مقاله

# بررسی کاربرد توربین‌های بادی در سیستم‌های هیبریدی نوین

جاماسب پیرکندی*
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
jamasb_p@yahoo.com

رضا حربی منفرد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
momfared1368@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵

## چکیده

افزایش روزافزون مصرف انرژی و محدودیت‌های سوخت فسیلی جوامع گوناگون را بر آن داشته است تا در اندیشهٔ منابع دیگری از انرژی باشند. از جمله مناسب‌ترین و کارآمدترین منابع جایگزین برای سوخت‌های فسیلی انرژی‌های تجدیدپذیر است؛ منابعی که طی سالیان اخیر به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه خیل صنعتگران و پژوهشگران قرار گرفته‌اند. انرژی باد به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی از سال‌های دور مورد توجه بوده است. در ایران نیز با توجه به وسعت مناطق بادخیز، بستر مناسبی جهت گسترش بهره‌برداری از توربین‌های بادی[1] فراهم است. متغیر بودن سرعت باد و درپی آن نوسانات توان خروجی توربین‌های بادی، متخصصان را بر آن داشته است که با ترکیب توربین‌های بادی و صفحات خورشیدی، پیل سوختی یا باتری، توان تولیدی پایدار و دائمی ایجاد کنند. سیستم‌های هیبریدی جدید بازده بالا و توان تولیدی پایدار جهت مصرف در بخش‌های گوناگون دارند. هدف از ارائهٔ این مقاله معرفی انواع سیستم‌های هیبریدی جدید حاصل از ترکیب توربین‌های بادی با سایر سیستم‌های تولید توان، جهت ذخیره‌سازی انرژی و ایجاد توانی پایدار است. برای این منظور، ابتدا سیستم‌های هیبریدی متنوع که از ترکیب توربین‌های بادی با انواع سیستم‌های تولید توان و یا سیستم‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی ایجاد می‌شود، معرفی شده و در ادامه عملکرد آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. معرفی اجزای تشکیل‌دهندهٔ این دسته از سیستم‌های هیبریدی و بررسی نحوهٔ عملکرد آنها از دیگر مواردی است که در این مقاله تشریح خواهد شد.

**واژگان کلیدی:** انرژی تجدیدپذیر، توربین بادی، سیستم‌های هیبریدی

## ۱. مقدمه

امروزه افزایش روزافزون دمای کرهٔ زمین و روند روبه رشد مصرف انرژی در جهان، استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندگی کم را در اولویت قرار داده است. عدم حضور شبکهٔ سراسری برق در مناطق دورافتاده و هزینهٔ بالای خطوط جدید انتقال قدرت به‌دلیل مسافت طولانی و عوارض نامناسب جغرافیایی اغلب

به جستجوی راه‌حل‌های جایگزین می‌انجامد [۱]. امروزه پیشرفت‌های روزافزون در زمینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر سبب ایجاد قالب‌های جدیدی برای استفادهٔ عمومی از این منابع شده است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد نسبت به سایر منابع انرژی دارای رشد و پیشرفت سریع‌تری بوده است. بزرگترین مشکل بر سر راه استفاده از انرژی باد، تغییرات سرعت باد و درپی آن نوسانات توان تولیدی توربین‌های بادی است. این امر به‌طور چشمگیری از قابلیت اطمینان سیستم می‌کاهد. این در حالی است که ترکیب توربین‌های باد با سایر منابع انرژی سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید انرژی می‌شود و انرژی الکتریکی خروجی را پایدار می‌کند [۲]. برای حل این مسئله ترکیب توربین بادی با باتری، پیل سوختی[۲] و صفحات خورشیدی[۳] به‌عنوان یکی از روش‌های نوین تولید توان مطرح می‌باشد. سیستم‌های هیبریدی حاصل بازده بالایی دارند. امروزه نیز پژوهشگران و شرکت‌های متعددی درپی تجاری‌سازی و افزایش توان و بازدهٔ این سیستم‌ها هستند [۳]. طی سالیان گذشته، تحقیقات گسترده‌ای دربارهٔ این نوع از سیستم‌ها در کشورهایی چون اسکاتلند، نروژ، انگلیس و جز این‌ها انجام شده است.

در این مقاله سیستم‌های هیبریدی متنوعی، که از ترکیب توربین بادی با انواع سیستم‌های تولید توان (مانند صفحات خورشیدی و پیل سوختی) و یا سیستم‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی (مانند باتری) ایجاد می‌شود، معرفی شده و در ادامه عملکرد آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. معرفی اجزای تشکیل‌دهندهٔ این دسته از سیستم‌های هیبریدی و بررسی نحوهٔ کارکرد آنها از دیگر موارد مطرح‌شده در این مقاله خواهد بود.

