

مدیریت تولید آینده در نیروگاه‌های برقایی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: نیروگاه سد کارون ۴)

اسداله اکبریان اقدم^۱، علی محمد احمدوند^۲، سعید علیمحمدی^۳

چکیده: افزایش تقاضا و کاهش بالقوه منابع، تولید انرژی در آینده را به یکی از چالش‌های مهم تبدیل کرده است. در نیروگاه‌های برقایی، تغییر اقلیم از دلایل اصلی محدودیت منابع تأمین تولید است. دما و بارش می‌تواند شرایط هیدرولوژیکی آینده را تغییر دهد و بر میزان و توزیع زمانی تولید اثر مستقیم بگذارد. برای مشخص شدن تغییرات آینده تولید و امکان مدیریت آن، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی تحت بسته نرم‌افزاری Lingo توسعه داده شده است. بررسی‌های تغییر اقلیم با ایجاد گروهی از سناریوهای آینده عوامل تأثیرگذار انجام گرفته است. این تحقیق با استناد به داده‌های تاریخی ۳۰ سال منطقه کارون ۴، مدل‌های لازم برای برآورد تبخیر و جریان رودخانه را تهیه کرده و با ایجاد سناریوهای آینده دما و بارش، با استفاده از مدل‌های مذکور، مقدار و توزیع زمانی جریان رودخانه در ۸۶ سال آینده را برآورد کرده است. نتایج نشان می‌دهد تا انتهای قرن، با ۱۷/۲ درصد کاهش بارش، و ۲۲/۶ و ۲۶/۱ درصد افزایش دما و تبخیر، جریان رودخانه به‌طور متوسط ۱۰/۹ درصد کاهش خواهد یافت. در مدیریت تولید، با ضریب بار نیروگاهی ۰/۲ می‌توان تولید نیروگاه برقایی را در محدوده کاهش ۱۲ تا ۴۶ درصدی و به‌طور متوسط ۲۰ درصد با لحاظ محدودیت‌های متعدد کنترل بهینه‌سازی کرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی تولید، نیروگاه برقایی، تغییر اقلیم، مخزن سد، تقاضای انرژی.

۱. مربی گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و مدیریت، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۶

نویسنده مسئول مقاله: اسداله اکبریان اقدم

E-mail: asad.akbarian@gmail.com

مقدمه

یکی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم، پُر کردن فاصله بین تقاضا و تأمین انرژی، با انرژی‌های پاک، تجدیدپذیر و ارزان است. انرژی برقی، که ارزان و سازگار با محیط زیست است، از حرکت و ذخیره آب در مخازن و دریاچه‌ها گرفته می‌شود. هد آب مخزن سد، فشاری را به وجود می‌آورد (فشار آب) که هر چه بیشتر باشد، توربین‌ها سریع‌تر حرکت خواهند کرد (مدیریت انرژی برقی غرب آمریکا، ۲۰۰۵). در حدود ۲۰ درصد از کل انرژی تولیدی جهان، به روش برقی تأمین می‌شود، اما در ایران با وجود پتانسیل فراوان، تنها در حدود ۱۰ درصد انرژی کل از این طریق به دست می‌آید (لیافتی، ۱۳۹۳). برنامه‌ریزی در زمینه فناوری در عرصه صنعت، نیازمند اجرای فرایندهای بسیار مهمی است که عبارت‌اند از تعیین خطوط کلان توسعه تکنولوژی، تعیین سبد و استراتژی‌های کلان اکتساب حوزه‌های استراتژیک تکنولوژی، تعیین سبد تکنولوژی‌ها و زیرتکنولوژی‌های کلیدی (رضوی، آراستی، جعفری و ملازاده، ۱۳۹۱). با وجود به‌کارگیری تدریجی انرژی‌های جدید، هنوز انرژی فسیلی منبع اصلی تولید انرژی است؛ اما محدودیت منابع فسیلی و انتشار دی‌اکسید کربن در پی مصرف انرژی فسیلی، توجه به منابع تجدیدپذیر از جمله برقی را در جهان و ایران الزامی ساخته است. انرژی برقی و انرژی زمین‌گرمایی به ترتیب با تولید تنها ۱۱ و ۱۵ گرم در کیلو وات ساعت، کمترین آلودگی؛ و انرژی‌های زغال سنگ و نفت به ترتیب با تولید ۹۷۵ و ۷۴۲ گرم در کیلو وات ساعت، بیشترین آلودگی را تولید می‌کنند. انرژی برقی علاوه بر تنظیم و تعدیل نیاز شبکه، تأمین مصرف در ساعات اوج را نیز بر عهده دارد. جدول ۱ مقایسه منابع مختلف تأمین انرژی و معایب و محاسن هر یک از روش‌های تولید انرژی را نشان می‌دهد.

انتظار می‌رود به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول سده جاری تغییرات زیادی در آب‌وهوای کره زمین به وجود آید؛ یکی از عوارض بالقوه آن، تغییر جریان رودخانه‌ها خواهد بود (هاریسون، ۲۰۰۱). تولید انرژی برقی متأثر از وقوع خشکسالی و تغییر اقلیم است و ارزیابی تولید آینده به ویژه در مناطق خشک یا نیمه خشک مثل ایران اهمیت بسزایی دارد و در برنامه‌ریزی، توسعه و ساخت و همچنین بهره‌برداری از نیروگاه‌های برقی مؤثر است. استان خوزستان به تنهایی بیش از ۴۰ درصد انرژی برقی کشور را تولید می‌کند و چند نیروگاه نیز در استان در حال توسعه‌اند. اقلیم این منطقه از کشور نیز همانند سایر مناطق دچار تغییراتی خواهد شد که در نهایت آثار آن بر همه منابع انرژی و ارکان کشور ظاهر خواهد شد. حوضه آبریز کارون ۴ و نیروگاه برقی آن موضوع مطالعه انتخاب

شد. عوامل اقلیم با استفاده از سناریوهای دانلودشده از CCCSN^۱ برآورد شد. سناریوها علاوه بر لزوم ارائه مقادیر عوامل اقلیم، باید توانایی پوشش دادن سراسر منطقه تحقیق را داشته باشند.

جدول ۱. انواع منبع انرژی، و محاسن و معایب آنها

منبع انرژی	محاسن	معایب
انرژی خورشیدی	پاک فراوانی دسترسی در اکثر مناطق کارایی سیستم‌ها به مدت ۱۵ تا ۳۰ سال	سرمایه‌گذاری اولیه زیاد وابستگی به تابش خورشید احتمال نیاز به انرژی الحاقی برای ساعات بدون تابش خورشید نیاز به فضای فیزیکی وسیع برای صفحات سلول‌های PV محدودیت دسترسی به پانل‌های پلی‌سیلیکون
انرژی بادی	بدون آلودگی مقرون به صرفه مشکلات کم اکوسیستمی خروجی به نسبت زیاد	وابستگی خروجی به سرعت باد امکان پذیر نبودن در همه مناطق جغرافیایی سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه نگهداری زیاد استفاده از سطوح بسیار وسیع
انرژی برقایی	بدون آلودگی مطمئن امکان تولید انرژی زیاد تولید انرژی تنظیم‌شدنی	آثار محیطی در پی تغییر محیطی در اطراف دریاچه سد زیاد بودن هزینه ساخت سدهای برقایی تأثیرپذیری سدها از وقوع خشکسالی‌ها امکان ایجاد سیلاب
گاز طبیعی	دسترسی وسیع پاک‌ترین سوخت فسیلی ترکیب با دیگر سوخت‌ها برای کاهش آلودگی امکان افزودن مواد معطر برای استنشام راحت‌تر در زمان نشت	هزینه زیاد انتقال گاز نیاز به زیرساخت مناسب برای دسترسی به منابع گازی سوخت نسبتاً تمیز با آلودگی کم خطوط لوله گاز محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهند
مواد نفتی	بسیار کارا برای حمل‌ونقل پایه بسیاری از محصولات اقتصادی بودن تولید سهولت انتقال	آلودگی زیاد گاز کربنیک محدود بودن مناطق دسترسی احتمال اتمام منابع قبل از منابع گاز یا زغال سنگ تأثیرات احتمال محیطی در حفر چاه و نیز انتقال به سایر نقاط
Biomass (زیست‌توده)	وفور منابع آلودگی کمتر به نسبت نفت و زغال سنگ استفاده در موتورهای دیزلی تبدیل راحت موتورها برای استفاده	لزوم نزدیکی منابع برای کاهش هزینه انتقال ایجاد برخی آلودگی‌های گازی یا فاضلابی افزایش انتشار دی‌اکسید نیتروژن به‌عنوان آلودگی هوا امکان استفاده از سوخت سنگواره‌ای در تبدیل انرژی

1. The Canadian Climate Change Scenarios Network

ادامه جدول ۱

منبع انرژی	محاسن	معایب
زغال سنگ	فراوانی دسترسی گران نبودن استخراج توانایی تولید انرژی زیاد	انتشار گازهای گلخانه‌ای و باران اسیدی دارای آثار زیست‌محیطی استخراج و سوزاندن؛ هرچند فناوری سوزاندن تمیزتر زغال سنگ توسعه یافته است خطرهای استخراج برای معدنکاران
اورانیوم	بدون گازهای گلخانه‌ای یا آلودگی گاز کربنیک کارایی در تولید انرژی الکتریکی زیاد بودن ذخایر اورانیوم، سوخت‌گیری سالانه	نیازمند هزینه امنیتی زیاد، اورژانسی، محدودیت، فضولات رادیواکتیو و سیستم‌های ذخیره مشکلات ذخیره بلندمدت فضولات رادیواکتیو آسیب‌رسانی فاضلاب داغ نیروگاه‌های هسته‌ای به آبزیان
زیست‌محیطی	کمترین آثار زیست‌محیطی بهره‌وری زیاد و مؤثر دارای فاضلاب کم، هزینه کم نگهداری	دسترسی در مناطق کمی از کره زمین زیاد بودن هزینه ایجاد و راه‌اندازی چاه‌ها در نهایت تمام شده و خشک می‌شوند

منبع: <http://people.bath.ac.uk>

منطقه تحقیق ضمن اینکه قسمت‌هایی از چند شبکه جهانی را شامل می‌شود، داده‌ها باید در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه یا سالانه نیز ارزیابی شده و مطابقت داده شوند. در این تحقیق ابتدا داده‌های سناریوها با کمک نرم‌افزار SDSM ریزمقیاس شدند؛ سپس برای مطابقت مکانی از روش RGAM استفاده شد و داده‌ها، به داده‌های قابل استفاده در محدوده مورد نظر تبدیل شدند. نتایج به‌کارگیری روش RGAM با مقایسه آن‌ها با داده‌های تاریخی، دقت بسیار زیاد این روش را تأیید می‌کند (اکبریان اقدم، احمدوند و علیمحمدی، ۱۳۹۳).

