

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی امکان سنجی استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC بر اساس داده‌های ماهواره‌های مشاهدات زمینی

نگارنده: حسین صالحی

اساتید راهنما

دکتر سعید قره‌چلو

دکتر سعید گلیان

مهر ماه ۱۳۹۹

تقدیم بہ

این پایان نامہ راضمن تشکر و باسپاس فراوان و در کمال افتخار تقدیم می نمایم بہ محضر پدر و مادر عزیزم؛

آن ہا کہ وجودم برایشان ہمہ رنج بود و وجودشان برایم ہمہ عمر،

توانشان رفت تا بہ توانایی برسم،

مویشان سفید کشت تا رویم سفید بماند،

آن ہا کہ فروغ محاکہشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایہ های جاودانی من است،

آن ہا کہ راستی قائمہ در سنگت قاتلان تجلی یافت،

در برابر وجود کرامی شان زانوی ادب بر زمین می نہم و بادلی ملو از عشق و محبت و خضوع بردستان بوسہ می زنم.

و تقدیم بہ

استاد فرزادہ و فریختہ آقای دکتر قرہ چلو و آقای دکتر گلکان کہ ہموارہ در راہ علم مرایاری نمودند.

تقدیر و شکر

حمد و سپاس بی پایان پروردگار قادر متعال که با فضل بی حسابش مسیر زندگی ام را در طریق علم آموزی قرار داد. از خدای علیم تقاضا می‌کنم

که توفیق پانگه‌ی مطلوب به این همه لطف و محبت اش را به این حقیر عطا کند تا بتوانم با خدمتی صادقانه در این راه نورانی گامی هر چند اندک

بردارم.

این پژوهش بارها بهانه‌ی های ارزنده و صادقانه جمعی از اساتید که بهواره از تلاش های مشتقانه و دلسوزانه آنان در طول تحصیل و تحقیق

برخوردار بودم، به سرانجام رسیده است. بر همین اساس بر خود فرض می‌دانم از کلیه کسانی که یاری کر طی این راه بودند، شکر و قدردانی

نمایم.

از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر قره‌چلو و جناب آقای دکتر گلکان که راهبانی تحقیق بر عهده ایشان بوده و در بهتر شدن پژوهش از هیچ

کوششی دریغ نکردند.

از جناب آقای دکتر عواد محجوبی به خاطر راهبانی های ارزنده و راحکشان در زمان تهیه این پایان نامه که بهواره پدید آورنده ایده ها و افق های جدید

ذخیرم بوده است.

در پایان لازم می‌دانم که از پژوهشگران، کولندراسینک از انستیتو سنجش از دور ملی هند، کل مارکرت از دانشگاه آلباما آمریکا، دنیل دی کاسترو و میکتوریا از انستیتو رامبریا برزیل، تانه دوس دانک از دانشگاه ملی سکا پور و محبتی صادقی از دانشگاه ابرو این کالیفرنیا که خالصانه به این جانب کمک کرده تقدیر و تشکر کنم.

تعهد نامه

اینجانب **حسین صالحی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بررسی امکان سنجی استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC بر اساس داده های مشاهدات زمینی تحت راهنمایی دکتر سعید قره چلو و دکتر سعید گلیان** متعهد می شوم:

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

تاریخ:

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این مطالعه با استفاده از داده‌های ماهواره‌های مشاهدات زمینی و مدل هیدرولوژیکی VIC به شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز حبله‌رود واقع در شرق استان تهران در دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۲ پرداخته شد. مدل هیدرولوژیکی VIC یک مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس است که در این مطالعه در حالت تعادل آبی مورد استفاده قرار گرفت. برای واسنجی آن از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II استفاده گردید که هدف کاهش خطای ریشه دوم میانگین مجذور خطای انتقال یافته (TRMSE) و افزایش مقدار ضریب نش-ساتکلیف (NSE) بود. جهت ارزیابی توانایی مدل ابتدا با کمک داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهدات زمینی شبیه‌سازی انجام گرفت و ضریب تبیین (R^2) و ضریب NSE و خطای TRMSE در دوره واسنجی (۱۹۹۴-۱۹۹۲) به ترتیب برابر با ۰,۷۲، ۰,۷۲ و ۰,۶۲ و در دوره صحت سنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۶) برابر با ۰,۷۳، ۰,۷۲ و ۰,۵۲ بود. همچنین این ضرایب در مقیاس ماهانه در دوره واسنجی برابر با ۰,۸۵، ۰,۸۴ و ۰,۴۷ و برای دوره صحت سنجی برابر با ۰,۸۴، ۰,۸۴ و ۰,۴۲ بود. پس از ارزیابی توانایی مدل به واسنجی مدل با کمک داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR پرداخته شد که ضرایب R^2 و NSE و خطای TRMSE به ترتیب در دوره واسنجی برابر با ۰,۶۱، ۰,۶۰ و ۰,۶۲ و برای دوره صحت سنجی برابر با ۰,۶۷، ۰,۶۲ و ۰,۵۸ بود. در مقیاس ماهانه این ضرایب برای دوره واسنجی برابر با ۰,۷۵، ۰,۷۴ و ۰,۴۹ و برای دوره صحت سنجی برابر با ۰,۸۲، ۰,۷۸ و ۰,۴۶ بود. نتایج حاکی از توانایی تخمین مناسب مدل هیدرولوژیکی VIC با استفاده از داده‌های ماهواره‌های مشاهداتی در حوضه آبریز حبله‌رود بود که ضرایب به دست آمده تایید کننده این امر هستند.

واژه‌های کلیدی: مدل هیدرولوژیکی VIC، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II، ماهواره‌های

مشاهدات زمینی، داده‌های بارش ماهواره‌ای، PERSIANN-CDR

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه و بیان مسئله.....	۲
۲-۱- مدلسازی هیدرولوژیکی.....	۳
۳-۱- انواع مدل های هیدرولوژیکی.....	۷
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۹
۵-۱- اهداف تحقیق.....	۱۰
۶-۱- فرضیات تحقیق.....	۱۰
فصل دوم: پیشینه تحقیق.....	۱۱
۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- پیشینه تحقیق.....	۱۲
۱-۲-۲- مطالعات داخلی.....	۱۲
۲-۲-۲- مطالعات خارجی (پژوهش های انجام شده در خارج از کشور).....	۱۴
۱-۲-۲-۲- استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC در مقیاس بزرگ.....	۱۴
۲-۲-۲-۲- کاربرد مدل VIC در مناطق کوچک.....	۱۷
۳-۲- جمع بندی.....	۲۱
فصل سوم: مواد و روش ها.....	۲۳
۱-۳- مقدمه.....	۲۴

۲۴	۲-۳- مدل هیدرولوژیکی VIC
۲۶	۱-۲-۳- داده‌های ورودی مدل VIC
۲۶	۱-۱-۲-۳- فایل کنترل عمومی
۲۶	۲-۱-۲-۳- داده‌های خاک
۲۸	۳-۱-۲-۳- پارامترهای پوشش گیاهی
۲۹	۴-۱-۲-۳- کتابخانه گیاهی
۳۰	۵-۱-۲-۳- داده‌های هواشناسی
۳۱	۶-۱-۲-۳- باندهای ارتفاعی
۳۲	۳-۳- مدل روندیاب
۳۳	۱-۳-۳- ورودی‌های مدل روندیاب
۳۳	۱-۱-۳-۳- فایل کنترل عمومی
۳۳	۲-۱-۳-۳- مسیر جریان
۳۳	۳-۱-۳-۳- فایل درصد مشارکت
۳۴	۴-۱-۳-۳- فایل ایستگاه خروجی
۳۴	۵-۱-۳-۳- فایل هیدروگراف
۳۴	۶-۱-۳-۳- فایل اندازه سلول
۳۴	۴-۳- منطقه مطالعاتی
۳۵	۱-۴- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه حبله‌رود شمالی
۳۶	۲-۴- هواشناسی و اقلیم منطقه

- ۳۷..... ۳-۴-۳- تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی حوزه آبریز.....
- ۳۹..... ۳-۴-۴- کشاورزی.....
- ۴۰..... ۳-۴-۵- جمعیت و شهرنشینی.....
- ۴۰..... ۳-۵-۵- داده‌های استفاده شده در این مطالعه.....
- ۴۰..... ۳-۵-۱- داده‌های مربوط به خاک.....
- ۴۳..... ۳-۵-۲- داده‌های مربوط به پوشش گیاهی.....
- ۴۳..... ۳-۵-۳- داده‌های مربوط به کتابخانه گیاهی.....
- ۴۴..... ۳-۵-۴- داده‌های باندهای ارتفاعی.....
- ۴۵..... ۳-۵-۵- داده‌های هواشناسی.....
- ۴۵..... ۳-۵-۵-۱- داده‌های بارش.....
- ۴۵..... ۳-۵-۵-۱-۱- داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی.....
- ۴۷..... ۳-۵-۵-۲- داده‌های بارش ماهواره‌ای.....
- ۴۸..... ۳-۵-۵-۲- داده‌های دما و سرعت باد.....
- ۴۸..... ۳-۵-۵-۵- داده‌های مورد استفاده برای اجرای مدل روندیاب.....
- ۴۸..... ۳-۵-۵-۱- فایل مسیر جریان.....
- ۴۸..... ۳-۵-۵-۲- فایل درصد مشارکت.....
- ۴۹..... ۳-۵-۵-۳- فایل هیدروگراف.....
- ۵۱..... ۳-۶-۶- معیارهای ارزیابی.....
- ۵۳..... ۳-۶-۱- ارزیابی داده‌های بارش ماهواره‌ای.....