## ۲. سیستم‌های هیبریدی

سیستم هیبریدی سیستمی دینامیکی است که رفتار پیوسته و گسسته‌ای از خود نشان می‌دهد [۵]. اغلب سیستم‌های هیبریدی برای کاربردهای مستقل از شبکه[۴] استفاده می‌شوند [۶]. ترکیب توربین باد با انواع گوناگونی از سیستم‌های تولید یا ذخیرهٔ انرژی مانند باتری، پیل سوختی و صفحات خورشیدی سیستم‌های هیبریدی جدیدی ایجاد می‌کند. بخشی از توان تولیدی در این دسته از سیستم‌های هیبریدی در مصرف‌کننده‌ها استفاده شده و بخشی باقیمانده نیز وارد سیستم‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی مانند باتری یا سایر سیستم‌های جانبی مانند الکترولایزر[۵] می‌شود. سیستم‌های هیبریدی بر پایهٔ توربین بادی اغلب به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در ساعاتی از شبانه‌روز، که انرژی باد زیاد است، از توان تولیدی توربین استفاده شود. در ساعاتی با وزش اندک باد نیز از توان تولیدی سایر سیستم‌های هیبریدشده یا توان ذخیره‌شده در باتری‌ها استفاده می‌شود. در ادامه انواع سیستم‌های هیبریدی بر پایهٔ توربین بادی معرفی و عملکرد هر یک تشریح می‌شود.

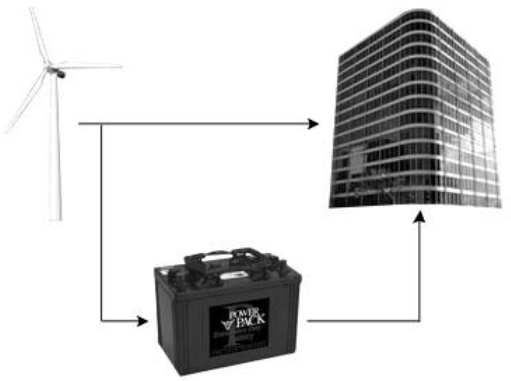
### ۲-۱. ترکیب توربین باد و باتری

از جمله سیستم‌های هیبریدی نوین، ترکیب توربین باد و باتری است. برای کاهش نوسانات توان خروجی از توربین باد، به‌دلیل تغییرات سرعت باد، باتری‌ها برای پایداری توان خروجی به‌کار می‌روند. بدین‌صورت که هر زمان توان تولیدی توربین بادی از توان مصرفی مصرف‌کننده کمتر باشد، باتری اختلاف توان را جبران می‌کند و هر زمان که توان تولیدی از توان مصرف‌کننده بیشتر باشد، توان مازاد صرف شارژ باتری می‌شود. در این نوع از سیستم‌ها اغلب از یک کنترلر[۶] برای جلوگیری از دشارژ کامل یا شارژ بیش از حد باتری استفاده می‌شود. معمولاً این نوع از سیستم هیبریدی در کاربردهای مستقل از شبکه و مناطق دوردست استفاده می‌شوند [۴]. در شکل ۱ نمایی شماتیک از نحوهٔ کاربرد این سیستم نمایش داده شده است.

### ۲-۲. ترکیب توربین باد و صفحات خورشیدی

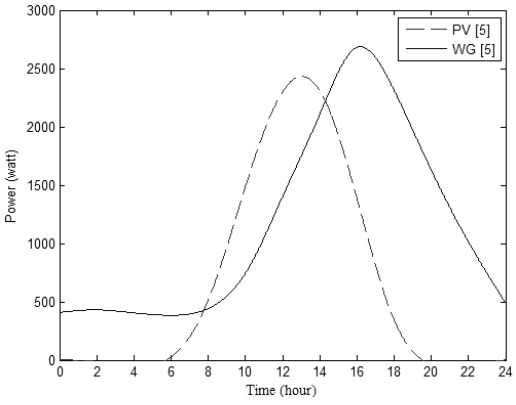
استفاده از ترکیب انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در قالب یک سیستم هیبریدی سبب تولید توان پایدارتر در طول

شبانه‌روز می‌شود. یکی از این سیستم‌های هیبریدی، ترکیب توربین باد و صفحات خورشیدی است. در طول شبانه‌روز، در زمان‌هایی که شدت وزش باد و تابش خورشید به اوج خود می‌رسند، استفاده از این دو انرژی تجدیدپذیر به‌صورت هیبریدی بسیار منطقی‌تر به‌نظر می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، انرژی بادی نسبت به انرژی خورشیدی در ساعات پایانی روز به حداکثر مقدار خود می‌رسد؛ یعنی وقتی خورشید غروب می‌کند و مصرف برق به اوج خود می‌رسد. بنابراین با توجه به اینکه ساعات اوج مصرف مطابق با ساعات فوق است، می‌توان به این نتیجه رسید این دو منبع انرژی مکمل یکدیگرند و در ساعات اوج مصرف می‌توان از آنها استفاده کرد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از نحوهٔ ترکیب توربین بادی و باتری

