

برنامه‌ریزی بهینه اقتصادی یک ریزشبکه در حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، باتری و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور برنامه پاسخگویی بار

علی مهدی‌زاده و نوید تقی‌زادگان کلانتری

است. انرژی‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به دلیل وابستگی تولید به شرایط محیطی دارای عدم قطعیت می‌باشند و به منظور تأمین انرژی الکتریکی به صورت مستمر استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی اجتناب‌ناپذیر است.

در [۲] مسایل اقتصادی و قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها در سیستم‌های توزیع و در [۳] جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع و پروژه‌های تحقیقاتی آتی پیشنهادی در این زمینه بررسی شده است. افزایش استراتژیکی منابع تولید پراکنده مبتنی بر تولید هم‌زمان برق و حرارت در جهت افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها در [۴] بررسی شده و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت تولید ریزشبکه‌ها در [۵] مورد توجه قرار گرفته است. در [۶] بهینه‌سازی چندهدفه برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی و محیط زیست مطالعه گردیده است. برخی منابع انرژی پراکنده از قبیل موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی، فتوولتائیک‌ها و انرژی بادی به دلیل توسعه و پیشرفت تکنولوژی و مسایل زیست‌محیطی، در شبکه توزیع گسترش یافته‌اند [۷]. بنابراین کاربرد ژنراتورها در محیط شبکه توزیع می‌تواند سبب بروز مشکلات زیادی شود. یک روش مناسب جهت استفاده بهینه از پتانسیل منابع انرژی پراکنده، ساختاری با عنوان ریزشبکه می‌باشد [۸]. در [۹] ریزشبکه به صورت ترکیبی از مجموعه بارها و منابع کوچک به عنوان یک سیستم قابل کنترل تشریح گردیده که انرژی الکتریکی و حرارتی را برای محدوده خود تأمین می‌کند. در [۱۰] و [۱۱] مزایای ریزشبکه از قبیل بالابردن ضریب اطمینان محلی، کاهش تلفات خط تغذیه، حمایت و بهبود ولتاژ محلی، تصحیح افت ولتاژ یا به عبارتی عملکرد به عنوان منابع تغذیه غیر قابل قطع ذکر شده است.

ریزشبکه توانایی عملکرد در دو موقعیت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای را دارد [۱۱]. پیش‌بینی‌های دقیق علمی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۴۰ بیش از ۲۵٪ انرژی الکتریکی توسط توربین بادی، بیش از ۲۰٪ توسط سلول‌های شیمیایی و حدود ۳۰٪ از انرژی الکتریکی توسط سلول‌های خورشیدی تولید خواهد شد [۱۲]. هر شبکه وسیع خود از چند شبکه کوچک تشکیل شده که هر شبکه کوچک متشکل از منابع کوچک تولید انرژی است که در فاصله کمی از مصرف‌کننده‌ها نصب شده است. این نوع آرایش شبکه امکان استفاده گسترده از انرژی‌های نو را فراهم می‌سازد [۱۳]. تولید توان در انرژی‌های تجدیدپذیر به شرایط محیطی نظیر میزان تابش خورشید یا سرعت باد در محیط بستگی دارد. با این شرایط به منظور تأمین بار، شبکه نیازمند سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد.

باتری‌ها معمول‌ترین گزینه برای ذخیره‌سازی انرژی هستند. باتری‌ها توانایی ذخیره‌سازی انرژی را در درازمدت به دلایل چگالی کم ذخیره

چکیده: ریزشبکه‌ها در سیستم توزیع با بهره‌گیری از منابع انرژی پراکنده تجدیدپذیر قادر به تأمین بار خود در سیستم سطح ولتاژ پایین هستند و می‌توانند در قسمت‌هایی که دسترسی به شبکه برق سراسری امکان‌پذیر نیست با هزینه سرمایه‌گذاری کمتر استفاده شوند. ریزشبکه مورد استفاده در این پژوهش دارای منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی می‌باشد. این مقاله، استراتژی مدیریت انرژی جدید را در ریزشبکه با وجود سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر ارائه داده است. مینیمم کردن هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، هزینه مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی با در نظر گرفتن قیود تأمین بار از اهداف این استراتژی جدید می‌باشد. محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل محدودیت‌های منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی و باتری می‌باشد. سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی شامل الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی می‌باشد. برنامه پاسخگویی طرف بار به منظور مسطح کردن نمودار بار و بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه به کار گرفته شده است. با استفاده از نرم‌افزار GAMS مدل پیشنهادی روی یک ریزشبکه اجرا شده که خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی این مدل روی ریزشبکه نشان می‌دهد استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه می‌شوند.

کلیدواژه: باتری ذخیره‌ساز، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار، ریزشبکه، منابع انرژی تجدیدپذیر.

۱- مقدمه

در مکان‌هایی که توسعه سیستم برق سراسری امکان‌پذیر نیست استفاده از ریزشبکه جزیره‌ای پیشنهاد می‌گردد. مطابق با گزارش آژانس بین‌المللی انرژی [۱]، امروزه بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان به شبکه برق دسترسی ندارند. برنامه‌ریزی برای تأمین برق مورد نیاز این افراد با استفاده از روش‌هایی نظیر توسعه سیستم برق سراسری و استفاده از ریزشبکه به صورت جزیره‌ای صورت می‌گیرد. مشکلاتی نظیر هزینه‌های بالای سوخت و آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث ایجاد محدودیت‌هایی در استفاده سوخت‌های فسیلی می‌شود. ریزشبکه مستقل بر اساس منابع انرژی تجدیدپذیر راه حل مناسبی برای این محدودیت‌ها

این مقاله در تاریخ ۲۲ آذر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۲۷ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

علی مهدی‌زاده، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز (email: alimehdizadee@gmail.com).

نوید تقی‌زادگان کلانتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، (email: taghizadegan@azaruniv.edu).

توربین‌های بادی یا سلول‌های خورشیدی دارای عدم قطعیت توان تولیدی می‌باشند و در این مسئله فرض می‌شود که توربین بادی و سلول‌های خورشیدی در همه زمان‌ها در ماکسیمم توان قابل دسترسشان بهره‌برداری می‌شوند. فلذا توان خروجی تابعی از تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد می‌شود. با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده شرایط محیطی در روابط مربوطه، مقدار مورد انتظار توان توربین بادی و سلول‌های خورشیدی برای هر زمان محاسبه می‌شود. برای تقاضای بار پیش‌بینی شده، هدف از استراتژی جدید مدیریت انرژی این است که بهره‌برداری بهینه از ادوات ذخیره‌ساز (باتری، الکترولایزر و پیل سوختی) تعیین شود با این هدف که هزینه بهره‌برداری بهینه ریزشبه‌حداقل گردد. در ادامه ابتدا هزینه‌های بهره‌برداری المان‌های ذخیره‌ساز مطرح شده و سپس تابع هدف پیشنهادی با قیود مربوط جهت انجام بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی خواهد شد.

۲-۱ هزینه‌های بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری باتری ذخیره‌ساز در حالت شارژ با استفاده از (۱) مدل‌سازی می‌شود [۲۸]

$$C_t^{B, ch} = \left\{ \frac{C_{in}^B}{L_t^{B, ch}} + C_{O\&M}^B \right\} \times U_t^{charge} \times \eta_{ch}^B \eta_{disc}^B \quad (1)$$

در این معادله C_{in}^B و $C_{O\&M}^B$ به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیر و بهره‌برداری باتری ذخیره‌ساز است و $L_t^{B, ch}$ عمر مفید باتری در حالت شارژ است که طبق (۲) قابل محاسبه است

$$L_t^{B, ch} = \frac{N_B U_B Q_B}{P_t^{charge}} \times N_{CYCLES} \quad (2)$$

علاوه بر این، هزینه بهره‌برداری باتری در حالت دشارژ از (۳) قابل محاسبه است

$$C_t^{B, dis} = \left(\frac{C_{in}^B}{L_t^{B, dis}} + C_{O\&M}^B \right) \times U_t^{disc} \quad (3)$$

در این معادله $L_t^{B, dis}$ عمر مفید باتری در حالت دشارژ است که طبق (۴) مدل شده است

$$L_t^{B, dis} = \frac{N_B U_B Q_B}{P_t^{disc}} \times N_{CYCLES} \times \eta_{disc}^B \quad (4)$$

