

سورة الاحقاف



دانشکده عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

# بررسی اثرات تغییر اقلیم در منابع آب سطحی بالادست سد گلستان به کمک مدل SWAT

افشین شهریاری

اساتید راهنما:

دکتر احمد احمدی

دکتر سعید گلیان

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۳

شماره :

تاریخ :

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم (فارسی) تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر  
در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیأت داوران نسخه نهائی پایان نامه آقای افشین شهریاری را تحت عنوان : بررسی اثرات تغییر اقلیم  
در منابع آب سطحی بالادست سد گلستان به کمک مدل SWAT

از نظر فرم و محتوی بررسی کردند و پذیرش آنرا برای دریافت درجه کارشناسی ارشد تایید می نمایند.

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیأت داوران
	دانشیار	دکتر احمد احمدی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر سعید گلپان	۲- استاد راهنما
	استادیار	دکتر رمضان واقعی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید فضل الله ساغروانی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر جعفر یزدی	۵- استاد ممتحن

**اگر شایسته شان باشد این کم ترین.**

**تقدیم می گردد به پدر و مادر مهربان و فداکارم. که همواره  
پشتیبان من بوده و وجودشان باعث دلگرمی است.  
و همسرم که با صبر و حمایتش مراهم بوده است.**

## تشکر و قدردانی:

ابتدا سپاس خدای را که آدمی را در تمامی مراحل زندگی یار و یاور است، که جز با لطف و عنایات حضرت حقش طی طریق ممکن نیست.

از اساتید گرانقدر آقایان دکتر احمد احمدی و دکتر گلپان که زحمت راهنمایی انجام این پایان نامه برعهده داشته و همواره پشتیبان و راهنمای بنده بودن، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

از اساتید ارجمند آقای دکتر ساغروانی و آقای دکتر یزدی که زحمت داوری این تحقیق را بر عهده گرفته و با رهنمود های خویش در بهبود آن یاری رسان بودن، تشکر می نمایم.

از دوستان و عزیزانی که هریک به نحوی در انجام این پایان نامه به بنده کمک کردند، آقایان مهندس

کیارش آرا، حسین سلمانی، صالح مهدی زاده، دکتر کریم عباسپور و دکتر حامد روحانی کمال تشکر را

دارم.

## تعهد نامه

اینجانب افشین شهریاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی اثرات تغییر اقلیم در منابع آب سطحی بالادست سد گلستان به کمک مدل SWAT تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی به عنوان استاد راهنمای اول و دکتر سعید گلیان به عنوان استاد راهنمای دوم متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده 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 / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی 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 افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، 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 / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق و نشر

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

## چکیده

بررسی تغییر اقلیم و ارزیابی اثرات آن بر مولفه های چرخه های هیدرولوژیکی حوضه آبریز کمک فراوانی به مدیریت بهینه حوضه آبریز می کند. دبی خروجی از حوضه آبریز به عنوان یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی است که برآورد درست آن در برنامه ریزی و استفاده بهینه از آب در دسترس حائز اهمیت می باشد. در این تحقیق ابتدا حوضه آبریز سد گلستان (شامل زیرحوضه های تنگراه و گالیکش) با استفاده از مدل توزیعی و پیوسته زمانی SWAT شبیه سازی شده است. پس از کالیبراسیون مدل با استفاده از بسته نرم افزاری SWAT CUP و الگوریتم SUFI-2، تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب خروجی از ایستگاه های تنگراه و گالیکش بررسی گردید. ورودی های داده های اقلیمی برای مطالعه تغییر اقلیم از داده های ریزمقیاس شده مدل چرخش عمومی (CGCM3 (GCM) گرفته شده است. شبیه سازی برای جریان خروجی از حوضه های تنگراه و گالیکش انجام شده و آمارهای دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۵ برای واسنجی (کالیبراسیون) مدل و دوره ۲۰۰۳-۲۰۰۱ جهت صحت سنجی مدل استفاده گردید. در ارزیابی مدل برای ایستگاه تنگراه با ضریب نش-ساتکیف (NS) در مراحل کالیبراسیون و صحت سنجی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۷ و برای ایستگاه گالیکش به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۸ بدست آمد. نهایتاً جریان خروجی ایستگاه های تنگراه و گالیکش در دو دوره زمانی ۲۰۶۴-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۱ تحت سناریوهای A2، B1 و A1B شبیه سازی گردید. با مقایسه دبی های شبیه سازی شده برای دوره های آینده و دوره فعلی، پیش بینی می شود که در آینده دبی پیک جریان بین یک تا دو ماه زودتر به وقوع می پیوندد. دلیل این امر می تواند تغییر الگوی ریزش های جوی از بارش برف به باران در مناطق مرتفع، ذوب زود هنگام برف و همچنین تغییر فصول بارش باشد. میانگین ماهانه دبی حوضه گالیکش تحت سناریو های مختلف افزایش یافته است. در حوضه تنگراه نیز برای سناریوهای خوش بینانه (B1) و متوسط (A1B) دبی جریان افزایش

می‌یابد، ولی برای سناریو بدبینانه (A2) دبی کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات دوره زمانی

۲۰۸۱-۲۰۹۹ شدیدتر از دوره ۲۰۶۴-۲۰۴۶ خواهد بود.

واژه های کلیدی: شبیه سازی بارش - رواناب، تغییر اقلیم، SWAT، SWAT CUP، SUFI-2



## فهرست مطالب

۱- مقدمه .....	۱
۱-۲- دلایل تحقیق در باب تغییر اقلیم .....	۳
۱-۳- هدف تحقیق .....	۴
۱-۴- فصل های پایان نامه .....	۴
۲- مروری بر تحقیقات انجام شده .....	۷
۲-۱- تحقیقات داخلی .....	۸
۲-۲- تحقیقات خارجی .....	۱۱
۳- مواد و روش ها .....	۱۵
۳-۱- مدل SWAT .....	۱۶
۳-۱-۱- تاریخچه مدل .....	۱۶
۳-۱-۲- خصوصیات مدل SWAT .....	۱۷
۳-۱-۳- مدلسازی SWAT .....	۱۹
۳-۱-۴- اجزای مدل SWAT و اطلاعات ورودی .....	۲۱
۳-۱-۴-۱- فاز خشکی چرخه هیدرولوژیکی .....	۲۱
۳-۱-۴-۲- آب و هوا (داده های اقلیمی) .....	۲۲
۳-۱-۴-۳- برف .....	۲۲
۳-۱-۴-۴- پوشش اراضی و رشد گیاهان .....	۲۴
۳-۱-۴-۵- فرسایش .....	۲۴
۳-۱-۴-۶- مدیریت .....	۲۵
۳-۱-۴-۷- مواد مغذی .....	۲۵
۳-۱-۴-۸- روندیابی جریان آبراهه اصلی .....	۲۶
۳-۱-۴-۹- محاسبه حجم رواناب به روش شماره منحنی SCS .....	۲۷

- ۲۸ ..... ۱۰-۴-۱-۳ محاسبه حجم رواناب به روش گرین - آمپ
- ۳۰ ..... ۱۱-۴-۱-۳ حداکثر رواناب
- ۳۱ ..... ۱۲-۴-۱-۳ زمان تمرکز
- ۳۲ ..... ۱۳-۴-۱-۳ شدت بارش
- ۳۳ ..... ۱۲-۴-۱-۳ رابطه منطقی اصلاح شده برای محاسبه رواناب حداکثر
- ۳۴ ..... ۱۳-۴-۱-۳ تبخیر و تعرق پتانسیل
- ۳۶ ..... ۱۴-۴-۱-۳ آب موجود در خاک
- ۴۰ ..... ۲-۳ برنامه SWAT-CUP
- ۴۱ ..... ۱-۲-۳ برنامه SUFI-2
- ۴۲ ..... ۲-۲-۳ تحلیل حساسیت
- ۵۰ ..... ۳-۲-۳ واسنجی مدل (کالیبراسیون)
- ۵۱ ..... ۴-۲-۳ اعتبارسنجی مدل
- ۵۲ ..... ۵-۲-۳ ارزیابی مدل
- ۵۳ ..... ۳-۳ تغییر اقلیم
- ۵۵ ..... ۱-۳-۳ مدلسازی اثرات تغییر اقلیم
- ۵۶ ..... ۲-۳-۳ مدل های GCM
- ۵۷ ..... ۳-۳-۳ سناریوهای انتشار
- ۶۱ ..... ۴-۳-۳ کوچک مقیاس کردن خروجی های GCM
- ۶۴ ..... ۴-۳ معرفی منطقه مورد مطالعه:
- ۶۵ ..... ۱-۴-۳ اقلیم حوضه
- ۶۵ ..... ۲-۴-۳ ورودی های مدل
- ۶۶ ..... ۱-۲-۴-۳ نقشه ها
- ۶۸ ..... ۲-۲-۴-۳ داده های اقلیمی
- ۶۹ ..... ۵-۳ ساخت و اجرای مدل منطقه
- ۶۹ ..... ۱-۵-۳ ساخت مدل منطقه با SWAT
- ۷۲ ..... ۲-۵-۳ مدلسازی اثر تغییر اقلیم

۴- نتایج ..... ۷۵

۴-۱- مقدمه ..... ۷۶

۴-۲- خصوصیات حوزه آبریز تنگراه و گالیکش ..... ۷۷

۴-۳- نتایج اجرای اولیه مدل ..... ۷۸

۴-۴- تحلیل حساسیت ..... ۸۰

۴-۵- واسنجی (کالیبراسیون) مدل ..... ۸۵

۴-۶- اعتبار سنجی مدل ..... ۸۸

۴-۷- ارزیابی آماری مدل در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی ..... ۹۰

۴-۸- شبیه سازی برای داده های اقلیمی آینده ..... ۹۱

۴-۸-۱- تغییرات دما ..... ۹۲

۴-۸-۲- تغییرات بارش ..... ۹۵

۴-۸-۳- دبی شبیه سازی برای داده های اقلیمی آینده ..... ۹۷

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۵

۵-۱- مقدمه ..... ۱۰۶

۵-۲- نتیجه گیری ..... ۱۰۷

۵-۳- پیشنهادات ..... ۱۰۸

منابع: ..... ۱۱۱

## فهرست شکل ها

- شکل ۳-۱- نمایی از چرخه هیدرولوژیکی مدل ..... ۲۰
- شکل ۳-۲- چرخه نیتروژن در SWAT ..... ۲۵
- شکل ۳-۳- مقایسه بین توزیع رطوبت حاصل از روش گرین-آمپ و واقعیت مشاهده شده در خاک (نایتچ، ۲۰۰۵) .... ۲۹
- شکل ۳-۴- رابطه بین SWAT و SWAT-CUP ..... ۴۱
- شکل ۳-۵- مفهوم توصیف رابطه بین عدم قطعیت پارامتر و عدم قطعیت پیش بینی شده (عباسپور، ۲۰۰۸) ..... ۴۳
- شکل ۳-۶- شماتیک نمونه برداری لاتین هایپرکیوب (عباسپور، ۲۰۰۸) ..... ۴۹
- شکل ۳-۷- موقعیت حوضه های مورد مطالعه در استان گلستان و ایران ..... ۶۴
- شکل ۳-۸- نقشه DEM منطقه مورد مطالعه ..... ۶۶
- شکل ۳-۹- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۰- نقشه خاک منطقه مورد مطالعه ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۱- موقعیت مکانی ایستگاههای باران سنجی و تبخیرسنجی مورد استفاده ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۲- آبراهه ها و زیرحوضه های ساخته شده حوضه تنگراه توسط مدل SWAT ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۳- آبراهه ها و زیرحوضه های ساخته شده حوضه گالیکش توسط مدل SWAT ..... ۷۰
- شکل ۴-۱- همبستگی بین دبی شبیه سازی و مشاهداتی ماهانه در اجرای اولیه مدل (بدون کالیبراسیون)- برای خروجی حوضه تنگراه (شکل سمت راست) و خروجی حوضه گالیکش (شکل سمت چپ) ..... ۷۹
- شکل ۴-۲- مقایسه سری زمانی دبی شبیه سازی اولیه با مقادیر دبی مشاهداتی در دوره زمانی ماهانه - ایستگاه تنگراه ..... ۷۹
- شکل ۴-۳- مقایسه سری زمانی دبی شبیه سازی اولیه با مقادیر دبی مشاهداتی در دوره زمانی ماهانه - ایستگاه گالیکش .. ۷۹
- شکل ۴-۴- همبستگی دبی مشاهداتی و شبیه سازی کالیبره شده (سمت راست - تنگراه) و (سمت چپ - گالیکش) ..... ۸۰
- ..... ۸۶

- شکل ۴-۵- مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی کالیبره شده با مقادیر دبی مشاهداتی در مقابل بارش مرتبط ایستگاه تنگراه.....  
 ۸۶ .....
- شکل ۴-۶- مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی کالیبره شده با مقادیر دبی مشاهداتی در مقابل بارش مرتبط ایستگاه گالیکش  
 ۸۷ .....
- شکل ۴-۷- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه تنگراه به همراه باند ۹۵ درصد عدم قطعیت.....  
 ۸۷ .....
- شکل ۴-۸- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه گالیکش به همراه باند ۹۵ درصد عدم قطعیت...  
 ۸۸ .....
- شکل ۴-۹- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه تنگراه (۱۳ ماه آمار دبی وجود ندارد).....  
 ۸۹ .....
- شکل ۴-۱۰- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه گالیکش.....  
 ۸۹ .....
- شکل ۴-۱۱- میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتیگراد) در دوره ۲۰۹۹ - ۲۰۸۱ و دوره پایه .....  
 ۹۲ .....
- شکل ۴-۱۲- میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتیگراد) در دوره ۲۰۶۴ - ۲۰۴۶ و دوره پایه .....  
 ۹۳ .....
- شکل ۴-۱۳- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۶۴-  
 ۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۱) تحت سناریوی B1، (درجه سانتیگراد).....  
 ۹۴ .....
- شکل ۴-۱۴- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۶۴-  
 ۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۱) تحت سناریوی A2، (درجه سانتیگراد).....  
 ۹۴ .....
- شکل ۴-۱۵- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۶۴-  
 ۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۱) تحت سناریوی A1B، (درجه سانتیگراد).....  
 ۹۴ .....
- شکل ۴-۱۶- میانگین ماهانه بارش (میلی متر) دوره های (۲۰۶۴-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۱).....  
 ۹۶ .....
- شکل ۴-۱۷- میانگین بارش (میلی متر) ماهانه سناریوهای A2 (سمت چپ) و B1 (سمت چپ).....  
 ۹۶ .....
- شکل ۴-۱۸- میانگین دبی ماهانه خروجی (مترمکعب بر ثانیه) از ایستگاه گالیکش در دوره (۲۰۶۴-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-  
 ۲۰۸۱).....  
 ۹۸ .....
- شکل ۴-۱۹- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو B1.....  
 ۹۹ .....
- شکل ۴-۲۰- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A2.....  
 ۹۹ .....

شکل ۴-۲۱- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A1B ..... ۱۰۰

شکل ۴-۲۲- میانگین دبی ماهانه خروجی (مترمکعب بر ثانیه) از ایستگاه تنگراه در دوره (۲۰۶۴-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۱)

۱۰۱

شکل ۴-۲۳- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو B1 ..... ۱۰۱

شکل ۴-۲۴- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A2 ..... ۱۰۲

شکل ۴-۲۵- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A1B ..... ۱۰۲

## فهرست جداول

- جدول ۳-۱ - متغیرهای رابطه دبی پیک در مدل SWAT ..... ۳۳
- جدول ۳-۲ - پیش بینی سناریوهای انتشار برای سال ۲۱۰۰ ..... ۶۰
- جدول ۴-۱ - نوع و درصد پوشش گیاهی حوضه های مورد مطالعه ..... ۷۷
- جدول ۴-۲ - مساحت کلاس بندی شیب حوضه ها ..... ۷۸
- جدول ۴-۳ - پارامترهای مورد استفاده در تحلیل حساسیت و دامنه تغییرات آنها در برنامه SWAT  
CUP ..... ۸۲
- جدول ۴-۴ - نمونه ای از نتایج تحلیل حساسیت کلی ..... ۸۳
- جدول ۴-۵ - ضرایب آماری ارزیابی مدل در شبیه سازی دبی ..... ۹۱
- جدول ۴-۶ - تغییرات نسبی میانگین ماهانه بارش ..... ۹۷
- جدول ۴-۷ - تغییرات نسبی دبی میانگین ماهانه دوره های آینده نسبت به دوره پایه ..... ۱۰۳





# فصل اول

## مقدمه

## ۱- مقدمه

منابع تجدید شونده از موهبت های الهی هستند که باید درست و آگاهانه استفاده شوند تا فرآیند تجدید و بازسازی آن دچار اختلال نشود. اگر بخواهیم در آینده جامعه ای بهتر داشته باشیم باید در جهت حفظ احیاء و توسعه این منابع بیش از پیش بکوشیم در غیر این صورت جهان آینده جهان توأم با فقر و گرسنگی و محیطی آلوده و غیر قابل زندگی خواهد بود.

آب بعنوان حیاتی ترین نیاز انسان بعد از هوا از جمله این منابع تجدید پذیر است. باتوجه به کمبود آب شیرین و قابل استفاده در چرخه طبیعی و گسترش روزافزون نیاز انسان و جامعه بشری به این منبع حیاتی، ناگزیر به توجهی بیش از پیش است. انتظار می رود که تقریباً تمام مناطق جهان تاثیر منفی تغییر

اقلیم را بر روی منابع آب و اکوسیستم آب های شیرین تجربه کنند (IPCC, 2007).

تغییر اقلیم و به طور خاص تخریب حوضه آبریز باعث تغییرات بارز دبی و زمان جریان آب می شود. تخریب حوضه آبریز از اثر متقابل خصوصیات فیزیوگرافی، اقلیم و بهره برداری نامناسب از زمین (قطع درختان، کشت نامناسب، احداث معادن، جاده سازی و غیره) حاصل می شود و اثرات آن به صورت سیل، خشکسالی، فرسایش خاک، لغزش ها، رسوبگذاری شدید، آلودگی آب بروز کرده و باعث ایجاد بار مالی و تشدید مشکلات اجتماعی می گردد (IPCC, 2007).

تغییر اقلیم طبق تعریف هیئت بین الدول تغییر اقلیم عبارت است از، تغییر در وضعیت آب و هوا که با تغییر در میانگین و یا تغییر خواص آن شناخته می شود و برای یک مدت زمان طولانی، معمولاً یک دهه یا بیشتر باقی بماند.

## ۱-۲- دلایل تحقیق در باب تغییر اقلیم

ایران با متوسط نزولات جوی ۲۶۰ میلی متر در سال از کشورهای خشک جهان و دارای منابع آب محدود است (این میزان برای شرق استان گلستان ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی متر در سال است). با شرایط فعلی رشد جمعیت و افزایش مصرف سرانه آب و از طرفی مسئله تغییر اقلیم مشکل کم آبی در آینده چندان دور از ذهن نیست. حل این بحران در درجه اول در سایه کاهش گازهای گلخانه ای و گرمایش زمین است ولی این راهی بلندمدت است. برای مقابله با این بحران و کاهش اثرات آن، باید منابع آب در دسترس را بصورت بهینه مدیریت کنیم. مدیریت منابع آب شامل، برآورد میزان تقاضای آب و پیش بینی جریان است. برآورد نیازها امری نسبتاً راحت است. آنچه مسئله را دشوار می سازد، پیش بینی جریان رودخانه در ماهها و سالهای آینده می باشد.

طبق گزارش سازمان ملل متحد، سرانه منابع آب تجدید شونده سالانه ایران تا سال ۱۴۰۰ به حدود ۸۰۰ مترمکعب کاهش یابد که پایین تر از مرز کم آبی (۱۰۰۰ مترمکعب) است. با این شرایط ایران وارد شرایط کم آبی شدید می گردد.

بحران کم آبی یک جنبه مسئله تغییر اقلیم است، جنبه دیگر مشکل تغییر الگوی بارش و ایجاد بارشهای سیل آسا است. بحرانی که شرق استان گلستان در دو دهه اخیر چندین بار با آن مواجه گشته است. تغییر الگوی بارش طیف گسترده‌ی مشکلات را ایجاد می کند. کمبود بارش در فصل های نیاز آبی، بارش در

فصل‌هایی که آب مورد نیاز نیست و ایجاد سیلاب‌های مخرب که خسارات مالی و جانی بر جا می‌گذارد از جمله این مشکلات است.

### ۱-۳- هدف تحقیق

تغییر اقلیم تحت اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، باعث تغییر رژیم جریان حوضه‌های آبریز می‌شود. که این امر باعث بروز نگرانی در باب، آب در دسترس و کنترل رواناب‌های سطحی ایجاد می‌کند. با توجه به سیل خیز بودن منطقه شرق گلستان، بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی منطقه ضروری می‌باشد.

در این تحقیق، ابتدا مدل هیدرولوژیکی SWAT برای منطقه ساخته و کالیبره خواهد شد و پس از بررسی تغییرات بارش و دمای آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم، دبی خروجی از حوضه آبریز شبیه‌سازی می‌گردد. نهایتاً تغییرات رژیم جریان رودخانه در طول سال بررسی و با دوره فعلی مقایسه می‌گردد.

### ۱-۴- فصل‌های پایان نامه

فصل اول شامل مقدمه تحقیق است.

فصل دوم: تاریخچه و مطالعات پیشین

در قسمت اول این فصل به معرفی مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده (SWAT)، بسته نرم افزاری SWAT CUP و الگوریتم SUFI2 به عنوان یکی از اجزای اصلی تحقیق پرداخته شده است. در قسمت بعدی تغییر

اقلیم و اجزای مرتبط با آن آورده شده است. و نهایتاً در قسمت آخر فصل مروری بر پژوهش‌های انجام شده با استفاده از مدل SWAT و تحقیقات تغییر اقلیم، انجام شده است.

فصل سوم: مواد و روش‌ها

در این فصل به معرفی منطقه مورد مطالعه، چگونگی ساخت و راه‌اندازی مدل هیدرولوژیکی SWAT، تهیه داده‌های اقلیمی و روش‌های مورد استفاده در تحقیق ارائه گردیده است.

فصل چهارم: شبیه‌سازی و نتایج

در این فصل ابتدا نتایج شبیه‌سازی حوضه آبریز به کمک مدل SWAT آورده می‌شود. سپس روند تغییرات بارش و دمای ریزمقیاس شده بررسی می‌گردد. نهایتاً نتایج شبیه‌سازی دبی خروجی از حوضه‌های مورد مطالعه بررسی می‌گردند.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل نتایج شبیه‌سازی جمع‌بندی شده و همچنین برای ادامه کار در تحقیقات آینده پیشنهاداتی ارائه گردیده است.



## فصل ۲

تاریخچه و مطالعات پیشین

## ۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

مدل SWAT که مدلی نیمه توزیعی مکانی و زمانی پیوسته است. و بر اساس روابط فیزیکی تهیه شده است. این مدل، مدلی همه جانبه می‌باشد و اجزای اصلی گوناگونی نظیر چرخه آب، چرخه مواد معدنی، رسوب، مدل کردن کشت کشاورزی و زیرجزءهای دیگر را شامل می‌شود. از این‌رو در طیف گسترده‌ای از تحقیقات در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه برخی از مطالعات را در دو بخش داخلی و خارجی مرور می‌شود.

### ۲-۱- تحقیقات داخلی

ذهبیون و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی با استفاده از مدل SWAT و مدل‌های تغییر اقلیم به تخمین رواناب حوضه قره‌سو از سرشاخه‌های رودخانه کرخه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ پرداختند. نتایج نشان از افزایش دمای منطقه بین ۱ تا ۴ درجه سلسیوس دارد. بارش نیز بجز در ماه‌های بدون بارش کاهش و افزایشی بین ۳۰- تا ۳۰ درصد خواهد داشت. همچنین تغییرات میزان دبی بین ۱۲۰ درصد افزایش تا ۹۰ درصد کاهش در ماه‌های مختلف سال متغیر خواهد بود.

اخوان و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی آب‌شویی نیترات از منابع کشاورزی و تاثیر آن بر غلظت نیترات منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای مدیریتی مختلف در دشت بهار- همدان پرداخته‌اند. آنها ۱۸ سناریو مدیریتی مختلف را بررسی کردند، نهایتاً در بهترین سناریو با کاهش ۶۲ درصدی کود نیترات و استفاده از جایگزین‌های دیگر باعث کاهش میزان آب‌شویی نیترات سالانه بمیزان ۲۴۳ کیلوگرم نیتروژن در هکتار شد.



فaramarzi و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۸)، منابع آب آبی ( آب در دسترس و خروجی سفره عمیق) و آب سبز (تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی بعلاوه رطوبت خاک) را در ایران در مقیاس ماهانه مدل کردند. نتایج نشان داد که آبیاری تاثیر زیادی بر بالانس آب در استان‌های با کشاورزی آبی دارد. با توجه به محصول غذایی اصلی در کشور، ۵۵ درصد از گندم آبی و ۵۷٪ از گندم دیمی در هر سال در مناطق با کمبود آب تولید می شوند. رضا سعیدی و همکاران (۱۳۸۹)، با ارزیابی رواناب حوضه سد پیشین برای دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۹ به این نتیجه رسیدند که میانگین دبی در چهار ماه پر آب سال (نیمه آذر تا نیمه فروردین) افزایش می‌یابد. همچنین دبی حداکثر نسبت به دوره پایه افزایش چشمگیری می‌یابد.

روح الله نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، در پروژه ای وسیع به بررسی منابع آب حوضه دریای سیاه با قدرت تفکیک فضایی و زمانی بالا پرداخته‌اند. و در آن مسائل ایجاد شده در ساخت مدل‌هایی در مقیاس بزرگ را شرح دادند. آنها از مدل SWAT برای مدل‌سازی و از بسته نرم افزاری SWAT-CUP و زیرمجموعه‌ی آن، مدل SUFI-2 برای کالیبراسیون و آنالیز عدم قطعیت مدل ساخته شده استفاده کردند. در بخشی از نتایج نشان داده شد، مناطقی در اوکراین و رومانی هم مرز با دریای سیاه و بخش‌هایی از ترکیه و روسیه در حوزه، بالاترین کسری آب را تجربه خواهند کرد.

علیزاده و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی میزان تبخیر و تعرق واقعی سالانه را در حوضه آبریز نیشابور با استفاده از مدل SWAT برآورد کردند. با توجه به ارتباط مستقیم تبخیر و تعرق با عملکرد گیاه، مدل علاوه بر دبی رودخانه برای عملکرد گیاه نیز واسنجی (کالیبره) شد. و سپس متوسط ده ساله تبخیر و تعرق و بارندگی ۲۳۰ و ۲۷۰ میلی‌متر محاسبه گردید.

پورعبدالله و تجریشی (۱۳۸۵)، در تحقیقی به مدل‌سازی فرسایش حوضه امامه در بالادست سد لتیان به کمک مدل‌های RUSLE و SWAT پرداختند. در این پژوهش پس از ارزیابی دو مدل به این نتیجه

---

<sup>1</sup> Faramarzi

رسیدند که مدل RUSLE بدلیل ناسازگاری با مناطق کوهستانی و عدم در نظرگرفتن فرسایش ناشی از ذوب برف، فرسایش را بسیار بیشتر تخمین زده و در مقابل SWAT که قابلیت محاسبه اثر ذوب برف در تولید برف را دارد نتیجه بهتری دارد. همچنین بیان می دارند که با تغییر روش کشت به روش کشت نواری، فرسایش کاهش یافته و میزان فرسایش خاک و خروجی فسفر از حوضه به ترتیب ۱۸ و ۴۲ درصد کاهش می یابد.

سید قاسمی و همکاران (۱۳۸۵)، اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود را ارزیابی کردند و به کمک نرم افزار SWAT تغییرات رواناب برای حوضه برای دو دوره ۳۰ ساله، ۲۰۵۰-۲۰۲۱ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ و برای دو سناریو شبیه سازی نمودند. نتیجه کاهش جریان در ماههای آوریل و می و انتقال پیک جریان از ماههای مارس و آوریل به ژانویه و مارس را نشان داد.

غریب و مساعدی (۱۳۸۲)، با بررسی تغییرات زمانی بارندگی در گرگانرود دریافتند که مقادیر بارندگی حوضه گرگانرود علیرغم اینکه در فصل های بهار و تابستان روند کاهشی دارد بطور سالانه این روند مثبت و افزایشی است.

آذری و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه آبریز گرگانرود را مطالعه کردند. طبق تحقیقات ایشان بارندگی حوضه در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ تا ۶/۷ درصد کاهش می یابد ولی الگوی بارشها در طول سال تغییری نمی کند. همچنین میزان آب سطحی و آب خاک کاهش ولی آبدهی کل حوضه و تبخیر و تعرق افزایش می یابند.

## ۲-۲- تحقیقات خارجی

در پژوهشی پنگ شی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) از مدل SWAT برای مدلسازی هیدرولوژیکی حوضه جیجان<sup>۲</sup> استفاده کردند. و نتایج نشان داد که بترتیب با مقادیر  $R^2$  و  $E_{NS}$ ، ۰/۹۲ و ۰/۸۸، مدل بخوبی برای منطقه عمل می‌کند و نشان می‌دهد که جریان پایه نقش مهمی در جریان خروجی از حوضه دارد. و بیش از ۶۰ درصد نزولات جوی با تبخیر و تعرق از حوضه خارج می‌شود.

سانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) طی تحقیق واکنش هیدرولوژیکی حوضه آبریز رودخانه بیجینگ چین را در مقابل تغییر اقلیم به کمک مدل SWAT بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش دما و بارش ثابت، تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد درحالیکه میزان آب (water yield) کاهش می‌یابد. همچنین در شرایط دمای ثابت و افزایش بارش، تبخیر و تعرق و میزان آب کم و بیش افزایش می‌یابند.

دیکسون<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۲) اثرات شهری شدن یک حوضه آبریز در فلوریدا را بر جریان سطحی را ارزیابی کردند. آنها از داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هواشناسی بعنوان ورودی استفاده کردند. نتایج نشان داد که هیدروگراف‌های شبیه سازی مدل SWAT، به اطلاعات هواشناسی بسیار حساس است. همچنین با تغییر سناریوهای کاربری اراضی ترکیب آبهای سطحی متفاوت خواهد بود.

پرازولی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲) تاثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب جنوب برزیل را با استفاده از سناریوهای انتشار بررسی کردند. مدل شبیه سازی شده SWAT با ضریب نش-ساتکیف ۰/۸۲ و ۰/۸۳ برای دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی، هماهنگی خوبی را نشان داد. مقایسه شبیه سازی دوره سناریوهای  $A_2$  و  $B_2$  با دوره پایه نشان از کاهش جریان به ترتیب به میزان ۳۹/۲٪ و ۴۱/۲٪ دارد. ولی میزان رسوب تغییر

<sup>1</sup> - Peng She

<sup>2</sup> - Xixan

<sup>3</sup> - Song

<sup>4</sup> - Dixon

<sup>5</sup> - perazzoli

زیادی نسبت به دوره پایه نخواهد داشت. مقادیر میانگین بارش در دوره آینده تغییر محسوسی نخواهد کرد ولی مقادیر ماکزیمم، افزایش خواهند یافت.

گوسین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل SWAT تاثیرات تغییر اقلیم بر روی ۱۲ رودخانه اصلی هند را برای دوره زمانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰ مورد بررسی قرار دادند.

ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران نیز از مدل SWAT برای پیش بینی پاسخ هیدرولوژیکی به تغییر اقلیم در حوضه رودخانه لوه<sup>۳</sup> که قسمتی از رودخانه زرد چین است، استفاده کرده اند. آنها براساس سناریوهای A2 و B2 به کمک مدل SWAT اثرات تغییر اقلیم بالقوه روی حجم جریان آب پایین دست رودخانه را تجزیه و تحلیل کردند. میانگین سالانه جریان در آینده نزدیک (۲۰۲۰) تغییر چندانی نخواهد داشت و برای سالهای حدود ۲۰۵۰ میلادی ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. ولی میانگین ماهانه جریان در ماه های مختلف تا ۲۰ درصد افزایش و یا کاهش می یابد.

عباسپور<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در ایران پرداختند، آنها به این نتیجه رسیدند که بارش در استانهای مرطوب افزایش و در استانهای خشک کاهش می یابد. همچنین در مقیاس حوضه ها، نتایج سناریوهای مختلف در مناطق مرطوب نزدیک به هم بوده ولی در مناطق خشک تفاوت دارند.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۷) از مدل SWAT برای شبیه سازی عوامل موثر در کیفیت آب، رسوب و چرخه مواد معدنی حوضه رودخانه تور در سوئیس استفاده کرده اند. نتایج شبیه سازی دبی و روند نترات بسیار خوب ارزیابی شد و برای رسوب قابل قبول تشخیص داده شد.

---

<sup>1</sup> - Gosain

<sup>2</sup> - Zhang

<sup>3</sup> - Luohe

<sup>4</sup> Abbaspour

در تحقیقی دیگر تانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، به مدل‌سازی و آنالیز عدم قطعیت رواناب حوضه رودخانه چاو<sup>۲</sup> در چین که در معرض کم آبی قرار دارد، پرداختند. آنها حوضه را با مدل SWAT شبیه‌سازی کرده و صحت سنجی مدل و آنالیز عدم قطعیت را بوسیله SUFI-2 که یکی از برنامه‌های هماهنگ شده با SWAT از بسته SWAT CUP می‌باشد، انجام دادند. نتایج میزان p-factor و r-factor را برای دوره صحت سنجی به ترتیب، ۰/۸۵ و ۱/۱۲ و برای دوره اعتبارسنجی، ۰/۸۳ و ۲/۱۵ نشان داد. وقتی میزان این فاکتورها قابل قبول بودند مطلوبیت بیشتر مدل، می‌تواند با نش - ساتکیف<sup>۳</sup> (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) ارزیابی گردد. که نتایج NS و  $R^2$  برای دوره صحت سنجی بترتیب، ۰/۸۸ و ۰/۹ و برای دوره اعتبارسنجی بترتیب، ۰/۷۴ و ۰/۷۷ بدست آمد. که نتایج رضایت بخشی است.

نیرایولا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، طی مدل‌سازی حوضه نیمه خشک سانتاکروز آریزونا با مدل SWAT، مطرح کردند که بجای اینکه مدل‌ها برای یک نقطه خروجی کالیبره شوند، برای چند نقطه حوضه بعنوان خروجی کالیبره شود، نتایجی حاصل می‌شود که به واقعیت کل حوضه نزدیک‌تر است. چون در قسمت‌های مختلف حوضه‌های خشک و نیمه خشک برای بیشتر سال بجز زمانی که واقعه سیل بزرگی داشته باشیم، جریان‌ات ناپیوسته و نامرتب هستند بنابراین جریان خروجی از حوضه نمی‌تواند بیانگر خصوصیات کل حوضه باشد.

لو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، ارتباط بین تغییرات هیدرولوژیکی و اقلیم را در حوضه می‌سی‌سی‌پی<sup>۶</sup> به کمک مدل SWAT و مدل‌های GCM چندگانه بررسی کردند. آنها دریافتند که هرچند تغییرات میانگین جریان آینده بیشتر تحت تاثیر افزایش دما است و کمتر به تغییرات بارش ارتباط دارد.

---

<sup>1</sup> - Tang

<sup>2</sup> - Chao

<sup>3</sup> - Nash - Sutcliffe

<sup>4</sup> - Niraula

<sup>5</sup> - lu

<sup>6</sup> - Mississippi



## فصل ۳

### مواد و روش ها

## ۳- مواد و روش ها

### ۳-۱- مدل SWAT

#### ۳-۱-۱- تاریخچه مدل

مدل SWAT مخفف Soil and Water Assessment Tool مدلی برای شبیه سازی حوضه آبریز است. این مدل، نیمه توزیعی - فیزیکی بوده که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا<sup>۱</sup> (ARS) در اوایل در دهه ۱۹۸۰ میلادی به سرپرستی دکتر جف آرنولد<sup>۲</sup> توسعه داده شد. این مدل از آن زمان تا کنون پیوسته در حال گسترش بوده و هم اکنون SWAT 2012 آخرین نسخه این مدل می باشد. همپنین بسته نرم افزاری آن در قالب ARCSWAT قابلیت الحاق به ARCGIS را دارا می باشد.

مدل SWAT حاصل ترکیب ویژگی‌های چند مدل موسسه ARS است و نسل مستقیمی از مدل شبیه سازی منابع آبی حوضه های روستایی (SWRRB) است که برای شبیه سازی اثرات فعالیت‌های مدیریتی بر چرخه آب و رسوب در حوضه‌های روستایی فاقد آمار طراحی شده بود.

مدلهایی که در گسترش SWAT نقش اصلی را داشتند عبارتند از،

مدل CREAMS سیستم‌های مدیریت مواد شیمیایی کشاورزی، رواناب و فرسایش

GLEAMS مدل اثرات ظرفیت آب زیرزمینی سیستم‌های مدیریت کشاورزی

EPIC محاسبه گر اثر بهره‌وری رسوب

---

<sup>1</sup> - Agricultural Research Service

<sup>2</sup> - Jeff Arnold



این مدل جهت پیش بینی اثرات اقدامات مدیریتی بر روی آب، رسوب و میزان مواد معدنی کشاورزی در حوضه‌های پیچیده بزرگ با خاک‌ها و کاربری‌های مختلف به‌مراه شرایط مدیریتی متفاوت در بازه زمانی طولانی توسعه داده شده است.

این توسعه‌ها تا به امروز ادامه پیدا کرده و آخرین نسخه آن SWAT2012 می باشد که در این تحقیق از الحاقیه آن به ARSGIS یعنی ARCSWAT2012 استفاده شده است.

### ۳-۱-۲- خصوصیات مدل SWAT

مدل SWAT، مدلی نیمه توزیعی مکانی و پیوسته زمانی است که سعی شده از روابط فیزیکی در تهیه آن استفاده شود. در شرح این خصوصیات داریم

فیزیکی : بیشتر از اینکه بر معادلات رگرسیونی و همبستگی‌های ریاضی بین ورودی‌ها و خروجی استوار باشد به اطلاعات خاصی درمورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی، و اقدامات مدیریتی حوضه آبریز نیاز دارد. فرآیندهای فیزیکی مرتبط با چرخه آب، حرکت رسوب، رشد گیاهان، چرخه نیترات و غیره مستقیماً با این داده‌های ورودی مدل می‌شوند.

پیوسته زمانی: مدل برای دوره های زمانی طولانی طراحی شده است و برای پیش بینی اتفاقات گسسته نظیر روندیابی تک واقعه سیل، طراحی نشده است.

نیمه توزیعی مکانی: کوچکترین واحد کاری در این مدل واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا <sup>1</sup>HRU است که از ترکیب نقشه های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب بدست می‌آید. این کار از این جهت انجام می‌شود که تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند.

---

<sup>1</sup> - Hydrological Response Units

مدل SWAT به منظور برآورد تاثیر کارهای مدیریتی بر آب و رسوب در حوضه‌های آبریز فاقد آمار تهیه شده است. از این رو برای شبیه سازی حوضه‌های بزرگ بدون نیاز به سرمایه زیاد می‌تواند اجرا شود.

برخی از کاربردهای مدل که در تحقیقات مختلف نیز بکار گرفته شده، عبارتند از:

شبیه سازی آب و خاک، مطالعات جریان پایه، ارزیابی عملیات حفاظتی حوضه‌های آبریز در ابعاد مختلف، شبیه سازی هیدرولیکی، مطالعات چرخه نیترات و فسفر، حرکت رسوب، مطالعات مخازن و سدها، تاثیر کاربری اراضی، ذوب برف، بررسی سناریوهای مدیریت حوضه آبریز، رشد گیاه و چرخه مواد غذایی و آفت کش‌ها، بررسی تغییرات اقلیم بر روی هیدرولوژی آبریز.

مدل SWAT در بین سایر مدل‌های هیدرولوژیکی مزایا و معایبی دارد، از مزایای این مدل می‌توان به مواردی زیر اشاره کرد.

تاثیر اطلاعات ورودی نظیر آب و هوا، پوشش گیاهی، خاک و اعمال روش های مختلف مدیریتی به خوبی بر خروجی مدل (رواناب، چرخه نیترات، رسوب و غیره) قابل مشاهده و اندازه‌گیری است.

استفاده از الحاقیه آن در محیط GIS استفاده از آن را ساده‌تر و ملموس‌تر کرده است، و امکان تهیه انواع گزارش‌های بصری نظیر تهیه نقشه‌های دیجیتال را فراهم آورده است.

مطالعات بلند مدت را برای بررسی تاثیر اقدامات انجام شده در آبریز را فراهم می‌آورد.

پارامترهای ورودی آن سهل‌الوصول (ارگان‌های مختلف مسئول جمع‌آوری این داده‌ها هستند) است.

بطور کلی می‌توان گفت تا جای امکان تمامی اجزای چرخه‌های موجود در یک حوضه آبریز را مدنظر قرار داده است. اما در کنار این مزایا، معایبی را نیز برای این مدل برشمرد.

دقت داده‌های ورودی تاثیر زیادی روی نتایج خروجی مدل دارد، از این رو تاثیر این شرایط روی نتایج شبیه‌سازی از کنترل کاربر مدل خارج است. (مواردی نظیر اندازه‌گیری‌های نامستولانه دبی‌های

ایستگاه‌های هیدرومتری)

گسترده‌گی و پراکندگی داده‌های ورودی مدل کاربرد مدل را در مناطقی که آمار منسجم ندارند، محدود کرده است. و یا اینکه نتایج مدنظر حاصل نمی‌گردد.

### ۳-۱-۳- مدلسازی SWAT

اولین مرحله برای مدلسازی حوضه، تقسیم حوضه به تعدادی زیر حوضه می‌باشد. این کار به این دلیل انجام می‌شود که اثر ناهمگنی حوضه را کاهش داد. این حوضه‌ها بطور مکانی با یکدیگر در ارتباط هستند به این صورت که خروجی یک زیرحوضه بعنوان ورودی به زیرحوضه پایین دست آن می‌ریزد. زیرحوضه‌ها براساس شرایط توپوگرافی منطقه تشکیل می‌شوند. در جهت همگنی مکانی بیشتر، زیرحوضه‌ها با توجه به نقشه خاک، نقشه طبقه‌بندی شیب و پوشش گیاهی به اجزای کوچکتری به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۱</sup> (HRU) تقسیم می‌شوند. از آنجایی که هر HRU دارای پوشش، خاک و شیب یکسانی است، اجرا شبیه‌سازی را آسان‌تر می‌کند. در مرحله اول شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر، رشد گیاهان، رسوب و روش‌های مدیریتی برای هر HRU شبیه‌سازی می‌گردد و سپس برای هر زیرحوضه متوسط وزنی گرفته می‌شود و با یکدیگر جمع می‌شوند و در نهایت جریان حوضه شامل آب، رسوب و غیره تا رسیدن به خروجی حوضه روندیابی می‌گردند.

اطلاعات ورودی مربوط به هر زیرحوضه بدین صورت دسته‌بندی می‌گردند: آب و هوا، اطلاعات مربوط به هر HRU، برکه‌ها و مرداب‌ها، آب زیرزمینی، رودخانه اصلی.

رابطه اصلی در محاسبه تمام پارامترها در حوضه بر اساس موازنه (بیلان) آب حوضه می‌باشد. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در حوضه را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود: اولین دسته، شبیه‌سازی روی زمین و روی پوسته خاک که میزان و مقدار آب، بار رسوب، نیتروژن و سموم را در هر زیر حوضه شامل می‌گردد.

---

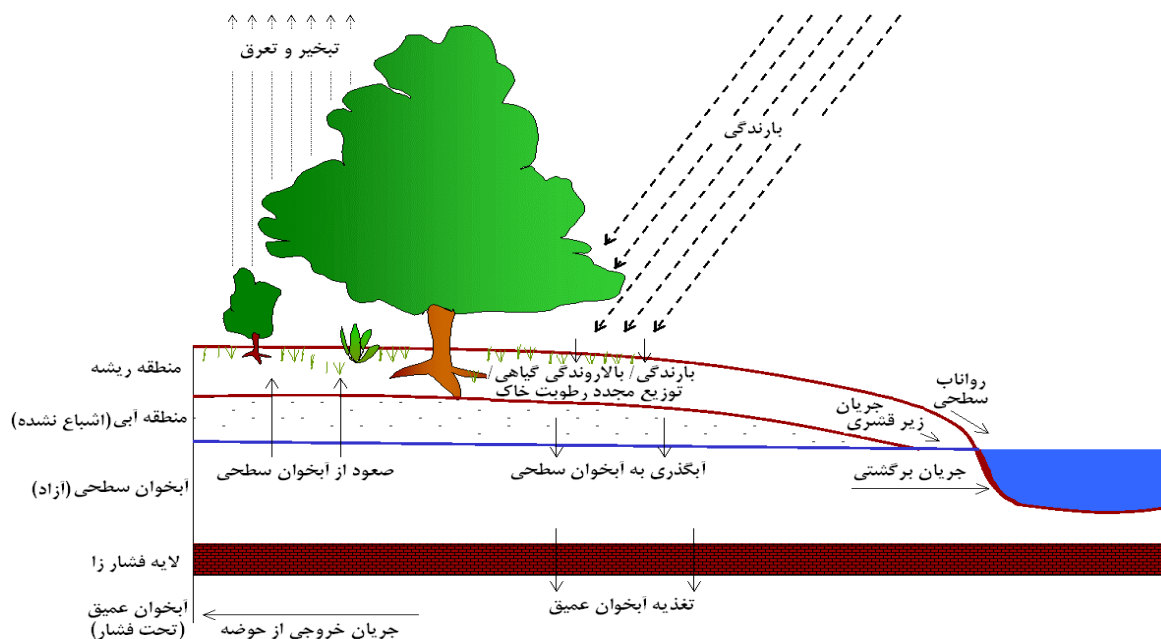
<sup>1</sup> Hydrologic Response Units

دومین قسمت، روند یابی آب است که برای تعیین انتقال آب، رسوب و غیره در شبکه رودخانه ای حوضه تا خروجی حوضه به کار می رود.

بدون توجه به نوع مسئله مورد بررسی توسط مدل SWAT، بیلان آبی نیرو محرکه هر پدیده‌ای است که در سطح حوضه روی می دهد. برای صحت پیش بینی چرخه نیترات، آفت کش‌ها، عناصر غذایی و رسوب، چرخه هیدرولوژیکی که توسط مدل شبیه سازی شده است باید با آنچه که در حوضه آبریز اتفاق می افتد مطابقت کند.

بطور کلی شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز توسط این مدل به دو بخش اصلی تقسیم می گردد: بخش اول مربوط به فاز خشکی چرخه است که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. که مقدار آب، رسوب، مواد مغذی و آفت کش‌هایی که به آبراهه اصلی وارد می شوند را کنترل می کند.

بخش دوم مربوط به مرحله فاز آبی یا روندیابی است که حرکت آب، رسوب و غیره را از طریق شبکه آبراهه حوضه به سمت خروجی شبیه سازی می کند.



شکل ۳-۱- نمایی از چرخه هیدرولوژیکی مدل

### ۳-۱-۴- اجزای مدل SWAT و اطلاعات ورودی

### ۳-۱-۴-۱- فاز خشکی چرخه هیدرولوژیکی

چرخه هیدرولوژیکی شبیه سازی توسط SWAT بر اساس معادله بیلان آب زیر می باشد:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1-3)$$

که در آن:

$SW_t$ : مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی متر آب)

$SW_o$ : مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی متر آب)

$R_{day}$ : مقدار بارش در روز  $i$  ام

$Q_{surf}$ : مقدار رواناب سطحی در روز  $i$  ام

$R_{day}$ : مقدار بارش در روز  $i$  ام

$E_a$ : مقدار تبخیر و تعرق در روز  $i$  ام (میلی متر آب)

$W_{seep}$ : مقدار آب نفوذی از لایه خاک به منطقه غیراشباع در روز  $i$  ام

$Q_{gw}$ : مقدار آب برگشتی در روز  $i$  ام

### ۳-۱-۴-۲ - آب و هوا (داده‌های اقلیمی)

مدل برای شبیه سازی به اطلاعات اقلیمی نظیر بارش روزانه، حداکثر و حداقل حرارت روزانه، تابش خورشیدی روزانه، متوسط سرعت باد روزانه و متوسط رطوبت نسبی روزانه نیاز دارد. این اطلاعات یا بصورت مستقیم بعنوان داده اندازه گیری شده و مشاهداتی به مدل وارد می شوند و یا توسط زیربرنامه مولد اقلیمی<sup>۱</sup> ساخته می شوند. مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی از روی متوسط ماهانه ایجاد می شوند. مدل در این حالت مجموعه‌ای از اطلاعات را به صورت مستقل برای هر زیرحوضه تولید می کند و هیچ همبستگی و ارتباط مکانی بین مقادیر تولید شده برای زیر حوضه های مختلف وجود ندارد.

در این حالت ما داده هایی مانند بارش و دما برای ایستگاه‌های دارای آمار را به مدل وارد می کنیم، همچنین آمار ماهانه یک ایستگاه در منطقه مورد نظر یا در نزدیکترین فاصله از آن، که دارای آمار بلندمدت و کامل می باشد را بعنوان مولد آمار به مدل می دهیم تا هم نواقص آمار موجود را اصلاح کند و هم اینکه برای مولفه‌هایی که آمار نداریم (مانند رطوبت نسبی و سرعت باد) مقداری را شبیه سازی کند.

### ۳-۱-۴-۳ - برف

مدل SWAT بر اساس متوسط روزانه دمای هوا بارش را به دو قسمت باران و برف تفکیک می کند. SWAT می توان پوشش برف را بصورت ساده و یکنواخت تا پیچیده و غیریکنواخت مدل کند که عواملی نظیر سایه، توپوگرافی، حجم برف و پوشش گیاهی را دخیل کند. ذوب برف در SWAT با دمای محیط و دمای حجم برف کنترل می شود. با برف ذوب شده مانند رواناب و آب نفوذی رفتار می شود. مدل هر زیرحوضه را حداکثر به ۱۰ باند ارتفاعی تقسیم می کند و قادر است پوشش و ذوب برف را برای هر باند

---

<sup>1</sup> - Weather Generator

ارتفاعی با توجه به تغییرات ارتفاعی بر بارش و درجه حرارت محاسبه کند. ذوب برف به صورت خطی، تابعی از تفاوت بین متوسط دمای برف پشته و حداکثر دمای هوا، و دمای پایه ذوب برف در نظر گرفته می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} SNO_{cov} \left[ \frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (2-3)$$

که در آن:

$SNO_{mlt}$  مقدار ذوب برف (میلی متر)،  $b_{mlt}$  فاکتور ذوب برف (میلی متر بر روز بر درجه سانتی‌گراد)،  $no_{cov}$  درصدی HRU پوشیده از برف،  $T_{snow}$  دمای برف پشته (درجه سانتی‌گراد)،  $T_{mx}$  حداکثر دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و  $T_{mlt}$  دمای پایه ذوب برف (درجه سانتی‌گراد).

هنگامی که بارش می‌بارد، ممکن است توسط سطح گیاهان جذب (ذخیره برگابی) شوند و یا به سطح خاک برسند. آب در سطح خاک به داخل خاک نفوذ می‌کند و یا در سطح جاری می‌شود و به رودخانه می‌ریزد. آب نفوذی به خاک ممکن است در آن بماند و بعداً تبخیر شود و یا به آرامی از راه جریانات زیرسطحی به سیستم آب سطحی بازگردد.

اجزایی که بعنوان هیدرولوژی در مدل شبیه سازی می‌شود عبارتند از: ۱- ذخیره در پوشش برگاب ۲- نفوذ ۳- بازگشت مجدد رطوبت ۴- تبخیر و تعرق ۵- جریان جانبی یا جریان زیر سطحی ۶- جریان سطحی ۷- برکه‌ها و مرداب‌ها ۸- آبراهه های فرعی ۹- جریان بازگشتی.

### ۳-۱-۴-۴ - پوشش اراضی و رشد گیاهان

مدل SWAT از یک مدل رشد تک گیاهی برای شبیه سازی تمامی انواع پوشش اراضی استفاده می کند. این مدل قادر است گیاهان یک ساله و چند ساله را از همدیگر تشخیص دهد. در رابطه با رشد گیاهان و پوشش اراضی، عوامل زیر در مدل شبیه سازی می شوند:

رشد پتانسیل ۲- تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل ۳- جذب مواد مغذی ۴- موانع رشد

### ۳-۱-۴-۵ - فرسایش

فرسایش حاصل از بارش و رواناب از طریق رابطه جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (MUSLE) محاسبه می شود (Williams, 1975). این روش توسعه یافته روش USEL که توسط ویشمیر<sup>۱</sup> و اسمیت<sup>۲</sup> در طی سالهای ۱۹۶۵ و ۱۹۷۸ گسترش یافته بود. USEL متوسط فرسایش ناخالص سالانه را بعنوان تابعی از انرژی بارش پیش بینی می کند و در MUSEL ضریب انرژی رواناب جایگزین ضریب بارش می شود با این کار پیش بینی حد رسوب را بهتر انجام می شود.

$$sed = 11.8(Q_{surf}q_{peak}area_{hru})^{0.56}K_{USLE}C_{USLE}P_{USLE}LS_{USLE}CFRG \quad (3-3)$$

که در آن:

sed مقدار رسوب (تن در روز)،  $Q_{surf}$  رواناب (میلی متر در هکتار)،  $q_{peak}$  حداکثر رواناب (متر مکعب بر ثانیه)،  $area_{hru}$  مساحت هر HRU (هکتار)،  $K_{USLE}$  فاکتور فرسایش پذیری خاک (۰.۰۱۳)،  $C_{USLE}$  فاکتور مدیریت و پوشش،  $P_{USLE}$  فاکتور روش های حفاظتی،  $LS_{USLE}$  فاکتور توپوگرافی،  $CFRG$  فاکتور ذرات درشت دانه .

<sup>1</sup> - Wischmeier

<sup>2</sup> - Smith





به محض این که مدل SWAT حجم بارگذاری آب، رسوب، مواد مغذی و آفت کش‌ها را در آبراهه اصلی حوضه، با استفاده از یک ساختار فرماندهی شبیه به HYMO تعیین کند این‌ها در شبکه آبراهه های حوضه جریان داده می‌شوند. علاوه بر روندیابی جریان توده ای آب در هر آبراهه، SWAT تغییر و تبدیل مواد شیمیایی در آبراهه‌ها (در آب و در بستر آبراهه) را نیز شبیه سازی می‌کند.

### ۳-۱-۴-۸- روندیابی جریان آبراهه اصلی

روندیابی در کانال اصلی به ۴ بخش آب، رسوب، مواد مغذی و مواد شیمیایی تقسیم می‌شود. SWAT از رابطه مانینگ برای تعیین مقدار سرعت جریان استفاده می‌کند. در این مدل، دو روش الف) روش ذخیره متغیر و ب) روش ماسکینگام برای روندیابی جریان وجود دارد.

آب وقتی بر سطح زمین جاری می‌شود و رواناب ایجاد می‌شود که مقدار نرخ بارش از نرخ نفوذپذیری خاک بیشتر شود. وقتی آب به سطح زمین خشک می‌رسد میزان نفوذپذیری زیاد است و هرچه که خاک خیس‌تر می‌شود میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد. و بعد آن گودال‌های سطحی شروع به پر شدن می‌کنند. هنگامی که نرخ بارش همچنان بیشتر از نرخ نفوذ باشد و چاله‌ها پر شده باشند، آنگاه آب بر سطح زمین جاری شده و رواناب ایجاد می‌شود. در این حالت نفوذ نهایی آب به داخل خاک معادل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است.

مدل SWAT دو روش شماره منحنی<sup>۱</sup> SCS و گرین-امپت<sup>۲</sup> را برای محاسبه رواناب سطحی را بکار می‌گیرد.

<sup>۱</sup> - SCS, 1972

<sup>۲</sup> - Green and Ampt infiltration Method, 1910

### ۳-۱-۴-۹- محاسبه حجم رواناب به روش شماره منحنی SCS

روش SCS یک روش تجربی است که استفاده از آن از سال ۱۹۵۰ میلادی رواج یافت. و محصول بیش از ۲۰ سال تحقیق سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) بر روی روابط بین بارش و رواناب در حوضه‌های مناطق روستایی در سرتاسر آمریکا می‌باشد.

این رابطه برای ایجاد اصولی منسجم جهت تخمین مقدار رواناب تحت کاربری‌ها و خاک‌های مختلف توسعه داده شده است (Rallison and Miller, 1981). رابطه SCS بدین صورت است:

$$Q_{sur} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (۴-۳)$$

$Q_{sur}$  رواناب سطحی (بر حسب میلی متر آب)،  $R_{day}$  عمق بارش در روز (بر حسب میلی متر آب)،  $S$  نگاهداشت سطحی خاک (بر حسب میلی متر آب) می‌باشد. پارامتر  $S$  به صورت مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و به صورت زمانی با تغییرات رطوبت خاک تغییر می‌کند. پارامتر نگاهداشت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (۵-۳)$$

$CN$  مقدار شماره منحنی در روز مورد نظر می‌باشد.  $CN$  به عواملی نظیر: گروه هیدرولوژیکی خاک، پوشش زمین و شرایط رطوبت پیشین بستگی دارد. SCS سه شرایط رطوبتی پیشین خشک، متوسط و تر را تعریف می‌کند. مقادیر موجود در جدول SCS برای خاک‌های مختلف و شرایط پوشش زمین مختلف بر اساس شرایط رطوبت پیشین II می‌باشند. شماره منحنی برای شرایط رطوبتی خشک و تر از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100-CN_2)}{[100-CN_2 + \exp(2.533 - .0636(100-CN_2))]} \quad (6-3)$$

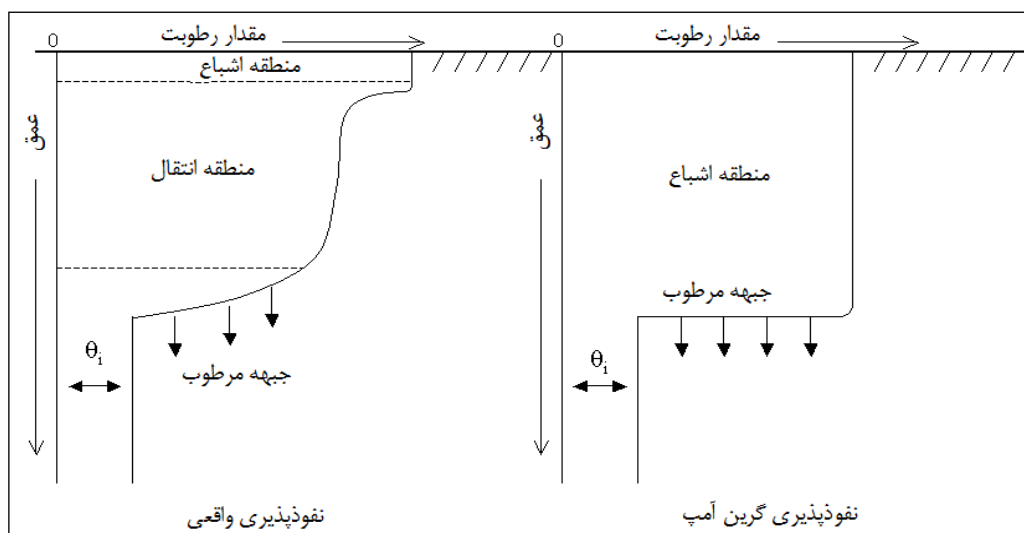
$$CN_3 = CN_2 \exp[.00673(100 - CN_2)] \quad (7-3)$$

که  $CN_1$  شماره منحنی برای شرایط خشک،  $CN_2$  شماره منحنی برای شرایط متوسط و  $CN_3$  شماره منحنی برای شرایط تر می‌باشد.

### ۳-۱-۴-۱- محاسبه حجم رواناب به روش گرین - آمپ

معادله گرین - آمپ برای پیش بینی نفوذ با فرض اینکه آب اضافی در همه حال در سطح وجود دارد، توسعه داده شد. (Green & Ampt, 1911)

در رابطه گرین - آمپ فرض بر این است که نیمرخ خاک به صورت همگن بوده و قبل از شروع نفوذپذیری رطوبت آن بصورت یکنواخت در پروفیل خاک توزیع شده است. با شروع نفوذ آب به خاک، این مدل فرض می‌کند که خاک در بالای جبهه رطوبتی به طور کاملاً اشباع بوده و جبهه رطوبتی نیز، بین قسمت اشباع و خشک فاصله می‌اندازد. شکل ۳-۳ تفاوت بین توزیع رطوبت با عمق که توسط گرین - آمپت مدل شده و آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳- مقایسه بین توزیع رطوبت حاصل از روش گرین-آمپ و واقعیت مشاهده شده در خاک (نایتچ، ۲۰۰۵)<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۷۱ مین و لارسون<sup>۲</sup> روشی را با استفاده از مدل گرین-آمپ برای محاسبه زمان پرشدن فرورفتگی ها توسعه دادند. این روش در SWAT برای محاسبه رواناب بکار گرفته شده است.

این روش به اطلاعات زیر-روزانه (ساعتی) بارش نیاز دارد.

سرعت نفوذ در روش اصلاح شده بدین صورت تعریف می‌شود:

$$f_{inf,t} = K_e \left( 1 + \frac{\Psi_{wf} \Delta \theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (۸-۳)$$

که در آن  $f_{inf,t}$  سرعت نفوذ در زمان  $t$  (mm/hr)،  $K_e$  هدایت هیدرولیکی موثر  $\Psi_{wf}$  (mm/hr) پتانسیل ماتریکس جبهه رطوبتی (mm)،  $\Delta \theta_v$  تغییرات حجمی رطوبت خاک در جبهه رطوبتی (mm/mm) و  $F_{inf,t}$  نفوذ تجمعی در زمان  $t$  (میلی متر) است.

هنگامی که شدت بارش از سرعت نفوذ کمتر باشد تمام بارش در طی گام زمانی نفوذ می‌کند و نفوذ تجمعی برای گام زمانی مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید:

<sup>1</sup> - Neitsch et al., 2005

<sup>2</sup> - Mein , Larson

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + R_{\Delta t} \quad (9-3)$$

$F_{inf,t}$  نفوذ تجمعی در یک دوره زمانی (میلی متر)،  $F_{inf,t-1}$  نفوذ تجمعی در دوره زمانی قبل،  $R_{\Delta t}$  مقدار بارندگی در طول دوره زمانی (میلی متر).

