مروری و قیاسی سیستم‌های تلفیقی بادی-خورشیدی، استراتژی‌های بهینه‌سازی و همچنین به طور خاص به بررسی عملکرد این سیستم‌ها در منطقه به نسبت دور از دسترس باروانی^{۱۱} هند پرداخته‌اند. در این پژوهش محققان بر اهمیت بهینه‌سازی مبدل جریان متناوب به مستقیم و بالعکس برای جلوگیری از اتلاف برق تولیدی در فرایند تبدیل، حذف اثر فرایندهای رندوم ذخیره و آزادسازی برق بر عملکرد و عمر باتری، و نقش اتصال سیستم هیبریدی به شبکه برق سراسری برای ارتقای کلی کارکرد سیستم تاکید نمودند [۷]. تعدادی از محققان نیز با به کارگیری روش‌های مختلف به تعیین ابعاد مناسب و بهینه سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر پرداخته و در این میان به ابعاد واحد ذخیره ساز برای پاسخگویی مناسب به پیک سایه و فراهم‌سازی برق در ساعات پرمصرف بسیار تاکید داشته‌اند [۸-۱۰]. بر مبنای ابعاد و سائز سیستم فاسیو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸) به طبقه‌بندی سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر همت گذاشته‌اند [۱۱]. طبقه بندی آنها بدین شرح می باشد.

جدول ۱ طبقه‌بندی سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر بر مبنای ابعاد [۱۱]

کارکرد	ظرفیت تولیدی	نوع
خانه‌های منفرد و دور از دسترس	> 5 کیلووات/ساعت	کوچک مقیاس
جوامع منفرد و دور از دسترس	بین ۵ تا ۱۰۰ کیلووات/ساعت	میان مقیاس
تامین برق ناحیه‌ای	< 100 کیلووات/ساعت	بزرگ مقیاس

پیرامون اهمیت اقتصادی و توسعه‌محور سیستم‌های هیبریدی در تولید برق جوامع کوچک‌تر و روستایی، زبرا^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عوامل تاثیر گذار بر عملکرد این سیستم ها در شبکه های کوچک برق در کشورهای در حال توسعه پرداخته اند [۱۲]. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد که حمایت دولتی و سامانمندی جامعه روستایی عنصری کلیدی در برپایی و استقرار موفق سیستم های هیبریدی تجدید پذیر می باشد. این پژوهش همچنین با مقایسه هزینه همتراز شده انرژی^{۱۴} در بین سیستم های دیزل (بین ۹۲,۰ دلار/کیلووات بر ساعت تا ۳۰,۱ دلار/کیلووات بر ساعت)، سیستم فتوولتائیک خورشیدی (بین ۴۰,۰ دلار/کیلووات بر ساعت تا ۶۱,۰ دلار/کیلووات بر ساعت) و سیستم هیبریدی دیزل-فتوولتائیک (بین ۵۴,۰ دلار/کیلووات بر ساعت تا ۷۷,۰ دلار کیلووات بر ساعت)، سیستم دیزل را به عنوان گران‌ترین گزینه تامین برق در پژوهش فوق تشخیص دادند. این پژوهش به جای گسترش شبکه برق سراسری، توسعه سیستم های هیبریدی تجدید پذیر را راه حل ارزان تر و مناسب تری برای تامین برق در کشورهای توسعه یافته ارجح دانست. علاوه بر پژوهش های مذکور طرح های تلفیقی پیشنهادی متعددی پیرامون منابع تجدیدپذیر گوناگون (خورشیدی-آبی، بادی-آبی، خورشیدی-ژئوترمال و...) در طی سال‌های اخیر توسط محققان در کشورهای مختلف ارائه گشته است که به مهم‌ترین یافته های آنان در بخش های آتی مقاله پیش رو اشاره خواهد شد.

در پژوهش حاضر سیستم‌های هیبریدی انرژی که برای تولید برق بر پایه سه منابع اصلی تجدیدپذیر (آبی، خورشیدی، بادی) استقرار یافته اند مورد ارزیابی قرار گرفته و پیشرفت های نوین در توسعه و بهینه سازی این سیستم ها مرور شده اند. در این راستا ابتدا وضعیت کلی تولید برق در جهان به طور مختصر شرح داده شده (بخش ۲)، سپس در بخش ۳ تا ۶ سیستم های هیبریدی تجدید

