

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقابی نیروگاه بختیاری

نگارنده: الناز میرزائی

اساتید راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر سعید گلیان

استاد مشاور

دکتر سعید جمالی

بہمن ۹۶

شماره: ۹۶/۲۱۹/ت  
تاریخ: ۹۶/۱۲/۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای .....الناز میرزایی.....  
 با شماره دانشجویی.....۹۳۱۷۰۴۴..... رشته .....عمران..... گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب.....  
 تحت عنوان ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقایی نیروگاه بختیاری که در تاریخ  
 .....۹۶/۱۱/۰۳..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل  
 اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ..... درجه .....)

مردود  عملی  نظری

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر احمد احمدی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد یار	دکتر سعید گلپیان	۲- استاد راهنمای دوم
	استاد یار	دکتر سعید جمالی	۳- استاد مشاور
	استاد یار	دکتر مهدی گلی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد یار	دکتر مهدی عجمی	۵- استاد ممتحن اول
	استاد یار	دکتر رمضان واقعی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشکده مهندسی شاهرود

تبره: در صورتی که نتوانستیم به صورت حضوری در مدت مجاز تحصیل می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

## تقدیم‌نامه

سر تا پایم را خلاصه کنند می‌شوم "مشتی خاک"، بی اغراق فقط مشتی خاک

که ممکن بود "خشتی" باشد در دیوار یک خانه...

یا "سنگی" در دامن یک کوه...

شاید "خاکی" از گلدان یا حتی "غباری" بر پنجره...

اما مرا از این میان برگزیدند

برای "نهایت" برای "شرافت" برای "انسانیت" برای آدم بودن و پروردگارم بزرگوارانه اجازه‌ام داد

و ارزنده‌ام کرد بابت نفسی که در من دمید

من منتخب گشته‌ام

پس تقدیم به خداوندی که مرا برگزید

و آنان که عشقشان را در وجودم دمید...

تقدیم به پدر و مادر و برادر عزیزتر از جانم.

## سپاس گزاری

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمون مان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

پس از ارادت خاضعانه به درگاه پروردگار بی همتا، لازم است از اساتید ارجمند آقایان دکتر احمد احمدی و دکتر سعید گلیان به خاطر سعه صدر و رهنمودهای دلسوزانه شان که در تهیه این تحقیق مرا مورد لطف خود قرار دادند و راهنمایی های لازم را نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین با تشکر فراوان از استاد گرامی جناب آقای دکتر سعید جمالی که با قبول زحمت مشاوره و کمک در جمع آوری منابع مرا در انجام این کار یاری داده اند.

با تقدیر و درود بی شمار از اساتید بزرگوار جناب آقایان دکتر مهدی عجمی و دکتر رمضان واقعی که با لطف بی دریغشان زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند.

از کارشناسان محترم دانشکده عمران خانم مهندس کیوانلو، آقای مهندس محمدی و آقای مهندس خسروی به خاطر کمک های بی دریغشان سپاسگزارم.

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند؛ باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## تعهدنامه

اینجانب **الناز میرزائی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقایی نیروگاه بختیاری** تحت راهنمایی دکتر **احمد احمدی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در دهه‌های اخیر، با آشکارتر شدن شواهد تغییر اقلیم، نگرانی‌های پیرامون برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آبی در مقابله با این شرایط جدید افزایش یافته است. افزایش این نگرانی‌ها منجر به انجام پژوهش‌های فراوانی در زمینه ارزیابی شدت پیامدهای نامطلوب ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آبی شده است. تغییر میزان رواناب ورودی به مخازن سدهای برقابی از جمله این پیامدهای نامطلوب می‌باشد. با استناد به گزارش‌های جهانی در حدود ۱۶ درصد برق تولیدی جهان و همچنین ۷۰ درصد انرژی الکتریکی تجدیدپذیر تولیدی دنیا، از انرژی برقابی تامین می‌شود. مزایای بسیار زیاد تولید انرژی برقابی از جمله هزینه بسیار اندک آن و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، این منبع را به یکی از منابع تولید انرژی محبوب در سراسر جهان تبدیل کرده است. از اینرو ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های تولیدکننده انرژی برقابی در مواجهه با پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم امری ضروری است. در این پژوهش حوضه سد بختیاری و سیستم مخزن برقابی آن مورد مطالعه قرار گرفته و میزان تاثیر پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقابی مورد انتظار از نیروگاه برقابی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور در نظر داشتن عدم قطعیت‌های محتمل، دو سناریوی اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از یک روش آماری و بهره‌گیری از نرم‌افزار SDSM4.2، داده‌های بزرگ-مقیاس حاصل از اجرای مدل گردش عمومی CANESM2 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 و تحت افق زمانی کوتاه مدت ۲۰۲۰-۲۰۴۰ ریزمقیاس شده و به کمک مدل بارش-رواناب HEC-HMS، میزان رواناب ورودی به مخزن سد بختیاری محاسبه گردید. پس از آن با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی جامع منابع آب کل حوضه، اثرات ناشی از تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد و متعاقباً انرژی تولیدی نیروگاه برقابی بختیاری تحت هر دو سناریو بررسی شد. با بررسی کل نتایج بدست آمده از پژوهش مشخص می‌گردد که در افق زمانی موردنظر میزان کاهش انرژی تولیدی نیروگاه برقابی تحت هر دو سناریو به میزان چشمگیری می‌باشد. بنابراین می‌توان با بروزرسانی قواعد

بهره‌برداری مخزن و همچنین در نظر گرفتن پیامدهای تغییر اقلیم اثرات نامطلوب تغییر اقلیم را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

**واژگان کلیدی:** انرژی برقایی، تغییر اقلیم، مدل بارش-رواناب، ریزمقیاس‌سازی، نیروگاه بختیاری



## فهرست عنوان‌ها

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- انرژی برقابی.....	۳
۳-۱- تغییر اقلیم.....	۶
۱-۳-۱- عوامل اقلیمی.....	۶
۲-۳-۱- پدیده تغییر اقلیم.....	۸
۳-۳-۱- علل بروز پدیده تغییر اقلیم.....	۸
۴-۳-۱- تاثیرات پدیده تغییر اقلیم.....	۱۰
۴-۱- هدف از انجام تحقیق.....	۱۲
۵-۱- اهداف کلی پایان‌نامه.....	۱۲
۶-۱- ساختار کلی پایان‌نامه.....	۱۲
فصل دوم: پیشینه و سابقه تحقیق.....	۱۵
۲-۲- پژوهش‌های انجام‌شده در سراسر جهان.....	۱۶
۳-۲- پژوهش‌های انجام‌شده در کشور ایران.....	۲۱
۴-۲- جمع‌بندی.....	۲۲
فصل سوم: مواد و روش‌ها.....	۲۳
۱-۳- مقدمه.....	۲۴
۲-۳- آشکارسازی اثرات تغییر اقلیم.....	۲۵
۱-۲-۳- مدل‌های گردش عمومی جو.....	۲۶
۲-۲-۳- سناریوهای انتشار.....	۲۷

۳۱	۳-۳- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گردش عمومی جو.....
۳۴	۳-۳-۱- مدل SDSM.....
۳۹	۳-۴- شبیه‌سازی میزان رواناب به کمک مدل HEC-HMS.....
۳۹	۳-۴-۱- مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژیکی.....
۴۳	۳-۴-۲- مدل‌ساز هیدرولوژیکی HEC-GeoHMS.....
۴۳	۳-۴-۳- مدل بارش-رواناب HEC-HMS.....
۵۴	۳-۵- نحوه محاسبه میزان انرژی برقابی تولیدی نیروگاه.....
۵۷	۳-۶- معیارهای عملکردی.....
۵۸	۳-۷- منطقه مورد مطالعه.....
۵۸	۳-۷-۱- سد بختیاری.....
۶۰	۳-۷-۲- ایستگاه‌های دماسنجی و تبخیرسنجی.....
۶۰	۳-۷-۳- ایستگاه‌های باران‌سنجی.....
۶۱	۳-۷-۴- ایستگاه‌های آب‌سنجی.....
۶۳	<b>فصل چهارم: نتایج.....</b>
۶۴	۴-۱- مقدمه.....
۶۴	۴-۲- نتایج ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی حوضه بختیاری.....
۶۴	۴-۲-۱- پیش‌بینی تغییرات دما.....
۶۸	۴-۲-۲- پیش‌بینی تغییرات بارش.....
۷۰	۴-۳- واسنجی مدل HEC-HMS.....
۷۵	۴-۴- صحت‌سنجی مدل HEC-HMS.....
۷۷	۴-۵- پیش‌بینی میزان رواناب ورودی به مخزن.....
۸۲	۴-۶- جمع‌بندی.....
۸۳	<b>فصل پنجم: نتیجه‌گیری.....</b>

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۸۵

۵-۲- پیشنهادها برای مطالعات آتی..... ۸۵

مراجع..... ۸۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمودار توزیع پتانسیل نیروی برقابی در نواحی مختلف دنیا..... ۴
- شکل ۲-۱: سهم تولید انرژی برقابی تعدادی از کشورها در سال ۲۰۱۶..... ۵
- شکل ۳-۱: ساختار کلی پژوهش..... ۵
- شکل ۲-۳: تغییرات متوسط میزان بارش در سراسر جهان تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵..... ۳۱
- شکل ۳-۳: طرح رویکرد کلی ریزمقیاس‌نمایی (قاله‌ری، ۱۳۹۳)..... ۳۲
- شکل ۴-۳: تولید سناریوی اقلیمی توسط مدل SDSM (قاله‌ری، ۱۳۹۳)..... ۳۶
- شکل ۵-۳: موقعیت حوضه بختیاری در ایران..... ۵۹
- شکل ۶-۳: شماتیک مدل هندسی حوضه بختیاری را در محیط HEC-HMS..... ۶۰
- شکل ۷-۳: موقعیت جانمایی ایستگاه‌های دماسنجی، باران‌سنجی و آب‌سنجی حوضه بختیاری..... ۶۲
- شکل ۱-۴: توسعه مدل طی مرحله صحت‌سنجی (Tmean)..... ۶۶
- شکل ۲-۴: مقایسه میانگین ماهانه دمای متوسط روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده..... ۶۶
- شکل ۳-۴: مقایسه میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی دما تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5..... ۶۷
- شکل ۴-۴: توسعه مدل طی مرحله صحت‌سنجی (بارش)..... ۶۹
- شکل ۵-۴: مقایسه میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5..... ۷۰
- شکل ۶-۴: طرح شماتیک و مفهومی مدل تلفات SMA..... ۷۱
- شکل ۷-۴: مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS در مرحله کالیبراسیون..... ۷۴
- شکل ۸-۴: همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله کالیبراسیون..... ۷۵
- شکل ۹-۴: مقادیر معیارهای آمار نکویی محاسبه شده توسط مدل HEC-HMS برای مرحله کالیبراسیون..... ۷۵

- شکل ۴-۱۰: هیدروگراف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله صحت‌سنجی..... ۷۶
- شکل ۴-۱۱: همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مقدار رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله صحت‌سنجی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۲: مقادیر معیارهای آمار نکویی محاسبه شده توسط مدل HEC-HMS برای مرحله صحت-سنجی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۳: مقایسه میزان متوسط سالانه رواناب ورودی به مخزن تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه کنترلی با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5..... ۷۸
- شکل ۴-۱۴: مقایسه میانگین ماهانه جریان مشاهده شده با پیش‌بینی شده..... ۷۸
- شکل ۴-۱۵: مقایسه میزان تولید متوسط سالانه انرژی برقابی تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه زمانی کنترلی با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5..... ۸۰
- شکل ۴-۱۶: مقایسه میانگین انرژی تولید ماهانه تحت شرایط اقلیمی تاریخی با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5..... ۸۱
- شکل ۴-۱۷: منحنی‌های تداوم کل انرژی..... ۸۱

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: میانگین جهانی افزایش دما در اواسط و اواخر قرن ۲۱..... ۳۰
- جدول ۲-۳: مقایسه دو روش ریزمقیاس‌سازی دینامیکی و آماری (Wilby et al., 2004)..... ۳۴
- جدول ۳-۳: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های دماسنجی و تبخیرسنجی حوضه بختیاری..... ۶۰
- جدول ۴-۳: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه بختیاری..... ۶۱
- جدول ۵-۳: مشخصات جغرافیایی ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری..... ۶۱
- جدول ۱-۴: معرفی متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP در ایستگاه کوه‌رنگ..... ۶۵
- جدول ۲-۴: معیارهای ارزیابی محاسبه شده ایستگاه‌های دماسنجی..... ۶۸
- جدول ۳-۴: معرفی متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP در ایستگاه الیگودرز..... ۶۸
- جدول ۴-۴: مقادیر نهایی پارامترهای مدل تلفات SMA حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS ۷۲
- جدول ۵-۴: مقادیر نهایی پارامترهای مدل روندیابی ماسکینگام حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS ۷۲
- جدول ۶-۴: مقادیر نهایی پارامترهای مدل مخزن خطی حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS ۷۳
- جدول ۷-۴: مقادیر نهایی پارامترهای روش تبدیل بارش به رواناب کلارک حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS ۷۳
- جدول ۸-۴: مقادیر نهایی پارامترهای روش ذوب برف شاخص حرارتی حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS ۷۴

فصل اول

کلیات

## ۱-۱- مقدمه

استفاده از نیروی آب برای تولید انرژی، سابقه‌ای دیرینه در جهان دارد. خصوصیات خاص این نوع از منبع تولید انرژی هم از نظر زیست محیطی و هم از لحاظ هزینه، موجب توجه ویژه‌ای به آن شده است. محدود بودن سوخت‌های فسیلی از یک سو و از سوی دیگر نقش بسزای نیروگاه‌های آبی در طراحی منابع آب، پیشگیری از وقوع سیل، حل مسایل آبیاری، بهبود کیفیت آب شرب و ایجاد مناطق تفریحی از عوامل موثر رشد این نوع نیروگاه‌ها و همچنین تولید نیروی برقابی در ابعاد وسیع‌تر هستند (شمس، ۱۳۸۵).

با توجه به نقش مهم نیروگاه‌های برقابی در تامین نیاز پیک کشور و میزان بالای سرمایه گذاری در توسعه آن‌ها، بررسی عواملی که می‌توانند در تولید برق این نیروگاه‌ها خللی ایجاد کنند ضروری می‌باشد. علیرغم ویژگی‌های منحصر بفرد نیروگاه‌های برقابی، به علت وابستگی شدید آن‌ها به مباحث هیدرولوژیکی، نیروگاه‌های برقابی در برابر پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند (جمالی، ۱۳۹۱).

مقدار انرژی الکتریکی تولیدشده در نیروگاه‌های آبی ارتباط مستقیم با حجم آب موجود در منابع آب دارد، هرچه حجم منابع آب موجود بیش‌تر باشد هم می‌توان تعداد توربین‌های نیروگاه و همچنین ژنراتورهای متصل به آن‌ها را افزایش داد و هم می‌توان ابعاد آن‌ها را بزرگ‌تر انتخاب نمود تا به این ترتیب انرژی الکتریکی بیش‌تری تولید کرد، بنابراین کاهش حجم آب موجود در منابع، کاهش نسبتاً چشمگیر میزان تولید انرژی برقابی را به دنبال خواهد داشت (ایوب سعیداوی، ۱۳۸۷). حجم آب موجود در منابع نیز ارتباط مستقیمی با میزان بارش در حوضه آن منابع دارد، از اینرو بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان بارش، دما و در نهایت حجم رواناب تولیدشده در داخل حوضه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است؛ به همین منظور به تفصیل به بررسی کامل اهمیت نیروی برقابی، تغییر اقلیم و میزان آسیب‌پذیری این نیرو در اثر تغییرات آب و هوا خواهیم پرداخت.



## ۱-۲- انرژی برقابی

به انرژی الکتریکی حاصل از نیروی آب، انرژی برقابی یا هیدروالکتریسیته<sup>۱</sup> اطلاق می‌شود. این انرژی به عنوان سومین منبع تولیدکننده برق و همچنین مهم‌ترین انرژی تجدیدپذیر مولد برق در جهان محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر، افزایش آگاهی از مزایای متعدد احداث نیروگاه‌های برقابی<sup>۲</sup> و بهره‌برداری از انرژی برقابی، موجب افزایش گرایش عمومی تولید برق در جهان از طریق احداث نیروگاه‌های برقابی شده است. از مزایای این نیروگاه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

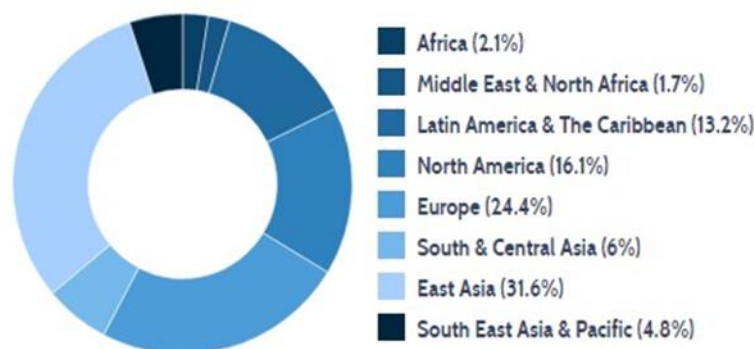
- عمر مفید این نیروگاه‌ها بیش از ۵۰ سال است و به ۱۰۰ سال هم می‌رسد که در مقایسه با عمر سایر نیروگاه‌ها (حدود ۲۵ تا ۳۰ سال) بسیار زیاد است.
- برای تولید انرژی چرخشی توربین‌ها، نیازی به سوخت نمی‌باشد. در نتیجه، هزینه بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها بسیار ناچیز می‌باشد.
- با توجه به این که در این نیروگاه‌ها هیچ‌گونه آلودگی ناشی از گازهای حاصل از احتراق وجود ندارد، بنابراین برای محیط زیست مشکلی ایجاد نمی‌کنند.
- نیروگاه‌های برقابی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها، از پایداری بیش‌تری برخوردار می‌باشند.
- هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه‌های برقابی بسیار پایین است.
- بهره‌گیری از انرژی برقابی، موجب صرفه‌جویی در مصرف سوخت و دیگر ذخایر وابسته به آن می‌شود.
- احداث نیروگاه‌های برقابی از طریق ایجاد سد، موجب پیشگیری از وقوع سیل و سیلاب‌های فصلی می‌گردد.
- ایجاد منابع مناسب به جهت بهره‌گیری از آب مصرفی شهری

---

<sup>۱</sup> Hydroelectricity  
<sup>۲</sup> Hydrolic Power Plant

همان‌طور که از نام نیروگاه آبی مشخص است؛ برای تولید این انرژی نیاز به احداث سد بر رودخانه می‌باشد که در کشورهای مختلف جهان با توجه به وجود رودخانه‌هایی با دبی‌های متفاوت، امکان نصب این نیروگاه‌ها بسیار زیاد است و خوش‌بختانه پتانسیل تولید نیروی برقابی به صورت گسترده‌ای در سراسر دنیا وجود دارد و تنها مناطق بسیار معدودی فاقد پتانسیل تولید این نیروی تجدیدپذیر هستند. در حال حاضر کشورهای توسعه یافته از حداکثر موقعیت‌های خود برای تولید انرژی برقابی بهره گرفته‌اند اما در سایر مناطق دنیا، توسعه فرایند تولید این انرژی با سرعت به مراتب کم‌تری در جریان است. با این حال پیشرفت‌های گسترده‌ای در منطقه آسیا صورت گرفته است؛ به خصوص در سال‌های اخیر کشور چین با سهم تولید ۲۹ درصد از مجموع انرژی برقابی تولیدی جهان، بالاترین میزان تولید انرژی برقابی را در میان سایر کشورها، به خود اختصاص داده است. تعداد بسیاری از مناطق نیز علی‌رغم برخورداری از ظرفیت بالای تولید انرژی برقابی، تاکنون اقدامی در راستای تولید این نیرو ننموده‌اند. شکل ۱-۱ توزیع پتانسیل ایجاد نیروگاه‌های برقابی و همچنین تولید انرژی برقابی را در نواحی مختلف دنیا نشان می‌دهد (Breeze, 2014).

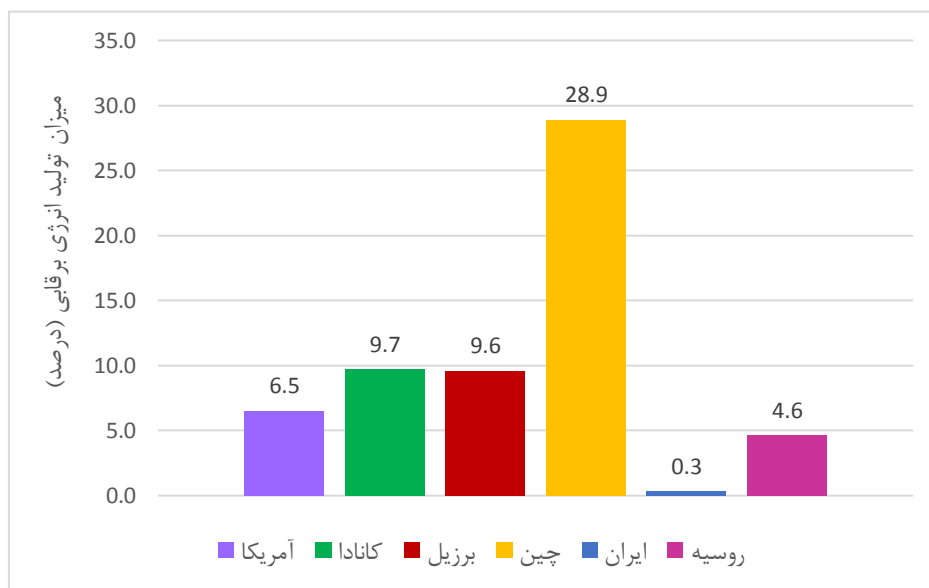
#### HYDROPOWER INSTALLED CAPACITY BY REGION



شکل ۱-۱: نمودار توزیع پتانسیل نیروی برقابی در نواحی مختلف دنیا

در سال‌های اخیر، رشد اقتصادی نیروی برقابی رشد چشمگیری داشته است به گونه‌ای که ظرفیت نصب نیروگاه‌های برقابی از سال ۲۰۰۵ تا سال ۲۰۱۵ با متوسط نرخ رشد سالانه نزدیک به ۴ درصد، در حدود ۳۹ درصد افزایش یافته است (Ary, 2016). بر اساس آخرین داده‌های موجود در سال

۲۰۱۶، حدود ۱۶/۴ درصد برق تولیدی جهان و همچنین ۷۱ درصد انرژی الکتریکی تجدیدپذیر تولیدی جهان، از انرژی برقابی تامین شده است. کشورهای چین، برزیل، کانادا و آمریکا به تنهایی در حدود ۵۵ درصد از این میزان انرژی را تولید می‌کنند. شکل ۱-۲ سهم تولید انرژی برقابی تعدادی از کشورهای تولیدکننده در سال ۲۰۱۶ را به گزارش شرکت انگلیسی بریتیش پترولیوم<sup>۱</sup> نشان می‌دهد (BP, 2017).



شکل ۱-۲: سهم تولید انرژی برقابی تعدادی از کشورها در سال ۲۰۱۶

همان‌گونه که در شکل مشخص است؛ کشور ایران با تولید ۰/۳ درصد از مجموع انرژی برقابی تولید شده در سال ۲۰۱۶، سهم بسیار اندکی از میزان کل تولید نیروی برقابی را به خود اختصاص داده است.

در ایران به دلیل وجود منابع سوخت فسیلی و نفت به میزان فراوان، در گذشته رویکردی نسبت به استفاده از این نیروگاه‌ها وجود نداشت اما اکنون با افزایش جمعیت و توجه به عوامل زیست محیطی نسبت به ایجاد این نیروگاه‌ها تمایل بیشتری ایجاد شده است. در حال حاضر نیز پتانسیل زیادی برای استفاده از این نوع منبع انرژی در کشور وجود دارد (مهرزاد شمس، ۱۳۸۵). از آن‌جا که کشور ایران

با میانگین بارش ۲۵۰ میلی متر در درازمدت (حدود یک چهارم میانگین جهانی) کشوری خشک و نیمه خشک به شمار می آید، با این حال این کشور، از لحاظ تولید نیروی برقایی، دارای رتبه ۳۶ در بین کشورهای تولیدکننده در جهان و رتبه اول در منطقه خاورمیانه می باشد. اما متأسفانه وقوع خشکسالی و کاهش شدید بارندگی‌ها از سال ۱۳۸۶، کاهش حجم آب ذخیره شده در پشت سدها، ایران را با مشکلات جدی چه از لحاظ تامین آب شرب و چه از لحاظ تولید انرژی توسط نیروگاه‌های برقایی مواجه نموده است و یکی از دلایل اصلی ایجاد این مشکلات، پدیده تغییر اقلیم می باشد (Sheet, 2016).

### ۱-۳- تغییر اقلیم

به متوسط شرایط جوی زمینی یا آبی در مقیاس‌های زمانی متفاوت، اقلیم<sup>۱</sup> گفته می شود. اقلیم یا آب و هوا به طور معمول توسط مجموعه تغییرات جوی و سطحی از جمله؛ بارش، دما، باد، رطوبت، ابر، رطوبت خاک، دمای سطح دریا، غلظت و ضخامت لایه‌های یخ در آب، توصیف می شود. داده‌های آماری ممکن است بر حسب مقدار میانگین متغیر در درازمدت یا سایر مقیاس‌ها از جمله حداقل دمای روزانه، مدت زمان فصل کشت و دوره تناوب وقوع سیلاب‌ها، باشند. اگرچه وضعیت آب و هوایی و همچنین تغییرات آن به طور معمول در مقیاس‌های جهانی ارائه می شوند اما ممکن است در غالب مقیاس‌های محلی نیز مورد بررسی قرار گیرند. عوامل متعددی در پایداری اقلیم یک منطقه و یا تغییرات اقلیم آن منطقه مشارکت دارند که به واسطه شناخت این عوامل و بررسی آن‌ها، می توان به پیش بینی هر چه دقیق تر روند تغییرات اقلیم یک منطقه کمک کرد (Gregory, 2009).