۵۳	۳-۶-۲- ارزیابی عملکرد مدل با داده‌های ماهواره‌ای
۵۵	۳-۷- روش واسنجی مدل
۵۵	۳-۸- نرم افزارها و زبان‌های برنامه نویسی مورد استفاده
۵۶	۸-۳-۱- نرم‌افزار GIS
۵۶	۳-۸-۲- زبان برنامه نویسی پایتون
۵۹	فصل چهارم: نتایج تحقیق
۶۰	۴-۱- مقدمه
۶۰	۴-۲- عملکرد داده‌های بارش ماهواره‌ای
۶۶	۴-۳- عملکرد داده‌های ماهواره‌ای در مدل هیدرولوژیکی VIC
۷۹	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۰	۵-۱- مقدمه
۸۰	۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۸۰	۵-۲-۱- تحلیل رواناب مدلسازی شده
۸۱	۵-۲-۱-۱- ضریب تبیین (R^2)
۸۱	۵-۲-۱-۲- ضریب نش-ساتکیف (NSE)
۸۲	۵-۲-۱-۳- ریشه میانگین مربعات خطای کاکس-باکس (TRMSE)
۸۲	۵-۲-۱-۴- رواناب بیشینه
۸۳	۵-۲-۲- تحلیل داده‌های بارش ماهواره‌ای
۸۳	۵-۳- بررسی فرضیه‌ها

۵-۴- پیشنهادات برای تحقیقات آینده..... ۸۵

منابع:..... ۸۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. مراحل مدل سازی هیدرولوژیکی ۴
- شکل ۱-۲. اجزا مدل ادراکی هیدرولوژیکی در سه سطح بالا، رو و زیر سطح زمین ۵
- شکل ۱-۳. تقسیم بندی مدل های هیدرولوژیکی ۸
- شکل ۳-۱. شماتیک مدل هیدرولوژیکی VIC ۲۵
- شکل ۳-۲. نمونه فایل ورودی خاک برای ۳ لایه خاک ۲۸
- شکل ۳-۳. نمونه فایل ورودی پوشش گیاهی ۲۹
- شکل ۳-۴. نمونه فایل ورودی کتابخانه گیاهی ۲۹
- شکل ۳-۵. نمونه فایل ورودی هواشناسی ۳۰
- شکل ۳-۶. نمونه فایل ورودی باندهای ارتفاعی و باندهای برف در ۵ باند برای ۴ سلول ۳۱
- شکل ۳-۷. شماتیک مدل روندیاب ۳۲
- شکل ۳-۸. مقایسه جهت جریان در GIS و VIC ۳۳
- شکل ۳-۹. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز حبله رود ۳۷
- شکل ۳-۱۰. نقشه زیرحوضه های آبریز حبله رود و موقعیت ایستگاه هیدرومتری بنکوه ۴۱
- شکل ۳-۱۱. فایل خاک HWSD حوزه آبریز حبله رود در نرم افزار HWSD VIWER ۴۲
- شکل ۳-۱۲. اطلاعات استفاده شده برای مدل هیدرولوژیکی VIC ۴۴
- شکل ۳-۱۳. موقعیت ایستگاه های باران سنجی در سطح حوزه آبریز و شبکه آبراهه حبله رود ۴۷
- شکل ۳-۱۴. ورودی های مدل روندیاب در حوضه آبریز حبله رود ۴۹
- شکل ۳-۱۵. جهت رواناب تعریف شده در هر سلول ۵۱
- شکل ۳-۱۶. شماتیک مدلسازی بر اساس الگوریتم NSGA-II در این مطالعه ۵۷
- شکل ۴-۱. نمودار شاخص های آماری تشخیص بارش ۶۱
- شکل ۴-۲. نمودار شاخص های آماری خطا داده های بارش ۶۱
- شکل ۴-۳. نمودار مقایسه بارش ایستگاه فیروزکوه و بارش ماهواره ای PERSIANN-CDR ۶۲
- شکل ۴-۴. نمودار مقدار بارش ایستگاه فیروزکوه در برابر بارش ماهواره ای ۶۲

- شکل ۴-۵. نمودار مقایسه بارش ایستگاه علی آباد و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR ۶۳
- شکل ۴-۶. نمودار مقدار بارش ایستگاه علی آباد در برابر بارش ماهواره‌ای ۶۳
- شکل ۴-۷. نمودار مقایسه بارش ایستگاه چنداب بشم و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR ۶۴
- شکل ۴-۸. نمودار مقدار بارش ایستگاه چنداب بشم در برابر بارش ماهواره‌ای ۶۴
- شکل ۴-۹. نمودار مقایسه بارش ایستگاه سیمین دشت و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR ۶۵
- شکل ۴-۱۰. نمودار مقدار بارش ایستگاه سیمین دشت در برابر بارش ماهواره‌ای ۶۵
- شکل ۴-۱۱. هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۶۹
- شکل ۴-۱۲. رواناب روزانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۶۹
- شکل ۴-۱۳. هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۷۰
- شکل ۴-۱۴. رواناب روزانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های ماهواره‌ای در دوره واسنجی ۷۰
- شکل ۴-۱۵. هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۱
- شکل ۴-۱۶. رواناب روزانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۱
- شکل ۴-۱۷. هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های ماهواره‌ای در دوره صحت‌سنجی ۷۲
- شکل ۴-۱۸. رواناب روزانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۲
- شکل ۴-۱۹. هیدروگراف ماهانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۷۴
- شکل ۴-۲۰. رواناب ماهانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۷۴
- شکل ۴-۲۱. هیدروگراف ماهانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی ۷۵
- شکل ۴-۲۲. رواناب ماهانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های ماهواره‌ای در دوره واسنجی ۷۵
- شکل ۴-۲۳. هیدروگراف روزانه ماهانه مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۶
- شکل ۴-۲۴. رواناب ماهانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۶
- شکل ۴-۲۵. هیدروگراف ماهانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده با داده‌های ماهواره‌ای در دوره صحت‌سنجی ۷۷
- شکل ۴-۲۶. رواناب ماهانه مشاهداتی در برابر رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی ۷۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳	مشخصات ایستگاه هیدرومتری بنکوه	۳۸
جدول ۲-۳	مساخت اراضی کشاورزی به تفکیک زیرحوضه	۳۸
جدول ۳-۳	میزان بهره‌برداری از منابع آب در هر زیرحوضه	۳۹
جدول ۴-۳	لایه‌بندی خاک در دیتاست HWS	۴۲
جدول ۵-۳	کلاس‌بندی پوشش گیاهی MSD12Q1 بر اساس استاندارد IGBP	۴۳
جدول ۶-۳	اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در این مطالعه	۴۷
جدول ۷-۳	نسبت رواناب ماهانه به رواناب کل سالانه	۵۰
جدول ۱-۴	نتیجه مقایسه داده بارش ایستگاه‌های زمینی با داده ماهواره‌ای PERSIANN-CDR	۶۰
جدول ۲-۴	پارامترهای واسنجی شده برای هر سلول با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی	۶۶
جدول ۳-۴	پارامترهای واسنجی شده برای هر سلول با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR	۶۷
جدول ۴-۴	نتایج دبی روزانه ایستگاه بنکوه با رواناب شبیه‌سازی شده با داده بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای	۶۸
جدول ۶-۴	نتایج رواناب ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه	۷۳

فصل اول:

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه و بیان مسئله

افزایش روزافزون جمعیت جوامع بشری، باعث افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی برای تأمین غذا، فعالیت‌های صنعتی جهت رفع نیازهای دیگر بشر و همچنین افزایش مصرف آب در بخش شرب شده است. از طرفی در دهه گذشته تغییر اقلیم، به صورت محسوسی در الگوهای بارندگی چه در میزان و چه در پراکندگی، تأثیرگذار بوده است، بنابراین نیاز است با توجه به منابع آب قابل دسترس و شرایطی که حاکم بر چرخه هیدرولوژیکی است، برنامه‌ریزی صحیحی در حفظ آن برای خود و آیندگان داشت.

ایران کشوری است که در کمربند خشک و نیمه خشک زمین قرار گرفته است که از لحاظ تنوع اقلیمی، شامل اقلیم‌های گوناگونی است که هر کدام دچار معضلاتی در بحث آب و بارندگی‌ها هستند. بنابراین باید به خوبی منابع آب را شناسایی کرد و با شناخت کامل به برنامه‌ریزی پرداخت. این شناخت باعث برنامه‌ریزی کارآمدتری در مدیریت منابع مانند بهبود برنامه‌ریزی مخزن، بهبود راندمان کشاورزی، ذخیره آب شرب و همچنین مطالعات زیست‌محیطی می‌گردد. به عنوان مثال تخمین پایین آورد رودخانه باعث تخریب سد و تخمین بالاتر از واقعیت آن باعث بالا رفتن هزینه‌های عمرانی می‌گردد که هر کدام به نحوی مشکل ساز هستند.