¹⁰. Sawle

¹¹. Barwani

¹². Faccio

¹³. Zebra

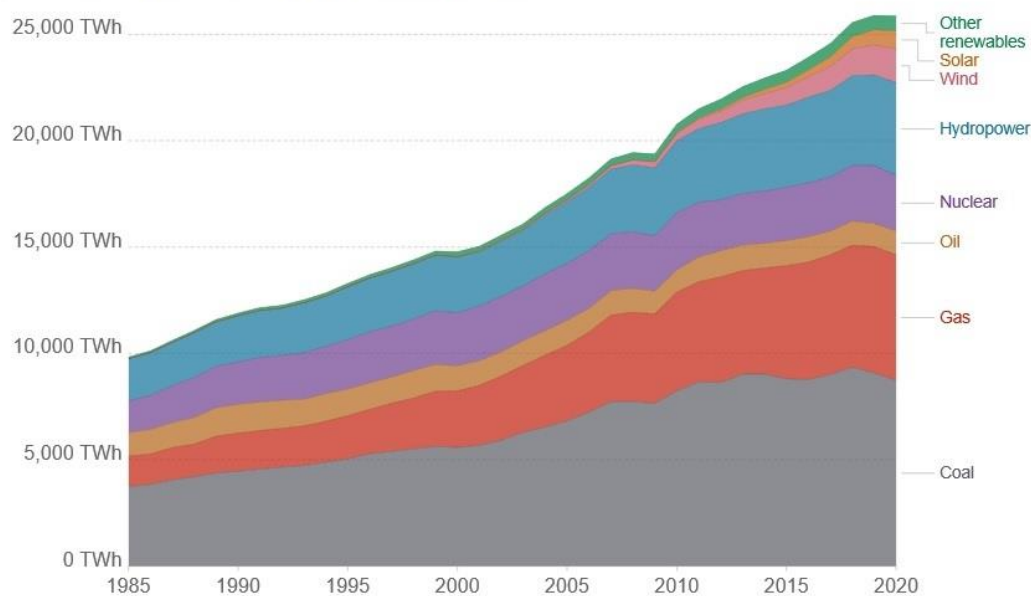
¹⁴. Levelized cost of energy (LCOE)

پذیر به تفکیک منبع انرژی تشریح گشته اند. در پایان و در بخش ۷ بحث و نتیجه گیری قابل مشاهده می باشد.

۲- مروری بر وضعیت تولید الکتریسیته در جهان

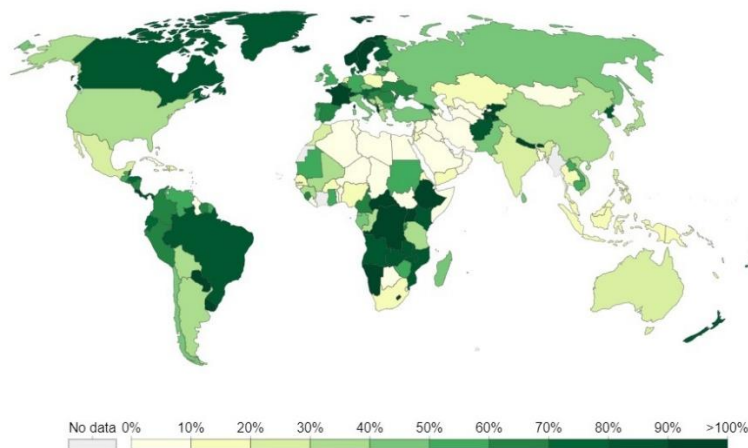
الکتریسته در کنار گرمایش و حمل و نقل یکی از سه مولفه اصلی برای محاسبه مصرف انرژی کل در سطح محلی، منطقه ای، ملی و یا جهانی می باشد. به جرات می توان گفت در میان این سه مولفه تولید و تولید برق در نقاط مختلف دنیا از بالاترین سطح اهمیت برخوردار بوده و تمرکز بر پایین آوردن هزینه تولید آن یکی از اولویت های اصلی در سیاست گذاری های انرژی محور هر کشوری می باشد. شکل ۲ میزان تولید برق در دنیا را بین سال های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ به تفکیک منبع [۱۳] نشان می دهد.

میزان تولید برق در جهان به تفکیک منبع تا سال ۲۰۲۰



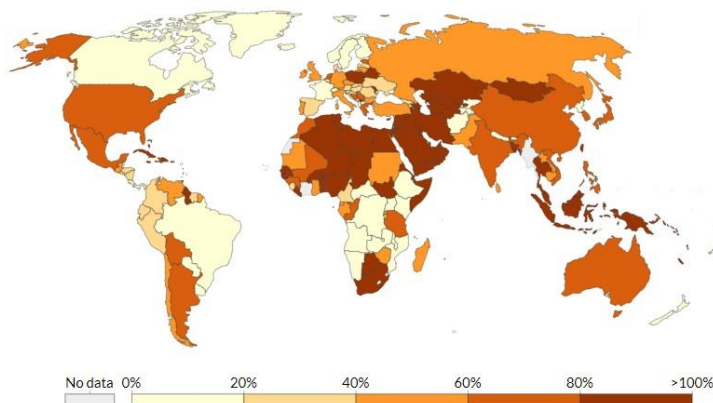
شکل ۲) میزان تولید برق در جهان به تفکیک منبع، بین سال های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ [۱۳]

چنانچه مشاهده می شود سهم سوخت های فسیلی (به ترتیب زغال سنگ، گاز و نفت) در تامین برق مورد نیاز نسبت به انرژی های تجدید پذیر بیشتر بوده و این شکاف با گذر اگر بیشتر نشده باشد، به نفع منابع تجدیدپذیر نیز تمایلی معناداری پیدا نکرده است. از طرف دیگر گرچه در طی ۳۵ سال گذشته سهم منابع تجدید پذیر در تولید برق افزایش یافته است (به ترتیب انرژی آبی، بادی، خورشیدی و دیگر انواع) اما این منابع قادر نبوده اند به طور قابل ملاحظه ای سهم خود را در تولید برق کل نسبت به منابع فسیلی افزایش دهند. به طور کلی با افزودن سهم انرژی هسته به منابع تجدیدپذیر، برآورد شده است که در حال حاضر تنها حدود ۳۷٪ برق تولیدی جهان وابسته به منابع تجدیدپذیر می باشد. شکل ۳ نشان دهنده سهم منابع تجدید پذیر در تولید انرژی به تفکیک کشور می باشد [۱۳].