هدف این تحقیق، آشکارسازی و برآورد وضعیت آینده تولید برقایی تحت تأثیر عوامل بسیار متغیر اقلیم با روش بهینه‌سازی متوالی و با تکیه بر داده‌های قابل اعتماد حاصل از سناریوهای اقلیم و نیز داده‌های واقعی تاریخی است. بدیهی است این امر می‌تواند در مدیریت تولید آینده انرژی برقایی به‌کار رود و در سرمایه‌گذاری‌های آتی لحاظ شود.

در این تحقیق ضمن به‌کارگیری روش‌های علمی برای تهیه مدل‌های لازم، روش‌های معتبر آماری و ریاضی برای سناریوسازی عوامل اقلیم آینده معرفی شده است. روش جدید RGAM برای انطباق منطقه‌ای سناریوها نیز معرفی شده است. همچنین روابط مدل بهینه‌سازی به‌نحوی ارائه شده‌اند که اعمال تغییرات مورد نظر در مقادیر عوامل مختلف به‌ویژه PE بسیار روان و دقیق انجام‌پذیر باشد.

پیشینه پژوهش

نظر به اهمیت انرژی و صنایع در توسعه کشورها، تصمیم‌گیری در زمینه انرژی در صنایع، بر حوزه وسیعی اثر می‌نهد. با توجه به رشد تقاضای انرژی و محدودیت منابع، اصلاح برخی سیاست‌ها در بخش انرژی کشور از جمله سیاست‌های تولیدی و قیمتی، بسیار ضروری است (قادری و زارع‌زاده، ۱۳۹۲). در صنایع به دلیل اهمیت این بخش در توسعه کشور، موضوع انرژی از اهمیت بیشتری نسبت به بخش‌های دیگر برخوردار است. در داخل کشور تا کنون تحقیقاتی در زمینه پیش‌بینی تقاضای انرژی در این بخش انجام گرفته است، از جمله پژوهش موسوی اهرنجاری، قادری و آزاده (۱۳۸۶) در زمینه تخمین توابع تقاضای انواع حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف کشور از جمله بخش صنعت.

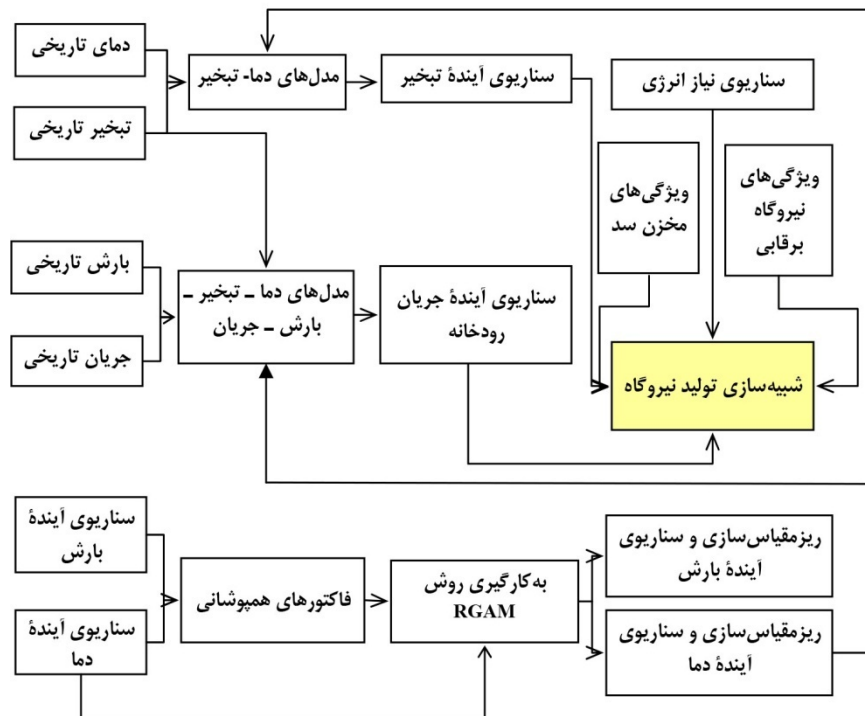
عملیات بهینه‌سازی تولید نیروگاه‌های برقابی در شرایط ثابت یا شرایط کاملاً معین و پیش‌بینی‌پذیر کوتاه‌مدت، بارها در تحقیقات و در عمل انجام پذیرفته است. در کشور ما بهینه‌سازی تحت شرایط بسیار متغیر و ناپایدار ناشی از تغییر اقلیم به طور جامع صورت نگرفته است. هرچند در برخی از مطالعات از منظر برخی از عوامل اقلیم مثل دما بررسی‌هایی انجام گرفته است. از جمله می‌توان به پژوهش انصاری (۱۳۹۰) اشاره کرد. در خارج از کشور تحقیقات مشابهی صورت گرفته است دارد؛ از جمله تحقیقی جامع در مکزیک از اسپینا نورنیا، گای گارسیا، کاندو، سانچس و تورس اسکدا (۲۰۱۱) که در آن جریان رودخانه، به استناد سناریوهای مختلف دما و بارش ایجاد شده و بهینه‌سازی بر اساس متوسط کل جریان صورت گرفته است. یک مدل تصمیم‌گیری برای تولید برقابی در سال ۲۰۰۸ در میلان ایتالیا ارائه شد است که به کارگیری آن موجب افزایش ۲ درصدی بازده نیروگاه شد (کانتی، ماگری و گرگو، ۲۰۰۸). در زمینه ریزمقیاس‌سازی داده‌های سناریوهای تغییر اقلیم تحقیقات متعددی انجام پذیرفته است.

تاچر و مک‌کروگر (۲۰۱۱) در تحقیقی ضمن اشاره به ابعاد بزرگ شبکه‌های جهانی بیان داشتند که با این وضوح با وجود مدل‌های بارزش‌گردش عمومی (GCM)، آن‌ها قادر به دریافت عوامل در مقیاس‌های محلی کوچک نیستند. یک راه برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از ریزمقیاس‌سازی داده‌های مدل‌های گردش عمومی به مقیاس‌های محلی با استفاده از یک مدل محلی (RCM) است. بدین طریق روند کلی اقلیم حاصل می‌شود، درحالی‌که پاسخ یا برآورد مدل GCM در مقیاس بزرگ حفظ شده است. شو هوا و همکاران (۲۰۱۰) برای منطقه نوادا و کالیفرنیا؛ و نگوین، مک‌گرگو و گوین (۲۰۱۰) برای حوضه آبریز موراوی - دارلینگ استرالیا از ریزمقیاس‌سازی استفاده کردند.

یلماز و ایمتیاز (۲۰۱۱) ریزمقیاس‌سازی برای داده‌های حاصل از مدل GCM ECHAM5 را برای شبیه‌سازی جریان حاصل از ذوب برف برای تولید برقابی در حوضه آبریز بالادست منطقه ایرپراتز به کار بردند. به استناد آن شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان، از طریق ریزمقیاس‌سازی شرایط حدی عوامل اقلیمی، دست‌یافتنی است.

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق به منظور دستیابی به داده‌های لازم برای مدل بهینه‌سازی تولید نیروگاه برقابی از جمله میزان جریان ورودی به مخزن سد و ارتفاع تبخیر از مخزن سد و نیز دمای هوا، ابتدا از اطلاعات موجود تاریخی ثبت‌شده استفاده و مدل‌های برآورد تبخیر ماهانه و همچنین مدل‌های برآورد جریان ایجاد شد. سپس به کمک این مجموعه مدل‌ها و با به‌کارگیری داده‌های سناریوهای دانلودشده و مطابقت منطقه‌ای و در نهایت ریزمقیاس‌شده، مقادیر جریان در آینده شبیه‌سازی شد. در شکل ۱ مراحل کار نشان داده شده است.



شکل ۱. فلوچارت عملیات تهیه داده‌های لازم برای بهینه‌سازی تولید نیروگاه برقابی

برای تهیه مدل‌های دما - تبخیر، داده‌های واقعی سی‌ساله منطقه (از سال آبی ۵۸-۱۳۵۷ تا ۸۷-۱۳۸۶) تهیه و بازرسی و تکمیل شد و مدل مربوط برای هر ماه به‌دست آمد روش‌های مختلفی از جمله مدل‌های تجربی (مثل تورنت وایت) آزمون شدند، ولی نتایج خوبی در مقایسه با داده‌های واقعی تاریخی ارائه ندادند. از آنجاکه بین دمای هوا (T) و ارتفاع تبخیر (E) همبستگی خطی بسیار خوبی برقرار است، مدل‌های رگرسیونی خطی برای پارامترهای مذکور مناسب‌اند. جدول ۲ خلاصه مدل‌های رگرسیون خطی ماهانه دما - تبخیر را به‌همراه مجذور ضریب همبستگی آن‌ها ارائه می‌کند. مقادیر بسیار بالای ضرایب همبستگی، مؤید مناسب بودن استفاده از مدل‌های خطی برای برآورد تبخیر از دمای ماهانه است.

جدول ۲. مدل‌های رگرسیون خطی ماهانه دما - تبخیر $E = a + b T$

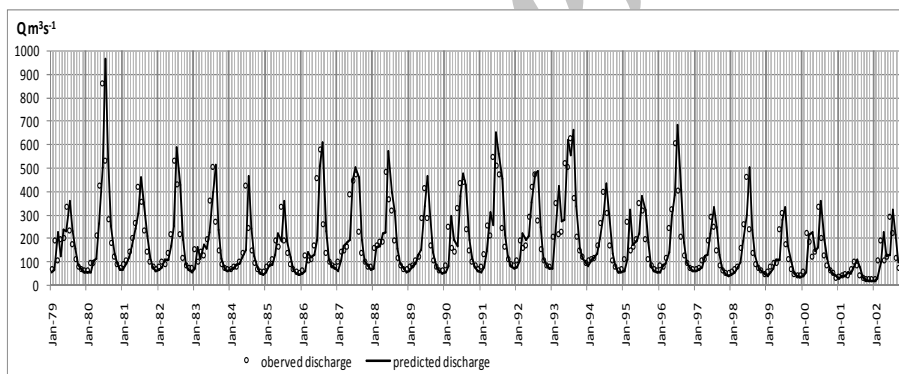
ماه	b	a	R ^۲
Jan	۱۵/۴۸	-۳۷/۹۵	۰/۹۲۷
Feb	۱۵/۵۹	-۴۰/۴۳	۰/۹۲۷
Mar	۱۵/۷۰	-۴۲/۸۵	۰/۹۲۹
Apr	۱۵/۷۷	-۴۴/۱۹	۰/۹۲۹
May	۱۵/۸۷	-۴۷/۳۳	۰/۹۳۳
Jun	۱۵/۸۷	-۴۷/۰۶	۰/۹۳۳
Jul	۱۶/۰۲	-۴۷/۵۳	۰/۹۲۹
Aug	۱۶/۳۱	-۵۰/۳۰	۰/۹۲۹
Sep	۱۶/۱۷	-۴۸/۸۹	۰/۹۲۸
Oct	۱۶/۰۵	-۴۷/۷۰	۰/۹۲۷
Nov	۱۶/۲۰	-۴۷/۷۹	۰/۹۴۲
Dec	۱۶/۲۴	-۴۶/۶۴	۰/۹۵۷