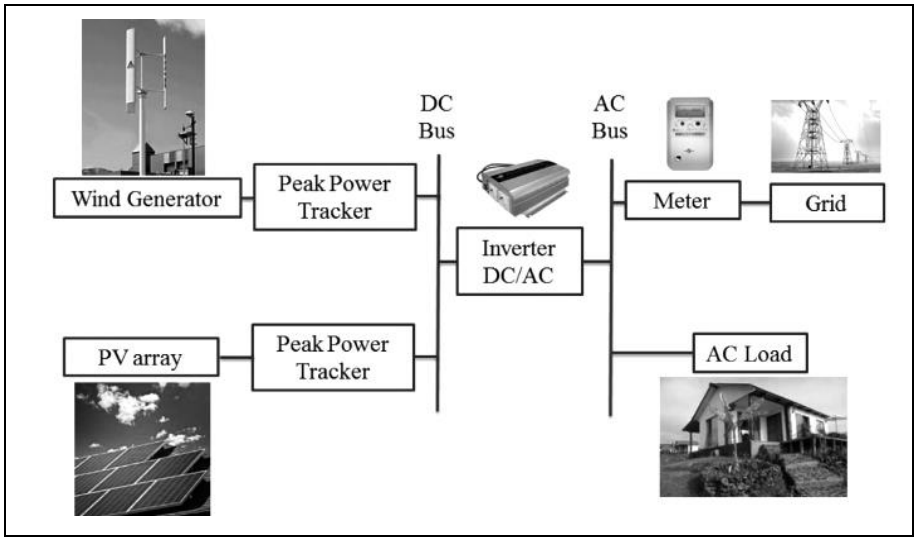
در شکل ۳ پیکربندی سیستم هیبریدی توربین بادی و صفحات خورشیدی نمایش داده شده است. وقتی توان تولیدی سیستم هیبریدی پاسخگوی نیاز مصرف‌کننده‌ها نباشد، شبکهٔ برق‌رسانی به‌عنوان سیستم پشتیبانی عمل کرده، اختلاف توان را جبران می‌کند؛ اما وقتی توان تولیدی سیستم هیبریدی از توان مصرفی بیشتر باشد، توان مازاد به شبکهٔ برق‌رسانی فروخته می‌شود. اگر امکان انتقال توان مازاد بر شبکه وجود نداشته باشد، توان الکتریکی اضافی صرف سایر فرایندهای جایگزین مثل گرمایش و سرمایش، پمپاژ آب و جز این‌ها می‌شود. در این سیستم‌های هیبریدی با استفاده از تبدیل‌کنندهٔ جریان مستقیم به متناوب امکان استفاده از برق تولیدی برای مصارف خانگی وجود دارد.



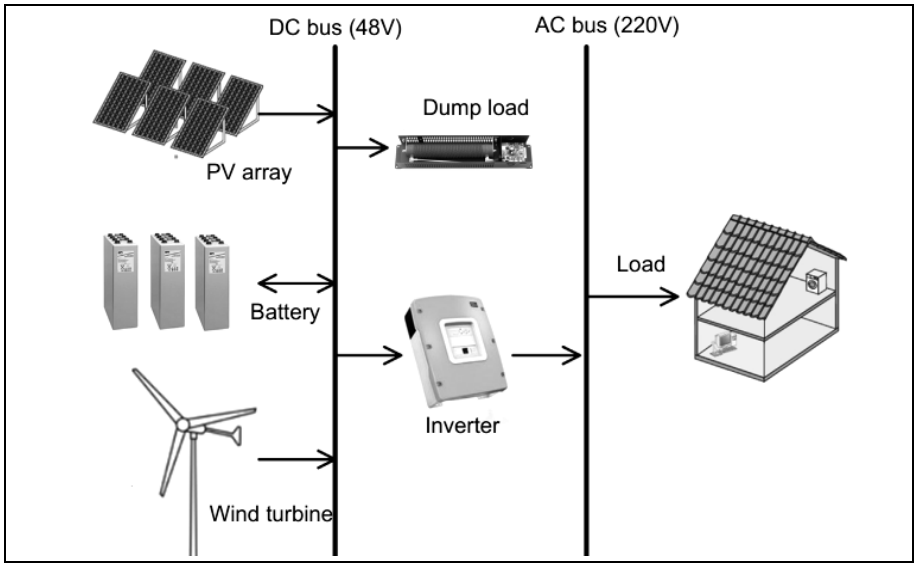

شکل ۲. نمودار توان تولیدی توربین بادی و صفحات خورشیدی در شرایط هوایی نمونه [۷]