سهم منابع تجدیدپذیر در تولید برق به تفکیک کشور، ۲۰۲۰

شکل ۳) سهم منابع تجدیدپذیر در تولید برق به تفکیک کشور در سال ۲۰۲۰

چنانچه ملاحظه می‌شود گرچه برخی از کشورها همچون ایسلند، سوئد، فرانسه، و یا حتی کنگو و اتیوپی اتکای خود به منابع تجدیدپذیر تولید برق را به بالای ۹۰٪ رسانده‌اند. این در حالی است که بخش عمده‌ای از کشورهای دنیا همچنان کمتر از ۵۰٪ تولید برق را برعهده منابع تجدیدپذیر گذاشته و در مورد برخی کشورها نیز (همچون ایران) اطلاعات قابل استناد یا کاملی وجود ندارد. متعاقباً شکل ۴ سهم منابع فسیلی هر کشور را در تامین برق مصرفی تا سال ۲۰۲۰ به نمایش می‌گذارد [۱۳]. چنانچه ملاحظه می‌شود بیشتر کشورهای جهان به خصوص در خاورمیانه، آفریقای شمالی، و آمریکای جنوبی برای تولید برق به منابع سنتی‌تر انرژی اتکا دارند. در این میان کشورهایی همچون لیبی، عربستان سعودی، ایران، نیجریه، و مصر همچنان بیش از ۹۰٪ برق مصرفی خود را از طریق سوخت‌های فسیلی تولید می‌نمایند.

سهم سوخت‌های فسیلی در تولید برق به تفکیک کشور، ۲۰۲۰

شکل ۵) سهم منابع فسیلی در تامین برق در سال ۲۰۲۰ به تفکیک کشور

به گزارش آژانس جهانی انرژی^{۱۵} در آمار سالانه خود در ۲۰۲۰، هزینه‌های هم‌تراز شده تامین برق توسط منابعی که کمتر به تولید کربن منجر می‌شوند (تجدیدپذیر) به طرز قابل ملاحظه‌ای رو به کاهش بوده و روز به روز فاصله آن با هزینه‌های فزاینده تولید برق

¹⁵. International Energy Agency (IEA)

از سوخت های فسیلی بیشتر می شود [۱۴]. همچنین این گزارش پیش بینی می کند که تا سال ۲۰۲۵ سیستم های بادی مستقر در سواحل از پایین ترین هزینه های هم تراز تامین برق برخوردار گردند. یکی از شواهد این پیش بینی کاهش چشمگیر هزینه تولید برق از باد در طی پنج سال اخیر (کاهش از بالای ۱۵۰ دلار/مگاوات بر ساعت به زیر ۱۰۰ دلار/مگاوات بر ساعت) بوده است. این گزارش همچنین به اهمیت و جایگاه رو به توسعه انرژی خورشیدی و آبی در مقام های دوم و سوم اشاره می نماید. بدین ترتیب همانگونه که از اطلاعات این بخش استنباط می شود، با در نظرگیری آنکه هنوز بسیاری از کشورها تا حد زیادی برای تامین برق به منابع فسیلی وابسته اند (به خصوص کشورهای در حال توسعه که معمولاً از شبکه برق سراسری کمتر گسترش یافته ای برخوردارند) و با مشاهده هزینه های رو به کاهش انرژی های تجدید پذیر و آلاینده های بسیار ناچیز آنها، توسعه سیستم های هیبریدی به دو دلیل اصلی حائز اهمیت می باشد: ۱) قابلیت بالا برای ذخیره حجم زیاد انرژی متعاقباً رهاسازی آن برای تولید برق، ۲) حل مسئله نوسانات طبیعی تولید انرژی توسط منابع تجدیدپذیر منفرد از طریق فراهم سازی واحد های تولیدی پشتیبان و جایگزین.

در ادامه سیستم های هیبریدی آبی، خورشیدی، بادی تشریح خواهند شد.