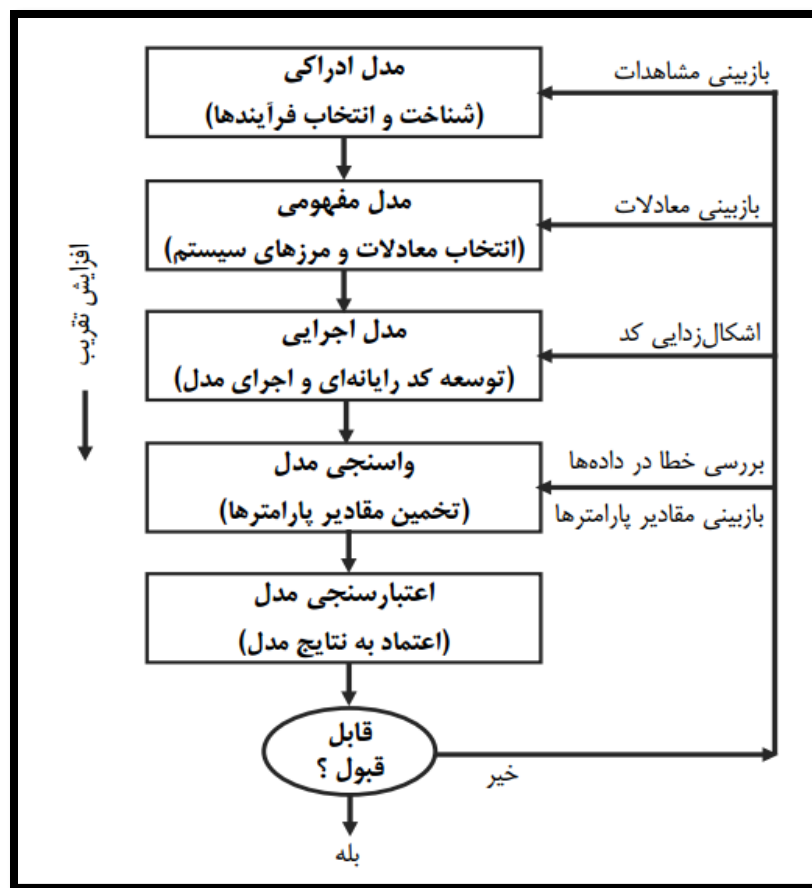
آب‌های سطحی، برگاب، رطوبت خاک و آب‌های زیرزمینی و همچنین جو، همگی مؤلفه‌های پیوسته هیدرولوژیکی هستند. درک تعامل بین این مؤلفه‌ها و در دسترس بودن اطلاعات آن‌ها و امکان پیش‌بینی، تنوع و کیفیت اطلاعات در مقیاس بزرگ، نیاز به یک استراتژی و راه‌حل دقیق و کارآمد دارد. محققین برای درک این روابط و برهم‌کنش آن‌ها چارچوبی به نام مدل هیدرولوژیکی ارائه کرده‌اند [۱]. مدل‌های هیدرولوژیکی نمایش ساده‌شده‌ای از سیستم هیدرولوژیکی حوضه هستند که به مطالعه درباره کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژیکی کمک می‌کنند [۲]. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی جهت مدیریت منابع آب، حل مشکلات زیست‌محیطی مانند بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب، مدیریت سیلاب

و بررسی کیفیت آب کارآمد بوده است [۳]. با توجه به رشد روزافزون فناوری‌ها و قابلیت‌های محاسباتی در رایانه‌ها، پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌های فرآیندهای منابع آبی بسیار گسترش یافته‌اند به‌طوری که در اغلب مطالعات کاربردی منابع آب مانند ارزیابی مؤلفه‌های بیلان آب، پیش‌بینی جریان رودخانه، پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده از مدل‌ها امری غیرقابل انکار می‌باشد. بنابراین با این دیدگاه استفاده از مدل باعث افزایش بینش و درک هیدرولوژیست از فرآیندهای مورد مطالعه و ارزیابی اثرات تغییرات محتمل در حوضه از طریق سناریوسازی‌های مختلف می‌شود [۴].

۱-۲- مدل‌سازی هیدرولوژیکی

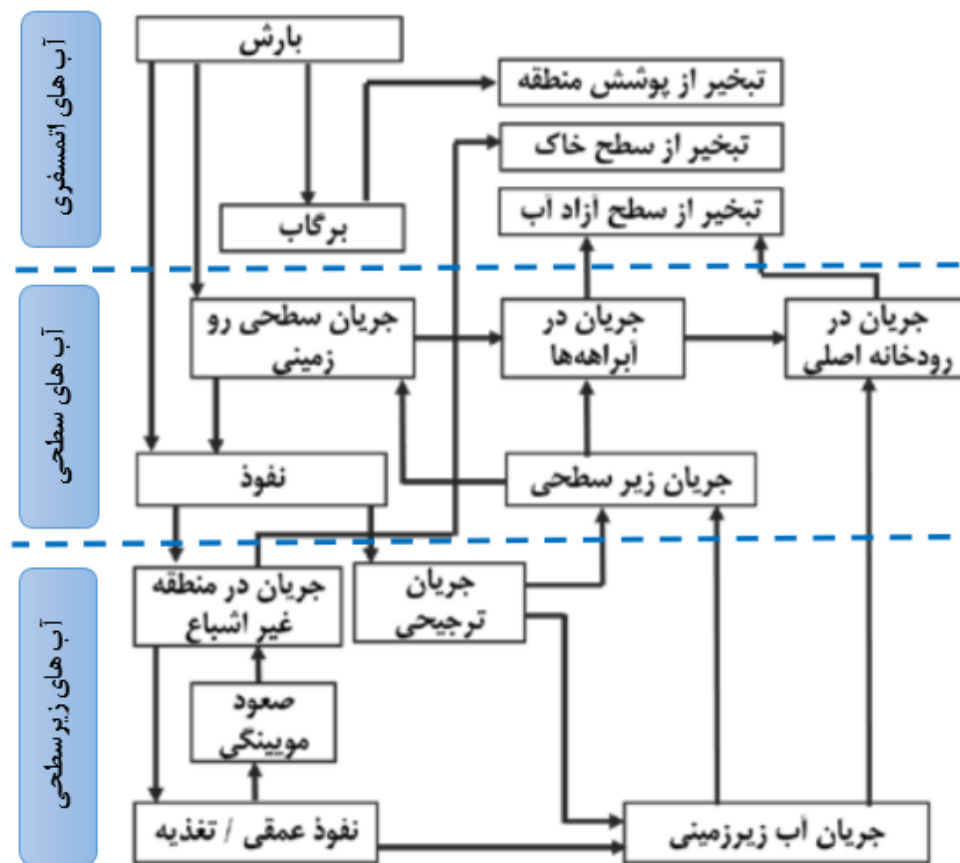
فرآیندها و مؤلفه‌های مرتبط با چرخه آب در طبیعت دارای ارتباطات نسبتاً پیچیده‌ای هستند. البته این روابط زمانی پیچیده‌تر می‌شوند که در مکان و زمان دست‌خوش تغییر شوند. امروزه اصلی‌ترین راه درک و پیش‌بینی این فرآیندها در حوضه‌های آبریز به سبب وجود روابط غیرخطی و پیچیده بین آن‌ها، وجود محدودیت‌های اقتصادی در اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌ها و نیاز به داده‌ها و اطلاعات مختلف در شناخت فرآیندهای هیدرولوژیکی، استفاده و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی با توجه به اهداف مورد انتظار می‌باشد [۴].

اغلب کتاب‌ها یا متون تخصصی برای شبیه‌سازی فرآیندهای مشخص هیدرولوژی مدل‌هایی را معرفی کرده‌اند، یا به عبارتی فرآیند مدل‌سازی را با انتخاب مدل آغاز کرده‌اند. اما مراحل قبل‌تر وجود دارد که در اغلب طرح‌ها و پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی از آن‌ها صرف‌نظر شده است یا کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. فرآیند مدل‌سازی هیدرولوژیکی در پنج گام انجام می‌گیرد که در شکل ۱-۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. در ادامه این پنج گام شرح داده خواهند شد.



شکل ۱-۱، مراحل مدل سازی هیدرولوژیکی [۴]

گام اول؛ تشکیل مدل ادراکی: مهم‌ترین و علمی‌ترین قسمت فرآیند مدل سازی هیدرولوژیکی تشکیل مدل ادراکی است. علم هیدرولوژی در پی شناخت روابط حاکم بر چگونگی رفتار آب بر روی زمین و زیر زمین است. این قسمت وابستگی زیادی به تجربیات میدانی هیدرولوژیست، منابع در دسترس وی، تحلیل مجموعه داده‌های مختلف و مطالعه کتب دارد. مدل ادراکی خلاصه‌ای از شناخت و آگاهی از چگونگی پاسخ‌های حوضه آبریز به بارش اتفاق افتاده تحت شرایط مختلف یا به عبارتی شناخت شخص هیدرولوژیست از آن پاسخ‌ها می‌باشد. در شکل ۱-۲ نمونه ای از مدل ادراکی مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲. اجزا مدل ادراکی هیدرولوژیکی در سه سطح بالای سطح زمین، روی سطح زمین و زیر سطح زمین [۴]

قابل ذکر است که تمامی تفاسیر و روابط ریاضی که برای پیش‌بینی‌ها استفاده می‌شوند در واقع حاصل ساده-سازی‌های انجام شده در مدل ادراکی است. مدل ادراکی با نظریه‌های ریاضی قابل محدود شدن نمی‌باشد، بلکه اساساً در فکر و ذهن شخص هیدرولوژیست وجود دارد و حتی لزومی به نوشتن آن نمی‌باشد. انسان می‌تواند پیچیده‌ترین فرآیندهای جریان را که حتی‌الامکان ارائه آن‌ها به صورت ریاضی دشوار باشد به صورت کاملاً کیفی درک کند؛ هرچند که توصیف ریاضی یک پدیده اولین گام در تشکیل یک مدل برای پیش‌بینی‌های کمی است.

گام دوم؛ تشکیل مدل مفهومی: در این مرحله به دنبال چگونگی و در نظر گرفتن مقیاس ارائه فرآیندهای شناسایی شده در مرحله قبل هستیم. در واقع گام قبلی بر اساس اصول محض علمی بوده است اما این گام به نوعی هنر (ترکیبی از خلاقیت و مهندسی) می‌باشد، به طوری که تصمیم‌گیری در نحوه چگونگی معماری مدل و شکل-دهی معادلات اساسی آن می‌باشد. این تصمیم‌گیری شامل انتخاب فرآیندهای غالب و تأثیرگذار هیدرولوژی

براساس موجودیت و صحت داده‌ها، نحوه ارتباط آن‌ها، انجام ساده‌سازی در آن‌ها و در نهایت ارائه ساختار و روابط است. در واقع فرضیه‌هایی که در این مرحله شکل می‌گیرند، می‌بایست در گام‌های بعدی ارزیابی شوند و در صورت نیاز بازبینی شوند [۵، ۶].

