# چکیده

یکی از را‌ه‌های استفاده کامل از ظرفیت نیروگاه­های تجدیدپذیر در شبکه، استفاده از ذخيره‌سازها است. در بین ذخيره‌سازها، ذخيره‌سازی باتری و هیدروژنی بسیار مورد توجه قرار گرفته­اند. باتری­ها برای ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت و هیدروژن قابلیت ذخيره‌سازی در بلندمدت را دارد. در این مطالعه که هدف آن افزایش سطح نفوذ واحدهای تجدیدپذیر با استفاده از ذخيره‌سازی باتری و هیدروژن در شبکه می­باشد با مدل‌سازی کامل شبکه قدرت و با استفاده از پخش­بار DC و درنظرگرفتن مشخصات خطوط انتقال شبکه، از تجدیدپذیرها در کنار ذخيره‌ساز هیدروژنی و استفاده همزمان از سایر ذخيره‌ساز­ها مانند باتری استفاده­ می­شود. همچنین تأثیر طول­عمر هر ذخيره‌ساز در اولویت استفاده از آن مورد بررسی قرارمی­گیرد. سیستم پیشنهادی توسط نرم­افزار GAMS شبیه­­سازی شده است.

نتایج شبیه­سازی نشان می­دهد که در شبیه­سازی شبکه قدرت، استفاده همزمان از ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی همراه با در نظر گرفتن طول عمر هر ذخيره‌ساز و اولویت­بندی استفاده از هرکدام براساس طول عمرآن­ها نه تنها می­توان استفاده بهینه­تری از واحد­های تجدیدپذیر کرد بلکه می­توان با استفاده از قابلیت ذخیره بلندمدت هیدروژن، برای شبکه کسب درآمد نیز انجام داد. براساس این شبیه­سازی که در یک بازه 24 ساعته است، نشان می­دهد از باتری­ برای ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت و هیدروژن برای بلندمدت استفاده شده و این نوع استفاده در بهره‌یرداری از ذخيره‌ساز­ها سبب کاهش هزینه در بهره­برداری از شبکه می­شود. اما در صورت عدم تأمین بار و تأثیر هزینه استهلاک باتری از ذخيره‌ساز هیدروژنی نیز در کوتاه‌مدت استفاده می­شود. استفاده از ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در شبکه باعث افزایش 15 درصدی استفاده از واحدهای بادی و کاهش 32 درصدی هزینه بهره­برداری شده است.

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

داده­های شبکه 118 باس IEEE نیز در ضمیمه که شامل راکتانس(x)، مقاومت(r)، سوسپتانس شارژ خازنی کل خط(b) و مشخصات واحدهای تولیدی است، مشخص شده است ]24[. باس اسلک در این سیستم باس 2 و $S\_{base}=100 MVA$ در نظر گرفته شده است.

در شبکه مورد مطالعه در کنار واحدهای حرارتی واحدهای بادی نیز قرار داده شده است. میزان ظرفیت و مشخصات واحدهای بادی نیز در ]26-25[ مشخص شده است. میانگین الگوی تولید واحدهای بادی در هر زمان از روز به‌صورتی ساعتی در شکل 7 نشان داده شده است .

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

#### شکل 7: نمودار الگوی تغییرات باد بر حسب زمان در شبکه 118 باس IEEE[24]

در ادامه محل قرارگیری و ظرفیت واحدهای ذخيره‌ساز باتری و ذخيره‌سازی مبتنی بر تبدیل برق به هیدروژن در شبکه به‌صورت تقریبی و منطبق بر یک تحلیل کوتاه‌مدت تعیین می­شود ]27[. محل قرارگیری و ظرفیت واحدهای بادی و ذخيره‌سازی شبکه، در جدول 2 نشان داده شده است. همچنین سهم واحدهای تولیدی و ذخيره‌سازی در شکل 8 نشان داده شده است.

#### جدول2: ظرفیت و محل قرارگیری واحدهای حرارتی، بادی و ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در شبکه

#### شکل8: سهم هر واحد در شبکه 24 باس IEEE

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

# 2-3. نتایج تست سیستم کوچک با در نظر گرفتن ذخيره‌ساز هیدروژن

در بهره­برداری شبکه همراه با ذخيره‌ساز باتری، میزان توان بادی مازاد استفاده نشده دارای مقدار قابل توجهی است. همچنین باتری تقاضای روز شبکه را برطرف می­کند، اما برای روز­های آینده که میزان تولید واحدهای تجدیدپذیر کاهش می­یابد، ذخيره‌سازی به‌وسیله باتری امکان­پذیر نیست و نمی­توان حتی مازاد انرژی­های تجدیدپذیر را به‌صورت فصلی ذخيره‌سازی کرد. در نتیجه در کنار واحدهای حرارتی و بادی و ذخيره‌ساز باتری در شبکه، ذخيره‌ساز مبتنی بر هیدروژن نیز استفاده می­شود. ظرفیت و محل قرارگیری واحدهای هیدروژنی برای شبکه 24 باس IEEE در جدول1 مشخص شده است که به ترتیب در باس 9 و 18 با ظرفیت 500 و 400 مگاوات، قرار داده شده است.