## ۳-۲. ترکیب توربین باد، صفحات خورشیدی و باتری

باتری در ترکیب توربین بادی و صفحات خورشیدی جایگزین شبکهٔ برق‌رسانی برای پشتیبانی سیستم در مواقع کمبود توان می‌شود. به‌بیان دیگر، این نوع سیستم هیبریدی برای کاربرد مستقل از شبکه استفاده می‌شود. به‌دلیل ویژگی‌های ناپایدار سرعت باد، تابش خورشید و مصرف توان مصرف‌کننده، باتری‌های اسید سرب مناسب‌ترین گزینه برای ذخیرهٔ انرژی تولیدی در کوتاه‌مدت می‌باشند [۲]. این سیستم هیبریدی شامل ترکیب صفحات خورشیدی، توربین بادی، باتری، مبدل الکتریکی و کنترلر می‌باشد. در شکل ۴ نمایی از آن نمایش داده شده است. توان خروجی توربین بادی و صفحات خورشیدی از نوع مستقیم است، لذا به‌منظور استفاده در مصرف‌کننده‌های گوناگون با استفاده از مبدل‌های الکتریکی به جریان متناوب تبدیل می‌گردد. مازاد برق تولیدی نیز در باتری‌های موجود در سیستم هیبریدی ذخیره می‌شود. با شارژ کامل باتری‌ها مازاد برق تولیدی توسط یک کنترلر هوشمند صرف سایر سیستم‌های جانبی مانند گرمایش هوا یا تولید آب گرم مصرفی می‌شود.




شکل ۳. نمایی شماتیک از سیستم هیبریدی توربین بادی و صفحات خورشیدی [۸]

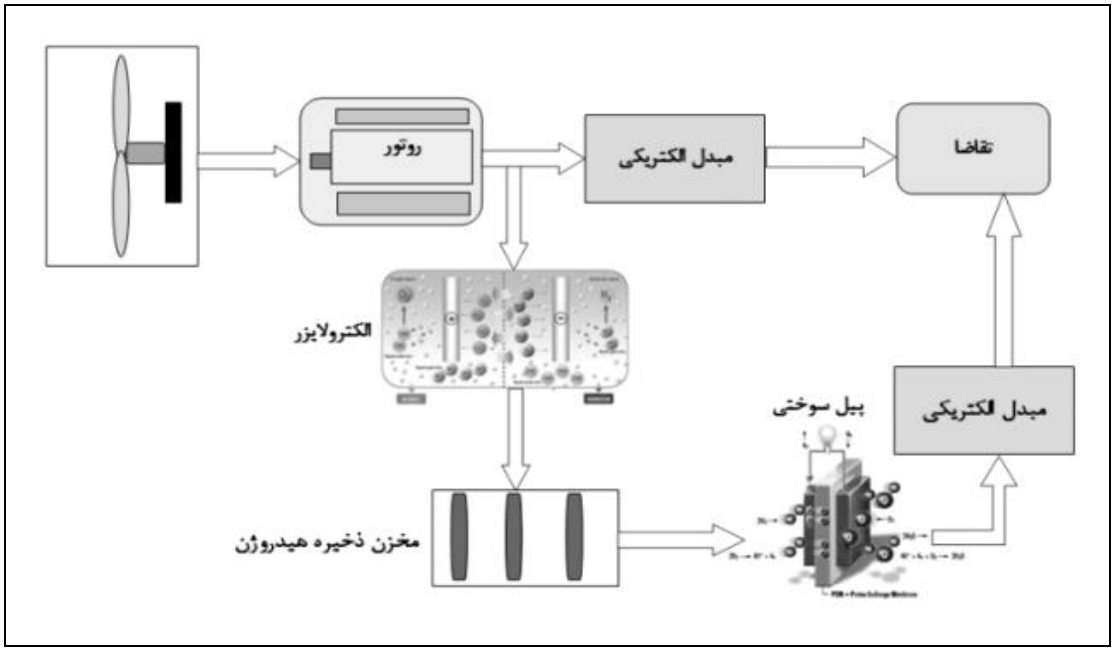



شکل ٤. نمایی شماتیک از نحوهٔ ترکیب توربین بادی با صفحات خورشیدی و باتری [۹]