### ۱-۳-۱- عوامل اقلیمی

از مهم ترین عوامل اقلیمی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

---

<sup>۱</sup> Climate

- بارش: به طور معمول هر چه هوا گرم‌تر باشد، رطوبت بیش‌تری را در خود ذخیره می‌کند، اما اگر دمای هوا کاهش یابد این امر موجب افزایش رطوبت نسبی هوا می‌شود و اگر روند سرد شدن هوا ادامه پیدا کند، رطوبت نسبی هوا به مقدار ۱۰۰ درصد و درجه حرارت آن به درجه حرارت نقطه شبنم می‌رسد و هوا دیگر قادر به حفظ رطوبت اضافی نخواهد بود، در نتیجه بخار آب اضافی به صورت قطرات آب به سطح زمین فرود می‌آیند و پدیده بارش را به وجود می‌آورند. غالباً مقدار بارش و تداوم آن برای مکان‌های مختلف با اقلیم‌های متنوع، متفاوت است.
- تابش: تابش آفتاب پرتویی الکترومغناطیسی است که از خورشید ساطع می‌شود. با این که ابرها مقدار قابل توجهی از پرتو خورشید را به فضای خارجی اتمسفر منعکس می‌کنند، اما باقی آن به سمت زمین منتشر می‌شود و باعث گرم شدن طبیعی زمین می‌شود.
- دمای هوا: میزان تابش انرژی خورشیدی به هر نقطه از سطح زمین در طول یک سال، به شدت و تداوم تابش آفتاب در آن منطقه بستگی دارد و مقدار گرما و سرمای سطح زمین در تعیین دمای هوای بالای آن قسمت از سطح زمین نقش بسزایی دارد. عامل ارتفاع نیز در اندازه درجه حرارت یک منطقه موثر است؛ برای مثال در یک عرض جغرافیایی ثابت، نقاطی که دارای ارتفاع بیش‌تری هستند دمای پایین‌تری نسبت به نقاط کم ارتفاع دارند.
- رطوبت هوا: طبق تعریف، به مقدار بخار آب موجود در هوا، رطوبت هوا گفته می‌شود. نواحی خط استوا از حداکثر میزان رطوبت برخوردار هستند و این مقدار رطوبت به طور تدریجی با حرکت به سمت قطبین کاهش می‌یابد.
- باد: تقسیم نامتعادل پرتوهای خورشید بر روی زمین علت اصلی تشکیل نقاط کمربندهای فشار هوا است که باعث ایجاد اختلاف دما در نقاط مختلف سطح زمین می‌شود که در نهایت موجب وزش باد می‌شود.

- فشار بخار: فشار بخار مقداری از فشار هواست که در اثر افزایش بخار آب موجود در هوا تشکیل می‌شود.

### ۱-۳-۲- پدیده تغییر اقلیم

تعریف صحیح تغییر اقلیم<sup>۱</sup> با تغییرات اقلیمی از لحاظ علمی کاملاً متفاوت می‌باشد. تغییرات اقلیمی به صورت دوره‌ای است و نوسانات و انحرافات پارامترهای اقلیمی را از مقدار میانگین آن‌ها بیان می‌کند و ممکن است که در دوره‌های زمانی مختلف اتفاق بیفتد، اما تغییر اقلیم، نوسانات کلی و گسترده ایجاد شده در وضعیت آب و هوای یک منطقه را مدنظر قرار می‌دهد. معمولاً دگرگونی و تغییر در اقلیم، پدیده‌ای کاملاً طبیعی است که در مقیاس زمانی بسیار طولانی در حدود چندین هزار سال رخ می‌دهد اما تغییرات اقلیمی که اخیراً به وقوع پیوسته، در مقایسه با تغییرات اقلیمی دو میلیون سال پیش بسیار شدیدتر بوده است و زمین در طول سال‌های اخیر به اوج گرمای خود در دو هزار سال گذشته رسیده است. با وجود اختلاف میان معانی عبارات تغییر اقلیم و تغییرات اقلیمی، به دلیل بکارگیری فراوان عبارت تغییر اقلیم با مفهوم تغییرات اقلیمی در بیش تر محافل علمی، در این مطالعه نیز عبارت تغییر اقلیم جایگزین عبارت تغییرات اقلیمی شده است (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۷).

### ۱-۳-۳- علل بروز پدیده تغییر اقلیم

عوامل متعددی موجب برهم خوردن شرایط حاکم بر اجزای سیستم اقلیم کره زمین و همچنین شکل‌گیری نوسانات ایجاد شده، شده‌اند که این عوامل شامل دو بخش طبیعی و انسانی می‌باشند.

- عوامل طبیعی: این عوامل شامل پیامدهای ناشی از تغییرات مدار خورشیدی در داخل کهکشان راه شیری، عبور ستاره‌های دنباله‌دار، تغییرات خروجی خورشید و تغییر در پارامترهای مداری زمین هستند.

---

<sup>۱</sup> Climate Change

• عوامل انسانی: انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای از طریق فعالیت‌های مربوط به انسان، از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر بروز پدیده تغییر اقلیم است.

از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای می‌توان به دی‌اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ )، متان ( $\text{CH}_4$ )، اکسید نیترو ( $\text{N}_2\text{O}$ )، بخار آب ( $\text{H}_2\text{O}$ )، اوزون ( $\text{O}_3$ ) و کلروفلوئوروکربن‌ها اشاره کرد. دی‌اکسید کربن به صورت طبیعی توسط جنگل‌ها و همچنین اقیانوس‌ها، جذب و مجدداً آزاد می‌شود. دی‌اکسید کربن به واسطه سوزاندن چوب، زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی تولید می‌شود، این فعالیت‌ها پس از انقلاب صنعتی، در طول دو قرن اخیر به طور پیوسته افزایش یافته است. گاز متان نیز از فضولات حیوانی، شالیزارهای برنج، سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تخمیر بی‌هوازی ضایعات جامد و مایع ایجاد می‌شود و همچنین از طریق باکتری‌های موجود در خاک و انجام واکنش‌های شیمیایی در جو، جذب می‌شود. اکسید نیترو به واسطه خاک‌های تقویت شده با کودهای شیمیایی، سوختن زیست توده و همچنین احتراق سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. اوزون عمدتاً در اثر تابش اشعه فرابنفش خورشید بر مولکول‌های اکسیژن در قسمت‌های بالاتر لایه اتمسفر ایجاد می‌شود و مقدار بیش‌تر آن در لایه استراتوسفر باقی می‌ماند. کلروفلوئوروکربن‌ها (CFCs) با دیگر گازهای گلخانه‌ای متفاوت هستند زیرا آن‌ها منبع طبیعی ندارند و از طریق فعالیت‌های صنعتی از جمله تولید گاز سرمازای یخچال، تولید آلومینیوم و صنعت برق، تولید می‌شوند (Gregory, 2009).

به طور کلی چنانچه مقدار گازهای گلخانه‌ای موجود در داخل جو، بیش‌تر از مقدار متعارف شود، توازن انرژی بر هم خورده و موجب ماندگاری انرژی بیش‌تری در داخل جو می‌شود که این خود تسریع روند پدیده تغییر اقلیم و گرمایش تدریجی کره زمین را به دنبال خواهد داشت.

رشد صنایع و گسترش کارخانه‌ها از آغاز انقلاب صنعتی و در پی آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از یک سو و تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی کشاورزی از سوی دیگر، موجب

افزایش قابل توجه مقدار گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر شده، به گونه‌ای که غلظت این گازها به خصوص گاز دی اکسید کربن از ppm ۲۸۰ در سال ۱۷۵۰، به مقدار ppm ۳۷۹ در سال ۲۰۰۵ افزایش یافته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند کنونی، ممکن است غلظت این گاز تا پیش از پایان قرن بیست و یکم به بیش از ppm ۶۰۰ برسد (مجمع بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷).

با توجه به گزارش‌های موجود، در طول سال‌های ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۵، مقدار متوسط دما در مقایسه با قرون گذشته در حدود ۰/۷۴ درجه سانتی گراد افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر متوسط افزایش دما در ۵۰ سال اخیر به میزان ۰/۱۳ درجه سانتی گراد به ازای هر ۱۰ سال بوده است که این مقدار نزدیک به دو برابر مقدار آن در صد سال گذشته می‌باشد (مساح بوانی، ۱۳۸۵).

#### ۱-۳-۴- تاثیرات پدیده تغییر اقلیم

بر اساس مطالعات انجام شده، ادامه روند پدیده تغییر اقلیم، وقوع رخداد‌های اقلیمی و بلایای طبیعی و همچنین تاثیرات مستقیم و نامطلوبی را بر اکوسیستم‌های آبی و مناطق ساحلی، وضعیت اقتصادی و اجتماعی، وضعیت کشاورزی، وضعیت بهداشت و منابع طبیعی در پی دارد که از آن جمله می‌توان به تعدادی از آن‌ها اشاره کرد:

- افزایش دمای کره زمین
- تاثیر بر رواناب‌ها و منابع آب زیرزمینی
- تاثیر نامطلوب بر کیفیت آب
- تغییر در میزان بارش و جهت وزش باد
- افزایش تبخیر و خشک شدن خاک‌ها
- تغییر در زیرساخت‌ها به واسطه جاری شدن سیل و حرکت لایه‌های زمین
- افزایش دمای اقیانوس‌ها و در نهایت نابودی قطب‌ها و سرزمین‌های یخی



- افزایش مقدار رطوبت در مناطق ساحلی و همچنین کاهش آن در نواحی داخلی قاره‌ها
- افزایش پدیده النینو و طوفان‌های موسمی
- تهدید سلامت انسان‌ها
- آتش گرفتن جنگل‌ها

علاوه بر تاثیرات مستقیم و نامطلوب پدیده تغییر اقلیم که پیش‌تر ذکر شد، از اثرات غیرمستقیم بروز این پدیده، می‌توان به آسیب‌های اقتصادی ناشی از اقدامات مقابله‌ای کشورهای توسعه‌یافته اشاره کرد. به منظور بررسی اثرات گرمایش زمین بر منابع آب، مطالعات گوناگونی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری و با بهره‌گیری از مدل‌های بارش-رواناب مختلف و همچنین سناریوهای انتشار متفاوت، انجام شده است که به طور کلی نتایج این مطالعات و همین‌طور اثرات پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن کره زمین بر منابع آب را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- تغییر در مدت، شدت و زمان بارش در مناطق مختلف کره زمین و در نهایت وقوع خشکسالی‌ها و سیلاب‌های بی‌سابقه

- تغییر در حجم، زمان و مدت تشکیل رواناب؛ که این خود موجب بروز مشکلات جدیدی در زمینه تامین آب خواهد شد.

- بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها در اثر ذوب یخچال‌های قطبی و در پی آن، ورود آب شور دریا به ساحل و ترکیب آن با منابع آب شیرین و در نهایت ایجاد مشکلات متعددی در تامین آب شرب

- کاهش ذخایر برفی در کوهستان‌ها به عنوان منابع ذخیره آب در فصول خشک سال

- تغییر در میزان تبخیر و تعرق از سطح گیاهان و تاثیر آن بر افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی

- افزایش نرخ تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن سدها و همچنین تشدید مساله کمبود و هدر رفت آب

-افزایش مصرف و تقاضای آب شهری در پی افزایش دمای هوا

با توجه به موارد مذکور، جهت اتخاذ مناسب‌ترین استراتژی‌های مقابله با سیلاب‌ها و بهره‌برداری از منابع آب، بررسی و پیش‌بینی تغییرات هیدروسیستم‌ها، بسیار مهم و ضروری تلقی می‌شوند (منتظری، ۱۳۸۲).

#### ۱-۴- هدف از انجام تحقیق

افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیم متاثر از آن رژیم جریان رودخانه‌ها را تغییر داده و نگرانی بسیاری را در مورد میزان آب قابل دسترس و قابل ذخیره در آینده ایجاد می‌کند. تغییرات به وجود آمده در رژیم جریان رودخانه‌ها، تغییر در حجم آب ذخیره شده در سدها و در نهایت تغییر در میزان انرژی تولیدی حاصل از نیروگاه‌های آبی را به دنبال دارد. با توجه به اهمیت نیروگاه بختیاری، بررسی اثر تغییر اقلیم بر حجم رواناب حوضه پیرامون این نیروگاه و همچنین انرژی برقابی تولیدی آن، امری ضروری می‌باشد.

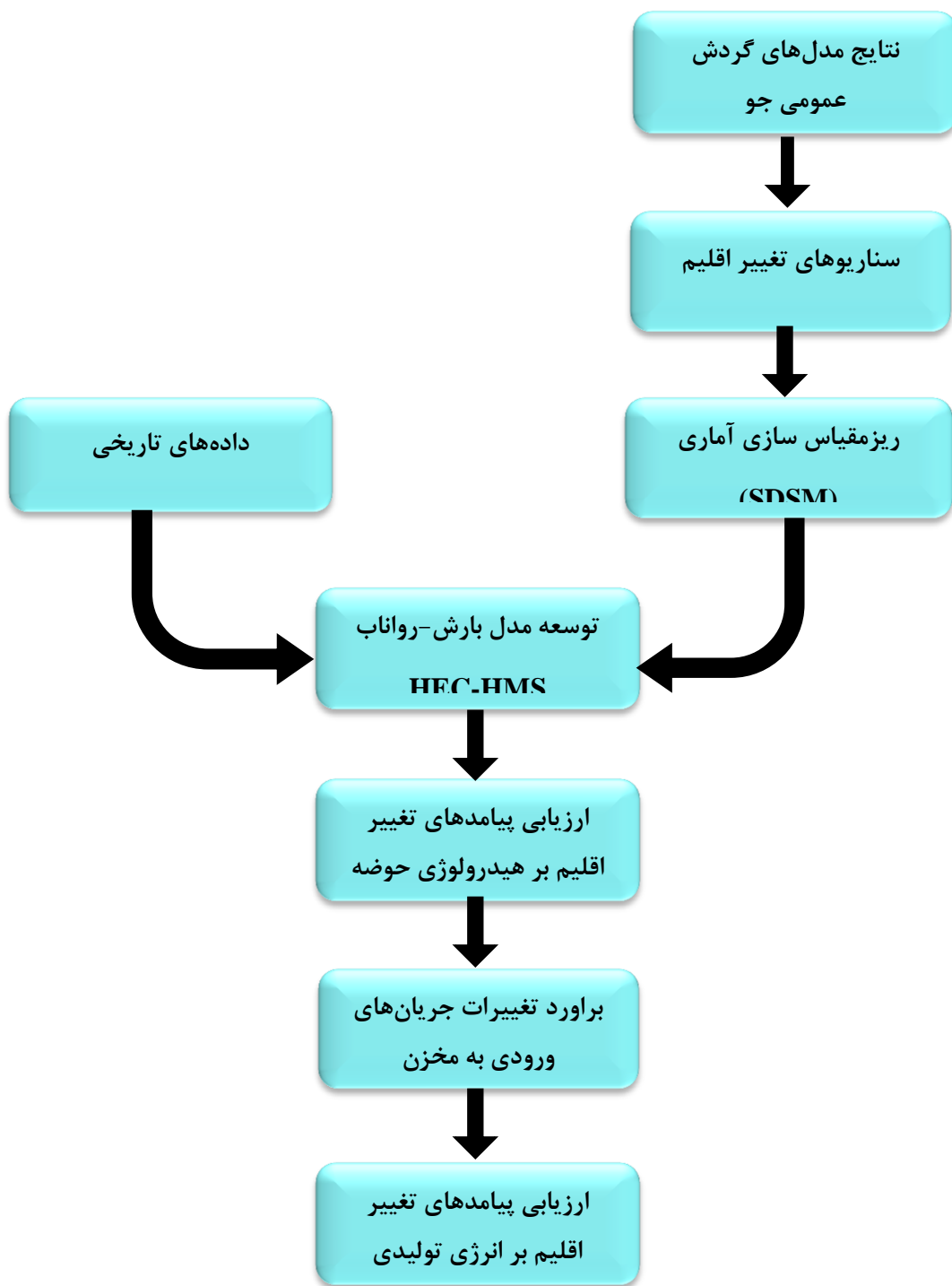
#### ۱-۵- اهداف کلی پایان‌نامه

- آشکارسازی روند اثرات تغییر اقلیم
- ریزمقیاس‌سازی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی گردش عمومی جو با بهره‌گیری از مدل SDSM
- پیش‌بینی میزان رواناب در افق زمانی موردنظر به کمک مدل بارش-رواناب HEC-HMS
- برآورد میزان انرژی برقابی تولیدی نیروگاه بختیاری در بازه زمانی منتخب

#### ۱-۶- ساختار کلی پایان‌نامه

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق پیش رو، در فصل دوم به ارائه سوابق پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی اثرات تغییر اقلیم پرداخته خواهد شد. در ادامه، در فصل سوم نحوه دستیابی به پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی شده برای افق زمانی موردنظر تشریح خواهد شد. همچنین مدل آماری

SDSM جهت ریزمقیاس سازی داده‌های بزرگ مقیاس و مدل هیدرولوژیکی HEC\_HMS در راستای برآورد میزان رواناب ورودی به مخزن سد، معرفی خواهند شد. پس از آن، روابط انرژی و توان جهت دستیابی به میزان انرژی برقابی تولیدی، ارائه خواهند شد. در فصل چهارم نیز به ارائه نتایج حاصل از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم پرداخته خواهد شد. در نهایت، در فصل پنجم به تشریح نتایج کلی و همچنین ارائه چندین پیشنهاد جهت تکمیل تحقیق حاضر پرداخته می‌شود. شکل ۱-۳ ساختار کلی پژوهش را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱-۳: ساختار کلی پژوهش

## فصل دوم

### پیشینه و سابقه تحقیق

تغییر اقلیم یکی از چالش برانگیزترین پدیده‌های محیطی در سیستم‌های اقلیمی است که امروزه توجه بسیاری از کشورها را در رابطه با مسائل زمین به خود جلب نموده است. در طی دهه‌های اخیر رشد صنایع و به دنبال آن مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش جمعیت جهان و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین به وجود آید. در حال حاضر آنچه امروزه مرزهای کشورها را درنوردیده و در سطح جهانی و به طور فراگیر همه ملت‌ها را تهدید می‌کند، بحران‌های محیطی و به تبع آن تغییرات غیرمنتظره آب و هوایی و گرمایش جهانی است. اخیراً با آشکارتر شدن شواهد تغییر اقلیم، نگرانی‌ها پیرامون نحوه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آبی در مواجهه با شرایط جدید افزایش یافته است. افزایش این نگرانی‌ها منجر به انجام مطالعات فراوان در نقاط مختلف جهان، در خصوص ارزیابی شدت پیامدهای نامطلوب ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آبی شده است. یکی از این پیامدهای نامطلوب، تغییر در جریان‌های ورودی به مخازن سدهای برقابی است.

## ۲-۲- پژوهش‌های انجام‌شده در سراسر جهان

مینویل و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل اقلیمی CGCM3 و همچنین سناریو انتشار A2 جهت پیش‌بینی وضعیت اقلیم در آینده، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید نیروی برقابی در نیروگاه‌های واقع در حوضه رودخانه پریبونکا<sup>۱</sup> کانادا پرداختند. در این مطالعه، با بهره‌گیری از داده‌های هیدرولوژیکی بازه زمانی ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰، میزان تولید نیروی برقابی برای سه افق زمانی ۲۰۲۰ (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، ۲۰۵۰ (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و ۲۰۸۰ (۲۰۷۰-۲۰۹۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که متوسط سالانه نیروی برقابی در افق زمانی ۲۰۲۰ به میزان ۱/۸ درصد کاهش و در افق‌های زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب به میزان ۹/۳ و ۱۸/۳ درصد افزایش خواهد یافت.

<sup>۱</sup> Peribonka

همچنین پیش‌بینی‌ها، افزایش قابل توجه روند صعودی تولید نیروی برقابی را پس از سال ۲۰۶۱ نشان دادند. به طور کلی نتایج بیانگر افزایش آسیب‌پذیری مخازن در برخورد با پدیده تغییر اقلیم است (Minville, 2009).

جمالی و همکاران (۲۰۱۳) جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه کرخه واقع کشور ایران، نخست نتایج خروجی دو مدل CGCM3 و HADCM3 را تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 و در سه افق زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰، ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰ و ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ مورد استفاده قرار دادند. در ادامه، جهت ریزمقیاس‌سازی از مدلی آماری به نام ASD<sup>۱</sup> استفاده نمودند. نتایج هر دو مدل CGCM و HADCM نشان دادند که در تمامی ماه‌ها دمای متوسط افزایش خواهد یافت. سپس جهت شبیه‌سازی آینده جریان رودخانه در حوضه آبریز کرخه از مدل هیدرولوژیکی IHACRES بهره گرفتند. پس از پیش‌بینی میزان رواناب در افق‌های زمانی موردنظر، با استفاده از مدل MODSIM، نشان دادند که میزان تولید انرژی برقابی در تمامی نیروگاه‌ها کاهش خواهد یافت (Jamali, 2013).

چیانگ و همکاران (۲۰۱۳) اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید نیروی برقابی در منطقه تایوان جنوبی را مورد تحقیق قرار دادند. در این راستا پنج مدل گردش عمومی CCCMA، CCCSRNIES، GFDL، ECHAM4 و HADCM3، تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 جهت پیش‌بینی دما و بارش به کار برده شد. سپس به منظور تخمین میزان رواناب رودخانه کاوپینگ<sup>۲</sup>، از مدل هیدرولوژیکی GWLF<sup>۳</sup> استفاده شد. نتایج بیش‌تر این مدل‌ها نشان دادند که رواناب رودخانه در فصل خشک در محدوده ۲۶- تا ۱۵+ و در فصل مرطوب در محدوده ۱۰- تا ۸۲+ تغییر خواهد کرد. همچنین میزان تغییرات در پتانسیل تولید نیروی برقابی نیز به طور تقریبی در محدوده تغییرات رواناب که قبل‌تر ذکر شده، تخمین زده شد (Chiang, 2013).

<sup>۱</sup> Automated Statistical Downscaling (ASD)

<sup>۲</sup> Kaoping

<sup>۳</sup> Generalized Watershed Loading Functions

گادارد و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید نیروی برقابی در حوضه رودخانه‌های آلپ واقع در کشورهای سوئیس و ایتالیا پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از اطلاعات بارش و دمای سه زیر حوضه در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰، جهت پیش‌بینی وضعیت اقلیمی در افق زمانی ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ استفاده نمودند. در ادامه، اطلاعات به دست آمده از دو مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM3 و REMO را با استفاده از یک مدل تلفیقی دینامیکی و آماری، ریزمقیاس نمودند. سپس جهت تخمین میزان رواناب در افق زمانی موردنظر، از مدل بارش-رواناب TOPKAPI بهره گرفتند. در انتها، نتایج حاصل نشان دادند که میزان رواناب در افق زمانی ۲۰۳۱-۲۰۵۰ در مقایسه با مقدار رواناب در دوره زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۰، در زیرحوضه‌های مت‌مارک<sup>۱</sup> و وال‌دی‌آستا<sup>۲</sup> به ترتیب در حدود ۲۱٪ و ۱۷٪ کاهش و در زیرحوضه توس<sup>۳</sup> به علت پیش‌بینی افزایش بارش باران در آن منطقه، به میزان اندکی افزایش خواهد یافت. همچنین پتانسیل تولید نیروی برقابی نیز در زیرحوضه‌های مت‌مارک و وال‌دی‌آستا به ترتیب به میزان ۱۸٪ و ۱۰٪ با کاهش و در زیرحوضه توس به میزان ۱۵٪ با افزایش مواجه خواهد شد (Gaudard et al., 2014).

در پژوهشی که توسط رینهیمر و همکاران (۲۰۱۴) در منطقه سیرا نوادا<sup>۴</sup> کالیفرنیا انجام شد، تغییرات مقدار تولید نیروی برقابی در مواجهه با پدیده تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، از مدل مدیریت منابع آب WEAP<sup>۵</sup> به منظور تعیین اثرات بالقوه پدیده گرمای جهانی بر نیروی برقابی در مقیاس حوضه مورد مطالعه، بهره گرفته شده است. در راستای ارزیابی اثرات بالقوه گرمای جهانی، افزایش دمای هوا به میزان ۰، ۲، ۴ و ۶ درجه سانتی‌گراد و با فرض عدم ایجاد تغییر در مقدار بارش باران، در نظر گرفته شد. پس از اجرای مدل، نتایج نشان دادند که تولید نیروی برقابی در زیرحوضه‌های شمالی حوضه مورد مطالعه، با توجه به کاهش مقدار رواناب سالانه با کاهش چشمگیری مواجه

---

<sup>۱</sup> Mattmark

<sup>۲</sup> Val d'Aosta

<sup>۳</sup> Toce

<sup>۴</sup> Sierra Nevada

<sup>۵</sup> Water Evaluation and Planning system (WEAP)



خواهد بود. اما در زیرحوضه‌های مرکزی میزان رواناب سالانه و به تبع آن تولید انرژی برقابی در مقایسه با زیرحوضه‌های شمالی با کاهش کمتری روبه‌رو می‌شوند. همچنین تولید انرژی برقابی در زیرحوضه‌های جنوبی با وجود پتانسیل اندک آن‌ها برای تولید نیرو، کاهش می‌یابد (Rheinheimer et al., 2014).

وانگ و همکاران (۲۰۱۴) آسیب‌پذیری تولید نیروی برقابی را در مواجهه با پدیده تغییر اقلیم، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق، تنها پارامتر اقلیمی بارش را مورد ارزیابی قرار دادند. سپس با توسعه مدل Gray تحت دو سناریو انتشار A2 و B2، تغییرات مقدار بارش را برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ پیش‌بینی نمودند. نتایج حاصل نشان دادند که آسیب‌پذیری تولید نیروی برقابی در مواجهه با پدیده تغییر اقلیم در مناطق خشک‌تر کشور چین با افزایش بیش‌تری روبه‌رو خواهد بود. همچنین در پیش‌بینی تغییر اقلیم تحت سناریو A2، تولید انرژی برقابی در سال ۲۰۲۰ در حدود ۳/۰۹ درصد و در سال ۲۰۳۰ در حدود ۵/۴۰ درصد، به ترتیب معادل ۳۱/۱۰۷ و ۵۷/۶۳۷ بیلیون کیلووات ساعت کاهش خواهد یافت. اما در پیش‌بینی این پدیده تحت سناریو B2، تولید انرژی در سال ۲۰۲۰ به میزان ۲/۰۲ درصد و در سال ۲۰۳۰ به میزان ۴/۴۱ درصد، به ترتیب معادل ۲۰/۳۸۶ و ۴۶/۹۵۲ بیلیون کیلووات ساعت کاهش می‌یابد (Wang, 2014).

کپیتکوسکی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقابی در حوضه رود کلرادو<sup>۱</sup> پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از سه مدل اقلیمی MICRO، MRI و CGCM3 بهره بردند. همچنین به منظور ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر از سناریوهای انتشار A2 و B1 استفاده کردند. سپس جهت پیش‌بینی میزان رواناب از مدل هیدرولوژیکی WARMF بهره گرفتند. در انتها، نتایج نشان دادند که میزان بارش باران در حدود ۱۶ درصد و میزان رواناب تا ۵۰ درصد تغییر خواهد کرد. همچنین آن‌ها دریافتند که راهکارهای مدیریت

---

<sup>۱</sup> Colorado

نیروی برقابی در آینده نیازمند تغییرات و اصلاحاتی در راستای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم خواهند بود (Kopytkovskiy, 2015).