نتایج حاصل از شبیه­سازی در این حالت نشان می­دهد، شبکه ابتدا تقاضای خود را با استفاده از واحدهای بادی رفع می­کند و در صورت وجود مازاد انرژی آن را در باتری یا به‌صورت هیدروژنی ذخيره‌سازی می­کند و در مواقع کمبود تولید نسبت به تقاضا، ابتدا از ذخيره‌ساز باتری به دلیل بازدهی بالاتر و هزینه کمتر استفاده می­شود و در صورت وجود تقاضا به ذخيره‌ساز هیدروژنی روی می­آورد. این نتایج به دلیل اینکه باتری، برای ذخيره‌سازی کوتاه‌مدت و هیدروژن برای بلندمدت مناسب است و سود حاصل از فروش هیدروژن مازاد، سبب کسب درآمد و کاهش هزینه بهره­برداری شبکه می­شود، حاصل شده است.

 نتایج حاصل از پخش بار شبکه در این حالت نشان می­دهد، که هزینه بهره­برداری در این حالت برابر 105$×$5083/2 دلار است که نسبت به حالتی که تنها ذخيره‌ساز باتری در شبکه استفاده شده است، 32 درصد در هزینه بهره­برداری صرفه­جویی شده است و سود حاصل از فروش هیدروژن برابر 103$×$76/104 دلار است. همچنین در این حالت حذف باری انجام نشده است و میزان استفاده از واحدهای حرارتی نسبت به مراحل گذشته در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است، به دلیل استفاده از ذخيره‌سازی مبتنی بر هیدروژن در کنار باتری، باعث افزایش نفوذ واحدهای بادی در شبکه شده است و حدود 20 درصد وابستگی شبکه به واحدهای حرارتی نسبت به زمانی که ذخيره‌سازها در شبکه حضور نداشته­اند، کاهش یافته است.

#### شکل 9: مقایسه میزان استفاده از واحدهای حرارتی در حالات مختلف

شکل 10 میزان انرژی استفاده شده و مازاد بادی در مراحل مختلف شبیه­سازی را نشان می­دهد. در شکل a-10 که انرژی مازاد بادی بدون حضور ذخيره‌سازها را نشان می­دهد در 7 ساعت در طول روز دارای مازاد انرژی بادی هستیم که بیشترین مقدار آن در ساعت 16 که برابر 1/293 مگاوات­ ساعت می­باشد.

اما بعد از استفاده از ذخيره‌ساز باتری، مطابق شکل 10-b این مقدار از انرژی مازاد استفاده نشده، حدود 60 درصد کاهش می­یابد و در ساعاتی که دارای مازاد تولید هستیم در باتری ذخیره­ شده و در ساعت­هایی که میزان تقاضا از تولید بیشتر است، باتری دشارژ می­شود. به‌عنوان نمونه، میزان 1/293 مگاوات ساعت انرژی مازاد بادی در ساعت 16 در حالت استفاده از ذخيره‌ساز باتری به 1/173 مگاوات ساعت کاهش یافته است و انرژی مازاد بادی در ساعت 18 به‌طور کامل در باتری ذخيره‌سازی می­شود.

(a)

(b)

(c)

#### شکل 10: میزان تولید واحدهای بادی (Pw) و توان مازاد بادی استفاده نشده (Pwc) بدون حضور ذخيره‌ساز باتری(الف)، باتری(ب)، باتری و هیدروژن(ج) در شبکه 24 باس

همانطور که در شکل b-10 قابل مشاهده است، هنگام استفاده از ذخيره‌ساز باتری به دلیل ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت و عدم توانایی در ذخیره­ بیشتر انرژی، در 5 ساعت از روز هنوز دارای مازاد انرژی هستیم. مطابق شکل c-10 بعد از اضافه شدن ذخيره‌ساز­های هیدروژنی به شبکه، مقدار مازاد انرژی بادی نسبت به زمانی که از باتری استفاده می­شود، حدود 90 درصد کاهش می­یابد. و تنها در ساعت 16 و 17 به ترتیب با مقادیر 11 و 1/25 مگاوات ساعت انرژی مازاد بادی، بدون استفاده باقی مانده است. دلیل این کاهش چشم­گیر در انرژی مازاد بادی هنگام استفاده از ذخيره‌ساز باتری و هیدروژن، ذخیره کوتاه‌مدت و رفع نیاز روزانه توسط باتری و ذخیره به‌صورت هیدروژن برای بلندمدت و فصلی می­باشد. به همین دلیل ظرفیت ذخيره‌سازی هیدروژن طبق مطالعات گذشته، در ظرفیت­های بالاتر دارای سوددهی و نتایج بهتری بوده است. در جدول 4 میزان انرژی مازاد بادی در هر ساعت از روز برای سناریوهای مختلف به تفصیل نشان داده شده است.

#### جدول4: انرژی مازاد بادی در حالت­های مختلف بهره­برداری

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ذخيره‌ساز باتری و هیدروژن(MWh) | با ذخيره‌ساز باتری(MWh) | بدون ذخيره‌ساز(MWh) | زمان(24-1) |
| - | 3/34 | - | 6 |
| - | - | 3/30 | 7 |
| - | 2/8 | 6/115 | 15 |
| 11 | 1/173 | 1/293 | 16 |
| 1/25 | 1/128 | 5/152 | 17 |
| - | - | 1/156 | 18 |
| - | 4/32 | 2/109 | 23 |
| - | 3/17 | 3/137 | 24 |