مدل‌های رگرسیونی تجربی چندمتغیره با اینکه نیازمند داده‌های وسیع‌اند و در ضمن نمی‌توانند تمام عوامل فیزیکی مؤثر را در مدل دخالت دهند یا پیش‌بینی کنند، هنوز به‌طور گسترده استفاده نشده‌اند و این به‌دلیل سادگی تهیه آن‌ها و قدرت پیش‌بینی‌های دقیق‌تر است. از این مدل‌ها در برآورد جریان و دیگر عوامل هیدرولوژیکی بارها استفاده شده است. در این تحقیق، مدل‌های رگرسیون تجربی چندمتغیره برای شدت جریان رودخانه و عوامل مؤثر بر آن همچون ارتفاع بارش، ارتفاع تبخیر، دمای هوا و جریان قبلی از داده‌های تاریخی تهیه و بررسی شدند. مناسب‌ترین مدل با استناد به روش‌های آمار و مطابقت با داده‌های واقعی انتخاب شد و در ادامه

محاسبات، مبنای استناد و استفاده قرار گرفت. مدلی که از بین مدل‌های ایجاد شده مناسب‌ترین تشخیص داده شد در رابطه ۱ نشان داده شده است. در این رابطه a مقدار ثابت و Q_{pre} جریان رودخانه در ماه قبل از ماه جاری است؛ به این معنا که جریان در ماه i به جریان در ماه $i-1$ ام وابسته بوده و حتی در صورت نبود بارش در آن ماه، جریانی در رودخانه وجود داشته است. به دلیل وجود مقادیر منفی برای دما این عامل به صورت خطی در رابطه وجود دارد؛ درحالی‌که بارش و تبخیر و جریان پیشین به صورت لگاریتمی هستند.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \ln(Q) = 2.389 - 0.034T + 0.0002\ln(P) + 0.631\ln(Q_{pre})$$

در شکل ۲ برای مشاهده میزان دقت برآورد این مدل، ابتدا با استفاده از مقادیر تاریخی عوامل مورد نیاز، مقادیر پیش‌بینی مدل برای جریان ماهانه در دوره زمانی تاریخی محاسبه و سپس در مقابل مقادیر واقعی مشاهده شده تاریخی جریان رسم شده است. شکل ۲ مطابقت بسیار خوب پیش‌بینی مدل با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. بدین طریق صحت‌سنجی مدل رابطه ۱ تأیید می‌شود.



شکل ۲. مقایسه خروجی مدل با آمار واقعی تاریخی

۲۸ سناریو از ۱۱ مدل انتشار جفت‌شده گردش عمومی جوی - اقیانوسی از بانک اطلاعاتی جهانی CCCSN که همگی از سری AR4 ارزیابی شد و تأیید گزارش چهارم IPCC^۱ در سال ۲۰۰۷ را دارد، برای مقادیر ماهانه دما و بارش تا انتهای سده جاری میلادی (سال ۲۱۰۰) بازسازی شده است. هر گروه از خانواده‌های انتشار غیراقليمی حاوی اطلاعاتی در دامنه‌های مختلف از وضعیت اقتصادی، اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین

1. Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)

است (فرج‌زاده، ۱۳۹۲). از جمله این اطلاعات عوامل اقتصادی، اجتماعی، تکنولوژیکی، رشد جمعیتی و محیط زیستی را می‌توان نام برد که سناریوها در مدل‌های پایه خود مدنظر قرار داده‌اند. از آنجاکه استفاده از تعداد محدود سناریو ممکن است دربرگیرنده همه واقیعت‌ها نباشد (فرج‌زاده، ۱۳۹۲) و نتایج غیرمنطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش آثار مخرب پدیده تغییر اقلیم در پی داشته باشد (پورعلی‌حسین و مساح یوانی، ۱۳۹۲)، تکیه بر یک یا چند سناریوی خاص این مخاطره را به‌همراه دارد که نتایج غیرواقعی و با خطای زیاد ارائه کند. توصیه اکید منابع از جمله CCCSN و CCCMa^۱ بر این است که حداکثر سناریوهای جوابگو به نیازهای هیدرولوژیکی استفاده شوند و از برآورد آن‌ها پیش‌بینی‌های لازم انجام پذیرد. بنابراین در این تحقیق تعداد حداکثری ۲۸ سناریو از گروه‌های انتشار ذکرشده انتخاب شده و آشکارسازی میزان جریان رودخانه و تغییرات آن در طول ۸۶ سال آینده براساس همه آن‌ها انجام پذیرفته است؛ هرچند که بدین‌ترین و خوش‌بین‌ترین سناریوها برای مشخص‌تر شدن شرایط حدی در آینده، جداگانه بررسی شده‌اند.

سناریوهای دما و بارش در ابتدا با نرم‌افزار SDSM به‌روش آماری ریزمقیاس شده‌اند. این نرم‌افزار از معروف‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای ریزمقیاس‌سازی است. برای ریزمقیاس‌سازی، به آمار روزانه تاریخی منطقه و نیز در دوره همزمان، به سناریوهای روزانه نیاز بود. پس از ریزمقیاس‌سازی با توجه به گستردگی حوضه آبریز کارون ۴ از روش RGAM، مطابقت مکانی داده‌های سناریوها انجام پذیرفت. در این روش با درنظر گرفتن مختصات جغرافیایی هر شبکه از سناریوها و همین‌طور حوضه آبریز، چند شبکه که بسته به مختصاتشان در سناریوهای مختلف متفاوت است، معلوم شده و درصد پوشش آن‌ها از سطح حوضه محاسبه می‌شود و مقدار عامل دما یا بارش از روی داده‌های سناریوها برای حوضه به‌دست می‌آید؛ به‌طوری‌که اگر اتفاقاً فقط یک شبکه، کل حوضه را پوشش دهد، مقدار عامل در حوضه مساوی مقدار آن در سناریو خواهد بود و اگر دو شبکه به نسبت‌های ۴۰ و ۶۰ درصد حوضه را پوشش دهند، مقدار عامل در حوضه برابر ۴۰ درصد مقدار آن عامل در سناریوی اول و ۶۰ درصد در سناریوی دوم خواهد بود. حوضه آبریز کارون ۴ در جنوب غربی ایران در محدوده جغرافیایی منطقه رشته‌کوه زاگرس واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری، بیشتر آن به استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان تعلق دارد. مخزن سد کارون ۴ دارای عرض متوسط ۵۰۰ متر، تراز عادی بهره‌برداری مخزن ۱۰۲۵، تراز حداقل بهره‌برداری ۹۹۶ و تراز آبگیر نیروگاه ۹۴۵ متر از سطح دریاست. مخزن سد دارای حجم

1. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis. <http://www.cccma.ec.gc.ca/data/data.shtml>

۲۲۷۹ میلیون متر مکعب است که ۸۲۷ میلیون متر مکعب آن حجم مفید است. همچنین آب قابل تنظیم سالانه توسط مخزن سد ۳۱۵۶ میلیون متر مکعب است. مختصات جغرافیایی چهار گوشه حوضه به شرح زیر است. علامت‌های J، K، L و M به‌عنوان چهار گوشه سطح حوضه کارون ۴ نامگذاری شده‌اند.

$\lambda_J = 31/33$	North Latitude	$Q_J = 49/55$	East Longitude
$\lambda_K = 32/67$	North Latitude	$Q_K = 49/55$	East Longitude
$\lambda_L = 32/67$	North Latitude	$Q_L = 51/75$	East Longitude
$\lambda_M = 31/33$	North Latitude	$Q_M = 51/75$	East Longitude

هدف‌های اصلی احداث نیروگاه عبارتند از ۱. تنظیم آب رودخانه کارون به میزان ۳/۷ میلیارد مترمکعب در سال؛ ۲. کنترل طغیان و سیلاب‌های مخرب رودخانه کارون؛ و ۳. تولید انرژی برقایی به میزان ۲۱۰۷ میلیون کیلووات‌ساعت (سایت رسمی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران ۱۳۹۳). در جدول ۳ خلاصه مشخصات فنی نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی کارون ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات فنی نیروگاه برقایی کارون ۴

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۴ سنکرون	تعداد و نوع ژنراتورها	۴	تعداد توربین
۲۶۳ مگاوات آمپر	قدرت خروجی هر ژنراتور	۲۵۵ مگاوات	قدرت هر توربین
۱۵/۷۵ کیلوولت	ولتاژ نامی هر ژنراتور	۹۵/۷	بازده در شرایط نامی
۱۸۷/۵ دور در دقیقه	سرعت چرخش ژنراتور	۱۶۱/۵ متر	ارتفاع طراحی توربین
۱۲۵۰۰ آمپر	جریان نامی ژنراتور	۱۷۱ متر مکعب بر ثانیه	خروج آب از توربین در شرایط نامی
۱۵/۷۵ کیلوولت	ولتاژ نامی اولیه	۱۲ عدد اصلی، ۱ عدد ذخیره	تعداد ترانسفورماتور
۴۱۰ کیلوولت	ولتاژ نامی ثانویه ترانسفورماتور	۱۰۰ مگاوات آمپر	قدرت نامی هر ترانسفورماتور

بهینه‌سازی تولید

برای عملیات بهینه‌سازی تولید برقایی یک مدل ریاضی توسعه یافت و در نرم‌افزار Lingo وارد شد. این مدل برای دریافت صحیح داده‌ها و اجرا و صدور نتایج، به چند قسمت اصلی دسته‌بندی شده است. برای ورود اطلاعات، داده‌ها در نرم‌افزار اکسل دسته‌بندی و تنظیم شد و فراخوانی داده‌ها از آن صورت پذیرفت. در ضمن برای استفاده‌های مناسب‌تر بعدی، خروجی عملیات

بهینه‌سازی ترجیحاً در محیط نرم‌افزار اکسل ذخیره شد. تولید برقابی تحت تأثیر دو گروه اصلی داده‌ها و محدودیت‌هاست:

۱. جریان ورودی به مخزن سد، سطح ایستابی مخزن، جریان آب از مخزن سد به سرریز یا داخل نیروگاه و توربین‌ها، دمای هوا و تبخیر از سطح مخزن؛
۲. مشخصات و ویژگی‌های نیروگاه و تقاضای انرژی.

ارتفاع آب داخل مخزن (هد آب) موجب جاری شدن آب در توربین‌ها می‌شود و به کمک سیستم‌های نیروگاه می‌تواند انرژی الکتریکی تولید کند که توسط شبکه برق در سراسر کشور توزیع می‌شود. به دلیل محدودیت منابع، جریان از سرریزها و توربین‌ها باید کنترل شود. جریان از توربین‌ها مهم‌تر است. تنظیم تقاضای انرژی که با فاکتور ضریب بار نیروگاهی اعمال می‌شود قابل مدیریت است و می‌تواند عامل کنترل تولید در طول شبانه‌روز باشد.