مشابه هزینه بهره‌برداری باتری در حالت شارژ، هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی مربوط است به هزینه تولید مول‌های هیدروژنی که توسط الکترولایزر برای مصرف پیل سوختی انجام می‌شود که طبق (۵) بیان شده است

$$C_t^{H\&ch} = \left\{ \frac{C_{in}^{EL} + C_{O\&M}^{EL}}{L_t^{EL}} + \left(\frac{C_{in}^{FC}}{L_t^{FC}} + C_{O\&M}^{FC} \right) \right\} \times U_t^{EL} \times \eta_{FC}^{EL} \quad (5)$$

همچنین اگر لازم است تقاضای بار به وسیله سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی تأمین شود، باید پیل سوختی بهره‌برداری شده و به تولید توان پردازد. بنابراین هزینه بهره‌برداری پیل سوختی مطابق با (۶) محاسبه می‌شود

$$C_t^{FC} = \left(\frac{C_{in}^{FC}}{L_t^{FC}} + C_{O\&M}^{FC} \right) \times U_t^{FC} \quad (6)$$

انرژی، خالی‌شدن باتری و خراب‌شدن ندارند [۱۴]. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر فناوری هیدروژن به منظور ذخیره‌سازی توان در درازمدت یکی از گزینه‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۵] تا [۱۷]. در این سیستم توان اضافی تولیدشده در زمان کم‌باری به منظور تولید هیدروژن استفاده می‌شود. هیدروژن تولیدشده در تانک‌های هیدروژن ذخیره می‌شوند و هنگام نیاز به توان اضافی هیدروژن ذخیره‌شده توسط پیل سوختی به توان مورد نیاز تبدیل می‌گردد.

امروزه در سیستم قدرت به منظور شیفت بار از قسمت پرباری به کم‌باری و به تبع آن مسطح‌شدن پروفیل بار، برنامه پاسخگویی طرف بار مورد توجه قرار گرفته است [۱۸]. یکی از رایج‌ترین انواع برنامه‌های پاسخگویی بار، برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده می‌باشد [۱۹]. این روش با شیفت بار از بازه‌های پرباری به بازه‌های کم‌باری باعث هموارشدن منحنی بار می‌شود. در ساعت‌های پیک به خاطر مصرف زیاد توان در یک ریزشبه‌حداقل، منابع انرژی‌های نو و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نمی‌توانند بار را تأمین کنند و این امر منجر به افزایش هزینه انرژی توزیع‌نشده می‌شود. مصرف‌کنندگان انرژی به منظور کاهش هزینه‌های انرژی مصرف خود را از زمان‌های پیک بار به زمان‌های کم‌باری انتقال می‌دهند [۲۰]. این تقسیم‌بندی را می‌توان برای ساعات یک روز، روزهای یک هفته و یا فصل‌های یک سال اعمال کرد. در هر بازه تقسیم‌بندی شده، تنها قادر به انتقال x درصد از بار به قسمت‌های دیگر می‌باشیم (تا به واقعیت نزدیک‌تر باشد). در این مقاله حداکثر ۲۰ درصد شیفت بار در هر بازه قابل اعمال است.

استراتژی جدید مدیریت انرژی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور برنامه پاسخگویی بار برای یک ریزشبه‌حداقل جزیره‌ای در این پژوهش مطالعه شده است. این استراتژی مدیریت انرژی بر اساس بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی و تعیین میزان شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی و باتری در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار با هدف مینیمم‌کردن هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، هزینه مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی با در نظر گرفتن قیود تأمین بار، محدودیت‌های فنی منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی و باتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن مطالب بالا، نوآوری ارائه‌شده در مقاله به شرح ذیل است:

(۱) پیشنهاد تابع هزینه بهره‌برداری به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هیدروژن (هزینه‌های بهره‌برداری الکترولایزر و پیل سوختی) و باتری.

(۲) در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی در تابع هدف پیشنهادی.

(۳) استفاده از الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی به عنوان مجموعه سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن.

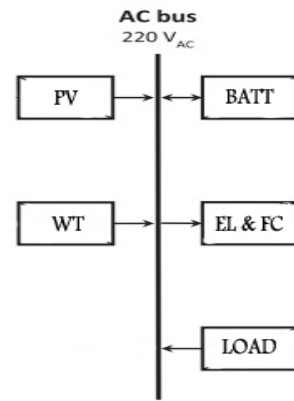
(۴) تعیین شارژ و دشارژ باتری و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی با و بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار.

(۵) استراتژی جدید مدیریت انرژی برای یک ریزشبه‌حداقل در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور برنامه پاسخگویی بار.

۲- نمایش مسأله

ریزشبه‌حداقل معمولاً از منابع تجدیدپذیر بهره‌مند هستند. این منابع نظیر

الکتریکی به طور پیوسته از سیستم ذخیره‌ساز باتری استفاده شده است. علاوه بر این برای استراتژی جدید مدیریت انرژی ریزشبه جزیره‌ای از الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی به عنوان سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور شرکت بار ریزشبه در برنامه پاسخگویی بار بهره گرفته است. شکل ۱ ساختار ریزشبه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و در ادامه زیربخش‌ها، اجزای سازنده ریزشبه تشریح می‌شود.



شکل ۱: ساختار ریزشبه در حالت جزیره‌ای.

در آخر، جهت جلوگیری از قطع بار و قطع توان مازاد تا حد ممکن، هزینه‌های مجازی برای تولید توان تأمین‌نشده ($C_{UN,t}$) و توان مازاد ($C_{EX,t}$) اختصاص داده می‌شود که در این مقاله قیمت‌های متناظر برابر با ۵ یورو بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

۲-۲ تابع هدف و قیود

استراتژی مدیریت جدید به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری پیشنهاد گردیده و تابع هدف پیشنهادی از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری باتری، الکترولایزر و پیل سوختی که در دو حالت شارژ و دشارژ بهره‌برداری می‌شود تشکیل شده است. علاوه بر این هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی هم در تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی با (۷) مدل‌سازی شده که باید مینیمم شود

$$f = \min \sum_{t=1}^{24} \{C_t^{B, ch} + C_t^{B, dis} + C_t^{H, ch} + C_t^{FC} + C_{EX,t} + C_{UN,t}\} \quad (7)$$

تابع هدف پیشنهادی باید با در نظر گرفتن قیود زیر بهینه‌سازی شود:

(۱) قید تعادل توان

مجموع توان‌های تولیدی در ریزشبه باید با مجموع توان‌های مصرفی برابر باشد. این قید در (۸) نشان داده شده و لازم به ذکر است که بار ریزشبه با بار جدید و در نظر گرفته برنامه پاسخگویی بار جایگزین شده است

$$P_t^{wind} + P_t^{PV} + P_t^{disc} + P_t^{FC} + P_{UN,t} = Load(t) + P_t^{charge} + P_t^{EL} + P_{EX,t} \quad (8)$$

(۲) قیود مربوط به توان تولیدی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی.

(۳) قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز باتری.

(۴) قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی.

(۵) قیود مربوط به برنامه پاسخگویی بار.

(۶) قیود مربوط به محاسبات هزینه‌های بهره‌برداری.

تابع هدف پیشنهادی (۷) با در نظر گرفتن قیود ذکرشده به صورت برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) مدل‌سازی شده و با استفاده از حل‌کننده DICOPT [۲۲] در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS [۲۳] حل شده است.

۳- مدل‌سازی اجزای ریزشبه

ریزشبه مورد مطالعه در این مقاله دارای توربین بادی و سلول‌های خورشیدی می‌باشد [۲۴] و همچنین به خاطر اطمینان از تأمین انرژی

۳-۱ مدل باتری

معادلات (۹) تا (۱۷) مربوط به قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز باتری است [۲۵]. معادله (۹) انرژی اولیه باتری و همچنین (۱۰) و (۱۱) محدودیت حداقل و حداکثر سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این محدودیت حداکثری و حداقلی توان شارژ و دشارژ باتری در (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده و لازم به ذکر است که باتری نمی‌تواند هم‌زمان شارژ و یا دشارژ شود که این محدودیت در (۱۶) اجبار شده و نهایتاً (۱۷) مدل دینامیکی انرژی در هر زمان را برای باتری نشان می‌دهد

$$SOC_t = SOC_{initial} \quad (9)$$

$$SOC_t \leq SOC^{max} \quad (10)$$

$$SOC_t \geq SOC^{min} \quad (11)$$

$$P_t^{charge} \leq P_{charge}^{max} \times U_t^{charge} \quad (12)$$

$$P_t^{charge} \geq P_{charge}^{min} \times U_t^{charge} \quad (13)$$

$$P_t^{disc} \leq P_{disc}^{max} \times U_t^{disc} \quad (14)$$

$$P_t^{disc} \geq P_{disc}^{min} \times U_t^{disc} \quad (15)$$

$$U_t^{charge} + U_t^{disc} \leq 1 \quad (16)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \eta_{ch}^B \times P_t^{charge} - \frac{P_t^{disc}}{\eta_{disc}^B} \quad (17)$$