چیلکوتی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر تولید نیروی برقابی در حوضه رودخانه اچلوکنی<sup>۱</sup> واقع در کشور آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها داده‌های اقلیمی را از یک مدل اقلیمی منطقه‌ای به دست آورده و تحت سناریو انتشار RCP4.5، که در گزارش پنجم IPCC منتشر شده است، ریزمقیاس نمودند. سپس به منظور پیش‌بینی مقدار رواناب از مدل هیدرولوژیکی مفهومی HYMOD بهره بردند. در نهایت نتایج نشان دادند که در افق زمانی ۲۰۹۱-۲۱۰۰ مقدار بارش سالانه در این منطقه در حدود ۱۴ درصد افزایش خواهد یافت و علاوه بر این، مقدار دمای حداقل در حدود ۱/۳۵ درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر نیز به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همچنین رواناب سالانه با افزایش ۲۱ درصدی روبه‌رو خواهد بود و همین‌طور رواناب فصلی نیز با تغییراتی مواجه خواهد شد؛ به گونه‌ای که در فصل زمستان میزان رواناب در حدود ۷۲ درصد افزایش، و در فصل تابستان به میزان ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. از آن‌جا که تغییرات میزان تولیدی انرژی برقابی تابعی از تغییرات رواناب است، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این انرژی در بازه زمانی منتخب تغییر خواهد کرد. افزایش ۷۲ درصدی رواناب در فصل زمستان موجب افزایش ۵۶ درصدی مقدار تولیدی انرژی برقابی در این فصل خواهد شد و همچنین کاهش ۲۴ درصدی رواناب در فصل تابستان، کاهش ۱۴ درصدی تولید انرژی برقابی را به دنبال خواهد داشت (Chilkoti, 2017).

تئوتونیو و همکاران (۲۰۱۷) اثرات بالقوه پدیده تغییر اقلیم بر تولید نیروی برقابی در کشور پرتغال را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها جهت بررسی اثرات این پدیده بر منابع آب این منطقه به ویژه منابع آب قابل دسترس جهت تولید انرژی برقابی تا سال ۲۰۵۰ میلادی، از مدل بهینه‌سازی TIMES-PT بهره بردند. در نهایت، نتایج این ارزیابی نشان دادند که تولید نیروی برقابی در این منطقه تا سال ۲۰۵۰ به

---

<sup>۱</sup> Ochlockonee

میزان ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این آن‌ها دریافتند که با توجه به اثرات قوی‌تر تغییر اقلیم از جمله افزایش ۷/۲ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای، اقدامات سیاسی جدی‌تری در راستای سازگاری با این پدیده مورد نیاز است (Teotónio, 2017).

### ۳-۲- پژوهش‌های انجام‌شده در کشور ایران

بهشتی منفرد و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان بهره‌برداری از سد کارون ۳ پرداختند. در این تحقیق، جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی سد و نیروگاه کارون ۳ واقع در جنوب غربی ایران در دو دوره آینده نزدیک ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹، از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت سناریوی انتشار A2 استفاده شده است. نرم‌افزار SDSM4.2 جهت ریزمقیاس کردن آماری پارامترهای اقلیمی به مقیاس محلی، به کار گرفته شده و مدل بارش-رواناب استفاده شده در این تحقیق، مدل شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> ANN می‌باشد که به شبیه‌سازی رواناب می‌پردازد. سپس با کمک مدل مخزن HEC-ResSim3.0 به پیش‌بینی تولید انرژی برقایی پرداخته شد. در نهایت، نتایج حاکی از افزایش تولید نیروی برقایی در آینده نزدیک به غیر از ماه‌های آپریل و می، با روند سالانه ۰.۷٪+ بوده، ولی در آینده دور کاهش تولید نیروی برقایی به جز ماه‌های اکتبر و نوامبر، با نرخ سالانه ۰.۶٪- خواهیم بود (بهشتی منفرد، ۱۳۹۰).

جدیری نقاشکار (۱۳۹۱) جهت مدلسازی تغییر اقلیم و اثر آن بر تولید برقایی سد سفیدرود در بازه‌های زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ از مدل‌های گردش عمومی تحت سناریو انتشار A2 بهره برد. سپس با کمک مدل ریزمقیاس‌نمایی نرم‌افزار LARS-WG خروجی‌های GCM را ریزمقیاس نمود. به منظور استخراج رابطه بارش-رواناب، از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده نمود. همچنین مدلسازی مخزن سد سفیدرود به کمک نرم‌افزار WEAP

---

<sup>۱</sup> Artificial Neural Networks

صورت گرفت. در نهایت نتایج نشانگر کاهش انرژی برقابی استحصالی از سد در بازه‌های مطالعاتی ذکر شده به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۵ و ۲۱ درصد بودند (جدیری، ۱۳۹۲).

## ۲-۴- جمع‌بندی

با توجه به آثار متفاوت پدیده تغییر اقلیم بر میزان تولید انرژی برقابی در سراسر جهان، می‌توان نتیجه گرفت که میزان آسیب‌پذیری نیروگاه‌های تولید انرژی برقابی وابستگی بسیاری به منطقه‌ای که در آن واقع هستند دارد. از اینرو ضروری است جهت پیش‌بینی تغییرات احتمالی در میزان تولید انرژی برقابی در حوضه سد و نیروگاه بختیاری، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط اقلیمی این منطقه و همچنین تغییرات میزان رواناب رودخانه‌های واقع در این حوضه، پرداخته شود. به همین منظور در فصول پیش‌رو به تفصیل به بررسی این پدیده و همچنین اثرات ناشی از آن خواهیم پرداخت.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

در حال حاضر موضوع تغییر اقلیم جهانی در اثر فعالیت‌های بی‌رویه صنعتی انسان‌ها، بیش از هر زمان دیگری مورد بحث کارشناسان و محققان در عرصه‌های بین‌المللی قرار گرفته است. بی‌تردید عوارض ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای که با بالا رفتن دمای کره زمین همراه است، می‌تواند بر کلیه فعالیت‌های آبی بشر در زمینه‌های گوناگون به ویژه منابع آب، موثر واقع شده است. تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب (سطحی و زیرزمینی) و کشاورزی یک موضوع حیاتی برای بشر می‌باشد (جعفرپور، ۱۳۹۴).

مبحث مدیریت ریسک و سازگاری با پدیده تغییر اقلیم از جمله مباحث نوین در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب محسوب می‌شوند. نکته حائز اهمیت در ارتباط با اجرای شیوه‌های سازگاری این است که پیش از تدوین استراتژی تطبیق با تغییر اقلیم، باید محدوده محتمل اثرات ناشی از تغییر اقلیم مشخص شود. بنابراین نخستین گام جهت تدوین استراتژی در راستای کاهش خسارت‌های ناشی از این تغییرات، ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم (در این پژوهش، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از نظر میزان تولید انرژی برقابی) می‌باشد. علاوه بر این برآورد می‌شود تغییر اقلیم از طریق اثرگذاری بر چرخه هیدرولیکی و نواسانات آب و هوایی، بتواند تولید انرژی برقابی را دچار چالش نماید. بنابراین بررسی اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقابی و همچنین میزان بهره‌برداری از مخازن در سطح حوضه ضروری است. به طور یقین، این امر در کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک با منابع آب قابل دسترس محدود مانند ایران، از اهمیت بالاتری برخوردار است. در واقع ارزیابی‌های به هنگام اثرات پدیده تغییر اقلیم می‌تواند موجب کاهش پیامدهای نامطلوب تغییر اقلیم بر تولید انرژی نیروگاه‌های برقابی موجود، در دست ساخت و مطالعه شود (جمالی، ۱۳۹۱).

نخستین گام جهت تدوین استراتژی در راستای کاهش خسارت‌های ناشی از تغییرات اقلیم، ارزیابی پیامدهای پدیده تغییر اقلیم (در این پژوهش، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از نظر میزان تولید انرژی

برقایی) می‌باشد. به منظور انجام این ارزیابی‌ها در ابتدا باید داده‌های پیش‌بینی بارش و دما در افق زمانی آینده را تهیه کرد. در ادامه این فصل، نخست مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای اقلیمی معرفی شده، پس از آن شیوه‌های ریزمقیاس‌سازی داده‌ها و مدل به کار گرفته شده در این پژوهش معرفی خواهند شد. پیش‌تر، نتایج حاصل از ریزمقیاس‌سازی داده‌ها در حوضه رودخانه بختیاری و اثرات تغییر اقلیم بر مقدار بارش و دمای این حوضه به تفکیک ایستگاه‌های منتخب آورده شده است. در پیرو نتایج حاصل، با معرفی مدل بارش رواناب و واسنجی آن برای حوضه آبریز رودخانه بختیاری، شدت تغییرات آبدی زیرحوضه‌های بختیاری در مواجهه با سناریوهای مختلف اقلیمی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت نحوه محاسبه انرژی برقایی در شرایط مواجهه با سناریوهای اقلیمی منتخب، ارائه شده است.

### ۳-۲- آشکارسازی اثرات تغییر اقلیم

به طور کلی جهت آشکارسازی روند تغییر اقلیم و بررسی آثار آن، دو روش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- استفاده از داده‌های تاریخی هواشناسی و هیدرولوژیکی جهت بررسی تغییرات آینده
- بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی گردش عمومی جو<sup>۱</sup> (GCM)

از آن‌جا که تعداد زیادی از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در برخی از دوره‌ها فاقد آمار می‌باشند، عدم دسترسی به تمامی داده‌های تاریخی را می‌توان از جمله محدودیت‌های روش اول برشمرد. شبیه‌سازی به روش دوم بر اساس مبادلات انرژی و مبادلات موجود میان خشکی، اقیانوس و اتمسفر می‌باشد. شبیه‌سازی با مدل‌های گردش عمومی، در مقیاس کوچک و برای دوره زمانی کوتاه‌مدت

---

<sup>۱</sup> General Circulation Model

نتایج قابل قبولی را به دنبال ندارد اما در بازه‌های زمانی بیش از ۱۰ سال، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند (سیدقاسمی، ۱۳۸۵).

### ۳-۲-۱- مدل‌های گردش عمومی جو

مدل‌های گردش عمومی در واقع حل معادلات حاکم بر جو بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک هستند. به عبارت دیگر قوانین نیوتن در سه محور  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  نوشته می‌شوند که در نهایت به عنوان معادلات تکانه از آن‌ها یاد می‌شود این معادلات در کنار قوانین عمومی گازها و ترمودینامیکی، اساس مدل‌های گردش عمومی جو را تشکیل می‌دهند. مدل‌های گردش عمومی جو، مدل‌هایی سه بعدی هستند که قادرند با لحاظ نمودن بیش‌تر فرایندهای موثر در مقیاس جهانی و یا قاره‌ای، عملیات شبیه‌سازی را به بهترین حالت ممکن انجام دهند. این مدل‌ها به منظور ارزیابی تغییرات اقلیمی، خصوصیات فیزیکی، چرخش‌ها و حرکات اتمسفری را تحلیل می‌نمایند و همچنین اثرات افزایش گازهای گلخانه‌ای را به صورت مکانیکی در سراسر کره زمین ارزیابی می‌کنند. ساختار یک مدل GCM، متشکل از چهار بخش اصلی خشکی‌ها، اقیانوس‌ها، اتمسفر و یخ‌های موجود در دریاها می‌باشد. هدف اصلی مدل‌های گردش عمومی، پیش‌بینی تحول زمانی جو می‌باشد. دقت مکانی این مدل‌ها در حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر است، که این دقت خصوصاً برای بررسی مناطق کوهستانی و پارامترهای اقلیمی نظیر بارش و دما مناسب نمی‌باشد، از این رو لازم است که با استفاده از روش‌های کوچک مقیاس کردن، خروجی‌های این مدل‌ها را به متغیرهای سطحی در مقیاس حوضه مورد مطالعه، تبدیل نمود.

به طور کلی دو دیدگاه عمده در ارتباط با این مدل‌ها وجود دارد:

- دیدگاهی که هدف آن، بکارگیری از این گونه مدل‌ها برای پیش‌بینی فصلی (از یک ماه آینده تا کمتر از یک سال) می‌باشد. البته اخیراً در مرکز هادلی انگلیس و سازمان هواشناسی ژاپن همین روش را برای پیش‌بینی‌های کمتر از ۵ سال نیز مورد استفاده قرار داده‌اند، اما این



پیش‌بینی‌ها تنها برای مناطق حاره‌ای که تأثیرپذیری بیشتری از دمای پهنه‌های اقیانوسی دارند، قابل استفاده هستند.

- دومین دیدگاه استفاده از این مدل‌ها جهت پیش‌بینی اقلیم در مقیاس دهه تا سده می‌باشد که نمونه‌های آن در حال حاضر در مراکز اقلیمی مختلف در حال اجرا می‌باشد و اخیراً اقلیم کره زمین را تا سال ۲۳۰۰ میلادی با استفاده از همین مدل‌ها شبیه‌سازی نموده‌اند.

به منظور ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده، از مدل گردش عمومی CANESM2 که در گزارش پنجم IPCC ارائه شده است، تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. این مدل، متشکل از شبکه‌بندی با ابعاد ۶۴\*۱۲۸ سلول (طول جغرافیایی \* عرض جغرافیایی) می‌باشد. داده‌های تاریخی این مدل از سال ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۵ میلادی، در اختیار می‌باشد. در این پژوهش نیز جهت ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده، از این مدل استفاده شده است.

### ۳-۲-۲- سناریوهای انتشار

پیش‌بینی‌های توسعه یافته مدل‌های گردش عمومی جو، قادر هستند تا تصویری شفاف از تغییرات اقلیم آینده کره زمین را در اختیار قرار دهند. این پیش‌بینی‌ها بر اساس سناریوهای مختلفی صورت می‌گیرد که هر کدام بیانگر وضعیت بخصوصی از تولید گازهای گلخانه‌ای و عوامل موثر بر کنترل تولید این گازها می‌باشد. هر یک از این سناریوها بر اساس فرضیات گوناگونی در ارتباط با رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تحول فناوری، سطح زندگی و گزینه‌های موجود تولید انرژی استوار می‌باشند که به آن‌ها سناریوهای انتشار اطلاق می‌گردد.

مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5)<sup>۱</sup> از سناریوهای جدید انتشار (RCPs)<sup>۲</sup> به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای بهره گرفته است.

---

<sup>۱</sup> Assessment Report

<sup>۲</sup> Representative Concentration Pathways

سناریوهای جدید انتشار شامل چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ میلادی، نام‌گذاری شده‌اند. این سناریوها بر اساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی، اقتصادی و خط مشی در آینده ارائه شده‌اند که قادرند در شرایط مختلف، منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطوح متفاوت و بروز تغییرات اقلیمی گردد. داده‌های سناریوی‌های RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ در اختیار می‌باشند و می‌توان آن‌ها را از سایت <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=pred-canesm2> بارگیری کرد. مشخصات این سناریوها به شرح زیر می‌باشد:

- RCP8.5: این سناریو به واسطه تیم مدل‌سازی MESSAGE موسسه IIASA به سرپرستی پروفیسور ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شده است. در صورت عدم اتخاذ هیچگونه سیاستی در راستای کاهش آثار تغییر اقلیم و همچنین مقابله با پیامدهای آن، پیش‌بینی شده که آب و هوای کره زمین در خط سیر انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. میزان جمعیت در سال ۲۱۰۰ در این سناریو، حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود. در این سناریو، میزان غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی، در حدود ۱۹۶۰ PPM تخمین زده شده است. ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. با توجه به میزان جمعیت پیش‌بینی شده در این سناریو و نیاز جمعیت ساکن در کره زمین به تامین انرژی، استفاده از انواع مختلف انرژی (به استثنای انرژی زیستی) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو بیش‌تر از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است.
- RCP6: سناریو انتشار RCP6 توسط گروه مدل‌سازی AIM در موسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن طراحی شده است. در این سناریو جمعیت جهان در حدود ۳ میلیارد نفر برآورد شده

است. میزان غلظت دی اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی PPM ۸۵۰ و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۶ وات بر مترمربع تخمین زده شده است. در این سناریو واداشت تابشی پس از سال ۲۱۰۰ میلادی به جهت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای، ثابت می‌ماند.

- RCP4.5: این سناریو توسط گروه مدلسازی MiniCAM طراحی شده است. میزان غلظت دی اکسید کربن در این سناریو تا سال ۲۱۰۰ میلادی در حدود PPM ۷۵۰ برآورد شده است و واداشت تابشی متأثر از گازهای گلخانه‌ای تا پیش از سال ۲۱۰۰، در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع خواهد ماند. در این سناریو، میزان رشد جمعیت کم‌تر از سناریوی RCP2.6 تخمین زده شده است، اما در دیگر پارامترهای موثر در تغییرات اقلیمی (مانند نرخ استفاده از انرژی‌های نو، رشد تکنولوژی و ...) نسبت به سناریوی RCP2.6 ضعیف‌تر در نظر گرفته شده است. در نتیجه سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت این سناریو در واداشتهای تابشی بیش از سناریوی RCP2.6 خواهد بود.

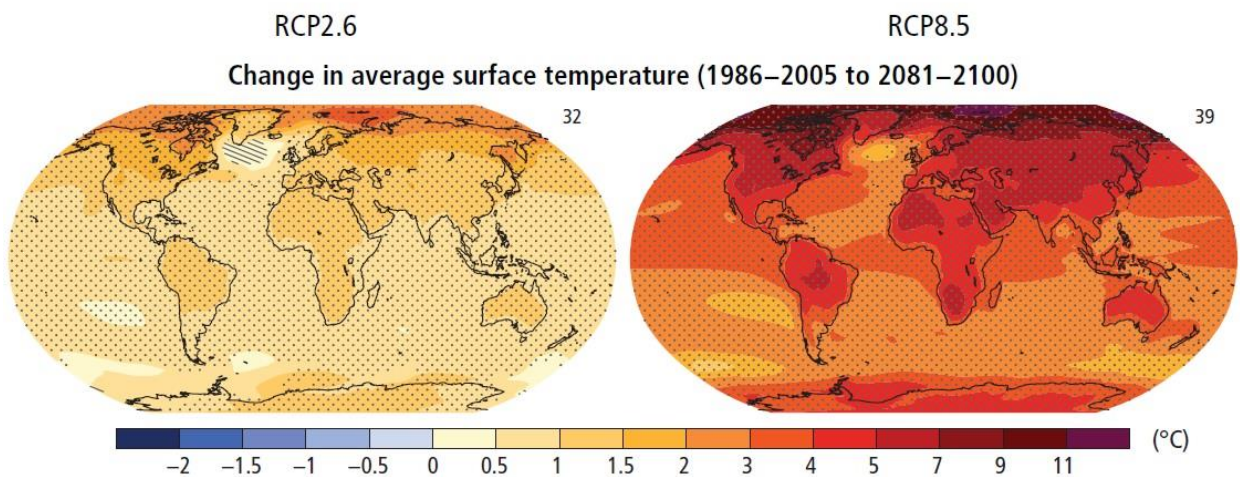
- RCP2.6: این سناریو به واسطه تیم مدلسازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. در این سناریو میزان جمعیت ساکن کره زمین تا سال ۲۱۰۰ میلادی در حدود ۷ میلیارد نفر برآورد شده است. میزان غلظت دی اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی در حدود PPM ۴۹۰ و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۲/۶ وات بر مترمربع تخمین زده شده است. در این سناریو به دلیل رشد تکنولوژی‌های جدید، به طور میزان استفاده از انرژی‌های نو، بیش از سایر سناریوها در نظر گرفته شده است. بر اساس این سناریو واداشت تابشی در اواسط قرن بیست و یکم به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. جهت دستیابی به این سطح واداشت تابشی بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابند (جعفرپور، ۱۳۹۴).

تغییرات پیش‌بینی شده در وضعیت آب و هوا تا اواسط قرن ۲۱، به طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تاثیر انتخاب یکی از انواع سناریوهای انتشار قرار دارد. جدول ۱-۳، متوسط افزایش دمای پیش‌بینی شده را برای تمامی سناریوهای RCP، در اواسط و اواخر قرن بیست و یکم نسبت به دوره تاریخی سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۰۵ نشان می‌دهد (IPCC, 2014).

جدول ۱-۳: میانگین جهانی افزایش دما در اواسط و اواخر قرن ۲۱ نسبت به سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۰۵

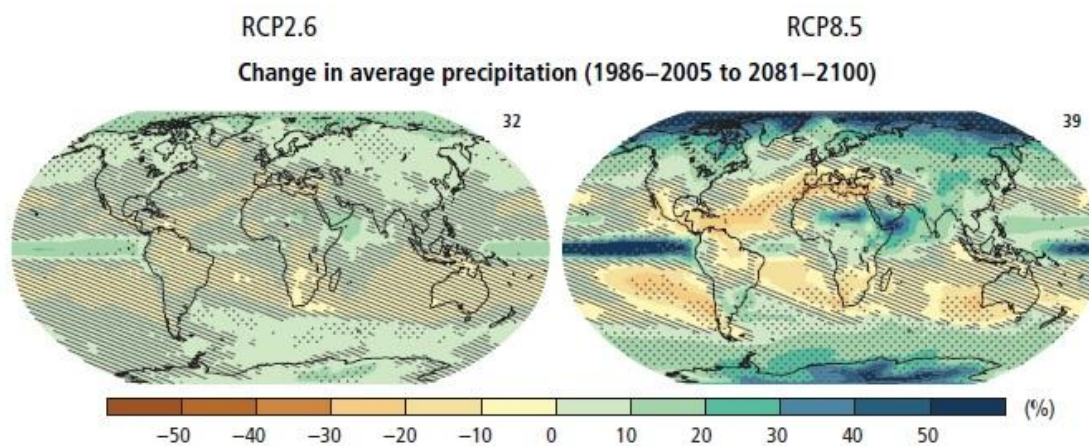
متوسط جهانی افزایش دمای (°C)	سناریو	۲۰۴۶-۲۰۶۵	۲۰۸۱-۲۱۰۰
	RCP2.6	۱	۱
	RCP4.5	۱/۴	۱/۸
	RCP6	۱/۳	۲/۲
	RCP8.5	۲	۳/۷

اغلب مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که متوسط سطح جهانی دما تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ بیش‌تر از ۱ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. البته با دید بدبینانه‌تر این میزان ۳/۷ درجه سانتی‌گراد خواهد شد. شکل ۱-۳ تغییرات متوسط دمای سالانه در سراسر جهان را تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵، برای دو سناریو خوش‌بینانه‌تر (RCP2.6) و همین‌طور بدبینانه‌تر (RCP8.5) را نشان می‌دهد (IPCC, 2014).



شکل ۱-۳: تغییرات متوسط دمای سالانه در سراسر جهان تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵

بر اساس پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی، مقدار متوسط بارش در سراسر جهان یکنواخت نخواهد بود. طبق سناریو RCP8.5، میانگین بارش سالانه در نواحی با عرض‌های جغرافیایی بالا و همچنین مناطق استوایی اقیانوس آرام افزایش خواهد یافت. در بسیاری از مناطق خشک در عرض‌های میانی، میانگین بارش سالانه کاهش می‌یابد این در حالی است که تحت سناریو RCP8.5 در مناطق مرطوب واقع در عرض‌های میانی، میانگین بارش سالانه افزایش خواهد داشت. شکل ۲-۳ تغییرات پیش‌بینی شده در متوسط مقدار بارش سالانه را تا پایان قرن ۲۱ برای سناریوهای RCP2.6 و همچنین RCP8.5 به نمایش می‌گذارد (IPCC, 2014).



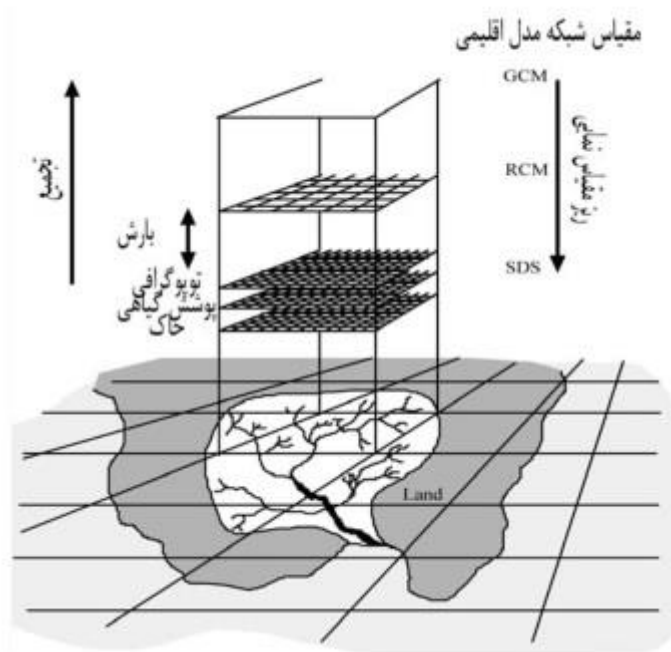
شکل ۲-۳: تغییرات متوسط میزان بارش در سراسر جهان تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵

در پژوهش حاضر، جهت پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در افق زمانی موردنظر از دو سناریو RCP8.5 و RCP4.5 استفاده شده است.

### ۳-۳- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گردش عمومی جو

حتی اگر مدل‌های اقلیم جهانی با دقت بسیار زیادی اجرا شوند، تحلیل دقیق مناطق و مکان‌ها با مقیاس کوچک‌تر، مستلزم ریزمقیاس‌نمایی نتایج مدل‌های اقلیمی خواهد بود. مدل‌های اقلیمی جهانی از وضوحی در حدود صدها کیلومتر برخوردارند در حالی که وضوح مدل‌های منطقه‌ای نزدیک به چند ده کیلومتر می‌باشد. با این وجود در بسیاری از پژوهش‌های ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، به داده‌های

اقلیمی یک نقطه (ایستگاه هواشناسی یا هیدرومتری) احتیاج است و نتایج به طور قابل توجهی به وضوح داده‌های ورودی حساس هستند (Wilby et al., 2004). شکل ۳-۳ نمایی از رویکرد کلی ریزمقیاس‌نمایی را به نمایش گذاشته است.