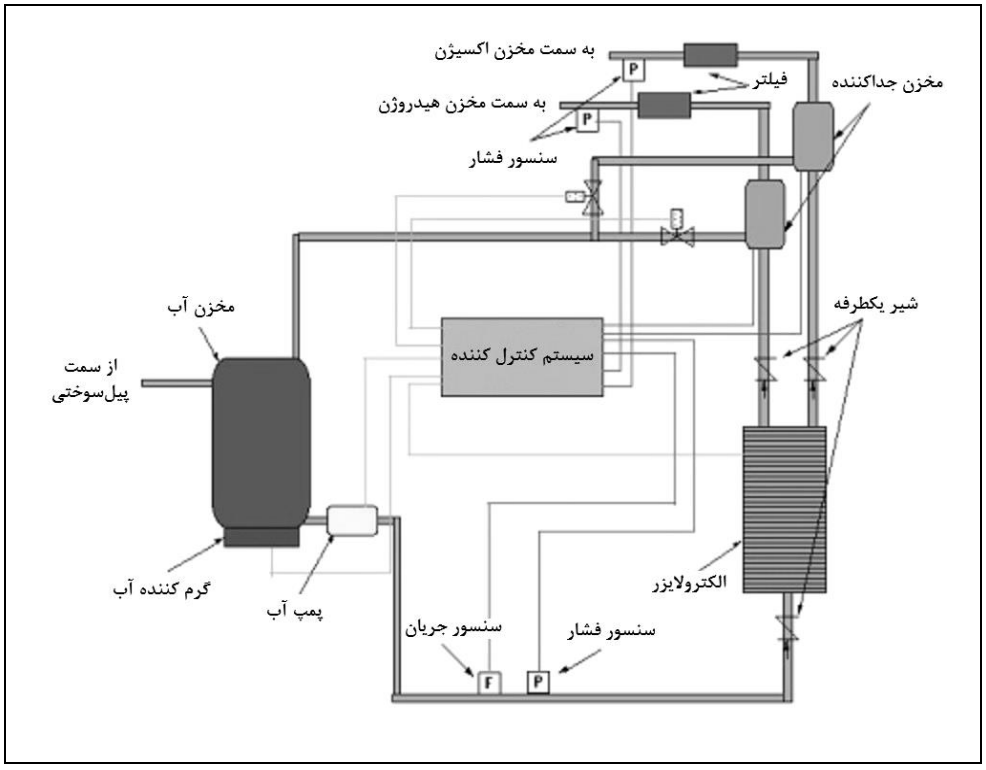
### ۴-۲. ترکیب توربین باد و پیل سوختی

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، بزرگ‌ترین مشکل بر سر راه استفاده از انرژی باد تغییرات سرعت وزش باد و درپی آن متغیربودن توان تولیدی توربین‌های بادی است. باتری‌های اسید سرب مناسب‌ترین گزینه برای ذخیرهٔ انرژی تولیدی در کوتاه‌مدت هستند و برای ذخیره‌سازی در بلندمدت قابل استفاده نمی‌باشند [۲]. امروزه پیل‌های سوختی پلیمری[۷] به‌دلیل دمای کارکرد پایین و در نتیجه زمان راه‌اندازی کوتاه و چگالی توان بالا، مورد توجه بسیاری از محققان و صنعتگران هستند. با توجه به ویژگی‌های ذکرشده، پیل‌های سوختی پلیمری برای استفاده در کنار انواع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد و خورشید قابلیت بالایی دارند [۱۰]. در این بخش سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از طراحی سیستم هیبریدی توربین

بادی و پیل‌سوختی پلیمری، کاهش نوسانات توان خروجی توربین بادی (به‌دلیل نوسانات سرعت باد) توسط پیل سوختی است. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، انرژی باد توسط روتور توربین بادی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و در ساعاتی از روز که سرعت باد به اندازهٔ کافی زیاد است، توسط مبدل الکتریکی (تبدیل جریان مستقیم به متناوب) صرف تأمین تقاضای مصرف‌کننده می‌شود. مازاد انرژی تولیدی در این ساعات وارد الکترولایزر شده و توسط فرایند الکتروشیمیایی، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند. در ادامه، گازهای تولیدشده از الکترولایزر خارج و در دو مخزن مناسب ذخیره می‌شوند. در ساعاتی که سرعت باد پایین است و توربین به‌تنهایی قادر به تولید انرژی الکتریکی نیست، پیل سوختی وارد مدار می‌شود و با استفاده از هیدروژن و اکسیژن ذخیره‌شده در مرحلهٔ قبل، تقاضای الکتریکی را تأمین می‌کند. در این‌گونه از سیستم‌ها، الکترولایزر از نوع پلیمری انتخاب می‌شود و به‌دلیل فشار بالای هیدروژن خروجی از آن، نیازی به کمپرسور برای ذخیرهٔ هیدروژن نیست [۱۱]. نکتهٔ مهم دیگر در استفاده از این سیستم آن است که مازاد برق تولیدی در آن می‌تواند به شبکهٔ برق شهری فروخته شود. یکی از اجزای مهم این سیستم هیبریدی الکترولایزر است. الکترولیز آب از جمله روش‌های تولید هیدروژن است که با انواع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خوبی سازگار می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، در طول روز انرژی اضافی تولیدشده در توربین‌های بادی - که مورد نیاز نیست - در الکترولایزر مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفهٔ الکترولایزر تأمین هیدروژن و اکسیژن از طریق الکترولیز آب است. اکسیژن و هیدروژن حاصل از الکترولیز در مخازنی ذخیره می‌شود و وقتی شدت باد کم است، جهت تأمین توان الکتریکی در پیل سوختی به‌کار می‌رود [۱۱]. در شکل ۶ نمایی شماتیک از نحوهٔ کارکرد یک الکترولایزر نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با عبور جریان مستقیم برق از الکترولایزر، آب به ملکول‌های سازنده‌اش تجزیه می‌شود. الکترولایزرها با توجه به الکترولیت مورد استفاده نیز دسته‌بندی می‌شوند. در حال حاضر پیشرفت‌های چشمگیری در زمینهٔ طراحی و ساخت الکترولایزرهای پلیمری حاصل شده است که دارای الکترولیت پلیمری هستند.