۳-۲ مدل سلول خورشیدی

سلول‌های خورشیدی، انرژی خورشید را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. از آنجایی که توان خروجی آرایه‌های خورشیدی وابسته به شدت تابش و دما می‌باشد کنترل نقطه کار آنها به منظور جذب حداکثر توان از اهمیت زیادی برخوردار است. در بیشتر روش‌های ارائه‌شده در مقالات، نقطه عملکرد بهینه با استفاده از تقریب خطی تخمین زده شده که به این روش‌ها ردیابی نقطه ماکسیمم توان اطلاق می‌شود. معادله (۱۸) در دماها و تابش‌های مختلف بیشترین توان قابل، P_t^{PV} حاصل از سلول‌های خورشیدی را تخمین می‌زند [۲۶]. مشاهده می‌شود که توان خروجی به شدت تابش خورشید و دمای هوا بستگی دارد

$$P_t^{PV} = G_t \cdot A_{PV} \cdot N_{PV} \cdot \eta_{PV} \quad (18)$$

در اینجا G_t ، A_{PV} و N_{PV} به ترتیب شدت تابش خورشید در زمان t ، مساحت سلول و تعداد سلول‌های خورشیدی است و بازده سلول‌های خورشیدی، η_{PV} تابعی از شدت تابش خورشیدی و دمای محیط طبق (۱۹) تعریف می‌شود

$$\eta_{PV} = \eta_{PV,ref} \left[1 - \alpha \left(T_t + G_t \times \frac{NOCT - 20}{\lambda_{0.0}} - T_{ref} \right) \right] \quad (19)$$

در (۱۹)، $\eta_{PV,ref}$ بازده سلول در شرایط استاندارد (شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد)، T_{ref} دمای استاندارد، α

منجر شده و آن را در مخازن تحت فشار ذخیره نماید. این هیدروژن ذخیره شده می‌تواند در مواقعی که بار ریزشکبه بیشتر از منابع انرژی‌های نو است توسط پیل سوختی به تولید برق پرداخته و قسمتی از بار ریزشکبه را تأمین کند [۲۴].

معادلات (۲۲) تا (۳۴) مربوط به محدودیت‌های فنی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی است. با مصرف توان مازاد توسط الکترولایزر، مول‌های هیدروژن از الکترولایزر به عنوان تابعی از توان مصرف‌شده توسط الکترولایزر جاری شده و در تانک‌های هیدروژنی تحت فشار ذخیره می‌گردد. محدودیت حداقل و حداکثر توان مصرفی توسط الکترولایزر با (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده و محدودیت حداکثری تعداد مول‌های هیدروژنی در (۲۴) و تعداد مول‌های هیدروژن تولیدشده تابعی از توان مصرف‌شده الکترولایزر در (۲۵) آمده است

$$P_t^{EL} \leq P_{\max}^{EL} \times U_t^{EL} \quad (22)$$

$$P_t^{EL} \geq P_{\min}^{EL} \times U_t^{EL} \quad (23)$$

$$N_{H_2,t}^{EL} \leq N_{H_2,\max}^{EL} \times U_t^{EL} \quad (24)$$

$$N_{H_2,t}^{EL} = \frac{\eta^{EL} P_t^{EL}}{LHV_{H_2}} \quad (25)$$

میزان فشار اولیه، محدودیت حداکثری و حداقلی تانک‌های هیدروژنی به ترتیب در (۲۶) تا (۲۸) نشان داده شده است

$$P_{t_i}^{H_2} = P_{initial}^{H_2} \quad (26)$$

$$P_t^{H_2} \leq P_{\max}^{H_2} \quad (27)$$

$$P_t^{H_2} \leq P_{\min}^{H_2} \quad (28)$$

وقتی که بار ریزشکبه بیشتر از توان تولیدی منابع انرژی‌های نو و سیستم ذخیره‌ساز باتری است، فیوسل مول‌های هیدروژن ذخیره شده در تانک‌های هیدروژنی را مصرف کرده و انرژی الکتریکی تولید می‌کند. میزان حداکثر تعداد مول مصرف‌شده توسط پیل سوختی با (۲۹) مدل‌سازی شده و میزان توان تولیدی توسط پیل سوختی که تابعی از تعداد مول مصرف‌شده است در (۳۰) نشان داده شده و همچنین میزان محدودیت حداکثری و حداقلی توان تولیدی توسط پیل سوختی در (۳۱) و (۳۲) بیان گردیده است

$$N_{H_2,t}^{FC} \leq N_{H_2,\max}^{FC} \times U_t^{FC} \quad (29)$$

$$N_{H_2,t}^{FC} = \frac{P_t^{FC}}{\eta^{FC} LHV_{H_2}} \quad (30)$$

$$P_t^{FC} \leq P_{\max}^{FC} \times U_t^{FC} \quad (31)$$

$$P_t^{FC} \geq P_{\min}^{FC} \times U_t^{FC} \quad (32)$$

لازم به ذکر است که در سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، الکترولایزر و پیل سوختی نمی‌تواند به طور هم‌زمان به ترتیب مصرف‌کننده توان (شارژ) و یا تولیدکننده توان (دشارژ) شود که این محدودیت در (۳۳) مدل‌سازی شده است. نهایتاً (۳۴) مدل دینامیکی فشار تانک‌های هیدروژنی را در هر زمان نشان می‌دهد که تابعی از فشار ساعت قبل و تعداد مول‌های تولیدشده توسط الکترولایزر و مصرف‌شده توسط پیل سوختی می‌باشد

$$U_t^{EL} + U_t^{FC} \leq 1 \quad (33)$$

$$P_t^{H_2} = P_{t-1}^{H_2} + \frac{\mathcal{R}T_{H_2}}{V_{H_2}} (N_{H_2,t}^{EL} - N_{H_2,t}^{FC}) \quad (34)$$

ضریب دم، $NOCT$ دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی و T_i دمای محیط می‌باشد.

۳-۳ مدل توربین بادی

توربین بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. برای مطالعه آیرودینامیکی تیغه‌ها از منحنی‌های ضرایب آیرودینامیکی بهره می‌برند. توان تبدیلی یک توربین بادی از (۲۰) به دست می‌آید که $A = \pi r^2$ مساحت سطح جاروب تیغه‌ها، ρ چگالی هوا و $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب آیرودینامیکی روتور است که تابعی از نسبت سرعت تیپ λ و زاویه پیچ تیغه β است. این ضریب می‌تواند به صورت درصدی از انرژی جنبشی برخوردی هوا به انرژی مکانیکی روتور بیان شود. در این مقاله توان خروجی توربین بادی با استفاده از روش درون‌یابی منحنی‌ها به صورت (۲۱) بیان گردیده و برای مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد، تابع توزیع ویبال^۱ برای تولید سناریو سرعت باد استفاده شده است. بنابراین توان خروجی توربین بادی در هر زمان و در هر سناریو به صورت (۲۱) بیان می‌شود

$$P_{con} = \frac{1}{\gamma} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_t^{w\gamma} \quad (20)$$

$$P_t^{wind} = \begin{cases} 0, & V_t^w < V_{ci} \\ P_r \times \left(\frac{V_t^w - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} \right)^\gamma, & V_{ci} < V_t^w < V_{cr} \\ P_r, & V_r < V_t^w < V_c \\ 0, & V_t^w > V_c \end{cases} \quad (21)$$

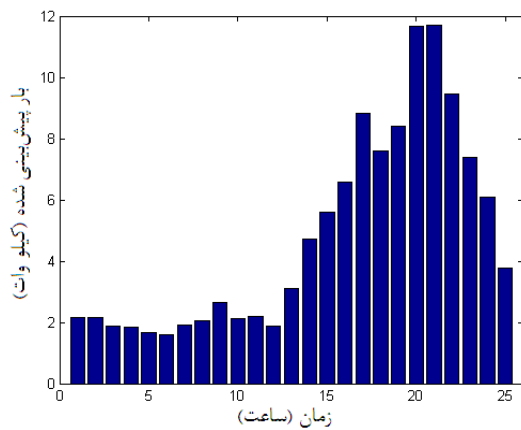
که در آن مقادیر V_r ، V_c ، V_{ci} ، P_r و V_t^w به ترتیب توان نامی، سرعت وصل، سرعت قطع، سرعت در توان نامی و سرعت باد در زمان t است [۲۷]. معادله (۲۱) نشان می‌دهد که توان خروجی باد با سرعت وزش باد متناسب است.

