

## برنامه‌ریزی تولید بهینه نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه با هدف حفاظت از هدررفت منابع آبی

امیر شهریار کلانتری<sup>۱</sup>، یونس نوراللهی<sup>۲\*</sup>، حسین یوسفی<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، آزمایشگاه تحقیقاتی متساپ، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست،

دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی متساپ، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۱۰)

### چکیده

پژوهش پیش رو به برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه با تابع هدف حفظ آب در چرخه، با رویکرد حفاظت از منابع آبی می‌پردازد. در پژوهش حاضر تأثیر برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه بر تقاضای بار الکتریکی کشوری بررسی شده است. با توجه به منافع فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی منابع تجدیدپذیر، تأثیر نصب نیروگاه بادی و خورشیدی (هیبرید با نیروگاه تلمبه-ذخیره) بر عملکرد نیروگاه سیاه‌بیشه و بار الکتریکی کشوری نیز بررسی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه چه به صورت هیبرید با منابع تجدیدپذیر و چه در حالت عادی، توانایی کاهش یک گیگاواتی پیک سالانه بار سراسری و کاهش بار پیک ماهانه را دارد. در پژوهش حاضر، روزانه در مدت چهار ساعت  $۳.۴۸۱.۹۲۰$  مترمکعب آب از سد بالادست به سد پایین‌دست منتقل می‌شود و تولید توان می‌کند و در مدت پنج ساعت دوباره این آب به سد بالادست پمپاژ می‌شود. با نصب واحدهای نیروگاهی بادی، خورشیدی و بادی-خورشیدی به ترتیب  $۴۵۱/۱۴۰$ ،  $۳۲۸/۹۲۹$  و  $۷۸۰/۰۶۹$  هزار تن میزان انتشار معادل دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. همچنین، نصب منابع بادی سبب کاهش مصرف انرژی اولیه برابر با  $۱۵۸/۶۵۸$  هزار تن معادل نفت، نصب منابع خورشیدی سبب کاهش  $۱۱۵.۶۷۷$  هزار تن معادل نفت و نصب هم‌زمان منابع بادی و خورشیدی سبب کاهش  $۲۷۴/۳۳۵$  هزار تن معادل نفت شد.

**کلیدواژگان:** سیاه‌بیشه، منابع تولید پراکنده بادی، منابع تولید پراکنده خورشیدی، نیروگاه برق‌آبی، نیروگاه تلمبه-ذخیره.

## مقدمه

تأمین تقاضای انرژی الکتریکی مشترکان در ساعت‌هایی که نیاز مصرف‌کنندگان بیشینه می‌شود (ساعت‌های اوج مصرف) یکی از دغدغه‌ها و موضوعات مهمی است که مدیریت شبکه الکتریکی همواره درگیر آن است. هر سال میزان تقاضای بارهای الکتریکی کشور در ساعت‌های اوج مصرف شاهد رشد درخور توجهی نسبت به سالیان قبل است. برای نمونه، میزان پیک سراسری بار سالانه طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷ به ترتیب برابر با ۵۳۰۴۱ مگاوات، ۵۵۴۴۲ مگاوات و ۵۷۰۹۷ مگاوات است. بررسی پیک‌های سراسری سالانه ده سال اخیر بیان‌کننده رشد میانگین سالانه ۴/۸ درصدی بار پیک سراسری در هر سال است. از سوی دیگر، ساعت‌های اوج مصرف، درصد کمی از کل زمان‌های سال را شامل می‌شود که برای تأمین بار آن باید نیروگاه‌های جدیدی احداث شود که فقط در ساعت‌های اوج مصرف سالانه بهره‌برداری می‌شوند. از آنجا که اختلاف میزان تقاضای بارهای الکتریکی در ساعت‌های کم‌بار و اوج بار در برخی از روزها به چند هزار مگاوات نیز می‌رسد، استفاده از نیروگاه‌های برق‌آبی تلمبه-ذخیره با ظرفیت مناسب برای تسطیح منحنی تولید و مصرف توان الکتریکی، بسیار کارآمد و قابل توجه است. نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره به طور گسترده برای ذخیره انرژی استفاده می‌شوند [۱-۳]. در زمان‌هایی که تقاضای برق کم است (معمولاً نیمه‌شب)، اضافه‌تولید نیروگاه‌های الکتریکی توسط پمپاژ آب از یک مخزن پایین‌تر به یک مخزن بالاتر انتقال می‌یابد و سیال در سد بالاتر ذخیره می‌شود. طی روز هنگامی که تقاضا افزایش می‌یابد، انرژی ذخیره‌شده (در قالب اختلاف پتانسیل سیال) به برق تبدیل می‌شود. درخور یادآوری است که معمولاً طی فرایند ذخیره‌سازی و تولید توان، حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد اتلاف انرژی نیز وجود دارد. به طور معمول، فرایند تلمبه کردن ۱۳/۶ درصد تلفات انرژی دارد که از این مقدار، ۰/۵ درصد در ترانسفورماتورها، ۳ درصد در موتورها، ۹/۶ درصد در پمپ‌ها و ۰/۵ درصد در لوله‌ها صورت می‌پذیرد. همچنین، به طور معمول فرایند تولید توان ۹/۱ درصد تلفات دارد که از این مقدار، ۰/۴ درصد در ترانسفورماتورها، ۱/۴ درصد در ژنراتورها، ۶/۵ درصد در توربین‌ها و ۰/۸ درصد در لوله‌ها اتلاف انرژی وجود دارد [۴]. نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره در کشورهای مختلفی همانند چین [۵ و ۶]، هند [۷ و ۸]، ژاپن [۹]، اروپا [۱۰ و ۱۱] و ایالات متحده آمریکا [۱۲]

استفاده شده است. به طور کلی، نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره در کشورهایی که سهم عمده‌ای از توان الکتریکی خود را از نیروگاه‌های هسته‌ای (مانند فرانسه و ژاپن) و نیروگاه‌هایی با سوخت زغال سنگ (مانند آمریکا) تأمین می‌کنند، متمرکزند. نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال سنگ به دلیل عدم انعطاف‌پذیری تأمین توان تولیدی مطابق تغییرات بار الکتریکی مصرفی شبکه اغلب به صورت نیروگاه‌هایی با توان ثابت و با هدف تأمین بار پایه شبکه طی شبانه‌روز بهره‌برداری می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. برای تنظیم تغییرات تقاضا در ساعت‌های مختلف، نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره با هدف جذب انرژی طی شب (که تقاضا کم است) و تولید توان به هنگام روز (که تقاضا زیاد است) استفاده می‌شوند [۱۵]. در سال‌های اخیر و با توسعه فناوری، تمایل به استفاده از نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره برای ذخیره‌سازی انرژی تولیدشده منابع نامنظم<sup>۱</sup> مانند باد [۱۶-۱۸] و خورشید [۱۹] بیش از پیش شده است، چرا که منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک مانند باد، خورشید، موج، جزر و مد، زیست‌توده، زباله‌های شهری و غیره، طبیعت و ماهیتی نامنظم دارند و از این‌رو امکان تولید مستمر، منظم و حساب‌شده توان الکتریکی از این منابع امکان‌پذیر نیست [۲۰ و ۲۱]. از میان منابع یادشده، باد به دلیل دخیل بودن پارامترهای هواشناسی گوناگون غیر قابل پیش‌بینی‌تر است. در عمل مشاهده می‌شود که تغییرات وزش و تولید انرژی الکتریکی از منابع بادی در بازه‌های زمانی سالانه، ماهانه، هفتگی، روزانه و ساعتی غیر قابل پیش‌بینی‌تر و الگوانپذیرتر است [۲۲]. بر همین مبنا، برای استفاده و اخذ توان الکتریکی به‌دست‌آمده از نیروی باد در شبکه و اطمینان از کیفیت توان مطلوب، سیستم‌های بزرگ ذخیره‌سازی انرژی مورد نیاز است. از سوی دیگر، تابش خورشید قاعده‌مندتر و پیش‌بینی‌پذیرتر از وزش باد است و بر این اساس، تولید توان الکتریکی از منابع خورشیدی منظم‌تر، حساب‌شده‌تر و مدیریت و تأمین کیفیت توان به کمک این منابع ساده‌تر است. به همین دلیل، سیستم‌های کوچک ذخیره‌ساز انرژی در کنار این منابع می‌توانند تداوم‌بخش تأمین پیوسته بار مشترکان و کیفیت توان شبکه باشند. اما نکته‌ای که به عنوان یکی از ضعف‌های منابع خورشیدی باید به آن اشاره کرد، ناتوانی تولید توان الکتریکی در شب است [۲۳ و ۲۴].

جدول ۱. بیست کشور برتر تولید برق از نیروگاه‌های برق آبی [۲۸]

ترتیب	کشور	نیروگاه آبی	تلمبه- ذخیره (مگاوات)	ظرفیت کل ترکیبی (مگاوات)
۱	چین	۱۴۰۱۲۰	۱۱۱۴۰۰	۲۵۱۵۲۰
۲	هند	۶۱۸۱۵	۳۵۰۰	۶۵۳۱۵
۳	برزیل	۳۵۴۵۵	۰	۳۵۴۵۵
۴	پاکستان	۳۱۱۶۸	۰	۳۱۱۶۸
۵	نپال	۲۵۹۹۳	۰	۲۵۹۹۳
۶	میانمار	۲۵۶۹۷	۰	۲۵۶۹۷
۷	ایالات متحده آمریکا	۱۷۱۲	۱۹۹۱۳	۲۱۶۲۵
۸	بوتان	۲۰۵۵۴	۰	۲۰۵۵۴
۹	اندونزی	۱۵۱۲۰	۵۲۸۰	۲۰۴۰۰
۱۰	فیلیپین	۷۲۷۰	۱۱۵۹۰	۱۸۸۶۰
۱۱	ترکیه	۱۰۲۰۱	۰	۱۰۲۰۱
۱۲	اتیوپی	۹۲۰۲	۰	۹۲۰۲
۱۳	ایران	۷۹۷۶	۱۰۰۰	۸۹۷۶
۱۴	لائوس	۸۶۳۲	۰	۸۶۳۲
۱۵	کلمبیا	۸۱۰۰	۰	۸۱۰۰
۱۶	پرو	۶۹۹۴	۰	۶۹۹۴
۱۷	آرژانتین	۶۷۷۱	۰	۶۷۷۱
۱۸	اکوادور	۶۵۶۱	۰	۶۵۶۱
۱۹	کانادا	۴۳۵۹	۱۵۰۰	۵۸۵۹
۲۰	ویتنام	۴۱۲۶	۱۲۰۰	۵۳۲۶

ساعت در سال ۲۰۱۵ به ۶۱۷۸/۹۲ تراوات ساعت در سال ۲۰۴۰ برسد [۲۷]. براساس گزارشی که در سال ۲۰۱۸ برای دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا تنظیم شده است، کشور ایران در رتبه‌بندی نیروگاه‌های مرتبط با آب، رتبه ۱۳ را کسب کرده است. از مجموع ۸۹۷۶ مگاوات نیروگاه‌های برق آبی ایران، ۷۹۷۶ مگاوات آن نیروگاه برق آبی و یک هزار مگاوات آن نیروگاه تلمبه- ذخیره است [۲۸]. جدول ۱، بیست کشور برتر در تولید برق از نیروگاه‌های برق آبی و تلمبه- ذخیره را نشان می‌دهد.

براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، در سال ۲۰۱۶ تأمین انرژی اولیه<sup>۳</sup> الکتریسیته نیروگاه‌های برق آبی کشور برابر ۱۴۱۲ (کیلو معادل نفت خام<sup>۴</sup>) است [۲۹].

#### نیروگاه سیاه‌بیشه

نیروگاه تلمبه- ذخیره سیاه‌بیشه (نخستین نیروگاه تلمبه- ذخیره ایران) در دامنه‌های رشته‌کوه البرز و در مجاورت

نیروگاه‌های تلمبه- ذخیره مزایای متعددی همچون راه‌اندازی و توقف سریع و انعطاف‌پذیر، توانایی رهگیری تغییرات بار، سازگاری و تطبیق تولید با تغییرات بار شدید و پایدارسازی ولتاژی و فرکانسی دارند [۲۵].