گام سوم؛ تشکیل مدل اجرایی: برخی معادلات و روابط حاصل از مدل مفهومی می‌توانند مستقیماً جهت محاسبات تبدیل به کدهای رایانه‌ای و ارائه مدل اجرایی شوند. از طرفی اگر معادلاتی امکان حل تحلیلی آن‌ها با شرایط مرزی مشخص در سیستم واقعی وجود نداشته باشد (مانند معادلات با مشتقات جزئی)، یک مرحله دیگر از تقریب واقعیت لازم است که با روش‌های حل عددی به صورت یک مدل اجرایی (کدنویسی در رایانه) انجام می‌شود. مثال مرسوم از روش‌های حل عددی استفاده از روش‌های حل تفاضل محدود یا حجم محدود می‌باشد. در تبدیل (انتقال) معادلات از مدل مفهومی به کد مدل اجرایی بیشترین احتمال وقوع خطا در حل معادلات اصلی وجود دارد و باید این مرحله با دقت مضاعف انجام شود [۵].

یک گام مهم که در این مرحله انجام می‌شود، صحت‌سنجی یا اشکال‌زدایی کد رایانه‌ای یا مدل اجرایی می‌باشد. صحت‌سنجی به معنی کنترل و بازبینی کد رایانه‌ای و رفتار مدل اجرایی (حل معادلات آن) به کمک اعمال شرایط حدی و یا افزایش و کاهش تدریجی مقادیر ورودی به مدل و بررسی صحت خروجی‌های کد رایانه‌ای است.

گام‌های چهارم و پنجم؛ واسنجی و اعتبارسنجی: با داشتن مدل اجرایی، کدی در اختیارمان قرار دارد که در رایانه‌ها قابلیت اجرا دارد. اما قبل از کاربرد کد جهت انجام پیش‌بینی‌های کمی در یک حوضه آبریز می‌بایست پارامترها یا ضرایب مدل، واسنجی یا به عبارتی تخمین زده شوند. تمامی مدل‌هایی که در هیدرولوژی استفاده می‌شوند دارای معادلاتی هستند که هر کدام شامل انواع مختلفی از متغیرهای وضعیت ورودی‌ها می‌باشند [۵].

ورودی‌هایی وجود دارند که تعریف‌کننده هندسه و شکل حوضه آبریز هستند و معمولاً در طول دوره شبیه‌سازی مقادیر ثابتی دارند. متغیرهایی وجود دارند که تعریف‌کننده شرایط مرزی متغیر در زمان در طول دوره شبیه‌سازی هستند، مانند بارندگی یا سایر متغیرهای هواشناسی که در گام زمانی مشخصی وجود دارند. متغیرهای وضعیت مانند ذخیره رطوبتی خاک یا سطح ایستابی است که در طول دوره شبیه‌سازی در اثر محاسبات در مدل تغییر

می‌کنند [۴].

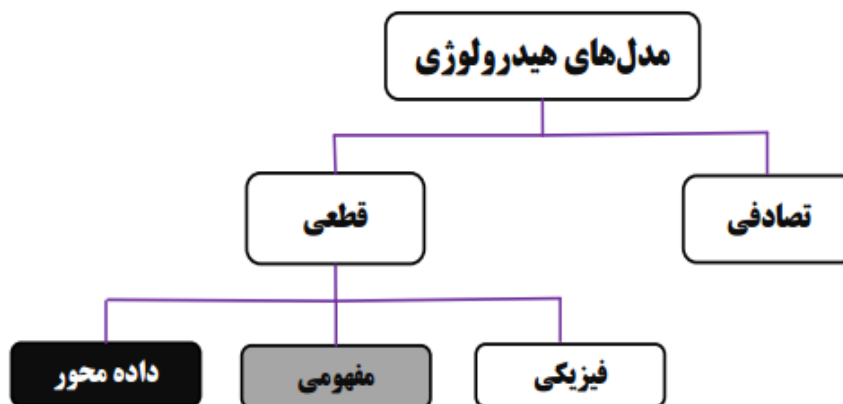
رایج‌ترین روش مورد استفاده در واسنجی پارامترها، تغییر و اصلاح مقدار پارامتر تا منطبق شدن پیش‌بینی مدل با مقدار مشاهده شده از پاسخ حوضه (در صورت مهیا بودن آن) می‌باشد. فرآیند تخمین پارامترها یا واسنجی مدل اغلب به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. به طوری که واسنجی، به بهینه‌سازی (تخمین بهینه) پارامترهای مدل با هدف به حداقل رساندن تمایز خروجی‌های مدل با مقادیر مشاهداتی واقعی اطلاق می‌شود [۷]. پس از واسنجی و تعیین ضرایب، مدل در یک دوره دیگر اجرا می‌شود تا عملکرد مدل و ضرایب حاصل از واسنجی، صحت‌سنجی شوند. این آخرین مرحله از مدل‌سازی است.

۱-۳- انواع مدل‌های هیدرولوژیکی

بر اساس یک طبقه‌بندی کلی، انواع مدل‌های هیدرولوژیکی به دو دسته مدل‌های غیرقطعی (تصادفی) و مدل‌های قطعی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های غیرقطعی در حقیقت روشی برای برآورد توزیع‌های احتمالاتی از خروجی‌ها با در نظر گرفتن تغییرات تصادفی متغیرهای ورودی مدل هستند [۸]. از طرف دیگر در یک مدل قطعی، از عنصر یا جزء تصادفی آن صرف‌نظر می‌شود. هر ورودی ثابت دارای یک خروجی ثابت است [۹]. از دیدگاه کاربردی، مدل‌های غیرقطعی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مگر در شرایط توصیف و پیش‌بینی پدیده‌های خاص اقلیمی یا حدی مانند خشکسالی و سیل [۴].

مدل‌های قطعی از لحاظ پیچیدگی به سه دسته تقسیم می‌شوند که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است و شامل مدل‌های داده‌محور یا تجربی (معروف به جعبه سیاه)، مفهومی (معروف به جعبه خاکستری) و فیزیکی (معروف به جعبه سفید) هستند [۸]. مدل‌های داده‌محور یا تجربی همان‌طور که از اسم این مدل‌ها بر می‌آید، هیچ‌گونه تفسیری از فرآیندهای فیزیکی صورت گرفته در یک فرآیند هیدرولوژیکی را ارائه نمی‌دهد؛ ولی با استفاده از آن می‌توان پارامترهایی را پیش‌بینی نمود (مانند مدل‌های رگرسیونی یا شبکه عصبی). در مقابل، مدل‌های فیزیکی با استفاده از روابط ریاضی صرف و درک دقیق فرآیندهای موجود در یک سامانه، سعی در مدل کردن آن دارند؛ این در

حالی است که مدل های هیدرولوژیکی مفهومی با درک رفتار سامانه به تفسیر فرآیندها و ارتباط آنها در شکل گیری یک پارامتر هیدرولوژیکی نظیر رواناب روزانه خروجی از حوضه می پردازند.



شکل ۱-۳. تقسیم بندی مدل های هیدرولوژیکی [۴]

از مزایای مدلسازی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تصمیم گیری مناسب تر
 - افزایش بینش کاربران از راه ایجاد ارتباط بین متغیرهای مختلف مشکل
 - ابزاری جهت ایجاد ارتباطات بهتر و مؤثر
 - صرفه جویی در هزینه ها
 - امکان بررسی و پیش بینی رفتار سیستم در مواجهه با انواع متغیرها یا پارامترهای مختلف یک وضعیت واقعی
 - امکان تحلیل کلیه ترکیبات احتمالی بین فاکتورهای بالقوه با استفاده از مدل سازی کامپیوتر
- مضاف بر موارد یاد شده، در دسترس نبودن اطلاعات کافی در تمامی نقاط زمین به طور پیوسته نیاز به مدل سازی برای آگاهی بهتر از شرایط موجود را مهم تر نشان می دهد. محققین در سال های اخیر مدل هایی مانند: Mac-۱، PDM ۲-WBMP، ۳-WaterGAP، ۴-H08 و ۵-VIC و غیره در این زمینه توسعه داده اند که هر کدام کاربرد

و محدودیت‌های متفاوتی دارند و برحسب نیاز می‌توان آن را انتخاب نمود^[۱۰]. در این پژوهش از مدل VIC^۱ استفاده خواهد شد.

VIC مدلی است بزرگ مقیاس که در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه واشنگتن^۲ توسط ژولیانگ^۳ و همکاران^[۱۱] توسعه یافته‌است و تاکنون محققان زیادی به توسعه و پیشرفت آن پرداخته‌اند. این مدل، مدل‌سازی را در دو حالت تعادل کامل آب و انرژی انجام می‌دهد و در بسیاری از رودخانه‌های بزرگ زمین و همچنین در سطح جهانی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در بدو توسعه این مدل از داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی استفاده می‌شد که با پیشرفت‌هایی که در علم سنجش از دور رخ داد و همچنین به‌دلیل ارزان و دسترسی آسان، بیشتر داده‌ها از طریق داده‌های ماهواره‌ای تأمین گردید.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به تغییرات اقلیمی که باعث تغییر الگوهای بارشی، وقوع خشکسالی و غیره گردیده‌است، در سال‌های اخیر مدیریت منابع آب اهمیت زیادی پیدا کرده‌است که این امر نیازمند داشتن اطلاعات کافی از منابع آب در دسترس و روند تغییرات آن در زمان حال و آینده می‌باشد. با توجه به قابل دسترس نبودن اطلاعات از ایستگاه‌های زمینی در تمامی نقاط با دقت و پیوستگی زمانی لازم از گذشته تاکنون در یک منطقه بزرگ مقیاس نیاز به استفاده از داده‌های ماهواره‌های مشاهدات زمینی و شبیه‌سازی در مدل‌های هیدرولوژیکی آن برای آینده کاملاً محسوس می‌باشد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی امکان استفاده از مدل بزرگ مقیاس VIC بر پایه داده‌های ماهواره‌های مشاهدات زمینی جهت شبیه‌سازی پارامترهای مهم هیدرولوژیکی برای تمامی نقاط یک منطقه بزرگ می‌باشد. این اطلاعات کمک شایانی در بحث مدیریت منابع آب، آبخیزداری و جلوگیری از فرسایش مراتع و همچنین در زمینه انجام پروژه‌های سدسازی، خواهد کرد.

