دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده عمران

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز سد زاینده‌رود

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران

مهران طور سوادکوهی

اساتید راهنما

دکتر حمید رضا صفوی

دکتر آزاده احمدی

۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

"سپاس بی پایان بر یگانه پروردگار هستی بخش"

با سپاس بی کران از اساتید فرهیخته ام، جناب آقای **دکتر حمیدرضا صفوی** و سرکار **خانم دکتر آزاده احمدی** که با شکیبایی و صمیمیت فراوان هدایت این پایان نامه را بر عهده داشتند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات

و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به عزیزترین عزیزانم

پدر و مادر بزرگوارم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

۱-فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه و کلیات ۲

۱-۲ ضرورت، هدف و دامنه تحقیق ۲

۱-۳ ساختار فصول پایان نامه ۶

۲-فصل دوم: سابقه مطالعات ۷

۲-۱ معرفی ۷

۲-۲ گرمایش جهانی و تغییرات اقلیم ۸

۲-۳ مدل‌های پیش بینی اقلیمی ۹

۲-۴ مدل‌های شبیه سازی بارش-رواناب ۱۲

۲-۵ تحقیقات مرتبط با منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز زاینده‌رود) ۱۵

۲-۶ جمع‌بندی ۱۷

۳-فصل سوم: روش تحقیق و مفاهیم پایه ۱۸

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۲ مباحث مرتبط با تغییر اقلیم و مدل‌های جهانی اقلیمی ۱۹

۳-۲-۱ گرمایش جهانی ۱۹

۳-۲-۲ تغییر اقلیم ۲۰

۳-۲-۳ گازهای گلخانه‌ای ۲۱

۳-۲-۴ سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های آینده ۲۳

۳-۲-۵ مدل‌های چرخه عمومی ۲۶

۳-۳ مباحث مرتبط با روش‌های کاهش مقیاس و مدل‌های پیش بینی ۳۰

۳-۳-۱ کاهش مقیاس ۳۰

۳-۳-۲ مدل پیش بینی اقلیمی ASD ۳۵

۳-۴ پیش بینی بلند مدت هیدرولوژیکی ۴۳

۳-۴-۱ مدل ابزار ارزیابی آب و خاک SWAT ۴۴

۳-۴-۲ مدلسازی در SWAT ۴۶

۳-۴-۳ مبانی مدل ۴۸

۳-۴-۴ فاز زمین در چرخه آب ۴۹

۳-۴-۵ فاز آب در چرخه هیدرولوژیکی ۵۶

۳-۴-۶ آنالیز حساسیت ۵۸

۳-۴-۷ کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از روش SUFI-2 ..... ۵۹

۴-فصل چهارم: محدوده مورد مطالعه ٦٥
۴-۱ منطقه مطالعاتی. ۶۶
۴-۱-۱ موقعیت طبیعی و جغرافیایی ۶۷
۴-۱-۲ شرایط آب و هوایی ۶۸
۴-۱-۳ طرح‌های انتقال آب به داخل حوضه ۶۸
۴-۱-۴ حوضه آبریز سد زاینده‌رود ۶۹
۴-۲ بررسی شواهد تغییر اقلیم در حوضه آبریز سد زاینده رود ۷۱
۵-فصل پنجم: نتایج به کار گیری روش تحقیق در مطالعه موردی ٧٦
۵-۱ مقدمه. ۷۶
۵-۲ پیش بینی بلند مدت بارش و دما به وسیله مدل ASD ۷۷
۵-۳ ایستگاه‌های هواشناسی ۷۷
۵-۴ اطلاعات متغییرهای مستقل خروجی GCM برای محدوده مورد مطالعه ۷۹
۵-۵ ارزیابی نتایج مدل برای درجه حرارت حداقل. ۸۰
۵-۵-۱ اثرات تغییر اقلیم بر روی درجه حرارت حداقل ۸۲
۵-۶ ارزیابی نتایج مدل برای درجه حرارت حداکثر. ۹۰
۵-۶-۱ اثرات تغییر اقلیم بر روی درجه حرارت حداکثر ۹۲
۵-۷ ارزیابی نتایج مدل برای بارش. ۹۹
۵-۷-۱ اثرات تغییر اقلیم بر روی بارش ۱۰۱
۵-۸ مقایسه مدل‌های GCM. ۱۱۱
۵-۹ انتخاب سناریوی بحرانی. ۱۱۲
۵-۱۰ نتایج مدل بارش رواناب. ۱۱۳
۵-۱۱ داده‌های ورودی مدل SWAT ۱۱۳
۵-۱۱-۱ ورودی‌های پیکره بندی حوضه آبریز ۱۱۳
۵-۱۱-۲ کاربری اراضی ۱۱۵
۵-۱۱-۳ نقشه خاک ۱۱۷
۵-۱۱-۴ نقشه طبقات شیب ۱۱۸
۵-۱۱-۵ داده‌های هواشناسی ۱۱۹
۵-۱۱-۶ فایل‌های اطلاعات حوضه آبریز ۱۲۰
۵-۱۲ اجرای مدل. ۱۲۱
۵-۱۳ آنالیز حساسیت مدل. ۱۲۲
۵-۱۴ محاسبه آورد طبیعی رودخانه زاینده‌رود ۱۲۳
۵-۱۵ نتایج کالیبراسیون، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت. ۱۲۴
۵-۱۶ بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب. ۱۲۸
۵-۱۷ نتیجه گیری. ۱۳۱
۶-فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۳۳