۳- سیستم های هیبریدی آبی - خورشیدی

یکی از رایج ترین سازه های تولید برق هیبریدی متشکل از منابع تجدید پذیر، تلفیق نیروگاه های خورشیدی فتوولتائیک با نیروگاه های برقابی و سدهای پمپاژی می باشد. گرچه سیستم های خورشیدی متمرکز نیز در چنین طرح های تلفیقی به کار می روند اما عمده تمرکز محققان بر یکپارچه سازی سیستم های فتوولتائیک با دیگر منابع تجدید پذیر می باشد. علاوه بر آنکه سیستم های خورشیدی از مزایای بسیاری برخوردارند همچنان چند مشکل اصلی در سر راه ارتقای آنها وجود دارد که از میان آنها می توان به امکان ذخیره سازی حجمی برق تولیدی، برق رسانی به فواصل دوردست تر و کیفیت پایین برق و کمبود ولتاژ در برخی از موارد اشاره نمود. از سوی دیگر منابع آبی به علت برخورداری از امکان فراهم سازی فوری و آبی برق و انعطاف پذیری در ذخیره و آزادسازی انرژی مکمل بسیار مناسبی برای سیستم های خورشیدی به خصوص در نواحی به دور از شبکه سراسری برق محسوب می شود. در همین راستا و در جهت بهبود مسئله انتقال برق به فواصل طولانی تر و ارتقای انعطاف پذیری سیستم در تنظیم میزان خروجی، در سال ۲۰۱۹، دنگ^{۱۶} و همکاران به ارزیابی اقتصادی یک سیستم خورشیدی-آبی بزرگ مقیاس در شرق و غرب آفریقا پرداختند [۱۵]. نتایج آنها نشان داد که استقرار چنین سیستم هایی در قاره آفریقا به کاهش قیمت همتراز برق، افزایش بهره وری از خطوط انتقال و همچنین کاهش قطع عمده توان به سبب تنظیم پذیری ظرفیت مخزن کمک می نماید. در سیستم پیشنهادی آنها، در ساعات و اوقاتی که تابش خورشیدی بالا می باشد، از بهره وری نیروگاه برقابی کاسته و برق تولیدی توسط سیستم فتوولتائیک به طور کامل مورد استفاده قرار می گیرد. آنگاه زمانی که ساعات آفتابی سپری شده و خروجی سیستم فتوولتائیک پایین می آید، خروجی نیروگاه های برقابی با در نظرگیری میزان برق مورد نیاز تنظیم می گردد.

علاقم پتانسیل فراوان چنین سیستم هایی، به علت نوظهور بودن بسیاری از این طرح ها و سازه ها، اطمینان لازم به کارکرد موثر این سیستم ها که متعاقباً منجر به سرمایه گذاری های بیشتر در این حوزه می شود هنوز به طور کامل به وجود نیامده است. به همین منظور لی^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۲۰ با در نظرگیری یکی از جدیدترین پیشرفت های صورت گرفته در این حوزه، یعنی یکپارچه سازی سیستم های هیبریدی فتوولتائیک شناور و نیروگاه های برقابی، با ارائه ارزیابی مروری مفصلی مزایای چنین سازه هایی را برشمرده و نشان دادند که پتانسیل تولیدی چنین سیستم هایی در جهان هم اکنون معادل ۴۲۵۱ تراوات بر ساعت تا ۱۰۶۱۶ تراوات بر ساعت به صورت سالانه می باشد [۱۶]. همانگونه که پیش از این ذکر شد اهمیت اصلی سیستم های هیبریدی در تامین برق نواحی

¹⁶. Deng

¹⁷. Lee

روستایی و دورافتاده‌ای است که دسترسی راحت به شبکه‌های برق سراسری دسترسی ندارند. سیاهپوترا^{۱۸} و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی عملکرد یک سیستم کوچک مقیاس خورشیدی- آبی در نواحی روستایی و محروم از برق یوگیاکارتا^{۱۹} در اندونزی پرداختند [۱۷]. سیستم پیشنهادی آنها که به کمک تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۲۰} و با در نظر گیری تقاضای موجود برای برق و موقعیت های مطلوب مکانی از نظر دسترسی به منابع تجدیدپذیر مذکور طراحی شده است با استقرار در منطقه انتخابی کولن پروگو، قابلیت تامین برق ۹۶۲ خانوار و تولید ۳۲۷۳ کیلووات بر ساعت را در طول یک روز دارا می باشد. این حجم از برق تولیدی نه تنها پاسخگوی تامین برق مصرفی اجتماع مذکور است بلکه با فراهم سازی ذخیره مازاد، و امکان فروش آن به شبکه برق سراسری ایجادکننده فرصت‌های بهره وری اقتصادی ثانویه نیز می باشد. این پژوهش همچنین یادآور این نکته شد که گرچه هزینه های اولیه ساخت نیروگاه بالا می باشد (به خصوص در رابط با نیروگاه های برقی)، اما هزینه تولید برق به نسبت سوخت‌های فسیلی در حالت حداقلی و نزدیک به صفر می باشد. در شکل ۶ شماتیک یک سیستم هیبریدی- خورشیدی متصل به شبکه برق سراسری به چشم می خورد [۱۷].



شکل ۶) نمای کلی مولفه های اصلی یک سیستم خورشیدی-آبی تولیدکننده برق [۱۷]

در انتها نمی توان از مهم ترین و پیشرفته ترین سیستم آبی تجدید پذیر یعنی سد های تلمبه ای-ذخیره ای و ادغام آن با سامانه های خورشیدی چشم پوشی نمود. این سدها که از راندمان بسیار بالایی برخوردار هستند در حال حاضر یکی از پیشرفته ترین گزینه های موجود برای ذخیره سازی و تولید برق در نقاط مختلف جهان تلقی می گردند. ادغام این سازه ها با سیستم های فتوولتائیک در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. قاعده کارکرد این سیستم ها بسیار آسان است: دو مخزن که در ارتفاعات متفاوتی مستقر گشته اند از طریق یک مجرا یا کانال شیب دار به یک دیگر متصل می شوند. در هنگام نیاز با رهاسازی آب از مخزن بالادست به سمت مخزن پایین دست و تبدیل انرژی پتانسیل آب به انرژی جنبشی، توربین ها به حرکت درآمده و برق تولید می شود. با ادغام شدن در سیستم های خورشیدی، این سازه ها برق تولیدی ناشی از پنل های خورشیدی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و از آن برای پمپاژ کردن آب از سد پایین دست به بالادست استفاده می کنند [۱۸].