شکل ۳-۳: طرح رویکرد کلی ریزمقیاس‌نمایی (قاله‌ری، ۱۳۹۳)

به صورت کلی چهار روش جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی مدل‌های GCM وجود دارد، این روش‌ها عبارت‌اند از استفاده از اطلاعات سلول اصلی (روش تناسبی)، درون‌یابی اطلاعات سلول‌های مجاور، روش‌های دینامیکی<sup>۱</sup> و روش‌های آماری<sup>۲</sup>.

۱. استفاده از اطلاعات سلول اصلی (روش تناسبی): در این روش پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM از اطلاعات مربوط به سلولی که منطقه مورد مطالعه در آن منطقه قرار می‌گیرد، استخراج می‌گردد.

<sup>۱</sup> Dynamical Downscaling Method (DD)  
<sup>۲</sup> Statistical Downscaling Method (SD)

۲. درون‌یابی اطلاعات سلول‌های مجاور: جهت رفع عدم پیوستگی در تغییرات میان متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده در سایت‌های نزدیک به هم که در دو سلول محاسباتی متفاوت قرار می‌گیرند، از این روش استفاده می‌شود (تابان، ۱۳۹۲).

۳. روش‌های دینامیکی: این روش‌ها شامل حل صریح سیستم‌ها بر مبنای فرایندهای فیزیکی-دینامیکی آن‌ها می‌باشد. در این روش‌ها مدل‌های گردش عمومی، شرایط مرزی را برای مدل‌های ترکیبی جو-زمین با وضوح مکانی بالا، مهیا می‌سازند. هدف در این دیدگاه، توسعه و کاربرد مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای<sup>۱</sup> RCMS و یا مدل‌های با مقیاس محدود<sup>۲</sup> LAMS می‌باشد. دیدگاه دینامیکی خود شامل سه روش می‌باشد:

- روش اجرای یک مدل محدود با مقیاس منطقه‌ای اما با شرایط جغرافیایی و مرزی مدل‌های گردش عمومی

- روش اجرای تجارب در مقیاس جهانی با مدل‌هایی با قدرت تفکیک بالا موسوم به مدل‌های گردش عمومی اتمسفر<sup>۳</sup> (AOGCM) با شرایط اولیه داده‌های مدل‌های گردش عمومی

- بکارگیری مدل‌های جهانی با قدرت تفکیک متغیر با بالاترین وضوح مکانی برای منطقه هدف

۴. روش‌های آماری: این روش‌ها با هدف گسترش روابط میان متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس و متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای و همچنین شناسایی روابط حاکم میان سیستم‌ها با توجه به داده‌های مشاهداتی، توسعه یافته‌اند. در واقع این مدل‌ها، روابط میان پیش‌بینی‌کننده‌ها<sup>۴</sup> که همان متغیرهای جوی بزرگ‌مقیاس هستند و پیش‌بینی شونده‌ها<sup>۵</sup> که همان متغیرهای سطحی محلی می‌باشند را گسترش می‌دهند و در نهایت متغیرهای محلی اقلیمی را برای آینده پیش‌بینی می‌کنند. در این دیدگاه، روابط نهایی غالباً از تحلیل‌های رگرسیونی به دست

---

<sup>۱</sup> Regional Circulation Models

<sup>۲</sup> Limited-Area Models

<sup>۳</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Model

<sup>۴</sup> predictors

<sup>۵</sup> Predictands

می‌آیند. نحوه انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها و همچنین تکنیک‌های مورد استفاده، از جمله مهم‌ترین عوامل ایجاد عدم قطعیت در این روش‌ها به حساب می‌آیند (جمالی، ۱۳۹۱).

جدول ۳-۲، مقایسه دو روش ریزمقیاس‌سازی دینامیکی و آماری و نقاط ضعف و قوت این دو روش را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲: مقایسه دو روش ریزمقیاس‌سازی دینامیکی و آماری (Wilby et al., 2004)

شیوه مورد استفاده	نقاط قوت	نقاط ضعف
ریزمقیاس‌سازی آماری	تولید داده‌های اقلیمی ایستگاهی هزینه اندک محاسبات ساده آماری امکان تحلیل ریسک و عدم قطعیت دسته سناریوهای اقلیمی امکان تولید انواع پیش‌بینی کننده‌های مورد نیاز	وابستگی به واقعی بودن داده‌های GCM تاثیرگذار بودن اندازه و موقعیت حوضه نیاز به داده‌های با کیفیت برای کالیبراسیون ناپایداری روابط پیش‌بینی کننده‌ها و پیش‌بینی شونده‌ها تاثیر انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده نیاز به تجربه بالا نتایج بازخورد خوبی با GCM ها ندارد
ریزمقیاس‌سازی دینامیکی	داده‌های اقلیمی با وضوح مکانی ۱۰ تا ۵۰ کیلومتر پاسخ‌های فیزیکی به متغیرهای اقلیمی خارجی بازتحلیل فرایندهای اتمسفریک مانند بارش سازگاری با مدل‌های گردش عمومی	وابستگی به واقعی بودن داده‌های GCM تاثیرگذار بودن اندازه و موقعیت حوضه نیاز به محاسبات طولانی دسته سناریوهای اقلیمی به ندرت تولید می‌شوند تاثیر شرایط مرزی اولیه بر نتایج عدم امکان انتقال به مناطق جدید

### ۳-۳-۱- مدل SDSM

SDSM یک مدل آماری برای کاهش مقیاس خروجی‌های روزانه مدل‌های گردش عمومی است. این مدل از طریق برآزش مدل‌های رگرسیونی خطی چندمتغیره و با نسبت دادن اعداد تصادفی متفاوت و مقایسه آن‌ها با مقادیر خروجی مدل رگرسیونی، اقدام به ایجاد سری‌های آب و هوایی<sup>۱</sup> مختلف می‌کند. شکل ۳-۴ ساختار کلی SDSM را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در مدل

<sup>۱</sup> Ensembles



آماري SDSM پس از انتخاب متغير پيش‌بيني شونده (مانند دما)، پيشگوها از ميان پيشگوهاي NCEP، ساختار مدل تعيين و سپس مدل كالبره مي‌شود. در مرحله بعد، کاهش مقياس به دو صورت انجام مي‌پذيرد. در صورت استفاده از پيشگوهاي NCEP، مدل به توليد آب و هوا<sup>۱</sup> مي‌پردازد. بدین مفهوم که سری‌های پيش‌بيني شونده در دوره‌ای که داده‌های مشاهداتی برای آن موجود است توليد مي‌کند. اما در صورت استفاده از پيشگوهاي GCM، مدل به توليد سناريو<sup>۲</sup> يا به بيان ديگر به توليد سناريوهاي پيش‌بيني شونده برای دوره‌های آینده و يا دوره‌هایی که فاقد آمار مي‌باشند، مي‌پردازد.

برنامه SDSM فرايند ريزمقياس‌نمائي سری‌های آب و هوایی روزانه را به صورت جداگانه به هفت مرحله خاص به شرح زیر تقسيم مي‌کند: (این هفت مرحله به ترتيب اجرا، در شکل ۳-۴ به نمايش گذاشته شده‌اند)

۱. کنترل کیفیت<sup>۳</sup> و تبديل داده‌ها<sup>۴</sup>

۲. غربالگری متغيرهاي پيش‌بيني کننده<sup>۵</sup>

۳. كالبره کردن<sup>۶</sup> مدل

۴. توليد داده‌های آب و هوا (با استفاده از پيش‌بيني کننده‌های مشاهده شده)

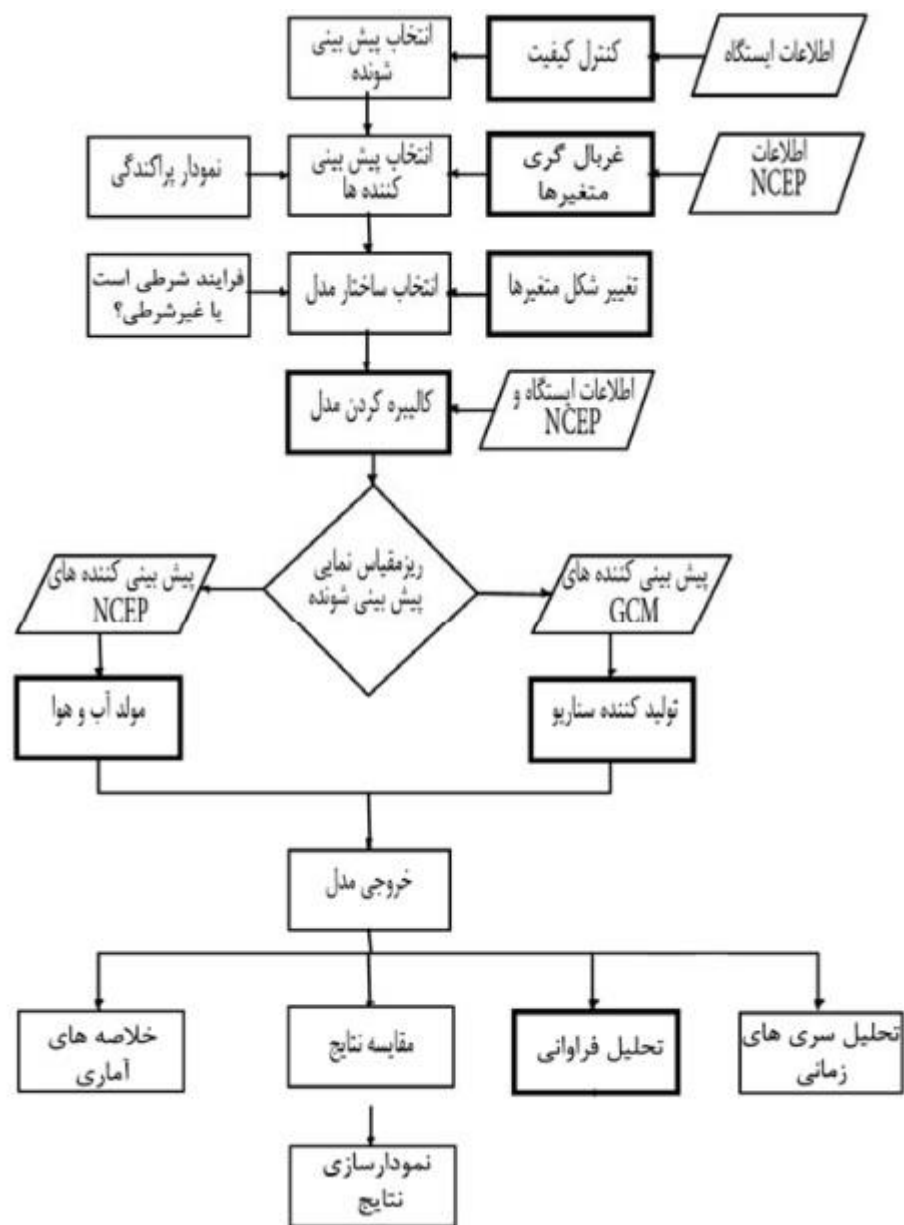
۵. تحليل‌های آماری

۶. نمودارسازی برای خروجی مدل

۷. توليد سناريو (با استفاده از پيش‌بيني کننده‌های مدل اقليمي)

---

<sup>۲</sup> Weather Generation  
<sup>۳</sup> Scenario Generation  
<sup>۴</sup> Quality Control  
<sup>۵</sup> Transform Data  
<sup>۶</sup> Screen Variables  
<sup>۷</sup> Calibration



شکل ۳-۴: تولید سناریوی اقلیمی توسط مدل SDSM (قاله‌ری، ۱۳۹۳)

### ۳-۳-۱-۱- کنترل کیفیت و تبدیل داده‌ها

تعداد اندکی از ایستگاه‌های آب و هواشناسی دارای داده‌های ۱۰۰٪ کامل و دقیق هستند. غالباً در بیش‌تر مواقع، نیاز به ترمیم و یا بازسازی داده‌های مفقود و یا غیردقیق می‌باشد. تست‌های ساده کنترل کیفیت در SDSM، ما را در شناسایی خطاهای اطلاعاتی و کدبندی داده‌های مفقود پیش از کالیبره کردن کمک می‌کند.

ممکن است در بسیاری از موارد لازم باشد تا پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌شونده‌ها را پیش از کالیبره کردن مدل، تغییر شکل داد. در فرایند تبدیل، مدل فایل‌های اطلاعاتی خاصی را گرفته و تغییرات انتخابی را برای آن‌ها اعمال می‌کند.

### ۳-۱-۳-۲- غربالگری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده

شناسایی رابطه تجربی میان پیش‌بینی‌کننده‌های شبکه‌بندی هم‌چون میانگین فشار سطح دریا و پیش‌بینی‌شونده‌های یک محل مانند بارندگی ایستگاه، در کانون همه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری قرار دارد. هدف اصلی این فرایند، کمک به کاربر در انتخاب مناسب‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده می‌باشد. این فرایند، یکی از مشکل‌ترین مراحل در توسعه هرگونه مدل ریزمقیاس‌نمایی می‌باشد، زیرا نحوه انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها تعیین‌کننده نوع سناریوی اقلیمی، ریزمقیاس شده است. فرایند انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها، فرایندی بسیار پیچیده است زیرا متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی، دارای قدرت تشخیص متفاوتی می‌باشند. غربالگری متغیرها، ارزیابی تغییرات فصلی را در پیش‌بینی‌کننده‌ها، ممکن می‌سازد.

### ۳-۱-۳-۳- کالیبره کردن مدل

فرایند کالیبره کردن مدل، یک متغیر پیش‌بینی‌شونده مشخص را همراه با مجموعه‌ای از اطلاعات پیش‌بینی‌کننده‌ها از کاربر دریافت و متغیرهای معادلات رگرسیون خطی چندگانه را از طریق یک الگوریتم بهینه‌سازی محاسبه می‌کند. مشخصات ساختار مدل، از جمله مقیاس آن (ماهانه، فصلی یا سالانه)، شرطی یا غیرشرطی بودن و همچنین سایر مشخصات، توسط کاربر تعیین خواهد شد. در مدل‌های غیرشرطی، یک رابطه مستقیم میان پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌شونده وجود دارد در صورتی که در مدل‌های شرطی، میان پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌شونده، فرایندهای واسطه‌ای وجود دارد.

### ۳-۳-۱-۴- مولد آب و هوا

مولد آب و هوا، مجموعه‌ای از سری‌های آب و هوایی روزانه ساختگی متغیرهای پیش‌بینی کننده جوی معینی را تولید می‌کند. در این مرحله، کاربر مدل کالیبره شده را انتخاب کرده و SDSM به طور خودکار، تمامی پیش‌بینی کننده‌های لازم را برای وزن‌دهی مدل رگرسیونی به هم پیوند می‌دهد. سری‌های زمانی ساخته‌شده در فایل‌های خاص خروجی برای تحلیل‌های بعدی آماری و یا مدل‌سازی پیامدها نوشته می‌شود.

### ۳-۳-۱-۵- تحلیل داده‌ها

SDSM ابزارهایی را برای تجزیه و تحلیل سناریوهای به دست آمده از SDSM و داده‌های اقلیمی مشاهده شده فراهم می‌کند. به علاوه SDSM یک سری درخواست‌های دیگر را نیز نمایش می‌دهد. این درخواست‌ها به صورت پیش‌فرض، شامل آماره‌های میانگین‌ها، مجموع‌ها، حداقل‌ها، حداکثرها و واریانس‌های ماهانه، فصلی و سالانه می‌باشد.

### ۳-۳-۱-۶- تحلیل نموداری

سه ابزار تحلیل گرافیکی توسط نرم‌افزار SDSM4.2 ارائه می‌شود. در این مرحله، نرم‌افزار به کاربر اجازه می‌دهد تا آماره‌های تولیدشده را رسم نماید. با مشخص کردن فایل ورودی، می‌توان از نمودارهای خطی یا میله‌ای برای نمایش داده‌ها استفاده نمود. گزینه‌های مختلف به کاربر اجازه می‌دهد تا هر مجموعه داده را به صورت هم‌زمان مقایسه نماید، بنابراین امکان ارزیابی سریع مقادیر ریزمقیاس شده نسبت به مقادیر مشاهده شده یا سناریوی حاضر نسبت به آینده امکان‌پذیر است.

### ۳-۳-۱-۷- تولید سناریو

سرانجام عملگر مولد سناریو، مجموعه‌ای از سری‌های آب و هوای روزانه شبیه‌سازی شده را به کمک متغیرهای پیش‌بینی کننده جوی تولید می‌کند که توسط یک مدل اقلیمی (برای سنجش اقلیم آینده

و اقلیم حاضر) حمایت می‌شود. این مرحله مشابه مرحله مولد آب و هواست با این تفاوت که در آن به جای متغیرهای NCEP از متغیرهای GCM استفاده می‌شود. در این صورت امکان کاهش مقیاس برای دوره‌های آینده نیز فراهم می‌شود.

در پژوهش حاضر، جهت ریزمقیاس‌سازی متغیرهای اقلیمی از مدل آماری SDSM استفاده شده است.

### ۳-۴- شبیه‌سازی میزان رواناب به کمک مدل HEC-HMS<sup>۱</sup>

#### ۳-۴-۱- مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژیکی

مدل‌های شبیه‌سازی به دو گروه اصلی فیزیکی<sup>۲</sup> و ریاضی<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند:

- مدل‌های فیزیکی: مدل‌های فیزیکی ارائه‌ای فیزیکی از دنیای واقعی هستند به گونه‌ای که در ساختار، ساده‌تر هستند ولی خصوصیات مشابه با دنیای واقعی دارند. از مدل‌های فیزیکی می‌توان به حوضه‌های آبخیز، شبیه‌سازهای باران و حوضه‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. از جمله محدودیت‌های این مدل‌ها تغییرناپذیری، انعطاف بسیار کم، کارایی اندک و پرهزینه بودن ساخت آن‌ها می‌باشد.
- مدل‌های ریاضی: مدل‌های ریاضی برداشتی ذهنی از دنیای واقعی هستند که خصوصیات مهم ساختاری مهم را حفظ می‌کنند. از آن‌جا که مدل‌های ریاضی غالباً به واسطه کامپیوتر اجرا می‌شوند، مدل‌های کامپیوتری نامیده می‌شوند. مدل‌های ریاضی به آسانی در دسترس قرار می‌گیرند و از لحاظ تغییر ورودی‌ها بسیار انعطاف‌پذیرند و نسبتاً کم‌هزینه نیز می‌باشند. با توجه به مزایای متعدد این مدل‌ها، طبیعی است که از مدل‌های ریاضی برای حل مسائل حوضه‌ها بیشتر استفاده شود. مدل‌های ریاضی می‌توانند قطعی<sup>۴</sup> یا احتمالاتی<sup>۵</sup>، خطی<sup>۱</sup> یا

<sup>۱</sup> Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System

<sup>۲</sup> Physical

<sup>۳</sup> Mathematical

<sup>۴</sup> Deterministic

<sup>۵</sup> Probabilistic

غیرخطی<sup>۲</sup>، ایستا<sup>۳</sup> یا غیرایستا<sup>۴</sup>، یکپارچه<sup>۵</sup> یا توزیعی<sup>۶</sup>، تحلیلی<sup>۷</sup> یا عددی<sup>۸</sup> و پیوسته<sup>۹</sup> یا تک-  
واقعه‌ای<sup>۱۰</sup> باشند.

از مهم‌ترین خصوصیات یک مدل، یکپارچه یا توزیعی بودن و همچنین پیوسته یا تک‌واقعه‌ای بودن آن می‌باشد که ویژگی‌های هر یک از آن‌ها به تفصیل ارائه شده است:

❖ مدل یکپارچه: در اصطلاح مدل یکپارچه به مدلی اطلاق می‌شود که از آن، پارامترها در داخل حوضه یکسان در نظر گرفته می‌شود، به عبارتی دیگر، کل حوضه به عنوان یک واحد یکپارچه و با پارامترهای یکنواخت شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین پاسخ حوضه، تنها بر خروجی حوضه برآورد می‌شود بدون آن که پاسخ در واحدهای کوچک‌تر در داخل حوضه به صورت صحیح به دست آید. هیدروگراف واحد نوعی از مدل‌های یکپارچه است.

❖ مدل توزیعی: مدلی است که در آن پارامترها می‌توانند در داخل حوضه، متغیر باشند. به عبارت دیگر، در این مدل می‌توان تغییرات مکانی پارامترها را در داخل حوضه در نظر گرفت. بنابراین یک مدل توزیعی می‌تواند پاسخ‌ها را در واحدهای داخل حوضه نیز محاسبه کند. در نتیجه یک مدل توزیعی، نسبت به یک مدل یکپارچه می‌تواند جزئیات بیشتری از فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبریز را شبیه‌سازی نماید و در اختیار کاربر قرار دهد. مدل‌های توزیعی، امکان شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش و همچنین تغییرات مکانی سایر عوامل هیدرولوژیکی را میسر می‌سازد. با این وجود برای آن‌که شبیه‌سازی توزیعی معنادار باشد، باید کیفیت و کمیت داده‌های در دسترس متناسب با توانایی مدل در شبیه‌سازی جزئیات باشد.

---

<sup>۳</sup> Linear  
<sup>۴</sup> NonLinear  
<sup>۵</sup> Stationary  
<sup>۶</sup> NonStationary  
<sup>۷</sup> Lumped  
<sup>۸</sup> Distributed  
<sup>۹</sup> Analytical  
<sup>۱۰</sup> Numerical  
<sup>۱۱</sup> Continuous  
<sup>۱۲</sup> Single Event

❖ مدل تک‌واقعه‌ای: مدل‌های تک‌واقعه‌ای، عمدتاً کوتاه‌مدت هستند و جهت شبیه‌سازی وقایع منفرد بارش-رواناب طراحی شده‌اند. هدف مدل‌های تک‌واقعه‌ای پیش‌بینی رواناب مستقیم است و تأکید این مدل‌ها بر نفوذ و رواناب سطحی می‌باشد. مدل‌های تک‌واقعه‌ای در محاسبه جریان سیلاب به کار می‌روند، به‌خصوص در مواردی که سهم عمده رواناب کل، مربوط به رواناب مستقیم باشد. طراحی مدل‌های تک‌واقعه‌ای به گونه‌ای نیست که بتوانند انتقال رطوبت بین دو بارش منفرد را در نظر بگیرند. بنابراین به منظور شبیه‌سازی جریان در مواقعی که بارش اتفاق نمی‌افتد (مانند جریان روزانه در کل سال)، نمی‌توان از این مدل‌ها استفاده نمود.

❖ مدل پیوسته: مدل‌های پیوسته، بر خلاف مدل‌های تک‌واقعه‌ای، مولفه‌های جریان شامل رواناب مستقیم (رواناب سطحی) و جریان غیرمستقیم شامل جریان زیرسطحی و جریان آب-های زیرزمینی را به صورت صریح محاسبه می‌کند. مدل‌های پیوسته، فرایند درازمدت هیدرولوژیکی مانند تبخیر و تعرق که در زمان‌های بدون بارش بر روی انتقال رطوبت و موازنه رطوبت موثرند، را در نظر می‌گیرند. هدف از بکارگیری مدل‌های پیوسته، محاسبه موازنه آب و رطوبت در سراسر حوضه، در یک دوره طولانی‌مدت است. در مجموع، مدل‌های پیوسته جهت شبیه‌سازی جریان‌های روزانه، ماهانه و فصلی بسیار مناسب می‌باشند.

کارایی هر مدل بستگی به روش‌های مورد استفاده در آن دارد اما به طور کلی اثبات برتری یک روش بر روش دیگر، بدون انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در حوضه‌های مورد مطالعه، امکان‌پذیر نمی‌باشد. عمدتاً تمایل کاربران مدل‌های بارش-رواناب این است که با حداقل داده‌های موجود به دقیق‌ترین پاسخ‌ها و تخمین‌ها دست یابند. بنابراین در گزینش مدل مناسب، تعداد و پیچیدگی مراحل مختلف لزوماً گویای مناسب بودن آن نیست. در حالت کلی، معیارهای انتخاب مدل‌های بارش-رواناب عبارت‌اند از:

۱. مبانی تئوری

۲. داده‌های موردنیاز مدل و داده‌های در دسترس و قابل اعتماد حوضه مورد مطالعه

۳. سهولت کاربرد

۴. هزینه دسترسی به مدل

۵. سوابق کاربرد مدل در برآورد پارامترها

۶. تجربه کاربر

۷. استحکام مدل

۸. اندازه حوضه

در مجموع، با تلاش برای ارضای غالب معیارهای ذکر شده و به ویژه با توجه به سوابق بسیار وسیع کاربرد مدل جهت پیش‌بینی جریان رواناب، بکارگیری این مدل کامپیوتری در بیش‌تر موارد توصیه شده است. با این وجود این مدل محدودیت‌هایی نیز دارد؛ یکی از معایب مدل HEC-HMS این است که فیزیوگرافی حوضه آبریز ابتدا باید به روش‌های سنتی و یا به کمک نرم‌افزارهایی مانند<sup>۱</sup> ArcGIS، Auto Cad و Excel (عملیات محاسباتی) به صورت جداگانه انجام شود و سپس داده‌ها به عنوان ورودی مدل HMS استفاده شود. به عنوان مثال فاکتورهایی مانند مساحت زیرحوضه‌ها<sup>۲</sup>، شماره منحنی<sup>۳</sup>، ارتفاع و شیب حوضه‌ها<sup>۴</sup> و آبره‌ها می‌بایست پیش از ایجاد مدل HMS محاسبه شوند. این محاسبات که باید خارج از مدل HMS انجام پذیرند، بسیار وقت‌گیر هستند و از دقت اندکی برخوردار می‌باشند.

---

<sup>۱</sup> Geographic Information System

<sup>۲</sup> Subbasins Area

<sup>۳</sup> Curve Number (CN)

<sup>۴</sup> Basins Slope and Elevation



به منظور برطرف کردن معایبی که پیش‌تر عنوان شدند و همچنین افزایش دقت و کارایی مدل HMS، مدل جانبی<sup>۱</sup> HEC-GeoHMS با همکاری مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا (HEC) و شرکت ESRI<sup>۲</sup> (تولیدکننده نرم‌افزارهای مکانی GIS) طراحی و تولید شده است.