۶-۱ خلاصه و نتیجه گیری، ۱۳۳
۶-۲ پیشنهادها، ۱۳۷
مراجع 139

چکیده:

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در اقلیم زمین به وجود آورده است. با توجه به اینکه گرمایش زمین عامل تهدید کننده‌ای برای زندگی بشر و کشاورزی در کره زمین می‌باشد، لذا پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آینده امری ضروری به حساب می‌آید. تغییر در الگوی بارش، دما و سایر متغیرهای اقلیمی بر رژیم هیدرولوژیکی نواحی مختلف تأثیرگذار است. مدل‌های جهانی اقلیم GCM مهمترین منبع برای دستیابی به اقلیم آینده می‌باشند اما قدرت تفکیک پایین مدل‌های جهانی اقلیم استفاده از آن‌ها را برای مطالعات هیدرولوژیکی و محلی ناممکن کرده است. اکثر مدل‌های جهانی اقلیم دارای قدرت تفکیک بیشتر از دو درجه عرض و طول جغرافیایی هستند. بنابراین لازم است که مقیاس خروجی این مدل‌ها را کاهش داد.

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار ASD به روش آماری داده‌های درجه حرارت حداقل، حداکثر و بارش برای ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز سد زاینده‌رود را ریزمقیاس نمودیم. در این مدل از داده‌های دو مدل جهانی اقلیم (HadCM3 و CGCM3) تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 در دو دوره زمانی 2049-2020 و 2099-2070 استفاده شد. پیش‌بینی تغییرات دمای حداقل و حداکثر در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه روندی افزایشی داشتند و شدت افزایش درجه حرارت حداکثر بیشتر از درجه حرارت حداقل است. میانگین سالانه بارش پیش‌بینی شده در دوره‌های مذکور برای همه سناریوها کاهش نشان می‌دهد و توزیع آن در فصل‌های مختلف تغییر خواهد یافت. بیشترین کاهش بارش در دوره 2099-2070 و سناریوی HadCM3-A2 و به اندازه 10/55 درصد رخ خواهد داد و کمترین میزان کاهش بارش در دوره 2049-2020 و سناریوی HadCM3-A2 و به اندازه 4/04 درصد رخ می‌دهد. در مرحله بعد خروجی‌های مدل ASD به عنوان ورودی‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد استفاده قرار گرفته است. سپس مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای منطقه مطالعاتی کالیبره شد. نتایج شبیه‌سازی شده توسط این مدل برای حوضه مطالعاتی نشان دهنده افزایش جریان در فصل پاییز در هر دو دوره زمانی است که این امر به دلیل افزایش بارش در این فصل در آینده می‌باشد. با وجود کاهش بارش در فصل زمستان، میزان رواناب در این فصل افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش دما در این فصل و تغییر شکل بارش از برف به باران می‌باشد. در این دوره‌ها همچنین با انتقال پیک جریان از ماه آوریل به ابتدای فصل بهار روبرو هستیم که در نتیجه افزایش دما در ابتدای بهار و ذوب زودهنگام برف می‌باشد. بر اساس پیش‌بینی‌ها میزان متوسط رواناب سالانه در همه سناریوها و در هر دو دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش برای سناریوی HadCM3-A2 در دوره 2099-2070 به میزان 18/35 درصد و کمترین کاهش برای سناریوی CGCM3-A2 در دوره 2049-2020 برابر 7/06 درصد اتفاق خواهد افتاد.

کلید واژه ها: تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی جو، ریزمقیاس نمایی آماری، ASD، SWAT، SUFI-2

فصل اول

مقدمه

1-1 مقدمه و کلیات

در ابتدای قرن نوزدهم میلادی همزمان با شروع تحولات صنعتی، تغییرات فراوانی در زندگی انسان‌ها رخ داده است. نیاز انسان به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی نظیر زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی باعث افزایش شدید تولید گازهایی مثل دی اکسید کربن در جو کره زمین شده است. اصلی‌ترین تأثیر این گازها، افزایش درجه حرارت زمین بوده است که باعث تحت تأثیر قرار گرفتن متغیرهای اقلیمی و در مجموع ایجاد پدیده تغییر اقلیم شده است. قابل پیش‌بینی است که تأثیرات منفی این پدیده در آینده به سبب توجه جوامع بر توسعه و نادیده گرفتن مسائل محیط زیست، تشدید خواهد شد.