تابع هدف

هدف یافتن میزانی از جریان است که تولید انرژی را در یک دوره زمانی حداکثر کند. بهترین مقطع زمانی برای بررسی، بازه‌های زمانی ماهانه است. از این رو یافتن مقدار جریان، مقدار تبخیر، مقدار دما، مقدار ارتفاع سطح آب، ارتفاع پایاب و ... در هر ماه ضرورت دارد که اغلب به لحاظ تغییر در وضعیت اقلیم به آن وابستگی دارند و به طور دقیق نمی‌توان آن‌ها را پیش‌بینی کرد و اگر تکرار محاسبات چند ماه متوالی مدنظر باشد، به‌ویژه به دلیل متأثر بودن وضعیت هر ماه از ماه یا ماه‌های قبلی، ابعاد مسئله بهینه‌سازی بزرگ‌تر می‌شود. تولید انرژی علاوه بر نیاز به منابع آبی و نوسانات سطح آب، به توزیع زمانی تقاضای انرژی نیز وابستگی دارد. نیروگاه‌های برقابی اغلب، دائم فعال نیستند و بیشتر به‌عنوان پشتیبان شبکه به‌ویژه در ساعات اوج مصرف یا برای جایگزینی سریع توقف‌های ناگهانی سایر نیروگاه‌ها به کار گرفته می‌شوند. مدل ریاضی بهینه‌سازی با روش مدل‌سازی غیرخطی، تابع هدف حداکثرسازی تولید انرژی و به کارگیری محدودیت‌ها صورت گرفته است. هدف حداکثرسازی، دستیابی به تولیدی معادل تولید اسمی نیروگاه (۱۰۰۰ مگاوات) است. اگر کمبود انرژی برابر اختلاف بین تقاضا و تولید در یک ماه گرفته شود، بهتر است هدف را حداقل‌سازی کمبود انرژی قرار دهیم. در ماه t کمبود انرژی برابر صفر خواهد بود اگر تولید برابر تقاضا باشد، وگرنه برابر اختلاف حداکثر انرژی پیک (OPE_{max}) و انرژی پیک تولیدی (OPE) خواهد بود (رابطه ۲). اگر Z جمع کمبود تولید در کل ماه‌ها T ($T=12$) باشد، تابع هدف به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$DEF(t) = \text{Max} [0, OPE_{\max}(t) - OPE(t)] \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T DEF(t) \quad \text{رابطه ۳}$$

برای افزایش کارایی سیستم نیروگاه و جلوگیری از فشار نامتعارف به آن و ایجاد نوعی تعادل در تولید متوالی، دسته‌بندی رژیمی تابع تولید مناسب‌تر خواهد بود (رابطه ۴).

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T \left(\frac{OPE(t) - OPE_{max}(t)}{OPE_{max}(t)} \right)^2 \quad \text{رابطه ۴}$$

تابع هدف Z (کمبود کلی شدت انرژی) حداقل مقدار خود را خواهد داشت (برابر صفر) اگر در تمام ماه‌ها انرژی پیک تولیدی برابر تولید حداکثر انرژی واقعی باشد، وگرنه حتی اگر در یک ماه معین انرژی کمتر از تولید پیک حداکثر باشد، Z مقدار مثبتی خواهد داشت. به بیان ریاضی، توان تولیدی واحدهای نیروگاه (PPW) تابعی از جریان آب (Q) و سطح ذخیره در مخزن (H) است که یک رابطه غیرخطی مقعر است (رابطه ۵).

$$PPW = f(Q, H) \quad \text{رابطه ۵}$$

حداکثر جریان ورودی به توربین‌ها و نیز سطح آب در مخزن، محدودیت‌های مشخصی دارند، ولی جریان عبوری از سرریز محدودیت ندارد و این عامل کنترل خروج سیلاب‌های بزرگ از دریاچه سد است. از دریچه‌های تنظیمی نیز می‌توان برای افزایش ارتفاع سطح آب در مخزن سد و افزایش توان تولید انرژی استفاده کرد.

محدودیت‌ها

در مدل ریاضی تهیه‌شده تلاش شد همه محدودیت‌های موجود ناشی از اقلیم، رودخانه و مخزن ذخیره آب و نیز محدودیت‌های توربین‌ها و سایر ویژگی‌های نیروگاه، و محدودیت‌های تقاضای انرژی لحاظ شود؛ اما به علت کثرت این محدودیت‌ها، تنها مهم‌ترین آن‌ها مدنظر قرار گرفته است. جدول ۴ محدودیت‌های عمده لحاظ‌شده در مدل را نشان می‌دهد. شرح مختصری از هر یک از این محدودیت‌ها در ستون مقابل روابط آن‌ها آورده شده است. در این روابط متغیرهای S ، Q ، R و EVP به ترتیب حجم مخزن، حجم ورودی، حجم خروجی از مخزن و حجم تبخیر (برحسب میلیون متر مکعب) است. از آنجاکه تولید انرژی به‌طور پیوسته ادامه می‌یابد و در هیچ زمانی از محاسبات (ماه) بدون برنامه متوقف یا قطع نمی‌شود، در عمل باید از تهی‌شدن مخزن

جلوگیری شود؛ چراکه تهی شدن مخزن بدون نیاز به دلیل دیگر موجب توقف تولید انرژی خواهد شد.

جدول ۴. محدودیت‌های مدل شبیه‌سازی تولید نیروگاه برقابی

ردیف	محدودیت	شرح محدودیت
۱	$S(t+1) = S(t) + Q(t) - R(t) - EVP(t)$	اصل بقای جرم در مخزن سد در گام زمانی t
۲	$S(T+1) = S(1)$	حجم مخزن در شروع گام جدید برابر حجم انتهایی گام قبلی
۳	$S(t) \leq S_{max}$	محدودیت‌های ذخیره آب در مخزن
۴	$S(t) \geq S_{min}$	محدودیت‌های ذخیره آب در مخزن
۵	$OPH(t) = Ndays(t) \times NPH$	ساعات پیک برابر ساعات پیک روزانه در تعداد روزهای ماه
۶	$OPE_{max}(t) = PPC \times OPH(t)$	انرژی پیک حداکثر بر حسب ظرفیت نصب
۷	$PPW(t) = \gamma \times R'(t) \times \overline{Hn}(t) \times e^{-\rho}$	رابطه محاسبه انرژی تولیدی بر حسب وزن خصوص آب، شدت جریان، متوسط هد مخزن و بازده توربین
۸	$PPE(t) = PPW(t) \times TH(t)$	انرژی تولیدی در کل ساعات
۷	$TH(t) = 24 \times Ndays(t)$	تعداد ساعات کل ماه t
۸	$OPE(t) = \text{Min}(OPE_{max}(t), PPE(t))$ $\text{if } R'(t) \geq Q_{min}$	انرژی پیک تولیدی واقعی
۹	$OPE(t) = 0 \quad \text{if } R'(t) < Q_{min}$	شرایط انرژی پیک تولیدی واقعی
۱۰	$R'(t) = \left(\frac{R(t) \times 10^6}{Ndays(t) \times 24 \times 3600} \right) \times \frac{24}{NPH}$	محاسبه شدت جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه
۱۱	$\overline{Hn}(t) = 0.5 (Hn(t) + Hn(t+1))$	هد نرمال متوسط (متر)
۱۲	$Hn(t) = f_1(S(t)) - H_{loss}$	هد نرمال بر حسب تابعی از حجم ذخیره و افت هد
۱۳	$Hdes = Hdes \quad \text{is given}$	هد طراحی (متر)
۱۴	$Qdes = Qdes \quad \text{is given}$	جریان طراحی (متر مکعب بر ثانیه)

ادامه جدول ۴

شرح محدودیت	محدودیت	ردیف
هد مینیمم برابر ضریب ثابت در هد طراحی	$H_{min} = C_1 \times H_{des}$	۱۵
جریان مینیمم برابر ضریب ثابت در جریان طراحی	$Q_{min} = \frac{C_2 \times Q_{des}}{NU}$	۱۶
هد ماکزیمم برابر ضریب ثابت در هد طراحی	$H_{max} = D_1 \times H_{des}$	۱۷
جریان ماکزیمم برابر ضریب ثابت در جریان طراحی	$Q_{max} = \frac{D_2 \times Q_{des}}{NU}$	۱۸
حجم تبخیر (میلیون متر مکعب)	$EVP(t) = \bar{A}(t) \times EV(t) \times K$	۱۹
سطح مخزن متوسط در زمان t (کیلو متر مربع)	$\bar{A}(t) = 0.5 (A(t) + A(t+1))$	۲۰
سطح مخزن بعنوان تابعی از حجم مخزن	$A(t) = f_1(S(t))$	۲۱
متغیرهای با مقادیر مثبت	$S, Q, R, EVP, EV, PPC, NPH > 0$ $R, R', H, H_{loss}, e, A, NU, H_{des}, Q_{des} > 0$	۲۲
ضرایب ثابت هد	$C_1, D_1 > 1$	۲۳
ضرایب ثابت دبی	$C_2, D_2 < 1$	۲۴
توابع حقیقی حجم - ارتفاع و حجم - سطح	f_1, f_2 real function	۲۵

توابع f_1 و f_2 ، توابع سطح - حجم ذخیره و ارتفاع-حجم ذخیره‌اند و از منحنی‌های مشخصه مخزن سد استخراج شده‌اند. این توابع به صورت توابع چندجمله‌ای و توانی تهیه شده‌اند. نظر به وجود برخی روابط غیرخطی در مدل ریاضی، لازم بود نرم افزار مناسبی که توانایی بهینه سازی مدل های خطی و غیرخطی را داشته باشد، شناسایی شود. نرم افزار Lingo دارای توانایی های لازم است. این نرم افزار توانایی تبادل داده‌ها به نرم افزار اکسل را نیز داراست. محدودیت‌های ورود آب به مخزن سد و آثار تغییر اقلیم در عوامل هیدرولوژیکی و نیز محدودیت‌های تقاضای انرژی در آینده از طریق داده‌هایی که در فایل‌های اکسل تهیه شده‌اند به مدل فراخوانی شد و مدل برای داده‌های ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ به‌ازای داده‌های ماهانه سناریوهای بارش، دما، تبخیر و جریان به اجرا درآمد. با توجه به مدل برآورد جریان (رابطه ۱)، جریان ماهانه پیشین اولیه برای محاسبه جریان در اولین گام، باید به مدل معرفی می‌شد. برای این منظور محاسبات از سال ۲۰۱۰ شروع شد و برای اولین جریان پیشین نیز مقدار واقعی ارائه شد. داده‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ برای بهبود نتایج مدل و کاهش آثار احتمالی آن‌ها، داده‌های اولیه در خروجی‌ها در نظر گرفته شده