۳-۴ مدل توان تأمین‌نشده و توان مازاد

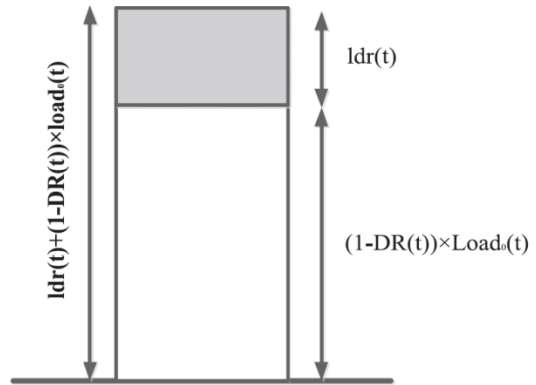
در یک ریزشکبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای، قطع بار و قطع توان تولیدی اغلب لازم می‌شود تا تعادل توان در سیستم برقرار شود. اگر بار ریزشکبه از ظرفیت تولید انرژی‌های نو و سیستم‌های ذخیره‌ساز بیشتر باشد، سیستم قادر به تأمین بار نبوده و لازم است برای برقراری تعادل توان در سیستم قطع بار صورت گیرد. بالعکس اگر کل بار ریزشکبه می‌تواند به وسیله منابع انرژی‌های نو تأمین شود و سیستم‌های ذخیره‌ساز در شارژ کامل باشند و چون توان اضافه تولیدی منابع انرژی‌های نو قادر به ذخیره‌سازی نیست بنابراین لازم است توان تولیدی منابع کاهش یابد. هر دو گزینه قطع بار و قطع توان تولیدی در قید تعادل توان سیستم به عنوان متغیر به ترتیب با توان تأمین‌نشده ($P_{UN,t}$) و توان مازاد ($P_{EX,t}$) مدل‌سازی شده‌اند.

۳-۵ مدل سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در سیستم‌های انرژی مستقل گسترش پیدا کرده است که در این سیستم ذخیره‌ساز، وقتی که توان تولیدی منابع انرژی‌های نو از بار ریزشکبه بیشتر باشد، توان مازاد تولیدی توسط الکترولایزر می‌تواند به تولید هیدروژن



شکل ۳: منحنی بار ریزشکه.



شکل ۲: مدل بار با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار.

جدول ۱: هزینه‌ها و عمر مفید اجزای ذخیره‌سازهای انرژی.

پیل سوختی	الکترولایزر	باتری	
۲۸۰۰۰ یورو	۷۵۰۰۰ یورو	۴۰۰ یورو برای هر باتری	هزینه نصب
۳۰۰۰۰ ساعت	۳۰۰۰۰ ساعت	۱۳۰۰ سیکل شارژ و دشارژ	عمر مفید
۰٫۲ یورو بر ساعت	۰٫۲ یورو بر ساعت	۰	هزینه تعمیر و بهره‌برداری

۴- مطالعات عددی

در این بخش برای نشان‌دادن کارایی استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی یک ریزشکه جزیره‌ای و مفاهیم پیشنهادی روی یک ریزشکه جزیره‌ای که شامل توربین بادی، سلول‌های خورشیدی، باتری ذخیره‌ساز و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن (شامل الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی) می‌باشد، شبیه‌سازی انجام شده است. همچنین اثر برنامه پاسخگویی بار روی بار ریزشکه مطالعه شده و اثر آن روی هزینه بهره‌برداری ریزشکه مطالعه خواهد شد و در نهایت حالت‌های مختلف بهره‌برداری با هم مقایسه شده و کارایی و عملکرد مطلوب روش پیشنهادی بررسی خواهد شد.

۴-۱ داده‌ها

به طور کلی، سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن شامل یک الکترولایزر، چهار مخزن مستقل برای ذخیره‌سازی فشار ناشی از تولید مول‌های هیدروژن با ظرفیت مجموع ۵۵ نیوتن متر مکعب (۱۳/۸ بار واحد فشار) و یک پیل سوختی ۶ کیلوواتی است. همچنین یک بانک ذخیره‌ساز شامل ۳۲ باتری اسید سرب نیز گنجانده شده است. جدول ۱ هزینه‌ها و عمر مفید مورد انتظار اجزای ذخیره‌ساز (باتری، الکترولایزر و پیل سوختی) را نشان می‌دهد، در حالی که جداول ۲ تا ۵ به ترتیب پارامترهای استفاده‌شده برای سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن، باتری ذخیره‌ساز، توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را ارائه داده است. علاوه بر این، منحنی بار ریزشکه در شکل ۳ نشان داده شده و در آخر مقادیر پیش‌بینی روزانه شرایط محیطی برای تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد در جدول ۶ آمده است.

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی در ۴ حالت مختلف و مقایسه نتایج

برای نشان‌دادن اثر سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار در استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشکه، چهار مطالعه موردی بررسی شده (زمان اجرای برنامه‌ریزی در هر ۴ مطالعه موردی در مقاله در حدود یک ثانیه است) و نتایج آن با هم

۳-۶ برنامه پاسخگویی بار

در این مقاله، برنامه پاسخگویی بار استفاده‌شده از نوع برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده می‌باشد. هدف از استفاده برنامه پاسخگویی بار، هموارکردن منحنی بار با استفاده از شیفت بار از بازه‌های پیک به بازه‌های کم‌باری و میان‌باری و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده می‌تواند همانند شکل ۲ مدل‌سازی شود [۲۰].

مطابق با شکل ۲ و با توجه به تعریف برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده، اپراتور ریزشکه فقط قادر به انتقال قسمتی از بار به بازه‌های زمانی دیگر می‌باشد که فرم ریاضی این جمله در (۳۵) و (۳۶) ارائه شده است

$$Load(t) = (1 - DR(t)) \times load'(t) + ldr(t) \quad (35)$$

$$load'(t) - load(t) = DR(t) \times load'(t) - ldr(t) \quad (36)$$

قیود فنی مربوط به برنامه پاسخگویی بار در (۳۷) تا (۴۰) بیان شده است. معادله (۳۷) بیانگر این واقعیت است که باری کم یا زیاد نمی‌شود بلکه از بازه‌های پیک به بازه‌های میان‌باری و یا کم‌باری شیفت داده می‌شود و به عبارتی بار کاهشی باید برابر با بار افزایشی در طول مدت بهره‌برداری باشد. همچنین، مقدار بار افزایشی باید کوچک‌تر از درصدی از بار پایه باشد که (۳۸) بیانگر این موضوع است و در نهایت درصد کاهش و یا افزایش بار باید کوچک‌تر از یک مقدار معینی باشد که با (۳۹) و (۴۰) بیان شده است. لازم به ذکر است این درصد در این مقاله برابر ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است

$$\sum_{t=1}^T ldr(t) = \sum_{t=1}^T DR(t) \cdot load'(t) \quad (37)$$

$$load^{inc}(t) \leq inc(t) \cdot load'(t) \quad (38)$$

$$DR(t) \leq DR \max \quad (39)$$

$$inc(t) \leq inc \max \quad (40)$$

جدول ۵: پارامترهای سلول‌های خورشیدی.

توان پیک هر سلول	۰/۲۲۵ کیلووات
بازده نامی	۱۸/۱٪
تعداد سلول‌های خورشیدی	۳۶
مساحت سلول خورشیدی	۱/۲۴۴ متر مربع
مواد سلول‌های خورشیدی	سیلیکون کیود
ضریب دما	-۰/۳۸٪/K
دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی	۴۵ درجه سانتی‌گراد
T_{ref}	۲۵ درجه سانتی‌گراد

جدول ۶: مقادیر پیش‌بینی روزانه شرایط محیطی برای تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد.