بررسی آب و هوای 2000 سال پیش کره زمین نشان داده است در حالی که دما در مقیاس‌های زمانی متعدد تغییرات متفاوتی داشته است، در طی 100 سال اخیر دارای افزایش قابل توجهی بوده است. گزارش پانل بین المللی تغییر اقلیم[1] (IPCC) می‌گوید تحقیقاتی که از تمام قاره‌ها و اکثر اقیانوس‌ها صورت گرفته، نشان دهنده تغییر اقلیم در بسیاری از سیستم‌های طبیعی است. تغییر اقلیم و اثرات آن به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در مدیریت منابع آب شناخته شده است. با توجه به اینکه آب یکی از نیازهای اولیه زندگی بشری است، تغییر منابع آب موجود می‌تواند منجر به بحران‌های جدی در زمینه‌هایی نظیر اجتماعی، بهداشت عمومی و زمینه‌های زیست محیطی و اکولوژیکی گردد[28].

[1] Intergovernment Panel on Climate Change

تغییر اقلیم می‌تواند بر کمیت آب در دسترس، کیفیت آب، بزرگی و فراوانی وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ و طراحی زیر بناهای مربوط به آب و فاضلاب، آب باران و آب‌های سطحی و تولید انرژی مؤثر باشد. این پدیده همچنین می‌تواند باعث بروز عدم قطعیت‌های بیشتری در حجم منابع آب شود. رشد روزافزون جمعیت و بالا رفتن سطح رفاه جوامع نیز در کنار اثرات تغییر اقلیم، تأثیر فزاینده‌ای بر میزان نیاز آبی در زمینه‌های مختلف داشته است، که مورد اخیر به خصوص در کشورهای در حال توسعه نیازمند توجه بیشتری می‌باشد.

تحقیقات نشان می‌دهد که منابع آب کشورهای خاورمیانه همانند ایران در برابر تغییر اقلیم آسیب پذیر است. با توجه به کمبود آب در این مناطق تغییر اقلیم نتایج وخیمی می‌تواند داشته باشد. هر تغییری در دما و بارش می‌تواند به طور مستقیم و یا غیر مستقیم بر رواناب و در نتیجه در برنامه‌ریزی منابع آب تأثیرگذار باشد و به پروژه‌های بزرگ آسیب رساند. متأسفانه در اکثر این کشورها اثرات تغییر اقلیم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در اولویت قرار ندارد. بنابراین بررسی و مطالعه تغییرات آینده اقلیم برای لحاظ نمودن اثرات احتمالی آن در مدیریت منابع آب و به خصوص در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های بلند مدت کشور ضروری به نظر می‌رسد.

2-1 ضرورت، هدف و دامنه تحقیق

در نظر گرفتن تغییرات اقلیم و اثرات آن در برنامه‌ریزی منابع آب به چهار دلیل ضروری است:

- مسجل شدن وقوع پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب
- عدم توانایی برنامه ریزی‌ها و پیش‌بینی‌های مبتنی بر روند تاریخی اقلیم یک منطقه در مدیریت منابع آب
- وقوع پدیده‌های سیل و خشکسالی با فرکانس کمتر و شدت‌های زیادتر در بسیاری از مناطق در سالیان اخیر
- افزایش آگاهی و اطلاعات در زمینه پدیده‌های بزرگ مقیاس اقلیمی و ارتباط آن‌ها با فرآیندهای محلی هیدرولوژیکی

کشور ایران و حوضه‌های آبریز آن از این قاعده مستثنی نبوده و اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب موضوعی است که بیش از پیش بایستی مورد توجه قرار گیرد. در میان حوضه‌های آبریز کشور، حوضه آبریز زاینده‌رود با دارا بودن اقلیم خشک و نیمه خشک نه تنها آب مورد نیاز بسیاری از شهرها و روستاهای مرکزی ایران را تأمین می‌کند، بلکه از لحاظ استراتژیک و قرارگیری آن در مرکز ایران، بین کویر و حوضه‌های پر آب رودهای دز و کارون و همچنین وجود صنایع مادر و توریست اهمیت دو چندانی یافته است. اثرات تغییر اقلیم در این منطقه می‌تواند مشکلات زیادی

را برای تصمیم گیری درباره منابع آب به همراه داشته باشد. از اینرو با توجه به اینکه اکثر آورد حوضه در بالادست سد زاینده‌رود تأمین می‌شود، تمرکز این مطالعه بر روی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه آبریز سد زاینده‌رود می‌باشد.

با توجه به ارتباط تنگاتنگی که میان چرخه‌های هیدرولوژیکی و سیستم اقلیمی وجود دارد هر تغییری که در اقلیم ایجاد گردد، بر روی عناصر چرخه هیدرولوژیکی نیز تأثیرگذار خواهد بود. رواناب، آبدهی رودخانه، آب‌های زیرزمینی، تبخیر و تعرق، شدت سیلاب و خشکی همگی متأثر از بارش و دما هستند که خود از مهم‌ترین عناصر اقلیمی می‌باشند. در نتیجه شناخت صحیح رفتار این دو متغیر تحت اثر تغییرات اقلیمی ضروری است.