### ۳-۴-۲- مدل‌ساز هیدرولوژیکی HEC-GeoHMS

نرم‌افزار HEC-GeoHMS که یک مدل‌ساز الحاقی در محیط ArcGIS است به عنوان پیش-پردازش مدل HMS در سه قسمت مدل حوضه، مدل هواشناسی و مدل کنترل مشخصه مورد استفاده قرار می‌گیرد. HEC-GeoHMS با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS و ابزار آنالیزور مکانی جهت توسعه تعدادی ورودی مدل‌ساز بارش-رواناب هیدرولوژیکی سیستم مرکز مهندسی هیدرولوژیکی آمریکا یا همان HEC-HMS ایجاد گردیده است. در واقع عملیات در این الحاقی به گونه‌ای است که با تجزیه و تحلیل داده‌های دیجیتالی شده، HEC-GeoHMS مسیرهای زهکشی و مرزهای حوضه را تشخیص و به یک ساختار داده‌های هیدرولوژیک که نشان‌دهنده شبکه زهکشی باشد تبدیل می‌کند. این برنامه این اجازه را به کاربر می‌دهد تا به تجسم اطلاعات مکانی، مستندسازی ویژگی‌ها و اجزای حوضه آبریز، انجام تجزیه و تحلیل فضایی یا مکانی ترسیم زیرحوضه‌ها و رودخانه‌ها بپردازد. در واقع به بیانی دیگر الحاقی HEC-GeoHMS به عنوان یک واسط قدرتمند مدل‌سازی در مباحث آب‌های سطحی، دارای توانمندی ایجاد مدل‌های ورودی به نرم‌افزار HEC-HMS بر اساس استانداردهای تعریف‌شده است.

### ۳-۴-۳- مدل بارش-رواناب HEC-HMS

سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی به منظور شبیه‌سازی فرایندهای بارش-رواناب در سیستم حوضه‌های آبخیز طراحی شده است. طراحی و تولید این مدل، با هدف بهره‌گیری از آن در محدوده گسترده‌ای از نواحی جغرافیایی جهت حل دامنه وسیعی از مسائل شامل منابع آب و هیدرولوژیکی حوضه‌های

<sup>۱</sup> Hydrologic Engineering Center- Geospatial Hydrologic Modeling System  
<sup>۲</sup> Environmental Systems Research Institute

بزرگ، رواناب و سیلاب حوضه‌های آبخیز طبیعی یا شهری کوچک صورت گرفته است. هیدروگراف-های محاسبه شده توسط این مدل به صورت مستقیم یا در تلفیق با سایر نرم‌افزارها جهت دستیابی به اهداف مختلف مطالعات نظیر آبرسانی، زهکشی شهری، پیش‌بینی سیل و دبی جریان، تاثیر تغییر کاربری اراضی، طراحی سرریز سدها، مطالعات کنترل سیلاب و بهره‌برداری از سیستم مخازن به کار می‌رود.

### ۳-۴-۱- تاریخچه مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS، مدل توسعه یافته و مدل تحت ویندوز مدل HEC-1 است. مدل HEC-1 نخست در سال ۱۹۶۷ توسط Leo R. Bread و دیگر اعضای مرکز هیدرولوژی مهندسی توسعه یافت. اولین نسخه از این مدل در سال ۱۹۶۸ منتشر گردید. این مدل در سال‌های ۱۹۶۹ و ۱۹۷۰ توسعه و مجدداً انتشار یافت. اولین نسخه نرم‌افزار، از چندین برنامه کوچک‌تر که در گذشته به طور مجزا مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفتند، تشکیل می‌شد.

جهت ساده کردن ورودی‌های موردنیاز و همچنین معنی‌دار کردن هرچه بیشتر خروجی‌های مدل، ساختار فرمت‌های ورودی و خروجی به طور کامل تغییر یافت تا این‌که از نسخه سال ۱۹۷۰، یک نسخه اصلی در سال ۱۹۷۳ حاصل گردید. در سال ۱۹۸۱ توانایی‌های محاسباتی ویژه هم‌چون شکست سد، بهینه‌سازی پروژه و موج سینماتیک با هم ترکیب و به مدل اضافه شدند. این امر منجر به تولید یک بسته نرم‌افزاری با روش آسان گردید. در اواخر سال ۱۹۸۴ یک نسخه میکرو کامپیوتری (نسخه مخصوص کامپیوترهای شخصی) از این نرم‌افزار توسعه یافت. این مدل قادر به بازسازی سیلاب‌ها با استفاده از اطلاعات هواشناسی بود. اصول محاسباتی بارش-رواناب این مدل، روش یکپارچه و روش نیمه‌توزیعی موج سینماتیک بود. از نظر به زمانی، مدل از نوع رویدادی و تنها قادر به شبیه‌سازی رواناب حوضه، فقط در صورت وقوع بارش و ایجاد سیل بود. به همین جهت این مدل به نرم‌افزار سیل

معروف است. برای محاسبه رواناب سطحی حوضه ناشی از بارش موثر، مدل HEC-1 از روش‌های شناخته شده هیدروگراف واحد استفاده نمود.

آخرین نسخه HEC-1 (نسخه ۴)، پیشرفت‌ها و توسعه‌های فراوانی را در زمینه توانایی‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی همراه با واسطه‌ها و همچنین قابلیت ذخیره سازی داده در سیستم ذخیره‌سازی داده‌ها (DSS<sup>۱</sup>) ارائه نمود. توانایی DSS امکان ذخیره و بازیابی داده‌ها برای برنامه‌های کامپیوتری دیگر و همچنین ایجاد جداول و نمودارهای باکیفیت برای گزارشات فراهم می‌کرد.

در سال ۱۹۹۴، مدل HEC-HMS جایگزین مدل HEC-1 گردید. شبیه‌سازی پیوسته هیدروگراف در دوره‌های زمانی طولانی و محاسبه توزیعی رواناب، از امکانات جدید این مدل محسوب می‌شدند. این برنامه شامل ارتباط گرافیکی با کاربر، اجزای تحلیل هیدرولوژیکی جامع، ابزار ذخیره و مدیریت داده-ها، امکانات گرافیکی و تهیه گزارش بود. نسخه‌های اولیه مدل HEC-HMS فاقد قابلیت شبیه‌سازی ذوب برف بود که از نواقص عمده مدل با شمار می‌رفت. در نسخه‌های اخیر مدل، علاوه بر این که این نقص برطرف گردیده است، از روش‌های غیرخطی برآورد ذوب برف نیز بهره گرفته شده است.

### ۳-۴-۲-۳-۲-۳-۲-۳-۲ HEC-HMS مدل اجزای

مدل HEC-HMS در واقع مجموعه‌ای مدل‌های ریاضی تلفات، تبدیل بارش-رواناب در زیرحوضه‌ها و روندیابی جریان در رودخانه‌ها، مخازن و سازه‌های آبی است. این نرم‌افزار مشتمل بر یک برنامه اصلی و پنج زیربرنامه می‌باشد. دو زیربرنامه، وظیفه بهینه‌سازی هیدروگراف واحد، مقدار تلفات آب یا پارامترهای روندیابی جریان سطحی را در مرحله واسنجی<sup>۲</sup> اتوماتیک به عهده دارند. سایر زیربرنامه‌ها نیز محاسبه هیدروگراف واحد، روندیابی و ترکیب هیدروگراف‌ها را بر عهده دارند. در این مدل شبیه-سازی بارش-رواناب به صورت سیستمی از اجزای دارای ارتباطات داخلی صورت می‌گیرد که هر جز

---

<sup>۱</sup> Data Storage System  
<sup>۲</sup> Calibration

یک جنبه از فرایند بارش-رواناب را در یک زیرحوضه یا زیرناحیه شبیه‌سازی می‌کند. به صورت کلی این مدل دارای چهار بخش اصلی می‌باشد که عبارت‌اند از:

۱. بخش شبیه‌سازی اجزای حوضه

۲. بخش تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی

۳. بخش ویژگی‌های کنترلی

۴. بخش تخمین پارامترها

### ۳-۴-۳-۱- شبیه‌سازی اجزای حوضه

در این بخش عناصر هیدرولوژیکی حوضه و نحوه ارتباطات این عناصر با یکدیگر می‌شوند. عناصر هیدرولوژیکی شامل زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها، مخازن، اتصالات (تقاطع‌ها)، سازه‌های انحراف آب، چشمه‌ها و چاه‌ها می‌باشند که در این بخش باید تعداد، مشخصات و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر مشخص گردد.

- زیرحوضه‌ها: هر حوضه به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود که توپولوژی و نحوه ارتباط مکانی آن‌ها در محیط گرافیکی مدل ساخته می‌شود. ترکیب هیدروگراف خروجی زیرحوضه‌ها پس از روندیابی در آبراهه‌ها، هیدروگراف کل حوضه را به وجود می‌آورد. هر زیرحوضه به نوبه خود، یک حوضه کامل محسوب می‌شود، فرایندهای تلفات، تبدیل بارش خالص به رواناب و جریان پایه را در بر می‌گیرد. در هر زیرحوضه تنها می‌توان یک روش تلفات، یک روش تبدیل بارش خالص به رواناب و یک روش جریان پایه را فعال نمود.

- روش‌های محاسبه تلفات زیرحوضه‌ها: در مدل مذکور سطح یک حوضه به دو قسمت نفوذناپذیر پیوسته مستقیم و نفوذپذیر، تقسیم می‌شود. سطح نفوذناپذیر پیوسته مستقیم به بخشی از حوضه اطلاق می‌شود که در آن کل بارش بدون هیچ‌گونه نفوذ، گیرش گیاهی (برگاب)، تبخیر و سایر تلفات به رواناب تبدیل می‌شود. مقدار سطح نفوذناپذیر پیوسته یک زیرحوضه به صورت درصد نفوذناپذیری مشخص می‌شود. بارش درسطوح نفوذناپذیر در

معرض تلفات قرار دارد. انواع روش‌های مختلف محاسبه تلفات بارش در مدل HEC-HMS

عبارت‌اند از:

- روش کمبود و ثابت<sup>۱</sup>
- روش کمبود و ثابت شبکه‌ای<sup>۲</sup>
- روش گرین-امپت<sup>۳</sup>
- روش اولیه و ثابت<sup>۴</sup>
- روش عدد منحنی SCS<sup>۵</sup>
- روش محاسبه رطوبت خاک<sup>۶</sup>
- روش عدد منحنی SCS شبکه‌ای<sup>۷</sup>
- روش محاسبه رطوبت خاک شبکه‌ای<sup>۸</sup>
- روش نفوذنمایی<sup>۹</sup>
- روش اسمیت-پارلنگ<sup>۱۰</sup>

در پژوهش حاضر، جهت محاسبه تلفات بارش، از روش Soil Moisture Accounting یا همان روش محاسبه رطوبت خاک استفاده شده است.

• روش‌های تبدیل بارش خالص به رواناب: رواناب مستقیم هر زیرحوضه پس از کسر تلفات را

می‌توان توسط یکی از شش روش زیر در مدل، شبیه‌سازی نمود.

- روش هیدروگراف واحد کلارک<sup>۱</sup>

---

<sup>۱</sup> Deficit and Constant

<sup>۲</sup> Gridded Deficit and Constant

<sup>۳</sup> Green and Ampt

<sup>۴</sup> Initial and Constant

<sup>۵</sup> SCS Curve Number

<sup>۶</sup> Soil Moisture Accounting

<sup>۷</sup> Gridded SCS Curve Number

<sup>۸</sup> Gridded Soil Moisture Accounting

<sup>۹</sup> Exponential

<sup>۱۰</sup> Smith-Parlange

- روش هیدروگراف واحد اشنايدر<sup>۲</sup>
- روش هیدروگراف واحد SCS<sup>۳</sup>
- روش هیدروگراف واحد معرفی شده توسط کاربر<sup>۴</sup>
- روش موج سینماتیک<sup>۵</sup>
- روش توزیعی کلارک اصلاح شده<sup>۶</sup>

در پژوهش پیش رو، به منظور تبدیل بارش خالص به رواناب، روش Clark Unit Hydrograph یا همان روش هیدروگراف واحد کلارک مورد استفاده قرار گرفته است.

- جریان پایه: دو مولفه هیدروگراف جریان عبارت‌اند از رواناب مستقیم سریع حاصل از بارش و جریان پایه. به رواناب پایدار حاصل از بارش‌های قبلی که به صورت موقت در حوضه ذخیره شده به اضافه رواناب تاخیری زیرقشری حاصل از بارش (رگبار) کنونی، جریان پایه اطلاق می‌شود.

در مدل HMS برای جریان پایه پنج گزینه مختلف دارد که عبارت‌اند از:

- روش مقدار ثابت ماهانه<sup>۷</sup>
- روش بازگشتی<sup>۸</sup>
- روش حجم مخزن خطی<sup>۹</sup>
- روش بوزینسک غیرخطی<sup>۱۰</sup>

---

<sup>۲</sup> Clark Unit Hydrograph  
<sup>۳</sup> Snyder Unit Hydrograph  
<sup>۴</sup> SCS Unit Hydrograph  
<sup>۵</sup> User-Specified Unit Hydrograph  
<sup>۶</sup> Kinematic Wave  
<sup>۷</sup> ModClark  
<sup>۸</sup> Constant Monthly  
<sup>۹</sup> Recession  
<sup>۱۰</sup> Linear Reservoir  
<sup>۱۱</sup> NonLinear Boussinesq

## - روش بازگشت محدود<sup>۱</sup>

در صورتی که هیچ کدام از گزینه‌ها مورد استفاده قرار نگیرند، جریان پایه معادل صفر در نظر گرفته می‌شود اما عموماً در مطالعات هیدرولوژیکی، یک مقدار ثابت دبی پایه به هیدروگراف رواناب مستقیم اضافه می‌گردد.

در پژوهش حاضر برای جریان پایه، گزینه Linear Reservoir یا همان مدل حجم مخزن خطی در نظر گرفته شده است.

• آبراهه‌ها: جهت روندیابی آبراهه‌ای (رودخانه‌ای)، می‌توان یکی از روش‌های زیر را انتخاب نمود.

- روش تاخیری<sup>۲</sup>

- روش ماسکینگام<sup>۳</sup>

- روش پالس اصلاح‌شده<sup>۴</sup>

- روش ماسکینگام-کانج استاندارد<sup>۵</sup>

- روش موج سینماتیک<sup>۶</sup>

- روش متداول استگر<sup>۷</sup>

در این تحقیق، به منظور روندیابی آبراهه‌ها از روش ماسکینگام استفاده شده است.

---

<sup>۱</sup> Bounded Recession

<sup>۲</sup> Lag

<sup>۳</sup> Muskingum

<sup>۴</sup> Modified Puls

<sup>۵</sup> Muskingum-Cunge

<sup>۶</sup> Kinematic Wave

<sup>۷</sup> Straddle Stagger

### ۳-۴-۳-۲- تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی

- بارش: تبدیل بارش به رواناب از طریق هیدروگراف‌های واحد یا موج سینماتیک صورت می‌گیرد. در کلیه روش‌ها فرض می‌شود که بارش در هر گام زمانی، بر روی سطح زیرحوضه به صورت یکنواخت برای یک زمان تداوم مشخص توزیع شده باشد. خصوصیات بارش هر زیرحوضه عبارت‌اند از عمق بارش و توزیع زمانی آن. روش‌های محاسبه میانگین مکانی بارش زیرحوضه در مدل، شامل موارد زیر می‌باشد:

- روش میانگین حسابی

- روش چندضلعی‌های تیسن<sup>۱</sup>

- روش خطوط همباران

- روش عکس مجذور فاصله

همچنین توزیع زمانی میانگین مکانی بارندگی نیز توسط الگوهای از پیش تعیین شده یا الگوهای حاصل از بارش‌های ثبت شده منطقه به مدل معرفی می‌گردد. گزینه‌های متفاوتی جهت تعریف پراکنش زمانی و مکانی بارش در مدل وجود دارد. این گزینه‌ها عبارت‌اند از:

- هیتوگراف تعریف‌شده کاربر<sup>۲</sup>

- تعیین وزن هر باران‌سنج توسط کاربر<sup>۳</sup>

- وزن‌دهی به روش عکس فاصله<sup>۴</sup>

- بارش شبکه‌ای<sup>۵</sup>

- رگبار با دوره بازگشت<sup>۶</sup>

---

<sup>۱</sup> Thiessen Polygons

<sup>۲</sup> User Hyetograph

<sup>۳</sup> User Gauge Weighting

<sup>۴</sup> Inverse Distance Weighting

<sup>۵</sup> Girded Precipitation

<sup>۶</sup> Frequency Storm



- رگبار استاندارد پروژه<sup>۱</sup>

- رگبار فرضی SCS<sup>۲</sup>

در پژوهش پیش رو، جهت محاسبه میانگین مکانی بارش هر زیرحوضه در مدل، از روش چندضلعی-های تیسن و همچنین به منظور تعریف پراکنش زمانی و مکانی بارش در مدل، از روش تعیین وزن هر باران سنج توسط کاربر استفاده شده است. مقدار وزن هر ایستگاه باران سنجی نیز به واسطه نرم افزار الحاقی HEC-GeoHMS در نرم افزار ArcGIS، محاسبه شده است.

- بارش و ذوب برف: مدل سازی ذوب برف برای حوضه های برف گیر و مناطقی که در آنها بارش برف و یا ترکیب توام برف و باران وجود دارد، ضروری می باشد. روش های ذوب برف علاوه بر این که نوع بارش را از نظر باران و برف تعیین می کنند، میزان ذوب برف و انباشت بیلان برفی را به صورت تجمعی محاسبه می کنند. جهت مدل سازی بارش و ذوب برف در HEC-HMS، دو روش یکپارچه ای و شبکه ای مورد استفاده قرار می گیرد. در صورت استفاده از روش مادکلارک جهت محاسبه رواناب سطحی، می بایست از روش شبکه ای به منظور محاسبه مقدار ذوب برف استفاده شود اما در صورت استفاده از سایر روش ها جهت محاسبه رواناب سطحی، روش یکپارچه برای محاسبه ذوب برف مورد استفاده قرار می گیرد. در روش یکپارچه، زیرحوضه ها به چندین نواحی ارتفاعی مختلف تقسیم می گردند که در این نواحی گرادیان دما ثابت در نظر گرفته می شود. روش محاسباتی به کار رفته جهت ذوب برف، روش شاخص حرارت می باشد. این روش توسعه یافته، روش درجه روز است که نیاز به پارامترهای متعددی برای شبیه سازی دارد.

- تبخیر و تعرق: به طور معمول در شبیه سازی سیلاب از محاسبه مولفه تبخیر و تعرق با توجه به ناچیز بودن آن صرف نظر می شود. اما در حالت کلی، با توجه به قابلیت شبیه سازی

---

<sup>۱</sup> Standard Project Storm

<sup>۲</sup> SCS Hypothetical Storm

پیوسته در مدل HEC-HMS، امکان محاسبه مولفه تبخیر و تعرق در کنار رطوبت خاک به صورت پیوسته در زمان وجود دارد. تنها روش موجود جهت شبیه‌سازی تبخیر و تعرق در این مدل، وارد کردن داده‌های تبخیر و تعرق به صورت میانگین ماهانه است. از روش میانگین ماهانه می‌توان برای محاسبه تبخیر و تعرق برای هر ماه از سال استفاده نمود.

در پژوهش حاضر نیز، با توجه به این‌که حوضه مورد مطالعه به صورت پیوسته شبیه‌سازی شده است، داده‌های تبخیر به شکل میانگین ماهانه به مدل هواشناسی حوضه اضافه شدند.

### ۳-۴-۳-۲-۳- ویزگی‌های کنترلی

در این بخش ویزگی‌های کنترلی به همراه اجزای حوضه و مدل هواشناسی جهت مدیریت اجرای مدل، فعال می‌گردد. تاریخ و زمان شروع و پایان اجرای مدل و همچنین دسته‌بندی زمان محاسبات یا گام زمانی در بخش ویزگی‌های کنترلی، تنظیم و در نهایت داده‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران سنجی با توجه به گام زمانی انتخاب‌شده، درون‌یابی می‌شوند.

### ۳-۴-۳-۲-۴- تخمین پارامترها

جهت برآورد پارامترهای مدل، در مرحله واسنجی از داده‌های بارش-رواناب مشاهداتی استفاده می‌شود، به گونه‌ای که بهترین برازش میان نتایج شبیه‌سازی و مشاهده‌ای حاصل گردد. به یک جستجوی نظام‌یافته جهت برآورد پارامترهای مدل، بهینه‌یابی اطلاق می‌شود. بهینه‌یابی خود مشتمل بر تابع هدف (شاخص نیکویی برازش) و روش جستجو است و هر یک دارای گزینه‌های متفاوتی هستند. به منظور مقایسه میزان تطابق هیدروگراف محاسباتی با هیدروگراف مشاهده‌ای، مدل HEC-HMS مقدار شاخص یک نیکویی برازش با تابع هدف را محاسبه می‌کند. الگوریتم‌های جستجوکننده، پارامترهایی را که بهترین مقدار شاخص (کم‌ترین خطا) را حاصل کنند، به عنوان مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده معرفی می‌نمایند. در مدل HEC-HMS چندین تابع هدف وجود دارد که تعدادی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- تابع مجموع خطاهای مطلق<sup>۱</sup>
- تابع مجموع مجذور باقیمانده‌ها<sup>۲</sup>
- تابع درصد خطا در دبی اوج<sup>۳</sup>
- تابع خطای وزنی RMS دبی اوج<sup>۴</sup>
- تابع درصد خطا در حجم<sup>۵</sup>
- تابع خطای وزنی RMS زمان<sup>۶</sup>
- نش ساتکلیف<sup>۷</sup>

روش‌های جستجو در مدل عبارت‌اند از:

- الگوریتم جستجوی شیب یک متغیره<sup>۸</sup>
- الگوریتم ندلر مید<sup>۹</sup>

در مدت زمان جستجو با هر کدام از الگوریتم‌های فوق، مدل HEC-HMS در هر تکرار، جهت اطمینان از این‌که مقادیر آزمون پارامترها در دامنه قابل قبول باشند، کنترل می‌شود. در صورتی که پارامترها در دامنه قابل قبول قرار نگیرند، مدل HEC-HMS مقادیر آزمون را تا رسیدن به مقدار حداقل، افزایش داده و یا تا رسیدن به مقدار حداکثر، کاهش می‌دهد و مجدداً جستجو ادامه می‌یابد.

در این پژوهش، جهت بهینه‌سازی<sup>۱۰</sup> پارامترها از تابع هدف نش ساتکلیف و همچنین الگوریتم ندلر مید استفاده شده است.

---

<sup>۱</sup> Sum Absolute Residuals Function  
<sup>۲</sup> Sum Squared Residuals Function  
<sup>۳</sup> Percent Error Peak Function  
<sup>۴</sup> Peak-Weighted RMS Error Function  
<sup>۵</sup> Percent Error Volume Function  
<sup>۶</sup> Time-Weighted Error Function  
<sup>۷</sup> Nash Sutcliffe  
<sup>۸</sup> Univariate Gradient  
<sup>۹</sup> Nelder Mead  
<sup>۱۰</sup> optimization

### ۳-۵- نحوه محاسبه میزان انرژی برقابی تولیدی نیروگاه

بهره‌برداری از مخازن سدها از موضوعات پیچیده و مهمی است که طراحان سیستم‌های منابع آب (مخازن سدها) با آن مواجه هستند. انتخاب روش صحیح مطالعات و بکارگیری تکنیک یا تکنیک‌های مناسب و مبتنی بر استانداردهای تدوین‌شده مهندسی، از موارد بسیار مهم در حل این‌گونه مسائل می‌باشند. در نهایت با کاربرد این تکنیک‌ها در مرحله شناسایی، ضمن برآورد حجم مخزن، نحوه بهره‌برداری از مخزن نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. البته در صورت در موجود بودن آمار و اطلاعات موردنیاز و دسترسی به تکنیک‌های پیشرفته در زمینه مطالعات بهره‌برداری از مخازن می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. در صورت عدم دسترسی به موارد فوق، از روش‌های ساده‌ای که نیاز به آمار و اطلاعات محدودتری داشته باشد نیز در این مرحله می‌توان استفاده کرد. در میان روش‌های محاسباتی متداول، روش‌های دوره بحرانی<sup>۱</sup> از مهم‌ترین روش‌های تعیین ظرفیت مخزن به شمار می‌آید که تکنیک‌های متداول این روش‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- روش منحنی تجمعی<sup>۲</sup>: در این روش ظرفیت مخزن بر اساس مقایسه گرافیکی دو منحنی تجمعی آبدهی در دوره بحرانی مصرف در محل مخزن حاصل می‌گردد.
- روش اوج متوالی<sup>۳</sup>: در این روش حجم موردنیاز مخزن با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

به طوری که:

$$S_t = \text{حجم مخزن در ابتدای دوره (میلیون مترمکعب)}$$

$$S_{t+1} = \text{حجم مخزن در انتهای دوره (میلیون مترمکعب)}$$

<sup>۱</sup> Critical Period Methods

<sup>۲</sup> Mass Curve

<sup>۳</sup> Sequent Peak Method

$I_t$  = ورودی به مخزن در طول دوره  $t$  (میلیون مترمکعب)

$O_t$  = خروجی از مخزن در طول دوره  $t$  (میلیون مترمکعب)

با بهره‌گیری از رابطه فوق و در نظر گرفتن مقادیر دبی‌های ورودی به مخزن و خروجی از مخزن و همچنین حجم اولیه مخزن، مقادیر مختلفی برای  $S_{t+1}$  محاسبه می‌گردد که بیش-ترین مقدار  $S_{t+1}$  حاصله در یک دوره زمانی معین برای مثال ۱۲ ماهه را می‌توان به عنوان حجم مخزن انتخاب نمود.