زمان (ساعت)	تابش خورشید (وات بر متر مربع)	دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱	۰	۲۴/۷	۱۰/۵
۲	۰	۲۴/۵	۱۳/۵
۳	۰	۲۴/۳	۱۴/۹
۴	۰	۲۴/۴	۱۵/۶
۵	۹۳/۵	۲۴/۵	۱۹/۵
۶	۲۱۹	۲۶/۵	۲۰/۶
۷	۴۶۷/۵	۲۷/۵	۱۴/۴
۸	۶۳۷/۵	۲۸	۱۴/۱
۹	۷۸۰	۲۸/۵	۱۱/۳
۱۰	۹۱۶	۲۸/۸	۹/۷
۱۱	۱۱۰۰	۲۹	۷/۰
۱۲	۱۰۳۳	۲۹/۷	۵/۹
۱۳	۸۵۰	۲۹/۸	۸/۹
۱۴	۶۸۰	۳۰	۹/۵
۱۵	۵۹۵	۲۹/۸	۱۰/۴
۱۶	۲۵۵	۲۹/۵	۸/۸
۱۷	۲۱۲/۵	۲۹	۷/۱
۱۸	۱۵۳	۲۷/۷	۸/۳
۱۹	۶۳	۲۶/۵	۹/۹
۲۰	۰	۲۴/۸	۷/۵
۲۱	۰	۲۵	۸/۸
۲۲	۰	۲۴/۸	۹/۸
۲۳	۰	۲۴/۶	۹/۲
۲۴	۰	۲۴/۸	۸/۴

نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و بدون استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی حل کرده و اثرات آن را روی منحنی بار ریزش‌بکه و هزینه‌های بهره‌برداری نشان می‌دهد. در آخر، مطالعه موردی ۴ به منظور نشان‌دادن استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی در این مقاله و نشان‌دادن اهمیت استفاده هم‌زمان از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار را ارزیابی کرده و اثرات هم‌زمان آن را روی منحنی بار و هزینه‌های بهره‌برداری ریزش‌بکه بررسی کرده است.

نتایج مقایسه‌ای هزینه‌های مختلف مربوط به هزینه‌های بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، انرژی تأمین‌نشده، مازاد انرژی و کل هزینه بهره‌برداری در چهار مطالعه موردی در جدول ۷ مقایسه شده است. با توجه به جدول مقایسه هزینه‌های مختلف برای چهار مطالعه موردی مشاهده می‌شود که کل هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه در حالت مطالعه

جدول ۲: پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن.

P_{max}^{EL}	۶/۲ کیلووات
P_{min}^{EL}	۱/۵ کیلووات
$N_{H_2,max}^{EL}$	۱/۰۵ نیوتون متر مکعب بر ساعت
η^{EL}	۵۰ درصد
LHV_{H_2}	۲۴۰
$P_{initial}^{H_2}$	۱۰ بار
$P_{max}^{H_2}$	۱۳/۸ بار
$P_{min}^{H_2}$	۲ بار
$N_{H_2,max}^{FC}$	۳/۹۰ نیوتون متر مکعب بر ساعت
η^{FC}	۴۰ درصد
P_{max}^{FC}	۶ کیلووات
P_{min}^{FC}	۰/۵ کیلووات
R	۸/۳۱۴
T_{H_2}	۳۱۳ درجه کلونین
V_{H_2}	۴ متر مکعب

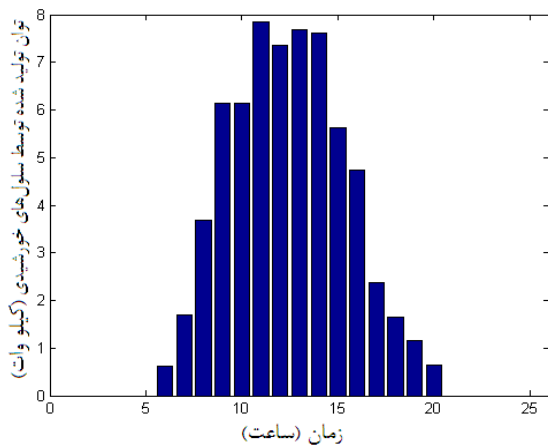
جدول ۳: پارامترهای باتری ذخیره‌ساز.

ولتاژ نامی (U_B)	۱۲ ولت
ظرفیت نامی (Q_B)	۲۴۰ آمپر ساعت
تعداد باتری‌ها (N_B)	۳۲
باتری در هر رشته	۴
نوع باتری	اسید سرب
SOC^{max}	۹۰ درصد
SOC^{min}	۶۰ درصد
$SOC^{initial}$	۸۰ درصد
P_{charge}^{max}	۱۸ کیلووات
P_{charge}^{min}	۰
P_{disc}^{max}	۱۸ کیلووات
P_{disc}^{min}	۰
η_{ch}^B	۸۲ درصد
η_{disc}^B	۹۰ درصد

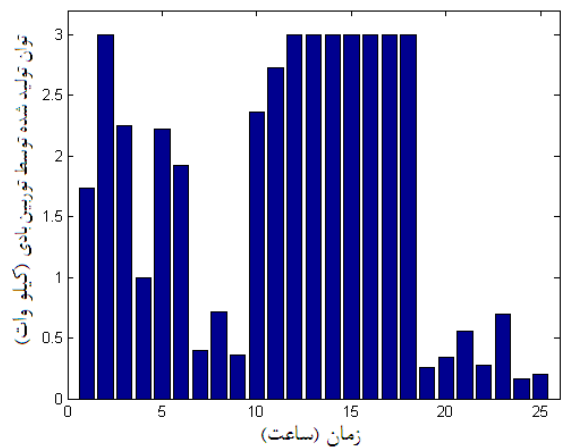
جدول ۴: پارامترهای توربین بادی.

توان نامی	۳ کیلووات
شکل	۳ تیغه با محور عمودی
قطر روتور	۴
ارتفاع مرکز توربین	۵/۸ متر
ارتفاع سنج	۲ متر
V_{ci}	۲ متر بر ثانیه
V_r	۱۴ متر بر ثانیه
V_c	۲۵ متر بر ثانیه

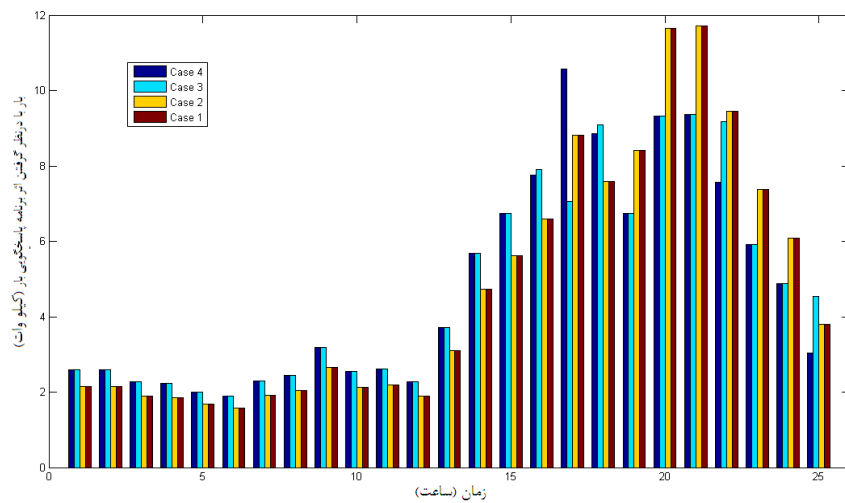
مقایسه گردیده است. در مطالعه موردی ۱، مسأله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزش‌بکه جزیره‌ای بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار بررسی شده است. به منظور نشان‌دادن اهمیت استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، مطالعه موردی ۲ همان مسأله مشابه را با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و بدون برنامه پاسخگویی بار مطالعه کرده است. مطالعه موردی ۳ همان مسأله را با در



شکل ۵: حداکثر توان تولیدشده توسط سلول‌های خورشیدی.



شکل ۴: حداکثر توان تولیدشده توسط توربین بادی.



شکل ۶: منحنی بار ریزشکه با در نظر گرفتن اثر برنامه پاسخگویی بار در چهار حالت.

جدول ۷: مقایسه هزینه‌های مختلف بهره‌برداری ریزشکه.