در دهه‌های اخیر شناسایی سیگنال‌های بزرگ مقیاس مدل‌های چرخه عمومی (که در حقیقت تابعی مکانی و زمانی از متغیرهای هواشناسی هستند و معمولاً با اندازه گیری تغییرات نسبی این متغیرها معرفی می‌شوند) به عنوان پیش‌بینی کننده‌های پدیده‌های هیدرولوژیکی، تحول عظیمی در پیش‌بینی‌ها بوجود آورده است. متأسفانه بار محاسباتی و پیچیدگی مدل‌های چرخه عمومی اجازه استفاده از این سیگنال‌ها در مقیاس محلی و منطقه‌ای را نمی-دهد. به همین منظور روش‌هایی برای ریزمقیاس کردن مدل‌های چرخه عمومی و منطقه‌ای توسعه یافته است.

لذا در این پایان نامه به عنوان گام اول پیش‌بینی‌های طولانی مدت بارش و دما با ابزار مدل ریزمقیاس کردن آماری صورت گرفته، در مرحله بعد با بکارگیری مدل جامع ارزیابی کمی-کیفی شبیه سازی جریان در مقیاس حوضه آبریز برای تبدیل بارش به رواناب استفاده شده است و با استفاده از اطلاعات بارش، دما، رواناب تاریخی و مشخصات فیزیولوژیکی حوضه مورد مطالعه، آورد ورودی به مخزن سد زاینده‌رود در دوره‌های آتی پیش‌بینی گردیده است. در همین راستا مراحل کار به شرح زیر است:

1- اخذ اطلاعات متغیرهای پیش‌بینی کننده هواشناسی در دوره آینده نزدیک (2049-2020) و آینده دور (2099-2070) محاسبه شده توسط دو مدل گردش عمومی CGCM3 و HadCM3 برای سناریوهای انتشار B2 و A2.
2- ریزمقیاس کردن اطلاعات دما و بارش با استفاده از مدل نرم افزاری ASD برای دو دوره آینده نزدیک و آینده دور.
3- اخذ اطلاعات تاریخی هیدرومتری (دبی) ورودی به مخزن سد زاینده‌رود، مشخصات فیزیکی-هیدرولوژیکی حوضه آبریز سد زاینده‌رود از جمله اطلاعات کاربری اراضی و پوشش گیاهی، اطلاعات مورفولوژی و جغرافیای حوضه و خصوصیات خاک.

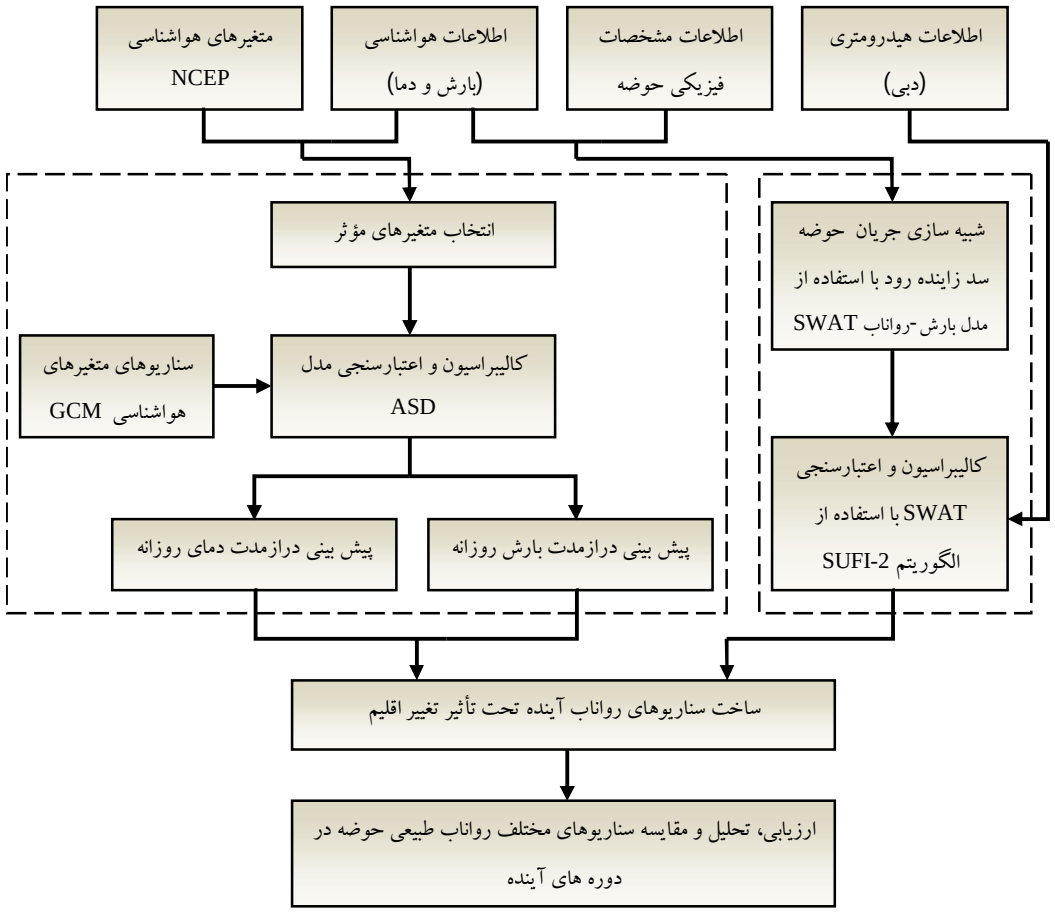
4- کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی SWAT در نقطه خروجی حوضه با استفاده از اطلاعات اخذ شده برای دوره زمانی 2007-1998.