- روش جدول عملیاتی<sup>۱</sup>: در پیرو تعیین ظرفیت مخزن توسط منحنی تجمعی و به منظور نمایش عملکرد مخزن، می‌توان از جدول مذکور استفاده کرد و حجم مخزن را متناسب با درصد موفقیت در تامین نیازها محاسبه کرد. در واقع این روش، اساس کار شبیه‌سازی نیز است و محاسبات مربوط می‌تواند به صورت دستی انجام گیرد اما در صورتی که دوره محاسبات طولانی باشد، می‌توان نحوه عملکرد جدول عملیاتی را توسط کامپیوتر انجام داد (نشریه راهنمای مطالعات بهره‌برداری از مخازن سدها)

در پژوهش پیش‌رو از رویکرد زیر جهت بررسی ظرفیت مخزن و محاسبه انرژی برقایی استفاده شده است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - E_t \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

$$0 \leq S \leq S_{cap} \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

$$0 \leq R_t \leq \min(S_t + Q_t - E_t, R_{max}) \quad \text{رابطه (۴-۳)}$$

که در این روابط:

$$S_t = \text{ذخیره مخزن}$$

---

<sup>۱</sup> Working table

$$Q_t = \text{حجم ورودی به مخزن}$$

$$R_t = \text{حجم آب آزادشده جهت تولید نیروی برقابی}$$

$$E_t = \text{حجم آب تبخیرشده}$$

$$S_{cap} = \text{ظرفیت ذخیره مخزن}$$

$$R_{max} = \text{بیشترین حجم آب ممکن برای رهاسازی به منظور تولید انرژی برقابی}$$

در رابطه فوق، با توجه به ناچیز بودن میزان حجم آب تبخیرشده در مقایسه با حجم کل مخزن، از اعمال پارامتر  $E_t$  در رابطه اصلی، صرف نظر شده است و پس از آن جهت محاسبه توان تولید انرژی برقابی، از رابطه ۳-۵ استفاده شده است:

$$P_t = \eta \times \rho \times g \times Q_t \times H_t \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

که در این رابطه:

$$P_t = \text{توان تولید انرژی برقابی (مگا وات)}$$

$$\eta = \text{راندمان توربین}$$

$$\rho = \text{چگالی آب (کیلوگرم بر مترمربع)}$$

$$g = \text{شتاب گرانش (مترمربع بر ثانیه)}$$

$$H_t = \text{تراز هیدرولیکی آب (متر)}$$

$$Q_t = \text{حجم آب تخلیه شده از مخزن جهت تولید نیروی برقابی (مترمکعب بر ثانیه)}$$

در نهایت پس از محاسبه پارامتر p از رابطه فوق، میزان انرژی برقابی تولید شده توسط توربین‌ها، با بهره‌گیری از رابطه ۳-۶ محاسبه شده است.

$$E = p \times T$$

رابطه (۳-۶)

به گونه‌ای که:

$E$  = میزان انرژی تولیدشده توسط توربین‌ها (مگاوات ساعت)

$P$  = توان تولید انرژی برقابی (مگاوات)

$T$  = مدت زمان تولید پیک (ساعت)

### ۳-۶- معیارهای عملکردی

در این پژوهش، از شاخص‌های آماری سنجش خطای ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب نس سستکیف (NS) که اخیراً در مسائل هیدرولوژی به وفور مورد استفاده قرار گرفته است، به کار گرفته شده است که هر یک به نوعی به ارزیابی نتایج شبیه‌سازی و نیکوئی برآزش می‌پردازند. این ضرایب، به ترتیب با روابط (۳-۷)، (۳-۸) و (۳-۹) محاسبه می‌شوند.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

رابطه (۳-۷)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n}}$$

رابطه (۳-۸)

---

<sup>۱</sup> Coefficient of Determination  
<sup>۲</sup> Root-Mean-Square Error  
<sup>۳</sup> Nash-Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad \text{رابطه (۹-۳)}$$

### ۳-۷- منطقه مورد مطالعه

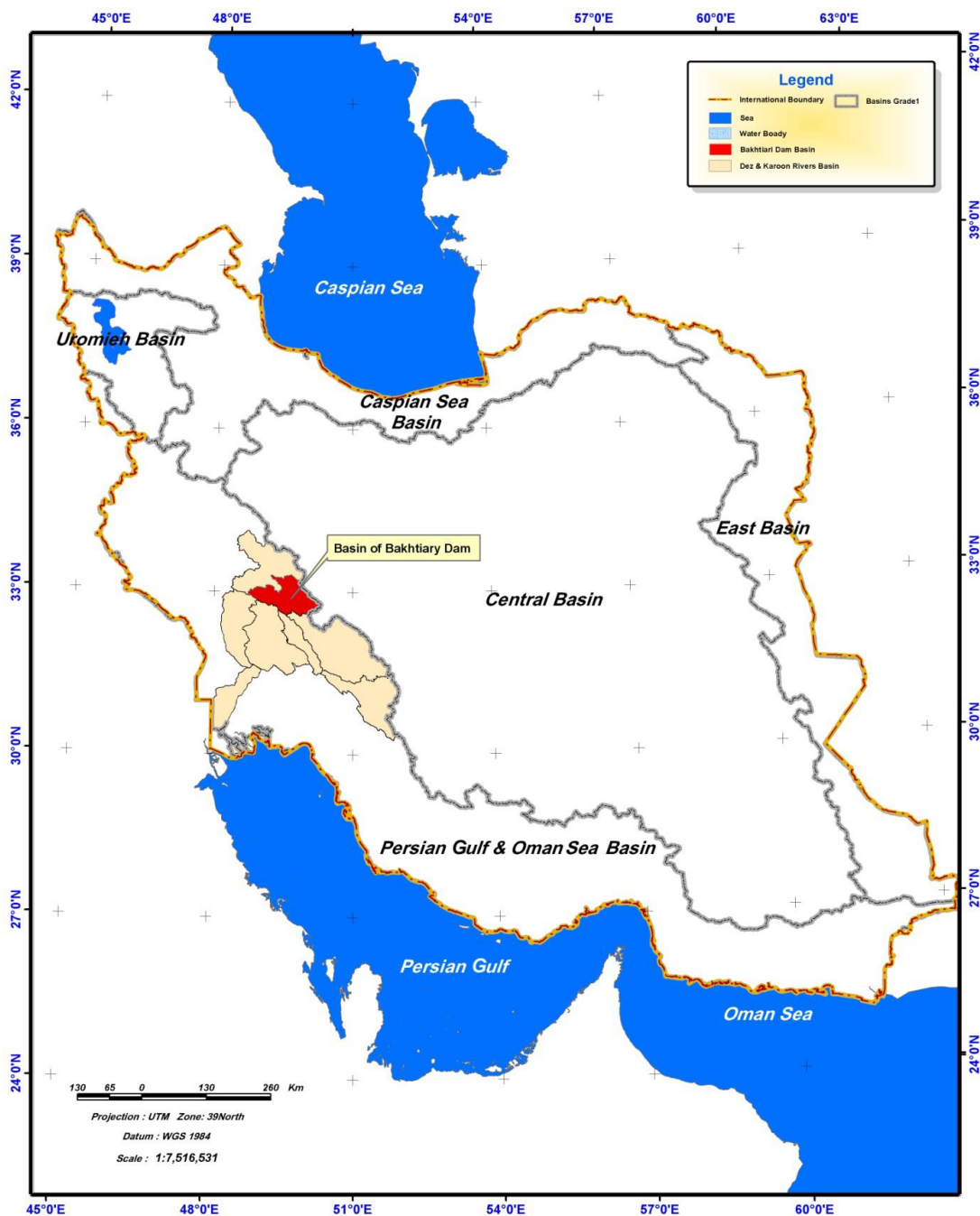
#### ۳-۷-۱- سد بختیاری

ساختگاه سد بختیاری به فاصله مستقیم حدود ۵۰ کیلومتری بالادست سد دز و ۵ کیلومتر بالادست تقاطع رودخانه‌های سزار- بختیاری قرار گرفته است. رودخانه بختیاری یکی از دو سرشاخه اصلی رودخانه دز می‌باشد که از ارتفاعات جنوبی اشترانکوه سرچشمه می‌گیرد و در نزدیکی ایستگاه تنگ پنج به رودخانه سزار می‌پیوندد و رود دز را تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز رودخانه بختیاری در جنوب غرب کشور واقع شده و در محدوده مختصات جغرافیایی ۴۵' ۴۸° تا ۲۰' ۵۰° طول شرقی و ۳۵' ۳۲° الی ۲۰' ۳۳° عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت حوضه آبریز در محل ساختگاه سد بختیاری در حدود ۶۳۸۸ کیلومترمربع و میانگین ارتفاع حوضه از سطح دریا ۲۲۱۲ متر است. دبی متوسط سالانه رودخانه بختیاری در محل سد بر اساس یک دوره آماری ۶۰ ساله معادل ۱۴۴/۶ مترمکعب بر ثانیه و متوسط بارش سالانه در حدود ۱۱۱۷ میلی‌متر است. شیب متوسط رودخانه بختیاری طی مسیر حدود ۳۵ درجه است.

سد بختیاری بلندترین سد دو قوسی بتنی جهان با ارتفاع ۳۱۵ متر محسوب می‌شود و از سوی دیگر بزرگترین مخزن مصنوعی ذخیره آب کشور پس از کرخه با حجمی معادل ۴/۸ میلیارد متر مکعب در تراز نرمال است. ظرفیت نیروگاه بختیاری در ضریب کارکرد ۲۰ درصد است و قابلیت تولید ۱۵۰۰ مگاوات برق را داراست. در مجموع نیروگاه بختیاری می‌تواند سالانه نزدیک به ۳۰۰۰ گیگاوات ساعت انرژی برق آبی تولید کند.

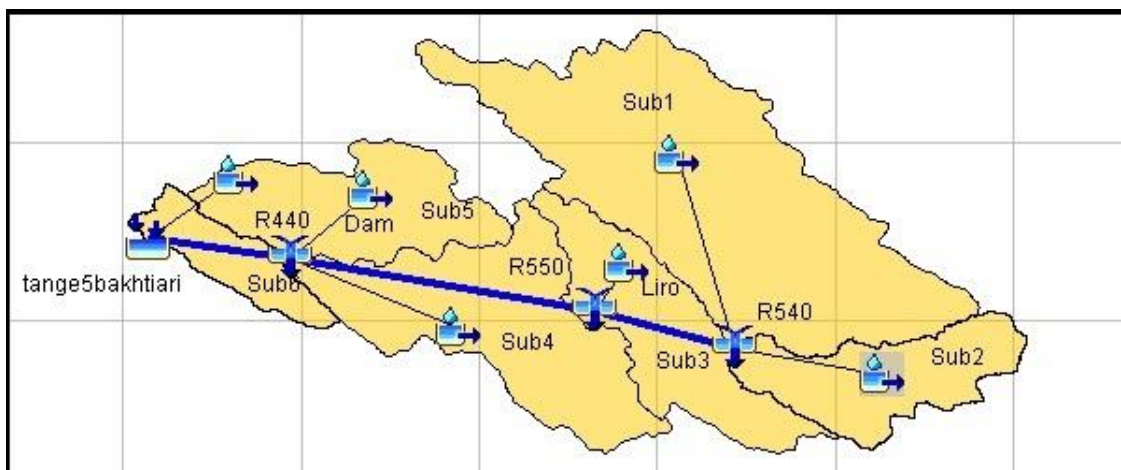
شکل ۳-۵ موقعیت حوضه سد بختیاری در کشور را نشان می‌دهد.





شکل ۳-۵: موقعیت حوضه بختیاری در ایران

بر اساس نقشه‌های توپوگرافی، شبکه رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، مرز حوضه تا حوضه آبریز ایستگاه آبسنجی تنگ پنج بختیاری بسته شدند. سپس حوضه مورد مطالعه به ۶ زیرحوضه تقسیم‌بندی شدند. شکل ۳-۶ شماتیک مدل هندسی حوضه بختیاری را در محیط HEC-HMS نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: شماتیک مدل هندسی حوضه بختیاری را در محیط HEC-HMS

### ۳-۷-۲- ایستگاه‌های دماسنجی و تبخیرسنجی

در این پژوهش از اطلاعات روزانه دما و تبخیر دو ایستگاه دماسنجی و تبخیرسنجی کوه‌رنگ و بروجرد در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ استفاده شده است. جدول ۳-۳ مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های دماسنجی و تبخیرسنجی حوضه بختیاری

ارتفاع (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	استان	نام ایستگاه	کد ایستگاه
۲۳۶۵	۵۰/۱۲۵	۳۲/۴۵۶۹۴	چهارمحال و بختیاری	کوه‌رنگ	۴۰۷۹۷
۲۰۲۲/۱	۴۹/۷۰۲۵	۳۳/۴۰۸۱	لرستان	الیگودرز	۴۰۷۸۳

### ۳-۷-۳- ایستگاه‌های باران‌سنجی

در پژوهش حاضر اطلاعات روزانه بارش شش ایستگاه باران‌سنجی ازنا، الیگودرز، تنگ پنج بختیاری، سپیددشت، قلیان و چرخ و فلک سبک در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳-۴: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه بختیاری

ارتفاع (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	استان	نام ایستگاه
۲۰۲۲/۱	۴۹-۴۲	۳۳-۲۴	لرستان	الیگودرز
۱۸۷۱/۸	۴۹-۲	۳۳-۲۶	لرستان	ازنا
۹۷۰	۴۸-۵۲	۳۳-۱۲	خوزستان	سپیددشت
۶۰۰	۴۸-۴۵	۳۲-۵۶	خوزستان	تنگ پنج بختیاری
۱۸۵۰	۴۹-۳۹	۳۳-۴	لرستان	قلیان
۹۵۰	۵۰-۴	۳۲-۵۳	اصفهان	چرخ و فلک سبک

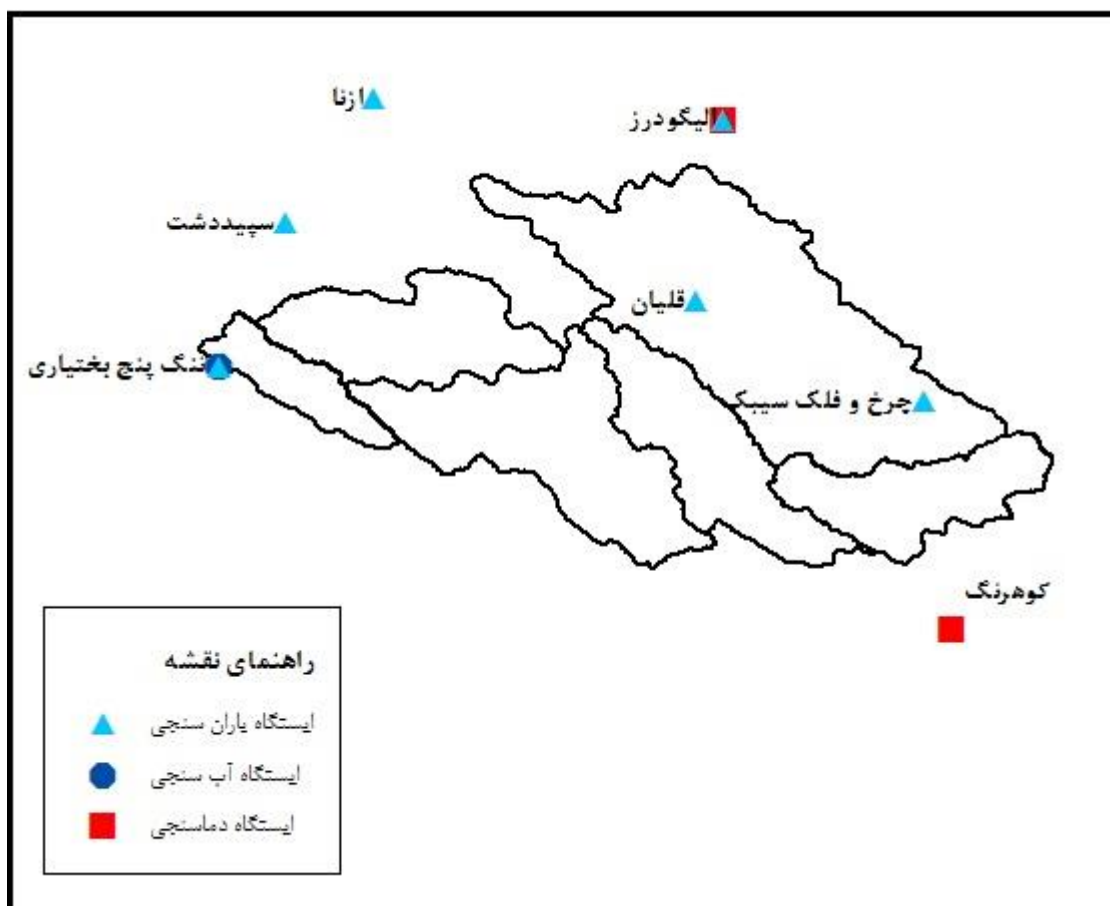
### ۳-۷-۴- ایستگاه‌های آب‌سنجی

در این تحقیق اطلاعات هیدرومتری روزانه ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ به کار گرفته شده است. جدول ۳-۵ مشخصات جغرافیایی ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵: مشخصات جغرافیایی ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری

ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	استان	نام ایستگاه
۶۰۰	۴۸-۴۵	۳۲-۵۶	خوزستان	تنگ پنج بختیاری

شکل ۳-۷ موقعیت جانمایی ایستگاه‌های دماسنجی، باران‌سنجی و آب‌سنجی واقع در داخل حوضه بختیاری را به تصویر می‌کشد.



شکل ۳-۷: موقعیت جانمایی ایستگاه‌های دماسنجی، باران‌سنجی و آب‌سنجی حوضه بختیاری

در این پژوهش، ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری به عنوان خروجی نهایی حوضه انتخاب شده است. ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری در نزدیکی و بالادست محل تلاقی با رودخانه سزار، در مسیر راه آهن تهران جنوب و در کنار تونل شماره ۲۸ و در مختصات جغرافیایی  $48^{\circ} 46'$  طول شرقی و  $32^{\circ} 56'$  عرض شمالی در ارتفاع ۶۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. وسعت حوضه آبریز در محل این ایستگاه ۶۴۳۲ کیلومترمربع است.

## فصل چہارم

### نتایج

در این فصل، با بهره‌گیری از مدل آماری SDSM، داده‌های بزرگ‌مقیاس روزانه بارش و دمای حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های GCM برای شش ایستگاه باران‌سنجی و دو ایستگاه دماسنجی تحت افق زمانی کوتاه‌مدت، ریزمقیاس شدند که نتایج آن‌ها در ادامه فصل ارائه خواهد شد. سپس با واسنجی و صحت‌سنجی کردن مدل بارش-رواناب HEC-HMS برای هر زیرحوضه، تغییرات رواناب سطحی روزانه تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 محاسبه خواهد شد. در نهایت، تغییرات جریان-های ورودی به مخزن سد برقابی بختیاری در گام زمانی ماهانه و همچنین تغییرات در انرژی تولیدی نیروگاه‌های حوضه تحت سناریوهای مذکور بررسی بررسی خواهد شد و در انتها شدت آسیب‌پذیری تولید انرژی در نیروگاه‌های بختیاری مشخص می‌شود.

#### ۴-۲- نتایج ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی حوضه بختیاری

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، مراحل تولید سناریوهای اقلیم روزانه توسط SDSM در سه گام انجام می‌شود. ابتدا مدل توسط داده‌های مشاهداتی دمای متوسط و بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه بختیاری مورد واسنجی قرار می‌گیرد. گام دوم صحت‌سنجی مدل است که در مرحله، توانایی مدل در شبیه‌سازی اقلیم ایستگاه‌های حوضه مذکور بررسی می‌شود. به همین منظور در گام سوم، داده‌های شبیه‌سازی شده دمای متوسط و بارش، توسط پارامترهای به دست آمده و پیش‌بینی‌کننده‌هایی که دقیق‌ترین نتایج را ارائه دادند، در طی عملیات واسنجی مدل تولید می‌شوند.

#### ۴-۲-۱- پیش‌بینی تغییرات دما

به منظور پیش‌بینی دمای متوسط روزانه، از داده‌های مشاهداتی دو ایستگاه دماسنجی کوه‌رنگ و الیگودرز استفاده شد و مقدار متوسط روزانه این پارامتر اقلیمی برای بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ محاسبه گردید. به منظور آشکارسازی دقیق نحوه پیش‌بینی پارامتر اقلیمی دما و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های برگرفته از GCM منتخب به واسطه مدل SDSM و همین‌طور نتایج آن‌ها، ایستگاه کوه‌رنگ

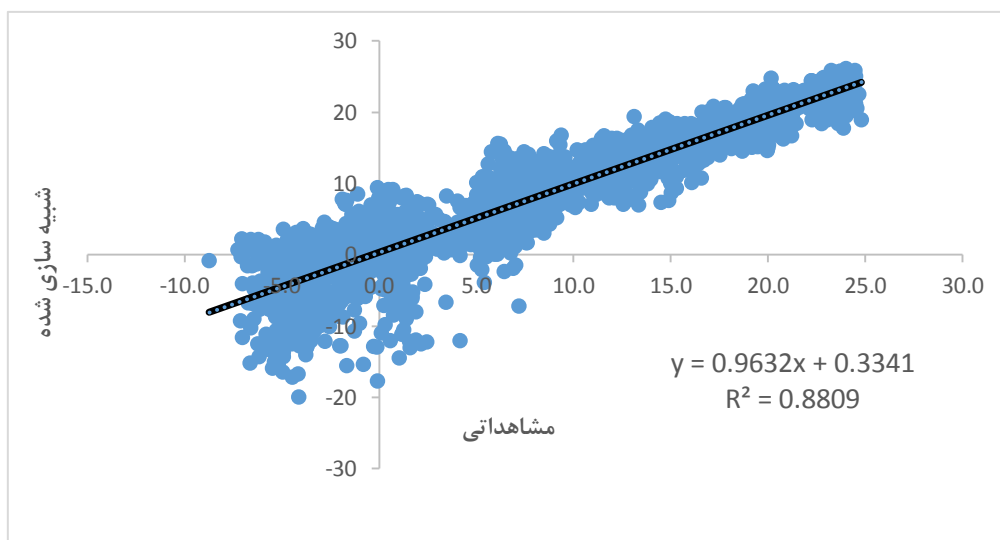
به عنوان نماینده ایستگاه‌های دماسنجی حوضه بختیاری، انتخاب گردید که فرایند کامل پیش‌بینی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و نتایج آن برای این ایستگاه به شرح زیر می‌باشد:

در ابتدا از ۱۹ سال داده‌های مشاهداتی متوسط دمای روزانه ایستگاه کوه‌رنگ، طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM استفاده شد و متغیرهای پیش‌بینی کننده پارامتر اقلیمی دما که همبستگی بسیاری با داده‌های NCEP داشتند، مورد استفاده قرار گرفتند. همان‌گونه که در جدول ۱-۴ مشخص است داده‌های NCEP همبستگی بالایی را با متغیر اقلیمی دما داشته‌اند که این خود می‌تواند تاثیر بسزایی در صحت پیش‌بینی مقدار دما طی دوره‌های آتی داشته باشد.

جدول ۱-۴: معرفی متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP در ایستگاه کوه‌رنگ

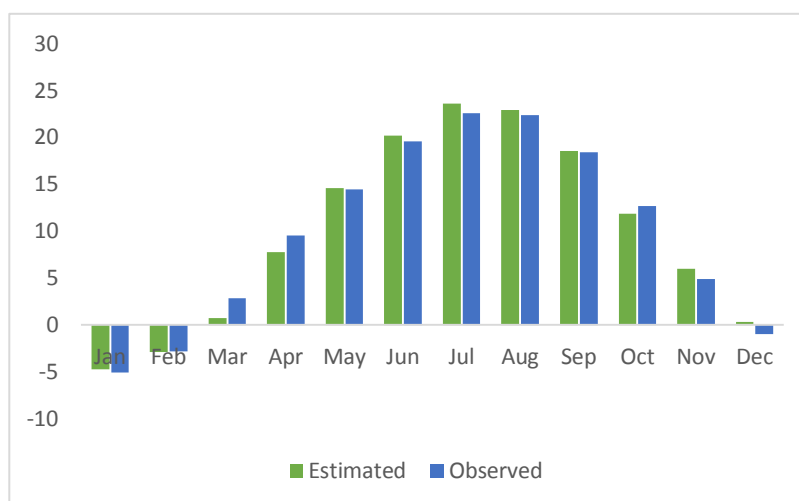
متغیر پیش‌بینی شونده	متغیرهای پیش‌بینی کننده	ضریب همبستگی
دمای متوسط	<b>ncepmslpgl</b>	۰/۶۶۲
	<b>ncepp500gl</b>	۰/۸۳۲
	<b>nceptempgl</b>	۰/۸۸۹

پس از انتخاب مناسب‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده، ۱۳ سال داده مشاهداتی جهت واسنجی و همچنین ۶ سال داده مشاهداتی جهت صحت‌سنجی مدل، مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۱-۴ مقایسه مقادیر مشاهداتی و همچنین شبیه‌سازی شده مقدار متوسط متغیر اقلیمی دما را به نمایش می‌گذارد. با توجه به شکل ۱-۴ ضریب همبستگی طی مرحله واسنجی در حدود ۰/۸۸ به دست آمده که این مقدار قابل قبول بوده و نشان‌دهنده پیش‌بینی نسبتاً دقیق این متغیر می‌باشد.



شکل ۴-۱: توسعه مدل طی مرحله صحت سنجی (Tmean)

شکل ۴-۲ مقایسه میانگین ماهانه مقدار متوسط دمای روزانه مشاهده شده طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ و مقدار شبیه سازی شده آن را طی مرحله صحت سنجی نشان می دهد.

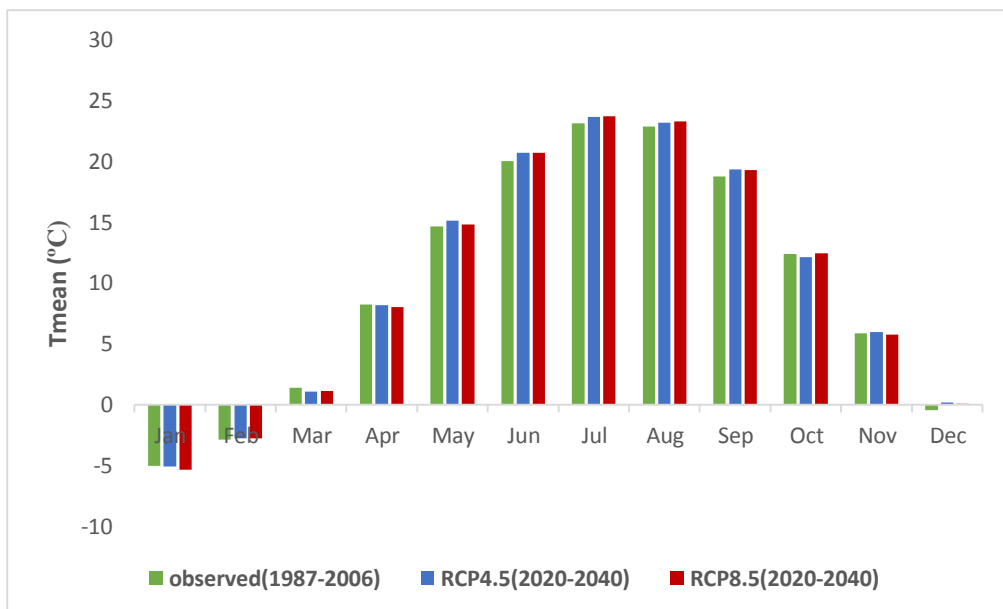


شکل ۴-۲: مقایسه میانگین ماهانه دمای متوسط روزانه مشاهداتی و شبیه سازی شده

پس از آن دمای متوسط روزانه شبیه سازی شده نسبت به دوره پایه ۱۹۸۷-۲۰۰۶، توسط مدل SDSM تحت دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ محاسبه گردید. شکل ۴-۳، مقایسه مقادیر فوق را به تصویر می کشد. همان گونه که در شکل مشخص است؛ دمای شبیه سازی نسبت به دوره پایه ۱۹۸۷-۲۰۰۶ تحت سناریو RCP4.5 نشان می دهد که مقدار میانگین ماهانه دمای متوسط روزانه در ماه های ژانویه، مارس، آوریل و اکتبر کاهش و در سایر ماه های



سال افزایش خواهد یافت و بیشترین مقدار افزایش دما در ماه ژوئن رخ خواهد داد و مقدار متوسط دمای روزانه در حدود ۰/۶۶ درجه سانتیگراد در طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰، افزایش می‌یابد. همچنین مقدار دمای شبیه‌سازی شده تحت سناریو RCP8.5 بیانگر این است که مقدار میانگین ماهانه دمای متوسط روزانه در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و نوامبر کاهش می‌یابد اما این مقدار در سایر ماه‌های سال با افزایش روبه‌رو خواهد بود و همچون سناریوی دیگر، بیشترین مقدار افزایش دما در ماه ژوئن اتفاق خواهد افتاد و دما به میزان ۰/۶۴ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت.