 در زمان حضور ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در کنار واحدهای بادی در شبکه، میزان سطح شارژ ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در هر لحظه از شبیه­سازی به ترتیب در شکل 11 و 12 مشخص شده است. در ذخيره‌ساز باتری در ساعات اولیه روز به دلیل تأمین تقاضا میزان سطح شارژ اولیه باتری که از روز قبل در باتری ذخیره­شده است، در ساعت 3 حدود 15 مگاوات ساعت دشارژ شده و تا چند ساعت اولیه روز این میزان سطح شارژ باتری در آن بدون تغییر باقی می­ماند. در ذخيره‌ساز هیدروژنی نیز در همین زمان شارژی صورت نگرفته است و میزان انرژی تولید شده توسط واحدهای بادی و حرارتی برای تأمین نیاز شبکه مصرف می­شود. اما بعد از آن در ساعت 5 و 6 به دلیل وجود مازاد انرژی بادی مطابق شکل 10، مقداری از مازاد انرژی در باتری و هیدروژن ذخیره شده و این روند تا ساعت 9 ادامه داشته است. اما از ساعت 10 تا 12 به دلیل افزایش میزان تقاضا در شبکه، باتری دشارژ شده و سطح شارژ آن کاهش یافته است اما در این بازه زمانی برای تأمین تقاضا شبکه از ذخيره‌ساز هیدروژن استفاده نشده است و میزان سطح هیدروژن ذخیره­شده در مقدار قبلی ثابت مانده است. در ادامه طول روز نیز این روند ادامه خواهد داشت و در طول روز تنها در یک مورد در ساعت 18 به دلیل افزایش ناگهانی تقاضا و عدم توانایی باتری در زمان مورد نظر برای تأمین لحظه‌ای و محدودیت­های انتقال برای محل قرارگیری باتری، از هیدروژن استفاده شده است و در باقی روز برای تأمین تقاضا از ذخيره‌ساز باتری استفاده می­شود. در ساعات انتهایی روز نیز سعی بر این است تا بیشترین مقدار هیدروژن، ذخیره­شود تا با فروش یا ذخيره‌سازی بلندمدت آن سود بیشتری نسبت به استفاده در کوتاه‌مدت به شبکه برسد و هزینه بهره­برداری شبکه کاهش یابد. به‌عنوان مثال در ساعت 17 به دلیل کمبود انرژی در باتری باس بیستم از ذخيره‌ساز هیدروژن استفاده شده است سپس در ساعت 22 و 23 مجدد شارژ شده است تا در پایان روز بیشترین مقدار هیدروژن برای فروش یا ذخيره‌سازی در بلندمدت باقی بماند. در مجموع باتوجه به نتایج گفته­ شده ابتدا واحدهای بادی نیاز شبکه را رفع می­کنند و مازاد تولید آن­ها در ذخيره‌سازها، ذخیره می­شود. در صورتی که میزان تولید واحدهای بادی از تقاضا کمتر باشد ابتدا از ذخيره‌ساز باتری برای تأمین تقاضا استفاده می­شود و درصورتی که باتری نیز توانایی تأمین تقاضا را نداشته باشد از ذخيره‌ساز مبتنی بر هیدروژن، برای تأمین نیاز شبکه استفاده می­کند. در پایان روز، مازاد هیدروژن اضافی باقی مانده قابلیت ذخيره‌سازی در بلندمدت یا فروش را داد.

#### شکل 11: میزان سطح شارژ باتری­ها در باس 2(Battery1) و باس 20 (Battery2) به‌صورت ساعتی در طول یک روز در شبکه 24 باس

#### شکل 12: میزان سطح شارژ هیدروژن در باس 9 (Hydrogen1) و باس 18 (Hydrogen2) به‌صورت ساعتی در طول یک روز در شبکه 24

در شبکه مورد نظر، تجهیزات ذخيره‌ساز هیدروژنی عموما ماهیت مکانیکی داشته و دارای طول عمر مشخصی هستند اما ذخيره‌ساز باتری به دلیل ذخيره‌سازی به واسطه واکنش­های شیمیایی، نحوه استفاده از آن شامل شارژ و تخلیه، در طول عمر آن تاثیرگذار است. از این جهت با توجه به روابط بخش 6-2 به این مبحث پرداخته شده است. برای تأثیر طول عمر باتری بر هزینه بهره­برداری، هزینه استفاده و استهلاک باتری مطابق رابطه 43 به رابطه 1 که تابع هدف و هزینه بهره­برداری شبکه است، اضافه می­گردد. با توجه به الگوریتم مبتنی بر ذخيره‌سازی با در نظر گرفتن طول عمر، هزینه استهلاک باتری با استفاده از الگوریتم Rainflow محاسبه شده است ]33[. در این پژوهش هزینه­های کامل چرخه باتری در تابع بهینه­سازی تأثیر داده شده است و به گونه­ای فرموله شده است که به‌صورت خطی قابل حل باشد. فرمولاسیون بهینه­سازی، برای در نظر گرفتن طول عمر باتری، به محاسبه دقیق DOD در هر نیم­چرخه تخلیه توسط باتری پرداخته است.

نتایج حاصل از این بخش نشان می­دهد، هزینه بهره­برداری در این حالت برابر 105$×$2703/2 دلار است که نسبت به حالت بدون تأثیر طول عمر باتری به میزان کمی کاهش یافته است. اما این مقدار در بلندمدت بسیار قابل توجه است. همچنین مقادیر توان بادی مازاد در این حالت تقریبا مشابه مقادیر بخش قبل است و تنها نحوه استفاده از ذخيره‌سازها در ساعت­های مختلف روز با یکدیگر متفاوت است و مواردی که استفاده از باتری به دلیل استهلاک آن باعث افزایش هزینه ­بهره­برداری شبکه می­شود، از ذخيره‌ساز هیدروژنی استفاده شده است.