2. Syahputra

¹⁹. Yogyakarta

²⁰. Particle swarm optimization (PSO)

۴- سیستم‌های هیبریدی آبی-بادی

سیستم‌های هیبریدی آبی و بادی (بدون دخالت منبع انرژی دیگر) نسبت به مورد پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال در سال‌های اخیر در زمینه توسعه و بررسی این دسته از سیستم‌های هیبریدی نیز تحولات قابل ملاحظه‌ای به چشم می‌خورد. چنانچه پیش از این اشاره شد مزارع بادی ساحلی یکی از ارزان‌ترین گزینه‌های در دسترس برای تولید برق می‌باشند. با این موجود نوسانات فراوان در منابع بادی و ماهیت نسبتاً غیرقابل پیش‌بینی این پدیده اتکای مطلق به آن را برای تولید برق به خصوص در نواحی دور افتاده تر دشوار می‌کند. بدین ترتیب ادغام آن با منابع آبی (به عنوان تولید کننده‌ای با ثبات) مزایای فراوانی را به همراه می‌آورد. سدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در ادغام با منابع بادی نیز (مشابه پنل‌های خورشیدی) گزینه مطلوبی به شمار می‌آید. مطالعات چندی به منظور امکان‌سنجی برپا کردن سیستم‌های تلفیقی تلمبه‌ای-بادی در نواحی مختلف (به خصوص دور افتاده) در اقصا نقاط دنیا صورت گرفته است. از میان آنها می‌توان به پژوهش فنتیدیس^{۲۱} و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود [۱۹]. این محققان به امکان‌سنجی استقرار سیستم مذکور در دهکده کوچکی در پلاکای^{۲۲} یونان پرداخته‌اند. در این راستا در سیستم مورد نظر انرژی تولید شده توسط توربین‌های بادی از طریق یک ایستگاه پمپاژ به سد تلمبه‌ای منتقل شده و تا زمان نیاز در مخزن بالادست ذخیره می‌گردد. نتایج نشان داد با به کارگیری یک توربین آبی متوسط (۳۳۰ کیلوواتی) با همراهی سد پمپاژی قادر به تامین برق مصرفی اجتماع آزمایشی مستقر در پلاکا می‌باشند. توربین به کار رفته در این پژوهش پلتون^{۲۳} بوده که به علت سازگاری با ارتفاع زیاد بین دو مخزن و جریان نسبتاً پایین آب، مناسب تشخیص داده شده است.

در سال ۲۰۱۵، کانالز^{۲۴} و همکاران در پژوهش قابل ملاحظه‌ای این سوال را مطرح می‌کنند که برای یک سیستم هیبریدی آبی-بادی به کارگیری نیروگاه‌های برقی معمولی مطلوب‌تر است و یا استفاده از سدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای [۲۰]. این محققان در ادامه با ارزیابی قیاسی این دو نوع نیروگاه در جنوب برزیل، و به کارگیری شبیه‌سازی‌های طراحی شده در نرم افزار هومر^{۲۵} نشان می‌دهند که سدهای پمپاژی به علت پایین آوردن هزینه‌های مربوطه و همچنین سازگاری بالا با محیط زیست نسبت به نیروگاه‌های برقی سنتی و سوخت‌های فسیلی ارجح‌تر می‌باشند. یافته‌های آنها به این واقعیت اشاره دارد که علاوه بر هزینه‌های اولیه بالای سدهای تلمبه‌ای، هزینه‌های مربوط به فعالیت آنها پایین‌تر بوده و در حالت ایده آل، به نسبت نیروگاه‌های سنتی، به محدوده سیلابی کوچکتری نیازمندند که متعاقباً اثر زیست‌محیطی کمتری بر جای می‌گذارد. افزون بر مسائل فوق، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌هایی که در استقرار چنین سیستم‌هایی موجود است، محدودیت‌های مکانی است. هم سدهای پمپاژی و هم مزارع بادی (در مقایسه با سیستم‌های فتوولتائیک) در دستیابی به مکان مطلوب به پیش‌نیازهای محیطی فزون‌تری اتکا دارند. بدین ترتیب پیدا کردن مکانی که هم برای استقرار مزارع بادی مناسب باشد و هم سدهای تلمبه‌ای کار دشوار و زمان‌بری است. در این راستا در سال ۲۰۲۰، احمدی و همکاران با به کارگیری روش تصمیم‌گیری فازی-ای ان پی^{۲۶} و فازی ویکور^{۲۷} به رتبه‌بندی و تعیین مکان‌های مناسب برای احداث این سیستم هیبریدی در شمال ایران (گیلان) پرداختند. براساس نتایج سد گیلان غرب به عنوان مکان مطلوب انتخاب شد. این مکان همچنین از شرایط ایجاد یک مزرعه بادی به وسعت ۱۳.۲ کیلومتر مربع و ظرفیت تولیدی ۳۱ مگاوات برخوردار است. محققان این پژوهش تاکید می‌کنند با معرفی چهارچوب تئوریک مناسب که با دربرگیری ضوابط مناسب امکان پشت سر گذاشتن هر چالش و مسئله‌ای را در فرایند تصمیم‌گیری چند منظوره می‌توان می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت

21. Fantidis

22. Plaka

23. Pelton

24. Canales

25. HOMER

26. Analytic network process (ANP)

27. VIKOR



[۲۱]. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت با تهیه معیارها و شاخص های مناسب و فرایند تصمیم گیری و وزن دهی مطلوب می توان در مناطق مختلف اقدام به تعیین مکان های بالقوه برای احداث چنین سیستم هایی نمود.

۵- سیستم های هیبریدی خورشیدی-بادی

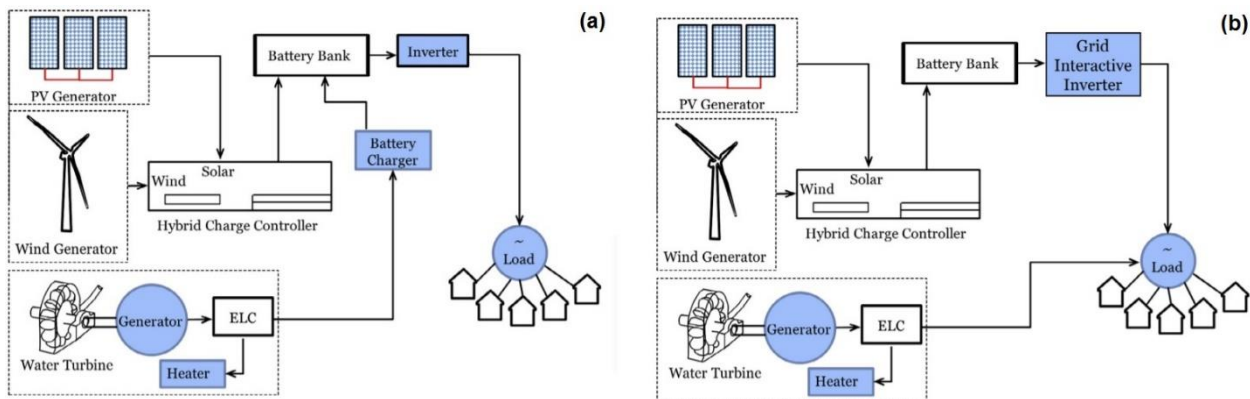
با حذف منابع آبی از سیستم های هیبریدی و اتکا به سیستم های منحصراً خورشیدی-بادی، مسئله تناوب و بروز نوسانات در فرایند تولید برق به طور اجتناب ناپذیری پررنگ تر می شود. از آنجایی که در سیستم های آب محور آب، در کنار تولید برق نقش خازن اصلی را نیز ایفا می کند، حذف این مولفه از سیستم های هیبریدی اهمیت انتخاب و جایگذاری واحد ذخیره ساز مناسب را دو چندان کرده و شاید بتوان گفت چالش اصلی در سیستم های هیبریدی خورشیدی-بادی بحث ذخیره سازی باشد. در این راستا ادغام سیستم های خورشیدی-بادی با سیستم های دیزلی و باتری های گوناگون از راهکار های رایج برای ارتقای اتکاپذیری این سیستم ها به شما می آید [۲۲]. علاوه بر وجود این چالش، سیستم های هیبریدی خورشیدی-بادی نسبت به سیستم های منفرد خورشیدی و بادی از ثبات تولیدی و هزینه های پایین تری برخوردار می باشند و به همین دلیل توسعه آنها در مناطق مستعد حائز اهمیت است. بخش های اصلی این سیستم ها عبارت اند از سلول های فتوولتائیک، توربین های بادی، واحد کنترل کننده و باتری ذخیره ساز. توربین ها انرژی بادی را به مکانیکی و سپس الکتریکی تبدیل می نمایند. با این حال به سبب ماهیت پیش بینی ناپذیر این منبع، برق تولیدی ناپایدار و متناوب می شود. به همین دلیل واحدهای کنترلی این اطمینان را حاصل می کنند که برق تولیدی به صورت پیوسته جریان داشته و در باتری ذخیره شود. سیستم فتوولتائیک نیز با تبدیل انرژی خورشیدی به برق (در قالب جریان مستقیم) آن را در باتری ذخیره کرده و آنگاه واحد کنترلی بسته به نیاز برق واحدهای مصرف کننده به تامین جریان متناوب یا جریان مستقیم برق می پردازد. در سالهای اخیر تعداد قابل ملاحظه ای از مطالعات موردی پیرامون امکان سنجی استقرار این سیستم ها در کشورهای در حال توسعه مختلف [۲۳-۲۷] همچون عربستان سعودی، اتیوپی، مغولستان، نپال، و همچنین ایران انجام گرفته است. با توجه به اهمیت ذخیره سازی و طبیعت متناوب این دو منبع طبیعی انرژی، نوسانات مربوط به ولتاژ و فرکانس، هزینه بالای ذخیره سازی، محدودیت ظرفیت مخزن، و خطرات زیست محیطی مرتبط با به کارگیری باتری ها و مخازن هیدروژنی در میان برخی از اصلی ترین چالش های پیش روی توسعه این دسته از سیستم های هیبریدی می باشد.