شکل ۴-۳: مقایسه میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی دما تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

در نهایت، پس از انجام این اقدامات برای سایر ایستگاه‌های دماسنجی، جهت صحت‌سنجی مدل‌ها و همچنین اطمینان از انتخاب مدل بهینه برای هر ایستگاه، عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیر اقلیمی دما مورد بررسی قرار گرفتند. به همین منظور، معیارهای ارزیابی ضریب راندمان (NS)، ضریب همبستگی (r) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر ایستگاه محاسبه شده است.

جدول ۴-۲: معیارهای ارزیابی محاسبه شده ایستگاه‌های دماسنجی

صحت سنجی			نام ایستگاه
RMSE	NS	r	
۳/۴۸	۰/۸۸	۰/۹۴	کوه‌رنگ
۳/۲۵	۰/۸۸	۰/۹۴	الیگودرز

#### ۴-۲-۲- پیش‌بینی تغییرات بارش

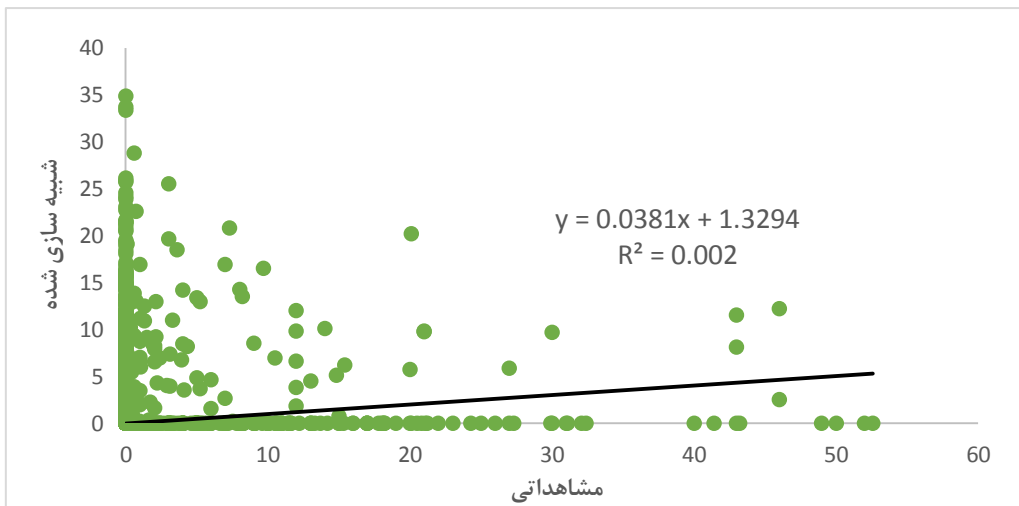
جهت پیش‌بینی بارش روزانه، از داده‌های مشاهداتی شش ایستگاه باران‌سنجی سپیددشت، ازنا، قلیان، تنگ پنج بختیاری، چرخ و فلک سیبک و الیگودرز استفاده شد و مقدار این متغیر اقلیمی برای بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ محاسبه گردید. در راستای آشکارسازی دقیق نحوه پیش‌بینی بارش در منطقه مورد مطالعه، برآورد میزان بارش ایستگاه الیگودرز به عنوان نماینده ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه بختیاری، به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در آغاز، از ۱۹ سال داده‌های مشاهداتی بارش ایستگاه الیگودرز، طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM استفاده شد و متغیرهای پیش‌بینی کننده پارامتر اقلیمی بارش که همبستگی نسبتاً قابل قبولی با داده‌های NCEP داشتند، مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۴-۳ میزان همبستگی متغیرهای پیش‌بینی کننده منتخب را با داده‌های NCEP نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳: معرفی متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP در ایستگاه الیگودرز

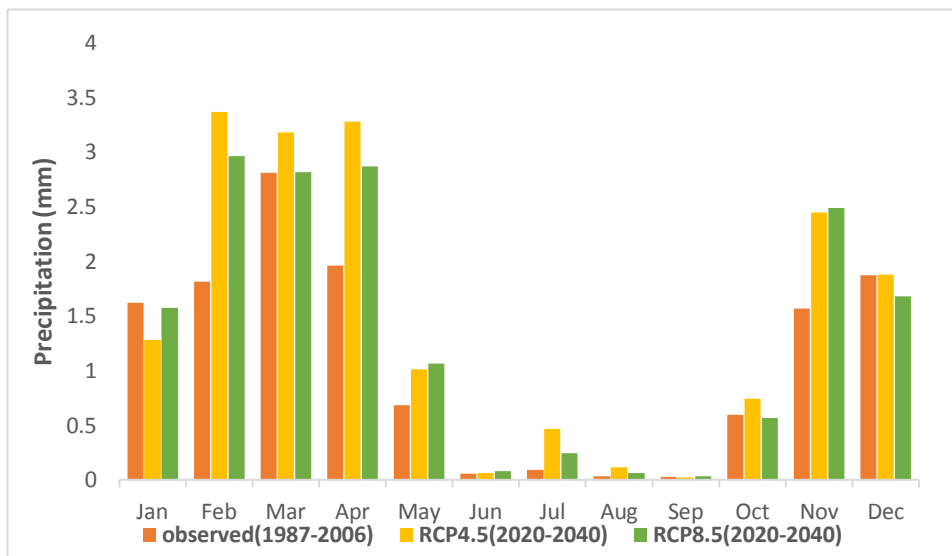
متغیر پیش‌بینی شونده	متغیرهای پیش‌بینی کننده	ضریب همبستگی
بارش	ncepmslpgl	۰/۱۳
	ncepp500gl	۰/۱۷
	nceptempgl	۰/۱۵

در گام بعد، با انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی کننده، ۱۳ سال داده‌های مشاهداتی جهت واسنجی و همچنین ۶ سال داده‌های مشاهداتی جهت صحت‌سنجی مدل، مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۴-۴ مقایسه مقادیر مشاهداتی و همچنین شبیه‌سازی شده مقدار بارش را نشان می‌دهد. با توجه به معادله‌های ارائه شده و ضرایب همبستگی آنها، نتایج نشان می‌دهد که مدل توسط داده‌های مشاهداتی بطور قوی توسعه نیافته به این دلیل که ضرایب همبستگی میان مقدار شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مرحله صحت‌سنجی کم و مقدار آن کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد.



شکل ۴-۴: توسعه مدل طی مرحله صحت‌سنجی (بارش)

پس از مرحله صحت‌سنجی، مقدار بارش شبیه‌سازی شده در ایستگاه الیگودرز نسبت به دوره پایه ۱۹۸۷-۲۰۰۶، توسط مدل SDSM تحت دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ محاسبه گردید. شکل ۴-۵، مقایسه مقادیر فوق را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نتایج پیش‌بینی بارش ماهانه برای دوره‌های آتی روند مشخصی ندارند به گونه‌ای که مقدار میانگین ماهانه بارش تحت سناریو RCP8.5 در ماه‌های ژانویه، اکتبر و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌های سال افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار میانگین بارش تحت سناریو RCP4.5 در ماه‌های ژانویه و سپتامبر کاهش می‌یابد و در سایر ماه‌های سال با افزایش روبه‌رو خواهد بود.

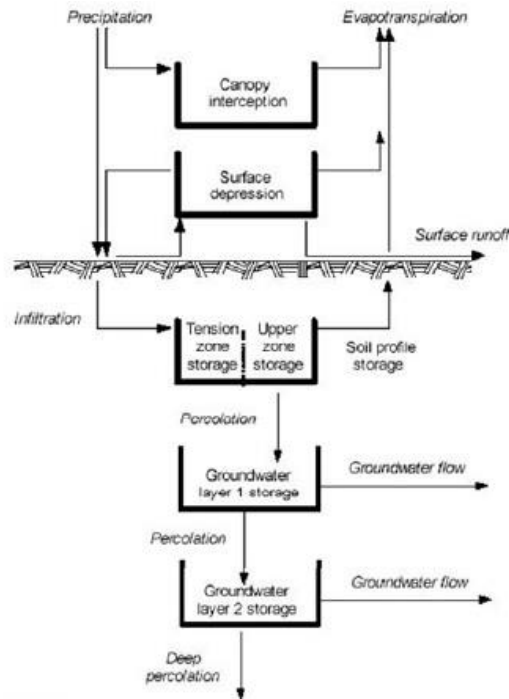


شکل ۴-۵: مقایسه میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

#### ۴-۳- واسنجی مدل HEC-HMS

در راستای کالیبراسیون مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی جریان، از داده‌های دبی روزانه هفت سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۹۰-۱۳۸۹ ایستگاه تنگ پنج بختیاری استفاده شد. داده‌های بارش، دمای روزانه و تبخیر نیز در همین بازه جهت کالیبراسیون به مدل اضافه شدند. پارامترهای کالیبراسیون برای هر زیرحوضه شامل ۱۴ پارامتر مربوط به مدل تلفات SMA، ۶ پارامتر مربوط به مدل مخزن خطی و ۲ پارامتر مربوط به مدل تبدیل بارش به رواناب کلارک می‌باشد. پارامترهای کالیبراسیون برای هر آبراهه شامل ۲ پارامتر مربوط به ضرایب X و K ماسکینگام می‌باشد. با توجه به این که تعداد زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه بختیاری به ترتیب برابر با ۶ و ۳ می‌باشد، تعداد کل پارامترها ۱۳۸ عدد می‌باشد که از ۱۲۶ عدد از این پارامترها جهت کالیبراسیون مدل HEC-HMS استفاده شده است. بنابراین از آنجا که تعداد پارامترها بسیار زیاد می‌باشند، کالیبراسیون مدل، دشوار و زمان‌بر می‌باشد. پارامترهای مدل تلفات SMA از مهم‌ترین پارامترهای کالیبراسیون محسوب می‌شوند به این دلیل که کوچکترین تغییرات در این پارامترها، موجب تغییر در هیدروگراف شبیه‌سازی می‌گردد. مدل مخزن خطی که به منظور دستیابی به میزان جریان پایه مورد استفاده قرار می‌گرفت، با مدل SMA رابطه مستقیم داشته

و مقدار ضرایب آب‌های زیرزمینی برای هر دو مدل به یکدیگر وابسته می‌باشند. مقدار بهینه اغلب پارامترها با استفاده از کالیبراسیون مشخص شده و سایر پارامترها از جمله نرخ نفوذ، ذخیره برگابی، ذخیره ناحیه کششی، ذخیره سطحی و پروفیل خاک از طریق جداول راهنمای قابل دسترس در منابع مختلف آورده شده است (NRCS, 1986).



شکل ۴-۶: طرح شماتیک و مفهومی مدل تلفات SMA

جدول ۴-۴، مقادیر نهایی پارامترهای مدل تلفات SMA را برای کلیه زیرحوضه‌های حوضه بختیاری، نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴: مقادیر نهایی پارامترهای مدل تلفات SMA حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS

Subbasin	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Canopy %	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Surface %	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Soil (%)	۵	۲	۲	۳	۵	۳
Groundwater 1 (%)	۳	۵	۳	۲	۴	۳
Groundwater 2 (%)	۸	۱۰	۵	۲۰	۱۰	۱۰
Maximun Infiltration (mm/hr)	۲۵	۳۵	۲۵	۲۰	۲۰	۲۵
Impervious (%)	۱۲	۲۰	۱۵	۱۰	۲۵	۱۱
Soil Storage (mm)	۲۰۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۵۰
Tension storage (mm)	۱۰	۲۵	۲۰	۱۰	۱۵	۱۰
Soil percolation (mm/hr)	۲۵	۱۰	۱۰	۲۵	۱۰	۱۰
Groundwater 1 storage (mm)	۵۰	۱۰۰	۱۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۳۰
Groundwater 1 percolation (mm/hr)	۳	۳	۳	۳	۳	۳
GW 1 coefficient (hr)	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۷۲۰	۴۰۰	۷۰۰
Groundwater 2 storage (mm)	۳۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۳۰	۱۰۰	۱۳۰
Groundwater 2 percolation (mm/hr)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
GW 2 coefficient (hr)	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰

جدول ۴-۵، مقادیر نهایی پارامترهای مدل روندیابی جریان ماسکینگام را برای آبراهه‌های حوضه بختیاری، نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵: مقادیر نهایی پارامترهای مدل روندیابی ماسکینگام حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS

Reach Name	Muskingum K (hr)	Muskingum X	SubReaches
R440	۸/۴	۰/۲۵	۱
R540	۱۵	۰/۳۰	۱
R550	۳۵	۰/۲۰	۳

جدول ۴-۶، مقادیر نهایی پارامترهای مدل مخزن خطی را برای تمامی زیرحوضه‌های حوضه بختیاری، نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶: مقادیر نهایی پارامترهای مدل مخزن خطی حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS

Subbasin	GW 1 initial (m3/sec/km2)	GW 1 coefficient (hr)	GW 1 Reservoir	GW 2 initial (m3/sec/km2)	GW 2 coefficient (hr)	GW 2 Reservoir
۱	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۲	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۳	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۴	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۵	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۶	۰/۰۰۳	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱

جدول ۴-۷، مقادیر نهایی پارامترهای روش تبدیل بارش به رواناب کلارک را برای کلیه زیرحوضه‌های حوضه بختیاری ارائه می‌دهد.

جدول ۴-۷: مقادیر نهایی پارامترهای روش تبدیل بارش به رواناب کلارک حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS

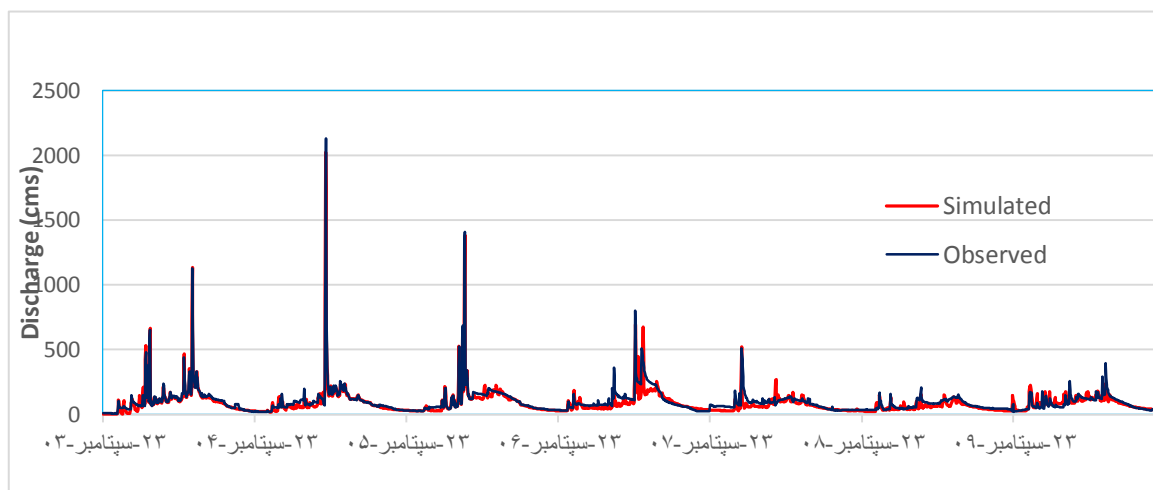
Subbasin	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)
۱	۵۳	۶
۲	۱۰	۷/۵
۳	۵/۲	۶/۹
۴	۱۴/۸	۹/۳
۵	۶/۰	۸
۶	۶/۷	۶/۵

جدول ۴-۸، مقادیر نهایی پارامترهای روش ذوب برف شاخص حرارتی را برای کلیه زیرحوضه‌های حوضه بختیاری ارائه می‌دهد.

جدول ۴-۸: مقادیر نهایی پارامترهای روش ذوب برف شاخص حرارتی حاصل از کالیبراسیون مدل HEC-HMS

PX Temperature	۲/۳
Base Temperature	-۱
Wet Meltrate	۲/۵
Rain Rate Limit	۱
ATI-Meltrate Coefficient	۰/۰۰۰۱
Cold Limit	۰/۵
ATI-Coldrate Coefficient	۰/۹

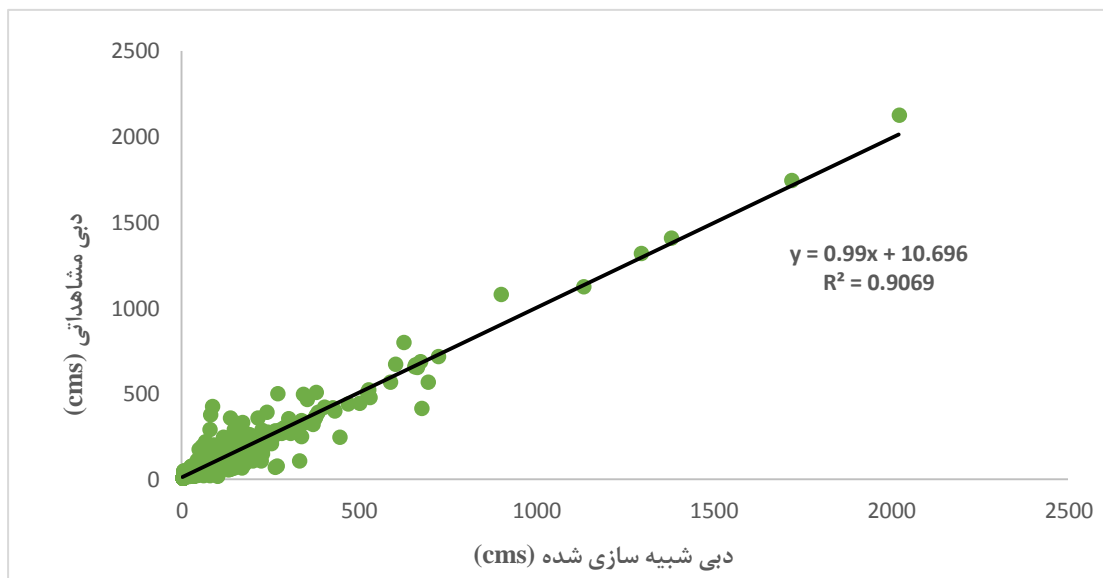
شکل ۴-۷، مقایسه مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب را در ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری در مرحله کالیبراسیون، نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷: مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS در مرحله کالیبراسیون

شکل ۴-۸، همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مقدار رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری را به تصویر می‌کشد.





شکل ۴-۸: همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله کالیبراسیون مقادیر معیارهای آماری نکویی برازش شامل RMSE و NS برای مرحله کالیبراسیون توسط مدل محاسبه شده که در شکل ۴-۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است؛ مقدار راندمان مدل (Nash Sutcliffe) برای این مرحله ۰/۸۹۷ به دست آمده که قابل قبول می‌باشد. ضریب راندمان مدل می‌تواند مقادیری از منفی بی‌نهایت تا ۱ را به خود اختصاص می‌دهد که عدد ۱ نشان‌دهنده برازش کامل و انطباق ۱۰۰٪ میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار معیار نکویی برازش RMSE نیز در حدود ۳۲ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است که این مقدار در مقایسه با مجموع رواناب شبیه‌سازی شده، کاملاً قابل قبول می‌باشد.

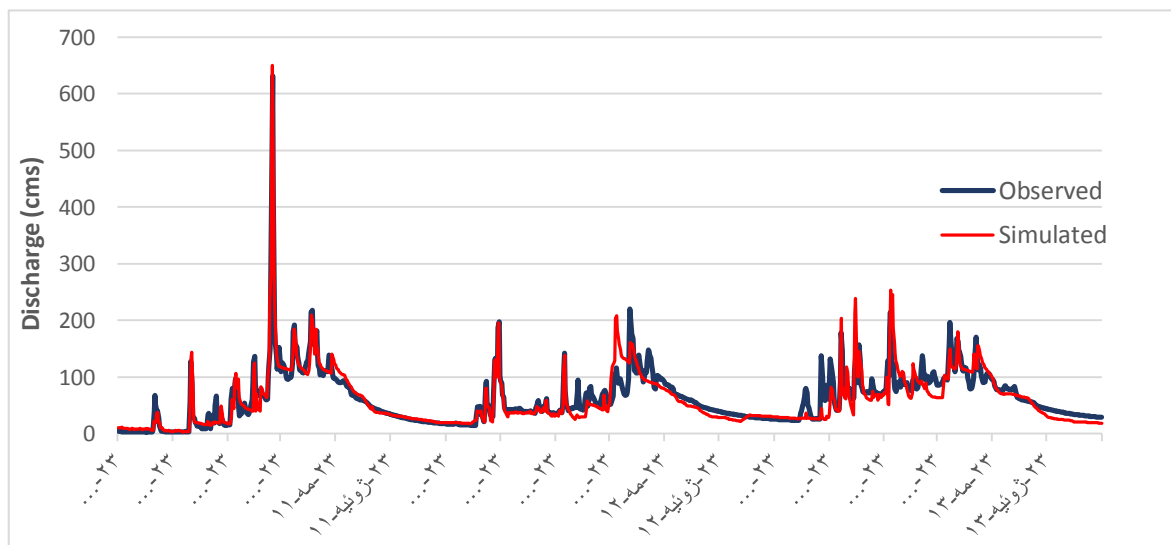
Observed Hydrograph at Gage tange5bakhtiari	
Peak Discharge: 2128.0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 12Mar2005, 00:00
Mean Abs Error: 19.4 (M3/S)	RMS Error: 32.0 (M3/S)
Volume: 3331.65 (MM)	Volume Residual: -340.45 (MM)
Nash-Sutcliffe: 0.897	

شکل ۴-۹: مقادیر معیارهای آمار نکویی محاسبه‌شده توسط مدل HEC-HMS برای مرحله کالیبراسیون

#### ۴-۴- صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

پس از مرحله واسنجی به منظور صحت‌سنجی مدل HEC-HMS، داده‌های مشاهداتی دما، بارش و رواناب ایستگاه‌های واقع در حوضه بختیاری طی دوره ۹۱-۱۳۹۰ تا ۹۳-۱۳۹۲ مورد استفاده قرار

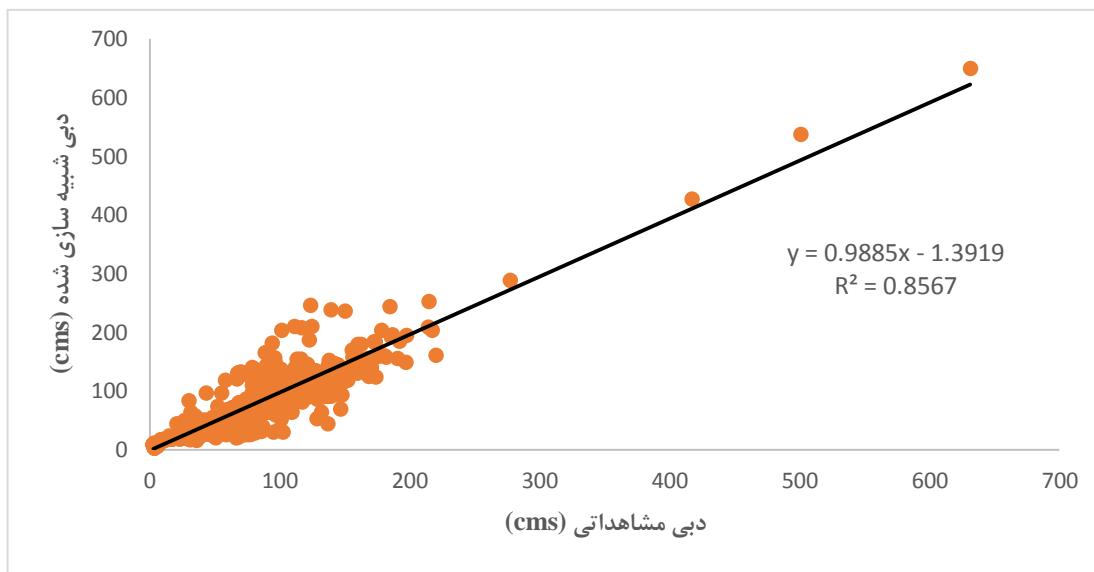
گرفتند. هیدروگراف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رواناب ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری برای مرحله صحت‌سنجی در شکل ۴-۱۰ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۰: هیدروگراف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله صحت‌سنجی

با توجه به شکل ۴-۱۰، نتایج نشان می‌دهند که دقت مدل در دبی‌های کم، بیش‌تر از دبی‌های پیک است اما به طور کلی می‌توان قضاوت نمود که مدل حتی دبی‌های اوج را با دقت معقول و مناسبی برآورد نموده است.

شکل ۴-۱۱، همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مقدار رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری را در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار همبستگی حدود ۰/۸۶ به دست آمده است که این مقدار، قابل قبول می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مقدار رواناب ایستگاه تنگ پنج بختیاری در مرحله صحت‌سنجی

شکل ۴-۱۲، مقادیر معیارهای سنجش خطا برای مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۱۲، مقدار ضریب NS برابر با ۰/۸۵۵ و RMSE برابر با ۱۹/۴ با توجه به مقدار دبی میانگین (۹۵ cms)، نشانگر دقت بالای مدل می‌باشد.