شکل ۵. نمایی شماتیک از نحوهٔ ترکیب توربین بادی و پیل‌سوختی [۲]




شکل ٦. نمایی شماتیک از نحوهٔ کارکرد یک الکترولایزر [۱۱]

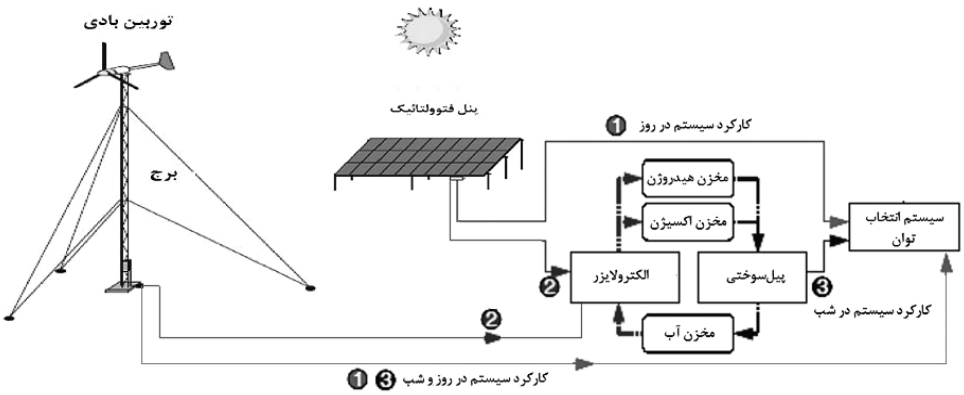
## ۵-۲. ترکیب توربین باد، صفحات خورشیدی و پیل سوختی

در نمونهٔ دیگری از این نوع سیستم هیبریدی خورشیدی، توربین باد در کنار صفحات خورشیدی و پیل سوختی قرار می‌گیرد. با استفاده از این سیستم می‌توان از انرژی باد جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. با توجه به اینکه انرژی خورشیدی در ساعات پرتابش خورشید قابل استفاده است، استفاده از توربین باد سبب می‌شود که در طول روز و شب از انرژی حاصل از وزش باد استفاده شود. انرژی الکتریکی تولیدشدهٔ مازاد در صفحات خورشیدی و توربین بادی می‌تواند در باتری‌های مناسب ذخیره‌سازی شود. در شکل ۷ نمایی شماتیک از نحوهٔ ترکیب سه‌گانهٔ توربین باد، صفحات خورشیدی و پیل سوختی نمایش داده شده است. پیل‌های سوختی پلیمری نویدبخش جایگزینی مناسب به‌عنوان منبع انرژی پشتیبان برای این‌گونه از سیستم‌های هیبریدی می‌باشند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، به‌دلیل برخی ویژگی‌ها همچون راه‌اندازی سریع و چگالی توان بالا، پیل سوختی پلیمری بهترین جایگزین برای باتری و خازن است. همان‌طور که در شکل ۸ نیز نمایش داده شده است، اجزای این سیستم هیبریدی شامل توربین بادی، صفحات خورشیدی، پیل سوختی پلیمری، الکترولایزر، مبدل الکتریکی و کنترلر می‌باشند. الکترولایزر با استفاده از توان تولیدی توربین بادی و صفحات خورشیدی، هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را تأمین می‌کند. هر گاه که منبع ذخیرهٔ هیدروژن پر شد، توان مازاد تولیدی توسط یک کنترلر صرف گرمایش و سرمایش آب یا هوا می‌شود [۱۲]. البته در برخی از سیستم‌های هیبریدی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی خریداری می‌شود.