5- اعتبارسنجی مدل در نقطه خروجی حوضه برای دوره زمانی 1997-1993.

6- ساخت سناریوهای آبدهی آینده تغییر اقلیم با استفاده از مدل کالیبره شده SWAT و بر اساس اطلاعات دما و بارش روزانه پیش‌بینی شده برای سناریوهای A2 و B2.

7- ارزیابی، تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌ها تحت سناریوهای مختلف.

در شکل 1-1 مراحل فوق و همچنین روند انجام پروژه به طور شماتیک خلاصه شده است.



شکل 1-1 روند و مراحل مطالعه و مدلسازی در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی و منابع آب حوضه‌ای

3-1 ساختار فصول پایان نامه

مطالب این پایان نامه در شش فصل ارائه شده است. در فصل اول مقدمه و تعریف کلی مسئله بیان شد. مطالب در سایر فصول به شرح زیر است:

- در فصل دوم سابقه مطالعات انجام شده در زمینه موضوعات مرتبط با تحقیق مرور شده است.
- در فصل سوم ابتدا به بیان تعاریف مربوط به تغییر اقلیم، افزایش گازهای گلخانه‌ای، ساختار مدل‌های چرخه عمومی GCM و روشهای کوچک مقیاس کردن خروجی‌های GCM پرداخته شده، سپس ساختار مدل اقلیمی ASD بیان شده و در انتها تعاریف و ساختار مدل جامع ابزار ارزیابی آب و خاک SWAT شرح داده شده است. همچنین در این فصل الگوریتم SUFI-2 که برای کالیبراسیون، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل بارش رواناب به کار می‌رودشرح داده شده است.
- در فصل چهارم به توصیف ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه در این پایان نامه پرداخته شده است.
- در فصل پنجم پیش‌بینی بلند مدت بارش و دما بر اساس متغیرهای هواشناسی خروجی مدل GCM در محدوده مورد مطالعه انجام می‌شود. همچنین نحوه ایجاد مدل حوضه آبریز در SWAT ، آماده کردن ورودی‌های مدل و کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل، شرح داده می‌شود و اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب حوضه در آینده به دست می‌آید.
- در فصل ششم نتایج خروجی‌های به دست آمده از پایان نامه جمع بندی و نتیجه گیری شده است و در انتها راهکارهای پیشنهادی جهت رفع مشکلات احتمالی و برای ادامه کار در پروژه‌های آینده ارائه می‌گردد.

فصل دوم
سابقه مطالعات

۲-۱ معرفی

پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن به عنوان یکی از مهمترین چالش‌های پیش رو در مدیریت منابع آب شناخته شده است. با توجه به اینکه تغییر اقلیم منجر به تغییرات محسوسی در متغیرهای هیدرولوژیکی مانند بارش، دما و رواناب می‌گردد، تغییر اقلیم نقش بسزایی بر منابع آب در دسترس خواهد داشت. در هر منطقه ممکن است این تغییرات بصورت مثبت یا منفی رخ می‌دهد ولی قدر مسلم اینکه میزان آب مورد دسترس در آینده تغییر خواهد کرد. لذا شناخت و ارزیابی کمی و کیفی حساسیت منابع آب به این تغییرات اقلیمی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و توجهی ویژه را می‌طلبد. در صورتی که برآوردهای قابل اعتمادی از وضعیت اقلیمی چند سال آینده در دسترس باشد، برنامه‌ریزان، مدیران و اقشار مختلف اجتماعی می‌توانند ضمن آمادگی جهت مقابله با حوادث نامطلوب نسبت به بهره برداری بهینه از منابع آب و خاک و نیروی انسانی اقدام نمایند.

در این فصل سابقه مطالعات در پنج بخش شامل (1) گرمایش جهانی و تغییرات اقلیم، (2) مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی، (3) مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب، (4) تحقیقات مرتبط با منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز زاینده‌رود) و (5) جمع بندی ارائه شده است.