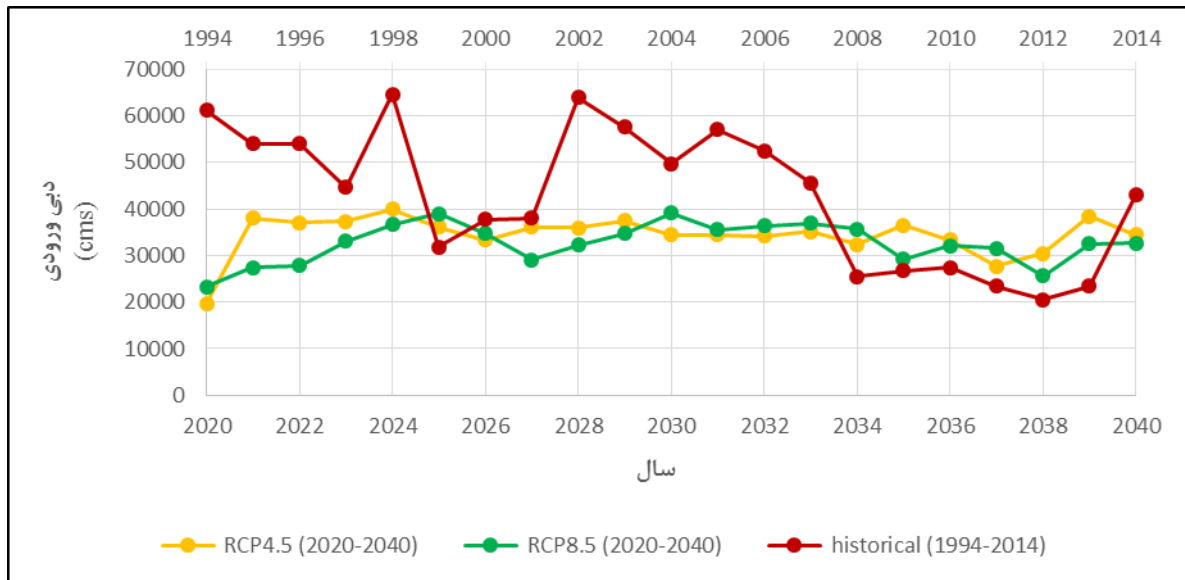
Observed Hydrograph at Gage tange5bakhtiari	
Peak Discharge: 650.0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 14Mar2011, 00:00
Mean Abs Error: 12.2 (M3/S)	RMS Error: 19.4 (M3/S)
Volume: 882.76 (MM)	Volume Residual: 31.08 (MM)
Nash-Sutcliffe: 0.855	

شکل ۴-۱۲: مقادیر معیارهای آمار نکویی محاسبه‌شده توسط مدل HEC-HMS برای مرحله صحت‌سنجی

#### ۴-۵- پیش‌بینی میزان رواناب ورودی به مخزن

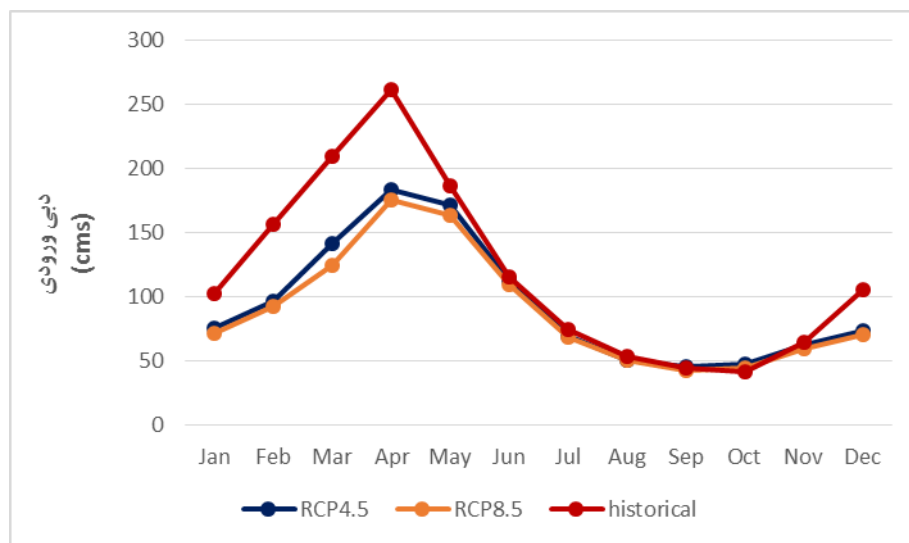
پس از اطمینان از عملکرد مطلوب مدل و همچنین با وارد کردن داده‌های روزانه دما و بارش که پیش از این به کمک مدل SDSM برای افق زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ پیش‌بینی و محاسبه شدند، حجم رواناب ورودی به مخزن سد تحت سناریوهای اقلیمی منتخب برآورد گردید. شکل ۴-۱۳، مقایسه میزان متوسط سالانه رواناب ورودی به مخزن سد تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه کنترلی را با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه و بدبینانه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که میزان کاهش رواناب

سالانه حوضه تحت سناریوی خوش‌بینانه RCP4.5 در حدود ۲۰ درصد و همچنین تحت سناریوی بدبینانه RCP8.5، ۲۴ درصد خواهد بود.



شکل ۴-۱۳: مقایسه میزان متوسط سالانه رواناب ورودی به مخزن تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه کنترلی با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5

در شکل ۴-۱۴ میانگین ماهانه جریان‌های ورودی به مخزن سد بختیاری وارد شده است. پیش‌بینی می‌شود بیش‌ترین میزان کاهش جریان ورودی مربوط به ماه‌های آوریل و مارس می‌باشد.

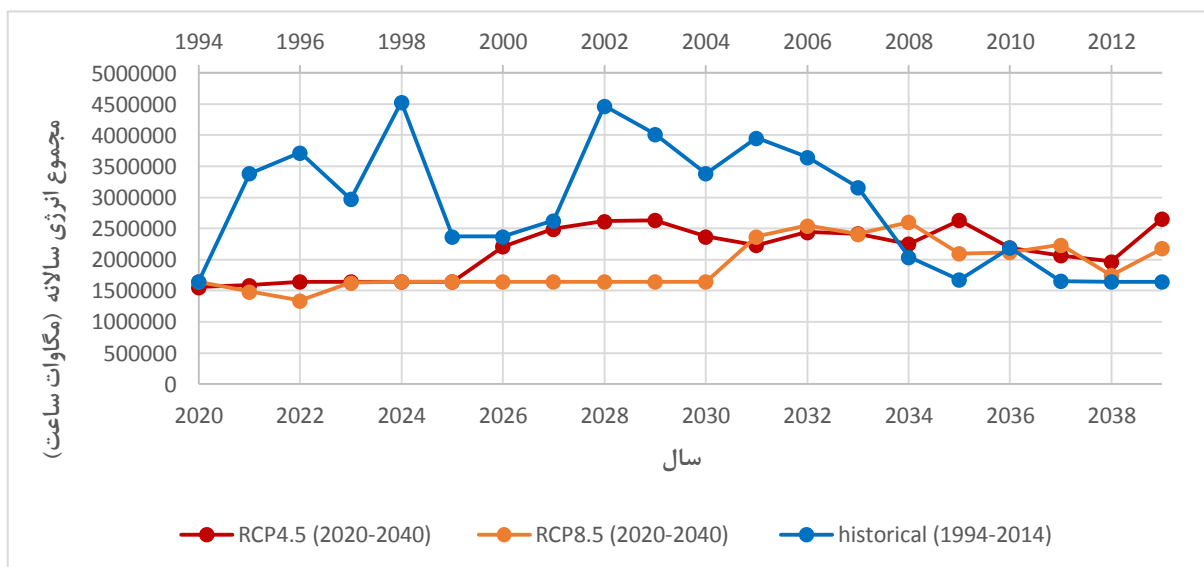


شکل ۴-۱۴: مقایسه میانگین ماهانه جریان مشاهده شده با پیش‌بینی شده

#### ۴-۵- محاسبه انرژی برقابی تولیدی

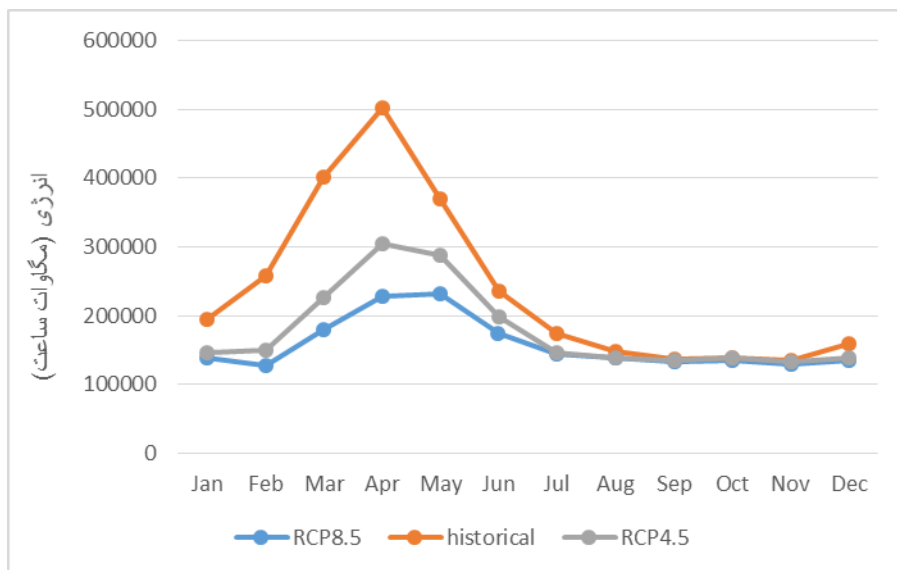
همان‌گونه که پیش‌تر به تفصیل بیان شد، میزان رواناب روزانه ایستگاه آب‌سنجی تنگ پنج بختیاری در دوره زمانی مذکور توسط مدل بارش-رواناب HEC-HMS، پیش‌بینی و مقدار میانگین ماهانه آن محاسبه شد. در ادامه، با در نظر گرفتن فرضیات مذکور و همچنین با بکارگیری روابطی که در فصل پیش به آن‌ها اشاره شد، میزان تولید انرژی برقابی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای افق زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ محاسبه گردید.

با توجه به رابطه انرژی و همچنین مدت زمان فعالیت روزانه توربین‌ها، مقدار متوسط ماهانه انرژی مورد تقاضا برای نیروگاه بختیاری در حدود ۱۳۵۰۰۰ مگاوات ساعت برآورد گردید. بدیهی است که تامین این مقدار انرژی به حجم دبی ورودی به مخزن سد بختیاری، وابسته است. چنانچه مقدار دبی ورودی به مخزن از مقدار آب معادل انرژی مورد تقاضا کم‌تر باشد، نیروگاه قادر به تامین انرژی مورد نیاز نخواهد بود. اما چنانچه مقدار دبی ورودی به مخزن بیش‌تر از مقدار آب معادل انرژی مورد تقاضا و یا حتی برابر با آن باشد، نیروگاه تمامی انرژی مورد انتظار را تولید خواهد کرد. شکل ۴-۱۵ مقایسه میزان تولید متوسط سالانه انرژی برقابی تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه زمانی کنترلی ۱۹۹۴-۲۰۱۴ را با سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 در افق زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نشان می‌دهد.



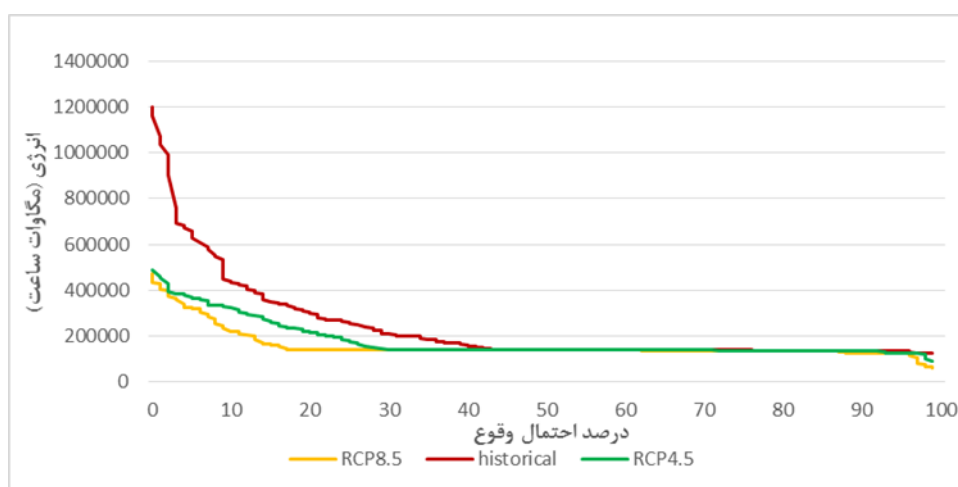
شکل ۴-۱۵: مقایسه میزان تولید متوسط سالانه انرژی برقابی تحت شرایط اقلیمی تاریخی در بازه زمانی کنترلی با سناریوهای اقلیمی خوش بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5

با توجه به شکل ۴-۱۵، حتی سناریوی خوش بینانه RCP4.5 نمایانگر کاهش چشمگیری در کل جریان ورودی سالانه و در نهایت مقدار تولید متوسط سالانه انرژی برقابی در سال‌های پیش رو می‌باشد. همچنین سناریوی اقلیمی بدبینانه RCP8.5 نشانگر افزایش کاهش‌ها در کل جریان ورودی سالانه و همین‌طور میزان تولید متوسط سالانه انرژی برقابی در سال‌های آتی است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد میزان تولید متوسط در هر دو سناریو کاهش خواهد یافت. این کاهش ناشی از کاهش جریان‌های ورودی به مخزن سد بختیاری به علت خشک‌تر بودن شرایط ناشی از تغییر اقلیم می‌باشد. شکل ۴-۱۶ نشان می‌دهد که تولید میانگین ماهانه انرژی برقابی در حوضه برای سناریوهای اقلیمی خوش بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 در فصول زمستان و بهار، کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به تولید میانگین ماهانه انرژی تحت شرایط اقلیمی تاریخی خواهد داشت. به گونه‌ای که مقدار متوسط ماهانه محاسبه شده انرژی برقابی تحت سناریوی RCP4.5 در ماه‌های مارس و فوریه با کاهش حدوداً ۴۰ درصدی مواجه خواهد بود، که این رقم برای سناریوی بدبینانه RCP8.5 تا ۵۰ درصد نیز می‌رسد. همچنین کم‌ترین مقدار کاهش نیز برای هر دو سناریو، در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۴-۱۶: مقایسه میانگین انرژی تولید ماهانه تحت شرایط اقلیمی تاریخی با سناریوهای اقلیمی خوش بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5

در شکل ۴-۱۷ منحنی‌های تولید انرژی کل در افق زمانی موردنظر، ترسیم شده است. در این شکل به وضوح مشخص گردیده است که تولید انرژی برقابی تخمین زده شده تحت هر دو سناریو به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این تخمین کاهش در تولید انرژی بسیار حائز اهمیت است. زیرا این حقیقت را معلوم می‌نماید که مخزن سد و نیروگاه طراحی شده بر اساس داده‌ها و شرایط اقلیمی گذشته در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم به شدت آسیب‌پذیر خواهند بود.



شکل ۴-۱۷: منحنی‌های تداوم کل انرژی

#### ۴-۶- جمع‌بندی

در این فصل، اثرات تغییر اقلیم بر سیستم نیروگاهی تولید انرژی برقایی حوضه رودخانه بختیاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشانگر آن است که اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیکی متعاقبا بر تولید انرژی برقایی در حوضه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. با توجه به نتایج حاصل، کسر تولید انرژی در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه، چشمگیر برآورد می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در تخمین میزان تولید انرژی برقایی تحت سناریوی RCP4.5 کاهش تولید در حدود ۱۰ درصد کاهش داشته است، اما در تخمین میزان تولید این انرژی تحت سناریوی RCP8.5 کاهش تولید به طور تقریبی ۲۰ درصد خواهد بود.



فصل پنجم

نتیجه گیری

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات تغییر اقلیم بر سیستم منابع آب و هیدرو انرژی حوضه بختیاری بررسی شده است. در آغاز، با استفاده از یک مدل آماری و به کارگیری داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط آن مدل در یک مدل هیدرولوژیکی توسعه یافته حوضه بختیاری، اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بر رواناب زیرحوضه‌های شش‌گانه بختیاری در افق زمانی مورد نظر، مشخص شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان کاهش رواناب سطحی کل حوضه به ازای هر دو سناریوی اقلیمی، چشمگیر خواهد بود به گونه‌ای که میزان کاهش رواناب سالانه حوضه تحت سناریوی خوش‌بینانه RCP4.5 در حدود ۲۰ درصد و همچنین تحت سناریوی بدبینانه RCP8.5، ۲۴ درصد خواهد بود. بیش‌ترین مقدار این کاهش در ماه‌های آوریل و مارس صورت می‌گیرد. همچنین زمستان و بهار خشک‌تری در سال‌های آینده پیش‌بینی می‌شود.

از اینرو برای آشکار شدن نقش این میزان کاهش در رواناب سطحی در انرژی تولیدی نیروگاه برقابی، یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده شد. بدین منظور به کمک روابط انرژی و به کارگیری داده‌های ریزمقیاس‌شده، میزان کاهش تولید انرژی در نیروگاه بختیاری تحت سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه و بدبینانه بدست آمد. بررسی نتایج نشان داد، میزان تولید انرژی رابطه مستقیمی با رواناب سطحی حوضه دارد، بطوریکه میزان کاهش تولید انرژی تحت هر دو سناریو مقدار قابل ملاحظه‌ای بوده است. به شکلی که تولید میانگین ماهانه انرژی برقابی در حوضه برای سناریوهای اقلیمی خوش-بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 در فصول زمستان و بهار، کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به تولید میانگین ماهانه انرژی تحت شرایط اقلیمی تاریخی خواهد داشت. به گونه‌ای که مقدار متوسط ماهانه محاسبه‌شده انرژی برقابی تحت سناریوی RCP4.5 در ماه‌های مارس و فوریه با کاهش حدوداً ۴۰ درصدی مواجه خواهد بود، که این رقم برای سناریوی بدبینانه RCP8.5 تا ۵۰ درصد نیز می‌رسد.

همچنین کم‌ترین مقدار کاهش نیز برای هر دو سناریو، در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر اتفاق خواهد افتاد.

این کاهش تولید منجر به عدم دستیابی به اهداف توسعه بلندمدت حوضه می‌شود. این امر نشانگر آن است که پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم بر توسعه تولید انرژی برقی اثرگذار خواهند بود و جهت فراهم ساختن توسعه پایدار در سطح حوضه می‌باید راهکارهایی برای افزایش ظرفیت سازگاری کل سیستم ارائه شود.

## ۶-۲- پیشنهادها برای مطالعات آتی

- در این پژوهش جهت ریزمقیاس‌سازی داده‌های بزرگ‌مقیاس از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 که در گزارش پنجم IPCC ارائه شده‌اند بکار گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود از دو سناریوی موجود دیگر جهت ریزمقیاس‌سازی استفاده شود.
- در تحقیق پیش رو از مدل بارش-رواناب HEC\_HMS بهره گرفته شده است. می‌توان از مدل هیدرولوژیکی SWAT نیز به منظور شبیه‌سازی حوضه و همچنین برآورد میزان رواناب، استفاده کرد.
- در تحقیق حاضر، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم برای افق زمانی کوتاه‌مدت انجام شده است که پیشنهاد می‌شود این ارزیابی برای افق‌های زمانی میان‌مدت و بلندمدت نیز صورت پذیرد.
- در این پژوهش تنها به جنبه مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییر اقلیم پرداخته شده است و از جنبه اثرات تغییر اقلیم بر تقاضا و مدیریت آن (مانند مدیریت بازار برق) صرف نظر شده است.
- پیشنهاد می‌شود علاوه بر ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت منابع آب حوضه، ارزیابی بر روی کیفیت منابع نیز انجام شود.

- از مباحثی دیگری که می‌تواند در تکمیل این پروژه مناسب باشد، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و اندرکنش آب زیرزمینی با آب‌های سطحی است.
- از دیگر پیشنهادات می‌توان به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر نحوه رسوب‌گذاری مخازن سدهای برقابی اشاره کرد.

## مراجع

- شمس م، رئوفی آ، (۱۳۸۵)، "مبانی نیروگاه‌های آبی کوچک"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، صفحه ۱-۷.
- جمالی س، (۱۳۹۱)، رساله دکتری، "ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی در حوضه آبریز کرخه و بررسی راهکارهای تطبیقی"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- مدیران سبزاندیش، (۱۳۸۷)، "تغییرات آب و هوا"، شماره ۴، نشریه سازمان حفاظت محیط زیست، صفحه ۱-۳.
- سعیداوی ا، (۱۳۸۷)، "تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های اتمی و آبی"، جلد دوم، چاپ اول، انتشارات کیفیت، تهران، صفحه ۱۴۹.
- کسمائی م، (۱۳۹۲)، "اقلیم و معماری"، چاپ پنجم، انتشارات نشر خاک، صفحه ۱-۱۰.
- خسروی م، اسمعیل نژاد م، نظری پور ح، (۱۳۸۹)، "تغییر اقلیم و تاثیر آن بر منابع آب خاورمیانه"، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- مساح بوانی ع، مرید س، محمدزاده م، گودس ک، (۱۳۸۵)، "وضعیت آینده اقلیم حوزه زاینده‌رود تحت تاثیر تغییر اقلیم: مقایسه بین سناریوهای مختلف AOGCM"، دومین همایش ملی منابع آب ایران، اصفهان.
- سیدقاسمی س، (۱۳۸۵)، پایان‌نامه ارشد، "پیش‌بینی تغییرات جریان رودخانه تحت اثر تغییرات اقلیم، مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- جعفرپور م، کانونی ا، (۱۳۹۴)، "سناریوهای تغییر اقلیم در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مقایسه آن با گزارش‌های قبلی"، دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

تابان ح، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد، "بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه دز علیا"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات خوزستان.

فلاح قاهره غ، (۱۳۹۳)، "ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های اقلیمی"، چاپ اول، انتشارات سخن گستر، مشهد، صفحه ۱-۲۰.

شرکت مهندسی مشاور دزآب، (۱۳۹۳)، "ارزیابی اثرات احداث سد و نیروگاه بختیاری بر مدیریت منابع آب حوضه دز"، گزارش مطالعات مرحله دوم سد و نیروگاه بختیاری، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

منتظری م، فهمی ه، (۱۳۸۲)، "اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب کشور"، سومین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، دانشگاه اصفهان، اصفهان.

بهشتی منفرد م، ثقفیان ب، رفیعی نسب آ، (۱۳۹۰)، "اثرات تغییر اقلیم بر روی بهره‌برداری از نیروگاه برقابی کارون ۳"، چهارمین کنفرانس منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

جدیری نقاشکار ل، ضرغامی م، (۱۳۹۲)، "تاثیر تغییر اقلیم بر تولید نیروی برقابی سد سفیدرود"، اولین کنفرانس ملی هیدرولوژی مناطق نیمه خشک، سنندج.

Ary, E. S. (2016). *World Energy Resources 2016, 2007*.

BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy 2017*, (June). Retrieved from.

Breeze, P. (2014). *Hydropower. Power Generation Technologies* (2nd ed.). Elsevier Ltd.

Chiang, J.-L., Yang, H.-C., Chen, Y.-R., & Lee, M.-H. (2013). Potential Impact of Climate Change on Hydropower Generation in Southern Taiwan. *Energy Procedia*, 40, 34–37.

Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510–517.

Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., ... Volonterio, M. (2014). Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of the Total Environment*, 493, 1211–1221.

- Gregory, K. (2009). *Climate Change Science. Climate Research.*
- IPCC. (2014). *Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jamali, S. ., Abrishamchi, A. ., & Madani, K. . (2013). Climate change and hydropower planning in the middle east: Implications for Iran's karkheh hydropower systems. *Journal of Energy Engineering, 139*(3), 153–160.
- Kopytkovskiy, M., Geza, M., & McCray, J. E. (2015). Climate-change impacts on water resource Kopytkovskiy, M., Geza, M., & McCray, J. E. (2015). Climate-change impacts on water resources and hydropower potential in the Upper Colorado River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 3*, 473–493.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S., & Leconte, R. (2009). Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management, 23*(14), 2965–2986.
- NRCS. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55. *USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55*, 164. h
- Rheinheimer, D. E., Viers, J. H., Sieber, J., Kiparsky, M., Mehta, V. K., & Ligare, S. T. (2014). Simulating High-Elevation Hydropower with Regional Climate Warming in the West Slope, Sierra Nevada. *Journal of Water Resources Planning and Management, 140*(5), 714–723.
- Sheet, I. E. B. (2016). Iran Energy Balance Sheet. *Iranian Power and Energy Planning Department, Ministry of Energy of I.R.IRAN.*
- Teotónio, C., Fortes, P., Roebeling, P., Rodriguez, M., & Robaina-Alves, M. (2017). Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74*(February), 788–799.
- Wang, B., Liang, X. J., Zhang, H., Wang, L., & Wei, Y. M. (2014). Vulnerability of hydropower generation to climate change in China: Results based on Grey forecasting model. *Energy Policy, 65*, 701–707.
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. *Analysis, 27*(August), 1–27.

## **Abstract**

In recent decades, with the growing evidences of climate change, concerns over the planning and exploitation of water resources have increased in response to these new conditions. An increase in these concerns has led to many studies in assessing the severity of the adverse effects of climate change on water resources. The variation in the amount of runoff entering the reservoirs of hydroelectric dams is one of the adverse consequences. Based on recent reports, about 16 percent of the world's electricity generation, and also 70 percent of the world's renewable electricity, comes from hydroelectric power. The huge benefits of hydroelectric power generation, including its very low cost and near-zero greenhouse gas emissions, have made this a popular source of energy throughout the world. Therefore, the assessment of the vulnerability of hydroelectric power generation systems is essential in the face of the consequences of climate change. In this study, Bakhtiari dam basin and its hydroelectric reservoir system have been investigated and the effect of climate change consequences on hydropower energy expected from hydropower plant has been evaluated. In order to consider probable uncertainties, two climatic scenarios were used. Then by using a statistical method and using the SDSM4.2 software, the large scale data obtained from the implementation of the CANESM2 general circulation model under the two scenarios RCP4.5 and RCP8.5, and under the short time horizon of 2020-2040, are microscopic and According to the HEC-HMS rainfall-run model, the amount of runoff entering the reservoir of Bakhtiari dam was calculated. Then, by developing a comprehensive water resource planning model for the whole basin, the effects of climate change on the inflow into the reservoir and subsequent production of Bakhtiari hydroelectric power were studied under both scenarios. By examining the overall results of the research, it can be seen that in this horizon the reduction in the energy produced by the hydroelectric power plant is significantly reduced in both scenarios. Therefore, updating reservoir operating rules and considering the consequences of climate change is a good way to reduce the adverse effects of climate change.

**Keywords:** Hydropower, Climate Change, Rain-Runoff Model, Downscaling, Bakhtiari Dam





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Civil Engineering**  
M.Sc. Thesis in Water Resources Engineering and Management

**Title of Thesis: Assessment of Climate Change Effects on Hydro  
Energy Production in Bakhtiari Power Plant**

By: Elnaz Mirzaie

Supervisors:  
Dr. Ahmad Ahmadi  
Dr. Saeed Golian

Adviser:  
Saeed Jamali

January 2018