با توجه به شکل 13 و 14 که میزان سطح شارژ باتری ­ها را در این حالت نشان می­دهد، در این بخش به دلیل تاثیرگذاری عمق دشارژ باتری بر طول عمر و هزینه استهلاک آن، در بعضی موارد ذخيره‌ساز مبتنی بر هیدروژن جایگزین باتری شده است. همانطور که مشاهده می­شود در ساعاتی که در هنگام استفاده از باتری بدون تأثیر طول عمر، سطح دشارژ باتری زیر 20 درصد بوده و باعث کاهش طول عمر باتری شده بود، تغییراتی داشته­ایم و سعی شده تا میزان سطح شارژ باتری بین 20 تا 90 درصد ظرفیت آن حفظ شود به‌عنوان مثال در ساعات ابتدایی و اواسط روز، سطح شارژ باتری پایدارتر شده و عمق دشارژ آن از 80 درصد فراتر نرفته است تا هزینه استهلاک آن به حداقل برسد، در این زمان­ها از هیدروژن بیشتر استفاده شده است تابتواند جایگزین باتری برای تأمین تقاضا باشد در نتیجه دارای سطح هیدروژن کمتری نسبت به قبل هستیم اما چون از هزینه استهلاک باتری کاسته شده است، در نتیجه دارای اندکی سود بیشتر در بهره­برداری شبکه نسبت به حالت قبل خواهیم بود. البته در بعضی موارد مانند ساعات انتهایی روز که فروش هیدروژن یا ذخيره‌سازی آن دارای سود بیشتری برای شبکه نسبت به استهلاک باتری است، عمق دشارژ باتری از 80 درصد فراتر رفته است و انرژی مازاد بادی به‌صورت هیدروژن ذخيره‌سازی شده است.

#### شکل 13: مقایسه میزان سطح شارژ باتری­ها در باس 2 قبل از تأثیر طول عمر(Battery1-a) و بعد از تأثیر طول عمر(Battery1-b)

#### شکل 14: مقایسه میزان سطح شارژ باتری­ها در باس 20 قبل از تأثیر طول عمر(Battery2-a) و بعد از تأثیر طول عمر(Battery2-b)

در شکل 15 میزان عمق دشارژ باتری ها نشان داده شده است. شکل a-15 میزان DOD اصلاح شده را نشان می­دهد که DOD1-a میزان عمق دشارژ باتری قبل از تأثیر طول عمر و DOD1-b میزان عمق درشارژ بعد از تأثیر طول عمر در باتری در باس 2 را نشان می­دهد که با کاهش عمق دشارژ باتری و حفظ آن در بازه 10 تا 80 درصد سعی شده تا طول عمر باتری افزایش یابد و سبب کاهش هزینه بهره­برداری شود. DOD∆ نیز مقدار تغییرات عمق دشارژ باتری را که با کاهش هزینه رابطه مستقیم دارد نشان می­دهد. بر این اساس در ساعات ابتدایی روز کاهش 6 تا 15 درصدی عمق دشارژ باتری سبب حفظ سطح شارژ آن به میزان 20 درصد ظرفیت باتری شده است. در ساعات 8 تا 14 و 17 تا 21 نیز این اصلاح در عمق دشارژ باتری انجام شده و به حفظ پایداری سطح شارژ باتری پرداخته است و در بقیه موارد سعی شده تا عمق دشارژ باتری از 80 درصد تجاوز نکند زیرا با کاهش سطح شارژ باتری به مقدار کمتر از 20 درصد ظرفیت آن، طول عمر باتری کاهش خواهد یافت. به‌طور مشابه در باتری دوم در باس 20 نیز چنین اصلاحاتی صورت گرفته است اما در در ساعات انتهایی روز شاهد افزایش عمق دشارژ باتری بوده ایم و حتی عمق دشارژ آن نسبت به حالت قبل افزایش یافته است، که دلیل آن را می­توان به استفاده بیشتر از ذخيره‌سازی مبتنی بر هیدروژن به جای باتری در طول روز و کاهش میزان ذخیره­شده آن اشاره کرد که با توجه به سود حاصل از فروش و ذخيره‌سازی هیدروژن شبکه ترجیح می­دهد در ساعات انتهایی روز بجای جلوگیری از استهلاک باتری، با ذخيره‌سازی حداکثری هیدروژن، سود حاصل از آن را کسب کند.

#### شکل 15: مقایسه میزان عمق دشارژ باتری قبل وبعد از تأثیر طول عمر در شبکه 24 باس IEEE

شکل 16 و 17 سطح هیدروژن ذخیره شده در طول روز را در مقایسه با حالت بدون تأثیر طول عمر باتری نشان می­دهد.

#### شکل 16: مقایسه میزان سطح شارژ هیدروژن در باس 9 قبل از تأثیر طول عمر(Hydrogen1-a) و بعد از تأثیر طول عمر(Hydrogen1-b) در شبکه 24 باس

#### شکل 17: مقایسه میزان سطح شارژ هیدروژن در باس 18 قبل از تأثیر طول عمر(Hydrogen2-a) و بعد از تأثیر طول عمر(Hydrogen2-b)

# 3-3 نتایج تست سیستم بزرگ با در نظر گرفتن ذخيره‌ساز هیدروژن

 در تست برنامه شبیه­سازی در مقیاس بزرگتر از شبکه 118 باس IEEE استفاده شده است و میزان ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر و ذخيره‌سازی به‌صورت واقع­ بینانه­تر در نظر گرفته شده است و حدود 7 درصد شبکه را واحدهای بادی و 5 درصد ظرفیت شبکه را ذخيره‌ساز­ها تشکیل داده­اند. ظرفیت و محل قرارگیری واحدهای تولید و ذخیره انرژی در جدول 2 مشخص شده است که در چهار نقطه از شبکه دارای ذخيره‌ساز باتری با حداکثر ظرفیت 26 مگاوات و هیدروژن با ظرفیت 100 مگاوات می­باشد.