۶- سیستم های هیبریدی آبی-خورشیدی-بادی

تلفیق چندگانه منابع تجدیدپذیر یکی از بهترین روش های برطرف سازی کاستی های موجود در سیستم های منفرد و یا دوگانه می باشد. در این راستا تلفیق سه گانه منابع آبی، خورشیدی و بادی که در پاک ترین و مقرون به صرفه ترین گزینه های تامین انرژی و تولید برق هستند در بین کارشناسان و محققان حوزه سیستم های هیبریدی تجدیدپذیر در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این امر نه تنها به ثبات بیشتر تولید و توزیع برق شبکه سراسری و یا سیستم های خودکفا کمک می نماید بلکه به طور قابل ملاحظه ای منجر به کاهش ابعاد و حجم مورد نیاز برای ذخیره سازی و متعاقباً کاهش هزینه های کل می شود. یکپارچه سازی تمام این سه منبع در قالب یک سیستم به خصوص در قالب سیستم های خودکفا هنوز در حال برداشتن گام های آغازین خود می باشد و در قیاس با سایر سیستم های هیبریدی از پیشرفت بسیار کمتری برخوردار بوده است. در این راستا بهانداری^{۲۸} و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای اولین بار امکان استقرار چنین سیستم سه گانه ای را در منطقه ای روستایی در نپال، بدون اتصال به شبکه برق سراسری مورد ارزیابی قرار دادند [۲۸]. این پژوهش دو تکنیک یکپارچه سازی منابع آبی، خورشیدی و بادی را برای ایجاد یک شبکه برق کوچک مقیاس بر پایه این سیستم هیبریدی معرفی نمود؛ در یک روش از واحد هیبریدی

²⁸. Bhandari

کنترلی/شارژکننده برا ادغام سازی استفاده شد. در روش دوم همگام سازی سیستم آبی کوچک مقیاس با تولیدکنندگان خورشیدی و بادی از طریق به کارگیری یک مبدل همگام. شکل ۷ نشان دهنده این دو تکنیک پیشنهادی می باشد.



شکل ۷) سامانه (a) نشان دهنده روش یکپارچه سازی با واحد هیبریدی کنترلی/شارژکننده و سامانه (b) نشان دهنده روش یکپارچه سازی به کمک مبدل همگام می باشد [۲۸].

در سال ۲۰۱۹ نیز ما^{۲۹} و همکاران هماهنگ سازی و سازماندهی بلندمدت یک سیستم هیبریدی آبی- حرارتی- بادی- خورشیدی را به منظور تامین برق استانی در چین مورد ارزیابی قرار دادند [۲۹]. در این راستا ناهماهنگی تولیدی سیستم ابتدا به چهار زیر شاخه ناهماهنگی خورشیدی، بادی، حرارتی و آبی تقسیم شد. سپس برای سه مورد اول بر حسب آنالیزهای رقومی صورت گرفته بر اساس داده های واقعی فعالیت سیستم، برنامه ریزی ها و هماهنگی های مربوط به تنظیم تولید صورت گرفت. در رابط با هماهنگ سازی تولید بخش آبی، بعد از تقسیم بندی سه گانه نیروگاه های آبی موجود در سیستم بر اساس ویژگی های کارکردی، با به کارگیری استراتژی های مختلف شیوه کار این واحدها تنظیم شد. نتایج پژوهش نشان داد که این روش در هماهنگ سازی سیستم چهارگانه تجدیدپذیر برای پوشش کامل برق مورد نیاز موفقیت آمیز بوده است.

۷- بحث و نتیجه گیری

مقاله حاضر به مرور ۴ دسته از سیستم های هیبریدی تجدیدپذیر (آبی-خورشیدی، آبی-بادی، خورشیدی-بادی، و آبی-خورشیدی-بادی) پرداخته است. هدف اصلی از ارتقای چنین سیستم هایی تامین برق در نواحی دورافتاده تری است که دستیابی به شبکه برق سراسری یا امکان پذیر باشد و یا ساکنین را متحمل هزینه های سنگین تر می نماید. با توجه به آنکه توسعه این سیستم ها به ثبات بیشتر تولید برق در منابع تجدیدپذیر و متعاقبا کاهش هزینه ها کمک می کند، اهمیت این سیستم ها به صورت فزاینده ای رو به افزایش است. با این حال این فناوری های نوظهور در نقاط مختلف دنیا همچنان در حال برداشت گام های اولیه خود می باشند. حمایت سیاست گذاران و برنامه ریزان در سطح کلان، حمایت های دولتی و همچنین محلی، جلب اعتماد سرمایه گذاران بازار انرژی، و افزایش مطالعات امکان سنجی استقرار و توسعه این سیستم ها افزون بر دیگر منابع پاک و بالقوه تولید انرژی (زمین گرمایی، زیست توده، هسته ای و...) از عوامل کلیدی موثر بر رشد و گسترش سیستم های هیبریدی تجدید پذیر می باشد.