^۱ Variable Infiltration Capacity

^۲ University of Washington

^۳ Liang, Xu

۱-۵- اهداف تحقیق

همان طور که در بخش گذشته ذکر شد نیاز به اطلاعات دقیق در مقیاس بزرگ بسیار پراهمیت است چرا که محیط زیست یک سیستم یکپارچه و وسیع است که تمامی حوضه های آبریز همجوار بر هم تأثیرگذارند و از هم تأثیرپذیر هستند. ایران کشوری پهناور و دارای اقلیم های متفاوتی است که هر کدام دچار چالش هایی در زمینه مشکلات زیست محیطی و آبی هستند. بنابراین اجرا و کالیبراسیون این مدل کمک شایانی به درک درستی از وضعیت آبی کشور خواهد نمود تا بتوان برای آینده تصمیمات بهتری گرفت. بنابراین هدف کلی این مطالعه امکان سنجی مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC بر پایه داده های ماهواره های مشاهدات زمینی در یک حوضه آبریز در ایران می باشد. در کنار هدف اصلی عنوان شده، در این مطالعه اهداف جزئی نیز وجود دارند که شامل موارد زیر می باشد:

- ارزیابی داده های بارش ماهواره ای با داده های زمینی
- تحلیل آماری خروجی مدل رواناب
- واسنجی مدل با استفاده از داده های مشاهداتی جهت سنجش عملکرد مدل VIC

۱-۶- فرضیات تحقیق

در این مطالعه به اثبات یا رد فرضیات زیر پرداخته خواهد شد:

- ۱- داده های ماهواره ای دقت مناسبی نسبت به داده های مشاهداتی دارند؛
- ۲- با استفاده از داده های مشاهداتی و مدل هیدرولوژیکی VIC می توان رواناب را با دقت مناسبی شبیه سازی کرد؛
- ۳- استفاده حداکثری از داده های ماهواره ای و مدل هیدرولوژیکی می تواند منجر به تخمین مناسب رواناب مشاهداتی شود.



۲-۱- مقدمه

مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی (GHMs)^۱ به‌طور اثرگذار در دو دهه گذشته به یک زمینه پژوهشی جداگانه تبدیل شده است. دلیل استفاده از این مدل‌ها با این وسعت به این دلیل است که حوضه‌های آبریز بر هم تأثیرگذار و از هم تأثیرپذیرند. بنابراین نمی‌توان یک حوزه را واحدی جدا در نظر گرفت [۱۲]. تغییرات کاربری اراضی بالادست، تا فاصله ۸,۵ کیلومتری پایین‌دست خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۳]. تغییرات در این چرخه‌های جهانی در نهایت پیامدهای اجتماعی و اقتصادی دارند که در این زمینه از تجارت آب مجازی به‌عنوان عامل مهم چرخه آب جهانی و امنیت غذایی می‌توان نام برد [۱۴]. در حالی که جامعه علمی به‌مدت طولانی از اثر تغییرات آب‌وهوایی بر چرخه هیدرولوژیکی آگاه بوده و با آن برخورد کرده است، بازخورد این تغییرات در سال‌های اخیر نمود بیشتری پیدا کرده است که منجر به ایجاد مفهوم "سیستم آب جهانی"^۲ شده است، که جریان آب جهانی با روابط فیزیکی، اقتصادی به سیستم‌های دیگر متصل می‌شود. این سیستم با دخالت انسان از طریق ذخیره و خروج آب پیچیده‌تر شده است [۱۵]. با این‌همه استفاده از مدل‌های بزرگ‌مقیاس و جهانی امری ضروری در راستای درک درستی از شرایط موجود به‌نظر می‌رسد. در ادامه به کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی در مناطق بزرگ‌مقیاس پرداخته خواهد شد.

۲-۲- پیشینه تحقیق

در این بخش مطالعاتی که پیشتر با استفاده از مدل هیدرولوژیکی انجام گرفته شده است، در دو بخش مطالعات داخلی و خارجی ارائه خواهد شد.

^۱ Global Hydrology Models

^۲ Global Water System

۲-۱-۲- مطالعات داخلی

علی‌رغم این‌که این مدل در دنیا در سال‌های اخیر زیاد مورد استفاده قرار گرفته است اما به دلیل این‌که این مدل، جزء مدل‌های زمان‌گیر و غیرمتمعارف از لحاظ اجرا می‌باشد، کمتر در ایران از این مدل استفاده شده است. در ادامه به مطالعاتی که از این مدل در آن استفاده شده است اشاره خواهد شد.

- پرویز و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی عملکرد مدل VIC در توانایی روندیابی جریان در حوضه رودخانه سفیدرود پرداختند. آن‌ها این منطقه را به هجده سلول تقسیم کردند. مقایسه جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی با پارامترهای واسنجی مدل در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه، حاکی از توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه است [۱۶].

- میری و همکاران (۱۳۹۴) به ارائه مدلی پرداختند که این مدل از خروجی‌های ۴ مدل Noah، Mosaic، CLM و VIC استفاده می‌کرد. این مدل به همسان‌سازی داده‌های زمینی به‌طور مشترک توسط مراکز ناسا و نوآ با هدف شبیه‌سازی دقیق متغیرهای جریان و شرایط چرخه آب و انرژی می‌پردازد. پوشش جهانی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا به همراه سیستم مدل‌سازی ترکیبی داده‌های سنجش از دوری و مشاهدات زمینی از ویژگی‌های منحصر به‌فرد این مدل است. مقایسه‌های آماری انجام‌شده نشان داد که داده‌های این مدل در سطح ایران از دقت بسیار مناسبی برخوردار می‌باشد و میزان خطای این مدل در برآورد متوسط دمای ایستگاه‌های مورد بررسی بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است [۱۷].

- عزیزیان و شکوهی (۱۳۹۶) به ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC-3L برای شبیه‌سازی دبی رودخانه چالوس در مقیاس‌های زمانی مختلف پرداختند. آن‌ها با بررسی شاخص کارایی (نش-ساتکلیف) به‌دست آمده در مراحل واسنجی (۰/۸۴) و صحت‌سنجی (۰/۷۴) به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور از توانایی مناسبی جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه چالوس برخوردار می‌باشد. همچنین تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای کالیبراسیون مدل نشان داد که در

مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه)، ترتیب پارامترهای تأثیرگذار متفاوت می‌باشد و مقادیر آن‌ها نیز متفاوت است [۱۸].

- کوهی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه آبریز رودخانه سفید رود مدل قدیمی VIC-3L را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک واسنجی کردند. آن‌ها دریافتند که یکی از مزیت‌های واسنجی مدل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک برخلاف واسنجی با استفاده از داده‌های جریان مشاهداتی این است که می‌توان تغییرات مکانی پارامترهای مدل در سطح حوضه را نیز برآورد نمود که این مساله خود می‌تواند دید بهتری از عملکرد مدل در سطح حوضه را فراهم نماید [۱۹].
- شایقی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در حوضه رودخانه سفیدرود استان گیلان، داده‌های منابع بارشی دو پایگاه بازتحلیل شده و ماهواره‌ای را ارزیابی کردند. آن‌ها در این مطالعه از داده‌های بارش پایگاه داده ECMWF و همچنین PERSIANN استفاده کردند. آن‌ها دریافتند علی‌رغم اینکه داده‌های بارش ECMWF از کیفیت بهتری نسبت به داده‌های PERSIANN برخوردار است، در مدلسازی هیدرولوژیکی با مدل VIC-3L عملکرد خوبی نداشته و این PERSIANN بود که در شبیه‌سازی رواناب عملکرد بهتری داشته و نتایج بهتری را ارائه داد [۲۰].

۲-۲-۲- مطالعات خارجی (پژوهش‌های انجام شده در خارج از کشور)

۲-۲-۲-۱- استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC در مقیاس بزرگ

- استم^۱ و همکاران (۱۹۹۴) از مدل VIC برای یک دوره ده ساله شبیه‌سازی استفاده کردند و داده‌های به‌دست آمده از مدل را با داده‌های مشاهداتی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر خاک دو لایه در نظر گرفته شود، نتایج خروجی حاصل از مدلسازی رواناب، به داده‌های رواناب ایستگاه‌های مشاهداتی

^۱ Stamm, J. F

نزدیک‌تر خواهد بود [۲۱].