نتایج حاصل از شبیه­سازی در این حالت نشان می­دهد، شبکه ابتدا تقاضای خود را با استفاده از واحدهای بادی رفع می­کند و در صورت وجود مازاد انرژی آن را در باتری یا به‌صورت هیدروژنی ذخيره‌سازی می­کند و در مواقع کمبود تولید نسبت به تقاضا ابتدا از ذخيره‌ساز باتری به دلیل بازدهی بالاتر و هزینه کمتر استفاده می‌شود و در صورت وجود تقاضا به ذخيره‌ساز هیدروژنی روی می­آورد. همچنین به دلیل اینکه باتری، برای ذخيره‌سازی کوتاه‌مدت و هیدروژن برای ذخيره‌سازی بلندمدت مناسب است و همچنین سود حاصل از فروش هیدروژن مازاد، نصیب شبکه می­شود، این اولویت­بندی در نتایج پخش بار در شبیه­سازی به دست آمده است.

 نتایج حاصل از پخش بار شبکه در این حالت نشان می­دهد، که هزینه بهره­برداری در این حالت برابر 105$×$0923/4 دلار است که نسبت به حالتی که تنها ذخيره‌ساز باتری در شبکه استفاده شده است، 26 درصد در هزینه بهره­برداری صرفه­جویی شده است و سود حاصل از فروش هیدروژن برابر 103$×$04/139 دلار است. همچنین در این حالت نیز حذف باری انجام نشده است و میزان استفاده از واحدهای حرارتی نسبت به گذشته کاهش یافته است.

شکل 18 میزان انرژی استفاده شده و مازاد بادی در هر ساعت از روز در شبیه­سازی را نشان می­دهد. در شکل a-18 که انرژی مازاد بادی بدون حضور ذخيره‌سازها را نشان می­دهد در 5 زمان در طول روز دارای مازاد انرژی بادی هستیم که بیشترین مقدار آن در ساعت 17 که برابر 2/30 مگاوات ساعت می­باشد.

امابعد از استفاده از ذخيره‌ساز باتری، مطابق شکل b-18 این مقدار از انرژی مازاد استفاده نشده، حدود 33 درصد کاهش می­یابد و در ساعاتی که دارای مازاد تولید هستیم در باتری ذخیره­ شده و در ساعت­هایی که میزان تقاضا از تولید بیشتر است، باتری دشارژ می­شود. به‌عنوان نمونه، میزان 2/30 مگاوات ساعت انرژی مازاد بادی در ساعت 17 در حالت استفاده از ذخيره‌ساز باتری به 6/25 مگاوات ساعت کاهش یافته است و انرژی مازاد بادی در ساعات 11 و 16 تقریبا صفر می­شود و در باقی ساعات روز به صورت جزیی باقی می­ماند.

(a)

(b)

(c)

#### شکل 18: میزان تولید واحدهای بادی (Pw) و توان مازاد بادی استفاده نشده (Pwc) بدون حضور ذخيره‌ساز باتری(الف)، باتری(ب)، باتری و هیدروژن(ج)

همانطور که در شکل b-18 قابل مشاهده است، هنگام استفاده از ذخيره‌ساز باتری به دلیل ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت و عدم توانایی در ذخیره­ بیشتر انرژی، در 5 ساعت از روز به‌صورت جزیی هنوز دارای مازاد انرژی هستیم. مطابق شکل c-18 بعد از اضافه شدن ذخيره‌ساز­های هیدروژنی به شبکه، مقدار مازاد انرژی بادی نسبت به زمانی که از باتری استفاده می­شود، حدود 92 درصد کاهش می­یابد. و تنها در ساعت 16 به ترتیب با مقادیر 2/3 مگاوات ساعت انرژی مازاد بادی، بدون استفاده باقی مانده است. دلیل این کاهش چشم­گیر در انرژی مازاد بادی همانند شبکه 24 باس استفاده از دو ذخيره‌ساز و امکان استفاده از انرژی ذخیره­شده در بلندمدت می­باشد. در جدول 5 میزان انرژی مازاد بادی در هر ساعت از روز برای سناریوهای مختلف به تفصیل نشان داده شده است.