براساس «چشم‌انداز جهانی انرژی<sup>۱</sup>» سال ۲۰۱۷ سهم نیروگاه‌های آبی در تولید الکتریسیته جهانی ۱۵/۷ درصد بوده است که این مقدار نه تنها از مشارکت سایر منابع تجدیدپذیر بادی (۴/۱ درصد)، خورشیدی (۱/۶۶ درصد)، بیوانرژی (۲/۳ درصد) و سایر منابع (ژئوترمال و...) افزون است، بلکه از میزان مشارکت منابع هسته‌ای در تولید الکتریسیته (۱۰/۱ درصد) نیز بیشتر است. تنها منابع فسیلی با ۶۳/۹ درصد (زغال سنگ ۳۷/۸ درصد، گاز طبیعی ۲۲/۴ درصد و نفت ۳/۶ درصد) مشارکت بیشتری در تولید انرژی الکتریکی دارند [۲۶]. در «سناریوی سیاست‌های جدید<sup>۲</sup>» پیش‌بینی می‌شود که میزان تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه‌های آبی از ۳۹۰۴/۶۶ تراوات

3. Primary Energy Supply  
4. Tonne of Oil Equivalent (TOE)

1. World Energy Outlook  
2. New Policies Scenario

دارند. همچنین، در ساعات‌های کم‌بار با دریافت ۹۴۰ مگاوات توان قادر به تلمبه کردن آب با دبی ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه هستند [۳۳].

### روش‌ها و مواد

#### مدل‌سازی داده‌های بادی

داده‌های خام اولیه برای به دست آوردن مقدار تولید انرژی بادی، میزان وزش باد است. داده‌های اولیه وزش باد از منطقه سیاه‌بیشه و اطراف سایت نیروگاهی سیاه‌بیشه استخراج شده است [۳۴] که باید بر اساس ضوابط موجود به میزان تولید انرژی بادی تبدیل شود. داده‌های وزش باد پژوهش حاضر به صورت میانگین ساعتی و اطلاعات براساس ۸۷۶۰ ساعت موجود است.

برای به دست آوردن توان خروجی توربین‌های بادی در هر لحظه از روابط ۱-۴ استفاده می‌شود؛ که در آن  $v_{cin}$  سرعت باد برای شروع تزریق توان به ریزشبه از توربین بادی،  $v_{cout}$  سرعت قطع توان،  $v_{rated}$  سرعت نامی و  $P_{rated}$  توان نامی توربین بادی (براساس میانگین ساعتی وزش باد) است.

روستای سیاه‌بیشه است که در فاصله ۴۸ کیلومتر چالوس در استان مازندران و در ۱۲۵ کیلومتری شمال تهران و ۱۰ کیلومتری شمال تونل کندوان در مسیر جاده کرج-چالوس قرار دارد.

این نیروگاه از دو سد تشکیل شده است که سد بالایی ۸۲/۵ متر بلندی و ۴۳۶ متر درازا دارد. مخزن سد بالایی ظرفیت ذخیره‌سازی ۴۳۴۴۲۰ مترمکعب دارد که از این مقدار ۳/۵ میلیون مترمکعب قابل استفاده است. سد مخزن پایینی بزرگ‌تر و دارای بلندی ۱۰۲ متر و درازای ۳۳۲ متر است. ظرفیت آن ۶۸۷۴۷۰۹ مترمکعب است که ۳/۶ میلیون مترمکعب از آن قابل استفاده است. همچنین ارتفاع هد<sup>۱</sup> این نیروگاه در شرایط نامی حدود ۵۰۰ متر است [۳۰-۳۲].

این نیروگاه چهار تلمبه ژنراتور از نوع فرانسویس دارد. هر تلمبه ژنراتور در وضعیت ژنراتوری می‌تواند با دبی ۶۵ مترمکعب بر ثانیه، ۲۶۰ مگاوات توان تولید کند و آب را از سد بالایی به سد پایینی انتقال دهد. همچنین، در ساعات‌های کم‌باری و در وضعیت تلمبه با دبی ۵۰ مترمکعب بر ثانیه و مصرف ۲۳۵ مگاوات، آب را از سد پایین به بالا انتقال دهد. در مجموع، این چهار واحد نیروگاهی با دبی ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه توانایی تزریق ۱۰۴۰ مگاوات توان در ساعات‌های اوج بار به شبکه را

$$P_W^t(v_t) = \begin{cases} 0 & v_t \leq v_{cin}, v \geq v_{cout} \\ P_{rated} \times (A + B \cdot v_t + C \cdot v_t^2) & v_{cin} < v_t < v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \leq v_t < v_{cout} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{(v_{cin} - v_{rated})^2} \left( v_{cin} (v_{cin} + v_{rated}) - 4v_{cin} \cdot v_{rated} \left( \frac{v_{cin} - v_{rated}}{2v_{rated}} \right)^2 \right) \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{(v_{cin} - v_{rated})^2} \left( 4(v_{cin} + v_{rated}) \left( \frac{v_{cin} + v_{rated}}{2v_{rated}} \right)^2 - (3v_{cin} + v_{rated}) \right) \quad (3)$$

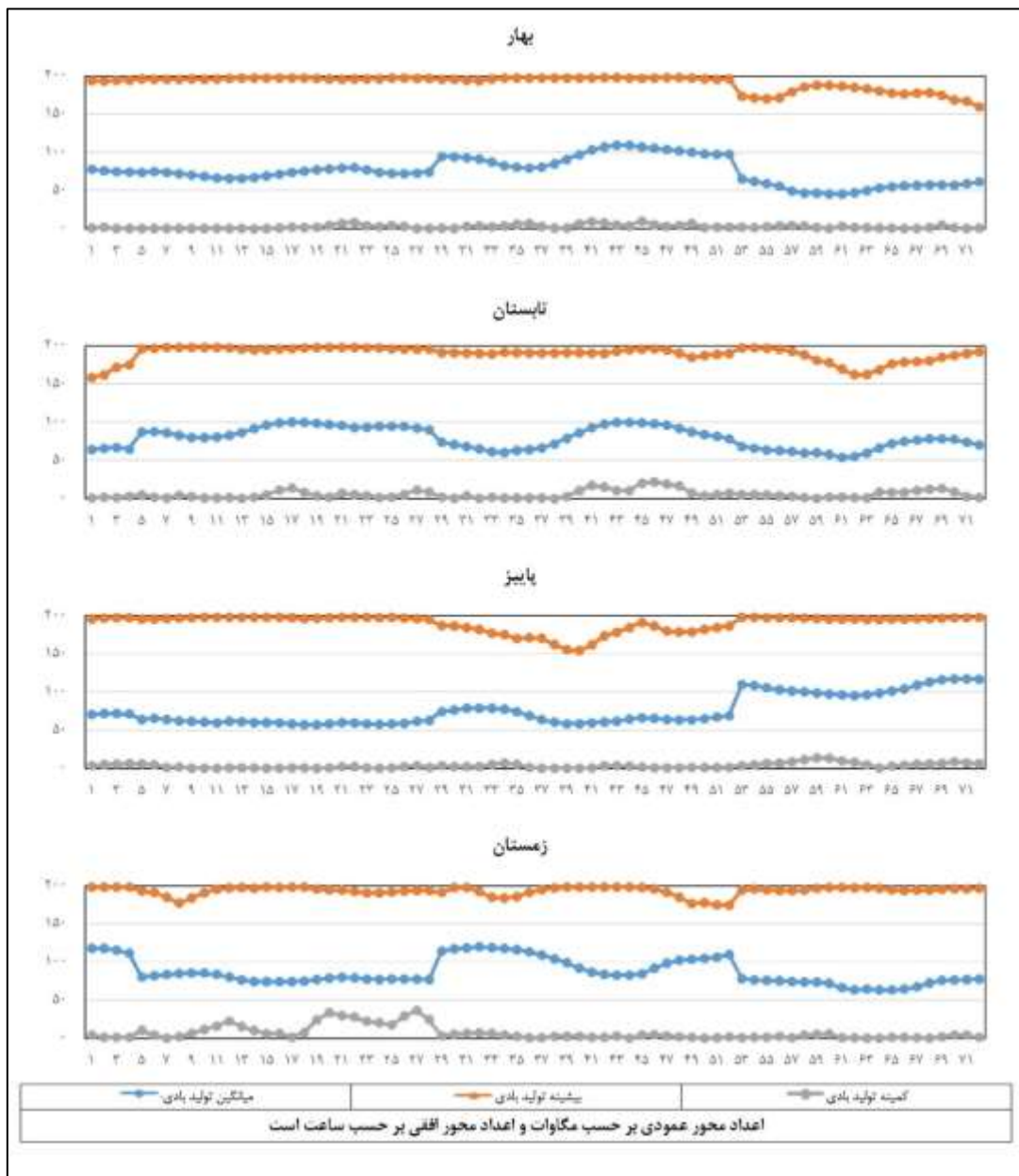
$$C = \frac{1}{(v_{cin} - v_{rated})^2} \left( 2 - 4 \left( \frac{4v_{cin} + v_{rated}}{2v_{rated}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

این داده‌ها به گونه‌ای تقسیم می‌شود که هر رده با یکی از ماه‌های سال شمسی تطابق داشته باشد. در انتها و پس از پردازشی که با نرم‌افزار MATLAB صورت می‌گیرد، خروجی به صورت میانگین هر ساعت طی هر ماه به دست می‌آید. همچنین، بیشینه مقدار تولید توان الکتریکی و

در تحقیق<sup>۱</sup> حاضر برای ساده‌سازی شبیه‌سازی، داده‌ها به ۱۲ رده (روز) شامل ۲۴ ساعت تقسیم می‌شوند. ۱۲ رده عبارت‌اند از: ماه‌های فروردین تا اسفند؛ بنابراین در ادامه داده‌های ۸۷۶۰ ساعتی در ۱۲ رده ماهانه جای می‌گیرد.

و میانگین ساعتی تولید نیروگاه بادی مطالعه‌شده در هر ماه در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱، مشاهده می‌شود هیچ نظم و الگوی خاصی در تولید نیروگاه بادی وجود ندارد. برای سادگی نمایش نمودارها و رعایت اختصار، نمودارها به صورت فصلی و هر یک در بازه ۱ تا ۷۲ نمایش داده شده است. در این نمودارها عدد ۱ تا ۲۴، ۲۵ تا ۴۸ و ۴۹ تا ۷۲ به ترتیب نشان‌دهنده ساعت‌های ۱ تا ۲۴ ماه اول، دوم و سوم هر فصل هستند.