و در تحلیل نتایج خروجی مدل، از همه مقادیر متغیرهای بهینه شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ چشم‌پوشی شده است. به‌عنوان داده‌ی مرزی مقادیر اولیه، به‌ویژه انتخاب جریان پیشین در مدل برآورد جریان می‌تواند نابسامانی‌های اولیه‌ای در نتایج مدل ایجاد کند. تأثیرات این اختلال بعد از چند گام محاسباتی بسیار کم می‌شود و عملاً از بین می‌رود. از این رو می‌توان نتایج برآوردی مدل را مستقل از انتخاب جریان پیشین اولیه دانست. بدین طریق با حاشیه‌ی اطمینان چندساله (تعداد ۶۰ ماه برای ۵ سال از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴) که به این روش ایجاد می‌شود، جریان پیشین اولیه برای شروع مدل هر چه انتخاب شود، تأثیرات آن در نتایج مدل بعد از ۶۰ گام کاملاً از بین می‌رود. مدل ریاضی تهیه‌شده در محیط نرم‌افزار Lingo پیاده‌شده و خلاصه‌ای از آن در جدول ۵ ارائه شده است. داده‌ها به فایل‌های اکسل وارد شد و خروجی بهینه‌سازی نیز به فایل اکسل ارسال گردید. تحلیل خروجی‌ها و تهیه‌ی منحنی‌ها و جدول‌ها با استفاده از فایل خروجی انجام گرفت. تمام عملیات بهینه‌سازی برای سه سناریوی شاخص (خوش‌بین‌ترین و بدبین‌ترین سناریو و سناریوی متوسط) انجام گرفت تا مقایسه‌ی تأثیر سناریوهای مختلف در تولید آینده‌ی نیروگاه امکان‌پذیر شود. متوسط کل سناریوها به دلیل اینکه به مقدار زیادی تغییرات مقادیر و عوامل هیدرولوژیکی و در نتیجه مقادیر جریان و تولید نیروگاه را مستهلک می‌کند (به دلیل میانگین‌گیری از مقادیر همه‌ی سناریوها) مورد استناد قرار نگرفته است. برای تهیه‌ی یک برنامه‌ی تولید آینده، استناد به سناریوی متوسط نتیجه‌ی مناسب‌تری ارائه خواهد کرد.

جدول ۵. مدل ریاضی بهینه‌سازی پیاده‌شده در محیط Lingo

MODEL:
 Sets:
 Period/1..1092/:PF,Tem,POP,Qin,Q,S,R,QR,H,Hn,HnBar,EV,EVP,A,AB,OPE,NPE,TE,
 Qop,Qexe,Qdef,ELR,ELT,Z,Ndays,P,PER;
 Endsets
 Data:
 a0,a1,a2,a3,a4=@OLE('GRAPHS.XLS','SHgraph')
 b0,b1,b2=@OLE('GRAPHS.XLS','QELTgraph')
 f0,f1,f2=@OLE('GRAPHS','Sagraph')
 Hdes,Qdes,Hloss,Smax,Smin=@OLE('Consts.xls','ResCons')
 NU,PPC,D1,D2,C1,C2=@OLE('Consts.xls','PlantCons')
 Gamma,e=@OLE('Consts.xls','PlantVars')
 M,K,K1=@OLE('Consts.xls','PhysicsCons')
 e,PER,tem,EV,Ndays,Qin=@ole('InputForLingo.xls','PTENQ');
 @ole('InputForLingo.xls','OutOptimization')=POP,Qin,Q,S,R,QR,H,HN,HNBAR,EV
 ,EVP,A,AB,OPE,NPE,TE,QOP,QEXE,QDEF,ELR,ELT,Z;

ادامه جدول ۵

```

TT = 1092;
Enddata

Min=@sum(Period(t):((POP(t)-PPC)^2/PPC^2));

Hmax=D1*Hdes;
Hmin=C1*Hdes;
Qmax=D2*Qdes;
Qmin=C2*Qdes;
@for(Period(t)|t#lt#TT:AB(t)=(A(t)+A(t+1))/2);
  AB(TT)=(A(1)+A(TT))/2;
@for(Period(t)|t#lt#TT: HnBar(t)=0.5*(Hn(t)+Hn(t+1)));
  HnBar(TT)=(Hn(1)+Hn(TT))/2;
@for(Period(t)|t#lt#TT:S(t+1)=S(t)+Q(t)-R(t)- EVP(t)+P(t));
  S(1)=S(TT)+Q(TT)-R(TT)- EVP(TT)+P(TT);
@for(Period(t):S(t)<=Smax;
  S(t)>=Smin);
@FOR(Period(t):
  Q(t)=Qin(t)*(3600*24*Ndays(t)/1000000));
@FOR(Period(t):
  A(t)=F0+F1*S(t)+F2*S(t)^2+F3*S(t)^3);
@FOR(Period(t): EVP(t)=AB(t)*EV(t)*K;
  P(t)=AB(t)*PER(t)*K*K1);
@FOR(Period(t):
  QR(t)=(R(t)*1000000)/(3600*24*Ndays(t));
  QR(t)=(Qop(t)-QDef(t))*PF(t) + Qexe(t);
@FOR(Period(t):
  Qexe(t)<=M*(Z(t));
  Qdef(t)<=Qop(t)*(1-Z(t));
@BIN(Z(t));
FOR(Period(t):POP(t)=(Gamma*(Qop(t)-QDef(t))*HnBar(t)*e)/1000000);
@FOR(Period(t):
  H(t)=ELR(t)-ELT(t);
  ELT(t)=b0+b1*QR(t)+b2*QR(t)^2;
  ELR(t)=a0 +a1*S(t)+a2*S(t)^2+a3*S(t)^3+a4*S(t)^4;
  Hn(t)=H(t)-Hloss;
  Qop(t)=(PPC*1000000)/(Gamma*HnBar(t)*e);
  OPE(t)=POP(t)*24*Ndays(t)*PF(t);
  NPE(t)=PPC*Qexe(t)*24*Ndays(t);
  TE(t)=OPE(t)+NPE(t);
@FOR(Period(t): POP(t)<=PPC;);

```

یافته‌های پژوهش

این بخش در دو قسمت اصلی زیر ارائه شده است:

- عملیات برآورد داده‌های ضروری برای بهینه‌سازی؛
- نتایج و یافته‌های بهینه‌سازی.

برآورد داده‌های مورد نیاز

استفاده از داده‌های واقعی در شبیه‌سازی، زمان‌بر و مستلزم جمع‌آوری داده‌های میدانی فراوان است. گاهی، به دلایلی مانند منحصر به فرد بودن یا نو بودن مورد شبیه‌سازی، همکاری نکردن افراد مسئول برای در اختیار گذاردن اطلاعات یا نبود زمان یا نیروی انسانی کافی برای جمع‌آوری داده در سطحی گسترده، ممکن است با داده‌هایی روبه‌رو شویم که از کیفیت، کمیت و تنوع کافی برخوردار نباشند و در نتیجه ممکن است برخی خصوصیت‌های دنیای واقعی در این داده‌های محدود، منعکس نشوند. در چنین شرایطی، اغلب به تخمین پارامترها توسط متخصصان یا خبرگان مجرب روی آورده می‌شود که با توجه به ماهیت تخمین، موجب پدید آمدن ذهنیت‌گرایی، ابهام و بی‌دقتی در تخمین پارامترها می‌شود (آدر، سقالرزاده و رجب‌زاده، ۱۳۹۱). برای پرهیز از این مشکل، داده‌های تاریخی عوامل هیدرولوژیکی که پایه‌تھیة مدل‌های لازم بودند، قبل از استفاده بررسی شده و به روش‌های مناسب تکمیل، صحت‌سنجی و همگن شدند (اکبریان اقدم، احمدوند و علیمحمدی، ۱۳۹۳).

نظر به تنوع عوامل مؤثر در تولید نیروگاه برقابی، داده‌های متنوعی ضروری است. تلاش شده است تا در هر گروه از متغیرهای مؤثر، آن‌هایی انتخاب و تأثیر داده شوند که بیشترین اثر را داشته‌اند و از متغیرهای کم‌اثرتر صرف‌نظر شد یا در قالب متغیر یا متغیرهای دیگر لحاظ شدند.

الف) داده‌های متأثر از تغییر اقلیم

کلیه مدل‌ها از داده‌های سی‌ساله تاریخی که ابتدا به روش‌های هیدرولوژیکی تکمیل شدند و ناهمگنی و نقایص آن‌ها رفع شد، تهیه شده‌اند. نتایج مدل‌های ماهانه تبخیر با داده‌های واقعی تبخیر، و نتایج مدل برآورد جریان رودخانه نیز با داده‌های واقعی جریان مقایسه شده‌اند (شکل ۲). داده‌های ۲۸ جفت سناریوی دما و بارش ماهانه، ابتدا با نرم‌افزار SDSM ریزمقیاس‌سازی شدند و پس از دسته‌بندی در گروه‌های یک‌شبکه‌ای، دوشبکه‌ای و چهارشبکه‌ای برای مطابقت مکانی از روش RGAM با حوضه آبریز کارون ۴ تطبیق مکانی یافتند. حاصل این کارها ۲۸ جفت سناریوی آینده برای دما و بارش ماهانه آینده حوضه است. با استفاده از سناریوهای دما، سناریوهای آینده تبخیر از مدل‌های ماهانه (جدول ۱) تولید شد. در نهایت از مدل جریان (رابطه

(۱) ۲۸ سناریوی آینده جریان ورودی به مخزن سد ساخته شد. چهار مجموعه سناریو به شرح زیر برای ادامه تحقیق تفکیک شدند:

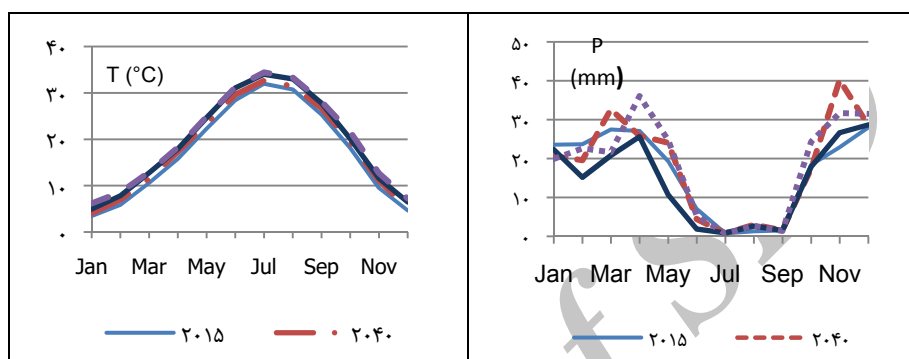
- سناریوهای ماهانه متوسط کل سناریوهای بارش، دما، تبخیر و جریان؛
 - بدبین ترین سناریوهای ماهانه بارش، دما، تبخیر و جریان؛
 - خوش بین ترین سناریوهای ماهانه بارش، دما، تبخیر و جریان؛
 - متعادل ترین سناریوهای ماهانه بارش، دما، تبخیر و جریان (سناریوی متوسط).
- الگوی ساخت یا انتخاب هریک از سناریوهای ذکر شده به قرار زیر بوده است:
- متوسط سناریوها میانگین کل سناریوها در ماه و سال مشخص است. مقادیر این سناریو دارای دامنه تغییرات اندک خواهد بود؛
 - سناریوی متوسط (متعادل) سناریویی است که مقادیر آن نزدیک ترین وضعیت را نسبت به میانگین همه سناریوها داشته باشد؛
 - سناریوی بدبین یا بدبین ترین آن ها سناریویی است که کمترین بارش، بیشترین دما، بیشترین تبخیر و کمترین جریان را در یک ماه مشخص برآورد می کند؛
 - سناریوی خوش بین یا خوش بین ترین آن ها سناریویی است که بیشترین بارش، کمترین دما، کمترین تبخیر و بیشترین جریان را در یک ماه مشخص برآورد می کند (جدول ۶).