منابع

- [1] Erdinc O, Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012 Apr 1;16(3):1412-25.
- [2] Dagdougui H, Sacile R, Bersani C, Ouammi A. Hydrogen infrastructure for energy applications: production, storage, distribution and safety. Academic Press; 2018 Feb 3.
- [3] Kondili E, (2010). Design and performance optimisation of stand-alone and hybrid wind energy systems. In *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*. Woodhead Publishing; 2010 81-101.
- [4] Islam SM, Nayar CV, Abu-Siada A, Hasan M. Power Electronics for Renewable Energy Sources. In *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann; 2018 783-827.
- [5] Palatel A. Isolated Hybrid Energy Systems for Remote Locations. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Elsevier; 2017 205-216.
- [6] Zohuri B. Hybrid Renewable Energy Systems. In *Hybrid Energy Systems*. Springer; 2017 1-38.
- [7] Sawle Y, Gupta SC, Bohre AK. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Jan 1;81:2217-35.
- [8] Ekren O, Ekren BY. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied energy*. 2010 Feb 1;87(2):592-8.
- [9] Al-Falahi MD, Jayasinghe SD, Enshaei HJ. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy conversion and management*. 2017 Jul 1;143:252-74.
- [10] Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 199, 112027.
- [11] Faccio, M., Gamberi, M., Bortolini, M., & Nedaei, M. (2018). State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs). *Frontiers in Energy*, 12(4), 591-622.
- [12] Zebra EI, van der Windt HJ, Nhumaio G, Faaij AP. A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021 Jul 1;144:111036.
- [13] Our World in Data Based on BP Statistical Review of World Energy & Ember, Electricity Production by Source, World, 2021
- [14] IEA. Projected Costs of Generating Electricity 2020, IEA, Paris; 2020. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>.
- [15] Deng Z, Xiao J, Zhang S, Xie Y, Rong Y, Zhou Y. Economic feasibility of large-scale hydro-solar hybrid power including long distance transmission. *Global Energy Interconnection*. 2019 Aug 1;2(4):290-9.
- [16] Lee N, Grunwald U, Rosenlieb E, Mirlletz H, Aznar A, Spencer R, Cox S. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*. 2020 Dec 1;162:1415-27.
- [17] Syahputra R, Soesanti I. Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia. *Energy Reports*. 2021 Nov 1;7:472-90.
- [18]] El-Jamal G, Ghandour M, Ibrahim H, Assi A. Technical feasibility study of solar-pumped hydro storage in Lebanon. In *International Conference on Renewable Energies for Developing Countries 2014*;23-28.
- [19] Fantidis JG, Mantzari VC, Kalkani E, Bandekas DV, Vordos N. A hybrid wind and hydroelectric power production system in Plaka, Alexandroupolis, Greece. *International Journal of Advances in Engineering, Science and Technology*. 2013;2(4):376-85.



- [20] Canales FA, Beluco A, Mendes CA. A comparative study of a wind hydro hybrid system with water storage capacity: Conventional reservoir or pumped storage plant?. *Journal of Energy Storage*. 2015 Dec 1;4:96-105.
- [21] Ahmadi SH, Noorollahi Y, Ghanbari S, Ebrahimi M, Hosseini H, Foroozani A, Hajinezhad A. Hybrid fuzzy decision making approach for wind-powered pumped storage power plant site selection: A case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020 Dec 1;42:100838.
- [22] Wagh S, Walke PV. Review on wind-solar hybrid power system. *International Journal of Research In Science & Engineering*. 2017 Mar;3(2).
- [23] Ramli MA, Hiendro A, Al-Turki YA. Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia. *Renewable energy*. 2016 Jun 1;91:374-85.
- [24] Bekele G, Boneya G. Design of a photovoltaic-wind hybrid power generation system for Ethiopian remote area. *energy Procedia*. 2012 Jan 1;14:1760-5.
- [25] Li J, Bo X, Chen Y. Feasibility Analysis of Applying the Wind-Solar Hybrid Generation System in Pastoral Area. In *Future Wireless Networks and Information Systems 2012* (pp. 621-628). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [26] Alex Z, Clark A, Cheung W, Zou L, Kleissl J. Minimizing the lead-acid battery bank capacity through a solar PV-Wind turbine hybrid system for a high-altitude village in the Nepal Himalayas. *Energy Procedia*. 2014 Jan 1;57:1516-25.
- [27] Razmjoo A, Qolipour M, Shirmohammadi R, Heibati SM, Faraji I. Techno-economic evaluation of standalone hybrid solar-wind systems for small residential districts in the central desert of Iran. *Environmental progress & sustainable energy*. 2017 Jul;36(4):1194-207.
- [28] Bhandari B, Lee KT, Lee CS, Song CK, Maskey RK, Ahn SH. A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources. *Applied Energy*. 2014 Nov 15;133:236-42.
- [29] Ma Z, Wang S, Li S, Shi Y. Long-term coordination for hydro-thermal-wind-solar hybrid energy system of provincial power grid. *Energy Procedia*. 2019 Feb 1;158:6231-5