کمینه مقدار آن نیز در هر ساعت طی هر ماه محاسبه می‌شود. در نمودارها مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار تولید توان ساعتی انرژی بادی در هر ماه تقریباً برابر بیشینه ظرفیت و مقدار کمینه آن نزدیک به صفر است. بنابراین، میزان توان تولیدی در هر ساعت در بازه وسیعی در حال تغییر است. شایان یادآوری است که میزان توان میانگین خروجی منابع بادی صرفاً برای نمایش و برآورد کلی استفاده می‌شود. میزان بیشینه ساعتی، کمینه ساعتی



شکل ۱. تولید بیشینه، کمینه و میانگین توان بادی در سال

مقدار آن نیز در هر ساعت طی هر ماه محاسبه می‌شوند. در نمودارهای ماهانه مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار تولید توان ساعتی در بعضی از ماه‌ها و در برخی ساعت‌ها تقریباً برابر بیشینه ظرفیت و مقدار کمینه آن در بعضی ساعت‌ها صفر است. نکته بااهمیتی که مشاهده می‌شود، این است که بازه تغییرات تولید توان این منابع در روز، بازه‌ای محدودتر از تغییرات تولید توان منابع بادی است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مقدار تولید منابع خورشیدی طی شب صفر بوده است. درخور یادآوری است که میزان توان میانگین خروجی منابع خورشیدی صرفاً برای نمایش و برآورد کلی استفاده می‌شود. شکل ۲ میزان میانگین توان تولیدی خورشیدی در منطقه مطالعه شده، میزان بیشینه و کمینه توان تولیدی خورشیدی را نمایش می‌دهد. میزان ظرفیت در نظر گرفته شده برای نصب واحد خورشیدی در منطقه سیاه‌بیشه برابر ۲۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده و علت انتخاب این ظرفیت در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه توان تولیدی واحد خورشیدی سیاه‌بیشه در ماه‌هایی غیر از اردیبهشت تا شهریور به ۲۰۰ مگاوات می‌رسد. همچنین، در تمام ماه‌ها مشاهده می‌شود که کمینه تولید واحد خورشیدی در ساعت‌های روز، بیشتر از صفر است که از تابش مناسب آفتاب در منطقه سیاه‌بیشه ناشی می‌شود. برای سادگی نمایش نمودارها و رعایت اختصار، نمودارها به صورت فصلی و هر یک در بازه ۱ تا ۷۲ نمایش داده شده است. در این نمودارها عدد ۱ تا ۲۴، ۲۵ تا ۴۸ و ۴۹ تا ۷۲ به ترتیب نشان‌دهنده ساعت‌های ۱ تا ۲۴ ماه اول، دوم و سوم هر فصل هستند.

#### مدل‌سازی نیروگاه تلمبه-ذخیره

نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره توانایی قرار گرفتن در دو وضعیت تولید و مصرف توان را دارند. این نیروگاه‌ها در وضعیت ژنراتوری همانند سایر نیروگاه‌های برق‌آبی و در وضعیت تلمبه به صورت بار مصرفی برای شبکه مدل می‌شوند. به طور کلی، تولید و مصرف این نیروگاه‌ها به کمک معادلات ۶-۹ بیان می‌شود.

$$w = \rho * g \quad (۶)$$

$$H = z + \frac{p}{w} + \frac{V^2}{2g} \quad (۷)$$

$$P_G = \eta_G * w * Q * H \quad (۸)$$

#### مدل‌سازی داده‌های خورشیدی

برای به دست آوردن مقدار تولید انرژی خورشیدی، داده‌های اولیه تابش خورشیدی از منطقه جغرافیایی سیاه‌بیشه (سایت نیروگاه تلمبه-ذخیره) استخراج شده است [۳۴]، بنابراین باید داده‌های تابش خورشیدی را براساس ضوابط موجود به تولید انرژی خورشیدی تبدیل کرد. داده‌های تابش خورشیدی به صورت میانگین ساعتی است و اطلاعات براساس ۸۷۶۰ ساعت موجود و در دسترس است. مقادیر تابش بر اساس رهگیری هر دو زاویه شیب<sup>۱</sup> و کجی<sup>۲</sup> به دست آمده است. برای به دست آوردن توان خروجی پنل‌های خورشیدی از رابطه ۵ استفاده می‌شود [۳۵].

$$P_{PV}^t = \eta_{pv} \times S \times G^t \left( 1 - 0.005 \times (T_a - 25) \right) \quad (۵)$$

در رابطه یادشده  $G^t$  تابش به دست آمده برای هر لحظه،  $S$  مساحت یک پنل خورشیدی نصب شده در محل،  $T_a$  دمای محیط و  $\eta_{pv}$  بازدهی پنل‌های خورشیدی است. اطلاعات مربوط به پنل‌های خورشیدی و توربین بادی در جدول ۲ آمده است. مقادیر دمایی نیز برحسب کلونین از منطقه مطالعه شده طی ساعت‌های مختلف استخراج شده است.

جدول ۲. اطلاعات پنل‌های خورشیدی و توربین بادی

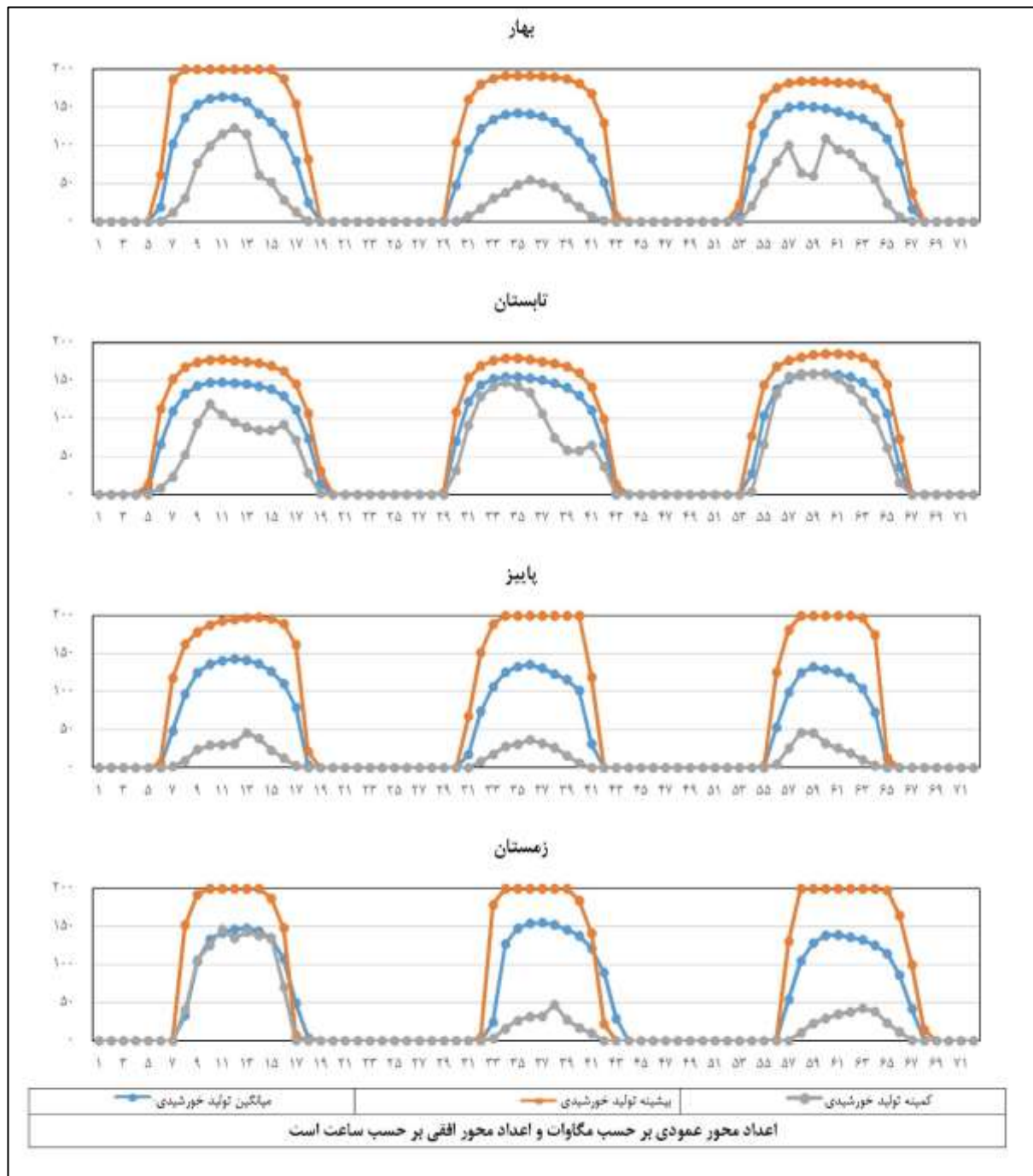
توربین بادی	پنل خورشیدی
$V_{cin} = 3 \left( \frac{m}{s} \right)$	$\eta_{PV} = 17\%$
$V_{rated} = 12 \left( \frac{m}{s} \right)$	
$V_{cout} = 25 \left( \frac{m}{s} \right)$	

در تحقیق حاضر برای ساده‌سازی شبیه‌سازی، داده‌ها به ۱۲ رده (روز) شامل ۲۴ ساعت تقسیم شده است. این دوازده رده عبارت‌اند از: ماه‌های فروردین تا اسفند. برای این کار داده‌های ۸۷۶۰ ساعتی به ۱۲ رده ماهانه تقسیم می‌شوند [۳۶]. این داده‌ها به گونه‌ای تقسیم می‌شوند که هر رده با یکی از ماه‌های سال شمسی تطابق داشته باشد. همچنین، بیشینه مقدار تولید توان الکتریکی و کمینه

1. Tilt  
2. Azimuth

مترمربع)،  $V$  میانگین سرعت سیال (متر بر ثانیه) است. در معادلات ۸ و ۹  $P_G$  و  $P_P$  به ترتیب توان تولید در وضعیت ژنراتوری (وات) و توان مصرف در حالت پمپ (وات) است. همچنین،  $\eta_G$  و  $\eta_P$  به ترتیب بازده فرایند ژنراتوری و بازده فرایند تلمبه است. در معادلات ۸ و ۹  $Q$ ، دبی سیال (مترمکعب بر ثانیه) است.

(۹)  $P_P = \eta_P * w * Q * H$   
 معادله ۶ مربوط به محاسبه  $w$  یا وزن مخصوص (نیوتن بر مترمکعب) است که از حاصل ضرب  $\rho$  یا چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) در مقدار  $g$  یا شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه) به دست می‌آید. معادله ۷ مبین محاسبه  $H$  یا هد (متر) است. در معادله ۷ فشار (نیوتن بر



شکل ۲. تولید بیشینه، کمینه و میانگین توان خورشیدی در سال



شکل ۳. تقاضای بیشینه، کمینه و میانگین توان الکتریکی مصرفی در سال

#### مدلسازی بار شبکه

در یک شبکه توزیع، تقاضای توان و انرژی الکتریکی به عوامل متعددی همچون زمان، الگوی استراحت و بیداری مشترکان، نوع کاربری مصرف، چگونگی بهره‌برداری از وسایل برقی، فصل و موقعیت جغرافیایی بستگی دارد. همه این عوامل سبب می‌شود که تقاضای توان الکتریکی طی زمان‌های مختلف ثابت نباشد. به همین دلیل، در تحلیل انرژی شبکه توزیع باید تغییرات توان بارها در زمان مد نظر قرار گیرد. در این بخش، داده‌های تقاضای انرژی الکتریکی در ۱۲ رده طبقه‌بندی شده است. حداکثر و حداقل بار

مصرفی مشترکان (در هر ساعت طی هر ماه) برای مشاهده پراکندگی و بازه تغییرات توان نمایش داده شده است. برای سادگی نمایش نمودارها و رعایت اختصار، نمودارها به صورت فصلی و هر یک در بازه ۱ تا ۷۲ نمایش داده شده است. در این نمودارها عدد ۱ تا ۲۴، ۲۵ تا ۴۸ و ۴۹ تا ۷۲ به ترتیب نشان‌دهنده ساعت‌های ۱ تا ۲۴ ماه نخست، دوم و سوم هر فصل است.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که نمودارهای بیشینه و کمینه توان مصرفی با نمودار میانگین توان مورد تقاضای شبکه همبستگی زیادی دارند. دقت در داده‌ها بیان‌کننده



پیش‌تر اشاره شد، یکی از معایب استفاده از منابع تجدیدپذیر، تولید نامنظم و غیر قابل پیش‌بینی این منابع در شبکه است. استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کنار نیروگاه‌های تلمبه- ذخیره با توجه به قابلیت ذخیره‌سازی انرژی توسط آنها، می‌تواند راه‌کاری مناسب برای تزریق توان تجدیدپذیر در زمان و شرایط مناسب به شبکه باشد. همچنین، حفظ منابع آبی و ایجاد تعادل چرخه آب برای جلوگیری از هدررفت منابع آبی برای تولید توان الکتریکی صرف، اهمیت دارد. با توجه به اقلیم و شرایط جغرافیایی ایران، استفاده از منابع ارزشمند آبی اهمیت زیادی دارد. نزدیکی سد سیاه‌بیشه به کلان‌شهر تهران برای مدیریت تأمین آب این کلان‌شهر از نکات حائز اهمیت است. به همین دلیل، برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه- ذخیره سیاه‌بیشه با هدف حفظ منافع و منابع آبی و حفظ آب در چرخه و نه با رویکرد صرف فنی (تأمین الکتریسیته) صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر پس از برنامه‌ریزی بهینه، سناریوهای مختلفی بررسی و تحلیل شده است.