۲-۲ گرمایش جهانی و تغییرات اقلیم

تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار اقلیمی یک منطقه در مقایسه با رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات ثبت و مشاهده شده مورد انتظار است. تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای، اسپری‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی و تشعشعات خورشیدی طی 2000 سال پیش منجر به تغییرات بودجه انرژی شامل مبادله انرژی بین اتمسفر و سطح زمین و تغییر در بودجه انرژی، موجب تغییر اقلیم گردیده است. در بین عوامل یاد شده، مهمترین عامل افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد که باعث گرمایش جهانی گردیده است. فعالیت‌های انساتی باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای مثل دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن و کلوروفلوئورکربن‌ها در لایه پایینی اتمسفر می-شوند. تحقیقات گوناگونی که در این زمینه انجام شده است حاکی از این است که فعالیت‌های انسانی بیشترین سهم را در تغییرات اقلیم دارند. لازم به ذکر است که گستره مطالعات در زمینه تغییر اقلیم بسیار زیاد است و با توجه به اهمیت موضوع بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرد.

موج[1] (1997) به بررسی گرمایش جهانی و اینکه چگونه افزایش دی اکسید کربن سبب حساسیت اقلیم می‌شود پرداخت. وی نشان داد بخار آب، دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای نادر جو همگی به طور موثری جاذب تابش فروسرخ یا مادون قرمز[2] می‌باشند. این گازها تابش موج بلند خروجی از سطح زمین را جذب می‌کنند و مجدداً تابش را گسیل می‌کنند. تابش در همه جهات منتشر می‌شود. بخشی از آن به فضا می‌رود و بخشی برگشته و دوباره بوسیله سطح زمین جذب می‌شود و دمای سطح زمین را افزایش می‌دهد. مسأله این است که فعالیت‌های انسانی مقدار گازهای گلخانه‌ای در جو را افزایش می‌دهد. این امر مقدار تابش موج بلند جذب شده را زیاد می‌کند و مقداری که مجدداً به طرف زمین گسیل می‌شود، سبب گرم شدن زمین می‌گردد. وی محاسبه کرد که دو برابر شدن دی اکسید کربن سبب افزایش دمای جهانی به میزان متوسط 3 تا 4 درجه سانتی گراد می‌شود [1].

گلیک[3] (1989) علت تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر را ناشی از رشد و تمرکز CO2 و سایر گازهای گلخانه‌ای در جو دانست. بخار آب، دی اکسید کربن، متان، اکسیدهای نیتروژن، انواع کلروفلوروکربن‌ها[4] و ازن از

[1] Mudge
[2] Infera-red
[3] Gleick
[4] CFCs

مهمترین گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند. بخار آب مهمترین گاز گلخانه‌ای است که حدود 68% کل گرمای ناشی از اثر گلخانه‌ای توسط بخار آب ایجاد می‌شود. اما غلظت این گاز در مقیاس جهانی تحت اثر فعالیت‌های بشر نبوده و بیشتر توسط فرآیندهای طبیعی تعیین می‌شود. پس از بخار آب CO_2 از طریق تنفس موجودات زنده، تجزیه بقایای آلی و آتش‌سوزی‌های طبیعی تامین می‌شود. منابع مصنوعی تولید این گاز استفاده از سوخت‌های فسیلی و جنگل زدایی می‌باشد [2].

جمع‌آوری شواهد علمی مبنی بر تغییر اقلیم جهانی بر اثر فعالیت بشر و پیامدهای آن از دهه 1980 آغاز شده است. در سال 1988 برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد[1] (UNEP) و سازمان جهانی هواشناسی[2] (WMO) به اتفاق هم پانل بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) را بنیان‌گذاری کردند.

IPCC در سال 1996 دومین گزارش ارزیابی خود را منتشر کرد. در این گزارش داده‌های علمی از بیش از 150 کشور ارائه شده است و تازه‌ترین اطلاعات درباره تغییر اقلیم و مخاطره پذیری سیستم‌های طبیعی و اجتماعی-اقتصادی مختصراً تشریح شده است. IPCC تا سال 2100 مقدار تمام گازهای گلخانه‌ای را پیش‌بینی کرده است که در اثر فعالیت بشر تولید می‌شوند. از موارد خاص مورد توجه افزایش سریع CO_2 در اتمسفر به خاطر سوزاندن سوختهای فسیلی می‌باشد. این پیش‌بینی‌ها بر اساس سناریوهای مختلف و هر کدام از این سناریوها بر مبنای فرضیات مختلف راجع به رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تحول تکنولوژی استوار بوده است. در این گزارش آمده است که زمین طی یک قرن اخیر 0/6 درجه سانتی گراد گرمتر شده است و بر اساس تخمین تجمع گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمایی معادل 1 تا 3/5 درجه سانتی گراد تا سال 2100 میلادی پیش‌بینی می‌گردد [3].