#### جدول5: انرژی مازاد بادی در حالت­های مختلف بهره­برداری در شبکه 118 باس

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ذخيره‌ساز باتری و هیدروژن(MWh) | با ذخيره‌ساز باتری(MWh) | بدون ذخيره‌ساز(MWh) | زمان(24-1) |
| - | 4/8 | 1/11 | 4 |
| - | 1/6 | - | 5 |
| - | 9/0 | 9/15 | 11 |
| - | - | 3/4 | 16 |
| 2/3 | 6/25 | 2/30 | 17 |
| - | 4 | - | 18 |

 در زمان حضور ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در کنار واحدهای بادی در شبکه، میزان سطح شارژ ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در هر لحظه از شبیه­سازی به ترتیب در شکل 19 و 20 مشخص شده است. در ذخيره‌ساز باتری در ساعات اولیه روز به دلیل تأمین تقاضا میزان سطح شارژ اولیه باتری که از روز قبل در باتری ذخیره­شده است، دشارژ شده. در ذخيره‌ساز هیدروژنی نیز در همین زمان شارژی صورت نگرفته است و میزان انرژی تولید شده توسط واحدهای بادی و حرارتی برای تأمین نیاز شبکه مصرف می­شود. اما بعد از آن در ساعت 4 به دلیل وجود مازاد انرژی بادی مطابق شکل 18، مقداری از مازاد انرژی در باتری و سپس به‌صورت هیدروژن ذخیره شده و این روند تا ساعت 6 ادامه داشته است. اما در ساعت 7 به دلیل افزایش میزان تقاضا در شبکه، باتری و هیدروژن دشارژ شده و سطح شارژ آن کاهش یافته است که برخلاف تست در شبکه 24 باس IEEE به دلیل کمتر بودن سهم ظرفیت باتری در شبکه میزان استفاده از ذخيره‌ساز هیدروژنی برای کمک به تأمین نیاز شبکه افزایش یافته است. در ادامه طول روز نیز این روند ادامه خواهد داشت و در طول روز به دلیل افزایش ناگهانی تقاضا و عدم توانایی باتری در زمان مورد نظر برای تأمین لحظه­ای و محدودیت­های انتقال در محل قرارگیری باتری، از هیدروژن استفاده شده است، در غیر این صورت برای تأمین تقاضا از ذخيره‌ساز باتری استفاده می­شود. به‌عنوان نمونه در ساعت 15 میزان انرژی ذخیره­شده در باتری به‌طور کامل تخلیه شده و برای تأمین باقی تقاضا شبکه از هیدروژن استفاده شده است. در ساعات انتهایی روز نیز همانند شبکه 24 باس، سعی بر این است تا بیشترین مقدار هیدروژن، ذخیره­شود تا با فروش یا ذخيره‌سازی بلندمدت آن سود بیشتری نسبت به استفاده در کوتاه‌مدت به شبکه برسد و هزینه بهره­برداری شبکه کاهش یابد. به همین دلیل از ساعت 20 به بعد به‌طور کامل از باتری استفاده شده و شارژی در آن صورت نگرفته است ولی انرژی مازاد به‌صورت هیدروژنی در همین ساعات ذخيره‌سازی شده است. در مجموع باتوجه به نتایج گفته­ شده ابتدا واحدهای بادی نیاز شبکه را رفع می­کنند و مازاد تولید آن­ها در ذخيره‌سازها، ذخیره می­شود. در صورتی که میزان تولید واحدهای بادی از تقاضا کمتر باشد ابتدا از ذخيره‌ساز باتری برای تأمین تقاضا استفاده می­شود و درصورتی که باتری نیز توانایی تأمین تقاضا را نداشته باشد از ذخيره‌ساز مبتنی بر هیدروژن، برای تأمین نیاز شبکه استفاده می­کند. در پایان روز، مازاد هیدروژن اضافی باقی مانده قابلیت ذخيره‌سازی در بلندمدت یا فروش را داد. تنها فرق با کاهش نفوذ میزان واحدهای ذخيره‌ساز در شبکه 118 باس نسبت به شبکه 24 باس، در این است که برای جبران در تأمین نیاز شبکه از ذخيره‌ساز هیدروژنی، بیشتر از شبکه 24 باس استفاده می­شود.

#### شکل 19: میزان سطح شارژ باتری­ها قبل از تأثیر طول عمر در هر ساعت از روز در شبکه 118 باس IEEE

#### شکل 20: میزان سطح شارژ هیدروژن­ها قبل از تأثیر طول عمر در هر ساعت از روز در شبکه 118 باس IEEE

اما بعد از تأثیر طول عمر باتری هزینه بهره­برداری به میزان بسیار اندکی حدود 12/0 درصد کاهش می­یابد که نسبت به شبکه 24 باس این مقدار کمتر است و دلیل آن کاهش نفوذ ذخيره‌سازها در این شبکه و مدل‌سازی در کوتاه‌مدت است و تأثیر طول عمر برهزینه بهره­برداری، با افزایش مدت شبیه­سازی و افزایش سهم واحدهای تجدیدپذیر و ذخيره‌سازی در شبکه، بسیار قابل توجه خواهد بود.

مقادیر توان بادی مازاد در این حالت تقریبا مشابه مقادیر بخش قبل است و تنها نحوه استفاده از ذخيره‌سازها در ساعت­های مختلف روز با یکدیگر متفاوت است و علاوه بر زمان­هایی که باتری توانایی پاسخگویی به تأمین بار را ندارد، در زمان­هایی که استهلاک آن باعث افزایش هزینه بهره­برداری می­شود از هیدروژن برای تأمین بار استفاده می­شود.