در پژوهش حاضر برنامه‌ریزی حالات ژنراتوری و تلمبه‌ای نیروگاه سیاه‌بیشه بررسی شده است. هدف از برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه حفظ آب در چرخه، ایجاد تعادل آبی و تحلیل توان مورد نیاز شبکه است که باید توسط نیروگاه‌های دیگر تأمین شود.

#### معرفی تابع هدف و محدودیت‌های آن

در این بخش تابع هدف و محدودیت‌های برنامه‌ریزی مسئله به زبان ریاضی بیان می‌شود. گفته شد که هدف اصلی برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه در پژوهش حاضر، جلوگیری و حداقل‌سازی هدررفت آب در چرخه تولید است. به همین دلیل، تابع هدف برنامه‌ریزی به صورت معادله ۱۰ بیان می‌شود. شایان یادآوری است که  $t$  نشان‌دهنده زمان و بازه تغییرات آن، اعداد طبیعی ۱ تا ۲۴ است. همان‌طور که در بخش بعدی به صورت کامل اشاره خواهد شد، تابع هدف معادله ۱۰ با توجه به قیود مسئله برای هر ماه حل و برنامه‌ریزی می‌شود.

$$\text{Min} \left( \sum_{t=1}^{24} (Q_G(t) * \text{State}_G(t) - Q_P(t) * \text{State}_P(t)) \right) \quad (10)$$

همچنین، محدودیت‌های پژوهش حاضر به صورت معادلات ۱۱ و ۱۲ قابل نمایش است.

الگوی تغییر نسبتاً ثابت مصرف مشترکان طی بازه زمانی هر ماه است. در فروردین‌ماه، بیشینه شدن بار حدود ساعت ۲۱ با میزان تقاضای ۳۹/۳ هزار مگاوات رخ می‌دهد. علت رخ دادن بیشینه مصرف در ساعت ۲۱ می‌تواند ناشی از استفاده انرژی برق برای تأمین روشنایی باشد. در اردیبهشت‌ماه و با گرم‌تر شدن هوا و با توجه به فعال بودن بارهای صنعتی، پیک مصرفی حدود ساعت ۱۵ و با میزان ۴۶/۶ هزار مگاوات رخ می‌دهد. جالب آنکه میزان بار مصرفی در ساعت ۲۱ برابر با ۴۲/۵ هزار مگاوات بوده و یکی از کمینه‌های محلی نمودار در اردیبهشت است که معلول کاهش مصرف در این ساعت (ناشی از خنک‌تر شدن هوا) است. این افت میزان مصرف انرژی برق طی ماه‌های خرداد تا شهریور نیز با استدلالی مشابه، قابل مشاهده است. در حالی که در شش‌ماهه دوم سال پیک مصرفی همراه حدود ساعت ۲۱ رخ می‌دهد. از آنجا که لوازم و تجهیزات سرمایشی و روشنایی در ایران معمولاً متکی بر انرژی برق است و لوازم گرمایشی معمولاً متکی بر انرژی‌هایی غیر از برق (گاز، نفت و غیره) اند، می‌توان وجود پیک مصرفی حدود ساعت ۲۱ در شش‌ماهه دوم سال را به علت استفاده از لوازم روشنایی، فعال بودن تجهیزاتی همچون تلویزیون، فرهای برقی و غیره دانست. در نمودارهای مصرف تمام ماه‌ها کمینه میزان مصرف حدود ساعت ۷ تا ۹ صبح قابل مشاهده است که می‌توان علت آن را در خاموشی ادوات روشنایی و خنکای هوا در این ساعت‌ها (در فصل گرم) دانست. همچنین، با توجه به مصرف زیاد انرژی در منازل و ادارات باید توجه داشت که این ساعت‌ها زمان حمل‌ونقل افراد از منازل به محل کار است و انتظار می‌رود که مصرف مشترکان خانگی، اداری، کشاورزی و غیره در حداقل میزان خود باشد.

#### روش تحلیل و سناریوها

مدیریت و برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه- ذخیره را از دیدگاه‌ها و هدف‌های متفاوتی می‌توان بررسی کرد. در نظر گرفتن هدف‌های متفاوت می‌تواند بیان‌کننده رویکرد مدیریت شبکه با توجه به شرایط آب‌وهوایی، فنی، زیست‌محیطی و غیره باشد [۳۷ و ۳۸]. از سوی دیگر، استفاده از منابع تجدیدپذیر در شبکه می‌تواند سبب کاهش انتشار آلاینده‌ها، تأمین بار شبکه و کاهش وابستگی به منابع فسیلی شود. همان‌طور که

معادلات ۱۷ و ۱۸ به نمایش درآمده است.

$$V_{up}(t+1) = V_{up}(t) + |Q_{G(P)}| * (State_P - State_G) \quad (17)$$

$$V_{low}(t+1) = V_{low}(t) + |Q_{G(P)}| * (State_G - State_P) \quad (18)$$

شرایط اولیه مخازن فوقانی و تحتانی به صورت معادلات ۱۹ و ۲۰ است:

$$V_{up}(0) = V_{up-} \quad (19)$$

$$V_{low}(0) = V_{low-} \quad (20)$$

همچنین، قید ممکن نبودن فعالیت هم‌زمان فرایند تلمبه‌زنی و تولید انرژی به صورت معادله ۲۱ مشخص شده است.

$$State_G(t) + State_P(t) \leq 1 \quad (21)$$

پارامترهای تابع هدف و محدودیت‌ها در جدول ۳ معرفی شده‌اند.

قید ظرفیت تولید و مصرف نیروگاه تلمبه-ذخیره به صورت معادلات ۱۱ و ۱۲ قابل نمایش است [۱۴].

$$P_{min-G} \leq |P(t)| \leq P_{max-G} \quad (11)$$

$$P_{min-P} \leq |P(t)| \leq P_{max-P} \quad (12)$$

قید میزان خروج آب<sup>۱</sup> در حالت‌های پمپی و ژنراتوری به صورت معادلات ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است.

$$Q_{min-G} \leq |Q_G(t)| \leq Q_{max-G} \quad (13)$$

$$Q_{min-P} \leq |Q_P(t)| \leq Q_{max-P} \quad (14)$$

قید ظرفیت مخازن فوقانی و تحتانی<sup>۲</sup> در قالب معادلات ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود.

$$V_{min-upp} \leq V_{up}(t) \leq V_{max-upp} \quad (15)$$

$$V_{min-low} \leq V_{low}(t) \leq V_{max-low} \quad (16)$$

قید تعادل آب<sup>۳</sup> بین مخازن فوقانی و تحتانی در

جدول ۳. معرفی پارامترهای تابع هدف و محدودیت‌ها

$State_G(t)$	وضعیت تولید انرژی نیروگاه در ساعت $t$ ، ( $State_G(t)=1$ ) به مفهوم حالت ژنراتوری و ( $State_G(t)=0$ ) به معنای تولید نشدن انرژی است	$State_P(t)$	وضعیت تلمبه‌زنی نیروگاه در ساعت $t$ ، ( $State_P(t)=1$ ) به مفهوم حالت تلمبه‌زنی و ( $State_P(t)=0$ ) به معنای فعال نبودن حالت تلمبه‌زنی است
$P_{min-G}, P_{max-G}$	حداقل/حداکثر توان خروجی در وضعیت ژنراتوری	$P_{min-P}, P_{max-P}$	حداقل/حداکثر توان خروجی در وضعیت تلمبه‌زنی
$Q_G(t), Q_P(t)$	میزان (دبی) خروجی آب در وضعیت ژنراتوری/تلمبه‌زنی در ساعت $t$	$P(t)$	توان خروجی واحد تلمبه-ذخیره در ساعت $t$
$V_{low-0}, V_{up-0}$	حجم اولیه مخزن فوقانی/تحتانی واحد تلمبه-ذخیره	$V_{low}(t), V_{up}(t)$	حجم مخزن فوقانی/تحتانی واحد تلمبه-ذخیره در ساعت $t$
$V_{min-up}, V_{max-up}$	حجم حداقل/حداکثر مخزن فوقانی واحد تلمبه-ذخیره	$V_{min-low}, V_{max-low}$	حجم حداقل/حداکثر مخزن تحتانی واحد تلمبه- ذخیره
$Q_{min-P}, Q_{max-P}$	حداقل/حداکثر میزان خروج آب در حالت تلمبه واحد تلمبه-ذخیره	$Q_{min-G}, Q_{max-G}$	حداقل/حداکثر میزان خروج آب حالت ژنراتوری واحد تلمبه-ذخیره

### برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه<sup>۱</sup>

در کشورهایی که نرخ برق در زمان‌های مختلف، بر پایه عرضه و تقاضا تعیین می‌شود، بر اساس مقدار قیمت یا مزیت اقتصادی است [۳۹-۴۱]. در پژوهش حاضر با توجه به عدم نرخ‌گذاری پویا بر قیمت برق، برنامه‌ریزی نیروگاه برق‌آبی براساس میزان مصرف بار کل کشور صورت می‌پذیرد. در پژوهش حاضر برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه بر مبنای رویکرد ماهانه بارهای الکتریکی صورت پذیرفته

این بخش به برنامه‌ریزی وضعیت نیروگاه سیاه‌بیشه طی سال و براساس برنامه‌ریزی ماهانه می‌پردازد. یکی از روش‌های برنامه‌ریزی نیروگاه‌های برق‌آبی و تلمبه-ذخیره

1. Water Flow Constraints
2. Upper & lower limits Constraints
3. Water Balance Constraints

به خلاف روند میانگین صورت پذیرفته و در کوتاه‌مدت رخ می‌دهد، نمی‌تواند مبنای عمل قرار گیرد.

۲. روند الگوی میانگین بار، شاخصی مطلوب برای حذف داده‌های اتفاقی و مبتنی بر شرایط خاص زمانی و مکانی است.

۳. اساساً برنامه‌ریزی تغییرات پیش‌بینی‌ناپذیر همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، غیرممکن است و پیش‌بینی آن مقدور نیست.

۴. پژوهش حاضر برای تغییرات خاص و نیز برای مدیریت شرایط، حالت رزرو در نظر گرفته است.

توجه شود که وضعیت نیروگاه سیاه‌بیشه بر مبنای الگوی تغییرات بار صورت می‌پذیرد؛ بنابراین انتظار می‌رود عوامل مشخصی همچون افزایش غیرمترقبه دما در فصل تابستان، به‌رغم تأثیر بر میزان بار مصرفی کشور، روی الگوی مصرف تأثیری نگذارد و وضعیت نیروگاه در ساعات‌های مختلف تقریباً ثابت بماند.