۳-۲ مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی

پیش‌بینی‌های مورد استفاده در علم هیدرولوژی بر حسب نوع متغیر به پیش‌بینی‌های هواشناسی-اقلیمی و پیش-بینی هیدرولوژیکی تقسیم می‌شوند. پیش‌بینی هواشناسی به پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی مانند دمای هوا و بارش می‌پردازد. هنگامی که افق زمانی پیش‌بینی هواشناسی بلند مدت باشد این نوع پیش‌بینی به پیش‌بینی اقلیمی تبدیل می‌شود. پیش‌بینی هیدرولوژیکی از مفاهیم علم هیدرولوژی برای پیش‌بینی جریان و دبی رودخانه استفاده می‌کند که در بخش بعدی بررسی شده است.

[1] United Nations Environment Programme
[2] World Meteorological Organization

در پیش‌بینی‌های اقلیمی با استفاده از اطلاعات اقلیمی مشاهده شده در شرایط فعلی، مقادیر محتمل و ممکن اقلیمی در یک دوره زمانی خاص پیش‌بینی می‌گردد. هنگامی که افق زمانی پیش‌بینی هواشناسی بلند مدت باشد برای انجام پیش‌بینی هیدرولوژیکی، ابتدا بر اساس اطلاعات اقلیمی باید متغییرهای هواشناسی منطقه پیش‌بینی شود که در این مرحله از کار، پیش‌بینی هواشناسی-اقلیمی نام می‌گیرد، سپس با توجه به نتایج متغییرهای هواشناسی، متغییرهای هیدرولوژیکی را پیش‌بینی نمود. در دهه‌های اخیر مطالعات در زمینه پیش‌بینی اثرات تغییر شرایط اقلیمی بر منابع آب افزایش یافته و با توجه به اطلاعات هواشناسی و اقلیمی پیش‌بینی شده، شرایط اقلیم آینده ارزیابی شده است [4].

انگل و هاف[1] (1997) تغییرات توزیع بارش‌های شدید (50mm‹) در غرب آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که برای ایستگاههای تحت مطالعه در سالهای اخیر احتمال بیشتری برای مواجهه با بارندگی شدید یک روزه وجود دارد که نشان از نوعی عدم ایستایی در سری‌های زمانی بوده و برازش توزیع‌های آماری روی داده-های گذشته بارندگی در این منطقه می‌تواند با اشکال همراه باشد [5].

کامگا[2] (2001) با تحقیق بر روی رودخانه بنو[3] در کامرون نشان داد که تا سال 2100 این منطقه می‌تواند شاهد افزایش بارندگی به میزان 4 تا 13 درصد، افزایش دما به میزان 1 تا 3 درجه سانتی‌گراد و تغییرات متوسط سالانه جریان به میزان 3- تا 18+ درصد باشد[6].

ویلبی[4] و همکاران (2002) اولین نسخه مدل ریزمقیاس کردن آماری (SDSM) را ارائه نمودند. مبنای این مدل رگرسیون چند متغییره می‌باشد و برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی چون بارش و دما در دراز مدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی استفاده می‌شود. آنها با استفاده از این مدل سناریوهای بارش و دمای روزانه را برای تورنتو[5] در کشور کانادا در دوره آتی 2040 تا 2069 بدست آوردند [7].

کارآموز و همکاران (2009) از مدل ریز مقیاس آماری SDSM و همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی منابع آب در حوضه آبریز رودخانه کاجو در جنوب شرقی بلوچستان استفاده کردند. با توجه به اینکه در شبکه عصبی، مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی آموزش داده شده است، این مدل روند شرایط واقعی بارش منطقه را حفظ نموده است. در مدل SDSM پیش‌بینی شونده‌ها با استفاده از پیش‌بینی کننده‌های پارامترهای اقلیمی بدست

[1] Angel & Huff
[2] Kamga
[3] Benue River
[4] Wilby
[5] Toronto

آمده‌اند در حالی که در شبکه عصبی، مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی برازش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل SDSM به دلیل لحاظ کردن شرایط اقلیمی بهتر از شبکه عصبی عمل می‌کند [8].

مدل‌های اقلیمی بر اساس نوع و میزان دقت تقسیم‌بندی می‌گردند. این مدل‌ها از مقیاس‌های کوچک شامل آب و هوای یک منطقه تا مقیاس‌های بزرگ شامل تغییرات اقلیم در مقیاس قاره‌ای را شامل می‌شوند. هرچند مدل‌های بزرگ مقیاس کلی بوده و نشان دهنده تغییرات عمومی می‌باشند، اما استفاده از مدل‌های در مقیاس کوچک برای کاربردهای منطقه‌ای و تبدیل نتایج مدل‌های بزرگ مقیاس به پدیده‌های منطقه‌ای لازم است. از مهمترین مدل‌های تدوین شده در این زمینه مدل‌های معروف به چرخه عمومی می‌باشد. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی چرخه عمومی جو بوده و می‌توانند برای شبیه‌سازی جو-اقیانوس با مقیاس‌های گوناگون به کار گرفته شوند.