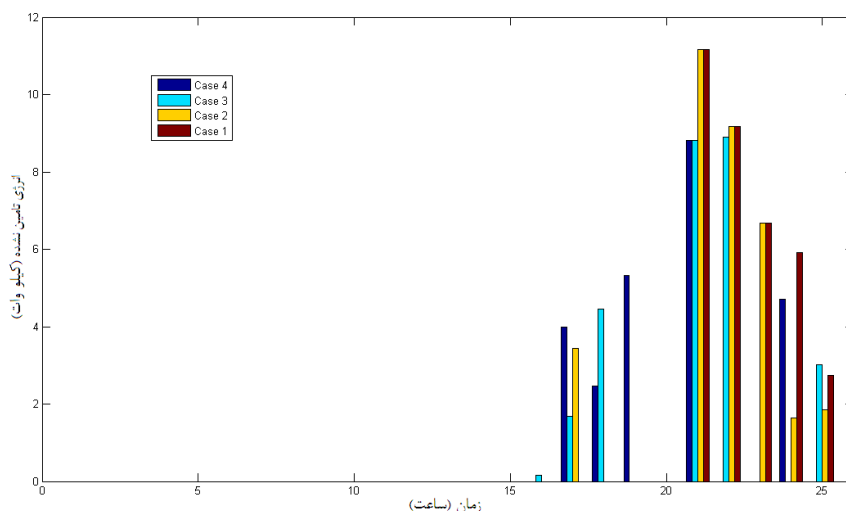
مطالعه موردی ۴	مطالعه موردی ۳	مطالعه موردی ۲	مطالعه موردی ۱	هزینه‌های مختلف بر حسب یورو
۵,۷۹	۵,۵۳	۵,۷۵	۶,۲۲	هزینه بهره‌برداری شارژ باتری (یورو)
۵,۴۷	۵,۳۲	۵,۴۵	۵,۷۲	هزینه بهره‌برداری دشارژ باتری (یورو)
۵۶,۷۰	۰	۷۵,۶۱	۰	هزینه بهره‌برداری شارژ ذخیره‌ساز هیدروژنی (یورو)
۵,۸۹	۰	۷,۴۸	۰	هزینه بهره‌برداری دشارژ ذخیره‌ساز هیدروژنی (یورو)
۱۲۷,۰۷	۱۳۵,۷۸	۱۶۸,۶۷	۱۷۷,۳۸	هزینه انرژی تأمین‌نشده (یورو)
۳,۰۵	۱۱۱,۸۷	۷,۳۴	۱۴۴,۸۸	هزینه مازاد انرژی (یورو)
۲۰۳,۹۷	۲۵۸,۵۰	۲۷۰,۳۰	۳۳۴,۲۰	کل هزینه بهره‌برداری (یورو)

حالت مختلف مطالعه موردی نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که منحنی بار در حالت ۴ در مقایسه با حالت‌های ۱، ۲ و ۳ هموارتر است و در نتیجه انتظار می‌رود که هزینه بهره‌برداری کل ریزشکه در این حالت کمتر از بقیه حالت‌ها باشد که طبق جدول ۷ که مقایسه هزینه‌ها را نشان می‌داد این امر به وضوح قابل مشاهده است.

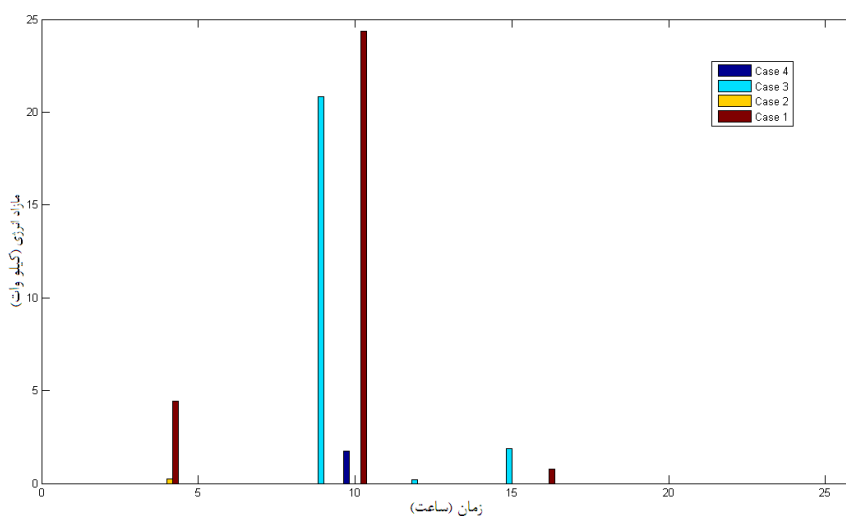
همچنین، شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب منحنی انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی برای ساعات مختلف شبانه‌روز را در چهار حالت مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که میزان انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی در حالت چهارم که برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی را مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که منجر به کاهش هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده گردیده و مازاد انرژی داشته که در جدول ۷ به وضوح قابل مشاهده است.

موردی چهارم که برنامه پاسخگویی بار و ذخیره‌ساز هیدروژن را به طور هم‌زمان استفاده کرده، هزینه کاهش قابل توجهی داشته است. علاوه بر این، هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده و انرژی مازاد در حالت چهارم نسبت به حالت‌های قبلی کاهش قابل توجهی داشته که منجر به کاهش هزینه کل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در یک ریزشکه جزیره‌ای، استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار علاوه بر کاهش انرژی تأمین‌نشده موجب کاهش هزینه کل بهره‌برداری ریزشکه شده است.

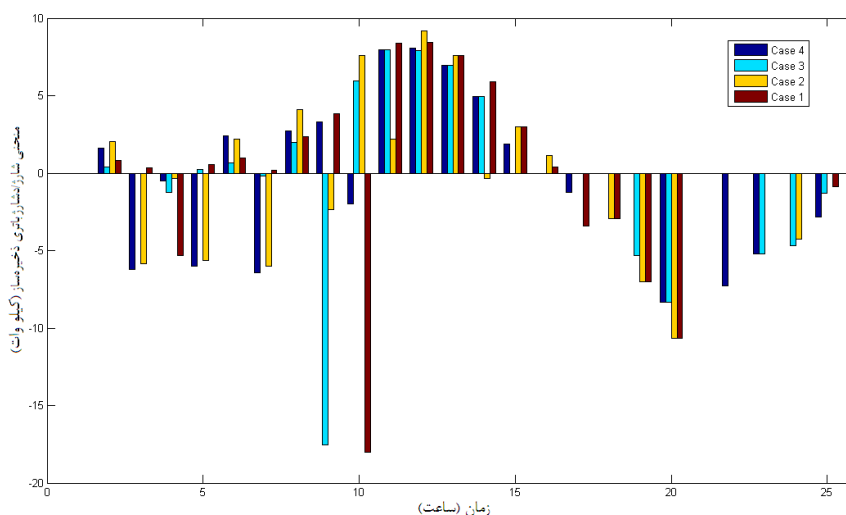
شکل‌های ۴ و ۵ توان تولیدشده توسط توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد که در هر چهار مطالعه موردی با حداکثر توان قابل دسترسشان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. همچنین شکل ۶ منحنی بار ریزشکه با در نظر گرفتن اثر برنامه پاسخگویی بار را در چهار



شکل ۷: منحنی انرژی تأمین نشده برای ساعات مختلف شبانه‌روز در چهار حالت.



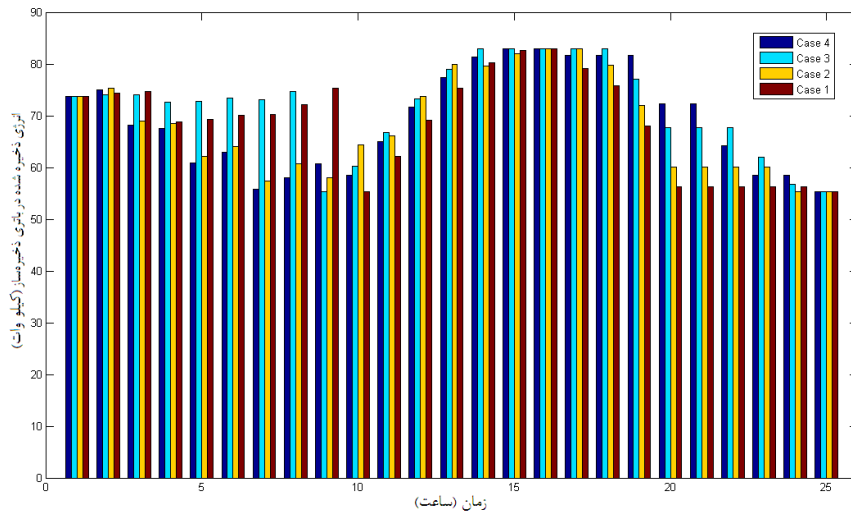
شکل ۸: منحنی مازاد انرژی برای ساعات مختلف شبانه‌روز در چهار حالت.



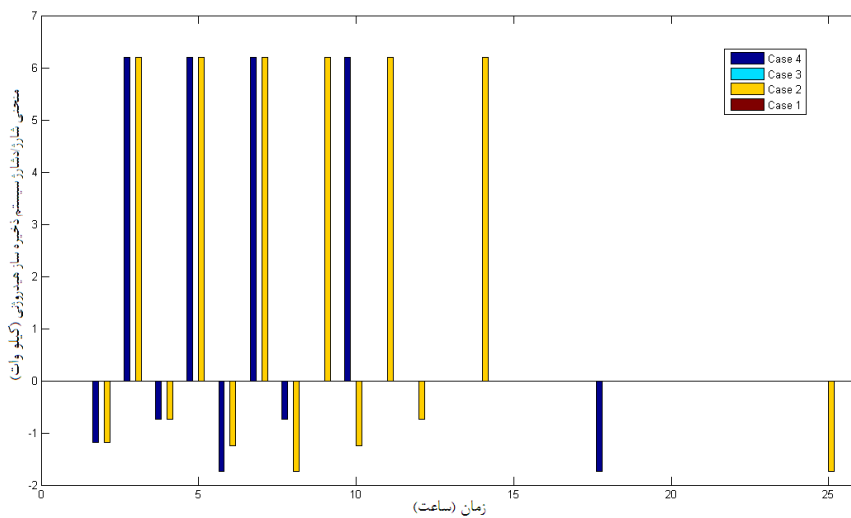
شکل ۹: منحنی شارژ/دشارژ باتری ذخیره‌ساز در چهار حالت.