نتیجه اجرای برنامه‌ریزی با توجه به قیود مسئله بیان‌کننده فعال بودن ژنراتور با تمام ظرفیت به مدت سه ساعت با میزان تولید توان ۱۰۴۰ مگاوات و تولید یک‌ساعته توان با میزان تولید ۷۴۸/۸ مگاوات و فعال بودن حالت پمپاژی به مدت چهار ساعت با تمام ظرفیت و میزان مصرف ۹۴۰ مگاوات و یک ساعت با ظرفیت ۸۳ درصد و مصرف ۷۸۰/۲ مگاوات است. با توجه به برنامه‌ریزی و تابع هدف مسئله، قید محدودکننده، میزان آب قابل برداشت از سد بالایی با ظرفیت برداشت ۳/۵ میلیون مترمکعب است. میزان آب برداشت‌شده از سد بالادست طی روز و در مدت چهار ساعت برابر ۳۴۸۱۹۲۰ مترمکعب است و در مدت پنج ساعت این میزان آب به سد بالادست منتقل می‌شود. در بخش‌های پیشین گفته شد که یکی از کاربردهای نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره، مدیریت تولید نامنظم و غیر قابل پیش‌بینی منابع تجدیدپذیری همچون باد و خورشید است. مطابق با ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵، میزان ظرفیت عملی نیروگاه‌های بادی کشور برابر با ۱۸۴/۴ مگاوات و ظرفیت عملی نیروگاه‌های خورشیدی کشوری برابر با ۳۴/۹ مگاوات است [۴۳]. با توجه به اعداد ترازنامه انرژی، در پژوهش حاضر فرض شده است توانایی نصب ۲۰۰ مگاوات خورشیدی و ۲۰۰ مگاوات بادی در حوالی

است. به همین دلیل، فرض شده است که الگوی رفتار و مصرف مشترکان در الگوی نمودار مصرف منعکس شده است. هدف مسئله، حفظ آب در چرخه و جلوگیری از هدررفت آب به منظور تأمین انرژی الکتریسیته است. بازه زمان‌بندی بر مبنای برنامه‌ریزی ماهانه است که یعنی ساعت‌های فعالیت ژنراتوری و پمپی نیروگاه سیاه‌بیشه برای هر ماه محاسبه شده و این محاسبات مبنای وضعیت نیروگاه در هر ساعت قرار گرفته است. به همین منظور، داده‌های میانگین بار الکتریکی ماهانه که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد، بر مبنای میزان مصرف مرتب شده و چهار ساعت پرمصرف مشخص شده است. علت انتخاب عدد چهار این است که در حال حاضر، ساعت‌های اوج مصرف حدود چهار ساعت گزارش شده و مبنای عمل وزارت نیرو و شبکه‌های توزیع قرار گرفته است [۴۲] با این تفاوت که ساعت‌های اوج مصرف دقیق‌تر و نه بر مبنای بازه شش‌ماهه که بر مبنای بازه ماهانه در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر هدف برنامه‌ریزی علاوه بر پیک‌سای و هموار کردن منحنی مصرف، حفظ تعادل آب در چرخه است. مطابق تحلیل صورت‌گرفته برای حفظ آب باید برای بازگرداندن سیال جابه‌جا شده به وضعیت اولیه خود به مدت پنج ساعت تلمبه کردن آب صورت بپذیرد. پنج ساعتی که نیروگاه طی آن اقدام به فرایند تلمبه کردن می‌کند؛ از کمترین ساعت‌های الگوی مصرف انتخاب شده است. ۱۵ ساعت باقی‌مانده به عنوان ساعت‌های رزرو در نظر گرفته شده است. در صورتی که به هر دلیلی امکان اجرای برنامه در ساعتی خاص امکان‌پذیر نباشد؛ ساعت‌های رزرو بهترین زمان برای حفظ تعادل آب در چرخه است. همچنین، در پژوهش حاضر از میزان دبی ورودی رودخانه صرف نظر شده و با توجه به محاسبات صورت‌پذیرفته، بهترین ساعت برای تخلیه سد بالادست برای جلوگیری از سرریز، ساعت‌های اوج مصرف چهارساعته یا ساعت‌های رزرو است. با توجه به فرض بهره‌برداری در شرایط نامی به ازای هر ۱۰۴۰ مگاوات تولید برق، ۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه از سد بالادست به سد پایین‌دست منتقل می‌شود.

علت تصمیم‌گیری بر مبنای میانگین بار و نه براساس بار ساعتی آن است که:

۱. هدف پژوهش حاضر، برنامه‌ریزی طولانی‌مدت و کارآمد نیروگاه است؛ بنابراین تغییرات ساعتی بار که

مشاهده می‌شود که نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه در تمامی ماه‌های سال توانایی پر کردن و بالا بردن میزان دره تولید (کمینه مقدار تولید) سایر نیروگاه‌ها را در سناریوی دشوار دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که در ماه فروردین پیک بار ساعت ۲۱ حدود یک گیگاوات کاهش یافته است. در ماه اردیبهشت هرچند پیک بار ساعت ۱۶، یک گیگاوات کاهش یافته اما برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه تأثیری در مقادیر زیاد بارهای الکتریکی ساعت‌های ۱۵ و ۱۷ نداشته و در عوض بیشینه مقادیر محلی ساعت‌ها ۲۲ تا ۲۴ را کاهش داده است. در ماه خرداد برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه سبب کاسته شدن از پیک بار ۱۵ تا ۱۷ شده ولی در مقادیر زیاد بار الکتریکی در ساعت‌های ۱۴ و ۱۸ تأثیری ندارد. در ماه تیر مقادیر پیک بار الکتریکی ساعت‌های ۱۵ تا ۱۸ به طور مؤثری کاهش یافته است. در ماه مرداد که پیک سراسری سالانه بار الکتریکی کشوری نیز در آن رخ می‌دهد، مشاهده می‌شود که پیک بار مردادماه و پیک بار سراسری به طور بسیار مؤثری کاهش پیدا کرده است. در شهریورماه نیز مشاهده می‌شود که پیک بار ماهانه کاهش یافته است. همچنین، در تمام ماه‌های نیمه دوم سال مشاهده می‌شود که پیک بار ماهانه به طور کاملاً مؤثری کاهش یافته است. شکل ۵ نشان‌دهنده میزان مصرف توان الکتریکی نیروگاه سیاه‌بیشه (هیبرید با منابع تجدیدپذیر و یا بدون آنها) است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده مصرف توان و مقادیر منفی نشان‌دهنده تولید توان توسط نیروگاه سیاه‌بیشه (هیبرید با منابع تجدیدپذیر) است. به همین دلیل با ترکیب نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه با منابع تجدیدپذیر شاهدیم که در بعضی از ماه‌ها، مصرف توان از شبکه، کاهش یافته و مقداری از توان مورد نیاز فرایند تلمبه‌زنی توسط منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. همچنین، در ساعت‌هایی که مطابق با برنامه‌ریزی، نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه باید در وضعیت ژنراتوری قرار گیرد، تمام توان الکتریکی منابع تجدیدپذیر وارد شبکه شده و پیک بار کاهش بیشتری داشته است. نتایج اجرای برنامه بیان می‌کند که تولید توان منابع تجدیدپذیر در ساعت‌های خاموشی نیروگاه تجدیدپذیر بادی و خورشیدی مستقیم وارد شبکه می‌شود. منافع شبکه قدرت در پر کردن دره‌های بار روزانه و کنترل فرکانسی شبکه در اخذ توان از شبکه در ساعت‌هایی است که کمینه بار مصرفی رخ می‌دهد.

سیاه‌بیشه و استان‌های همجوار وجود دارد و تأثیر هر یک از منابع بادی، خورشیدی و حضور هم‌زمان آنها (بدون در نظر داشتن سایر ظرفیت‌های منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی شبکه) بر بار شبکه با حضور برنامه‌ریزی شده نیروگاه سیاه‌بیشه بررسی شده است.

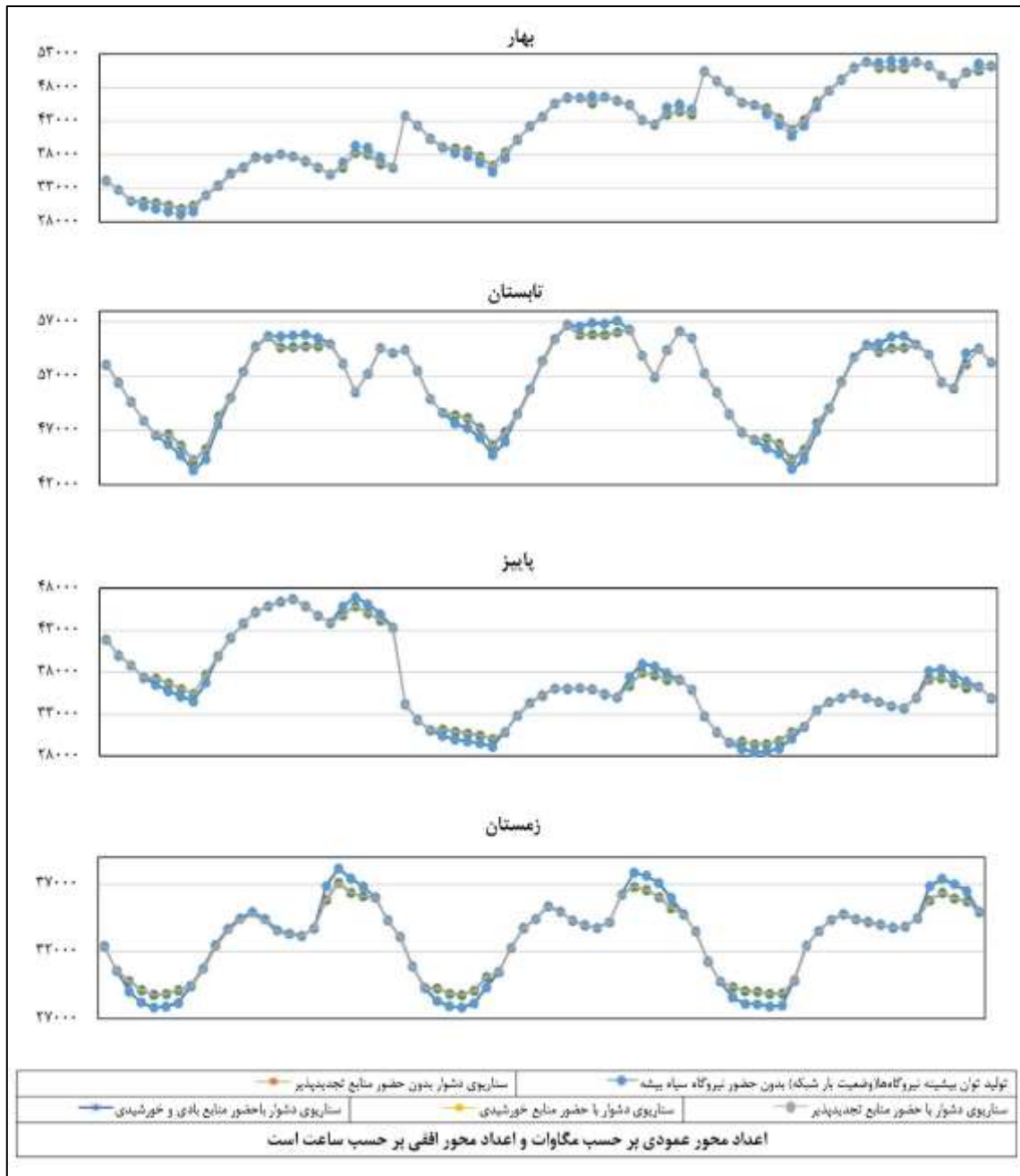
از آنجا که نمایش نتیجه اجرای این برنامه‌ریزی در همه روزهای ماه ممکن نیست. با دقت در حالات مختلف مشاهده می‌شود که تمام حالات بین دو بازه حداقل و حداکثر متغیر و البته محدود است؛ بنابراین می‌توان همه حالات را در دو سناریو بررسی کرد. سناریوی نخست به تحلیل حالت دشوار شبکه اختصاص دارد. این سناریو به تحلیل حالت حداکثری بار با کمترین تزریق توان توسط منابع تجدیدپذیر (سناریوی حالت دشوار) اختصاص دارد. همچنین، در سناریوی یادشده تأثیر حضور برنامه‌ریزی شده نیروگاه سیاه‌بیشه بدون حضور منابع تجدیدپذیر نیز بررسی می‌شود. سناریوی دوم به بررسی تحلیل حالت حداقلی بار با فرض بیشترین تزریق توان توسط منابع تجدیدپذیر (سناریوی آسان) اختصاص دارد. در این سناریو تأثیر حضور برنامه‌ریزی شده نیروگاه سیاه‌بیشه بدون حضور منابع تجدیدپذیر نیز بررسی می‌شود.