- پس از این مطالعه لیانگ و همکاران^۱ (۱۹۹۴) به اجرای مدل استم با دو لایه خاک در منطقه کانزاس پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به تأثیر پوشش گیاهی و خاک در هر سلول در بیلان آب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که رطوبت لایه دوم خاک، به میزان رواناب زیرسطحی وابسته است [۱۱].
- کایان آر^۲ و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر خشکسالی آینده بر رواناب و رطوبت خاک در جنوب غربی آمریکا را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC پیش‌بینی کردند. آن‌ها دریافتند که با توجه به روند گرمای جهانی و تأثیر آن بر روی داده‌های ورودی به مدل، باید منتظر خشکسالی‌های شدیدتری باشیم. این خشکسالی سبب کاهش رطوبت خاک و کاهش برف در کوهستان‌ها در اواخر بهار و تابستان می‌گردد بنابراین مدیریت منابع آب این منطقه را دچار چالش کرده است [۲۲].
- دادوال و همکاران^۳ (۲۰۱۰) به بررسی اثر تغییر کاربری زمین بر رواناب در حوضه آبریز رودخانه ماهانادی در هند پرداختند. در این مطالعه از مدل هیدرولوژیکی VIC برای تبدیل بارش به رواناب از سال ۱۹۷۲ تا سال ۲۰۰۳ استفاده شد. این تحقیق نشان داد که تغییر کاربری زمین باعث شده است، ۴۵۳٪ به حجم رواناب این منطقه افزوده شود [۲۳].
- وانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۲) در کشور چین منابع آب در دسترس را با کمک مدل هیدرولوژیکی VIC و داده‌های چرخش جهانی پیش‌بینی کردند. آن‌ها ابتدا رواناب خروجی را با کمک ۱۲۵ ایستگاه مشاهداتی کالیبره کرده و سپس با اجرای مدل برای آینده، به این نتیجه رسیدند که تا سال ۲۰۵۰ مقدار بارندگی در این کشور ۳ تا ۱۰ درصد افزایش خواهد داشت اما الگوهای بارشی دستخوش تغییر خواهند شد. این تغییرات بدان معنی است که زمان و مکان و حتی شدت بارش‌ها تغییر خواهند کرد و این تغییرات بر

^۱ Liang, X

^۲ Cayan, D. R

^۳ Dadhwal, V. K

^۴ Wang, G. Q

روی رواناب ایجاد شده اثر خواهد گذاشت و باعث بروز سیلاب‌های شدید خواهد شد و باید برای کنترل این سیلاب‌ها تمهیداتی دیده شود [۲۴].

- ژیا یی و همکاران^۱ (۲۰۱۴) به ارزیابی توانایی شبیه‌سازی رطوبت خاک چهار مدل هیدرولوژیکی (VIC, SAC, Mosaic, Noah) در دو منطقه اکلوهاما و ایلینوس ایالات متحده آمریکا برای سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۴ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به اینکه هر چهار مدل رطوبت خاک را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند اما با وجود این بیش برآورد، هر چهار مدل توانایی شبیه‌سازی رطوبت خاک را دارند، مدل VIC بهترین عملکرد را در منطقه اکلوهاما داشت اما Noah در دو منطقه عملکرد بهتری داشت [۲۵].

- نجفی و مرادخانی^۲ (۲۰۱۵) برای منطقه وسیعی از آمریکای شمالی برای شبیه‌سازی سیلاب‌های شدید از این مدل استفاده کردند. آن‌ها با کمک داده‌های گردش جهانی مدل را برای سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ در آن منطقه کالیبره و برای سال‌های ۲۰۷۰-۲۰۱۴ با ۸ سناریو پیشبینی کردند. نتایج نشان داد با توجه به تغییرات الگوهای بارش، سیلاب‌های شدید فصلی در دو منطقه راکیز^۳ و غرب کیس‌کادز^۴ افزایش می‌یابد [۲۶].

- لیونس و همکاران^۵ (۲۰۱۵) در حوضه بزرگ مری دارلینگ^۶ استرالیا با استفاده از مدل VIC به شبیه‌سازی رطوبت خاک و رواناب سطحی پرداختند که پس از گرفتن خروجی‌های اولیه به کمک ۱۶۹ ایستگاه موجود در حوضه این مدل را برای این حوضه کالیبره کردند. آن‌ها دریافتند که صحت خروجی‌های این مدل به صورت روزانه بالا نیست اما خروجی‌های ماهانه صحت بالایی دارند و می‌توان از این مدل برای

^۱ Xia, Y., et al

^۲ Najafi, M. R., & Moradkhani, H.

^۳ Rockies

^۴ Cascades

^۵ Lievens, H

^۶ Murry-Darling

حوضه‌های بزرگ استفاده کرد [۲۷].

- بی‌هایون و همکاران^۱ (۲۰۱۶) به مقایسه عملکرد چهار مدل هیدرولوژیکی جهانی (VIC, CLM, Noah, Mosaic) در شبیه‌سازی رطوبت خاک در منطقه فلات تبت برای سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۶ پرداختند که به این نتیجه رسیدند مدل VIC بهترین تخمین را داشته است اما هر چهار مدل توانایی شبیه‌سازی و تخمین رطوبت خاک را در این منطقه داشته‌اند [۲۸].
- مارکرت و همکاران^۲ (۲۰۱۸) در منطقه جنوب شرق آسیا برای بررسی تأثیر تغییرات کاربری زمین بر خصوصیات هیدرولوژیکی از مدل VIC استفاده کردند و پس از کالیبره کردن داده‌ها برای سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۸۲، در اعتبارسنجی برای سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۱، به کیفیت "خوب" تا "خیلی خوب" در شبیه‌سازی ماهیانه داده‌ها رسیدند. این مطالعه نشان داد که افزایش سطح جنگل باعث کاهش میزان رواناب و افزایش تبخیر تعرق می‌شود در حالی که افزایش سطح زراعت باعث افزایش رواناب و کاهش تبخیر تعرق می‌شود [۲۹].
- ماجودر و همکاران^۳ (۲۰۱۹) در حوضه رودخانه پتوماک در ساحل شرقی ایالات متحده با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC به ارزیابی حساسیت آب قابل دسترس بر اساس خطای داده‌های بارش پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند ماه‌های می و آوریل بیشترین حساسیت را به خطاهای بارش دارند. زیرحوضه‌های حساس مشخص شدند و همچنین اطلاعات تنوع بیلان آب با افزایش تنوع داده‌های بارش افزایش یافت [۳۰].

۲-۲-۲-۲- کاربرد مدل VIC در مناطق کوچک

- مک‌فرسون^۴ (۲۰۱۶) در دانشگاه اوکلوهاما به بررسی رودخانه قرمز در ایالات متحده آمریکا پرداخت. در

^۱ Bi, H

^۲ Markert, K

^۳ Majumder, R

^۴ McPherson, R.

این مطالعه از داده‌های CIMP5 جهت پیش‌بینی استفاده گردید و این داده‌ها به مدل VIC معرفی و نهایتاً مدل‌سازی انجام گرفت. آن‌ها از سه سناریو برای پیش‌بینی داده‌های هواشناسی استفاده کردند که هر سه این سناریو نشان دادند که جریان رودخانه در آینده کاهش چشم‌گیری خواهد داشت و مدیران باید به فکر آینده این اکوسیستم باشند [۳۱].

- نازندرا و الدهو^۱ (۲۰۱۸) تأثیر بارش‌های احتمالی روزانه در حوضه رودخانه گداوری هند برای سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۹۹ را با استفاده از مدل VIC مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ابتدا با دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 بارش را پیش‌بینی کردند و سپس شرایط تبخیر-تعرق، جریان زیر سطحی و جریان سطحی را در این حوضه بررسی کردند. [۳۲].

- ونجون^۲ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه رود زرد در چین پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل VIC رواناب را شبیه‌سازی کردند. سپس با کمک ضریب همبستگی اسپیرمن به آنالیز آن‌ها با دما پرداختند. نتیجه به‌دست آمده نشان داد که با افزایش دما مقدار بارندگی به‌صورت معناداری روند کاهشی یافته و باران‌های شدید سیل‌آسا نیز افزایش یافته است. مدل VIC شبیه‌سازی خوبی برای دبی خروجی در ایستگاه تانگهای نشان داد. که در آن ضریب همبستگی برای دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب ۹۱٪ و ۹۳٪ است [۳۳].

- کلیفتون^۳ و همکاران (۲۰۱۸) تأثیرات تغییر اقلیم را بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب در منطقه نیمه خشک اورگان ایالات متحده آمریکا با استفاده از مدل VIC بررسی کردند. یکی از نتایج مطالعه آن‌ها این بود که تغییر اقلیم در آینده باعث افزایش سیلاب‌های شدید در این منطقه خواهد شد که این امر افزایش سیلاب‌ها، باعث تخریب جاده‌ها، آبراهه‌ها و اردوگاه‌ها می‌شود و جان گردشگران را به خطر خواهد

^۱ NARENDRA HENGADÉ & TIELDHO

^۲ Lu, Wenjun

^۳ Caty F. Clifton

انداخت [۳۴].

- ملک‌پور^۱ و همکاران (۲۰۱۸) در ایالت کالیفرنای آمریکا به مدلسازی بر اساس داده‌های گردش جهانی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC و داده‌های گردش جهانی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به این نتیجه رسیدند که در آینده بارش‌ها در فصول پر بارش افزایش و در فصول دیگر خشک‌تر خواهد شد که این بر روی منابع آب در دسترس اثرگذار خواهد بود که مهم‌ترین آن جریان رواناب سطحی است. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر و کامل‌تر برای آینده کمک کند [۳۵].

- راکویدز^۲ و همکاران (۲۰۱۹) دو مدل بزرگ مقیاس mHM و VIC را در ایالات متحده آمریکا مقایسه کردند. آن‌ها با استفاده از ۴۹۲ زیرحوضه مدل‌ها را کالیبره کردند. در این مطالعه مشخص شد مدل VIC پس از کالیبراسیون، مقدار تبخیر-تعرق را نسبت به مدل mHM بیشتر تخمین می‌زند که این باعث کاهش تخمین رواناب می‌گردد. در ادامه برای اینکه مقایسه عادلانه گردد به بررسی تعداد متغیرهای کالیبراسیون پرداختند که برای VIC تعداد ۱۴ عدد و برای mHM تعداد ۴۸ عدد بود. نتایج نشان داد این پارامترها در کالیبراسیون رفتار مشابهی دارند و نهایتاً مدل VIC ارزیابی بهتری نسبت به مدل دیگر دارد [۳۶].