هزینه صرفه­جویی شده در بهره­برداری شبکه که ناشی از جلوگیری از استهلاک باتری است براساس عمق دشارژ باتری می­باشد. در شکل 21 میزان عمق دشارژ باتری ها، قبل و بعد از تأثیر طول عمر نشان داده شده است که قسمت الف تا د هرکدام برای باتری اول تا چهارم می‌باشد. در نمودار بالا میزان عمق دشارژ هر حالت و در قسمت پایین DOD اصلاح شده را نشان می­دهد که اختلاف عمق دشارژ قبل و بعد از تأثیر طول عمر می­باشد.اگر این اختلاف عمق دشارژ در قسمت مثبت قرار گیرد یعنی اصلاح آن سبب کاهش استهلاک باتری شده و در نتیجه باعث کاهش هزینه بهره­برداری شده است و بالعکس اگر در قسمت منفی قرار گیرد یعنی استهلاک باتری افزایش یافته و در نتیجه هزینه بهره­برداری نیز افزایش یافته است. البته باید به این نکته توجه کرد که باید عمق دشارژ باتری در محدوده مجاز خود بین 10 تا 80 درصد باشد. به‌عنوان مثال در شکل 4-18-الف، DOD1-a میزان عمق دشارژ باتری قبل از تأثیر طول عمر و DOD1-b میزان عمق دشارژ باتری بعد از تأثیر طول عمر را برای باتری اول نشان می­دهد که با کاهش عمق دشارژ باتری و حفظ آن در بازه 10 تا 80 درصد سعی شده تا طول عمر باتری افزایش یابد و سبب کاهش هزینه بهره­برداری شود. DOD∆ نیز مقدار تغییرات عمق دشارژ باتری را که با کاهش هزینه رابطه مستقیم دارد نشان می­دهد. بر این اساس در ساعات ابتدایی روز کاهش حدود 20 درصدی عمق دشارژ باتری سبب حفظ سطح شارژ آن به میزان 20 درصد ظرفیت باتری شده است. در ساعات 4 تا 12 اصلاح عمق دشارژ باتری برای باتری اول مثبت بوده ولی در ساعت 7 در باتری دوم و چهارم موجب استهلاک بیشتر آن شده است و باتری سوم نیز تغییراتی نداشته است. این روند در باقی روز نیز طی شده اما در ساعات انتهایی روز بیشترین تخلیه توسط باتری‌ها صورت گرفته است و نسبت به حالت بدون تأثیر طول عمر در همان ساعت عمق دشارژ بیشتری رخ داده است که علت آن شارژ ذخيره‌ساز هیدروژنی برای ذخيره‌سازی در بلندمدت و فروش آن می­باشد. به‌عنوان مثال در باتری اول از ساعت 18 تا 23 عمق دشارژ نسبت به قبل بیشتر شده که سبب استهلاک بیشتر باتری می­شود همچنین در باتری دوم در ساعت 22 عمق دشارژ نسبت به قبل حدود20 درصد افزایش یافته است و در ساعات بعدی نیز بدون تغییر باقی مانده است.

#### شکل 21: مقایسه میزان عمق دشارژ باتری قبل وبعد از تأثیر طول عمر در شبکه 118 باس IEEE

با توجه به شکل 22 که میزان سطح انرژی ذخیره­شده در باتری­ها را قبل و بعد از اصلاح DOD نشان می­دهد، در ساعاتی که در هنگام استفاده از باتری بدون تأثیر طول عمر، سطح دشارژ باتری زیر 20 درصد بوده و باعث کاهش طول عمر باتری شده بود، تغییراتی داشته­ایم و سعی شده تا حداقل میزان 20 درصد ظرفیت باتری، انرژی در آن ذخیره شود و در کل میزان سطح شارژ باتری را بین 20 تا 90 درصد ظرفیت آن به‌صورت پایدار حفظ کند. به‌عنوان مثال در ساعات ابتدایی و اواسط روز، سطح شارژ باتری پایدار تر شده و عمق دشارژ آن از 80 درصد فراتر نرفته است و انرژی ابتدایی آن حفظ شده البته در باتری دوم در ساعت 3 مقداری تخلیه داشته­ایم. در این زمان میزان استفاده از واحد های حرارتی نسبت به قبل بیشتر شده است زیرا واحدهای هیدروژنی نیز شارژ نبوده و برای اصلاح عمق دشارژ باتری در ساعات بعدی روز اندکی شارژ می­شوند. در باقی ساعات روز که برای جلوگیری از استهلاک باتری هیدروژن سهم خود را در تأمین نیاز کوتاه‌مدت حدود 20 درصد افزایش داده است. البته در بعضی موارد مانند ساعات انتهایی روز که فروش هیدروژن یا ذخيره‌سازی آن دارای سود بیشتری برای شبکه نسبت به استهلاک باتری است، عمق دشارژ باتری روی حداقل مقدار آن نگه داشته شده است و انرژی مازاد بادی به‌صورت هیدروژن ذخيره‌سازی شده است.

#### شکل 22: مقایسه میزان انرژی ذخیره­شده در باتری قبل و بعد از تأثیر طول عمر باتری در شبکه 118 باس IEEE

شکل 23 سطح هیدروژن ذخیره­شده در طول روز را در مقایسه با حالت بدون تأثیر طول عمر باتری نشان می­دهد.

#### شکل 23: میزان سطح شارژ هیدروژن بعد از تأثیر طول عمر به‌صورت ساعتی در طول یک روز در شبکه 118 باس IEEE

میزان استفاده از هیدروژن برای تأمین نیاز شبکه در کوتاه‌مدت در شبکه 118 باس به دلیل میزان نفوذ کمتر ذخيره‌سازها نسبت به شبکه 24 باس حدود 20 درصد بیشتر بوده است.