#### سناریوی نخست: تحلیل حالت دشوار (بدبینانه)

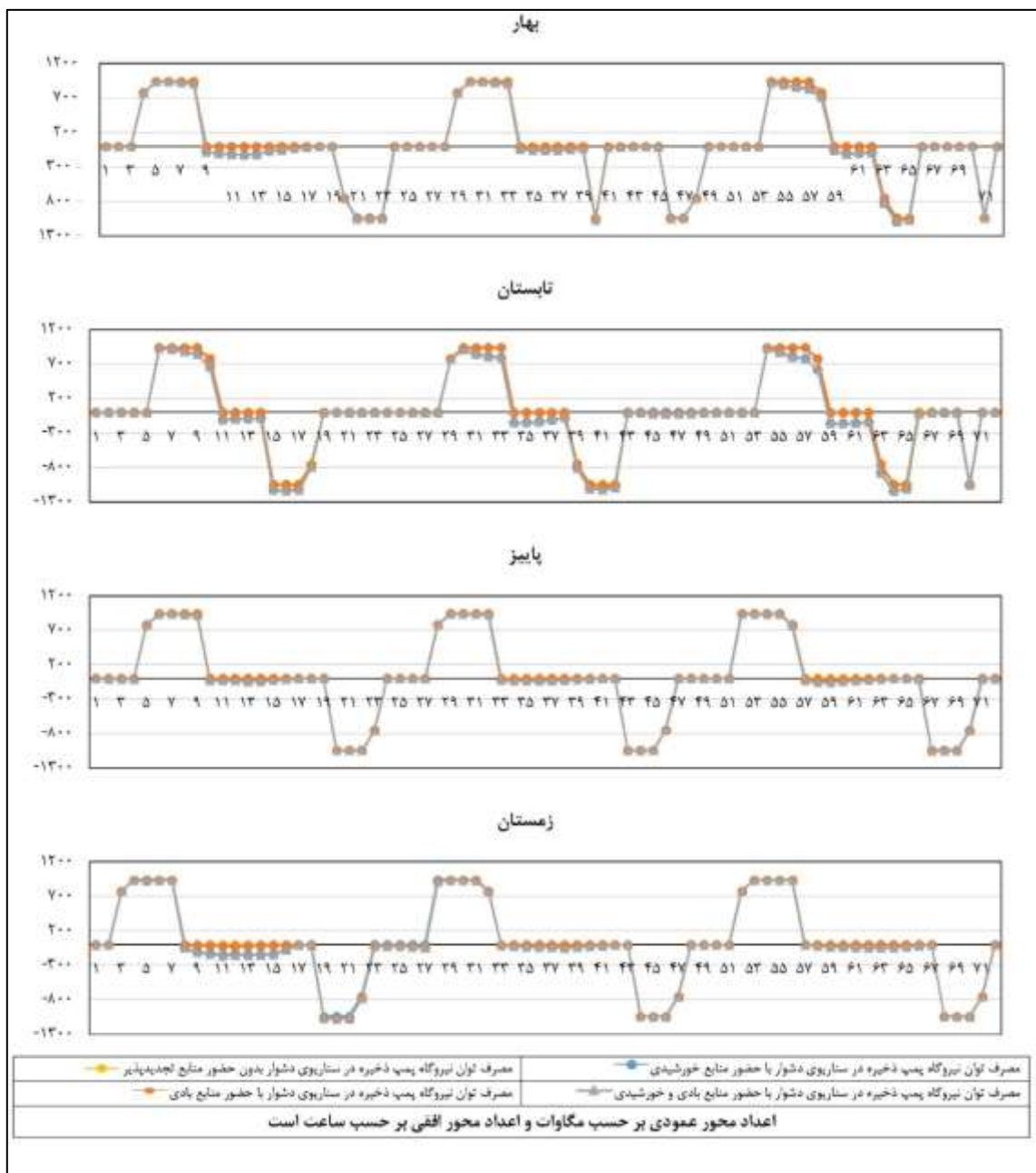
حالت دشوار، حالتی است که در آن تولید سایر نیروگاه‌های شبکه (به غیر از نیروگاه تلمبه-ذخیره و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی) در هر ساعت، بیشینه مقدار آن ساعت (در ماهی معین) و میزان تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر کمینه مقدار آن ساعت (در همان ماه) است. به بیان دیگر، حالت دشوار هر ماه، روز فرضی است که بیشترین توان در هر ساعت (در ماه معین) از نیروگاه‌های شبکه (به غیر از نیروگاه تلمبه-ذخیره و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی) مطالبه می‌شود. علت بیان قید «فرضی» آن است که احتمال اینکه در تمام ساعت‌های یک روز واقعی، بار شبکه در همه ساعت‌های بیشینه مقدار ساعتی آن ماه و میزان تولید منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در همه ساعت‌های همان روز کمترین میزان تولید ساعتی در آن ماه باشد، کم است. به خصوص که در ماه‌های گرم سال میزان تابش زیاد بوده و به همین علت توان تولیدی منابع خورشیدی معمولاً بیشتر از ایام دیگر است. در شکل ۴

درصد؛ در ساعت ۹ از مردادماه ۱۵/۱ درصد و در ساعت ۱۰ از ماه شهریور، ۲۰ درصد توان فرایند تلمبه توسط نیروگاه خورشیدی تأمین می‌شود. این در حالی است که در بهترین وضعیت با حضور منابع بادی که در ساعت ۴ از ماه بهمن رخ می‌دهد، صرفاً توانایی تأمین انرژی فرایند تلمبه‌زنی به مقدار ۲/۵ درصد تأمین شده است.

با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود حتی در سخت‌ترین حالت نیز در بعضی از ساعت‌های ماه‌های خرداد تا شهریور با توجه به زمان فرایند پمپ، درصد مناسبی از توان عملیات تلمبه توسط منابع خورشیدی تأمین می‌شود. به گونه‌ای که در هیبرید نیروگاه سیاه‌بیشه با منابع تجدیدپذیر خورشیدی در ساعت ۹ از ماه خرداد، ۱۰/۷ درصد؛ در ساعت ۹ از ماه تیر، ۱۰



شکل ۴. میزان تولید توان سایر نیروگاه‌های شبکه در سناریوی دشوار



شکل ۵. میزان مصرف توان نیروگاه (هبرید) سیاه‌بیشه در سناریوی دشوار

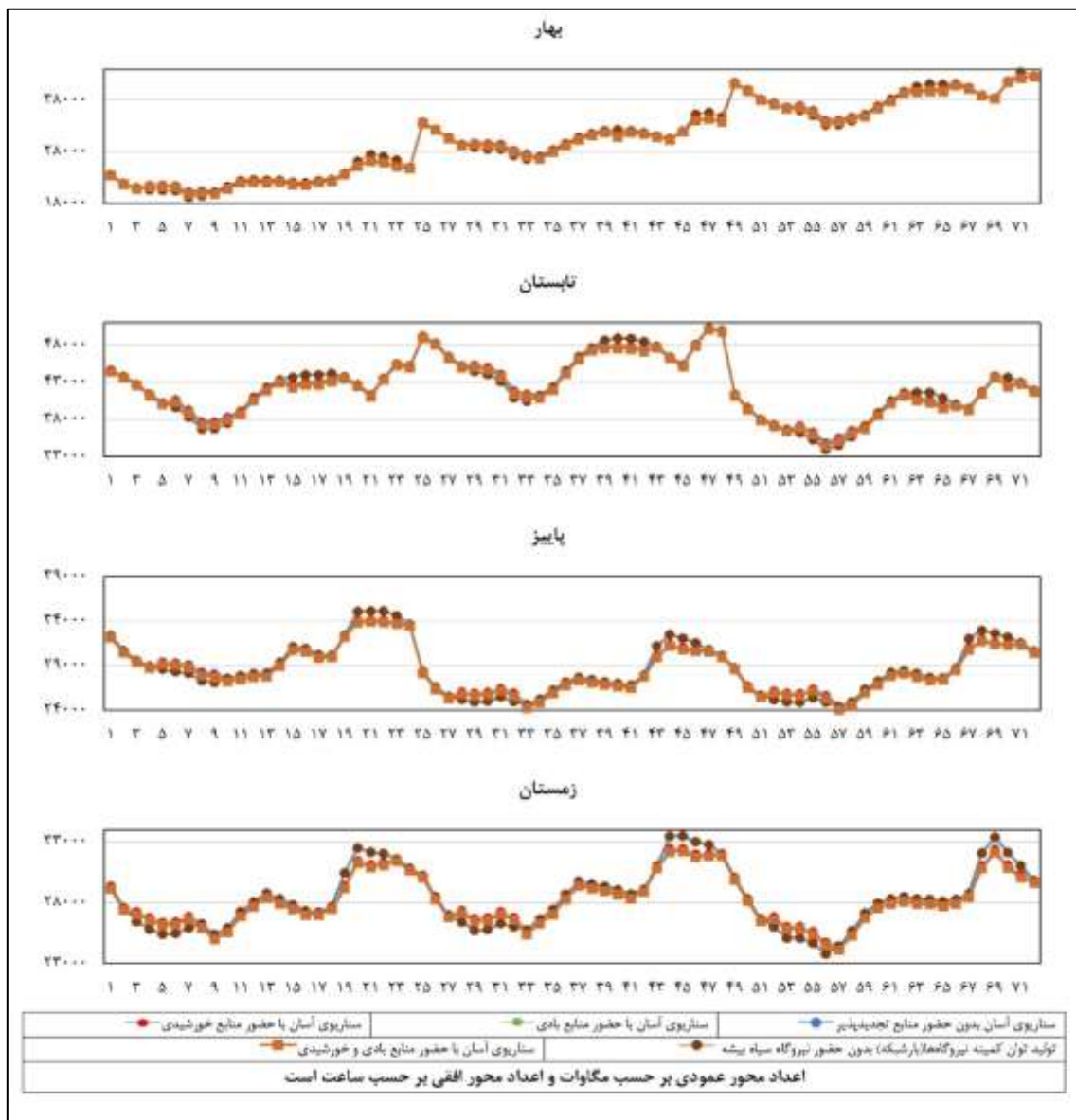
سناریوی دوم: تحلیل حالت آسان (خوش‌بینانه)

سناریوی آسان حالتی است که در آن بار شبکه در هر ساعت از ماه کمینه مقدار تجربه شده در آن ساعت باشد. همچنین، در صورت در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر، تولید توان آنها، بیشینه مقدار تولید این منابع در آن ساعت (در ماه مشخص) است. علت استفاده از واژه «آسان» کمترین میزان تولید توان توسط سایر نیروگاه‌ها و تحمیل فشار کمتر به سایر نیروگاه‌ها و شبکه قدرت است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که ورود برنامه‌ریزی نیروگاه

هبرید سیاه‌بیشه سبب کاهش پیک بار ماهانه در همه ماه‌ها شده است. مشاهده می‌شود ورود برنامه‌ریزی نیروگاه هبرید سیاه‌بیشه سبب پر شدن دره‌های ماهانه ماه‌های فروردین تا مهر شده است. همچنین، مشاهده می‌شود در ماه‌های آبان تا بهمن به‌رغم مصرف توان در ساعت‌هایی که شبکه با بیشینه تولید مواجه است، در پر کردن دره (کمینه) بار ماهانه چندان مناسب عمل نمی‌کند، اما در هر صورت در بهبود شرایط مفید بوده و توانسته است کمینه بار مصرفی سالانه کشور را ۹۴۰ مگاوات افزایش دهد.