جدول ۶. مشخصات خوش بین ترین و بدبین ترین سناریوها و مدل های انتشار آنها

نوع سناریو	سری	سناریو	سناریوی انتشار
خوش بین ترین	AR4 (2007)	HADGEM 1 (Run 1)	SR-A1B
بدبین ترین	AR4 (2007)	NCARCCSM3 (Mean)	SR-A1B
متعادل ترین (متوسط)	AR4 (2007)	INGV-SXG (Run 1)	SR-A1B

اگر سده حاضر را به دوره های (۲۰۱۵-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۷۱) و (۲۰۷۱-۲۰۷۱) تقسیم کنیم، تحلیل سناریوهای متوسط ماهانه دما و بارش نشان می دهد با وجود روند افزایشی دما از ۲۰۱۵ و در انتهای دوره های منتهی به ۲۰۴۰، ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ (شکل ۳)، بارش تا دوره دوم روند کاهشی دارد، ولی در دوره سی ساله آخر مقداری روند افزایشی پیدا می کند. به طور کلی می توان گفت افزایش دما در ماه های گرم بیشتر از فصول سرد است، به این معنا که ماه های گرم، گرم تر خواهند شد که این خود به نحوی سبب افزایش مصرف آب و انرژی در فصول گرم می شود.

براساس تحقیقاتی در آمریکا، این نوع تأثیرگذاری حدی تغییر اقلیم در اکثر مناطق جهان نمود می‌یابد و پذیرفته شده است که آثار تغییر اقلیم به صورت تأثیر حدی است (ماریون، اوو سینتیا و مدنی، ۲۰۱۴). در کشور ما نیز انتظار می‌رود در حالت کلی مناطق گرم، گرم‌تر و مناطق سرد، سردتر شوند.

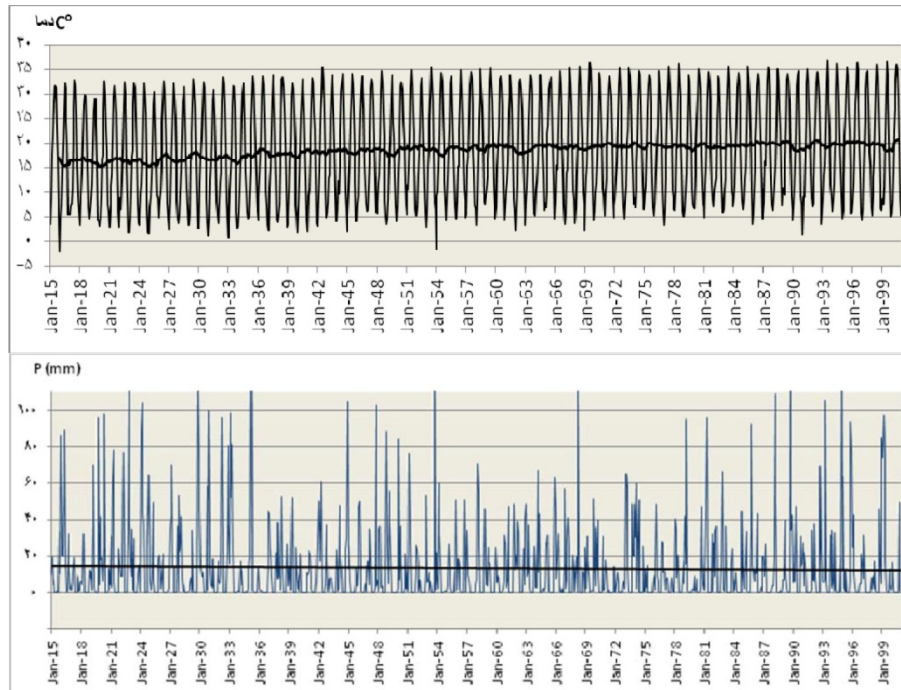


شکل ۳. تغییرات بارش (راست) و دمای ماهانه (چپ) متوسط سناریوها

در تحقیق بزرگ حداد و احمدی (۱۳۹۲) با ریزمقیاس‌سازی داده‌های دما و بارش، نشان داده شد که دمای حوضه در دوره‌های ۲۰۲۵-۲۰۳۹، ۲۰۵۵-۲۰۶۹ و ۲۰۸۵-۲۰۹۹ به ترتیب حدود ۱/۳۵، ۱/۴۵ و ۲/۲۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. این افزایش در فصل زمستان برای سه دوره به ترتیب ۰/۸، ۱/۳۸ و ۱/۴۲، در فصل بهار به ترتیب ۲/۱۲، ۰/۹۲ و ۳/۰۲ در فصل تابستان به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۸۹ و ۲/۴۵ و در نهایت در فصل پاییز به ترتیب ۱/۱۰، ۱/۵۸ و ۱/۹۲ درجه سانتی‌گراد است. این نتایج با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد.

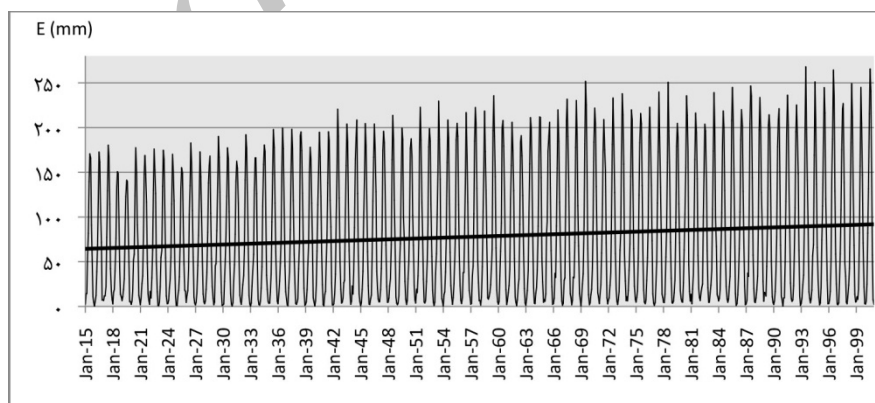
برحسب نتایج تحقیق مذکور در دوره‌های آتی شاهد کاهش بارش به طور متوسط به میزان ۱۸ درصد برای دوره ۲۰۲۵-۲۰۳۹، ۰/۴ درصد برای ۲۰۵۵-۲۰۶۹ و ۳۰ درصد برای دوره ۲۰۸۵-۲۰۹۹ خواهیم بود. در این میان تنها در فصل‌های زمستان و بهار دوره آتی ۲۰۵۵-۲۰۶۹ اندکی افزایش بارش نشان داده شده است و در دیگر فصول سایر دوره‌ها کاهش بارش نسبت به دوره پایه ملاحظه می‌شود. نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های مذکور مطابقت دارد.

در شکل ۴ (بالا) تغییرات دمای ماهانه و میانگین متحرک ۱۲ ماهه آن و در شکل ۴ (پایین) تغییرات بارش ماهانه و روند کاهشی آن از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی متوسط نشان داده شده است.



شکل ۴. تغییرات دمای ماهانه (بالا) و بارش ماهانه (پایین) سناریوی متوسط

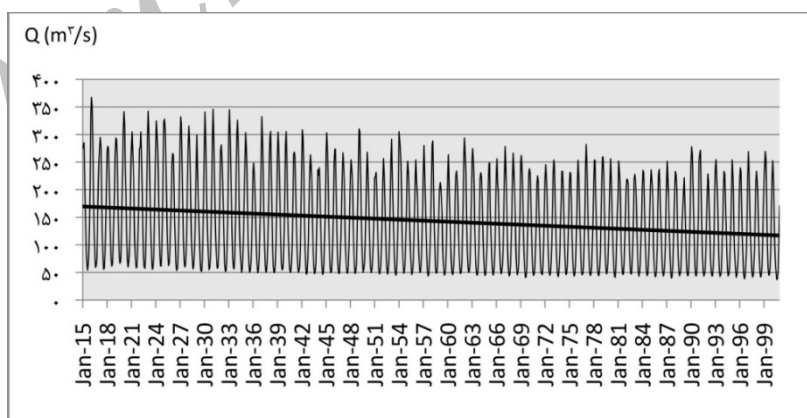
روند افزایشی تبخیر ماهانه نیز توسط سناریوی متوسط در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس برآورد سناریوی متوسط تبخیر کاهش حدود ۳۵ درصدی در طول سال‌های آینده خواهد داشت. متوسط کل سناریوها این کاهش را به‌طور متوسط حدود ۲۶ درصد برآورد می‌کند که پذیرفتنی‌تر است.



شکل ۵. تغییرات تبخیر ماهانه سناریوی متوسط و روند افزایشی آن

جریان ماهانه نیز بر حسب سناریوی متوسط دارای تغییراتی طبق شکل ۶ خواهد داشت. مطابق نتایج سناریوها، میانگین جریان ماهانه ورودی به مخزن سد در طول ۸۶ سال آینده به طور متوسط ۱۳/۵ درصد کاهش خواهد داشت و حدود این کاهش از ۴/۴ درصد تا ۱۹/۲ درصد نسبت به متوسط جریان در قبل خواهد بود. حدود اطمینان ۹۵ درصد جریان ماهانه آینده به استناد داده‌های سناریوها و تابع توزیع احتمال آن‌ها، برای هر یک از ماه‌ها محاسبه شده و در جدول ۷ نشان داده شده است. بر حسب برآورد سناریوها، متوسط جریان در ماه سپتامبر با اطمینان ۹۵ درصد و خطای ۵ درصد بین ۴۸/۲۹ و ۵۶/۴۴ متر مکعب در ثانیه، کمترین جریان متوسط ماهانه خواهد بود. بیشترین جریان ماهانه نیز مربوط به ماه فوریه با اطمینان ۹۵ درصد بین ۲۳۸/۶۵ و ۲۷۹/۷۶ متر مکعب در ثانیه است.

بر حسب سناریوی متوسط، جریان سالانه نیز در دوره‌های سی‌ساله به ترتیب ۱۴۱/۸، ۱۵۷/۳ و ۱۲۶/۶ متر مکعب در ثانیه خواهد بود. میزان کاهش جریان سالانه در دوره‌های مذکور به ترتیب ۳/۳، ۱۰/۴۶ و ۱۱/۳ درصد خواهد بود. این عامل برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ برابر ۱۰/۸ درصد خواهد بود. سناریوی بدبین کاهش جریان در طول کل دوره را بالغ بر ۲۸ درصد ارائه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی رواناب تحقیق پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در دوره‌های آتی، حاکی از کاهش رواناب ورودی به مخزن کارون ۴ در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه است؛ در حال که در دوره ۲۰۵۵-۲۰۶۹ در مقایسه با دوره ۲۰۲۵-۲۰۳۹ کاهش کمتری نسبت به دوره پایه شاهد خواهیم بود. این کاهش‌ها در دوره ۲۰۲۵-۲۰۳۹ برابر ۳۷ درصد و برای دوره ۲۰۵۵-۲۰۶۹ برابر ۱۹ درصد خواهد بود. نتایج تحقیق مذکور با یافته‌های تحقیق حاضر در حالت سناریوهای بدبین تطابق دارند.