هدایت هیدرولیکی موثر تقریباً نصف هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می باشد (Bouwer, 1969).

$$K_e = \frac{56.82 K_{sat}^{0.286}}{1+0.051 \exp(0.062 CN)} - 2 \quad (10-3)$$

که در آن:

$K_e$  هدایت هیدرولیکی موثر (mm/hr)،  $K_{sat}$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (mm/hr) و CN شماره منحنی است.

### ۳-۱-۴-۱۱- حداکثر رواناب

رواناب حداکثر بیشترین نرخ جریان است که در یک واقعه بارش ثبت می شود. حداکثر رواناب شاخصی برای توانایی فرسایش سیلاب است و برای پیش بینی رسوب استفاده می شود. SWAT حداکثر رواناب را با استفاده از روش منطقی به صورت زیر محاسبه می کند.

$$Q_{peak} = \frac{C i A}{3.6} \quad (11-3)$$

که در آن:  $Q_{peak}$  حداکثر سیلاب (مترمکعب برثانیه)، C ضریب رواناب، i شدت بارش (میلی متر بر ساعت) و A مساحت زیر حوضه (کیلومترمربع)

### ۳-۱-۴-۱۲- زمان تمرکز

زمان تمرکز فاصله زمانی بین زمان شروع واقعه بارندگی تا زمانی که همه سطح حوضه در جریان خروجی از حوضه سهیم شوند. بعبارت دیگر بدین صورت محاسبه می‌گردد که، زمان تمرکز از جمع مدت زمانی که جریان از دورترین نقطه سطح زیر حوضه‌ها به آبراهه‌ها برسد و مدت زمانی که طول می‌کشد جریان از آبراهه‌های بالادست به نقطه خروجی برسد، به دست می‌آید:

$$t_{\text{conc}} = t_{\text{ov}} + t_{\text{ch}} \quad (۱۲-۳)$$

$t_{\text{conc}}$  زمان تمرکز برای زیر حوضه (ساعت)،  $t_{\text{ov}}$  زمان تمرکز برای جریان روی زمین (ساعت) و  $t_{\text{ch}}$  زمان تمرکز برای جریان در آبراهه‌ها (ساعت) است.  
زمان تمرکز جریان روی زمین از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$t_{\text{ov}} = \frac{L_{\text{slp}}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot \text{slp}^{0.3}} \quad (۱۳-۳)$$

که:  $L_{\text{slp}}$  طول شیب زیر حوضه (متر)،  $n$  ضریب مانینگ و  $\text{slp}$  متوسط شیب زیر حوضه (متر بر متر) است.  
زمان تمرکز جریان در آبراهه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{\text{ch}} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{\text{Area}^{0.125} \cdot \text{slp}_{\text{ch}}^{0.375}} \quad (۱۴-۳)$$

ضریب رواناب نسبت نرخ جریان ورودی به سیستم (بارش) به دبی خروجی حداکثر است. ضریب رواناب از یک سیلاب به سیلاب دیگر بسیار متغیر است و از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن:  $Q_{surf}$  رواناب سطحی (میلی متر آب) و  $R_{day}$  بارش روزانه (میلی متر آب) است.

### ۳-۱-۴-۱۳- شدت بارش

شدت بارش متوسط نرخ بارندگی در طول مدت تمرکز می‌باشد. و طبق رابطه زیر فرموله می‌گردد:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad (۱۶-۳)$$

براساس آنالیز داده‌های بارش توسط هرشفیلد<sup>۱</sup> (1961) برای مدت زمان و شدت‌های بارش متفاوت، نشان داده شد که میزان بارش در مدت زمان تمرکز با مقدار بارش در طول ۲۴ ساعت متناسب است.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} R_{day} \quad (۱۷-۳)$$

$R_{tc}$  بارش روزانه که در زمان تمرکز رخ می‌دهد (mm)،  $\alpha_{tc}$  نسبت بارندگی روزانه که در طول زمان تمرکز رخ می‌دهد و  $R_{day}$  مقدار بارش در طول روز (mm).

SWAT میزان بارندگی که در زمان تمرکز رخ می‌دهد را تابعی از میزان بارندگی که در شدیدترین بارش نیم ساعته رخ می‌دهد در نظر می‌گیرد:

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp [2. t_{conc} \ln(1 - \alpha_{0.5})] \quad (۱۸-۳)$$

که،  $\alpha_{0.5}$  نسبت بارندگی که در شدیدترین بارش نیم ساعته رخ می‌دهد و  $t_{conc}$  زمان تمرکز برای زیرحوضه (ساعت) است.

<sup>1</sup> - Hershfield



### ۳-۱-۴-۱۲ - رابطه منطقی اصلاح شده برای محاسبه رواناب حداکثر

با جایگذاری ضریب رواناب و زمان تمرکز در معادله اصلی دبی پیک خواهیم داشت:

$$Q_{\text{peak}} = \frac{C_i A}{3.6} \quad (۱۹-۳)$$

$$Q_{\text{peak}} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{\text{surf}} \cdot \text{Area}}{3.6 \cdot t_{\text{conc}}} \quad (۲۰-۳)$$

به عنوان نمونه متغیرهای معادل رابطه دبی پیک در مدل SWAT در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱ - متغیرهای رابطه دبی پیک در مدل SWAT

فایل ورودی	توضیحات	نام متغیر
.sub	مساحت زیرحوضه (کیلومتر مربع)	SUB_KM
.hru	مساحتی از زیرحوضه که در HRU جای می‌گیرد	HRU_FR
.hru	میانگین طول شیب (متر): $L_{slp}$	SLSUBBSN
.hru	میانگین تندی شیب (متر بر متر): $slp$	HRU_SLP
.hru	ضریب مانینگ جریان سطحی: $n$	OV_N
.sub	طولانی‌ترین طول آبراهه فرعی در زیرحوضه (کیلومتر): $L$	CH_L(1)
.sub	میانگین شیب آبراهه فرعی: $slp_{ch}$	CH_S(1)
.sub	ضریب مانینگ آبراهه فرعی: $n$	CH_N(1)

### ۳-۱-۴-۱۳- تبخیر و تعرق پتانسیل

تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، به کلیه فرایندهایی که آب با تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه به صورت بخار به اتمسفر برمیگردد، اطلاق می‌شود. تبخیر و تعرق مکانیسمی اولیه است که آب را از حوضه خارج می‌کند. تقریباً ۶۲٪ از بارشی که روی قاره‌ها می‌بارد تبخیر و تعریق می‌شوند. تبخیر و تعرق در بیشتر حوضه‌های رودخانه‌ها در تمام قاره‌ها به جزء قطب جنوب از رواناب بیشتر است (Neitsch et al, 2005). تفاوت بین بارش با تبخیر و تعرق آب است که در دسترس انسان است و قابل مدیریت است. تخمین صحیح تبخیر و تعرق در ارزیابی منابع آب و تاثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر آن بسیار حیاتی است. روش‌های زیادی برای تخمین تبخیر و تعرق گسترش داده شده اند، در SWAT از سه روش هارگریوز، پنمن-مانتیس، پریستلی-تیلور برای محاسبه آن استفاده می‌شود. همچنین مدل این امکان را به کاربر می‌دهد که روش‌های دلخواه مدنظر خود را به مدل وارد کنند. این سه روش محاسبه ورودی‌های متفاوتی را نیاز دارند. روش پنمن-مانتیس به تابش خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد نیاز دارد. روش پریستلی-تیلور به تابش خورشیدی، دما و رطوبت نسبی نیازمند است و روش هارگریوز فقط به دمای هوا نیاز دارد.

### ۳-۱-۴-۱۳- روش پنمن-مانتیس

رابطه این روش به شکل زیر است:

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net}-G) + \rho_{air} C_p [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma(1+r_c/r_a)} \quad (21-3)$$

که در آن:  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)،  $E$  تبخیر و تعرق (میلی متر در روز)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل درجه حرارت ( $KPa C^{-1}$ ).

$H_{net}$  تشعشع (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $G$  شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $\rho_{air}$  جرم مخصوص هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $C_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت (مگاژول بر کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد).

### ۳-۱-۴-۱۳-۲- روش پریستلی - تیلور

همانطور که گفته شد این روش به دمای هوا، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی نیاز دارد و فرمول آن به صورت زیر است:

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad (22-3)$$

$\lambda$  گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)،  $E_o$  پتانسیل تبخیر و تعرق (میلی متر در روز)،  $\alpha_{pet}$  ضریب،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل درجه حرارت (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $H_{net}$  تابش خالص (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $G$  شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر متر مربع در روز).

این روش در شرایطی که جریان‌ات افقی کم است تخمین بهتری دارد و در مناطق خشک و نیمه خشک که جزء حرکات افقی در تعادل انرژی قابل ملاحظه است، این روش تخمینی کمتر از واقعیت دارد.

### ۳-۱-۴-۱۳-۳- روش هارگریوز

این روش تنها به دمای هوا نیاز دارد و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\lambda E_o = 0.0023 H_o (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} (T_{av} + 17.8) \quad (23-3)$$

که در آن:  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)،  $E_0$  پتانسیل تبخیر و تعرق (میلی متر بر روز)،  $H_0$  تشعشع (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $T_{mx}$  حداکثر درجه حرارت (سانتی گراد)،  $T_{mn}$  حداقل درجه حرارت (سانتیگراد) و  $T_{av}$  متوسط درجه حرارت (سانتی گراد) می باشد.

### ۳-۱-۴-۱۴- آب موجود در خاک

آب در خاک می تواند تحت شرایط اشباع و غیراشباع حرکت کند. در خاک های اشباع، جریان توسط نیروی ثقلی و عموماً به سمت پایین حرکت می کند. جریان غیراشباع بعلت تفاوت در سطوح آب ایجاد می شود. این جریان در هر جهتی می تواند روی دهد.

آبی پس از نفوذ به خاک در مسیرهای مختلف حرکت می کند. ممکن است جذب گیاه شده و یا تبخیر شود. ممکن است به لایه های پایین خاک نفوذ کرده و نهایتاً خروجی آبخوان شود. بخشی پایانی آن نیز ممکن است به صورت جانبی حرکت کند و به جریان سطحی بپیوندد. در این طرق مختلف، جذب گیاهی اصلی ترین بخشی است که آب را از خاک خارج می کند.

مدل SWAT تنها جریان اشباع را به صورت مستقیم شبیه سازی می کند. مدل، آب موجود در لایه های مختلف را محاسبه می کند، با فرض این که آب در هر لایه به صورت یکنواخت توزیع شده است. با این فرض مدل نیاز به شبیه سازی جریان غیراشباع در جهت افقی را نادیده می گیرد. مدل، جریان غیراشباع را به صورت غیر مستقیم توسط توزیع عمقی جذب گیاهی و توزیع عمقی تبخیر آب خاک محاسبه می کند. جریان اشباع وقتی اتفاق می افتد که آب موجود در لایه خاک از ظرفیت زراعی بیشتر باشد. در این حالت آب برای نفوذ عمقی، جریان جانبی و یا جریان زهکشی عمیق در دسترس است مگر این که دمای لایه خاک به زیر صفر درجه سانتی گراد برسد. وقتی لایه خاک یخ می زند هیچ حرکت آبی محاسبه نمی شود.

### ۳-۱-۴-۱- نفوذ عمقی

نفوذ در هر لایه خاک پروفیل موجود محاسبه می‌گردد. آب موجود هنگامی می‌تواند به لایه بعدی نفوذ کند که آب لایه خاک از ظرفیت زراعی خاک بیشتر باشد. مقدار آبی که برای نفوذ موجود است از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$SW_{Iy,excess} = SW_{Iy} - FC_{Iy} \quad SW_{Iy} > FC_{Iy} \quad (۲۴-۳)$$

$$SW_{Iy,excess} = 0 \quad SW_{Iy} < FC_{Iy}$$

$SW_{Iy,excess}$  مقدار آب قابل زهکشی در یک لایه خاک در روز مورد نظر (میلی متر)،  $SW_{Iy}$  مقدار آب موجود در لایه خاک در روز مورد نظر (میلی متر) و  $FC_{Iy}$  رطوبت خاک در گنجایش زراعی (میلی متر) مقدار آبی که از یک لایه به لایه بعدی حرکت می‌کند، با استفاده از روش روندیابی ذخیره محاسبه می‌شود. معادله ای که برای تخمین آب نفوذی به لایه بعد استفاده می‌شود عبارت است از:

$$W_{perc,Iy} = SW_{Iy,excess} \left( 1 - \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (۲۵-۳)$$

که در آن:

$W_{perc,Iy}$  مقدار آبی که به لایه زیرین نفوذ می‌کند (میلی متر)،  $SW_{Iy,excess}$  مقدار آب قابل زهکشی در لایه مورد نظر (میلی متر)،  $\Delta t$  طول گام زمانی و  $TT_{perc}$  زمان حرکت نفوذ عمقی (ساعت)

### ۳-۱-۴-۲- جریان زیر قشری (جانبی)<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> -lateral flow

جریان زیر قشری در مناطقی که لایه های سطحی، هدایت هیدرولیکی بالایی دارند و یک لایه نفوذناپذیر یا نیمه نفوذپذیر در عمق کم قرار گرفته است، قابل ملاحظه است. در چنین سیستمی بارندگی به صورت عمودی نفوذ خواهد کرد تا زمانی که به لایه نفوذناپذیر برسد. آب سپس به صورت دریاچه‌ای در بالای لایه نفوذ ناپذیر جمع شده و یک منطقه اشباع ایجاد می‌کند. این منطقه اشباع منبع آب برای جریان زیرسطحی جانبی است.

مدل SWAT از یک مدل ذخیره جنبشی برای جریان زیر قشری استفاده می‌کند که توسط Sloan et al در سال ۱۹۸۳ توسعه یافته است. و در سال ۱۹۸۴ توسط Sloan و Moore خلاصه شد.

$$Q_{lat} = 0.024 \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (26-3)$$

که،  $Q_{lat}$  دبی در خروجی تپه (میلی متر در روز)،  $SW_{ly,excess}$  مقدار آب قابل زهکشی در لایه مورد نظر (میلی متر)،  $K_{sat}$  هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی متر در ساعت)،  $slp$  شیب،  $\phi_d$  تخلخل قابل زهکشی خاک (میلی متر بر میلی متر) و  $L_{hill}$  طول تپه (متر) می باشد.

### ۳-۱-۴-۳- جریان آب زیرزمینی

آب زیرزمینی آبی است که در منطقه اشباع زمین و در فشار بیشتر از فشار اتمسفر یعنی فشار مثبت، قرار دارد. در پروفیل خاک آب در فشار منفی ناشی از جاذبه بین ذرات رس دارای بار منفی و آب قرار دارد. سفره آب زیرزمینی عمقی است که در آن فشار بین آب و خاک اطراف آن برابر فشار محیط باشد. آب بوسیله نفوذ و همچنین از طریق نشت آب سطحی ممکن است به سفره آب زیرزمینی وارد شود. آب بطریق جریان به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها از سفره آب زیرزمینی خارج می‌شود. همچنین می‌تواند به سمت بالا حرکت کند و وارد منطقه مویینه در بالای سطح اشباع سفره آب زیرزمینی شود. در SWAT بیلان

آبی برای چهار حجم ذخیره شامل برف، لایه پروفیل خاک (عمق ۲-۰ متری)، لایه سفره های کم عمق و لایه سفره های عمیق محاسبه می شود. جریان در این لایه ها رواناب سطحی، جریان تأخیری پروفیل خاک و جریان برگشتی از سفره های عمیق می باشد. نفوذ آب در پروفیل خاک برای پر کردن سفره های کم عمق فرض شده است. به محض نفوذ آب به سفره های عمیق، سیستم شبیه سازی آن را تلف شده تلقی کرده و نمی تواند برگرداند.

SWAT دو نوع سفره آب زیرزمینی را مدل می کند. سفره کم عمق آبخوانی آزاد است که جریان را به کانال اصلی می دهد. سفره عمیق یک آبخوان محدود است. آبی که آن وارد می شود فرض می شود که از حوضه خارج می شود و شاید جایی خارج از این حوضه به جریان رودخانه ای بپیوندد ( Arnold et al., 1993).

### ۳-۱-۴-۴-۱-۳ سفره کم عمق

سفره کم عمق جریان پایه را برای آبراهه اصلی فراهم می کند. اجزای جریان پایه شامل جریان جانبی<sup>۱</sup>، آب زیرزمینی<sup>۲</sup> است. بیلان آبی برای سفره های کم عمق از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad (3-27)$$

که در آن:

$aq_{sh,i}$  مقدار آب ذخیره شده در سفره های کم عمق در روز  $i$  ام (میلی متر)،  $aq_{sh,i-1}$  مقدار آب ذخیره شده در سفره های کم عمق در روز  $i-1$  ام (میلی متر)،  $w_{rchrg}$  مقدار آب وارد شده به آبخوان در روز  $i$  ام (میلی متر)،  $Q_{gw}$  جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه در روز  $i$  ام (میلی متر)،  $w_{revap}$  برگشت جریان از

<sup>1</sup> - lateral flow

<sup>2</sup> - Groundwater

سفره های کم عمق به پروفیل خاک در روز  $W_{deep}$  (میلی متر)، مقدار آبی که از سفره های کم عمق به سفره های عمیق در روز  $W_{pump,sh}$  (میلی متر) و مقدار آبی که از پروفیل کم عمق خاک به وسیله پمپاژ خارج می شود (میلی متر).

### ۳-۱-۴-۱۴-۵ - سفره عمیق

معادله بیلان آبی آن بدین شکل است:

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + W_{deap} + W_{pump,dp} \quad (28-3)$$

آبی که سفره عمیق وارد می شود در سایر چرخش های آب سیستم وارد نمی شود و می توان آن را هدر رفت (خروجی غیرقابل کنترل) سیستم در نظر گرفت.

### ۳-۲ - برنامه SWAT-CUP<sup>1</sup>

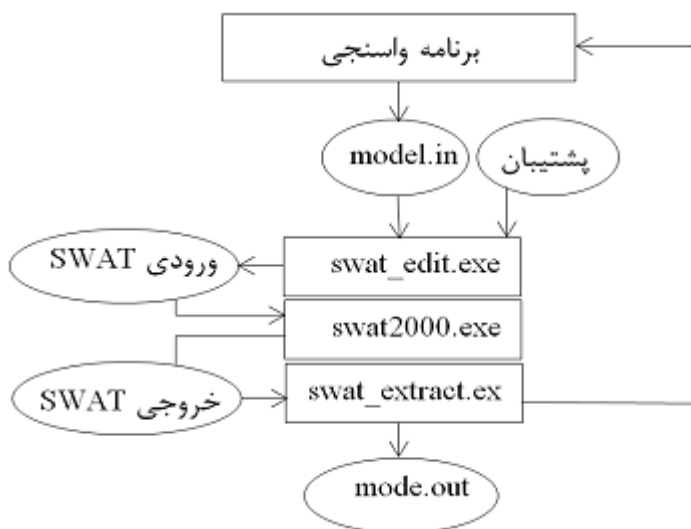
مدل هایی که برای هر منطقه ساخته می شوند باید برای آن منطقه واسنجی (کالیبره) شود، تا اطمینان حاصل شود که آن مدل بخوبی با واقعیت های حوضه هماهنگ شده باشد.

SWAT-CUP بسته نرم افزاری است که برای واسنجی مدل های SWAT مورد استفاده قرار می گیرد. این برنامه شامل روش های SUFI-2، GLUE، ParaSol، MCMC و PSO است. این برنامه شامل نسخه ای از مدل SWAT نیز می باشد که استفاده چندباره جهت کالیبراسیون را تسهیل می نماید. این برنامه قادر به آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل های SWAT می باشد.

<sup>1</sup> - SWAT Calibration and Uncertainty Programs



این برنامه از این جهت ارجحیت دارد که چندین روش واسنجی مدل SWAT در یک رابط کاربردی کنار هم قرار داده است و نمایش نتایج آنها بصورت گرافیکی به راحتی در دسترس است. همچنین از آنجائیکه مدل SWAT دارای تعداد زیادی پارامتر است، انتخاب پارامترهای مدنظر و کالیبراسیون آنها زمان بر و پرهزینه خواهد بود. SWAT-CUP مراحل زمان بر واسنجی را آسان می کند و می توان چند روش واسنجی را با هم مقایسه کرد. در شکل ۳-۴ نحوه ارتباط SWAT و SWAT-CUP را می بینیم.



شکل ۳-۴- رابطه بین SWAT و SWAT-CUP

### ۳-۲-۱- برنامه SUFI-2<sup>1</sup>

مدل SUFI-2 یک مدل معکوس است که جهت کالیبره نمودن و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT گسترش داده شده است. روش معکوس در اینجا بدین صورت است که، داده های مشاهداتی شامل دبی، رسوب، میزان نیترات و غیره و همچنین محدوده مجاز تغییر پارامترهای مدل شامل شماره منحنی خاک، رطوبت اولیه، هدایت هیدرولیکی خاک، دمای ذوب برف و غیره به مدل SUFI-2 داده می شود و میزان بهینه پارامترها را به ما می دهد.

<sup>1</sup> - Sequential Uncertainty Fitting, version 2

مدل‌های حوضه آبریز در معرض طیف گسترده‌ای از عدم قطعیت‌ها هستند. که به سه دسته عدم قطعیت‌های مفهومی مدل، عدم قطعیت ورودی‌ها، عدم قطعیت پارامترهای دخیل. قطعیت‌های مفهومی (ساختاری) شامل موارد زیر می‌شود:

عدم قطعیت مربوط به ساده سازی مدل، مثلاً معادله ساده فرسایش خاک جهانی. عدم قطعیت مربوط به فرآیندهایی که در حوضه اتفاق می‌افتد ولی در مدل وجود ندارد، مانند فرسایش ناشی از باد، فرسایش ناشی از رانش زمین و " اثر بارش ثانویه " که در میزان جذب آب توسط خاک موثر است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷). فرآیندهایی که در مدل گنجانده شده‌اند ولی توسط مدل کننده استفاده نشده یا اینکه صحت آن تایید نمی‌شود.

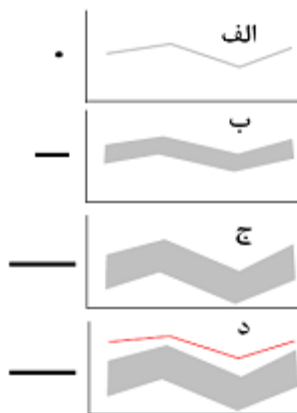
مدل SUFI-2 جهت در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، محدوده  $2/5\%$  و  $97/5\%$  پارامترها را بعنوان محدوده جواب در نظر می‌گیرد. از معیارهای درجه عدم قطعیت می‌توان به دو فاکتور P-factor و R-factor اشاره کرد.

P-factor درصد داده‌های مشاهده‌ای که در باند تخمین عدم قطعیت  $95\%$  قرار می‌گیرند، را نشان می‌دهد. عدم قطعیت  $95\%$  در سطوح  $2/5\%$  و  $97/5\%$  از تابع توزیع تجمعی متغیر خروجی که با روش نمونه برداری لاتین هاپرکیوب بدست آمده محاسبه می‌گردد و  $5\%$  از شبیه‌سازی‌های بسیار بد را کنار می‌گذارد. از آنجایی که اثر همه عدم قطعیت‌ها در متغیر اندازه گیری شده (یعنی دبی) منعکس شده اند عدم قطعیت‌های پارامتر تخمین عدم قطعیت  $95\%$  را برای همه منابع عدم قطعیت‌ها در نظر می‌گیرد.

فاکتور دیگر اندازه‌گیری عدم قطعیت R-factor است، که برابر است با متوسط ضخامت باند 95PPU تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه گیری شده. مدل SUFI-2 در عین حال که سعی می‌کند بیشتر مقادیر مشاهداتی را در بازه قرار دهد، سعی می‌کند این مقادیر در باند عدم قطعیت کوچکتری قرار بگیرند.

بنابراین این روند وقتی ایده‌آل خواهد بود که P-Factor به سمت ۱ برود و همزمان R-Factor به سمت صفر میل کند.

شکل ۳-۵ مفهوم تحلیل عدم قطعیت در SUFI-2 را نشان می‌دهد. مقدار پارامتر منفرد (نشان داده شده به صورت نقطه) به پاسخ مدل یگانه می‌رسد. ولی زمانی که گستره پارامترها افزایش پیدا می‌کند عدم قطعیت پارامتر (نشان داده شده بصورت خط) به ناحیه‌ی 95PPU منتهی می‌گردد که بصورت سایه نشان داده شده است. وقتی که عدم قطعیت افزایش می‌یابد عدم قطعیت خروجی نیز افزایش می‌یابد (نه لزوماً بصورت خطی).



شکل ۳-۵- مفهوم توصیف رابطه بین عدم قطعیت پارامتر و عدم قطعیت پیش بینی شده (عباسپور، ۲۰۰۸)

در SUFI-2 ابتدا یک دامنه بزرگ عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود بنابراین داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده 95PPU قرار خواهند گرفت. در هر مرحله پارامترهای قبلی تجدید نظر شده و فاصله اطمینان ۹۵٪ پارامترها با ماتریس حساسیت (بر اساس معادله ژاکوبین) کاهش می‌یابد. این پارامترها سپس مورد تجدید نظر قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت‌ها در گام‌های بعدی کاهش می‌یابد و فاکتورهای P و R مورد بازبینی قرار می‌گیرند. در این صورت محدوده داده‌های جدید نسبت به محدوده قبلی کوچکتر است و اطراف بهترین شبیه‌سازی متمرکز می‌شود. این کار تازمانی ادامه می‌یابد

که اکثر داده های مشاهده ای در سطح 95 ppu واقع شوند، P-factor زیاد شود و R-factor کمترین حد شود.

از آنجایی که با افزایش P-factor مقدار R-factor نیز افزایش می یابد لذا محاسبات تا زمانی ادامه می یابد که تعادلی بین این دو فاکتور برقرار شود. فاکتورهای دیگر انطباق مقادیر مشاهداتی و بهترین شبیه سازی، ضرایب  $R^2$  و ناش-ساتکلیف (NS) می باشند. باید توجه داشت که ما به دنبال "بهترین شبیه سازی" نیستیم زیرا در چنین روش تصادفی، "بهترین راه حل" در واقع محدوده ای از جوابها (محدوده نهایی پارامترها) است.

اگر محدوده پارامترها در بیشترین حالت ممکن تنظیم شد ولی همچنان داده های مشاهداتی در باند 95PPU قرار نگرفت، مسئله ما دیگر کالیبراسیون پارامتر نیست و باید مدل SWAT دوباره ساخته شود (قسمت د - شکل ۳-۵).

نحوه عمل الگوریتم SUFI-2 به ترتیب مراحل زیر است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۴):  
مشخص کردن تابع هدف (توابع موجود در SUFI-2 شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، مجموع مربع خطا (Sum)، ضریب کای اسکوئر، ضریب نش - ساتکلیف (NS)، حاصلضرب مربع خطا (Mult)، مجموع مربعات خطا مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی پس از رتبه بندی (SSQR) و حاصلضرب ضریب تعیین و ضریب رگرسیون خطی ( $bR^2$ ) است). توابع هدف مختلف نتایج متفاوتی را ایجاد می کنند، برای پوشش عدم یگانگی توابع مختلف، ترکیب توابع مختلفی استفاده می شود.  
تعیین حداقل و حداکثر پارامترها از لحاظ معناداری فیزیکی. چون حدود پارامترها نقش مهمی در نتایج دارند باید تا جایی که به لحاظ فیزیکی معنادار باشند، بزرگ در نظر گرفته شوند.

$$b_j : b_{j,abs\_min} \leq b_j \leq b_{j,abs\_max} \quad j=1\dots m \quad (29-3)$$

آنالیز حساسیت مطلق پارامترها در مراحل اولیه کالیبراسیون. این مرحله اختیاری است ولی توصیه می گردد انجام بگیرد زیرا کالیبراسیون اتوماتیک نمی تواند جایگزین دید فیزیکی و سنجش تاثیر هر پارامتر بر پاسخ سیستم گردد. برای انجام آنالیز حساسیت در این مرحله همه پارامترها به جز پارامتر هدف در مقادیر واقعی خود ثابت نگه داشته می شوند و یک پارامتر در محدوده معینی تغییر می کند. دامنه اولیه تغییرات پارامترها تعیین شده تا برای نمونه برداری به روش لاتین هایپرکیوب مورد استفاده قرار می گیرد.

$b_j$  :  $j$  امین پارامتر و  $m$  تعداد پارامترها می باشند.

$$b_j : b_{j,abs} \leq b_j \leq b_{j,abs} \quad j = 1, \dots, m \quad (30-3)$$

بطور کلی این حدود کوچکتر از حدود مطلق تعیین شده در مرحله دو بوده و باید براساس تجربه و تصمیم استفاده کننده تعیین گردد. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها در مرحله سه می تواند در تعیین این حدود بسیار راهگشا باشد.

نتایج نمونه برداری لاتین هایپرکیوب در  $n$  دسته پارامتر ترکیب می شوند ( $n$  تعداد شبیه سازی ها است که لازم است به اندازه کافی بزرگ باشد تقریباً بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مرتبه). برنامه شبیه سازی  $n$  بار اجرا می گردد و نتایج متغیر شبیه سازی مدنظر در مقابل مقادیر مشاهداتی متناظر ذخیره می گردند.

به عنوان اولین مرحله ارزیابی شبیه سازی براساس تابع هدف تعیین شده، انجام می گردد. در این مرحله برای ارزیابی هر دسته پارامتر یک سری از محاسبات انجام می گیرد. ابتدا ماتریس حساسیت ( $J$ ) را تشکیل داده

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta b_j} \quad i = 1, \dots, C_2^n \quad j = 1, \dots, m \quad (31-3)$$

که  $C_2^n$  تعداد سطرهای ماتریس حساسیت (برابر تعداد ترکیب های ممکن پارامترهای مختلف)، و  $z$  تعداد ستون های ماتریس (برابر تعداد پارامترها) است. سپس ماتریس هسین به روش گاوس و با چشم پوشی از مشتق مراتب بالاتر بدست می آید:

$$H = J^T J \quad (32-3)$$

براساس روش کرامر، تخمینی از ماتریس کواریانس حد پایین پارامتر محاسبه می گردد.

$$C = s_g^2 (J^T J)^{-1} \quad (33-3)$$

که  $s_g^2$  واریانس نتایج مقادیر تابع هدف از  $n$  بار اجرای مدل حاصل می شود. انحراف معیار و محدوده اطمینان ۹۵٪ پارامتر  $b_j$  بدین شکل محاسبه می گردد که:

$$s_j = \sqrt{C} \quad (34-3)$$

$$b_{j,lower} = b_j^* - t_{v,0.025} s_j \quad (35-3)$$

$$b_{j,upper} = b_j^* + t_{v,0.025} s_j \quad (36-3)$$

که  $b_j^*$  پارامتر  $b$  برای در بهترین شبیه سازی و  $v$  درجه آزادی  $(n-m)$  است. همبستگی های پارامتر با استفاده از مولفه های قطر اصلی و غیراصلی ماتریس کواریانس بررسی می گردند.

$$r_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}} \sqrt{C_{jj}}} \quad (37-3)$$

ماتریس  $r$  میزان تغییرات تابع هدف را در نتیجه تغییر پارامتر  $i$  در مقابل تغییرات سایر پارامترها  $j$  را نشان می دهد. چون در روش SUFI-2 همه پارامترها می توانند تغییر کنند، همبستگی بین دو پارامتر کم خواهد بود.