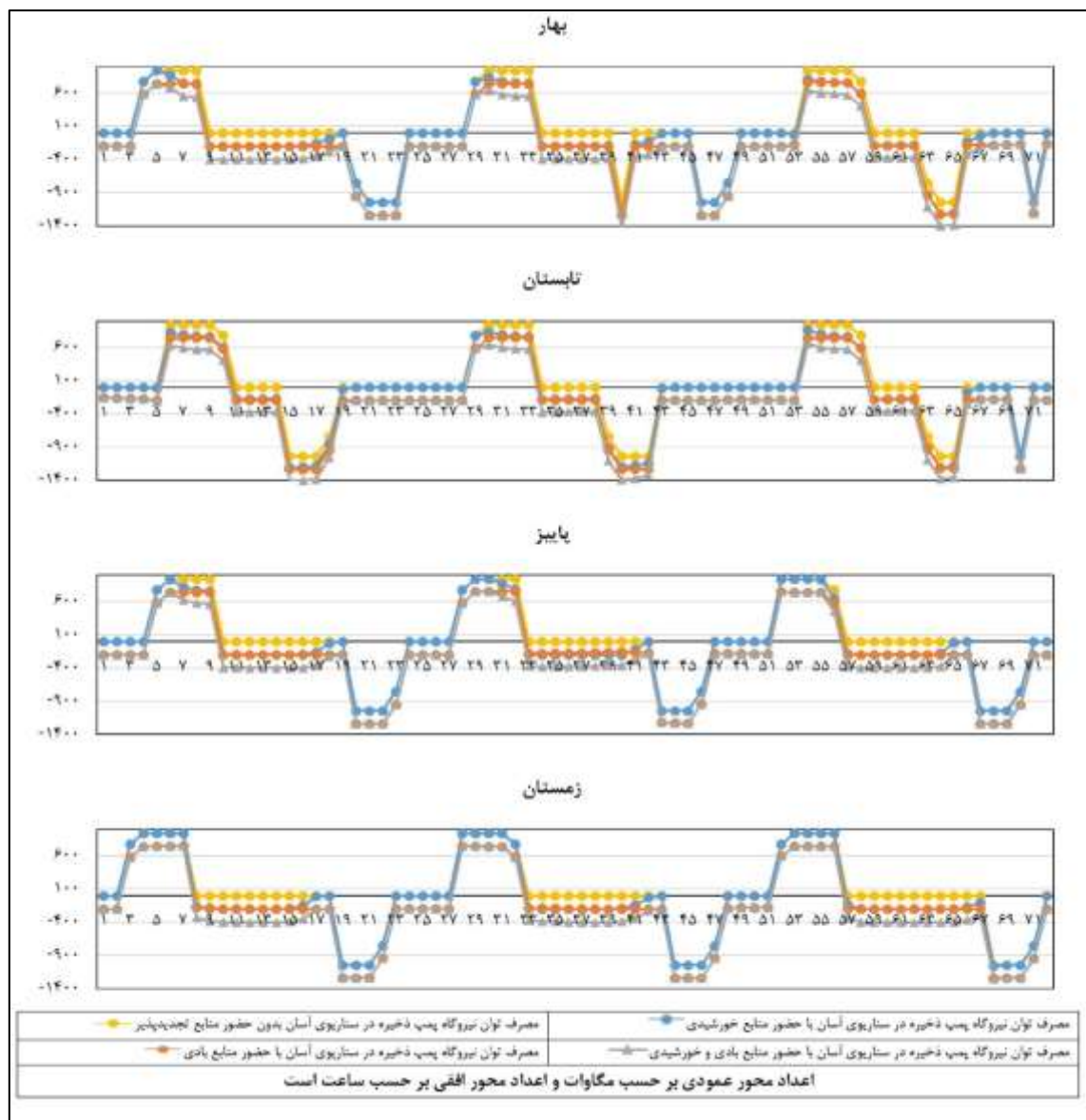
۱۸-۲۶ درصد فرایند تلمبه‌زنی توسط انرژی به‌دست‌آمده از توربین‌های بادی هستیم؛ اما منابع خورشیدی در این سناریو و در تأمین فرایند تلمبه تأثیر مشابهی ندارند. از آنجا که فرایند تلمبه‌زنی با توجه به شکل ۷ در ساعات‌هایی رخ می‌دهد که تابش مناسبی وجود ندارد، منابع خورشیدی سهم زیادی در فرایند تلمبه نخواهند داشت. هرچند در نیمه نخست سال و به‌خصوص ماه‌های تابستان منابع خورشیدی در بعضی از ساعت‌ها تا ۲۳ درصد از توان فرایند تلمبه را تأمین می‌کنند، اما در سه ماه زمستان در هیچ ساعتی، حتی سهم یک درصدی در تأمین توان فرایند تلمبه‌زنی ندارند.

شکل ۷ مصرف نیروگاه (هیبرید) سیاه‌بیشه را نشان می‌دهد. اعداد منفی نشان‌دهنده تولید و اعداد مثبت نشان‌دهنده مصرف‌اند. مشاهده می‌شود در هیبرید نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه با نیروگاه خورشیدی، طی ساعات‌های شب به دلیل خاموشی منابع خورشیدی، بیشتر توان تلمبه از شبکه اخذ شده، ولی در هیبرید بادی و هیبرید بادی-خورشیدی در ساعات‌هایی که نیروگاه در وضعیت پمپاژ قرار دارد، سهم درخور توجهی از توان مصرفی نیروگاه‌ها توسط منابع تجدیدپذیر تأمین شده است. در سناریوی آسان و با حضور منابع بادی و به منظور تأمین توان فرایند پمپ، در همه ماه‌ها شاهد تأمین توان



شکل ۶. میزان تولید توان سایر نیروگاه‌های شبکه در سناریوی آسان





شکل ۷. میزان مصرف توان نیروگاه (هیدرید) سیاه‌بیشه در سناریوی آسان

میلیون مترمکعب، سد لتیان با حجم ۹۵ میلیون مترمکعب و سد ارس با حجم ۱۲۵۴ میلیون مترمکعب درخور توجه است.

برآورد کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها و انرژی اولیه یکی از مزایای مهم استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید توان الکتریکی، کاهش میزان انتشار آلاینده‌هاست. نیروگاه‌های فسیلی هم‌زمان با تولید توان الکتریکی مقادیر درخور توجهی از آلاینده‌های گازی را وارد اتمسفر می‌کنند. تأثیر این آلاینده‌ها روی سلامت و بهداشت عمومی، امری شناخته شده است. همچنین، نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی فسیلی که بخش بزرگی از سبد

میزان بازچرخانی آب و مصرف کل آب هدررفته

بنا بر نتایج پژوهش حاضر، طی یک روز در مجموع ۳۴۸۱۹۲۰ مترمکعب آب از سد بالایی به سد پایین‌دست منتقل و بازچرخانی می‌شود. بنابراین، طی یک فصل حدود ۱۲۷۰۹۰۰۸۰۰ مترمکعب و طی یک سال ۳۲۳۸۱۸۵۶۰ مترمکعب بازچرخانی می‌شود. انتقال ۱۲۷۰ میلیون مترمکعب آب از سد بالادست به سد پایین‌دست برای تولید انرژی طی یک سال است. این حجم آب بازچرخانی شده طی یک سال در مقایسه با حجم مخزن سد لار با حجم ۹۶۰ میلیون مترمکعب، سد زاینده‌رود با حجم ۱۴۷۰ میلیون مترمکعب، سد آزاد با حجم ۸/۵



جدول ۴. میزان کاهش انتشار در سناریوهای مختلف

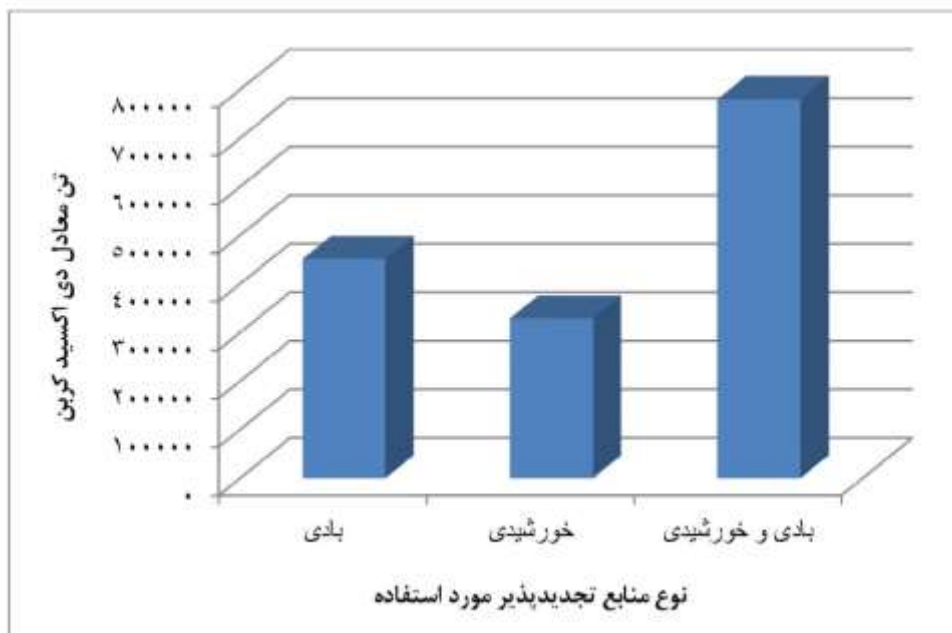
میزان کاهش انتشار سالانه (تن)									
NOx	SO2	SO3	CO	SPM	CO2	CH4	N2O	C	سناریوی تجدیدپذیر
۱۶۸۲/۷۲	۷۷۶/۱۶	۶/۲۸	۴۲۱/۲	۶۶/۲۵	۴۲۰۴۸۲/۳	۹/۷۶	۱/۳۹	۱۲۲۸۵۹	بادی
۱۲۲۶/۸۸	۵۶۵/۹	۴/۵۸	۳۰۷/۱	۴۸/۳	۳۲۸۴۴۷/۲	۷/۱۲	۱/۰۲	۸۹۵۷۶/۶۵	خورشیدی
۲۹۰۹/۶	۱۳۴۲/۰۶	۱۰/۸۵	۷۲۸/۳	۱۱۴/۵۵	۷۷۸۹۲۹/۲	۱۶/۸۸	۲/۴۱	۲۱۲۴۳۵/۷	بادی و خورشیدی

هم‌زمان منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی میزان انتشار کربن سالانه ۲۱۲۴۳۵/۷ تن، کربن دی‌اکسید ۷۷۸۹۲۹/۵ تن، اکسیدهای نیتروژن ۲۹۰۹/۶ تن و سولفور دی‌اکسید ۱۳۴۲/۰۶ تن کاهش یافته است.

از آنجا که همه آلاینده‌های گلخانه‌ای به یک اندازه در گرمایش جهانی تأثیر ندارند، شاخصی با عنوان معادل کربن دی‌اکسید<sup>۱</sup> تعریف شده است. این شاخص برای سادگی و تبدیل تأثیر هر یک از آلاینده‌های گلخانه‌ای به معادل کربن دی‌اکسید استفاده می‌شود [۴۴]. استفاده از منابع تجدیدپذیر در پژوهش حاضر سبب کاهش معادل کربن دی‌اکسید به مقدار ۴۵۱۱۴۰/۵ تن با وجود منابع بادی، ۳۲۸۹۲۹ تن با وجود منابع خورشیدی و ۷۸۰۰۶۹/۷ تن با حضور هر دو منبع شد. شکل ۸ میزان کاهش انتشار معادل کربن دی‌اکسید را با حضور منابع تجدیدپذیر نشان می‌دهد.

نیروگاهی کشور را به استناد ترازنامه انرژی تشکیل داده‌اند، برای تولید توان الکتریکی و با توجه به بازدهی نه‌چندان مطلوب خود، ناگزیر به سوزاندن مقادیر بسیار زیادی از سوخت‌های فسیلی‌اند. هدف این بخش، محاسبه میزان انتشار و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی با نصب واحدهای تولید پراکنده است.