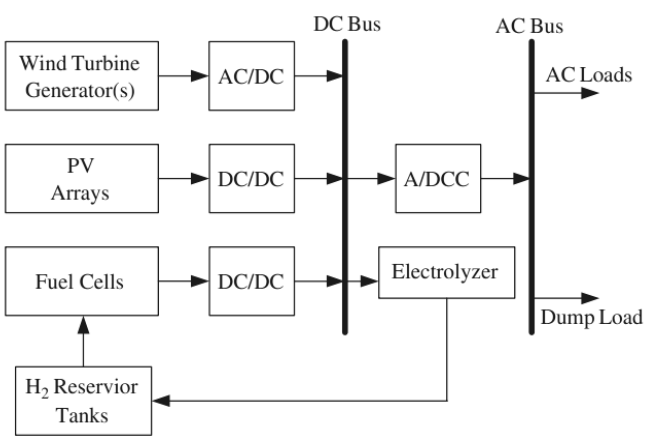
## ۶-۲. ترکیب توربین باد، صفحات خورشیدی، پیل سوختی و باتری

یکی دیگر از سیستم‌های هیبریدی نوین، ترکیب توربین بادی، صفحات خورشیدی، پیل سوختی و باتری می‌باشد. در این‌گونه از سیستم‌ها استفاده از باتری و پیل سوختی

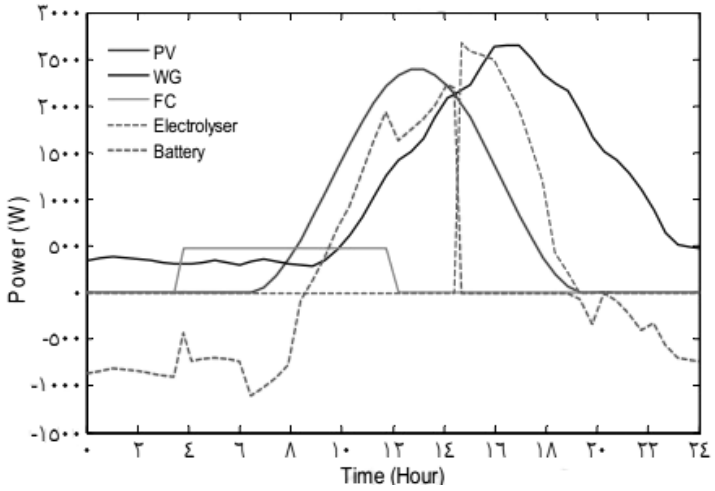
قابلیت اطمینان بالایی برای سیستم‌های مستقل از شبکه ایجاد می‌کند. با توجه به شکل ۹، در ساعات ابتدایی روز که شدت تابش خورشید کم است و توان خروجی توربین بادی نیز اغلب ناچیز می‌باشد، بار مصرفی از طریق باتری تأمین می‌شود (لازم به‌ذکر است که باتری حدود ۲۰ درصد شارژ اولیه دارد). پس از حدود چهار ساعت و با توجه به کاهش ذخیرهٔ باتری و افزایش تقاضای بار مصرفی، پیل سوختی پلیمری روشن می‌شود و در تأمین بار مشارکت می‌کند. حضور پیل سوختی در مدار تا وقتی است که باتری مجدداً شارژ شود. تا وقتی‌که شدت تابش به‌حد مطلوب نرسیده، عملکرد سیستم به همین منوال است. با افزایش شدت تابش خورشید، باتری در حالت شارژ قرار گرفته و در تأمین بار دخالت ندارد. در این حالت اغلب پیل سوختی نیز به‌طور کامل از مدار خارج می‌شود. با افزایش شدت تابش خورشید و شروع شدت باد، صفحات خورشیدی و توربین بادی توان الکتریکی مورد نیاز سیستم را به‌همراه شارژ باتری برعهده دارند. پس از شارژ باتری‌ها، توان مازاد مورد نیاز توسط کنترلر به الکترولایزر ارسال می‌شود. این کار تا پرشدن تانک اکسیژن و هیدروژن ادامه خواهد یافت. با پرشدن تانک هیدروژن الکترولایزر خاموش شده، توان الکتریکی مازاد توسط کنترلر در اختیار سایر تجهیزات جانبی قرار داده می‌شود. در اواخر روز به‌دلیل کاهش تولید توان توربین بادی و صفحات خورشیدی، باتری مجدداً روشن می‌شود و بار الکتریکی مجموعه را تأمین می‌کند [۷]. بیشتر الکترولایزرها هیدروژن را در حدود فشار ۳۰ بار تولید می‌کنند و بنابراین نیازی به کمپرسور ندارند [۱۲].




شکل ۷. ترکیب سه‌گانهٔ صفحات خورشیدی، توربین باد و پیل سوختی




شکل ۸ نمایی شماتیک از نحوهٔ ارتباط اجزای سیستم هیبریدی توربین بادی، صفحات خورشیدی و پیل سوختی [۱۳]




شکل ۹. عملکرد سیستم هیبریدی توربین بادی، صفحات خورشیدی، پیل سوختی و باتری [۷]