یاتس[1] و همکاران (1998) با مدل کردن حوضه رودخانه نیل تحت تأثیر سناریو اقلیم با استفاده از 5 مدل گردش عمومی نشان دادند که این حوضه در دوره‌های آتی نسبت به تغییر اقلیم حساس بوده و به خصوص مقادیر متوسط دبی در آن افزایش خواهد یافت [9].

بابائیان و همکاران (2004) تغییرات اقلیمی کشور کره جنوبی را با استفاده از مدل ریز مقیاس LARS-WG در دوره زمانی 2010 تا 2039 مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه تمامی مقادیر روزانه بارش، تابش و دما برای ده ایستگاه سینوپتیک کره جنوبی تولید شد و مطالعات بر روی پارامترهای اقلیمی بارش، تابش، دمای حداقل و حداکثر، طول روزهای خشک و تر، روزهای یخبندان و داغ و روند تغییرات بارش‌های سنگین برای این دوره انجام گرفته است [10].

حسامی و همکاران (2008) اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی شرق کانادا را با استفاده از مدل ریز مقیاس ASD بر مبنای رگرسیون ارزیابی کرد و نتایج آنرا با مدل SDSM مقایسه کرد. در این تحقیق از خروجی‌های مدل-های گردش عمومی HadCM3 انگلستان و CGCM1 کانادا بعنوان ورودی‌های مدل‌های ریزمقیاس استفاده شده است [11].

تیسوئیل[2] و همکاران (2010) چهار مدل ریزمقیاس استاتیکی برای کوچک‌مقیاس کردن داده‌های خروجی GCM پیشنهاد کردند. در این تحقیق جریان رودخانه‌ای در شمال غربی فرانسه تحت بررسی قرار گرفت و اثر تغییر اقلیم بر جریان آینده رودخانه تحت دو سناریوی A1B و A2 مورد بررسی قرار گرفت [12].

[1] Yates
[2] Tisseuil

ژانگ[1] و همکاران (2010) در تحقیقی تاثیر تغییرات بارش در آینده، ناشی از تغییر اقلیم را بر روی قدرت فرسایندگی بارش در شمال شرقی چین مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از 6 مدل گردش عمومی GCM تحت سه سناریوی تغییر اقلیم (A2,A1B,B1) و در دو دوره 2030 تا 2059 و 2070 تا 2099 بارش منطقه پیش‌بینی گردید و خروجی‌های این مدل‌ها با استفاده از مدل CLIGEN ریز مقیاس گردید [13].

هاشمی[2] و همکاران (2011) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش حوضه آبریز کلوتا[3] در جنوب نیوزیلند پرداخت. وی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی توضیحی ژنتیک[4] (GEP) که بر مبنای رگرسیون غیر خطی توسعه داده شده است بارش حوضه را ریز مقیاس کرد. وی همچنین با استفاده از مدل SDSM اقدام به ریزمقیاس کردن بارش حوضه کرد و نتایج آنرا با GEP مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطای فاکتورهای صحت‌سنجی مدل برای GEP کمتر از SDSM است [14].

۴-۲ مدل‌های شبیه سازی بارش-رواناب

با توجه به اهمیت میزان منابع آب در دسترس، پیش‌بینی جریان و به طور کلی پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی دارای اهمیت بسزایی در بحث‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد. به طوری که با آگاهی از وضعیت خشکسالی یا ترسالی آینده می‌توان برای منابع آب موجود برنامه‌ریزی نمود. برای پیش‌بینی هیدرولوژیکی، ابزاری مورد نیاز است تا بتوان برآیند تاثیر سیستم اقلیمی را بر سیستم هیدرولوژیکی شبیه‌سازی نمود، به صورتی که شرایطی شبیه به وضع واقعی منطقه را بتوان مدل کرد.

هدف از مدلسازی هیدرولوژیکی تخمین توزیع آب‌ها و جابجایی آنها بر روی سطح زمین، زیر سطح زمین و در رودخانه می‌باشد. همچنین یکی دیگر از اهداف مورد نظر، تخمین میزان آب‌های ذخیره شده در خاک یا بسترهای طبیعی رودخانه و یا تبدیل آنها به یکدیگر می‌باشد. همچنین این مدل‌ها می‌توانند میزان تغییرات دبی و حجم رواناب را تخمین بزنند. مدل‌های هیدرولوژیکی برگرفته از نتایجی پیچیده ومتنوع، قابل دسترسی به دو صورت زمانی و مکانی[5] بوده و مسائل فیزیکی مربوط به روابط آب، خاک، گیاه و اتمسفر را تشریح می‌کنند. یک مدل شبیه‌ساز حوضه آبریز فرآیندهای مربوط به مسائل هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی می‌کند[15].

---

[1] Zhang
[2] Hashmi
[3] Clutha
[4] Gene Expression Programming
[5] Spatiotemporally