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

نتیجه­گیری

در این پژوهش مطالعه بر روی شبکه 24 و 118 باس IEEE در سطح انتقال پرداخته شده است که در آن در 24 باس حدود 30 درصد ودر118 باس حدود 7 درصد واحدهای فسیلی، واحد بادی به شبکه اضافه شده است. میزان ذخیره سازها در شبکه 24 باس حدود 21 درصد و در شبکه 118 باس حدود 6 درصد بوده است. ابتدا شبیه­سازی در شبکه کوچک تر 24 باس با نفوذ بالای انرژی­های تجدیدپذیر و ذخیره ساز باتری و هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است تا نتایج شبیه­سازی به‌طور واضح­تری نشان داده شود سپس در شبکه 118 باس به‌عنوان شبکه بزرگتر با میزان نفوذ واقع بینانه­تری پیاده­سازی شده است.

به­طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان می­دهد، اگر در کنار واحدهای حرارتی، واحدهای بادی استفاده شود، انرژی مازاد استفاده نشده بادی زیادی باقی می­ماند و میزان نفوذ واحدهای تجدیدپذیر به دلیل قیود فنی و محدودیت­های شبکه ازجمله پایداری و محدودیت­های خطوط انتقال، کم است. اما زمانی که واحدهای ذخيره‌ساز مانند باتری و هیدروژن استفاده می­شود، بیشترین استفاده از واحدهای بادی صورت می­گیرد و میزان توان مازاد بادی به حداقل می­رسد، به همین دلیل هزینه بهره­برداری شبکه در کنار آلودگی­های محیط­زیستی و انتشار گاز­های گلخانه­ای به‌صورت قابل توجهی کاهش می­یابد.

استفاده تنها از ذخيره‌ساز باتری به دلیل محدودیت­های نگهداری انرژی، میزان قابل توجهی انرژی مازاد بادی را در شبیه­سازی نشان می­دهد اما اگر در کنار باتری از ذخيره‌سازی مبتنی بر هیدروژن استفاده شود، نه تنها مازاد انرژی بادی، برای آینده یا فروش در بازار هیدروژن، ذخيره‌سازی می­شود بلکه در تأمین تقاضای روز شبکه نیز به باتری کمک می­کند و باعث افزایش سهم واحدهای بادی در شبکه می­شود. در این حالت ابتدا واحدهای بادی نیاز شبکه را برطرف می­کنند و مازاد خود را در ذخيره‌ساز­ها، ذخیره می­کنند و در زمان کمبود تولید واحدهای بادی نسبت به تقاضا، ابتدا از باتری استفاده می­شود و در صورت نیاز از هیدروژن برای تأمین تقاضا شبکه استفاده می­شود. هیدروژن مازاد را نیز در انتهای روز می­توان برای بلندمدت ذخيره‌سازی کرد یا در بازار هیدروژن فروخت که سود بسیار خوبی برای شبکه خواهد داشت.

اما زمانی که طول عمر ذخيره‌ساز باتری در بهره­برداری از شبکه تأثیر داده می­شود، برای جلوگیری از افزایش هزینه استهلاک باتری که باعث افزایش هزینه بهره­برداری شبکه می­شود، در ابتدا و اواسط روز در مواردی که استفاده از باتری باعث کاهش طول عمر آن می­شود، از ذخيره‌ساز هیدروژنی استفاده می­شود اما در ساعات انتهایی روز به دلیل اینکه سود حاصل از ذخیره­ازی و فروش هیدروژن بیشتر از استفاده از آن است، استفاده از باتری بیشتر می­شود تا بتوان بیشترین مقدار هیدروژن را ذخيره‌سازی کرد. تأثیر طول عمر بر بهره­برداری باعث کاهش کمی در هزینه بهره­برداری در کوتاه‌مدت می­شود اما چون این مساله در سطح انتقال و ابعاد بزرگ بررسی شد، تأثیر آن قابل مشاهده بوده است، اما این تأثیر در بلندمدت بسیار قابل توجه است.

نتایج نشان می­دهد استفاده همزمان از باتری و هیدروژن باعث کاهش 20 درصدی در واحدهای حرارتی می­شود که این مقدار توسط انرژی مازاد بادی ذخیره­شده در ذخيره‌ساز­ها جبران می­شود. در هزینه بهره­برداری نیز حدود 32 درصد صرفه­جویی صورت گرفته است. اگر میزان نفوذ واحدهای تجدیدپذیر به واسطه وجود ذخيره‌ساز باتری و هیدروژن در شبکه بیشتر شود به دلیل ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت وبلندمدت و فروش انرژی مازاد سود بسیار بیشتری عاید شبکه خواهد شد. همچنین بازدهی اقتصادی هیدروژن در ظرفیت­های بالاتر بسیار بهتر است. استفاده تنها از هر ذخيره‌ساز نیز به دلیل ویژگی­های خاص هرکدام، هزینه بهره­برداری بیشتری را به شبکه تقبل می­کند و بیشترین میزان کاهش هزینه در نفوذ بالای واحدهای تجدیدپذیر در شبکه و حضور همزمان هردو ذخيره‌ساز می­باشد.

در کل استفاده از ذخيره‌ساز باتری و هیدروژنی در کنار واحدهای تجدیدپذیر در شبکه برای ذخيره‌سازی در کوتاه‌مدت و بلندمدت بسیار مناسب است و باعث افزایش حداکثری سهم واحدهای تجدیدپذیر در شبکه می­شود. همچنین با تأثیر گذاری طول عمر ذخيره‌ساز­ها در اولویت­بندی استفاده از آن­ها و کاهش هزینه استهلاک ذخيره‌سازها، هزینه بهره­برداری در بلندمدت کاهش می­یابد.