نشان می‌دهد. از این گذشته، شکل ۱۱ میزان توان مصرف‌شده توسط الکتروولایزر برای تولید مول‌های هیدروژنی برای ذخیره در تانک‌های هیدروژنی و توان تولیدشده توسط پیل سوختی با مصرف مول‌های هیدروژن ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی را در چهار حالت مختلف ارائه کرده است. در آخر، شکل ۱۲ میزان فشار ذخیره‌شده در تانک‌های

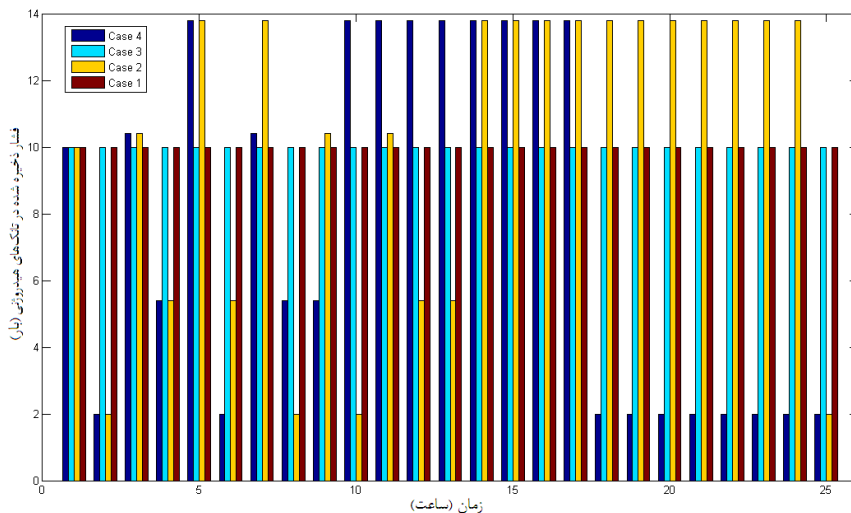
این کاهش توان انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی منجر به کاهش کل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در حالت چهارم در مقایسه با سایر موارد بهره‌برداری شده است. علاوه بر این شکل، شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب منحنی شارژ/دشارژ و میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری ذخیره‌ساز را در چهار حالت مختلف



شکل ۱۰: منحنی انرژی ذخیره‌شده در باتری ذخیره‌ساز در چهار حالت.



شکل ۱۱: منحنی توان مصرف‌شده (شارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی) و توان تولیدشده (شارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی) توسط الکترولایزر و پیل سوختی در چهار حالت.



شکل ۱۲: منحنی فشار ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی در چهار حالت.

هیدروژنی و برنامه‌پاسخگویی بار هموارتر از سایر حالت‌ها است و پیک بار کمتری نسبت به بقیه منحنی‌ها دارد. بنابراین در این حالت، هزینه بهره‌برداری کل کمتر از حالات دیگر خواهد شد. همچنین از شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود که انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی در حالت چهارم در مقایسه با حالت‌های اول، دوم و سوم کمتر شده و در نتیجه هزینه انرژی

هیدروژنی که ناشی از تولید مول‌های هیدروژن توسط الکترولایزر و مصرف مول‌های هیدروژن توسط پیل سوختی تغییر می‌کند را در چهار حالت مختلف بهره‌برداری نشان داده است. در مقایسه کلی می‌توان گفت از شکل ۶ مشاهده می‌شود که منحنی بار در حالت مطالعه چهارم به خاطر استفاده هم‌زمان از سیستم ذخیره‌ساز

- [10] C. Marnay and G. Venkataraman, "Microgrids in the evolving electricity generation and delivery infrastructure," in *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 5 pp., Oct. 2006.
- [11] J. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [12] J. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [13] Y. Uno, et al., "Evaluation of micro-grid supply and demand stability for different interconnections," in *Proc. IEEE Int. Power and Energy Conf., PECon'06*, pp. 612-617, Nov. 2006.
- [14] A. Yilanci, I. Dincer, and H. K. Ozturk, "A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 3, pp. 231-244, Jun. 2009.
- [15] E. I. Zoulias, et al., "Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 5, pp. 432-462, Oct. 2006.
- [16] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, W. I. F. David, and N. P. Brandon, "Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4356-4362, Dec. 2008.
- [17] O. Ulleberg, "The importance of control strategies in PV-hydrogen systems," *Solar Energy*, vol. 76, no. 1, pp. 323-329, Mar. 2004.
- [18] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 426-435, Apr. 2010.
- [19] H. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, "Optimum time of use program proposal for Iranian power systems," in *Proc. of Int. Conf. on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS'09*, 6 pp., Nov. 2009.
- [20] S. Nojavan, H. Qesmati, K. Zare, and H. Seyyedi, "Large consumer electricity acquisition considering time-of-use rates demand response programs," *Arabian J. for Science and Engineering*, vol. 39, no. 12, pp. 8913-8923, Dec. 2014.
- [21] R. Duflo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, and J. Contreras, "Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1102-1126, Jun. 2007.
- [22] The GAMS Software Website, 2015, <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/dicopt.pdf>.
- [23] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, *GAMS: A User's Guide*, Washington, DC: GAMS Development Corporation, 2008, <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>.
- [24] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. K. Kar, and C. Milan, "Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 820-831, Nov. 2014.
- [25] N. D. Tung and L. B. Le, "Optimal bidding strategy for microgrids considering renewable energy and building thermal dynamics," *Smart Grid, IEEE Trans. on*, vol. 5, no. 4, pp. 1608-1620, Jul. 2014.
- [26] H. A. Aalami and S. Nojavan, "Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 107-114, Jan. 2016.
- [27] S. Nojavan and H. A. Aalami, "Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 1008-1018, Oct. 2015.

علی مهدی زاده در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق-قدرت خود را از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تبریز دریافت نمود. نامبرده در سال ۱۳۹۲ دوره دکتری مهندسی برق گرایش سیستم در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان پذیرش شده و هم‌اکنون دانشجوی دوره دکتری می باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند بازار برق، شبکه های هوشمند و کنترل سیستم های قدرت می باشد.

نوید تقی زادگان کلانتری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۳ و ۱۳۸۶ از دانشکده‌های مهندسی برق و کامپیوتر، در دانشگاه های تبریز، تهران و تبریز به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می باشد. نامبرده قبل از دانشکده

تأمین نشده و مازاد انرژی در این حالت کمتر از حالت‌های قبلی شده است. نهایتاً از شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتیجه می شود که در حالت چهارم میزان شارژ و دشارژ باتری و سیستم ذخیره ساز هیدروژنی در مقایسه با حالت‌های دیگر با شیب ملایم انجام شده، زیرا حالت چهارم از مزایای سیستم ذخیره ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار به طور هم‌زمان بهره می برد و در نهایت منجر به کاهش هزینه کل بهره برداری ریزشبکه شده است.

۵- نتیجه گیری

ریزشبکه در حالت جزیره‌ای بهره برداری شده، شامل منابع انرژی نو از قبیل سلول‌های خورشیدی و توربین بادی به همراه سیستم ذخیره ساز باتری است. استراتژی جدید مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار مطالعه گردیده است. به دلیل معایب زیاد باتری در ذخیره سازی توان در درازمدت، استفاده از سیستم ذخیره ساز هیدروژنی به همراه برنامه پاسخگویی بار استفاده گردیده است. در این مقاله، تابع هدف پیشنهادی شامل هزینه‌های بهره برداری شارژ و دشارژ باتری، الکترولیزر و پیل سوختی و هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین نشده و مازاد انرژی است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی باعث مدیریت انرژی بهتری نسبت به بدون استفاده از آن شده و هزینه بهره برداری ریزشبکه و همچنین هزینه مربوط به انرژی تأمین نشده و مازاد انرژی کاهش می یابد. از طرفی با شرکت کردن بار ریزشبکه در برنامه پاسخگویی بار و شیفت بار از بازه‌های پیک به بازه‌های کم‌باری و میان‌باری باعث هموارشدن منحنی بار ریزشبکه شده و در نهایت موجب کاهش هزینه بهره برداری ریزشبکه در حالت جزیره‌ای شده است.