مطابق جدول ۴، با وجود منابع تجدیدپذیر بادی، میزان انتشار کربن سالانه ۱۲۲۸۵۹ تن، کربن دی‌اکسید ۴۵۰۴۸۲/۳ تن، اکسیدهای نیتروژن ۱۶۸۲/۷۲ تن و سولفور دی‌اکسید ۷۷۶/۱۶ تن کاهش می‌یابد. با وجود منابع خورشیدی میزان انتشار کربن سالانه ۸۹۵۷۶ تن، کربن دی‌اکسید ۳۲۸۴۴۷/۲ تن، اکسیدهای نیتروژن ۱۲۲۶/۶۸ تن و سولفور دی‌اکسید ۵۶۵/۹ تن کاهش می‌یابد. همچنین، در سناریوی بادی و خورشیدی، وجود



شکل ۸. میزان کاهش انتشار معادل کربن دی‌اکسید با حضور منابع تجدیدپذیر مختلف<sup>۱</sup>

1. Carbon Dioxide Equivalent (CDE)

خورشیدی، آلاینده‌ها به میزان ۳۲۸/۹۲۹ هزار تن معادل کربن دی‌اکسید و انرژی اولیه ۱۱۵/۶۷۷ تن معادل نفت کاهش یافت. در صورت به‌کارگیری هم‌زمان ۲۰۰ مگاوات خورشیدی و ۲۰۰ مگاوات بادی میزان آلاینده‌ها ۷۸۰/۰۶۹ هزار تن معادل کربن دی‌اکسید و میزان انرژی اولیه ۲۷۴/۳۳۵ هزار تن معادل نفت کاهش یافت.

#### منابع

- [1]. Al-hadhrami LM, Alam M. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;44:586–98.
- [2]. Vennemann P, Gruber K, Haaheim J, Kunsch A. Pumped storage plants – Status and perspectives. Vol. 90. Essen: VGB power tech; 2011.
- [3]. Yousefi H, Mohammadi A, Noorollahi Y. Analyzing the Water Quality of Babaheydar Dam in Farsan using NSFQI Analytical Method. *Journal of Watershed Management Research*. 2019;9(18):1–11 [In Persian].
- [4]. V. Quaschnig. *Understanding renewable energy systems*. London: Routledge; 2016.
- [5]. Zhang S, Andrews-speed P, Perera P. The evolving policy regime for pumped storage hydroelectricity in China: A key support for low-carbon energy. *Applied Energy*. 2015;150(2):15–24.
- [6]. Ming Z, Kun Z, Daoxin L. Overall review of pumped-hydro energy storage in China: Status quo, operation mechanism and policy barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;17:35–43.
- [7]. Sivakumar N, Das D, Padhy N. Economic analysis of Indian pumped storage schemes. *Energy Conversion and Management*. 2014;88:168–76.
- [8]. Sivakumar N, Das D, Padhy N, Senthil Kumar A, Bisoyi N. Status of pumped hydro-storage schemes and its future in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;19:208–13.
- [9]. Zhang D, Chen T, Li Y. Survey on pumped storage power stations in Japan. *South Power Syst Technol*. 2009;3:1–5.
- [10]. Punys P, Baublys R, Kasiulis E, Vaisvila A. Assessment of renewable electricity generation by pumped storage power plants in EU Member States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:190–200.

گفته شد که با توجه به تولید انرژی الکتریکی توسط منابع تجدیدپذیر و با در نظر داشتن بازده نیروگاه‌های کشور (۳۷/۸ درصد مطابق با ترانزنامه انرژی سال ۱۳۹۵) می‌توان در میزان سوخت اولیه نیز تا حد درخور توجهی صرفه‌جویی کرد. با محاسبات صورت‌گرفته، وجود منابع بادی پژوهش حاضر سبب کاهش مصرف انرژی اولیه برابر با ۱۵۸۶۵۸ تن معادل نفت شد. نصب منابع خورشیدی در پژوهش حاضر سبب کاهش ۱۱۵۶۷۷/۷ تن معادل نفت و نصب هم‌زمان منابع بادی و خورشیدی سبب کاهش ۲۷۴۳۳۵/۷ تن معادل نفت شد.

#### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر ضمن برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه، به بررسی تأثیر این نیروگاه روی بار الکتریکی کل کشور پرداخته است و به جای مصرف آب برای فقط یک‌بار تولید انرژی الکتریکی، آب بازچرخانی شده و چندین بار استفاده شده است. به‌رغم رویکرد سایر مقالات پیرامون برنامه‌ریزی نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره برای تسطیح منحنی مصرف بار، پژوهش حاضر برنامه‌ریزی نیروگاه سیاه‌بیشه را با اولویت حفظ آب در چرخه و بعد از آن، پیک‌سازی و پر کردن دره‌های مصرف انجام داده است [۳۷ و ۳۸]. پژوهش حاضر در برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه-ذخیره سیاه‌بیشه رویکرد حفاظت از آب را همواره مد نظر قرار داده و از اتلاف و آزادسازی آب پشت سدها با هدف تولید انرژی الکتریکی جلوگیری کرده است. نتایج برنامه‌ریزی این نیروگاه و اجرای آن بر روزهای فرضی سخت و آسان با فرض نبود منابع تجدیدپذیر، وجود منابع تجدیدپذیر بادی، وجود منابع تجدیدپذیر خورشیدی و وجود هم‌زمان منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی بیان‌کننده کاهش حداقل یک گیگاواتی بار پیک هم‌زمان سالانه و رویکرد مشابه در بیشتر ماه‌های سال است. حجم آب در گردش در فرایند تلمبه‌زنی و تولید ۳۴۸۱۹۲۰ مترمکعب بوده و زمان فرایند تلمبه‌زنی و تولید به‌ترتیب برابر پنج و چهار ساعت است. هیبرید نیروگاه سیاه‌بیشه با ۲۰۰ مگاوات منابع بادی سبب کاهش آلاینده‌ها به میزان ۴۵۱/۱۴۰ هزار تن معادل کربن دی‌اکسید و کاهش انرژی اولیه فسیلی به میزان ۱۵۸۶۵۸ تن معادل نفت شد. در هیبرید نیروگاه سیاه‌بیشه با ۲۰۰ مگاوات منابع

- [11]. Geth F, Brijs T, Kathan J, Driesen J, Belmans R. An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: Current status and new developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;52:1212–27.
- [12]. Barbour E, Wilson I, Radcliffe J, Ding Y, Li Y. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;61:421–32.
- [13]. Dames M. An Assessment of Hydroelectric Pumped Storage An Assessment of Hydroelectric Pumped Storage. National Hydroelectric Power Resources Study, Vol. X. Virginia; 1981.
- [14]. Ardehali M. Power Plants and Generation of Electrical Energy. Tehran: Amirkabir University of Technology; 2012 [In Persian].
- [15]. Hunt J, Aurélio M, Freitas V, Olímpio A, Junior P. A review of seasonal pumped-storage combined with dams in cascade in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;70(April 2016):385–98.
- [16]. Caralis G, Papantonis D, Zervos A. The role of pumped storage systems towards the large scale wind integration in the Greek power supply system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(5):2558–65.
- [17]. Schmidt J, Cancellar R, Junior A. The effect of windpower on long-term variability of combined hydro-wind resources: The case of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;55:131–41.
- [18]. Foley A, Leahy P, Li K, McKeogh E, Morrison A. A long-term analysis of pumped hydro storage to firm wind power. *Applied Energy*. 2015;137:638–48.
- [19]. Kusakana K. Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage. *Energy Conversion and Management*. 2016;111:253–60.
- [20]. Noorollahi Y, Itoi R, Yousefi H, Mohammadi M, Farhadi A. Modeling for diversifying electricity supply by maximizing renewable energy use in Ebino city southern Japan. *Sustainable Cities and Society*. 2017 Oct;34:371–84.
- [21]. Hamlehदार M, Yousefi H, Noorollahi Y, Fahimi R. Utilize the Potential of the Water and Wastewater Industry for Distributed Generation of Clean Energy. *Iranian journal of Ecohydrology*. 2018 Dec 22;5(4):1147–60 [In Persian].
- [22]. Alam M, Rehman S, Al-Hadhrami L, Meyer J. Extraction of the inherent nature of wind speed using wavelets and FFT. *Energy for Sustainable Development*. 2014;22:34–47.
- [23]. Rehman S, Al-Hadhrami L, Alam M. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;44:586–98.
- [24]. Jangavar H, Noorollahi Y, Emami Meybodi A. Economic and Environmental Analysis of the Small Hydropower Plants Development. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2017 Dec 22;4(4):1255–68 [In Persian].
- [25]. Hino T, Lejeune A. 6.15 - Pumped Storage Hydropower Developments. In: Sayigh ABT-CRE, editor. Oxford: Elsevier; 2012. p. 405–34.
- [26]. IEA. World Energy Outlook 2017 [Internet]. International Energy Agency, Paris. 2017. Available from: <https://www.iea.org/weo2017/>
- [27]. IEA. World Energy Outlook 2018 [Internet]. International Energy Agency. Paris; 2018. Available from: <https://www.iea.org/weo2018/>
- [28]. Ridge O. 2017 Hydropower Market Report. 2018;(April). Available from: [https://hydropower-qa.ornl.gov/docs/research/2017\\_Hydropower\\_Market\\_Report\\_summary\\_slide\\_deck.pdf](https://hydropower-qa.ornl.gov/docs/research/2017_Hydropower_Market_Report_summary_slide_deck.pdf)
- [29]. International energy agency(IEA). Total Primary Energy Supply (TPES) by source Iran, Islamic Republic of 1990 - 2016 [Internet]. 2019. Available from: <https://www.iea.org/statistics/?country=IRAN&year=2016&category=Energy supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>
- [30]. Yazdani M, Sharifzadeh M, Kamrani K, Ghorbani M. Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;28:41–8.
- [31]. Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K. Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016;51:424–38.
- [32]. Ghorbani M, Sharifzadeh M. Long term stability assessment of Siah Bisheh powerhouse cavern based on displacement back analysis

- method. Tunnelling and Underground Space Technology. 2009;24(5):574–83.
- [33]. Katal F, Fazelpour F. Multi-criteria evaluation and priority analysis of different types of existing power plants in Iran: An optimized energy planning system. *Renewable Energy*. 2018;120:163–77.
- [34]. Pfenninger S, Staffell I. renewables.ninja [Internet]. Available from: <https://www.renewables.ninja/>, Accessed date, June 2019
- [35]. Yona A, Senjyu T, Funabashi T. Application of Recurrent Neural Network to Short-Term-Ahead Generating Power Forecasting for Photovoltaic System. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. IEEE; 2007. p. 1–6.
- [36]. Hung D, Mithulananthan N, Lee K. Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for minimizing energy loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014 Feb;55:179–86.
- [37]. Tahani M, Yousefi H, Noorollahi Y, Fahimi R. Application of nature inspired optimization algorithms in optimum positioning of pump-as-turbines in water distribution networks. *Neural Computing and Applications*. :1–11.
- [38]. Yousefi H, Noorollahi Y, Tahani M, Fahimi R. Modification of pump as turbine as a soft pressure reduction systems (SPRS) for utilization in municipal water network. *Energy Equipment and Systems*. 2019 Mar 1;7(1):41–56.
- [39]. Benato A, Stoppato A. Pumped Thermal Electricity Storage: A technology overview. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018;6:301–15.
- [40]. Noorollahi Y, Yousefi H, Mahyar Taheri Babil Oliaei M, Mohammadi M. Identification of the catchment areas and potential survey of power generation from small hydropower plants in Kurdistan province. *Iranian journal of Ecohydrology*. 2017 Mar 21;4(1):275–86 [In Persian].
- [41]. Breeze P. Chapter 2 - Pumped Storage Hydropower. In: Breeze PBT-PSEST, editor. Academic Press; 2018. pp. 13–22.
- [42]. ISNA. What is the most expensive time of a day to use electricity with time-of-use rates? *KhabarOnline* [Internet]. 2012 Oct 22; Available from: <https://www.khabaronline.ir/news/252851> [In Persian], Accessed date, June 2019
- [43]. Ministry of Energy of the Islamic Republic of Iran. Energy balance sheet 2016 [Internet]. 2018. Available from: <http://pep.moe.gov.ir/> [In Persian], Accessed date, June 2019
- [44]. Panel TI, Change C, Nations U, Programme E, Ipcc T, Report FA, et al. *Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability* [Internet]. 2007. Available from: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf), Accessed date, Jan. 2019