- کراتزرت و همکاران^۳ (۲۰۱۹) با توجه به اینکه مدل‌های بارش-رواناب به صورت زیرحوضه‌ای عملکرد بهتری نشان می‌دهند، توانستند با استفاده از علم آموزش ماشین^۴، متدی ارائه دهند که مدل‌ها در مقیاس بزرگ هم عملکرد خوبی داشته باشند. در این مطالعه آن‌ها ۱۴ مدل را در مقیاس کوچک و بزرگ مقایسه کردند. در این تحقیق زمانی که مدل VIC در مقیاس کوچک کالیبره شد، به ضریب نش-ساتکلیف ۰,۷۲،

^۱ Iman Mallakpour

^۲ Rakovec

^۳ Kratzert, F

^۴ Machine Learning

و زمانی که کل ایالات متحده را مدل‌سازی کردند به ۰,۴۶ رسیدند [۳۷].

- گوچ^۱ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی مدل‌های پایه فیزیکی، مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی و همچنین مدل‌های درختی در بالادست دریاچه اری^۲ در کانادا پرداختند. آن‌ها با مورد توجه قرار دادن ضریب نش-ساتکلیف، رواناب خروجی هر مدل را با دوره بازگشت ۵ ساله، ۱۰ ساله و ۱۰۰ ساله مقایسه کردند که نهایتاً مشخص شد مدل‌های درختی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. در این مطالعه مدل VIC به عنوان مدل پایه فیزیکی مورد آزمایش قرار گرفت [۳۸].
- وانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خشکسالی تحت سناریوهای مختلف CIMP5 در رودخانه مروارید چین پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از مدل هیدرولوژیکی VIC نیز در بررسی رواناب استفاده کردند. این مطالعات نشان داد طی سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۰۵ قسمت شمالی رودخانه خشکسالی را تجربه کرده است و همچنین تقریباً تمامی سناریوها این خشکسالی را پیش‌بینی می‌کنند. در ادامه مطالعه، آن‌ها به بررسی خشکسالی‌های آینده پرداخته و همچنین رواناب در آن دوره را نیز پیش‌بینی کردند [۳۹].
- احمد و حسین^۴ (۲۰۱۹) به مطالعه در مورد به حداکثر رساندن تولید نیروگاه‌های آبی دو سد در ایالات متحده آمریکا با بهینه‌سازی عملیات مخزن بر اساس پیش‌بینی ورودی کوتاه‌مدت که حاصل مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوایی عددی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از مدل هیدرولوژیکی VIC جهت تبدیل بارش به رواناب استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقدار قابل توجه بیشتری از انرژی هیدروالکتریک می‌تواند به‌طور مداوم نسبت به عملیات سنتی بدون بهینه‌سازی و پیش‌بینی آب‌وهوا حاصل شود و همچنین اهداف کنترل سیلاب و ایمنی سد نیز هنگام حداکثر رساندن توان نیروگاه برقایی به خطر نیفتد [۴۰].

^۱ Gauch, M

^۲ Lake Erie Watershed

^۳ Li, J., Wang et al.

^۴ Shahryar Khalique Ahmad, Faisal Hossain

- زمانی سبزی^۱ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی آب قابل دسترس در حوضه رودخانه قرمز در اوکلوهاما ایلات متحده آمریکا پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC جهت شبیه‌سازی رواناب و سناریوهای مختلفی از CIMP5 نقاطی را که در آینده تحت استرس آبی قرار می‌گیرند را در این منطقه پیش‌بینی کردند [۴۱].
- ژانگ بی^۲ و همکاران (۲۰۲۰) در ایالات متحده آمریکا به بررسی روند تبخیر-تغرق به وسیله چندین مدل هیدرولوژیکی از جمله VIC.4.0.3, VIC.4.1.2, Noah و غیره استفاده کردند که نتایج نشان داد تعدادی از مدل‌ها همچون VIC.4.0.3 تبخیر-تغرق را صعودی و تعدادی از مدل‌ها از جمله VIC.4.1.3 روند را نزولی پیش‌بینی کردند [۴۲].
- باتاچاریا^۳ و همکاران (۲۰۲۰) در شمال هیمالیا ابتدا داده‌های بارش و دما ۵ پایگاه داده بازتحلیل شده CFSR, MERRA, JRA-55, ERA-Interim و WFDEI را به داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی مقایسه کرده و سپس با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC به شبیه‌سازی رواناب پرداختند. نتایج ارزیابی داده‌های دما و مقایسه آن‌ها با ایستگاه‌های مشاهدات زمینی نشان داد، داده‌های دما اختلاف چشمگیری با هم نداشتند و همه آن‌ها دقت خوبی داشتند. پایگاه داده ERA-Interim نسبت به دیگر داده‌ها در تخمین بارش دقت بالاتری داشت که این باعث برتری این پایگاه داده در شبیه‌سازی رواناب با کمک مدل VIC شد. [۴۳]

۲-۳- جمع‌بندی

با توجه به تحقیقات انجام گرفته در سراسر دنیا، مدل هیدرولوژیکی VIC مدل پرکاربردی بوده است و کمک بسیاری برای دید بهتر نسبت به شرایط کنونی و شرایطی که ممکن است در آینده با آن روبرو گردیم، به محققین

^۱ Sabzi, H. Z

^۲ Zhang, B.

^۳ Bhattacharya

ارائه داده است.

از معایب این مدل هیدرولوژیکی، بزرگ مقیاس بودن و کاربر پسند نبودن آن است که باعث شده است کمتر در ایران مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از محاسن آن شبکه بندی بودن این مدل است که می تواند با داده های ماهواره ای هماهنگ شده و پردازش های قبل از مدلسازی را کاهش دهد. در مطالعات انجام گرفته از داده های ماهواره ای کمتر استفاده گردیده لذا در این مطالعه سعی خواهد شد در یک حوضه آبریز با استفاده از داده های ماهواره ای مدل هیدرولوژیکی VIC را اجرا نمود و به بررسی بیشتر این مدل و نتایج آن پرداخت. نوآوری این تحقیق ارزیابی توانایی مدل هیدرولوژیکی VIC و داده های ماهواره ای، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه NSGA-II است که تاکنون از این الگوریتم استفاده نشده است.



فصل سوم:

مواد و روش‌ها
(روش‌شناسی تحقیق)

۳-۱- مقدمه

در این فصل به معرفی و بررسی روش تحقیق، داده‌ها و روش‌ها و همچنین ابزارهای مورد استفاده در این مطالعه پرداخته می‌شود.

۳-۲- مدل هیدرولوژیکی VIC

مدل VIC یک مدل نیمه توزیعی بزرگ‌مقیاس است که قابلیت شبیه‌سازی تحت شرایط بیلان انرژی و آبی در مقیاس مکانی مختلف و با گام زمانی ساعتی و روزانه را داراست. لازم به ذکر است که در این مدل شبیه‌سازی به صورت سلول به سلول انجام می‌گیرد و هر سلول جدا از دیگر سلول‌ها شبیه‌سازی می‌گردد که در انتها همه سلول‌ها به هم متصل شده و می‌توان میزان رواناب را در هر نقطه ارائه داد.

VIC در بسیاری از رودخانه‌های مهم و بزرگ دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. البته این مدل یک مدل جهانی است و می‌توان در مقیاس‌های بزرگ حتی مدل‌سازی قاره‌ها استفاده کرد [۴۴].

این مدل توسط لیانگ و همکاران (۱۹۹۴) در دانشگاه واشنگتن در آمریکا توسعه یافت. امروزه این مدل در آزمایشگاه دکتر لتنمایر^۱ در حال توسعه است و به تکامل نسبی رسیده است. آخرین ورژن این مدل، VIC.5.1.0 است که در حساب کاربری مدل در سایت GitHub^۲ قابل دریافت است. در این ورژن داده‌های هواشناسی باید به صورت ساعتی به مدل ارائه گردد.

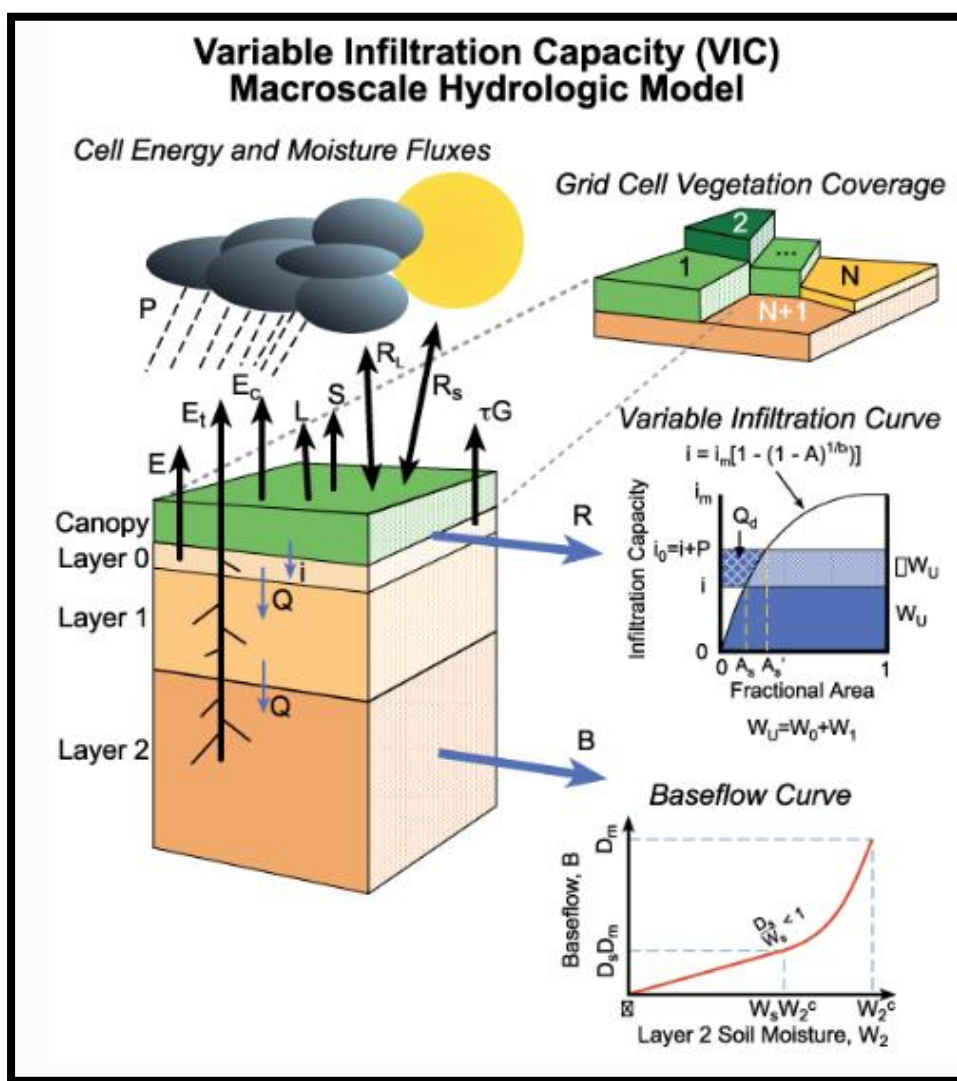
در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های ساعتی در حوزه مورد مطالعه، از آخرین ورژن سری چهارم یعنی VIC.4.2.d استفاده گردید که این ورژن هم در حساب کاربری مدل در سایت GitHub به صورت رایگان در دسترس است.