## ۳. جمع‌بندی

از جمله سیاست‌های مهم بخش انرژی در کشور جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع تجدیدپذیر و استفاده از سوخت‌های باصرفه و مطابق با استانداردهای محیط زیست است. در این راستا، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی باد به‌جای سوخت‌های فسیلی مد نظر کشورهای مختلف قرار دارد. جمهوری اسلامی ایران نیز به‌لحاظ دارابودن مناطق بادخیز فراوان از قابلیت بالایی جهت استفاده از انرژی بادی برخوردار است. مناسب‌ترین مناطق جهت استفاده از این انرژی واقع در شمال، شمال غرب و برخی از مناطق مرکزی کشور می‌باشد. با توجه به نوسانات توان خروجی از توربین‌های بادی، استفاده از چند سیستم تولید توان دیگر مانند صفحات خورشیدی و پیل سوختی در کنار توربین‌های بادی می‌تواند موجب بالارفتن کارایی آنها گردد. از طرف دیگر، مسئلهٔ ذخیرهٔ انرژی الکتریکی مازاد تولیدشده در توربین‌های بادی در باتری‌ها و همچنین امکان فروش آن به شبکهٔ برق سراسری نیز می‌تواند سبب بالارفتن کارایی سیستم‌های هیبریدی گردد. با توجه به تغییرات آب‌وهوایی زیاد در کشور، استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند تا حدود زیادی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های سیستم‌های حرارتی و برودتی به‌کار رفته در کشور شود.

## ۴. مآخذ

[۱] جهانگیری، مهدی، احمد صداقت. "طراحی سیستم ترکیبی پنل خورشیدی - توربین بادی - سیستم هیدروژنی؛ مطالعهٔ موردی: الیگودرز"، *ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست*، تهران، ۱۳۹۱.

[۲] احمدی، سمیه، محمد رضایی میرقائد، رامین روشندل. "مدل‌سازی سیستم ترکیبی توربین بادی – پیل سوختی و سهم پیل سوختی در تأمین تقاضای الکتریکی در یک منطقه نمونه"، *نشریهٔ علمی پژوهشی مدیریت انرژی*، س. ۲، ش. ۳، پاییز ۱۳۹۱.

[3] Brouwer, J., *Hybrid Gas Turbine Fuel Cell Systems*, National Fuel Cell Research Center, University of California, http://www.nfcrc.uci.edu (accessed May 10, 2015)

[4] Sarrias, R., L.M. Fernández, C.A. García, F. Jurado. "Coordinate operation of power sources in a doubly-fed induction generator wind turbine/battery hybrid power system." *Journal of Power Sources* 205(0), 2012, pp. 124-366.

[5] Ding J., M. Kamgarpour, S. Summers, A. Abate, J. Lygeros, C. Tomlin. "A stochastic games framework for verification and control of discrete time stochastic hybrid systems." *Automatica* 49(9), 2013, pp. 865-874.

[6] Mikati, M., M. Santosb, C. Armentac. "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system." *Renewable Energy* 57(0), 2013, pp. 587-510.

[۷] جلیلوند، ابوالفضل، احمد روحانی، حسین کرد. "طراحی، کنترل و مدیریت انرژی سیستم هیبریدی فتوولتائیک - بادی - پیل سوختی برای کاربردهای مستقل از شبکه"، *چهاردهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق*، کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۸.

[8] Caballero, F., E. Sauma, F. Yanine. "Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)-wind energy system without energy storage for an Easter Island's block." *Energy* 61(0), 2013, pp. 58-81.

[9] Ma, T., H. Yang, L. Lu, J. Peng. "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island." *Applied Energy* 121(0), 2014, pp. 149-158.

[10] Rahimi, S., M. Meratizaman, S. Monadizadeh, M. Amidpour. "Techno-economic analysis of wind turbine–PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in standalone area." *Energy* 67(0), 2014, pp. 381-396.

[11] Maleki, A., A. Askarzadeh. "Comparative study of artificial intelligence techniques for sizing of a hydrogen-based stand-alone photovoltaic/wind hybrid system." *International Journal of Hydrogen Energy* 39(19), 2014, pp. 9973-9984.

[12] Ahmed, N. A., M. Miyatake, A. Al-Othman. "Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems." *Energy Conversion and Management* 49(10), 2008, pp. 2711-2719.

[13] Nelson, D. B., M. H. Nehrir, C. Wang. "Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems." *Renewable Energy* 31(10), 2006, pp. 1641-1656.

## پی‌نوشت

1. Wind Turbine
2. Fuel Cell
3. Solar Cell
4. Standalone
5. Electrolysis
6. Dump Load controller
7. Ploymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell

هیئت تحریریهٔ مجلهٔ *مهندسی مکانیک* از تمامی پژوهشگران، استادان، دانشجویان و صنعتگران ساعی دعوت می‌کند تا دست‌نوشته‌ها و مقاله‌های علمی و گزارش‌های تخصصی خود را به دبیرخانهٔ مجلهٔ علمی ترویجی *مهندسی مکانیک* ارسال کنند و بدین طریق این مجلهٔ کهن را در مسیر رشد و شکوفایی بیش از پیش یاری فرمایند.

*هیئت تحریریهٔ مجلهٔ مهندسی مکانیک*