حساسیت پارامترها با روش رگرسیون چندگانه محاسبه می گردد که نشانگر ارتباط بین مقادیر تعیین شده پارامترها بوسیله روش لاتین هایپرکیوب را در مقابل مقادیر تابع هدف است.

$$g = a + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (3-38)$$

سپس بر اساس آزمون t-test میزان اهمیت هر پارامتر معین می گردد. این تحلیل حساسیت متفاوت از مرحله سه است. این تحلیل حساسیت میانگین تغییرات تابع هدف در نتیجه تغییر هر پارامتر در مقابل تغییرات دیگر پارامترها است. بنابراین تحلیل حساسیت نسبی براساس تخمین خطی ارائه می دهد. آنالیز حساسیت در اینجا به حدود پارامترها بستگی دارد پس رتبه حساسیت پارامترها در هر مرحله تغییر خواهد کرد.

در این مرحله ارزیابی عدم قطعیت انجام می گیرد. چون SUFI-2 فرآیندی تصادفی است روش های آماری مثل  $R^2$  و نش ساتکیف که دو خط را مقایسه می کنند، به تنهایی کافی نیست و باند 95PPU نیز برای ارزیابی بهتر محاسبه می گردد. ارزیابی باند مذکور به دو طریق انجام می شود بدین نحو که درصدی از مقادیر شبیه سازی شده که داخل باند محاسبه شده واقع شده مشخص گردد (P-factor). ارزیابی دیگر با محاسبه نسبت میانگین ضخامت باند به انحراف معیار مقادیر شبیه سازی شده، انجام می گیرد. مقادیر کمتر از ۱ رضایت بخش خواهد بود (R-factor).

به خاطر عدم قطعیت پارامترها در مراحل اولیه مقدار R-factor بزرگ خواهد بود. از این رو تکرار شبیه سازی بیشتری همراه با تغییر حدود پارامترها نیاز است. تغییر حدود پارامترها بدین صورت انجام می گیرد که،

$$b'_{j,\min} = b_{j,\text{lower}} - \text{Max}\left(\frac{b_{j,\text{lower}} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,\max} - b_{j,\text{upper}}}{2}\right) \quad (39-3)$$

$$b'_{j,\max} = b_{j,\text{upper}} + \text{Max}\left(\frac{b_{j,\text{lower}} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,\max} - b_{j,\text{upper}}}{2}\right) \quad (40-3)$$

که  $b'$  مقادیر حدود جدید می باشند. مقدار پارامترهای بهترین شبیه سازی برای محاسبه  $b_{j,\text{lower}}$  و  $b_{j,\text{upper}}$  استفاده می گردند. در این رابطه عدم قطعیت پارامترهای حساس سریع تر از پارامترهای غیرحساس کاهش می یابد.

### ۳-۲-۲- تحلیل حساسیت

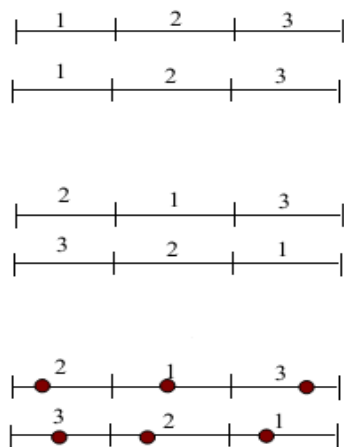
جهت تعیین میزان اهمیت متغیرهای ورودی در یک مدل و میزان تاثیر آنها از تحلیل حساسیت<sup>۱</sup> استفاده می شود. در واقع میزان وابستگی مدل به داده‌های ورودی را نشان می‌دهد. دو روش معمول برای این کار روش سراسری و روش موضعی است. در تحلیل حساسیت موضعی، تاثیر یک متغیر ورودی به وسیله ثابت نگه داشتن دیگر متغیرها در مقدار میانگین آنها، میزان تابع خروجی نسبت به متغیرهای ورودی، بررسی می شود. اما در تحلیل حساسیت سراسری همه متغیرها طبق تابع احتمال مربوطه و در محدوده مجاز خود تغییر می کند و پس از شبیه سازی به دفعات زیاد با استفاده از یکی از روش های شبیه سازی ، معمولاً مونت کارلو یا روش‌های نمونه برداری پیشرفته تر خروجی مدل در هر مرحله شبیه سازی میشود (سلمانی، ۱۳۹۰).

---

<sup>1</sup> - Sensivity Analysis



یکی از این روش‌ها نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب<sup>۱</sup> است، در این روش دامنه ای از مقادیر محتمل برای هر پارامتر ورودی نامعلوم درون بخش‌های مرتب با احتمال مساوی تقسیم شده است. از این رو کل فضای پارامتر، شامل همه پارامترهای نامشخص به سلول‌هایی تقسیم می‌گردد که شانس یکسانی دارند و آنها بصورت کارآمد نمونه برداری می‌شوند به طوری که هر پارامتر از هر بخش تنها یک مرتبه نمونه‌برداری می‌گردد. این طرح نمونه برداری به نمونه‌های بیشتر برای متغیرهای بیشتر نیاز ندارند، این استقلال یکی از مزیت‌های اصلی این طرح نمونه برداری است.



شکل ۳-۶- شماتیک نمونه برداری لاتین هایپرکیوب (عباسپور، ۲۰۰۸)

مطابق شکل ۳-۶، ابتدا پارامترها (مثلاً ۲ پارامتر) به چند محدوده (مثلاً ۳) تقسیم می‌شوند. سپس بخش‌ها بصورت تصادفی پخش می‌شوند و آنگاه نمونه تصادفی از هر بخش انتخاب می‌گردد. هر ترکیب عمودی یک دسته پارامتر را شکل می‌دهد.

برای یافتن پارامترهای موثر در شبیه سازی رواناب حوضه، می‌بایست میزان تاثیرگذاری تغییر هر پارامتر را بر خروجی مدل (دبی) شناسایی کرد. تحلیل حساسیت در SWAT CUP به دو روش تحلیل حساسیت

<sup>1</sup> - Latin Hypercube Sampling

کلی و یک به یک پارامترها انجام گیرد (عباسپور، ۲۰۰۸)<sup>۱</sup>. در روش تحلیل حساسیت کلی میزان تاثیر گذاری هر پارامتر بر متغیر خروجی بر اساس ضرایب t-stat و p-value مشخص می گردد. t-stat مقیاسی برای سنجش حساسیت پارامترها است. حساسیت ارائه شده توسط این ضریب بیانگر تغییرات متوسط تابع هدف ناشی از تغییر در مقدار هر پارامتر، با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای دیگر است. هرچه مقدار مطلق t-stat بیشتر باشد نشان از حساسیت بیشتر پارامتر است (فرامرزی، ۲۰۱۰)<sup>۲</sup>. همچنین می توان پارامترهای تاثیرگذار مدل SWAT در شبیه سازی چرخه بارش - رواناب، را در تحقیقات صورت گرفته در سراسر جهان یافت (آرنولد و همکاران، ۲۰۱۲)<sup>۳</sup>. در این تحقیق تحلیل حساسیت بین پارامترهای تاثیرگذار در دبی خروجی از برآیند تحقیقات انجام شده نظیر عباسپور و همکاران برای شبیه سازی حوضه تور سوئیس، بیلان آبی غرب افریقا، فرامرزی و همکاران در شبیه سازی بیلان آبی ایران و آرنولد و همکاران در بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر چرخه های مختلف مدل SWAT در تحقیقات مختلف در سراسر جهان و غیره گرفته شده است. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای منتخب در منطقه مورد مطالعه در فصل بعد می آید.

### ۳-۲-۳ - واسنجی مدل (کالیبراسیون)<sup>۴</sup>

SWAT CUP، الگوریتم هایی مانند الگوریتم های اتوماتیک PSO و GLUE و نیمه اتوماتیک SUFI2 را دارا می باشد. ویژگی بارز الگوریتم SUFI2 این است که چون کالیبراسیون در چند مرحله صورت می گیرد، می توان در طی فرایند کالیبراسیون، با استفاده از قابلیت پارمترزاسیون جهت دهی اصلاح پارامترها را کنترل کرد. کالیبراسیون به کمک الگوریتم SUFI2، فرایندی نیمه اتوماتیک است (روح الله نژاد و

---

<sup>1</sup> - abbaspour, 2008

<sup>2</sup> - farmarzi, 2010

<sup>3</sup> - Arnold et al., 2012

<sup>4</sup> - Calibration

همکاران، ۲۰۱۲)<sup>۱</sup>. بدین صورت که پس از یک مرحله کالیبراسیون با تعداد مشخص اجرای مدل (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ بار) حدود پارامترهای مشخص می‌شوند. با مشاهده و مقایسه مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی، حدود پارامترها را در جهت بهبود تابع هدف تغییر داده و یا اصلاح می‌کنیم (عباسپور، ۲۰۰۷). این روند هر چند نیازمند شناخت از پارامترها و نحوی تاثیرگذاری آنها بر تابع هدف است، ولی این مزیت را دارد که فرایند کالیبراسیون در اختیار مدل کننده است و زمان کالیبراسیون را بهینه می‌کند.

در این تحقیق مدل برای سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۵ میلادی (۲ سال اول بعنوان گرم کردن مدل استفاده می‌شود) در پنج مرحله کالیبره گردید. دو مرحله اول با تعداد ۲۷ پارامتر اجرا شد و سپس در طی مراحل بسته به شکل هیدروگراف شبیه سازی و تحلیل حساسیت هر مرحله، پارامترها اصلاح گردید. نهایتاً در مرحله آخر تعداد پارامترها به ۱۵ پارامتر حساس تر کاهش یافت. کاهش تعداد پارامترها باعث افزایش دقت مدل بواسطه کاهش عدم قطعیت و کاهش زمان اجرای مدل می‌گردد.

سنجش مطابقت بین مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط تابع هدف صورت می‌گیرد. تابع هدف انتخابی در این تحقیق نش - ساتکلیف می‌باشد.

### ۳-۲-۴- اعتبارسنجی مدل<sup>۲</sup>

بعد از کالیبره شدن مدل، باید به منظور سنجش کارایی مدل در دوره زمانی دیگری غیر از دوره کالیبراسیون اجرا گردد. از این رو مدل‌های با استفاده از حدود پارامترهای نهایی مرحله کالیبراسیون، برای دوره زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۱ میلادی اجرا می‌گردد.

<sup>۱</sup> - Rouholahnejad et al., 2012

<sup>۲</sup> - Validation

### ۳-۲-۵- ارزیابی مدل

ارزیابی مدل در شبیه سازی‌های هیدرولوژیکی با استفاده از روش‌های آماری مختلفی صورت می‌گیرد. قضاوت در مورد کارایی مدل بر اساس یک روش آماری بسیار دشوار و شاید نا کارآمد باشد. استفاده از ضریب همبستگی ( $R^2$ ) به همراه ضریب نش- ساتکلیف (NS) پیشنهاد می‌شود. (سانتی و همکاران، ۲۰۰۱)

ضریب همبستگی (رابطه ۳-۱)، همخوانی مقادیر پیش بینی شده و مشاهداتی را با استفاده از روش تجزیه و رگرسیون بررسی می‌کند. ضریب همبستگی قسمتی از واریانس کل می‌باشد که به وسیله رابطه خطی بین مقادیر شبیه سازی و مشاهداتی توجیه می‌گردد (سلمانی، ۱۳۹۰) مقدار بهینه آن یک است و زمانی بدست می‌آید که مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی مشابه باشند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2} \quad (۴۱-۳)$$

که در آن:  $Q_i^{sim}$  معادل مقدار متغیر شبیه سازی شده نقطه نام،  $Q_i^{simav}$  معادل میانگین متغیر شبیه‌سازی نقطه نام،  $Q_i^{obs}$  مقدار مشاهداتی نقطه نام،  $Q_i^{obsav}$  میانگین متغیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

روش دیگر برای سنجش اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی، ضریب نش- ساتکلیف (رابطه ۳-۲) است. این روش برای ارزیابی شبیه سازی متغیرهای هیدرولوژیکی به طور گسترده استفاده می‌شود. البته این ضریب به داده های پرت و نحوه تغییر شکل هیدروگراف حساس است (موسی، ۲۰۰۸)

مقادیر نش- ساتکیف بین یک تا منفی بینهایت متغیر است و مقدار بهینه آن یک است.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2} \quad (42-3)$$

که در آن:  $Q_i^{sim}$  معادل مقدار متغیر شبیه سازی شده نقطه نام،  $Q_i^{simav}$  معادل میانگین متغیر شبیه سازی نقطه نام،  $Q_i^{obs}$  مقدار مشاهداتی نقطه نام،  $Q_i^{obsav}$  میانگین متغیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

### ۳-۳- تغییر اقلیم

آب و هوا شرایط جو در یک زمان معین است در حالی که اقلیم متوسط آب و هوا در یک دوره زمانی است و به صورت دقیق‌تر یعنی توصیف آماری برحسب میانگین و انحراف و تغییرات کمیت‌های مرتبط در طول یک دوره زمانی که از ماه تا هزاران سال را در برمیگیرد. سازمان جهانی هواشناسی این دوره را ۳ دهه در نظر گرفته است. این کمیتها معمولاً متغیرهای سطحی مانند دما، بارش و باد می‌باشند.

هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیم (IPCC) تغییر اقلیم را اینگونه تعریف می‌کند " تغییر در وضعیت آب و هوا که با تغییر در میانگین و یا تغییر خواص آن شناخته می‌شود و برای یک مدت زمان طولانی، معمولاً یک دهه یا بیشتر باقی بماند".

فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی گازهای گلخانه‌ای تولید می‌کند، از اینرو باعث افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌شود. تاثیرات تغییر اقلیم در گوشه و کنار جهان بصورت افزایش دمای سطحی، افزایش سطح دریاهای، تغییر در الگوی بارش‌ها و کاهش پوشش برف قابل مشاهده است (IPCC 2007).

تغییر اقلیم اثرات ملموسی بر سیستم های طبیعی دارند. با این حال، تاثیر آن بر چرخه آب قابل ملاحظه است. تغییر اقلیم به طور طبیعی باعث ایجاد مخاطرات طبیعی نظیر سیل، خشکسالی و ... می شود. همچنین برخورد نامناسب با طبیعت مثل جنگل زدایی، فقر کشاورزی، روش های نامناسب استفاده از زمین، باعث اثرات مخرب می شود، این وضعیت به طور عمده توسط فعالیت های انسانی مانند تغییر کاربری زمین و ایجاد آلودگی ها تشدید می شود. اثرات بالقوه بر منابع آب با توجه به تغییر اقلیم جهانی در چند دهه گذشته از چالش های بزرگ است. زیرا اقلیم از عوامل مهم در دسترس بودن منابع آب است.

هرچند شدت و مشخصات این تاثیر می توانند بین مناطق مختلف به طور قابل توجهی متفاوت باشد احتمالاً بعضی مناطق با کمبود آب مواجه شوند. همراه با افزایش جمعیت و افزایش تقاضا، انتظار می رود که تعداد زیادی با کمبود آب مواجه بشود. افزایش سطح آب در مناطق پر جمعیت ساحلی شاید زندگی و امرار معاش میلیون ها نفر را به خطر بیندازد. مطمئناً تعداد دفعات سیل و خشکسالی در قسمت های زیادی از دنیا افزایش می یابد. انتظار می رود هزینه های اقتصادی افزایش و مقدار محصولات کاهش یابد که این باعث افزایش خطر فقر و گرسنگی می شود.

IPCC با همکاری سازمان جهانی هواشناسی (WMO) و برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEP) تشکیل شد. ماموریت آن ارائه ارزیابی جامع علمی از اطلاعات علمی، فنی و اجتماعی و اقتصادی در سراسر جهان در مورد خطر تغییر اقلیم ناشی از فعالیت های انسانی است، بررسی پیامدهای بالقوه زیست محیطی و اجتماعی و اقتصادی، و راه های ممکن برای تطبیق با پیامدها یا کاهش اثرات آن از دیگر وظایف آنها است.

وظیفه اصلی IPCC تهیه گزارش های تغییر اقلیم به منظور حمایت علمی از کنوانسیون تغییر آب و هوای سازمان ملل (UNFCCC) که اصلی ترین معاهده تغییر آب و هوای بین المللی در جهان می باشد، است. گزارش ها در سه بخش دسته بندی می شوند. گزارش اول در زمینه اطلاعات علمی، تکنیکی و اقتصادی

اجتماعی، گزارش دوم در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر سیستم های مختلف طبیعی و انسانی و ارائه راه- کارهای سازگاری با آن و گزارش سوم در زمینه راه کارهای کاهش گازهای گلخانه ای می باشد. تاکنون ۵ گزارش ارزیابی منتشر شده است که پنجمین گزارش آن اخیراً در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است. در این تحقیق از چهارمین گزارش ارزیابی (AR4) که در سال ۲۰۰۷ منتشر شده، استفاده می شود.

### ۳-۳-۱- مدلسازی اثرات تغییر اقلیم

دو روش را برای بررسی اثرات تغییر اقلیم می توان برشمرد، اولین روش مدلسازی، از شبیه سازی با داده های هیدرولوژیکی و آب و هوایی گذشته برای تغییرات آینده استفاده میکند. که از محدودیتهای این روش میتوان به کمبود اطلاعات گذشته برای این پیش بینی ها اشاره نمود. روش دیگر استفاده از شبیه سازی ریاضی اقلیمی است که با نام مدل های چرخش عمومی (GCM) شناخته می شوند. شبیه سازی با مدل های GCM بر اساس مبادلات انرژی و مبادلات بین خشکی، اقیانوس و اتمسفر می باشد. این مدلسازی ها در مقیاس کوچک و در کوتاه مدت شبیه سازی مناسبی ندارند ولی در بازه های زمانی بالای ۱۰ سال شبیه سازی قابل قبولی ارائه می دهند (سیدقاسمی، ۱۳۸۵)

برای ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب لازم است که ابتدا تغییرات دما، بارش، تبخیر و تعرق بررسی گردد و سپس تغییرات دبی خروجی و رواناب از حوضه با استفاده از خروجی های گام قبل می پردازند (مهدی زاده، ۱۳۹۰). مدل های اقلیمی با فرض شرایط مختلفی که در آینده خواهیم داشت، به پیش بینی پارامترهای اقلیمی آینده می پردازند.

## ۳-۳-۲- مدل‌های GCM

مدل‌های گردش عمومی<sup>۱</sup> (GCMs)، که نمایانگر فرایندهای فیزیکی در سطح اتمسفر، اقیانوس و زمین است، پیشرفته‌ترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی پاسخ سیستم اقلیمی جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای هستند (IPCC). که به طور معمول دارای وضوح افقی بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر، دارای ۱۰ تا ۲۰ لایه عمودی در جو و گاهی تا ۳۰ لایه در اقیانوس ها است (IPCC). مدل‌های اقلیمی جهانی، که به عنوان مدل گردش عمومی (GCM) شناخته می‌شوند، تغییرات اقلیمی را بصورت عددی بعنوان نتیجه‌ای از تغییرات آهسته در برخی از شرایط مرزی (مانند ثابت خورشیدی) یا پارامترهای فیزیکی (مانند غلظت گازهای گلخانه‌ای) شبیه‌سازی می‌کنند (فرامرزی، ۲۰۱۰). بنابراین این مدلها بر پایه قوانین فیزیکی بوده که به وسیله روابط ریاضی در یک شبکه سه بعدی در سطح کره زمین حل میشوند. متغیر موجود در این مدلها عبارتند از میزان بارندگی، میانگین فشار سطح دریا، تابش خورشیدی، دمای میانگین، دمای نقطه شبنم، دمای هوای حداقل، دمای هوای حداکثر و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار شبیه سازی شده اند (مهدی‌زاده، ۱۳۹۰)

مدل‌های گردش عمومی در واقع حل معادلات حاکم بر جو بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک در سه بعد هستند، این سه معادله در کنار قوانین عمومی گازها و ترمودینامیکی، اساس مدل‌های گردش عمومی جو را تشکیل می‌دهند. در ارتباط با این مدل‌ها دو دیدگاه عمده وجود دارد:

دیدگاهی که هدف آن استفاده از اینگونه مدل‌ها برای پیش‌بینی فصلی (از یک ماه آینده تا کمتر از یکسال) می‌باشد. البته اخیراً در مرکز هادلی انگلیس و سازمان هواشناسی ژاپن همین روش را برای پیش‌بینی‌های کمتر از ۵ سال نیز استفاده می‌کنند، منتها برای مناطق حاره که تاثیرپذیری بیشتری از دمای

---

<sup>1</sup> - General Circulation Models



پهنه های اقیانوسی دارند. در واقع دو مرکز یاد شده با استفاده از فقط داده های شرایط مرزی اقیانوسی اقدام به پیش بینی ۲ تا ۵ سال اقلیم می کنند.

دومین دیدگاه استفاده از این مدل ها برای پیش بینی اقلیم در مقیاس دهه تا سده می باشد که نمونه های آن هم اکنون در مراکز مختلف اقلیمی در حال اجرا می باشد و هم اکنون اقلیم کره زمین را تا ۲۳۰۰ میلادی با استفاده از همین مدل ها شبیه سازی نموده اند.

مدل های مختلفی در نقاط مختلف جهان ساخته شده و با شرایط مرزی خاص خود اجرا شده اند، که نتایج اکثر آنها در دسترس عموم قرار می گیرد. یکی از این مراکز، مرکز کانادایی مدلسازی و تغییر اقلیم کانادا (CCCma) است. یکی از آخرین مدل های گسترش داده شده توسط این مرکز، مدل CGCM3 می باشد. این مدل در گزارش چهارمین ارزیابی (AR4) در سال ۲۰۰۷ انتشار یافت.

این مدل دارای ۲ سطح وضوح T47, T63 می باشد. T47، با وضوح مکانی در خشکی ۳/۷۵ درجه طولی و عرضی است و دارای ۳۱ باند ارتفاعی می باشد. وضوح مکانی روی اقیانوس برای این مدل ۱/۸۵ درجه بوده و دارای ۲۹ باند ارتفاعی می باشد.

T63، وضوح مکانی این مدل در خشکی ۲/۸ درجه بوده و دارای ۳۱ باند ارتفاعی می باشد. وضوح مکانی روی اقیانوس ۰/۹۴ درجه بوده و دارای ۲۹ باند ارتفاعی می باشد که نسبت به ورژن قبلی دارای وضوح بالاتری می باشد و دارای دقت مکانی بیشتری می باشد.

### ۳-۳-۳- سناریوهای انتشار

به منظور تعیین تاثیر تغییرات آب و هوایی در آینده، ما به پیش بینی غلظت گازهای گلخانه ای و دیگر آلاینده های موجود در جو که آب و هوا به آنها حساس است، در سال های پیش رو نیاز داریم. این غلظت به تولید گازهای گلخانه ای از منابع مختلف طبیعی و انسانی بستگی دارد. سناریوهای انتشار میزان آزاد

شدن گازهای گلخانه ای، ذرات معلق در هوا و دیگر آلاینده ها را به داخل جو توصیف می کند، و همراه با اطلاعات مربوط به کاربری و پوشش زمین، ورودی های مدل های اقلیمی را فراهم می کنند. این سناریوها برپایه فرضیاتی در عوامل تاثیرگذاری مانند الگوهای اقتصادی، رشد جمعیت، توسعه فناوری و سایر عوامل استوار است.

سری اول سناریو های انتشار در سال ۱۹۹۲ با نام IS92 و سری جدید سناریو های انتشار را از حدود سال ۲۰۰۰ به منظور به روز کردن و جایگزینی سناریوهای قبلی با نام SRES ارائه شد. گزارش ارزیابی اول (FAR) در سال ۱۹۹۰، گزارش ارزیابی دوم (SAR) در سال ۱۹۹۵، گزارش ارزیابی سوم (TAR) در سال ۲۰۰۱ و گزارش ارزیابی چهارم (AR4) در سال ۲۰۰۷ انتشار یافت. همراه با این گزارشها نتایج حاصل از مدل های GCM برای سناریو های مختلف و نقاط مختلف جهان منتشر می گردد (هیات بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷).

۴۰ سناریو مختلف SRES، هر یک با فرض های مختلف برای آینده گاز گلخانه ای، کاربری زمین و دیگر عوامل محرک وجود دارد. این سناریو انتشار در خانواده هایی مشابه تقسیم می شوند. خانواده سناریوهای انتشار به سناریوهای اطلاق می شود که دارای موضوع و زمینه مشترکی هستند. در گزارش های سوم و چهارم IPCC بر روی شش خانواده از سناریوهای انتشار بحث شده است که عبارتند از A1B، A1FI، A1T، A2، B1 و B2 (IPCC).

سناریوی A1:

در این سناریو تاکید بر رشد خیلی سریع اقتصادی است، جمعیت جهان تا اواسط قرن به ۹ میلیارد می رسد و پس از آن کاهش می یابد، و رشد فناوری های جدید و کارآمد تر افزایش می یابد. دنیا همگرا -

درآمد و روش زندگی در بین مناطق با هم همگرا می شوند و تعاملات اجتماعی و فرهنگی در دنیا سریع گسترش می یابد. مقدار افزایش CO<sub>2</sub> در سال ۲۱۰۰ بطور متوسط ۵۰ درصد نسبت به حال حاضر می باشد. خانواده سناریو A1 به سه گروه تقسیم می شود که راه های متفاوت تغییرات تکنولوژی در سیستم مصرف انرژی را توصیف می کنند. سه زیرگروه A1 عبارتند از A1FI با تاکید بر استفاده از سوخت های فسیلی، A1T تاکید بر استفاده از منابع انرژی غیرفسیلی، A1B با تاکید بر استفاده متعادل از انواع منابع انرژی.

#### سناریوی A2:

در این خانواده سناریو جهان ناهمگن در نظر گرفته می شود. اصل بر اعتماد به نفس و حفظ هویت های منطقه ای است. الگوهای باروری در سراسر مناطق بسیار آرام همگراست، که در نتیجه جمعیت به طور مداوم افزایش می یابد و جمعیت تا سال ۲۱۰۰ به ۱۵ میلیارد نفر می رسد. توسعه اقتصادی منطقه محور است. توسعه اقتصادی در درجه اول منطقه ای و سرانه رشد اقتصادی و تغییرات تکنولوژیک پراکنده تر و کندتر از سناریوهای دیگر است.

#### سناریوی B1:

در خانواده سناریو B1، جهان همگراست و همانند سناریو A1 جمعیت جهانی در نیمه قرن جاری به حداکثر رسیده و سپس کاهش می یابد. اما با تغییر سریع در ساختارهای اقتصادی و حرکت به سمت اقتصاد خدماتی، باعث کاهش در شدت مصرف مواد و مقدمه ای از فناوری های پاک و کارآمد تکنولوژی می باشد. با تاکید بر راه حل های جهانی برای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، عدالت بهبود یافته است. CO<sub>2</sub> تا ۲۰ درصد افزایش می یابد.

#### سناریوی B2:

خانواده سناریو B2 جهان را با تاکید بر راه حل های منطقه ای برای اقتصاد، مسائل اجتماعی و پایداری زیست محیطی توصیف می کند. جمعیت جهان با سرعت کمتری از سناریو A2 بطور پیوسته افزایش می

یابد و به ۱۰/۴ میلیارد نفر در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. توسعه اقتصادی در حد متوسط، و تغییرات تکنولوژیکی با سرعت کمتر و پراکنده تر از B1 و A1 خواهد بود. هرچند این سناریو نیز در جهت حفاظت از محیط زیست و عدالت اجتماعی است، ولی تمرکز آن در سطح محلی و منطقه ای است.

جدول ۳-۲- پیش بینی سناریوهای انتشار برای سال ۲۱۰۰

سناریو	۱۹۹۰	A1	A2	B1	B2
جمعیت (میلیارد نفر)	۵/۲۵۲	۷/۱	۱۵/۱	۷/۲	۱۰/۴
غلظت CO <sub>2</sub> (ppm)	۳۵۴	۶۸۰	۸۳۴	۵۴۷	۶۰۱
تغییر دما (درجه سانتیگراد)	-	۲/۲۵	۳/۰۹	۲/۰۴	۲/۱۶
خیز سطح آب دریا (سانتیمتر)	-	۵۸	۶۲	۵۰	۵۲
حدود تغییرات (سانتیمتر)	-	۲۳ - ۱۰۱	۲۷ - ۱۰۷	۱۹ - ۹۰	۲۰ - ۹۳

مدل های چرخش عمومی جو تحت سناریوهای مختلف خوش بینانه و بدبینانه اجرا شده، خروجی‌های آنها جهت استفاده محققان قرار داده می‌شود. در مطالعات تغییر اقلیم باید خروجی‌های مدل انتخابی را برای حداقل ۲ سناریو مختلف انتخاب کرده و نتایج آنها با هم مقایسه شوند (مهدی‌زاده، ۱۳۹۰)

بنابراین، سناریوی اقلیمی به هر نوع خروجی مدل های اقلیمی می گویند که تحت سناریوهای انتشار هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) و یا هر سناریوی دیگری که توسط مراکز بین المللی اقلیمی اجراء شده باشد. نکته مهم این است که سناریوهای انتشار، سناریوهای اقلیمی نیستند. آنها غلظت گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها و غیره را در دهه‌های آینده مشخص می‌کنند در حالیکه سناریوهای اقلیمی وضعیت اقلیم را مشخص می‌کنند. البته برخی سناریوهای خاص هم وجود دارد که گاهاً با این دو نوع

اشتباه گرفته می شود. مثل سناریوهای ورودی مدل لارس که یک سناریوی خاص بوده و تغییرات آینده اقلیم را نسبت به دوره مشاهداتی بیان می کنند.

در این تحقیق به منظور پوشش حداکثری دامنه روند تغییرات، سه سناریو بدبینانه A2، خوش بینانه B1 و حد وسط (ادامه روند فعلی) A1B برای مطالعات اثر تغییر اقلیم انتخاب شده و مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۳-۳-۴ - کوچک مقیاس کردن خروجی های GCM

داده های خروجی مدل های GCM با توجه به بزرگ مقیاس بودن دارای وضوح مکانی مناسب برای استفاده در مطالعات هیدرولوژی حوضه نمی باشند. از این رو برای استفاده، نیاز به کوچک مقیاس کردن می باشد تا دارای وضوح مکانی قابل قبول شود. کوچک مقیاس کردن در حقیقت به فرآیند حرکت از پیش بینی کننده های بزرگ مقیاس به پیش بینی شونده ها در مقیاس محلی اطلاق می شود. روش های مختلفی جهت کوچک مقیاس کردن این داده ها وجود دارد، که روش های آماری و روش های دینامیکی از جمله آنهاست. روش های آماری، قادرند تا خصوصیات آماری داده های مشاهداتی و GCM از قبیل میانگین، انحراف معیار و چولگی را یکسان کنند. بعبارتی روش های کوچک مقیاس کردن آماری شامل بسط روابط کمی بین متغیرهای اتمسفری بزرگ مقیاس و متغیرهای منطقه ای می باشند. روابط مختلفی بین پیش بینی کننده ها و پیش بینی شونده ها ایجاد نمود که می تواند در مقیاس حوضه آبریز با استفاده از متغیرهای اقلیمی چون بارش و دما انجام گردد. با برقراری روابط آماری مناسب بین متغیرهای پیش بینی کننده و پیش بینی شونده می توان به روابط مناسب جهت پیش بینی متغیرهای اقلیمی در آینده تحت تاثیر تغییر اقلیم دست یافت (صمدی، ۱۳۸۶). روش های دینامیکی روشی پر هزینه بوده و به دلیل غیر قابل دسترس بودن منبع مدل های GCM در ایران، به راحتی ممکن نیست.