پیوست

فهرست علائم و اختصارات در جدول پ- ۱ آمده است.

مراجع

- [1] T. Hak, B. Moldan, and A. L. Dahl, *Sustainability Indicators: A Scientific Assessment*, Chapter 18, Island Press, Sept. 2012.
- [2] S. Wang, Z. Li, L. Wu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2852-2861, Aug. 2013.
- [3] P. S. Georgilakis and N. D. Hatzigiorgiou, "Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods, and future research," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3420-3428, Aug. 2013.
- [4] A. K. Basu, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Impact of strategic deployment of CHP-based DERs on microgrid reliability," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1697-1705, Jul. 2010.
- [5] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and A. M. Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 138-148, Jan. 2011.
- [6] F. Ren, M. Zhang, and D. Sutanto, "A multi-agent solution to distribution system management by considering distributed generators," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1442-1451, May 2013.
- [7] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," in *Proc. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conf., PESC 04*, vol. 6, pp. 4285-4290, Jun. 2004.
- [8] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Extended microgrid using (DER) distributed energy resources," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 5 pp., Jun. 2007.
- [9] R. H. Lasseter, "Microgrids," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 305-308, Jan. 2002.

جدول پ-۱: فهرست علائم و اختصارات.			
هزینه سرمایه‌گذاری باتری	C_{in}^B	توان تبدیلی توربین بادی	P_{con}
هزینه تعمیر و بهره‌برداری باتری	$C_{O\&M}^B$	چگالی هوا	ρ
تعداد باتری‌ها	N_B	مساحت سطح جاروب تیغه‌ها	A
ولتاژ نامی باتری‌ها	U_B	ضریب آبرودینامیکی روتور	C_p
ظرفیت نامی باتری‌ها	Q_B	توان در دسترس توربین بادی	$P_{t,s}^{wind}$
تعداد سیکل شارژ و دشارژ باتری	N_{CYCLES}	سرعت باد	$V_{t,s}^w$
هزینه سرمایه‌گذاری الکترولاایزر	C_{in}^{EL}	توان نامی توربین بادی	P_r
هزینه تعمیر و بهره‌برداری الکترولاایزر	$C_{O\&M}^{EL}$	سرعت وصل	V_{ci}
هزینه سرمایه‌گذاری پیل سوختی	C_{in}^{FC}	سرعت در توان نامی	V_r
هزینه تعمیر و بهره‌برداری پیل سوختی	$C_{O\&M}^{FC}$	سرعت قطع	V_c
احتمال سناریوی s	π_s	توان خروجی سلول خورشیدی	$P_{t,s}^{PV}$
متغیرها		شدت تابش خورشید	$G_{t,s}$
هزینه توان مازاد	$C_{EX,t,s}$	مساحت سلول خورشیدی	A_{PV}
هزینه توان تأمین نشده	$C_{UN,t,s}$	تعداد سلول‌های خورشیدی	N_{PV}
هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی	$C_{t,s}^{H\tau, ch}$	بازده سلول‌های خورشیدی	$\eta_{PV,t,s}$
هزینه بهره‌برداری باتری در حالت شارژ	$C_{t,s}^{B, ch}$	بازده سلول در شرایط استاندارد	$\eta_{PV,ref}$
هزینه بهره‌برداری باتری در حالت دشارژ	$C_{t,s}^{B, dis}$	ضریب دما	α
عمر مفید الکترولاایزر	L^{EL}	دمای محیط	$T_{t,s}$
عمر مفید پیل سوختی	L^{FC}	دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی	$NOCT$
عمر مفید باتری در حالت شارژ	$L_{t,s}^{B, ch}$	دمای استاندارد	T_{ref}
عمر مفید باتری در حالت دشارژ	$L_{t,s}^{B, dis}$	میزان انرژی باتری در ساعت شروع	$SOC_{t,}$
میزان افزایش بار	$ldr(t)$	انرژی اولیه باتری	$SOC_{initial}$
حداکثر بار قابل افزایش	$load^{inc}(t, s)$	حداکثر انرژی باتری	SOC^{max}
درصد بار قابل افزایش	$inc(t, s)$	حداقل انرژی باتری	SOC^{min}
بار با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار	$Load(t)$	حداکثر توان شارژ باتری	P_{charge}^{max}
میزان کاهش بار	$DR(t)$	حداقل توان شارژ باتری	P_{charge}^{min}
توان تأمین نشده	$P_{UN,t,s}$	حداکثر توان دشارژ باتری	P_{disc}^{max}
توان مازاد	$P_{EX,t,s}$	حداقل توان دشارژ باتری	P_{disc}^{min}
تعداد مول‌های هیدروژن مصرف‌شده توسط پیل سوختی	$N_{HV,t,s}^{FC}$	بازده شارژ باتری	η_{ch}^B
تعداد مول‌های هیدروژن تولیدشده توسط الکترولاایزر	$N_{HV,t,s}^{EL}$	بازده دشارژ باتری	η_{disc}^B
فشار تانک هیدروژنی	$P_{t,s}^{H\tau}$	حداقل توان الکترولاایزر	P_{min}^{EL}
توان الکترولاایزر	$P_{t,s}^{EL}$	حداکثر توان الکترولاایزر	P_{max}^{EL}
توان تولیدشده توسط پیل سوختی	$P_{t,s}^{FC}$	حداکثر تعداد مول‌های هیدروژن تولیدشده توسط الکترولاایزر	$N_{HV,t,s}^{EL,max}$
انرژی باتری	$SOC_{t,s}$	بازده الکترولاایزر	η^{EL}
میزان توان شارژ باتری	$P_{t,s}^{charge}$	حداقل ارزش حرارتی هیدروژن	$LHV_{H\tau}$
میزان توان دشارژ باتری	$P_{t,s}^{disc}$	فشار تانک هیدروژنی در وضعیت شروع	$P_{t,}^{H\tau}$
متغیرهای باینری		فشار تانک هیدروژنی در وضعیت اولیه	$P_{initial}^{H\tau}$
متغیر باینری برای وضعیت شارژ باتری	$U_{t,s}^{charge}$	حداکثر فشار تانک هیدروژنی	$P_{max}^{H\tau}$
متغیر باینری برای وضعیت دشارژ باتری	$U_{t,s}^{disc}$	حداقل فشار تانک هیدروژنی	$P_{min}^{H\tau}$
متغیر باینری برای وضعیت الکترولاایزر	$U_{t,s}^{EL}$	حداکثر تعداد مول‌های هیدروژن مصرف‌شده توسط پیل سوختی	$N_{HV,t,s}^{FC,max}$
متغیر باینری برای وضعیت پیل سوختی	$U_{t,s}^{FC}$	بازده پیل سوختی	η^{FC}
متغیرهای باینری		حداکثر توان تولیدشده توسط پیل سوختی	P_{max}^{FC}
متغیر باینری برای وضعیت شارژ باتری	$U_{t,s}^{charge}$	حداقل توان تولیدشده توسط پیل سوختی	P_{min}^{FC}
متغیر باینری برای وضعیت دشارژ باتری	$U_{t,s}^{disc}$	ثابت گازها	\mathfrak{R}
متغیر باینری برای وضعیت الکترولاایزر	$U_{t,s}^{EL}$	دمای میانگین هیدروژن	$T_{H\tau}$
متغیر باینری برای وضعیت پیل سوختی	$U_{t,s}^{FC}$	حجم مخزن هیدروژن	$V_{H\tau}$
متغیرهای باینری		بار پیش‌بینی شده	$load^*(t)$
متغیر باینری برای وضعیت شارژ باتری	$U_{t,s}^{charge}$	حداکثر درصد بار قابل کاهش	DR_{max}
متغیر باینری برای وضعیت دشارژ باتری	$U_{t,s}^{disc}$	حداکثر درصد بار قابل افزایش	inc_{max}

فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به این دانشگاه چندین سال به عنوان استادیار صنعتی در مراکز آموزشی و پژوهشی وزارت نیرو مشغول بوده و چندین عنوان پژوهشگر برتر را نیز دریافت نموده است. ایشان علاوه بر تألیف کتب متعدد در زمینه مهندسی برق، مجری چندین پروژه تحقیقاتی صنعتی در حد ملی بوده و نگارنده بیش از ۲۰۰ مقاله ژورنال و کنفرانس ملی و بین‌المللی نیز می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های قدرت و توزیع با تکیه بر مسائل حفاظتی، قابلیت اطمینان، حالت‌های دینامیکی و انرژی‌های تجدیدپذیر.