شکل ۶. تغییرات جریان ماهانه سناریوی متوسط و روند کاهشی آن

جدول ۷. حدود بازه اطمینان ۹۵ درصد جریان ماهانه آینده

ماه	میانگین جریان	بازه اطمینان ۹۵٪	
		حد پایین	حد بالا
Jan	۲۲۱/۵۳	۲۰۰/۰۱	۲۴۳/۰۵
Feb	۲۵۹/۲۱	۲۳۸/۶۵	۲۷۹/۷۶
Mar	۲۴۹/۷۵	۲۳۴/۴۲	۲۶۵/۰۸
Apr	۲۰۸/۲۸	۱۹۳/۹۰	۲۲۲/۶۶
May	۱۵۴/۳۰	۱۳۹/۱۳	۱۶۹/۴۸
Jun	۱۰۴/۰۶	۹۰/۴۰	۱۱۷/۷۳
Jul	۷۱/۰۲	۶۱/۱۸	۸۰/۸۶
Aug	۵۴/۴۴	۴۸/۷۶	۶۰/۱۲
Sep	۵۲/۳۶	۴۸/۲۹	۵۶/۴۴
Oct	۶۴/۸۹	۵۹/۱۸	۷۰/۶۰
Nov	۹۸/۷۷	۸۸/۶۹	۱۰۸/۸۴
Dec	۱۵۶/۱۳	۱۳۹/۶۰	۱۷۲/۶۶

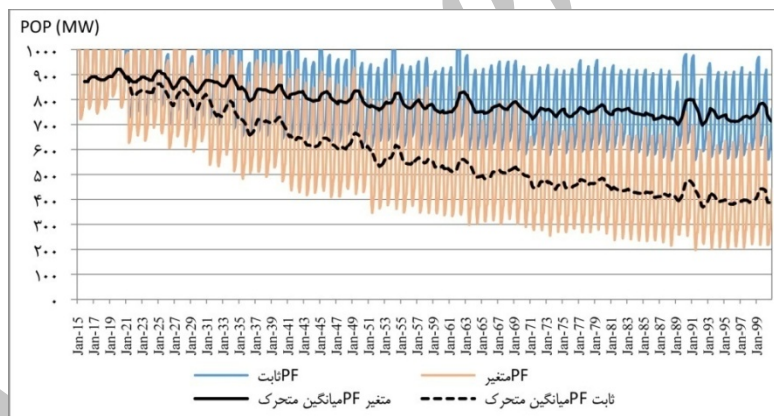
ب) داده‌های ثابت و متغیر نیروگاه

علاوه بر داده‌ها و مشخصات ثابت نیروگاه که برخی از آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است، برخی ویژگی‌های دیگر نیز در بهینه‌سازی تولید دخالت مستقیم دارند. از جمله آن‌ها می‌توان به ضریب بار نیروگاهی (PE=Plant Factor) که بسته به میزان نیاز حضور نیروگاه در شبکه برق کشور ممکن است تغییر یابد، منحنی‌های مشخصه توربین‌ها، لوله آب‌بر و پمپ‌ها اشاره کرد. PF از عوامل مهم تقاضای انرژی شمرده می‌شود که نیازمند مدیریت مناسب است. مقدار آن از ۰/۲ تا ۰/۲۵ تغییر یافته و احتمال افزایش مستمر آن در سال‌های آتی به دلیل نیاز روزافزون به انرژی برقی وجود دارد. در مدل ارائه شده ضریب بار نیروگاهی برای هر ماه متغیر جداگانه در نظر گرفته شده است که می‌توان مقدار ثابت یا متغیر برای آن در نظر گرفت. این ضریب به طور معمول در فصل گرما مقداری بیشتر از فصول سردتر دارد. با توجه به تغییرات اجتناب‌ناپذیر اقلیم و آثار سوء آن در مصرف انرژی و تولید انرژی، مدیریت اعمال این ضریب در به‌کارگیری نیروگاه‌های برقی می‌تواند در ایجاد تعادل بیشتر در تولید و توزیع انرژی تأثیر داشته باشد. مشخصات مخزن سد از جمله منحنی‌ها، برای سهولت انتقال به مدل به روابط ریاضی تبدیل شده‌اند. در شکل ۷ سناریوی تولید بهینه نیروگاه تحت سناریوی متوسط عوامل و میانگین متحرک دوازده‌ماهه در

شرایط PF ثابت و PF با تغییرات به صورت جدول ۸ ارائه شده است. روند تغییرات کاهشی تولید در سرتاسر سال‌ها مشاهده می‌شود. از نیمه سی ساله سوم تولید روند افزایشی نسبی پیدا می‌کند.

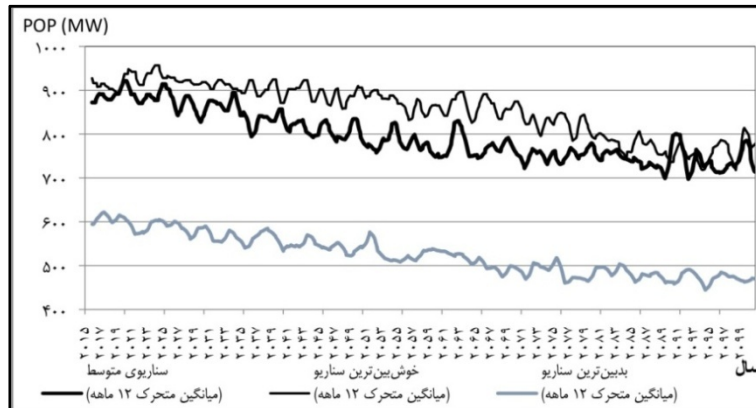
جدول ۸. مقادیر انتخابی PF

حدود زمانی	PF
۲۰۱۵-۲۰۲۰	۰/۲
۲۰۲۱-۲۰۳۰	۰/۲۲۵
۲۰۳۱-۲۰۴۰	۰/۲۵
۲۰۴۱-۲۰۵۰	۰/۲۷۵
۲۰۵۱-۲۰۶۰	۰/۳
۲۰۶۱-۲۰۷۰	۰/۳۲۵
۲۰۷۱-۲۰۸۰	۰/۳۵
۲۰۸۱-۲۰۹۰	۰/۳۷۵
۲۰۹۱-۲۱۰۰	۰/۴

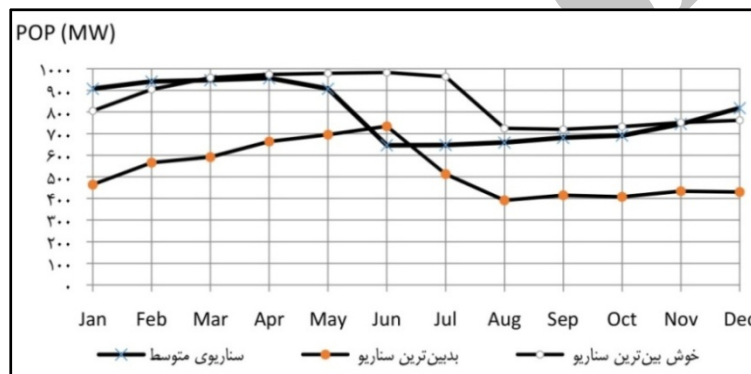


شکل ۷. سناریوی متوسط تولید بهینه و میانگین متحرک ۱۲ ماهه (PF ثابت و PF متغیر)

در شکل ۸ میانگین متحرک سناریوهای تولید بهینه تحت سه سناریوی خوش بین‌ترین، بدبین‌ترین و متوسط برای PF ثابت ۰/۲ برای مقایسه ارائه شده است. تولید بهینه انرژی در ماه‌های مختلف سال بر حسب سناریوها دارای تغییراتی است که در شکل ۹ ارائه شده است. تمام سناریوها در فصل تابستان و ماه‌های گرم تولید کمتری پیش‌بینی می‌نمایند. سناریوی خوش‌بین در ماه‌های فصل بهار حداکثر تولید را برآورد می‌کند، درحالی‌که سناریوی متوسط در طول ماه‌های فوریه، مارس و آوریل تولید زیاد را برآورد می‌کند.



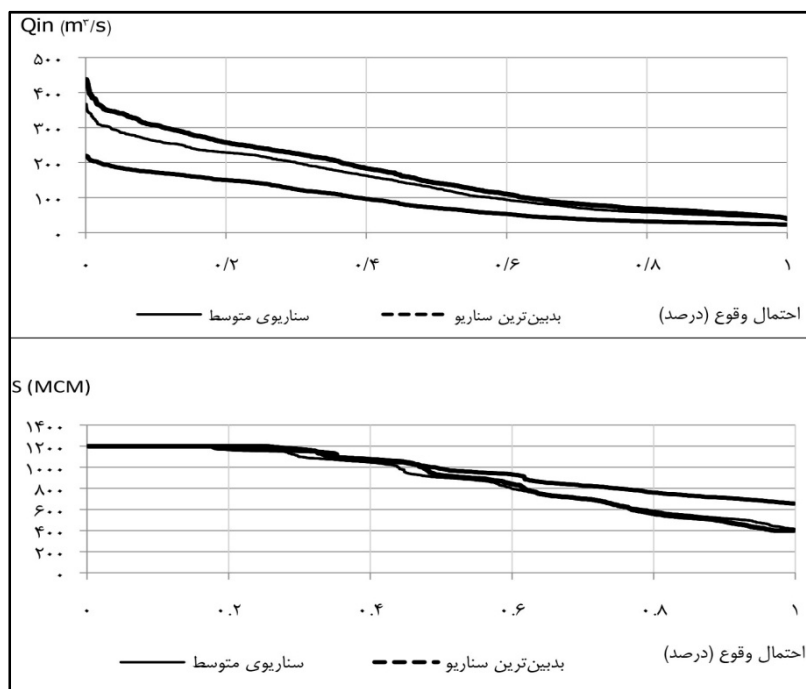
شکل ۸. میانگین متحرک ۱۲ ماهه سناریوهای تولید انرژی بهینه

شکل ۹. تولید بهینه انرژی ماهانه آینده برحسب سناریوی متوسط تولید انرژی ($PF=0.2$)

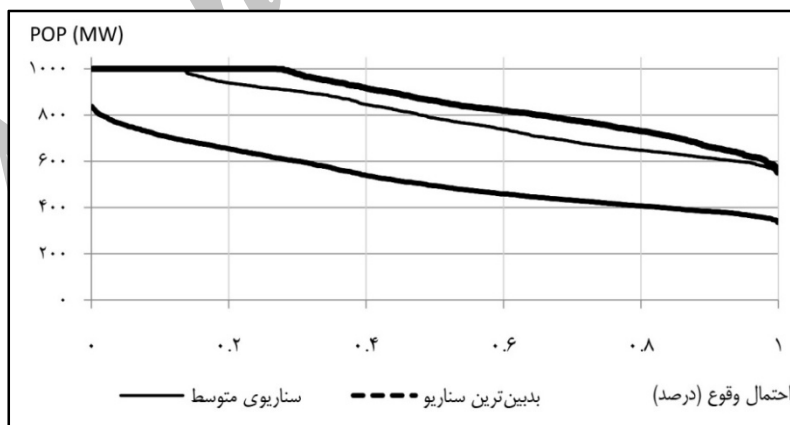
در شکل ۱۰ منحنی‌های تداوم جریان ورودی به مخزن سد (شکل بالا) و حجم مخزن (پایین)، مربوط به سناریوهای سه‌گانه ارائه شده است. برحسب سناریوی متوسط در ۵۰ درصد اوقات جریان ۱۳۰ مترمکعب در ثانیه یا بیشتر به مخزن وارد می‌شود. در حالی که این مقدار در سناریوهای خوش‌بین و بدبین به ترتیب ۱۴۴ و ۶۸ متر مکعب در ثانیه است.