### ۳-۳-۴-۱- ریز مقیاس نمایی دینامیکی

مدل‌هایی که برای ریز مقیاس نمایی دینامیکی استفاده می‌شوند بسیار شبیه مدل‌های گردش عمومی هستند، اما گام‌های زمانی و مکانی شبکه ریزتر و دقیق‌تر هستند. مثلاً گام مکانی مدل‌های گردش عمومی حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه جغرافیایی (حدود ۲۵۰ کیلومتر در عرض‌های جغرافیایی) می‌باشد، در حالیکه که گام مکانی مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی که به آنها مدل‌های منطقه‌ای نیز می‌گویند بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. از انواع مدل‌های دینامیکی می‌توان به RegCM, NCEP/RSM و WRF اشاره کرد.

### ۳-۳-۴-۲- ریزمقیاس مقیاس نمایی آماری:

این روش پس از تعیین تابع مطلوب، متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس که توسط مدل‌های چرخه عمومی در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شده‌اند، بعنوان ورودی در این توابع اعمال شده و متغیر سطحی مدنظر بعنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و غیره بین رفتار واقعی ایستگاه و برون‌داد مدل گردش عمومی ایجاد می‌شود. بعد از راستی‌آزمایی، این معادلات می‌توانند در ریزمقیاس نمایی پیش‌بینی‌های آینده با استفاده از سناریوهای انتشار مورد استفاده قرار گیرند. برخی از مدل‌هایی که در روش استفاده می‌شوند عبارتند از SDSM، ASD، CLIMGEN و غیره.

روش SDSM، ارتباطات آماری بین رفتارهای بزرگ مقیاس و محلی را بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. این ارتباطات با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه و خروجی مدل‌های

گردش عمومی در دوره مشابه پایه ایجاد می شوند. فرض بر این است که این روابط در آینده نیز صادق باشند، به عبارت دیگر فرض اساسی در ریزمقیاس نمایی آماری مستقل از زمان بودن این ارتباطات است. قبل از انجام فرآیند ریزمقیاس نمایی توسط این مدل داده های مشاهداتی و داده های مدل های گردش عمومی با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار آنها در دوره مورد نظر نرمال می شوند. مدل های گردش عمومی نمی توانند به خوبی اقلیم محلی را مانند دیدبانی شبیه سازی نمایند؛ لذا مقایسه این دو باهم قبل از نرمال کردن شاید موجب همبستگی های غیرمعقول گردد. متغیرهای پیش بینی کننده اطلاعات مربوط به حالت بزرگ مقیاس جو را فراهم می کنند؛ در حالیکه متغیرهای پیش بینی شونده حالت جو را در مقیاس محلی مشخص می کنند.

فرآیند ریزمقیاس نمایی آماری در این روش طی مراحل زیر انجام می شود:

۱- بررسی اولیه توانمندی ریزمقیاس نمایی توسط متغیرهای پیش بینی.

۲- واسنجی مدل ریزمقیاس نمایی. متغیرهای بزرگ مقیاس معرفی شده قبل، برای تعیین روابط همبستگی خطی چند متغیره استفاده می شوند. مقیاس زمانی مدل های آماری طراحی شده در این مرحله می تواند ماهانه، فصلی و یا سالانه باشند. واریانس و خطای استاندارد مدل مشخص می شوند،

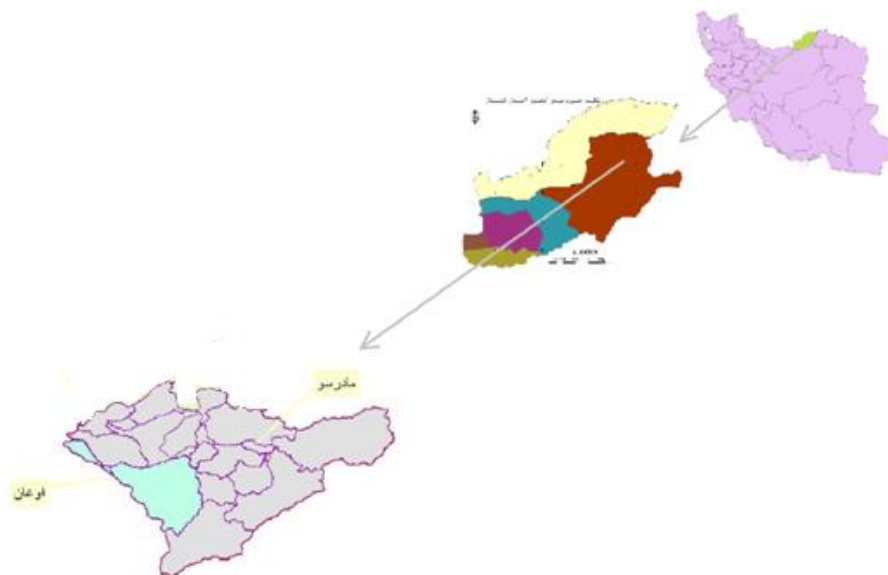
۳- تولید چندین سری از وضعیت جاری اقلیم با استفاده از پیش بینی کننده های مشاهداتی و ارزیابی آنها. مولفه تصادفی SDSM می تواند سری های مختلفی از داده های شبیه سازی شده (تا ۱۰۰ سری) که دارای مشخصات آماری یکسانی هستند، تولید نماید؛ اما مقادیر روزانه هر سری با همدیگر متفاوت می باشد،

۴- تولید سری های مختلفی از داده های هواشناسی با استفاده از متغیرهای پیش بینی کننده GCM. این سری داده ها با استفاده از روابط آماری رگرسیون خطی چند متغیره حاصل از مرحله دوم بدست می آیند.

۵-مرحله نهایی آنالیز داده‌های پیش بینی شده و مشاهداتی می باشد. در این مرحله مشخصات آماری سناریوی تغییر اقلیم را می توان با رفتار مشاهداتی ایستگاه مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

### ۳-۴- معرفی منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه بالادست سد گلستان شامل زیرحوضه‌های تنگراه (مادرسو) و گالیکش ( اوغان ) می باشد، که مجموعاً با مساحت ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در شرق استان گلستان، بین عرض‌های  $36^{\circ}57'30''$  تا  $37^{\circ}30'37''$  شمالی و طول‌های  $55^{\circ}13'59''$  تا  $56^{\circ}28'00''$  شرقی واقع می باشد. بخش عمده‌ای از منطقه در استان گلستان و قسمت‌هایی از حوضه تنگراه در استان‌های خراسان شمالی و سمنان واقع شده است. موقعیت نسبی منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و ایران در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷- موقعیت حوضه های مورد مطالعه در استان گلستان و ایران



حوضه‌های مورد مطالعه این تحقیق، بخشی از حوضه بزرگتر گرگانرود می باشد و از دو زیرحوضه اصلی تنگراه (مادرسو) و گالیکش (اوغان) تشکیل شده است.

سرشاخه های اصلی حوضه عبارتند از:

رودخانه دوغ (مادرسو): این رودخانه از ارتفاعات دشت، سیاه‌کوه و آلمه در استان خراسان‌شمالی و نیز ارتفاعات شرق کلالة سرچشمه می‌گیرد. آورد آن سالانه حدود ۵۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. این رودخانه بعد از عبور از حومه جنوبی شهر کلالة به گرگانرود و سد گلستان می‌ریزد.

رودخانه اوغان: این رودخانه از ارتفاعات فارسیان فرنگ سرچشمه گرفته و در جهت شمال غربی جریان می‌یابد. پس از عبور از حاشیه شهر گالیکش به سد گلستان می‌ریزد. رودخانه اوغان دارای آب دائمی است.

### ۳-۴-۱- اقلیم حوضه

اقلیم منطقه متأثر از رشته کوه البرز، مجاورت دریای خزر، بیابان‌های جنوب ترکمنستان و تحت اثر جریان‌های شمالی جنوبی سیبری و نیز جریان غربی شرقی مدیترانه ای است. در منطقه مورد مطالعه بارندگی از غرب به شرق کاهش می‌یابد. همچنین توجه به تفاوت‌های ارتفاعی منطقه (ارتفاع منطقه ۲۳۶۲ متر در ارتفاعات تا ۴۶ متر در دشت متغیر است) اقلیم غرب منطقه نیمه خشک تا نیمه مرطوب معتدل و اقلیم شرق و جنوب شرقی منطقه، خشک تا نیمه خشک سرد طبقه بندی می‌شوند.

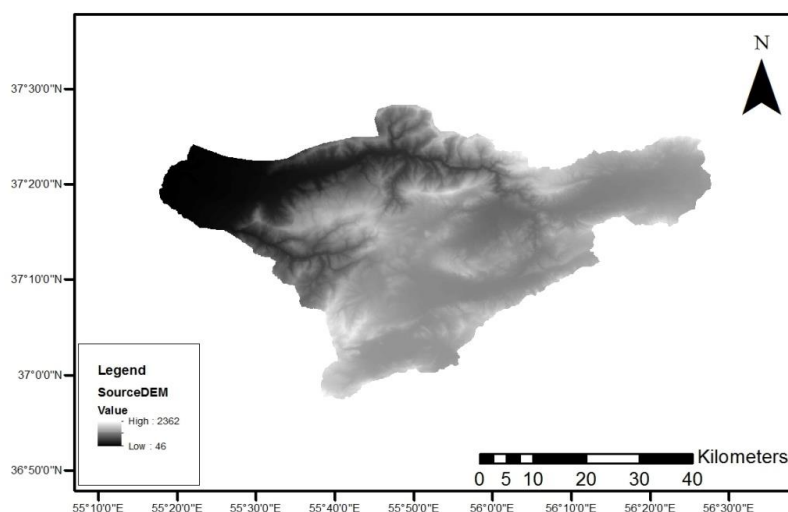
### ۳-۴-۲- ورودی‌های مدل

برای اجرای مدل SWAT حوضه آبریز به اطلاعات زیادی در سطوح مختلف نیاز داریم. این اطلاعات در سه سطح حوضه، زیرحوضه و HRU به مدل وارد و معرفی می‌شوند. اطلاعات لازم برای ساخت حوزه آبریز عبارتند از، نقشه‌های DEM، کاربری اراضی (پوشش گیاهی) و خاکشناسی. گروه دیگر اطلاعات ورودی

شامل داده های هواشناسی است. مدل SWAT اطلاعات دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی را به عنوان ورودی دریافت می کند. SWAT این امکان را فراهم می کند که، اطلاعاتی را که موجود داریم به عنوان مشاهداتی به مدل وارد کنیم و اطلاعاتی که آمار وجود ندارد را بر اساس مشخصات ایستگاه مبدا شبیه سازی می کند.

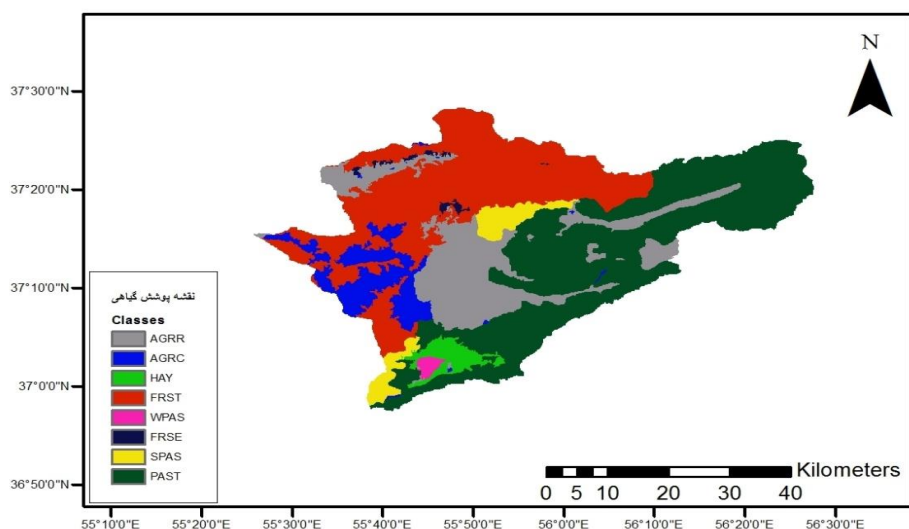
### ۳-۴-۱- نقشه ها

دسترسی به نقشه های خاک شناسی از مشکلات و محدودیت های جدی در مطالعات آبخیزداری و هیدرولوژی در این سطح می باشد، در این تحقیق نیز این مسئله دغدغه جدی محسوب می شد. نهایتاً با استفاده از نقشه های مناطق کوچک مطالعه شده در طرح های مطالعاتی سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، نقشه خاک منطقه ساخته شد، شکل ۳-۱۰ (سلمانی، ۱۳۹۰). اطلاعات نقشه DEM و کاربری اراضی از مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو تهیه گردید. پراکندگی ارتفاعی منطقه در نقشه DEM شکل ۳-۸ قابل مشاهده است.

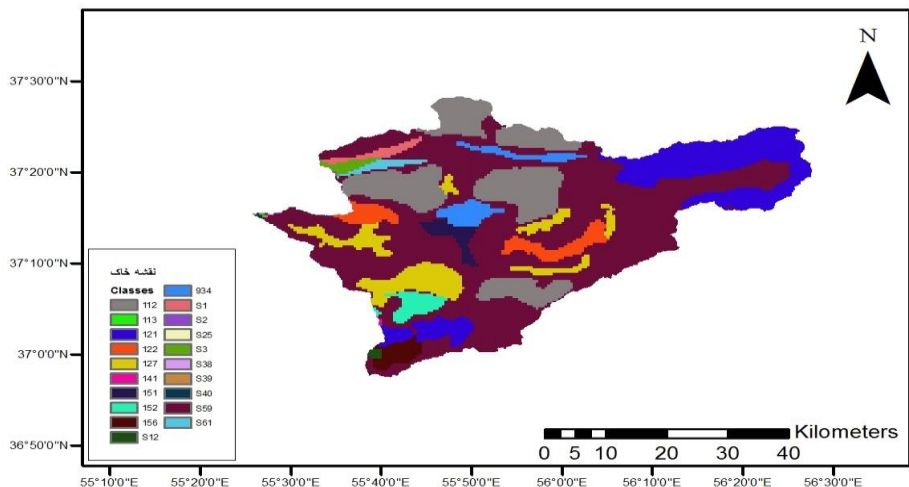


شکل ۳-۸- نقشه DEM منطقه مورد مطالعه

پوشش گیاهی و کاربری اراضی از عوامل تاثیرگذار در میزان رواناب حاصل از بارندگی می‌باشد. در روش SCS (شماره منحنی) با استفاده از نقشه‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی و تلفیق آن با اطلاعات گروه‌های هیدرولوژیک خاک و رطوبت پیشین، نقشه شماره منحنی تهیه می‌شود. غالب پوشش منطقه عبارتند از مرتع ۳۷ درصد، جنگل مخلوط ۳۲ درصد و کشاورزی ۲۴ درصد. همان گونه که شکل ۳-۹ نشان می‌دهد، پوشش گیاهی منطقه بسیار تنوع است.



شکل ۳-۹- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳-۱۰- نقشه خاک منطقه مورد مطالعه

### ۳-۴-۲-۲- داده‌های اقلیمی

آب و هوا به عنوان کنترل کننده چرخه انرژی، هیدرولوژیکی و تعادل آبی از مولفه‌های اصلی ساخت یک مدل هیدرولوژی و خصوصا مدل SWAT می‌باشد. مدل SWAT برای شبیه‌سازی چرخه‌های مختلف حوضه آبریز، به داده‌های اقلیمی بارندگی، دما، تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی نیاز دارد. این مقادیر یا به صورت سری زمانی روزانه به مدل وارد می‌شوند و یا در صورت نبود این متغیرهای آب و هوایی، با توجه به متوسط ماهانه پارامترهای اقلیمی نزدیکترین ایستگاهی که آمار بلندمدت دارد، متغیرها را شبیه سازی می‌کند (مولد آب و هوایی)<sup>۱</sup>. در این تحقیق متوسط اقلیمی ایستگاه‌های مراره تپه و گنبد به عنوان ملاک ساخت متغیرهایی که آمار ندارند، در فایل به نام userwgn به مدل معرفی شد.

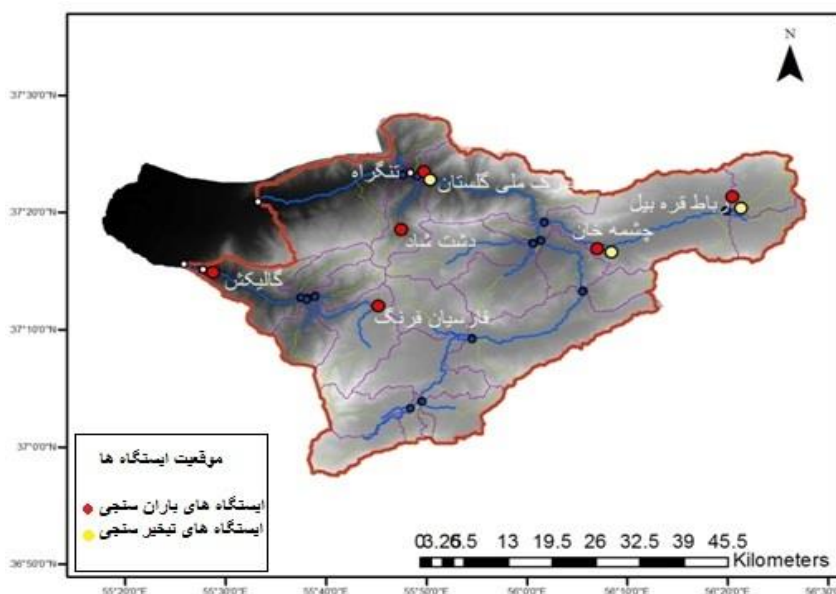
در این تحقیق از داده های بارش و دمای دوره آماری ۲۰۰۳-۱۹۹۵ میلادی، ایستگاه‌های باران سنجی و تبخیر سنجی شکل ۳-۱۱ به عنوان مقادیر مشاهداتی به مدل وارد و سری زمانی رطوبت نسبی، تشعشع خورشیدی و سرعت باد بر اساس قابلیت مدل شبیه سازی شدند.

بارش و دمای حداقل و حداکثر، ایستگاه های تبخیرسنجی رباط قره بیل، چشمه خان و پارک ملی گلستان (آب منطقه‌ای گلستان)

بارش، ایستگاه های باران سنجی دشت شاد، فارسین فرنگ و گالیکش (آب منطقه‌ای گلستان)

---

<sup>1</sup> - Weather generator



شکل ۳-۱۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران سنجی و تبخیرسنجی مورد استفاده

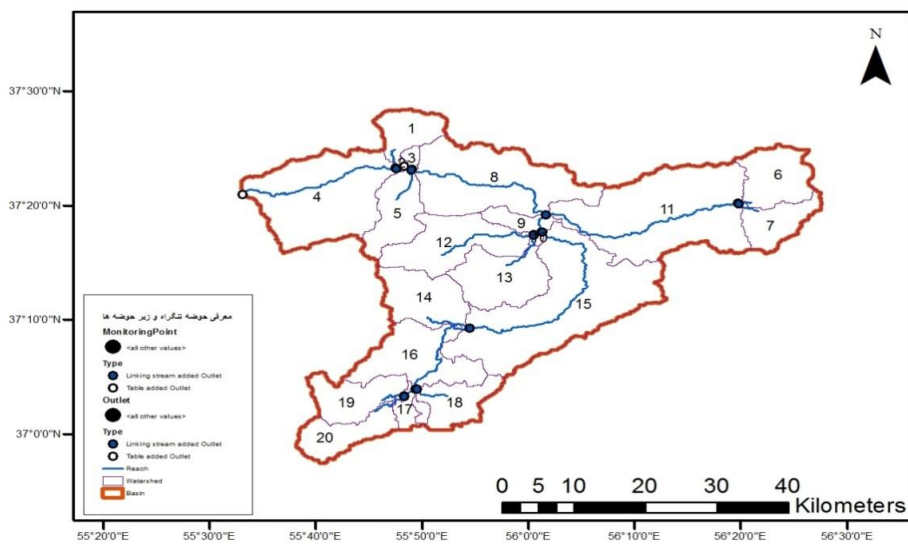
### ۳-۵- ساخت و اجرای مدل منطقه

#### ۳-۵-۱- ساخت مدل منطقه با SWAT

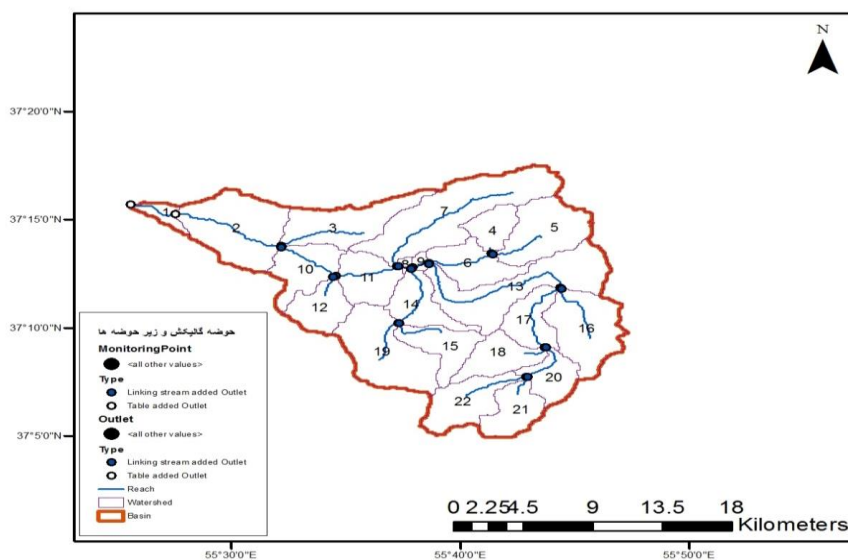
پس از آماده کردن نقشه‌ها و داده‌های ورودی، گام بعدی ساخت حوضه آبریز به کمک افزونه مدل SWAT در محیط ArcGIS است. با توجه به تفاوت‌های اقلیمی دو حوضه تنگراه و گالیکش و همچنین دبی خروجی مجزا، مدل هر حوضه جداگانه ساخته شده و مطالعه تغییرات رواناب هر حوضه جداگانه بررسی می‌شود.

تعیین حداقل مساحت زیرحوضه‌ها بر عهده مدل SWAT گذاشته شد تا با توجه به تغییرات ارتفاعی، میزان بهینه تعداد زیرحوضه‌ها را تعیین کند. همچنین مسیر جریان آبراهه‌های اصلی و فرعی توسط مدل SWAT، از روی نقشه DEM شناسایی و به مدل اضافه گردید. با تعیین حدود لازم برای ساخت

زیرحوضه‌ها و HRU ها، حوضه تنگراه به ۲۰ زیرحوضه و ۱۷۶ HRU تقسیم شد. همچنین حوضه گالیکش به ۲۲ زیرحوضه و ۱۸۴ HRU تقسیم شد. در شکل‌های ۱۲-۳ و ۱۳-۳ آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های هر یک از حوضه‌های تنگراه و گالیکش، به ترتیب دیده می‌شوند.



شکل ۳-۱۲- آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های ساخته شده حوضه تنگراه توسط مدل SWAT



شکل ۳-۱۳- آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های ساخته شده حوضه گالیکش توسط مدل SWAT

بعد از وارد کردن نقشه‌های پوشش گیاهی، خاک و تعیین دسته بندی شیب‌های حوضه، نقشه‌های پوشش گیاهی، خاک و شیب حوضه طبق فرمت مدل ذخیره می‌گردند.

سپس با تعیین حدود حداقل برای دسته‌های پوشش گیاهی، خاک و شیب، واحدهای هیدرولوژیک (HRU) که پوشش گیاهی، خاک و شیب یکسان خواهند داشت ایجاد می‌گردد. در این مرحله ساخت حوضه آبریز و اجزای آن شامل زیرحوضه‌ها و HRU ها به اتمام می‌رسد.

در مرحله بعد سری زمانی های اطلاعات آب و هوایی به مدل وارد شده و جدول‌های مورد نیاز برای محاسبات هیدرولوژیک در هر HRU ساخته می‌شود. نهایتاً با مشخص کردن نوع رابطه های مورد استفاده و حدود اولیه برای مشخصات هیدرولوژیک منطقه، مدل برای تعداد سال‌هایی که آمار وجود دارد اجرا می‌گردد. مقادیر اولیه پارامترها نیز طبق پیش فرض مدل حفظ شدند ولی برای شبیه سازی بهتر، دو سال آماری ۹۶-۱۹۹۵ به عنوان آماده سازی اولیه (warming up) تعیین شد تا مقادیر اولیه پارامترها با توجه به شرایط منطقه جایگزین شود. نتیجه شبیه سازی این دو سال در خروجی مدل SWAT نمایش داده نمی‌شوند. در این تحقیق برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از روش پنمن - مانتیس، برای محاسبه رواناب از روش SCS، برای روندیابی جریان از روش ذخیره متغیر<sup>۱</sup> استفاده شده است.

همان طور که فصل قبل اشاره شد برای تطبیق مدل ساخته شده با شرایط منطقه ای، نیاز است پارامترهای موثر در شبیه سازی شناسایی (تحلیل حساسیت) به صورت‌های مختلف تغییر یابند تا بهترین حالت شبیه‌سازی متغیر مورد سنجش، که در اینجا دبی خروجی از حوضه می‌باشد، بدست آید (کالیبراسیون). سپس مدل کالیبره شده برای دوره زمانی دیگری غیر از دوره کالیبراسیون اجرا و دقت شبیه سازی سنجیده شود (اعتبار سنجی).

---

<sup>1</sup> - variable storage

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای دخیل در شبیه سازی با مدل SWAT فرایند کالیبراسیون به صورت دستی کاری وقت گیر و طاقت فرسا خواهد بود. در این تحقیق از نرم افزار SWAT CUP و الگوریتم SUFI2 برای تحلیل حساسیت، کالیبراسیون و اعتبارسنجی استفاده شده است.

### ۳-۵-۲- مدلسازی اثر تغییر اقلیم

بعد از ساخت مدل و کالیبراسیون و اعتبار سنجی آن، مدل آماده مطالعات اثر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و دبی خروجی از حوضه می باشد. در این مرحله داده های اقلیمی (بارش و دما) ریزمقیاس شده آینده برای دو دوره زمانی نزدیک (۲۰۶۴-۲۰۴۶) و دور (۲۰۹۹-۲۰۸۱) به مدل وارد می شود و بعد از اجرای مدل با حدود پارامترهای مرحله قبل، دبی خروجی بصورت حدود ۹۵ درصد عدم قطعیت به دست می آید.

مدل GCM مورد استفاده در این تحقیق، مدل CGCM3 از مرکز مدلسازی و تغییر اقلیم کانادا (CCCma) است. این مدل در گزارش چهارمین ارزیابی (AR4) در سال ۲۰۰۷ انتشار یافت.

این مدل دارای ۲ سطح وضوح T47, T63 می باشد. در این تحقیق از داده های بارش و دمای ریزمقیاس شده سطح T47، با وضوح مکانی در خشکی ۳/۷۵ درجه طولی و عرضی است و دارای ۳۱ باند ارتفاعی می باشد. وضوح مکانی روی اقیانوس برای این مدل ۱/۸۵ درجه بوده و دارای ۲۹ باند ارتفاعی می باشد. جهت استفاده از داده های اقلیمی برای شبیه سازی حوضه آبریز نیاز است که خروجی های مدل های GCM ریزمقیاس شوند. در این تحقیق داده های ریزمقیاس شده باران و دمای حداقل و حداکثر منطقه مورد مطالعه، از پروژه مشترک بانک جهانی<sup>۱</sup> و دانشگاه سنتا کلارا<sup>۱</sup> گرفته شده است. روش ریزمقیاس نمایی، روش آماری<sup>۲</sup> BCSD می باشد.

---

<sup>1</sup> - World Bank



روش BCSD استفاده شده در این پروژه ریزمقیاس نمایی جهانی و بصورت داده‌های اقلیمی روزانه، بدین گونه است که ابتدا خروجی های مدل‌های GCM را از دقت مکانی ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتری به مقیاس مکانی کوچک‌تر تبدیل می‌کنند (جداسازی مکانی)<sup>۳</sup>. سپس انحرافات این داده های ریزمقیاس شده مکانی با توجه به شرایط اقلیمی محلی برای هر منطقه، اصلاح می‌گردند (اصلاح انحرافات)<sup>۴</sup>. جهت نمایش بهتر تاثیر توپوگرافی و الگوهای اقلیمی منطقه، اصلاح انحراف در هر دو حالت میانگین و واریانس (تفاوت) انجام می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> - Santa Clara University (climate Central)

<sup>2</sup> - Bias-Corrected Spatial Disaggregation

<sup>3</sup> - Spatial Disaggregation

<sup>4</sup> - Bias-Corrected



فصل ٤

نتایج

## ۴- نتایج

### ۴-۱- مقدمه

پس از جمع آوری داده ها و اطلاعات مورد نیاز، در این فصل به ارائه نتایج اجرای مدل و تشریح و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. آنچه در ادامه فصل می‌آید عبارتند از: معرفی حوضه های آبریز تنگراه و گالیکش، ارائه نتایج اولیه مدلسازی، تحلیل حساسیت پارامترهای موثر در فرآیند بارش و رواناب، واسنجی (کالیبراسیون) و اعتبار سنجی مدل به همراه ارائه شاخص‌های آماری مربوط به هر مرحله جهت ارزیابی میزان کارایی مدل در شبیه سازی رواناب ماهانه، پس از اطمینان از کارایی مدل کالیبره شده به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب می‌پردازیم. ابتدا تغییرات بارش و دما به عنوان ورودی های هواشناسی اصلی مدل، تحت سناریوهای مختلف (A1B , A2, B1) در دو دوره زمانی نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت بارش و دماهای ریز مقیاس شده به مدل کالیبره شده داده و نتایج خروجی مدل که همان دبی جریان باشد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در این تحقیق شبیه سازی دبی دو خروجی تنگراه و گالیکش به صورت جداگانه صورت گرفته است و نتایج رواناب دو حوضه جداگانه ارائه می‌گردد.

## ۴-۲- خصوصیات حوزه آبریز تنگراه و گالیکش

به دلیل نبود خروجی واحد در بالادست سد گلستان، بررسی‌های این تحقیق در دو خروجی تنگراه و گالیکش بصورت جداگانه انجام گرفته است. بعد از معرفی حوضه‌ها و تعریف HRU به کمک مدل، حوضه تنگراه به ۲۰ زیرحوضه و ۱۷۶ HRU و حوضه گالیکش به ۲۲ زیرحوضه و ۱۸۴ HRU تقسیم گردید. مساحت دسته‌های مختلف کاربری اراضی که پس از معرفی نقشه پوشش گیاهی به مدل ساخته شده است، مطابق جدول ۴-۱ می‌باشد.