در شکل ۱۱ نیز منحنی‌های تداوم تولید انرژی به ازای PF ثابت برابر 0.2 ارائه شده است. تنظیم مناسب PF در راستای ایجاد توازن بین نیاز به انرژی برقی و توان تولید آن در نیروگاه می‌تواند در تداوم تولید و توزیع مناسب آن کارساز باشد. برای PF ثابت 0.2 یعنی حدود ۵ ساعت به کارگیری نیروگاه در شبانه‌روز، برحسب سناریوی خوش‌بین در حدود ۳۰ درصد اوقات تولید به مقدار اسمی ۱۰۰۰ مگا وات می‌رسد. در صورتی که سناریوی بدبین حداکثر تولید را در هیچ زمانی

بیشتر از ۸۴۰ مگاوات پیش‌بینی نمی‌کند. بر حسب سناریوی متوسط نیز در ۹۰ درصد اوقات تولید انرژی ۶۰۰ مگاوات یا بیشتر است. با افزایش PF مقادیر کاهش می‌یابند.



شکل ۱۰. منحنی‌های تداوم جریان (بالا) و تداوم حجم ذخیره مخزن (پایین) در آینده



شکل ۱۱. منحنی‌های تداوم تولید بهینه انرژی آینده بر حسب سناریوی متوسط و $PF=0.2$

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پدیده تغییر اقلیم به‌عنوان یک پدیده اجتناب‌ناپذیر که آثار آن هم‌اکنون نیز در کشور مشهود است، گاه تأثیرات نامطلوبی بر تمامی ارکان زندگی مردم کشور از جمله انرژی و صنایع خواهد داشت. پیش‌بینی و کسب آمادگی برای مقابله با آن و مدیریت وضعیت جدید می‌تواند از چالش‌های احتمالی آینده جلوگیری کند. نیاز به تولید انرژی روزافزون یکی از مقولات مهم است که بیشتر تحت تأثیر این پدیده است. به‌ویژه انرژی برقایی که وابستگی قوی و مستقیم به منابع آبی دارد باید در این زمینه بیشتر در نظر گرفته شود. این تحقیق نشان داده است در آینده حتی در خوش‌بینانه‌ترین حالت، به‌طور متوسط با ۲۰ درصد کاهش تولید انرژی برقایی مواجه خواهیم بود. این کاهش بین ۱۲ تا ۴۶ درصد متغیر خواهد بود. بهینه‌سازی تولید انرژی برقایی نشان می‌دهد در ۱۰ سال انتهایی دوره قرن حاضر (۲۰۹۰-۲۱۰۰) متوسط تولید ۷۲۰ مگاوات، در ۳۰ سال آخر دوره ۷۳۵ مگاوات و متوسط کل ۸۶ سال (از ۲۰۱۵ تا ۲۰۹۹) ۸۰۰/۶ مگاوات خواهد بود. در انتهای سال ۲۱۰۰، حدود ۷۰۰ مگاوات به‌جای ۱۰۰۰ مگاوات فعلی تولید خواهد شد. جریان مازاد در رودخانه و در نتیجه تولید مازاد انرژی برقایی تنها در برخی از ماه‌های ۳۰ سال اول دوره به‌وجود می‌آید و در سال‌های بعد همواره کمبود تولید وجود خواهد داشت. بهینه‌سازی با به‌کارگیری مقادیر سناریوهای دما و بارش (ریز‌مقیاس‌سازی‌شده و مطابقت مکانی یافته)، تبخیر (حاصل استفاده از مدل‌های ماهانه دما-تبخیر) و جریان (حاصل مدل‌های چندمتغیره جریان) و همچنین لحاظ شرایط و محدودیت‌های متعدد اقلیمی، نیروگاهی و نیاز آینده به انرژی با مدل ریاضی پیاده‌شده در محیط Lingo انجام پذیرفته است. مدل به‌صورت متوالی ماهانه برای ۸۶ سال اجرا شده و ضریب PE در دو حالت ثابت برابر ۰/۲ و متغیر با افزایش تدریجی و بطئی در هر ۱۰ سال در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند به‌طور متوسط به‌ازای افزایش نسبی ۶۷ درصدی PF (از ۰/۲ تا ۰/۴) در سال‌های آینده، میزان تولید بهینه انرژی تا ۷۴ درصد کاهش خواهد یافت. مدیریت مناسب برای تولید انرژی با تنظیم ضریب بار نیروگاهی PF می‌تواند هماهنگی لازم تقاضا و توان تولید را به‌وجود آورد. اگر مقدار PF ثابت و برابر ۰/۲ انتخاب شود، در طول سده میلادی جاری که به‌طور متوسط کاهش جریان ۱۱ درصدی، افزایش تبخیر ۲۶ درصدی، کاهش بارش ۱۷ درصدی و افزایش دمای ۲۳ درصدی وجود خواهد داشت، کاهش متوسط ۲۰ درصدی را در تولید انرژی برقایی ایجاد خواهد کرد.

عامل PF را می‌توان پارامتری دانست که مدیریت استفاده از انرژی برقایی در طول شبانه‌روز و در طول ماه و سال را منعکس می‌کند که می‌توان با ایجاد روابط یا منحنی‌های خاص تغییرات آن

را در مدل بهینه‌سازی مدیریت و بدین وسیله نتایج بهینه‌سازی را مشاهده کرد که در نتیجه آن، توان تولید پیش‌بینی و مدیریت می‌شود. این کار می‌تواند یکی از موارد ادامه تحقیق حاضر در آینده باشد. موضوع بررسی نیاز به تداوم کار توربین‌های نیروگاه یا احیاناً نصب توربین‌های جدید یا از دور خارج کردن برخی از توربین‌های موجود و نیز به‌کارگیری ترجیحی پاره‌وقت توربین‌ها، همگی با مشاهده میزان توان تولید انرژی نیروگاه در آینده و با مانور دادن روی مقادیر PF، از کاربردهای تحقیق حاضر است.

References

- Akbarian Aghdam A., Ahmadvand A. & Alimohammadi S. (2014). Future Surface Water Resources Sensitivity to Climate Changes Impacts. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering*, 18(2):1-10.
- Ansari S. (2011). Climate Change Impact on Hydropower Generation. MSc. thesis, Sharif University of Technology. (in Persian)
- Azar A., Saggalarzade S. & Rajabzade A. (2012). Fuzzy Simulation in Uncertain Circumstances. *Journal of Industrial Management*, University of Tehran Faculty of Management; 4(2); 1-20. (in Persian)
- Bozorg Haddad A. & Ahmadi M. (2013). Assessing the impact of climate change on runoff in upstream Karun in future periods. *5th Water Resources Management*, Tehran, Iran. (in Persian)
- Cateni A., Magri L. & Grego G. (2008). Optimization Of Hydro Power Plants Performance Importance Of Rehabilitation And Maintenance In Particular For The Runner Profiles. *7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements*. Milan, Italy.
- Farajzadeh M. (2013). Climate Change Effects on River Discharge-Case Study Sheshpir River. *Geography and Environmental Planning Journal*; <http://uijs.ui.ac.ir/gep> ; 49(1). (in Persian)
- Harrison G. P. (2001). An Assessment of the Impact of Climate Change on Hydro electric Power. Phd thesis. EDINBURGH University.
- Iran Power & Water Resources Co. Karun 4 Project Basic Information. (2014). <http://fa.iwpc.ir/karun4/default.aspx>. (Assessed: August 12, 2014). (in Persian)
- Liagati H. (2014). *Seminar on climate change and its impacts on natural ecosystems*. Shahid Beheshti University. <http://sbu.ac.ir/Lists/News/DispForm.aspx?ID=13463>. (in Persian)

- Marion G., Uvo Cintia B. & Madani K. (2014). Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. *Journal of Hydrology*, 42; 261-271.
- Moosavi Aharjani P., Gaderi S.F. & Azadeh M. (2007). Simulation of industrial electricity demand with the use of dynamic system. *Journal of Technical Faculty*, University of Tehran; 41(7); 943-9. (in Persian)
- Nguyen C., McGregor J. L. & Guobin F. (2010). A comparison of multi-site daily rainfall downscaling techniques under Australian conditions. *Journal of Hydrology*. 408(1-2): 1-18
- Ospina Noreña J. E., Gay García C., Conde A. C., Sánchez G. & Torres Esqueda S. (2011). Water availability as a limiting factor and optimization of hydropower generation as an adaptation strategy to climate change in the Sinú-Caribe river basin; *Atmósfera*. 24 no.2 México abr.
- Pooralihosein SH. & Bavani M. (2013). Risk analysis and assessment of impacts of climate change on temperature and precipitation of East Azerbaijan in 2013-2022. *Journal of the Earth and Space Physics*; 30(4):191-208. (in Persian)
- Razavi S.M., Arasti M., Jafari A. & Mokhtarzadeh N. (2012). Developing a Model for Technology Planning at Industry Level. *Journal of Industrial Management*, University of Tehran Faculty of Management; 4(2); 43-68. (in Persian)
- Shu-Hua C., Lin-Lin P., Dan C., Mei-Ying L., Quinn H., Ming-Hua Z., Yubao L. & Jianzhong W. (2010). Influences of climate change on California and Nevada regions revealed by a high-resolution dynamical downscaling study. *Clim Dyn* 37:2005-2020 DOI 10.1007/s00382-010-0961-5.
- Thatcher M., McGregor J.L., Katzfey J.J. & Nguyen K.C. (2011). Dynamical downscaling techniques: Impacts on regional climate change signals. Proceedings, World IMACS/MODSIM Congress, Cairns.U.S. Department of the Interior. (2005). *Managing water in the west* Water Resources Office, Washington DC.
- Yilmaz A. G. & Imteaz M. A., Impact of climate change on runoff in the upper part of the Euphrates basin. *Hydrological Sciences Journal*; DOI:10.1080/02626667.2011.609173; 56(7); 1265-1279.