جدول ۴-۱- نوع و درصد پوشش گیاهی حوضه‌های مورد مطالعه

درصد	نوع پوشش گیاهی حوضه گالیکش
۱۱/۲۱	AGRR - زمین‌های کشاورزی با کشت ردیفی
۴۵/۵۶	FRST - جنگل‌های مخلوط همیشه سبز و برگ ریزان
۴۲/۹۵	AGRC - زمین‌های کشاورزی با کشت غیر ردیفی
۰.۲۷	PAST - مرتع
درصد	نوع پوشش گیاهی حوضه تنگراه
۱۷/۹۲	AGRR - زمین‌های کشاورزی با کشت ردیفی
۲۸/۶۸	FRST - جنگل‌های مخلوط همیشه سبز و برگ ریزان
۰.۳۲	AGRC - زمین‌های کشاورزی با کشت غیر ردیفی
۴۴/۸۸	PAST - مرتع
۴/۳۴	SPAS - مرتع تابستانی
۰.۵۸	WPAS - مرتع زمستانی
۰.۶۴	FRSE - جنگل همیشه سبز
۲/۶۴	HAY - علفزار

با معرفی نقشه خاک به مدل حوضه تنگراه و گالیکش به ترتیب به ۱۶ و ۱۳ گروه خاک تشکیل شد. همچنین با کلاس بندی شیب حوضه و اعمال حدود مد نظر، ۵ دسته شیب (۰-۵، ۵-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵-۴۵ و ۳۰-۹۹) برای منطقه مورد مطالعه تشکیل شد.

جدول ۴-۲- مساحت کلاس بندی شیب حوضه ها

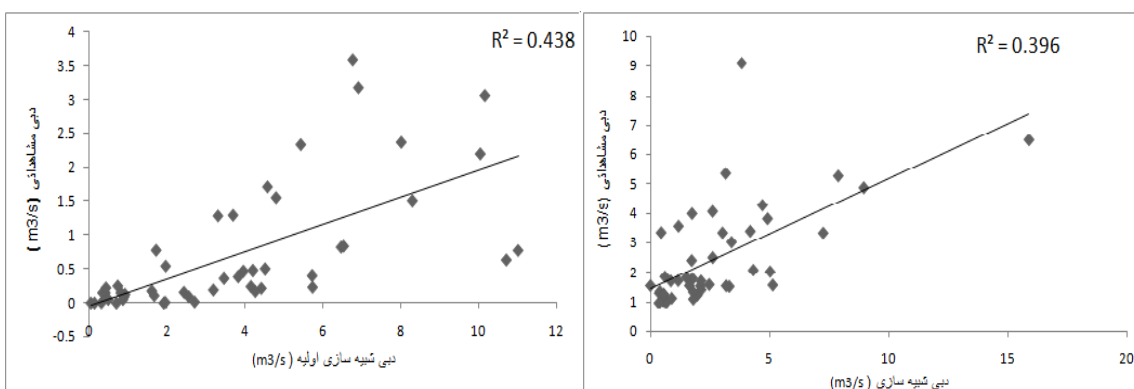
درصد مساحت		کلاس بندی شیب
حوضه گالیکش	حوضه تنگراه	
۴/۹۵	۲۰/۶۵	۰-۵
۲۰/۵۹	۲۹/۶۱	۵-۱۵
۳۹/۳۸	۲۷/۴۰	۱۵-۳۰
۲۲/۲۶	۱۳/۶۷	۳۰-۴۵
۱۲/۸۲	۸/۶۶	۴۵-۹۹

#### ۴-۳- نتایج اجرای اولیه مدل

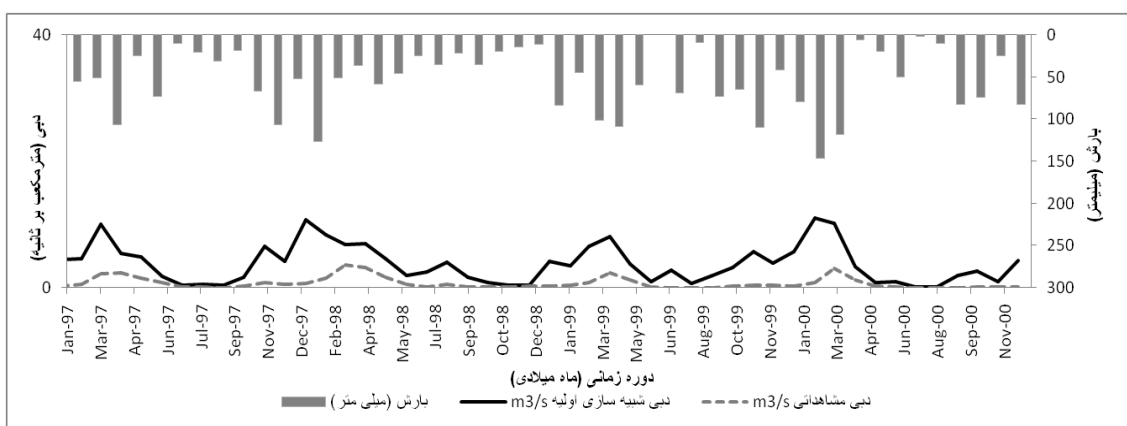
در ابتدا با استفاده از داده های هواشناسی ورودی (شامل بارش و دما) ، و وارد کردن اطلاعات لازم به مدل شامل پارامترهای روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش محاسبه رواناب سطحی و روش روندیابی جریان، مدل اجرا شد. در این تحقیق از روش پنمن-مانتیس برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش

شماره منحنی (CN) برای رواناب سطحی و روش ذخیره متغیر برای روندیابی جریان در رودخانه استفاده شده است.

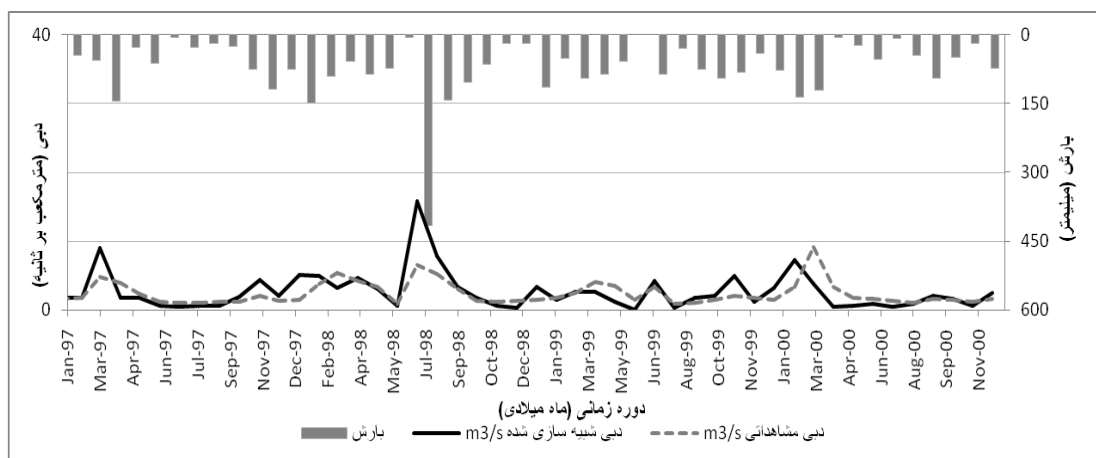
شکل ۱-۴ الی شکل ۳-۴ به ترتیب همبستگی و سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده ایستگاه های تنگراه و گالیکش را در شبیه سازی اولیه نشان می دهند.



شکل ۱-۴ - همبستگی بین دبی شبیه سازی و مشاهداتی ماهانه در اجرای اولیه مدل (بدون کالیبراسیون) - برای خروجی حوضه تنگراه (شکل سمت راست) و خروجی حوضه گالیکش (شکل سمت چپ)



شکل ۲-۴ - مقایسه سری زمانی دبی شبیه سازی اولیه با مقادیر دبی مشاهداتی در دوره زمانی ماهانه - ایستگاه تنگراه



شکل ۴-۳- مقایسه سری زمانی دبی شبیه سازی اولیه با مقادیر دبی مشاهداتی در دوره زمانی ماهانه - ایستگاه گالیکش

#### ۴-۴- تحلیل حساسیت

پارامترهای بسیاری برای کنترل و تکمیل چرخه‌های مختلف در مدل SWAT تعریف شده است. بعضی از این پارامترها در تمامی چرخه‌ها موثر هستند، تعدادی در بعضی از چرخه‌ها و تعدادی هم در یک چرخه خاص موثر هستند. به عنوان مثال بارش- رواناب چرخه‌ای است که بر اکثر چرخه‌های دیگر مانند گردش نیترات و فسفر و روندیابی رسوبات تاثیر مستقیم دارد. بنابراین پارامترهای موثر بر چرخه بارش - رواناب در مطالعات رسوب و چرخه حرکت نیترات نیز موثر هستند و باید در شبیه سازی این چرخه‌ها نیز در نظر گرفته شوند. ولی پارامترهای خاص روندیابی رسوب و نیترات بر چرخه بارش - رواناب تاثیری ندارند. بر اساس خصوصیات هر حوضه و دقت داده‌های ورودی به مدل میزان حساسیت پارامترهای موثر بر بارش - رواناب در حوضه‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. از این رو در کالیبراسیون اتوماتیک با بسته نرم افزاری SWAT-CUP و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی SUFI2، ابتدا مدل ۵۰۰ بار اجرا گردید. سپس با



استفاده از مقادیر آماره های p-value و t-state پارامترهای با حساسیت بالا استخراج گردید و ادامه روند کالیبراسیون با این پارامترها ادامه یافت. که هر چه مقادیر مطلق t-state بیشتر و مقدار p-value کمتر باشند پارامتر مدنظر حساسیت بیشتری از سایر پارامترها خواهد داشت. تغییر مقدار اولیه پارامترها به سه صورت انجام می‌شود:

الف)  $-t$  : ضرب مقدار فعلی پارامتر در (۱+ مقدار داده شده)

ب)  $-v$  : جایگزین کردن مقادیر موجود با مقدار داده شده

ج)  $-a$  : اضافه کردن مقدار داده شده به مقدار اولیه پارامتر

در جدول ۳-۴ پارامترهای که برای تحلیل حساسیت استفاده شده‌اند به همراه دامنه تغییرات آنها، آورده شده است.

جدول ۴-۳- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل حساسیت و دامنه تغییرات آن‌ها در برنامه SWAT  
CUP

پارامتر	توضیح	حد پایین	حد بالا
r_CN2.mgt	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی متوسط	۲۰	۹۰
r_sol_BD.sol	چگالی توده خاک مرطوب در هر لایه (g/cm <sup>3</sup> )	۱	۲/۵
r_sol_AWC.sol	آب موجود در هر لایه ( mmH <sub>2</sub> O / mm soil )	۰	۱
r_sol_K.sol	هدایت هیدرولیکی خاک اشباع (mm/hr)	۰	۲۰۰
R_SLSOIL.hru	طول شیب برای جریان زیر قشری (متر)	۰	۱۵۰
v_Alpha_BF.gw	فاکتور بازگشت جریان پایه به آبراهه اصلی (روز)	۰	۱
v_gw_DELAY.gw	زمان تاخیر برای بازگشت آب زیر زمینی (روز)	۰	۵۰۰
v_REVAPMN.gw	عمق آستانه آب سفره آب زیر زمینی (mm H <sub>2</sub> O)	۰	۵۰۰
v_gw_REVAP.gw	ضریب آب زیر زمینی	۰/۰۲	۰/۲
v_SHALLST.gw	عمق اولیه آب در آکیفر کم عمق (mmH <sub>2</sub> O)	۰	۱۰۰
v_RChrg_DP.gw	ضریب نفوذ عمقی لایه پایینی	۰	۱
v_GWQMN.gw	عمق اولیه آب برگشتی در سفره آب (mm)	۰	۵۰۰
v_EPCO.hru	فاکتور تصحیح رشد پوشش گیاهی	۰	۱
v_ESCO.hru	فاکتور تصحیح تبخیر از سطح خاک	۰	۱
v_SLSUBBSN.hru	میانگین طول شیب (متر)	۱۰	۱۵۰
v_ov_N.hru	ضریب مانینگ برای دشت‌های سیلابی	۰	۰/۸
v_ch_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه (کانال) اصلی	۰	۰/۳
v_ch_K2.rte	هدایت هیدرولیکی رودخانه اصلی (mm/hr)	۰	۱۵۰
r_ch_K1.sub	هدایت هیدرولیکی رودخانه فرعی (mm/hr)	۰	۰/۶
v_LAT_TTIME.hr	زمان حرکت جریان از آبراهه فرعی (روز)	۰	۱۸۰
v_ALPHA_BNK.rt	ضریب آلفا جریان پایه جهت ذخیره (روز)	۰	۱
v_SFTMP.bsn	دمای آستانه بارش برف (درجه سانتیگراد)	-۵	۵
v_SMTMP.bsn	دمای آستانه ذوب برف (درجه سانتیگراد)	-۵	۵
v_SMFMX.bsn	فاکتور حداکثر ذوب برف در طول سال	۰	۱۰
v_SMFMN.bsn	فاکتور حداقل ذوب برف در طول سال	۰	۱۰
v_TIMP.bsn	ضریب تاخیر زمانی برای دمای توده برف	۰	۱
v_SURLAG.bsn	زمان تاخیر رواناب (روز)	۱	۲۴

طبق جدول ۴-۴ در بین پارامترهای تحلیل شده، پارامترهای CN2، sol\_K، ESCO، RCHRG\_DP، SOL\_BD، ALPHA\_BNK و SLSUBBSN در رده های اول تا هفتم حساسیت قرار گرفتند. البته وجود پارامترهای کنترل آب زیرزمینی مانند GWQMN، GW\_REVAP و REVAPMN که در رده های بعدی حساسیت قرار گرفته‌اند، برای تکمیل چرخه گردش آب و کالیبراسیون بهتر ضروری تشخیص داده شده اند. طبق تحقیقات انجام شده پارامترهای با حساسیت کمتر ولی موثر به لحاظ فیزیکی در چرخه را نیز باید در فرآیند کالیبراسیون نگه داشت، زیرا شکل نهایی هیدروگراف را بهبود می بخشد (نیرولا و همکاران، ۲۰۱۲)<sup>۱</sup>.

جدول ۴-۴ - نمونه ای از نتایج تحلیل حساسیت کلی

پارامتر	t-Stat	P-Value
1:R_CN2.mgt	-21.577224	0
15:R_SOL_K(..).sol	-17.219951	0
2:R_CN2.mgt	-13.382143	0
10:V_RCHRG_DP.gw	-11.934492	0
18:V_ESCO.hru	8.26262372	0
3:R_CN2.mgt	-6.5027959	0
12:V_ALPHA_BNK.rte	-6.4297803	0
19:R_SLSUBBSN.hru	6.42418269	0
17:R_SOL_BD(..).sol	-5.6027001	0.000000036
26:V_LAT_TTIME.hru	2.53758042	0.011482832
5:R_CN2.mgt	-1.8342367	0.067248192
16:R_SOL_AWC(..).sol	-1.7295001	0.084373409
22:V_SFTMP.bsn	1.65989618	0.097599525
20:R_OV_N.hru	1.64729555	0.100162847
25:R_SLSOIL.hru	1.60620782	0.108897021
13:V_CH_N2.rte	1.31598461	0.188817974
7:V_GW_REVAP.gw	1.04155336	0.298151998
8:A_GWQMN.gw	1.00855455	0.313705056
6:V_GW_DELAY.gw	-0.9587461	0.338177517
9:A_REVAPMN.gw	-0.7276747	0.467173547
23:V_TIMP.bsn	-0.6690322	0.503802024
4:R_CN2.mgt	0.60087589	0.548211083
27:R_CH_K1.sub	-0.5713866	0.568009554
21:V_SMTMP.bsn	0.38959992	0.697008135
24:V_SURLAG.bsn	0.36384163	0.716139192
14:V_CH_K2.rte	-0.3390441	0.734727276
11:V_ALPHA_BF.gw	0.15255109	0.878817485

<sup>1</sup> - Niraula et,al. 2012

همان طور که انتظار می‌رفت CN2 حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. این پارامتر تابعی از نفوذ پذیری خاک، پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی می‌باشد. در مدل‌های جدیدتر SWAT دو روش برای محاسبه CN روزانه در نظر گرفته شده است، روش اول محاسبه به عنوان تابعی از رطوبت خاک و روش دوم به عنوان تابعی از تبخیر و تعرق گیاهی. محاسبه به طریق روش دوم به این دلیل اضافه شده است که روش رطوبت خاک در خاک‌های کم عمق رواناب بسیار زیادی پیش‌بینی می‌کند. با محاسبه CN روزانه به عنوان تابعی از تبخیر و تعرق گیاهان، مقادیر رواناب پیش‌بینی شده بستگی کمتری به لایه‌های خاک داشته و بیشتر به آب و هوای پیشین بستگی دارد (آرنولد و همکاران، ۲۰۱۲)<sup>۱</sup>. در تحقیق حاضر با توجه به شرایط منطقه و عدم وجود نقشه خاک با دقت بالا از روش دوم استفاده شده است. با افزایش مقدار CN2 مقدار رواناب زیاد می‌شود که باعث کاهش نفوذ آب به لایه‌های خاک و کاهش تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی می‌گردد.

پارامترهای مرتبط با خاک نظیر SOL\_k و SOL\_BD از جمله پارامترهای حساس در این تحقیق می‌باشند، که یکی از دلایل آن می‌تواند نبود اطلاعات دقیق از خاک منطقه و تفاوت مشخصات خاک‌های ورودی با مقدار واقعی باشد. که مدل با تغییرات زیاد در مقدار آنها سعی در اصلاح این پارامترها جهت شبیه‌سازی بهتر رواناب خروجی از حوضه کرده است. ESCO (فاکتور جبران‌کننده تبخیر از خاک) در بالانس آب بین منابع سطحی و زیرسطحی موثر است، به طوری که با افزایش این پارامتر تا ۱ میزان تبخیر و تعرق از سطح خاک کاهش می‌یابد. و آب بیشتری به لایه‌های پایینی نفوذ می‌کند و در نتیجه رواناب سطحی کاهش می‌یابد.

Sol\_AWC (ظرفیت رطوبت قابل استفاده در لایه خاک) که آب در دسترس گیاه نیز نامیده می‌شود، این پارامتر فرایند هم تبخیر و تعرق خاک و هم نفوذ عمقی را کنترل می‌کند (بوشه، ۲۰۱۲)<sup>۲</sup>. این پارامتر

---

<sup>1</sup> -Arnold et al., 2012

<sup>2</sup> - Busche, 2012

وقتی زیاد شود، رواناب سطحی کاهش یافته و آب بیشتری به لایه‌های پایین تر حرکت می‌کند. CH\_N2 (ضریب مانینگ رودخانه اصلی) عامل تاثیرگذار مستقیم در محاسبه زمان تمرکز حوضه است. همچنین CH\_K2 (هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه اصلی) در مناطق با انشعابات و رودخانه‌های فرعی فصلی حساسیت بالایی نشان داده است (نیرولا و همکاران)<sup>۱</sup>. پارامترهای موثر آب زیرزمینی شامل GWQMN، REVAPMN، GW\_REVAP، GW\_DELAY و ALPHA\_BF می‌باشند. که در شبیه سازی‌های با آب پایه زیاد، با افزایش پارامترهای GWQMN (عمق آستانه آب در سفره کم عمق که نیاز است تا آب برگشتی اتفاق بیفتد) و GW\_REVAP (ضریب حرکت آب از سفره آب کم عمق به لایه های غیراشباع) و کاهش پارامتر REVAPMN (حداقل عمق سطح ایستابی در سفره کم عمق برای صعود به بالا از طریق موینگی یا نفوذ عمقی و تغذیه سفره عمیق) میزان آب برگشتی به جریان رودخانه کاهش می‌یابد (روح اله نژاد، ۲۰۱۴)<sup>۲</sup>.

#### ۴-۵- واسنجی (کالیبراسیون) مدل

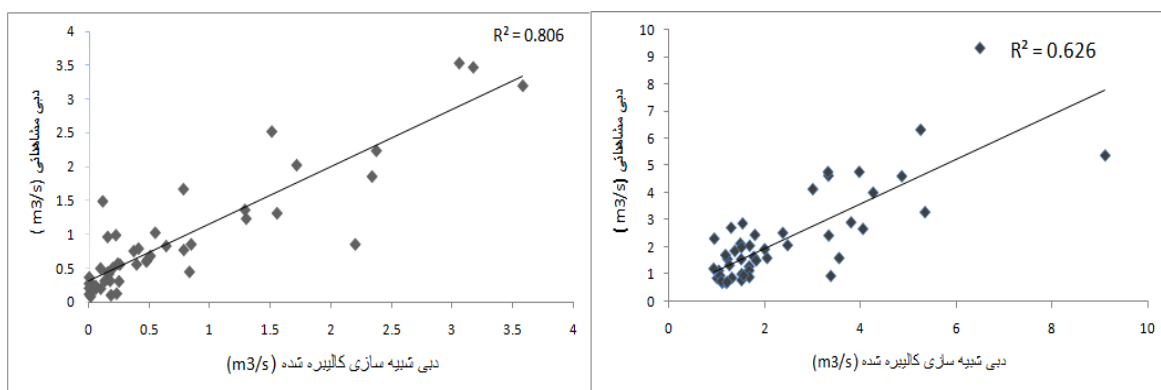
برای اجرای کالیبراسیون مدل از برنامه SUFI2 از بسته نرم افزاری SWAT CUP استفاده شده است. فرآیند کالیبراسیون برای دبی خروجی از ایستگاه های تنگراه و گالیکش در سال‌های ۱۹۹۷ الی ۲۰۰۰ میلادی انجام گرفت. دو سال ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ نیز به عنوان آماده سازی اولیه مدل<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است. بعد از اتمام فرایند کالیبراسیون ضریب همبستگی برای دبی خروجی از ایستگاه تنگراه ۰/۸۱ و ایستگاه گالیکش ۰/۶۳ بدست آمد.

<sup>1</sup> - niraula, et al. 2012

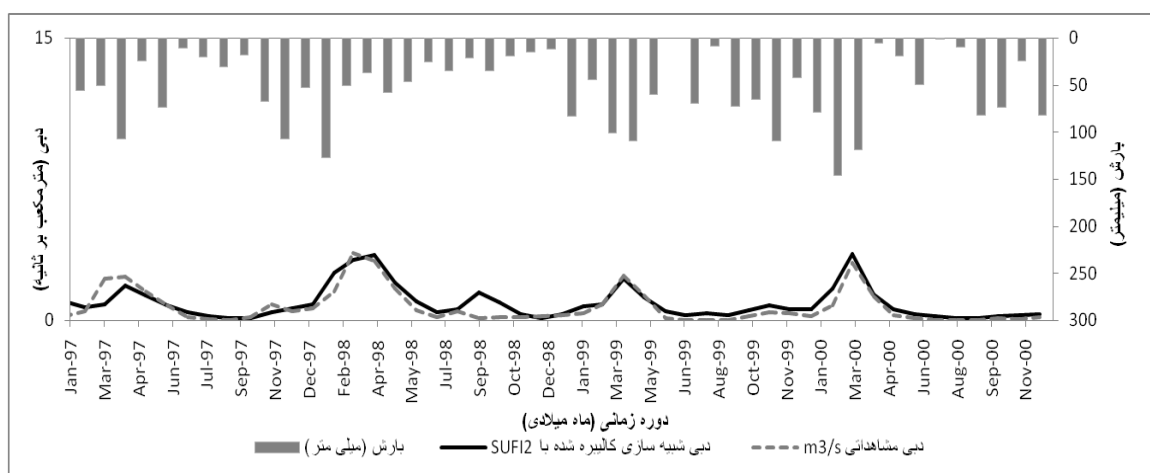
<sup>2</sup> - Rouholahnejad, et al. 2014

<sup>3</sup> -Warming up

همچنین ارزیابی مدل با تابع هدف نش ساتکیف صورت گرفت که برای دبی خروجی تنگراه ۰/۷۷ و برای گالیکش ۰/۵۷ بدست آمد. براساس پژوهش های پیشین ضریب نش ساتکیف بیشتر از ۰/۵ برای شبیه سازی های هیدرولوژیکی نتیجه قابل قبولی می باشد (گاسمن و همکاران، ۲۰۰۷)<sup>۱</sup>. نتایج به ترتیب در شکل های ۴-۴ الی ۴-۸ آورده شده است.

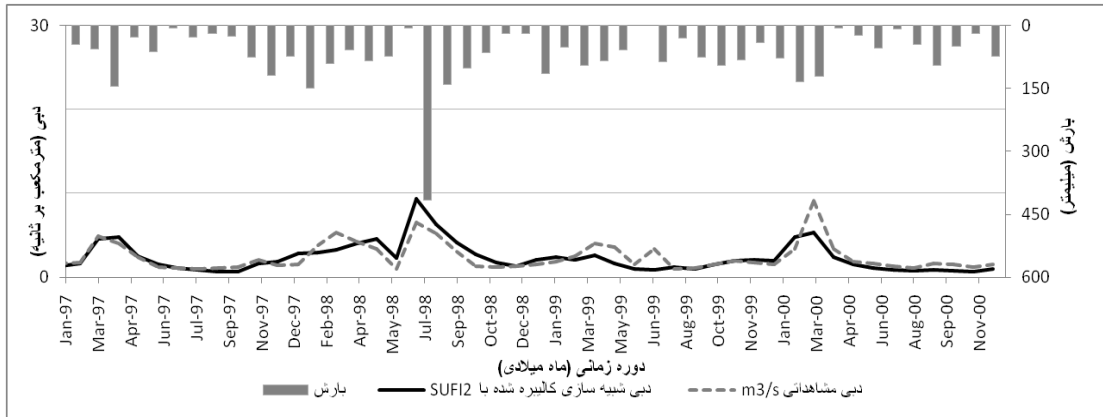


شکل ۴-۴ - همبستگی دبی مشاهداتی و شبیه سازی کالیبره شده (سمت راست - تنگراه) و (سمت چپ - گالیکش)

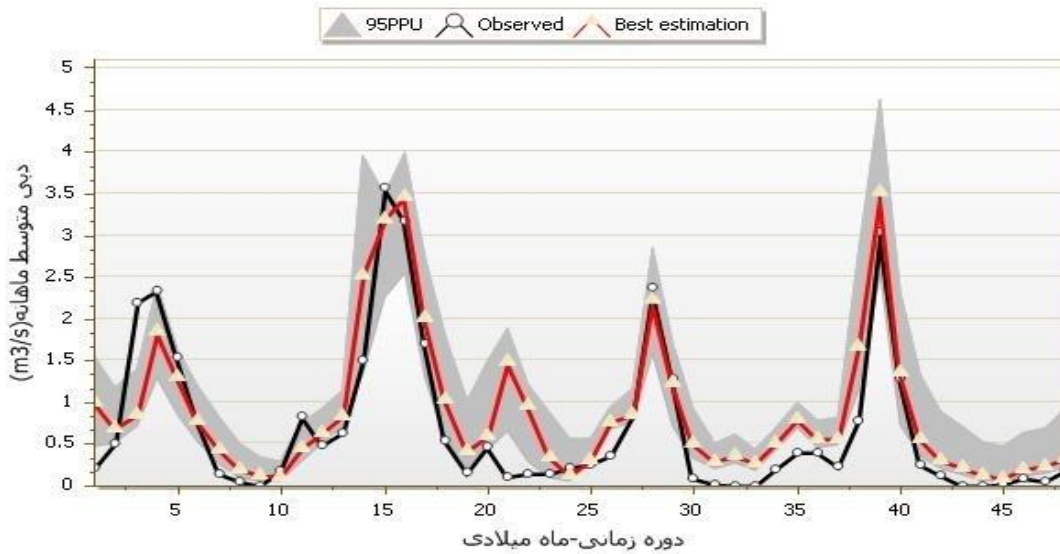


شکل ۴-۵ - مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی کالیبره شده با مقادیر دبی مشاهداتی در مقابل بارش مرتبط ایستگاه تنگراه

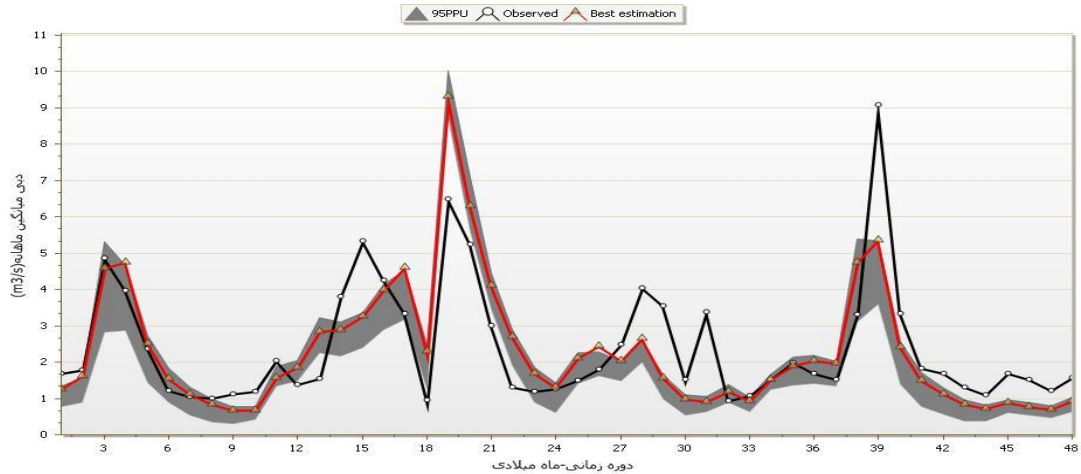
<sup>1</sup> - Gassman et al., 2007



شکل ۴-۶- مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی کالیبره شده با مقادیر دبی مشاهداتی در مقابل بارش مرتبط ایستگاه گالیکش



شکل ۴-۷- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه تنگراه به همراه باند ۹۵ درصد عدم قطعیت



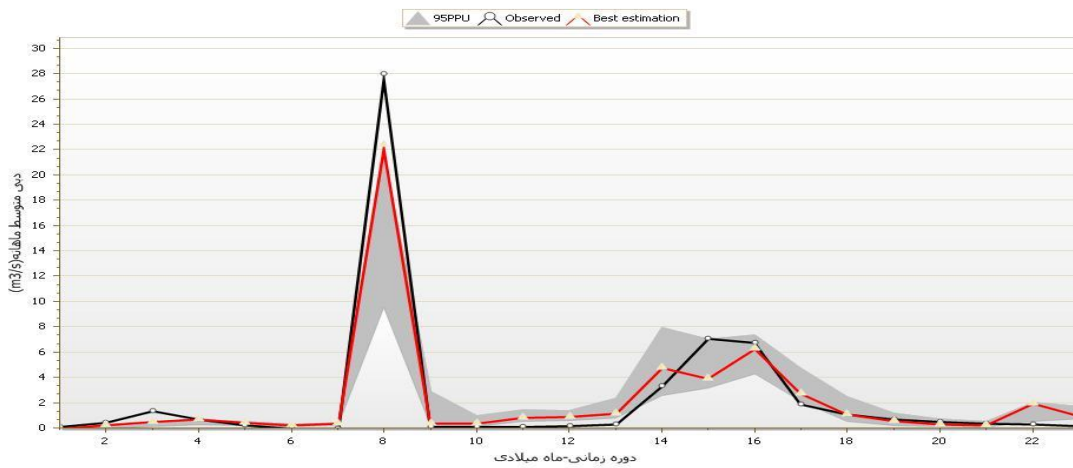
شکل ۴-۸- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای خروجی ایستگاه گالیکش به همراه باند ۹۵ درصد عدم قطعیت

#### ۴-۶- اعتبار سنجی مدل

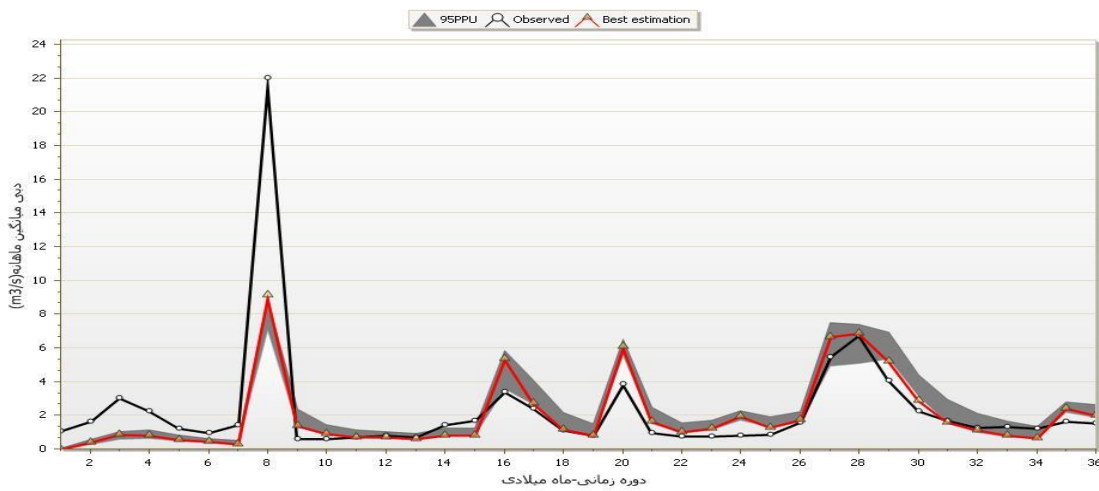
بعد از اتمام فرآیند کالیبراسیون و تطبیق حداکثری مدل با شرایط منطقه جهت پیش بینی بهتر دبی خروجی از حوضه، بایست اعتبار مدل با شبیه سازی یک دوره زمانی دیگر غیر از دور کالیبراسیون سنجیده شود. در این تحقیق، اعتبار سنجی مدل با استفاده از داده‌های بارش و دمای سال های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۳ انجام پذیرفته است. نتایج تابع هدف نش - ساتکیف برای ایستگاه های تنگراه و گالیکش به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۵۷ بدست آمد. که نشان از تطبیق مدل در دوره زمانی دیگری غیر از دوره کالیبراسیون می‌باشد. حال با اطمینان از عدم محدودیت مدل کایبره شده به دوره زمانی خاص، می توان از آن در بررسی شرایط اقلیمی آینده بهره گرفت.

نتایج شبیه سازی برای دوره اعتبارسنجی ایستگاه‌های تنگراه و گالیکش در شکل های ۴-۹ و ۴-۱۰ نشان داده شده است.





شکل ۴-۹- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه تنگراه (۱۳ ماه آمار دبی وجود ندارد)



شکل ۴-۱۰- نتیجه کالیبراسیون با مدل SUFI2 برای دبی خروجی ایستگاه گالیکش

## ۴-۷- ارزیابی آماری مدل در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی

در بسته نرم افزاری SWAT CUP، دقت شبیه سازی توسط روابط آماری مختلف از جنبه‌های مختلفی بررسی می‌گردد. تابع هدف ارزیابی دبی شبیه سازی در مقابل دبی مشاهداتی نش- ساتکیف (NS) در نظر گرفته شد که برای تنگراه در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۷ بدست آمد. و برای ایستگاه گالیکش نش - ساتکیف مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۸ بدست آمد. کارایی مدل از جنبه های دیگر با استفاده از ضرایب  $p$ -factor،  $\alpha$ -factor،  $R^2$ ،  $BR^2$  نیز مورد بررسی قرار گرفت.  $p$ -factor عبارت است از درصدی از داده‌های مشاهداتی که داخل باند تخمین عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته اند. که هرچه مقدار این ضریب به یک نزدیکتر باشد شبیه سازی با دقت بیشتری انجام گرفته است. مقدار این شاخص برای حوضه تنگراه در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۱ و برای حوضه گالیکش به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۳۲ بدست آمد. یکی از دلایل کم بودن مقادیر  $p$ -factor این است که جریان پایه توسط مدل بیشتر از مقادیر واقعی پیش بینی شده است. کمبود اطلاعات در مورد برداشت آب از رودخانه ها برای مصارف کشاورزی یکی از دلایل ناتوانی مدل در پیش بینی بهتر جریان پایه می‌باشد. (سلمانی، ۱۳۹۰).

ضریب  $r$ -factor عبارت است از متوسط ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵٪ تقسیم بر انحراف معیار داده های اندازه گیری شده. هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد شبیه سازی بهتر صورت پذیرفته است. مقدار این ضریب برای ایستگاه تنگراه و گالیکش و برای دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

$bR^2$  (حاصل ضرب  $R^2$  در ضریب رگرسیون خطی است) به عنوان پارامتر اصلاحی در جهت  $R^2$  جهت سنجش همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی به کار می‌رود.  $bR^2$  بیشتر از ۰/۴ در کارهای بارش-رواناب نتیجه قابل قبولی محسوب می‌شود (عباسپور، ۲۰۰۷)<sup>۱</sup>.

جدول ۴-۵ ضرایب آماری ارزیابی مدل در شبیه‌سازی دبی

حوضه گالیکش		حوضه تنگراه		شاخص آماری
کالیبراسیون	اعتبارسنجی	کالیبراسیون	اعتبارسنجی	
۰/۳۹	۰/۵	۰/۶۱	۰/۷۳	p-factor
۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۵۱	۱/۹	r-factor
۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۹۷	۰/۸۱	$R^2$
۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۹۳	۰/۷۷	NS
۰/۳	۰/۵۲	۰/۷۶	۰/۶۸	$bR^2$

#### ۴-۸- شبیه‌سازی برای داده‌های اقلیمی آینده

با توجه به نتایج کالیبراسیون (صحت سنجی) و اعتبارسنجی مدل در قسمت‌های پیشین، در این مرحله مدل آماده استفاده جهت شبیه‌سازی دبی رودخانه در دوره‌های زمانی آینده می‌باشد. در این مرحله با استفاده از مدل SWAT کالیبره شده و داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده سناریوهای A2، B1 و A1B شامل بارش و دما در دوره زمانی نزدیک (۲۰۴۴ - ۲۰۴۶) و دور (۲۰۹۹ - ۲۰۸۱)، دبی جریان در ایستگاه‌های تنگراه و گالیکش پیش‌بینی شده است.

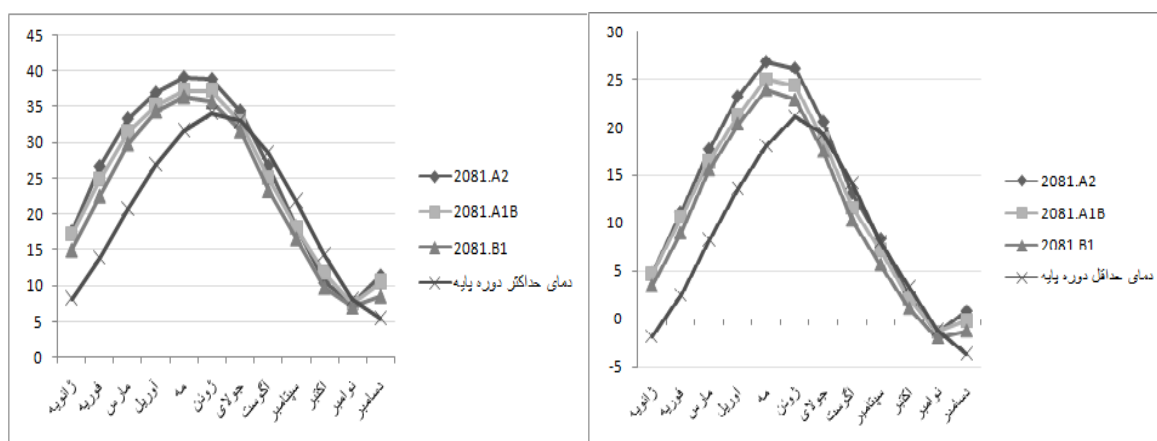
ابتدا میزان و نحوه تغییرات بارش و دما به عنوان ورودی‌های اصلی مدل SWAT تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دو دوره زمانی آینده دور و نزدیک بررسی می‌شوند. میانگین بلندمدت بارش ماهانه و دما دوره نزدیک (۲۰۴۴-۲۰۴۶) و دوره دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) تحت سناریوهای A1، B2 و A1B محاسبه

<sup>1</sup> - Abbaspour, 2007

گردید و با میانگین دوره پایه سناریوها (۱۹۶۱-۱۹۹۹) مقایسه گردید. داده‌های ریزمقیاس بارش و دما از پروژه مشترک بانک جهانی<sup>۱</sup>، مرکز اقلیمی دانشگاه سنتا کلارا<sup>۲</sup> و مرکز حفاظت از طبیعت<sup>۳</sup> برای ریزمقیاس نمایی روزانه مدل های GCM برای سراسر جهان گرفته شده است. روش استفاده شده برای ریزمقیاس نمایی مدل های GCM روش BCSD<sup>۴</sup> است.

#### ۴-۸-۱- تغییرات دما

در این قسمت نحوه تغییرات دمای حداقل و حداکثر در دوره نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و دوره دور (۲۰۹۹-۲۰۸۱) تحت سناریوهای A1، B2، A1B و نسبت به دوره پایه بررسی می‌شود. در شکل های ۴-۱۱ الی ۴-۱۵ نتیجه این مقایسه ها نشان داده شده‌اند.



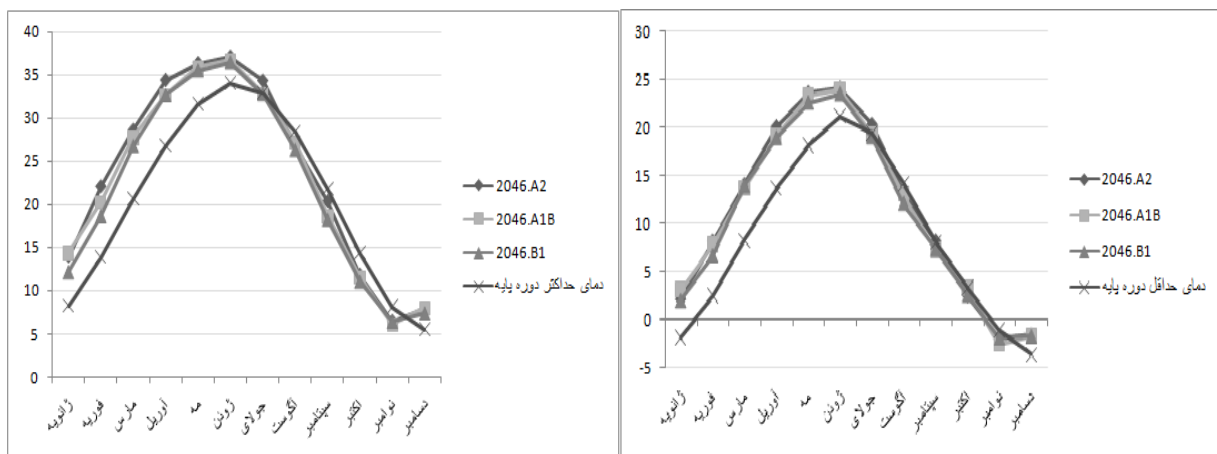
شکل ۴-۱۱- میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتیگراد) در دوره ۲۰۹۹ - ۲۰۸۱ و دوره پایه

<sup>1</sup> - world bank

<sup>2</sup> - santa clara university (climate central)

<sup>3</sup> - The Nature Conservancy

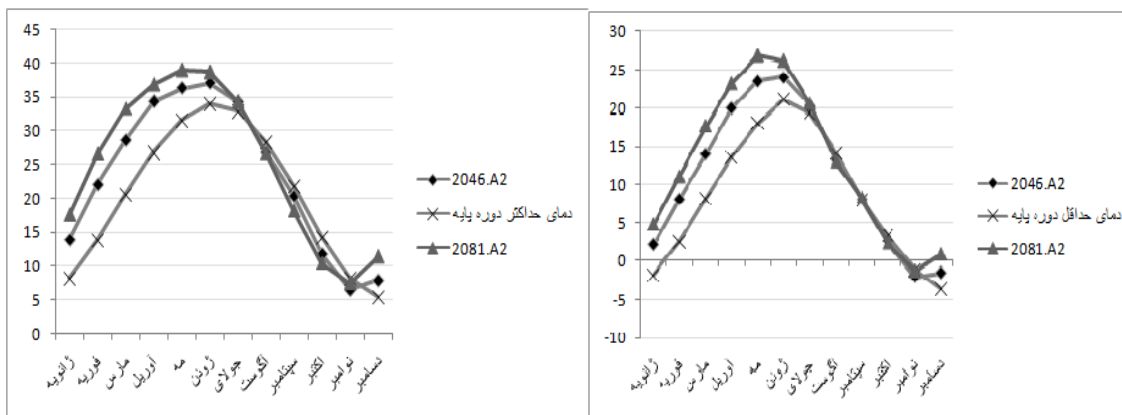
<sup>4</sup> - Bias-Corrected Spatial Disaggregation method



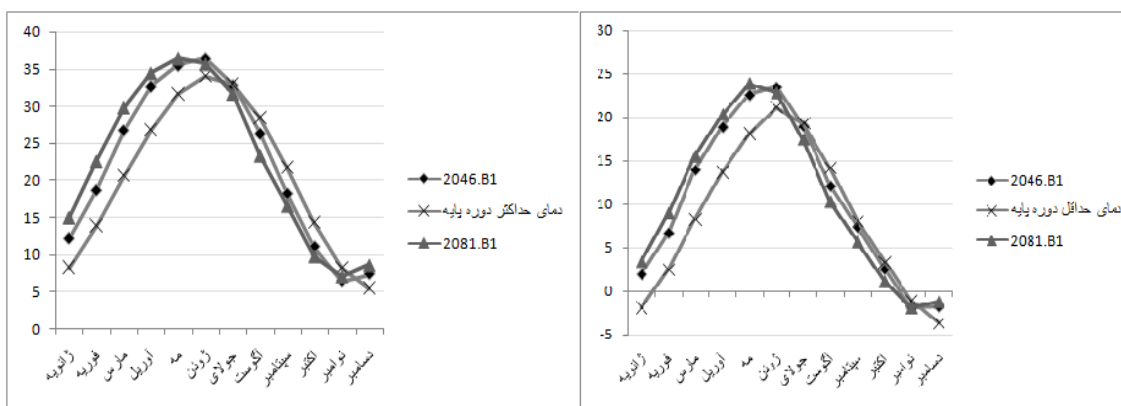
شکل ۴-۱۲- میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل (درجه سانتیگراد) در دوره ۲۰۴۶ - ۲۰۶۴ و دوره پایه

با توجه به نمودارهای دمای حداکثر و حداقل می توان دریافت که، تحت هر سه سناریو و در هر دو دوره زمانی تغییرات افزایشی دمای حداقل و حداکثر در فصل‌های زمستان و بهار، بیشتر از تغییرات کاهشی دمای فصل‌های تابستان و پاییز است. دما در فصل زمستان در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۴، تا ۵ درجه سانتیگراد و در دوره ۲۰۸۱-۲۰۹۹، ۸ تا ۱۰ درجه افزایش را نشان می‌دهد. پس باید انتظار زمستان‌های گرم‌تری از زمستان‌های دوره حاضر داشته باشیم. این در حالی است که دمای تابستان و پاییز تغییرات به مراتب کمتری را نشان می‌دهد. به طوریکه دما در نیمه دوم تابستان و پاییز، ۱ تا ۳ درجه کاهش را نشان می‌دهد.

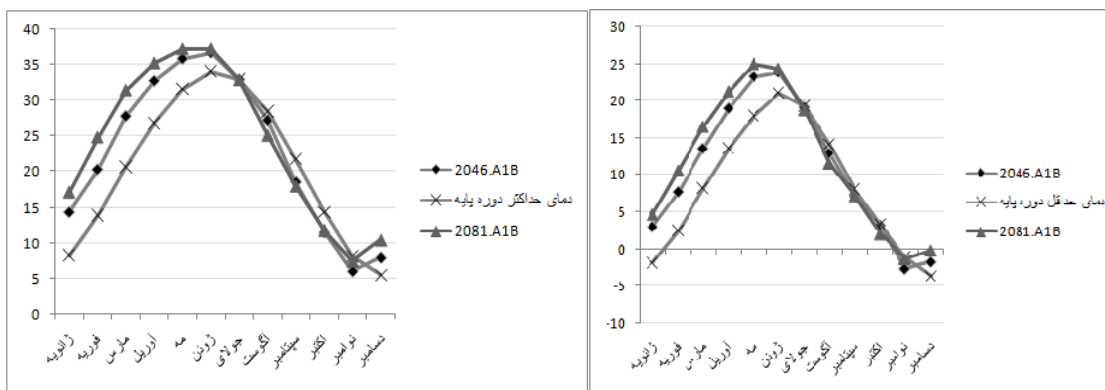
همچنین همانطور که انتظار می‌رفت شدت تغییرات برای سناریو A2 (حالت بدبینانه تغییرات) بیشتر از سناریوهای B1 (حالت خوش بینانه تغییرات) و سناریو A1B (حالت حد وسط تغییرات) است.



شکل ۴-۱۳- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹) تحت سناریوی B1، (درجه سانتیگراد)



شکل ۴-۱۴- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹) تحت سناریوی A2، (درجه سانتیگراد)

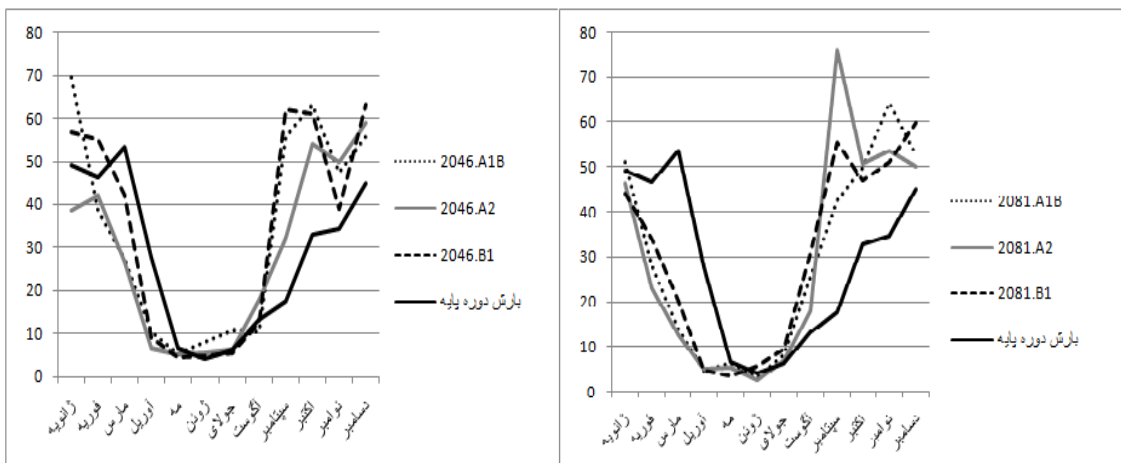


شکل ۴-۱۵- میانگین ماهانه دمای حداقل (شکل سمت راست) و حداکثر (شکل سمت چپ) در دو دوره زمانی (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹) تحت سناریوی A1B، (درجه سانتیگراد)

شکل ۴-۱۳ تاثیر تغییرات اقلیمی بر دمای حداقل و حداکثر تحت سناریوی خوش بینانه B1 در دوره زمانی را نشان می‌دهد. تغییرات در دوره زمانی دورتر (۲۰۹۹-۲۰۸۱) شدت بیشتری نسبت دوره زمانی نزدیک (۲۰۶۴-۲۰۴۶) دارد. این الگو برای سناریوهای A2 و A1B در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نیز دیده می‌شود.

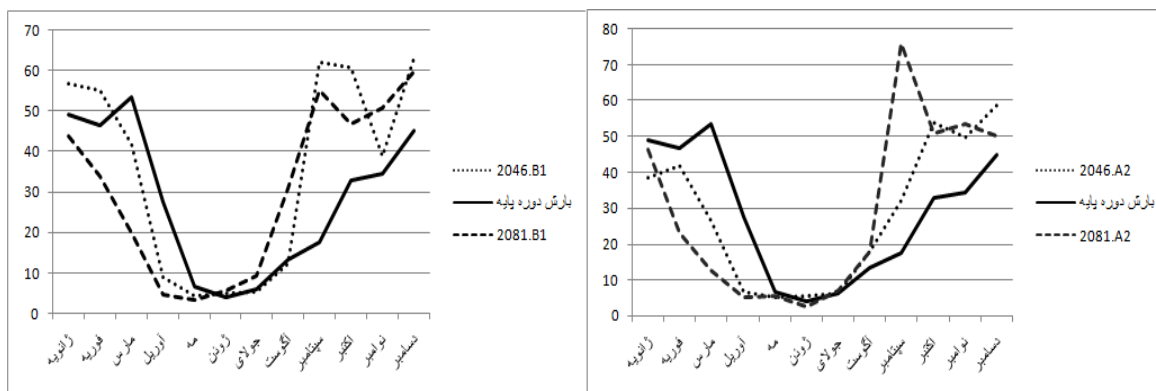
#### ۴-۸-۲- تغییرات بارش

در ادامه تغییرات الگو و میزان بارش متوسط حوضه‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق شکل ۴-۱۶، الگوی تغییرات بارش روندی مانند تغییرات دما را دنبال می‌کند. بارش در فصل‌های پرباران (زمستان و نیمه اول بهار) کاهش می‌یابد. تغییرات ماه‌های کم باران (نیمه دوم بهار و نیمه اول تابستان) بسیار ناچیز است. ولی در نیمه دوم تابستان و پاییز میانگین بارش ماهانه افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که شدت تغییرات بارش از ماه‌های کم باران به پرباران (نیمه تابستان)، شدیدتر از دوره پایه می‌باشد. این امر چندین بار در دهه ۱۳۸۰ شمسی، با سیل‌های هفته سوم مرداد ۱۳۸۰، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴ جنگل گلستان که باعث خسارات جانی و مالی فراوانی شده، به وقوع پیوسته است. مشاهده ادامه این روند در آینده می‌تواند اعلام هشدار برای وقوع سیل‌های تابستانی دیگری باشد. همچنین در دوره دور (۲۰۹۹-۲۰۸۱) شدت تغییرات بارش از ماه‌های خشک به تر بیشتر از دوره نزدیک (۲۰۶۴-۲۰۴۶) است. در مقایسه بین سناریوهای تغییر اقلیمی می‌توان دریافت که سناریو بدبینانه A2 در دوره نزدیک با کاهش بارش در تمام فصول سال اثر خود را نشان می‌دهد. و در دوره دور به صورت افزایش شدت تغییرات بین ماه‌های خشک و تر بروز پیدا می‌کند. میزان تغییرات بارش در سناریوهای B1 و A1B نسبت به دوره پایه نزدیک به هم می‌باشند.



شکل ۴-۱۶- میانگین ماهانه بارش (میلی متر) دوره های (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹)

از مقایسه الگوی میانگین بارش ماهانه در دوره‌های نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) در شکل ۴-۱۷ می‌توان نتیجه گرفت که کاهش بارش فصول تر در دوره (۲۰۸۱-۲۰۹۹) بیشتر از دوره نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۶۴) است که نشان از تشدید بحران اقلیمی در صورت ادامه روند افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین است. نهایتاً نتایج تغییرات بارش نسبت به دوره پایه بصورت درصد تغییرات در جدول ۴-۶ آورده شده است.



شکل ۴-۱۷- میانگین بارش (میلی متر) ماهانه سناریوهای A2 (سمت چپ) و B1 (سمت چپ)



جدول ۴-۶ تغییرات نسبی میانگین ماهانه بارش

ماه میلادی	درصد تغییرات بارش					
	۲۰۴۶.A۱B	۲۰۴۶.A۲	۲۰۴۶.B۱	۲۰۸۱.A۱B	۲۰۸۱.A۲	۲۰۸۱.B۱
ژانویه	۴۱/۷	-۲۱/۵	۱۵/۸	۴/۳	-۶	-۱۰/۷
فوریه	-۱۷/۲	-۹/۵	۱۸/۷	-۴۰	-۵۰/۴	-۲۷
مارس	-۴۹/۴	-۵۰/۵	-۲۱/۵	-۷۴/۱	-۷۶/۴	-۶۲/۷
آوریل	-۶۲/۶	-۷۵/۸	-۶۷/۲	-۸۳/۷	-۸۱/۶	-۸۳/۴
می	-۲۲/۸	-۱۹/۱	-۳۲	-۷/۲	-۱۵/۵	-۴۸
ژوئن	۱۰۰/۴	۳۹/۲	۲۳/۶	-۲۴/۴	-۳۵/۵	۴۱/۲
جولای	۷۶/۹	۶/۱	-۹	۳۰/۸	۱۵/۸	۵۵/۲
اگوست	-۲۲/۱	۳۵/۶	-۶/۸	۹۲/۸	۳۵/۸	۱۳۱/۸
سپتامبر	۲۱۶/۷	۸۳/۲	۲۵۴	۱۴۱/۸	۳۳۱/۴	۲۱۴/۵
اکتبر	۹۲/۶	۶۴/۵	۸۵/۹	۵۱/۸	۵۴/۵	۴۲/۵
نوامبر	۳۷/۳	۴۴/۹	۱۲/۹	۸۷/۲	۵۵/۶	۴۸/۲
دسامبر	۲۳/۷	۳۰/۷	۴۰/۴	۱۷/۳	۱۱	۳۲/۹

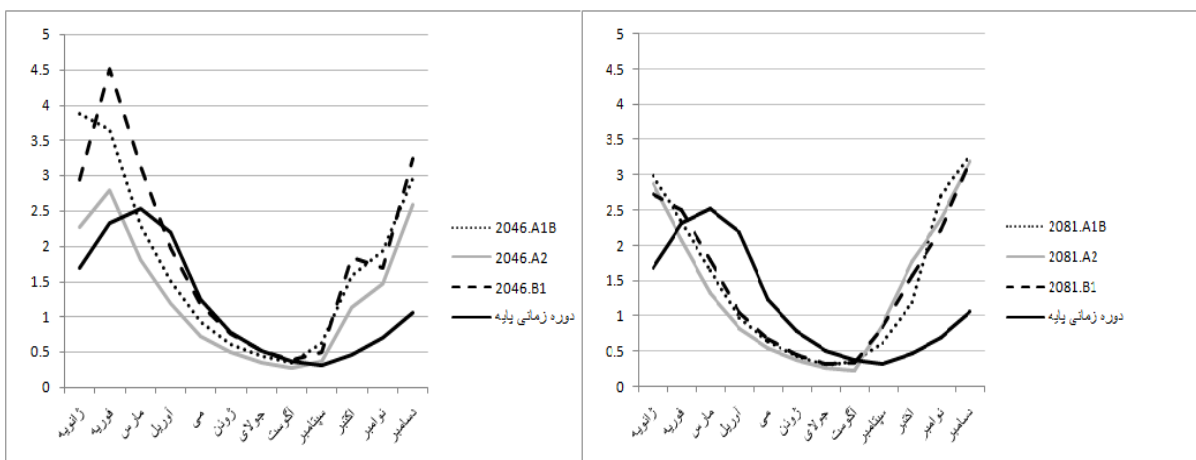
#### ۴-۸-۳- دبی شبیه سازی برای داده‌های اقلیمی آینده

پس از بررسی تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای تغییر اقلیم، این داده‌ها را به عنوان ورودی به مدل کالیبره شده وارد می‌کنیم. و با محدوده پارامترهای نهایی کالیبراسیون مدل SUFI2 را یک بار به تعداد اجرای مدل آخرین مرحله کالیبراسیون اجرا می‌کنیم. خروجی مدل باند محدوده ۹۵ درصد تغییرات دبی خروجی از خواهد بود. در این تحقیق میانگین حد بالا و حد پایین باند ۹۵٪ به عنوان ملاک مقایسه در نظر گرفته شده است.

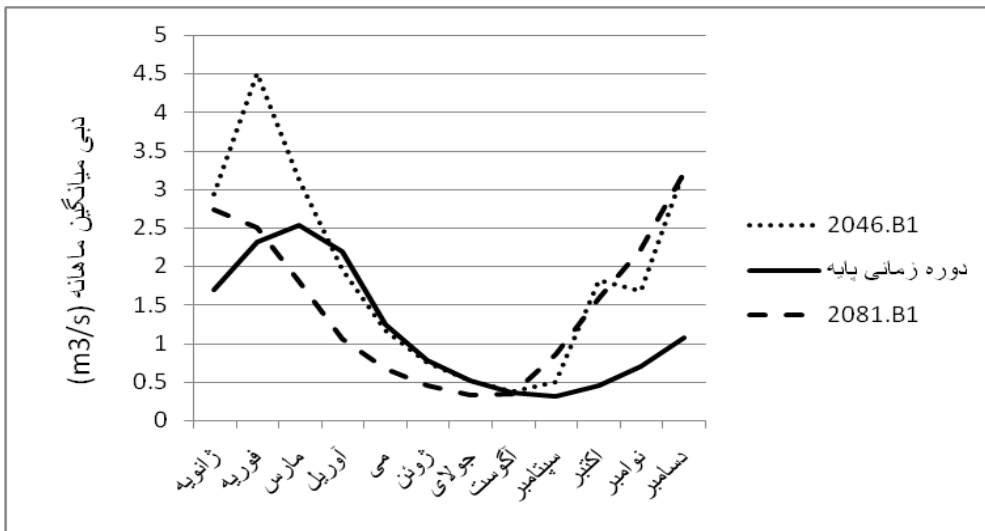
با توجه به شکل ۴-۱۸ و همچنین شکل‌های ۴-۱۹ الی ۴-۲۱، و با بررسی‌های انجام شده می‌توان دریافت رژیم جریان خروجی ماهانه از ایستگاه گالیکش در طول سال تغییر پیدا خواهد کرد. بدین صورت که در دوره نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۶۴) دبی پیک از یک ماه زودتر به وقوع می‌پیوندد و از ماه مارس (نیمه اسفند تا نیمه فروردین) به ماه فوریه (نیمه بهمن تا نیمه اسفند) انتقال می‌یابد. همچنین اندازه دبی پیک نیز بین

۰/۳ تا ۲ مترمکعب بر ثانیه برای سناریوهای مختلف، افزایش می‌یابد. در این دوره دبی جریان در ماه‌های خشک سال تغییر محسوسی پیدا نکرده است. دبی جریان بعد از ماه‌های خشک، طی ماه‌های فصل پاییز تا ۳ برابر افزایش می‌یابد. و به طور کلی دبی میانگین سالانه خروجی از ایستگاه گالیکش برای سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه، ۰/۴ تا ۰/۷ مترمکعب در ثانیه افزایش می‌یابد.

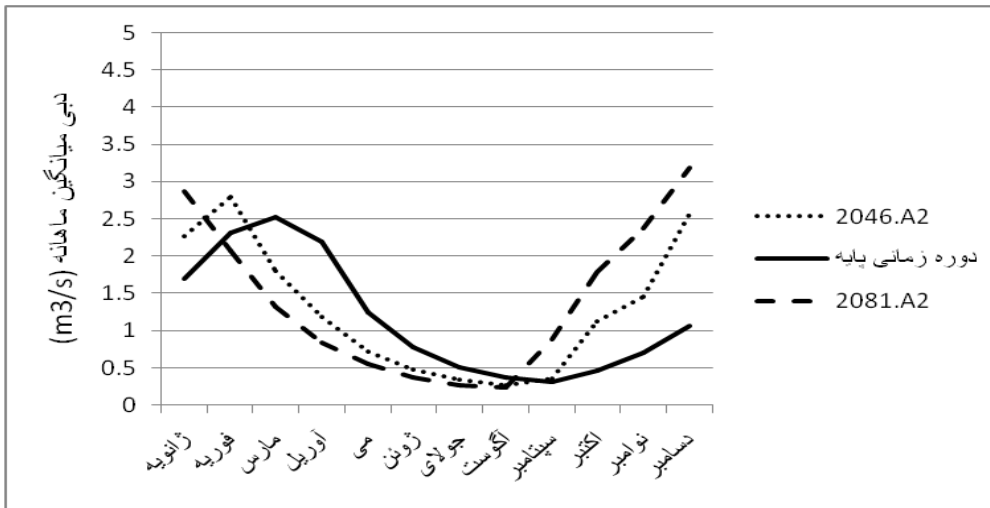
در دوره دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) دبی پیک ۲ ماه زودتر ایجاد می‌گردد و از ماه مارس به ژانویه منتقل می‌گردد. اندازه دبی پیک نیز افزایش می‌یابد ولی مقدار افزایش آن کمتر از دوره (۲۰۴۶-۲۰۶۴) است. میانگین دبی سالانه به مقدار ۰/۲ تا ۰/۳ افزایش می‌یابد. نکته مهم در اینجا جابجایی الگوی دبی و تغییر ماه‌های پر آب و کم آب است به طوری که هیدروگراف میانگین ماهانه دو ماه به عقب شیفت پیدا می‌کند.



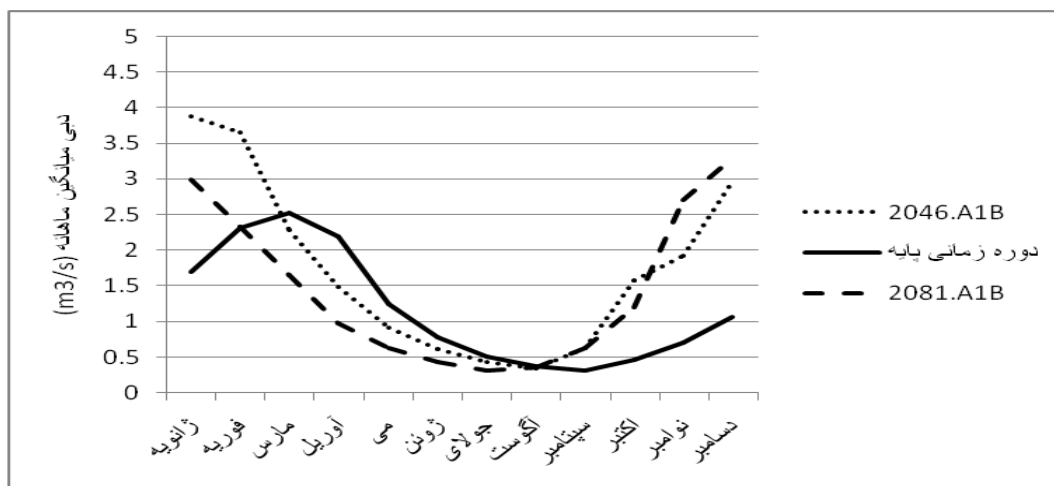
شکل ۴-۱۸ - میانگین دبی ماهانه خروجی (مترمکعب بر ثانیه) از ایستگاه گالیکش در دوره (۲۰۴۶-۲۰۶۴) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹)



شکل ۴-۱۹- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو B1



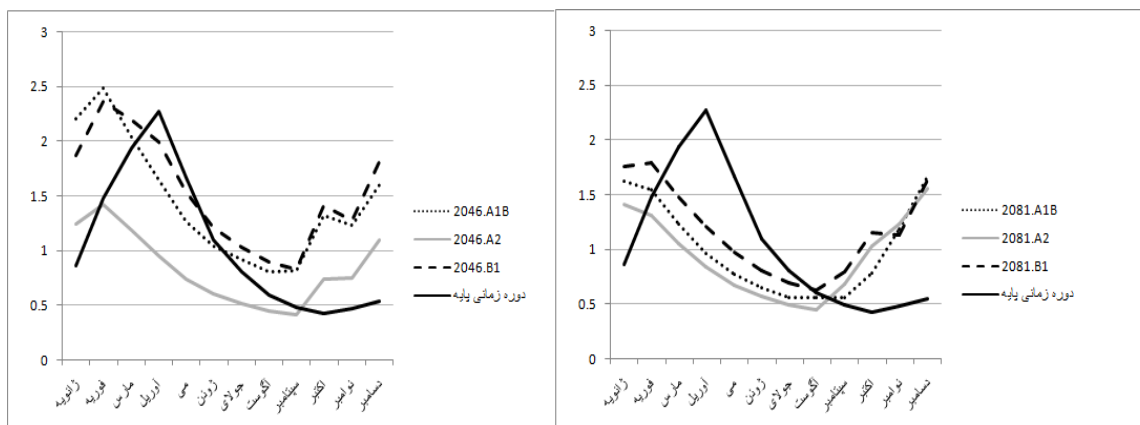
شکل ۴-۲۰- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A2



شکل ۴-۲۱- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه گالیکش در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A1B

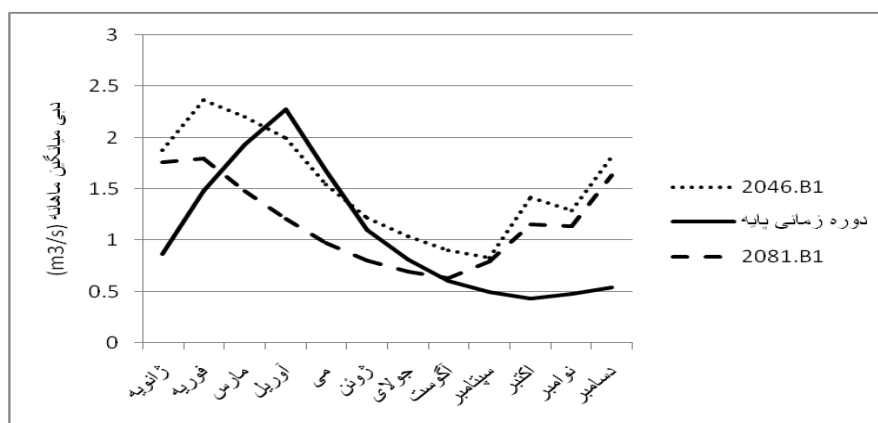
طبق شکل ۴-۲۲ و محاسبات صورت گرفته، دبی متوسط سالانه ایستگاه تنگراه در دوره نزدیک (۲۰۶۴-۲۰۴۶) برای سناریوهای خوش بینانه و متوسط B2 و A1B به طور میانگین ۰/۵ و ۰/۴ مترمکعب در ثانیه افزایش می یابد در حالی که برای سناریو بدبینانه A2، ۰/۳ مترمکعب در ثانیه کاهش می یابد. دبی پیک جریان دو ماه زودتر روی می دهد و از ماه آوریل (نیمه فروردین تا نیمه اردیبهشت) به ماه فوریه (نیمه بهمن تا نیمه اسفند) انتقال می یابد. در سناریوهای B2 و A1B دبی جریان در ماه های کم آب ۰/۵ تا ۱ مترمکعب در ثانیه افزایش می یابد.

برای دوره زمانی دور (۲۰۹۹-۲۰۸۱) میانگین دبی های شبیه سازی شده برای سناریوهای سه گانه نزدیک به میانگین دوره پایه می باشد. دبی پیک دو ماه زودتر به وقوع می پیوندد و همچنین اندازه دبی پیک ۰/۵ تا ۰/۸ مترمکعب در ثانیه کاهش می یابد.

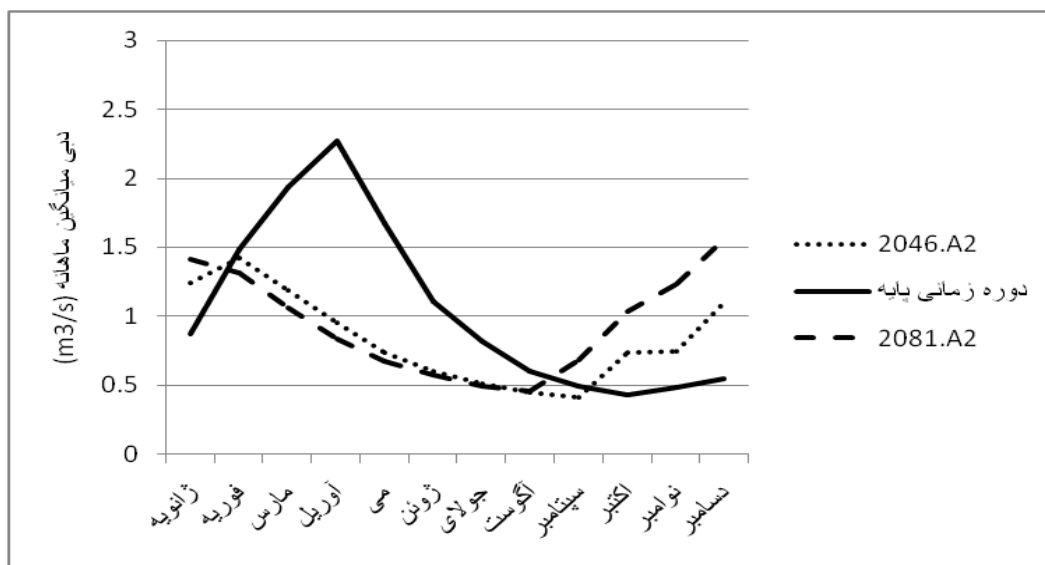


شکل ۴-۲۲- میانگین دبی ماهانه خروجی (مترمکعب بر ثانیه) از ایستگاه تنگراه در دوره (۲۰۶۴-۲۰۴۶) و (۲۰۸۱-۲۰۹۹)

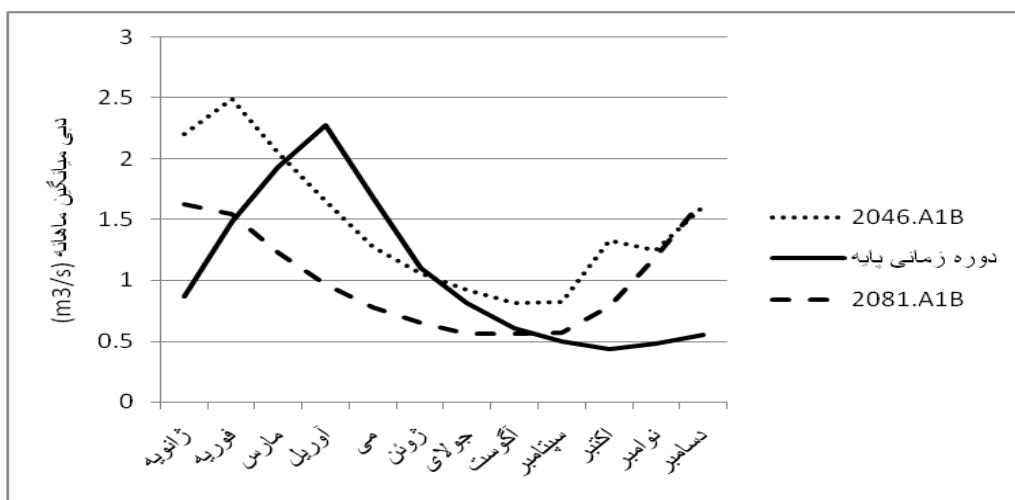
طبق شکل‌های ۴-۲۳ الی ۴-۲۵ می‌توان دریافت که در ایستگاه تنگراه، کاهش دبی ماه‌های پر آب (اواخر فصل زمستان و فصل بهار) در دوره آینده دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) نسبت به آینده نزدیک (۲۰۶۴-۲۰۴۶) در هر سه سناریو، بیشتر است. در عین حال میزان افزایش دبی ماه‌های کم آب در سناریوی A2 برخلاف سناریوهای B1 و A1B، در دوره آینده دور (۲۰۸۱-۲۰۹۹) بیشتر از دوره (۲۰۶۴-۲۰۴۶) می‌باشد.



شکل ۴-۲۳- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو B1



شکل ۴-۲۴- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A2



شکل ۴-۲۵- مقایسه دبی میانگین ماهانه ایستگاه تنگراه در دوره دور و نزدیک آینده تحت سناریو A1B

نهایتاً تغییرات نسبی میانگین دبی خروجی از ایستگاه های تنگراه و گالیکش نسبت به دوره پایه در ماه های مختلف سال در جدول ۴-۷ آورده شده است.

جدول ۴-۷- تغییرات نسبی دبی میانگین ماهانه دوره های آینده نسبت به دوره پایه

درصد تغییرات دبی ماه میلادی	تنگراه						گالیکش					
	۲۰۴۶A۱B	۲۰۴۶A۲	۲۰۴۶B۱	۲۰۸۱A۱B	۲۰۸۱A۲	۲۰۸۱B۱	۲۰۴۶A۱B	۲۰۴۶A۲	۲۰۴۶B۱	۲۰۸۱A۱B	۲۰۸۱A۲	۲۰۸۱B۱
ژانویه	۱۵۴	۴۳/۲	۱۱۵/۸	۸۷/۳	۶۲/۶	۱۰۳/۲	۱۲۹/۳	۳۴/۴	۷۴/۴	-۷۲	-۲۴/۸	-۴۳/۴
فوریه	۶۸/۲	-۴/۲	۶۰	۴/۵	-۱۱/۶	۲۱/۲	۵۷/۴	۲۰/۳	۹۴/۵	-۱۰۶/۱	-۱۲/۲	-۹۳/۵
مارس	۵/۸	-۳۸/۸	۱۳/۹	-۳۶/۶	-۴۵/۴	-۲۳/۴	-۱۰/۱	-۲۸/۸	۳۳/۳	-۷۷۵/۸	۱۴۱/۸	-۷۳۷/۳
آوریل	-۲۷/۴	-۵۸/۲	-۱۲/۳	-۵۷/۶	-۶۳/۲	-۴۶/۹	-۳۱/۹	-۴۵/۶	-۱۰/۴	۱۱۳/۱	-۵۵	۱۱۰/۷
می	-۲۴	-۵۶/۳	-۷/۹	-۵۳/۸	-۵۹/۸	-۴۱/۸	-۲۶/۴	-۴۱/۹	-۶/۱	۱۳۴/۸	-۶۷/۴	۱۲۴/۵
ژوئن	-۴/۷	-۴۵/۶	۱۰/۵	-۴۱/۴	-۴۸/۴	-۲۷/۱	-۲۱/۶	-۳۸/۳	-۳/۳	۸۷۲/۹	-۳۲۴	۷۸۴/۴
جولای	۱۲/۸	-۳۷/۳	۲۷/۹	-۳۱/۱	-۳۹/۱	-۱۴/۳	-۱۵/۷	-۳۴/۸	-۰/۲	-۳۹۲/۷	۱۱۸/۷	-۳۴۳/۴
اگوست	۳۴/۶	-۲۶/۳	۵۰/۱	-۷/۳	-۲۴/۵	۴/۸	-۷/۷	-۲۸	۱/۵	-۱۷۶/۱	۴۵	-۱۲۰/۹
سپتامبر	۶۵/۷	-۱۶/۷	۶۹/۳	۱۴/۶	۳۹/۱	۶۰/۶	۹۹/۲	۱۴/۹	۵۶/۷	-۱۲۵/۴	۵/۵	-۷۸
اکتبر	۲۰۵/۷	۶۹/۲	۲۳۷/۹	۸۱/۴	۱۳۹/۶	۱۶۶/۶	۲۴۰/۵	۱۴۲/۷	۲۹۵/۵	-۶۶/۴	۱۰/۸	-۶۰/۵
نوامبر	۱۵۷/۸	۵۴/۶	۱۶۷/۶	۱۴۷/۴	۱۵۶/۵	۱۳۶/۲	۱۷۴/۸	۱۰۸/۵	۱۳۹/۴	-۶۵/۵	۶/۲	-۶/۷
دسامبر	۱۹۳/۹	۱۰۱/۱	۲۳۳	۲۰۵/۱	۱۸۴/۹	۱۹۹/۴	۱۷۷/۷	۱۴۱/۳	۲۰۳/۵	-۴۷/۹	۲۰/۲	۵/۸





## فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

### ۵-۱- مقدمه

تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب از چالش‌های عصر جدید می‌باشد. برای کنترل این شرایط و مدیریت بهینه حوضه آبریز، بررسی و برآورد مناسب مولفه‌های چرخه هیدرولوژیکی حائز اهمیت می‌باشد. منطقه بالادست سد گلستان و به خصوص حوضه‌های گالیکش و تنگراه در دهه اخیر شاهد تغییرات ناگهانی الگوی بارش و پیدایش سیلاب‌های تابستانی بوده‌اند. سیل‌های سال‌های ۸۰، ۸۱ و ۸۴ نشان دهنده اهمیت توجه بیشتر به بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تغییرات منابع آب سطحی در حوضه‌های بالادست سد گلستان (تنگراه و گالیکش) تحت تاثیر تغییر اقلیم می‌باشد. برای این منظور تغییرات دبی خروجی ایستگاه‌های تنگراه و گالیکش به عنوان ملاک سنجش تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. ابتدا حوضه آبریز سد گلستان (شامل زیرحوضه‌های تنگراه و گالیکش) با استفاده از مدل توزیعی و پیوسته زمانی SWAT شبیه‌سازی شده است. پس از کالیبراسیون مدل با استفاده از بسته نرم افزاری SWAT CUP و الگوریتم SUFI-2، تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب خروجی از ایستگاه‌های تنگراه و گالیکش بررسی گردید. نتایج این بررسی در بخش بعدی آورده می‌شود.

## ۵-۲- نتیجه گیری

نتایج میانگین ماهانه بارش و دمای ریزمقیاس شده برای منطقه مورد مطالعه نشان می دهد، میانگین دمای منطقه برای دوره زمانی آینده ۱ تا ۳ درجه افزایش خواهد داشت و همچنین الگوی بارش ماه‌های مختلف سال بدین صورت تغییر می‌یابد که ماه‌های پرباران، با کاهش بارش هم راه هستند و میزان بارش‌های تابستانی افزایش می‌یابد. بارش میانگین سالانه در هر دو دوره افزایش می‌یابد که این افزایش دوره نزدیک بیشتر از دوره دور است. یافته‌های افزایش بارش سالانه و متوسط دبی با نتایج مهدی‌زاده (۱۳۹۰) مطابقت دارد ولی الگوی بارش و دبی ماهانه در طول سال تطبیق زمانی ندارند. الگوی تغییرات زمانی با تحقیقات عباسپور (۲۰۰۹) مطابقت زمانی نزدیکی دارد.

همانطور که از نتایج مدل برای شبیه سازی رواناب آینده برمی آید، به دلیل تغییر اقلیم تحت اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، دبی پیک جریان بین یک تا دو ماه برای حالات مختلف زودتر به وقوع می‌پیوندد. دلیل این امر می‌تواند تغییر الگوی ریزش‌های جوی از بارش برف به باران در مناطق مرتفع، ذوب زود هنگام برف و همچنین تغییر فصول بارش باشد. میانگین دبی حوضه گالیکش تحت سناریوهای مختلف افزایش یافته است. در حوضه تنگراه نیز برای سناریوهای خوش بینانه و متوسط دبی جریان افزایش می‌یابد، ولی برای سناریو بدبینانه (A2) دبی کاهش یافته است. دلیل این تفاوت را می‌توان در تفاوت بین نوع پوشش گیاهی و اقلیم فعلی این مناطق یافت. حوضه گالیکش منطقه ای مرطوب با پوشش جنگلی و کشاورزی است، حال آنکه نیمه شمالی حوضه تنگراه دارای شرایط نیمه خشک است. می‌توان نتیجه گرفت اثر تغییر اقلیم بر کاهش رژیم جریان مناطق با میانگین بارش کمتر و نیمه خشک بیشتر از مناطق مرطوب است. این نتیجه با نتایج عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، که با بررسی منابع آب استان‌های

مختلف ایران به این نتیجه رسیدند که مناطق کم‌آب خشک‌تر و مناطق مرطوب، پرآب تر می‌گردد، مطابقت دارد.

تغییر رژیم جریان در ماه‌های مختلف سال و جابجایی ماه‌های پر آب و کم آب، می‌تواند بر کشاورزی منطقه تاثیر بگذارد. بررسی تغییرات الگوی بارش و جریان آب سطحی جهت انتخاب محصول کشاورزی متناسب با شرایط زمانی امری گریز ناپذیر است.

نهایتاً، این تحقیق با توجه به تغییرات دما و بارش و به طبع آن تغییرات منابع آب سطحی، لزوم کنترل و مدیریت بهینه منابع آب سطحی جهت بهره‌برداری حداکثری و کنترل خسارات احتمالی را لازم و ضروری می‌یابد.

### ۵-۳- پیشنهادات

همانطور که اشاره شد مدل SWAT، مدلی با ورودی‌های متنوع می‌باشد که هر چه اطلاعات ورودی کامل تر و دقت بیشتری داشته باشند، شبیه سازی بهتر صورت می‌گیرد. از این رو پیشنهاد می‌گردد:

۱- نقشه خاک با پارامترهای دقیق تر برای منطقه مورد بررسی تهیه شود که باعث افزایش دقت شبیه سازی و کاهش زمان کالیبراسیون مدل می‌گردد.

۲- در حوضه های مدیریت شده اطلاعاتی نظیر، برداشت آب از رودخانه‌ها جهت مصارف کشاورزی بر شبیه سازی بارش - رواناب تاثیر گذار است. کمبود این اطلاعات بر شبیه سازی صحیح رواناب خروجی حوضه تاثیر مسقیم دارد. پیشنهاد می‌گردد اطلاعات برداشت آب جهت مصارف کشاورزی به مدل اضافه گردد.

۳- تاثیر تغییر اقلیم بر اجزای دیگر چرخه هیدرولوژیکی نظیر، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و آب زیرزمینی بررسی شود.

۴- استفاده از الگوریتم‌های دیگر جهت کالیبراسون مدل SWAT نظیر PSO، PARASOL، GLUE و MCMC جهت مقایسه با مدل SUFI2 انجام شود.

۵- استفاده از داده‌های مدل‌های GCM دیگر و روش‌های ریزمقیاس کردن متفاوت، جهت ارزیابی دقت پیش بینی‌ها.



# منابع

## منابع:

- آذری م.، مرادی ح.، ثقفیان ب. و فرامرزی م. (۱۳۹۱) "ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه گرگانرود" نشریه آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۳، ص ۵۳۷.
- پورعبدالله م. و تجریشی م. (۱۳۸۵) "مدلسازی فرسایش حوضه ای به کمک مدل‌های RUSLE و SWAT (منطقه مورد مطالعه : زیر حوضه امامه)" هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران.
- ذهبیون، ب.، گودرزی م. و مساح بوانی ع.، (۱۳۸۹) "کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم" نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، سال اول، شماره سه و چهار: ص ۴۳.
- سعیدی، ر. و زهرایی، ب. (۱۳۸۹) "مدلسازی فرآیند بارش - رواناب در حوضه سد پیشین برای شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم" ششمین کنگره مهندسی عمران، سمنان.
- سلمانی، ح. (۱۳۹۰) پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهینه سازی پارامترهای موثر در بارش - رواناب در مدل نیمه توزیعی SWAT (مطالعه موردی زیر حوضه قزاقلی حوزه گرگانرود استان گلستان)" دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- سید قاسمی، س. (۱۳۸۵) پایان نامه کارشناسی ارشد: "پیش بینی تغییرات جریان رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه زاینده رود)" دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- صمدی، ز.، مساح بوانی، ع.، مهدوی، م. (۱۳۸۶). "بررسی تأثیر روشهای کوچک مقیاس کردن رگرسیون بر رژیم سیلاب رودخانه" کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب. تهران، کمیته ملی آبیاری و زهکشی
- علیزاده ا.، ایزدی ع. و ... (۱۳۹۲) "برآورد تبخیر - تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه با استفاده از مدل SWAT" نشریه آبیاری و زهکشی، شماره ۲، جلد ۷، ص ۲۴۳.
- غریب م. و مساعدی ا. (۱۳۸۲) " بررسی نحوه تغییرات زمانی و مکانی بارندگی دربخشی از حوزه آبخیز گرگانرود" سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، اصفهان.
- مهدی زاده، ص. (۱۳۹۰) پایان نامه کارشناسی ارشد: "پیش بینی تغییرات جریان رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم..." دانشکده آبخیزداری، دانشگاه منابع طبیعی گرگان.



- Abbaspour K. C., Johnson C. A., and van Genuchten M. Th.. (2004). “Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure” **Vadose Zone Journal** 3:1340–1352.
- Abbaspour K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. (2007). “Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT” **Journal of Hyd.** 333: 413– 430
- Abbaspour K. C., (2008). “ SWAT Calibration and Uncertainty Programs, A User Manual” Systems Analys.. Depart. (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95pp.
- Abbaspour K. C., Faramarzi M ., Seyed Ghasemi S. and Yang H. (2009). “Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. **Water Resources Research**, Vol. 45, W10434
- Akhavan S., Abedi-Koupai J., Mousavi S. F., ... (2010) “Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran” **Journal Agriculture, Ecosystems and Environment** 139 (2010) 675–688.
- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., ... (2012) “Swat: Model Use, Calibration, And Validation” **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Vol. 55(4): 1491-1508
- Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., Haney E.B., Neitsch S.L. (2012) “ SWAT Input/Output Documentation, Version 2012” Texas.Agricultural Research Service.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah and Williams J.R., (1998) “Large area hydrologic modeling and assessment; part I: model development” **Journal of Amer. Water Res. Assoc.** 1998, 34(1):73-89.
- Busche H.G.K., (2012), PhD. Thesis “Modeling hydrological processes in a semi-arid mountainous catchment at the regional scale” Mathematics and Natural Sciences. Depart. Bonn university.
- Dixon B. and Earls J., (2012) “Effects of urbanization on streamflow using SWAT with real and simulated meteorological data” **Journal Applied Geography**, 35 (2012), pp 174-190.

- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009), Modelling blue and green water resources availability in Iran. **Hydrol. Process.**, 23: 486–501. doi: 10.1002/hyp.7160
- Faramarzi M.,(2010) PhD. Thesis “Assessment of regional water endowments, crop water productivity, and implications for intra-country virtual water trade in iran” ETH ZURICH university.
- Gassman PW. Reyes MR., Green CH. and Arnold JG., (2007) “the Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions” **Trans. ASABE**. 2007: 50(4): 1211-1250.
- Gosain A.K., Rao S. and Basuray D.,( 2006) “Climate changes impact assessment on hydrology of Indian River basins” **Journal Current Sci**. 2006, 90(3): 346-353.
- IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)
  - Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007)“Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change “Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
  - M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds),(2007) “Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change “ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
  - B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds) (2007). “Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones, C. D., Gregory, J. M., Thorpe, R. B., Cox, P. M., Murphy, J. M., Sexton, D. M. H. and Valdes, P., (2005). “Systematic optimisation and climate simulation of FAMOUS, a fast version of HadCM3” **Clim. Dyn.**, 25, 189-204.
- Lue., Takle E.S. and Manoj J., (2009) “The Relationships Between Climatic And Hydrological Changes In The Upper Mississippi River Basin: A Swat And Multi-Gcm Study” **Journal American Meteorological Society**, volume 11: pp 437-451.
- Moussa R. (2008) “Significance of the Nash-Sutcliffe efficiency measure for linear rise and exponential recession in event based flood modeling” **Journal Geophysical Research**, 2008: 10: 2pp.

- Neitsch SL., Arnold JG., Kiniry JR., Williams JR. and King KW, “Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation – version 2005” Texas. Agricultural Research Service. 2005: pp. 494.
- Niraula N., Norman N.I., Meixner T. and Callegary J. (2012) “Multi-gauge calibration for Modeling the semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT” **Air, Soil and Water Research** 2012:5 41–57.
- Perazzoli M., Pinheiro A., Kaufmann V., (2012) “Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil” **Hydrological Sciences Journal**, 58 (1), pp 1–11.
- Rouholahnejad E., Abbaspour K. C., Srinivasan R., Bacu V., Lehmann A. (2014) “Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution” **Water Resour. Res.**, Volume 50, Issue 7, pages 5866–5885.
- Segni D. L. (2011) M.Sc thesis: “Climate Change Impact Assessment On Water Resources Availability (A Case Study For The Selected Catchments In Upper Blue Nile Basin” Civil Engineering. Depart. Addis Ababa University.
- Shi, P., Hou, Y., Xie, Y., Chen, C., Chen, X., Li, Q., Qu, S., Fang, X., and Srinivasan, R. (2013) ”Application of a SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed, China.” **J. Hydrol. Eng.**, 2013.18:1522-1529.
- Song L. and ZHANG J. (2012) “Hydrological Response to Climate Change in Beijiang River Basin Based on the SWAT Model” **Journal Procedia Engineering**, 28 (2012) 241 – 245.
- Tang F.F., Xu H.S. and Xu Z.X, (2012) “Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting” **Journal Procedia Environmental Sciences**, 2012 1760 – 1770.
- Zhang X., Srinivasan R. and Van Liew M: (2008) “Multi-site calibration of the SWAT model for Hydrologic modeling” **Trans. ASABE.**,2008: 51(6): 2039-2049.



## **Abstract**

Assessment of climate change impacts on the catchment hydrological cycle components contributed to the improved management of the catchment. The discharge is one of the main components of the hydrological cycle, it is important in the planning and efficient use of available water that estimated it correctly. In this study, first Golestan dam catchment area (including the basins of the tangrah and Galikash) is simulated by using SWAT semi distributed continuous model. Next, after calibration model by using SWAT CUP software and SUFI-2 algorithm, impact of climate change on tangrah and Galikash stations discharge were investigated. Input climate data for the study of climate change has been taken from down scaled CGCM3 general circulation model (GCM). Discharge simulations of tangrah and Galikash basins done by using data of 1995 – 2000 period for calibration and 2001-2003 was used for validation. In evaluation model for Tangrah station, Nash - Sutcliffe coefficient (NS) were obtained in the calibration and validation, respectively 0.81 and 0.97, and 0.57 and 0.58 for Galikash station. Finally, Galikash and Tangrah stations discharge are simulated in the two periods 2046- 2064 and 2081- 2099 under A2, B1 and A1B emission scenarios. By comparing the simulation future period and current period, the peak discharge occurs between one and two months earlier in future periods. This pattern can be changed due to atmospheric fallout from snow to rain in the highlands, early snow melt and also changing rainfall seasons. Average monthly discharge of Galikash basin is grown under different scenarios. In the Tangrah basin discharge for the optimistic scenario (B1) and medium (A1B) is increased, but for a pessimistic scenario (A2) flow is reduced. The results show that changes in the period 2081 - 2099 will be more severe than period 2046 - 2064.

**Keywords:** simulation rainfall - runoff, climate change, SWAT, SWAT CUP, SUFI





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**Assessment the Effects of Climate Change on Surface Water  
Resources of Golestan Dam by Using SWAT Model**

**Afshin Shahriari**

Supervisors:

**Dr. Ahmad Ahmadi**

**Dr. Saeed Golian**

February 2015