^۱ Dennis P. Lettenmaier

^۲ <https://github.com/UW-Hydro/VIC>

مدل VIC مجموعه‌ای از کدهای نوشته‌شده در زبان برنامه‌نویسی C هستند که باید کامپایل^۱ شوند و بعد مورد استفاده قرار گیرند. این مدل برای سیستم عامل لینوکس^۲ طراحی شده است اما در سیستم عامل ویندوز^۳ هم قابل اجراست اما پشتیبانی از سمت توسعه‌دهندگان مدل فقط در لینوکس انجام می‌گیرد.

در شکل ۱-۳ شماتیک عملکرد مدل هیدرولوژیکی VIC نشان داده شده است.



شکل ۱-۳. شماتیک مدل هیدرولوژیکی VIC [۴۵]

^۱ Compile
^۲ Linux
^۳ Windows

۳-۲-۱- داده‌های ورودی مدل VIC

هر یک از ورژن‌های مدل VIC به ۴ صورت قابل اجراست:

- روش کلاسیک^۱
- روش تصویر^۲
- روش CESM (این روش در حال توسعه است و هیچ پشتیبانی از آن انجام نمی‌گیرد).
- روش کدهای پایتون^۳

برای هر کدام از این روش‌ها، کدهای جداگانه‌ای نوشته شده است و ورودی‌ها باید در قالب آن روش تعریف و به مدل ارائه شود. در این مطالعه از روش کلاسیک استفاده شده است. در این روش باید داده‌ها به متن^۴ تبدیل گردد.

۳-۲-۱-۱- فایل کنترل عمومی^۵

این فایل بیشتر به توضیح نحوه اجرای مدل چه از لحاظ گام‌های زمانی، اندازه سلول‌ها، نوع تعادل آبی و انرژی و غیره می‌پردازد. همچنین در این فایل مکان قرارگیری داده‌های دیگر ورودی تعریف می‌گردد بنابراین اصلی‌ترین قسمت مدل، این قسمت است. توضیحات این فایل در سایت مدل^۶ قرار دارد.

^۱ Classic

^۲ Image

^۳ Python

^۴ Text

^۵ Global Param

^۶ <https://vic.readthedocs.io/en/vic.4.2.d/Documentation/GlobalParam/>

۳-۲-۱-۲- داده‌های خاک^۱

این فایل شامل داده‌های مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک برای هر سلول است. در این فایل اطلاعاتی مربوط به هر سلول از جمله شماره سلول شبکه، طول و عرض جغرافیایی سلول و دیگر مشخصات خاک به مدل معرفی می‌شود که در ادامه به شرح مهم‌ترین آن‌ها پرداخته می‌شود که در کالیبراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند و بقیه پارامترها در ضمیمه شرح داده خواهند شد:

b_{infil} : این پارامتر معرف منحنی نفوذ متغیر^۲ است. کمترین مقدار آن $0,00001$ و بیشترین مقدار آن $0,4$ است. با افزایش این پارامتر رواناب بیشتری تولید می‌گردد.

D_{smax} : حداکثر سرعت جریان پایه در هر سلول شبکه بر حسب (mm/day) است که با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) تخمین زده می‌شود. این پارامتر بین $0-30$ در نظر گرفته می‌شود.

D_s : کسری از پارامتر D_{smax} می‌باشد، هنگامی که جریان پایه غیرخطی می‌شود. برای این پارامتر می‌توان عددی بین $0-1$ در نظر گرفت. با ضرب این پارامتر در D_{smax} ، سرعتی که جریان زیرسطحی در پایین‌ترین لایه خاک، جریان خطی به غیرخطی تبدیل می‌شود. این پارامتر بدون واحد است.

W_s : درصدی از حداکثر رطوبت خاک است، هنگامی که جریان پایه غیرخطی رخ می‌دهد. مقدار آن به‌طور معمول بین $0,5-0,9$ می‌باشد.

D_1 : عمق بالاترین لایه خاک است که بین 5 سانتی‌متر تا 40 سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

D_2 : عمق لایه دوم خاک است که بین 40 سانتی‌متر تا 2 متر در نظر گرفته می‌شود (البته این مقادیر قطعی نیستند و می‌توان حد بالا و پایین آن‌ها را در کدهای اولیه قبل از کامپایل کردن مدل تغییر داد).

D_3 : عمق لایه سوم خاک است که بین 40 سانتی‌متر تا 2 متر در نظر گرفته می‌شود (لایه سوم زمانی تعریف می‌شود که در فایل کنترل عمومی ۳ لایه تعریف کرده باشیم). در شکل ۳-۲، نمونه‌ای از فایل خاک ورودی مدل

^۱ Soil Param

^۲ Variable infiltration curve

برای سه لایه نشان داده شده است.

Run	gridcel	Lat	Long	Infilt	Ds	Ds_Max	Ws	C
	Expt1 Expt2	Expt3	Ksat1	Ksat2 Ksat3	Phi1	Phi2 Phi3	Moist1	
	Moist2	Moist3	Elev	Depth1	Depth2	Depth3		
	Ave_T Dp	Buble1	Buble2	Buble3	Quarz1			
	Quarz2	Quarz3	BulkDen1	BulkDen2	BulkDen3			
	SoilDen1	SoilDen2	SoilDen3	Off-GMT	WcrFT1			
	WcrFT2	WcrFT3	WpFT1 WpFT2	WpFT3	Z0_Soil (rough)	Z0		
	_Snow	Precp	Resm1	Resm2 Resm3	FS_ACTIV			
1	1	35.75	52.25	0.25	0.1736	0.3	40.1	1.138
	9.99	556.56	332.39	332.39	-9999	-9999	-9999	68.9
	160.76	51.84	2559.36	0.3	2.5	0.225734	9.3	4
	30.52	34.94	34.94	0.397	0.353	0.353	1416	1505
	2701.97	2701.97	3.5	0.533	0.518	0.518	0.322	0.313
	0.001	0.0005	470.5	0.1	0.1	0.1	1	

شکل ۳-۲. نمونه‌ی فایل ورودی خاک برای ۳ لایه خاک

۳-۲-۱-۳- پارامترهای پوشش گیاهی^۱

این بخش فایل ورودی نشان دهنده کاربری اراضی و نوع پوشش گیاهی است که شامل دو قسمت اجباری و اختیاری است. پارامترهایی که برای پوشش گیاهی نیاز است به مدل معرفی گردد، پارامترهای اجباری شامل موارد زیر است که برای یک سلول شرح داده می‌شود:

- شماره سلول که بر اساس شماره سلول در فایل خاک می‌باشد (ستون اول)
- تعداد کلاس‌های موجود در سلول (ستون دوم، خط اول)
- شماره کلاس پوشش گیاهی (ستون دوم، خط دوم تا آخرین خط سلول)
- درصد تحت پوشش هر کلاس در سطح سلول (ستون سوم)
- عمق ریشه در هر لایه (ستون چهارم، ششم و هشتم)
- نسبت توسعه ریشه در هر لایه (ستون پنجم، هفتم و نهم)

```
86340 5
1 0.642534 0.10 0.05 1.00 0.45 5.00 0.50
4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895 4.895
6 0.194570 0.10 0.10 1.00 0.65 1.00 0.25
0.125 0.138 0.200 0.562 1.688 3.550 4.188 3.825 3.012 1.975 0.562 0.213
7 0.122172 0.10 0.10 1.00 0.65 1.00 0.25
0.225 0.287 0.275 0.275 0.675 2.537 3.463 3.212 1.350 0.337 0.250 0.237
10 0.013575 0.10 0.10 1.00 0.70 0.50 0.20
0.162 0.150 0.162 0.275 0.525 1.038 0.962 0.550 0.338 0.200 0.138 0.138
11 0.027149 0.10 0.10 0.75 0.60 0.50 0.30
0.100 0.100 0.213 0.725 1.225 1.637 1.763 1.425 0.837 0.400 0.175 0.125
```

۳-۲-۱-۴- کتابخانه گیاهی^۱

٢٩

#Class	OvrStry	Rarc	Rmin	JAN-LAI	FEB-LAI	MAR-LAI
	APR-LAI	MAY-LAI	JUN-LAI	JUL-LAI	AUG-LAI	SEP-
LAI	OCT-LAI	NOV-LAI	DEC-LAI	JAN-ALB	FEB-ALB	MAR-
ALB	APR-ALB	MAY-ALB	JUN-ALB	JUL-ALB	AUG-ALB	SEP-
ALB	OCT-ALB	NOV-ALB	DEC-ALB	JAN-ROU	FEB-ROU	MAR-
ROU	APR-ROU	MAY-ROU	JUN-ROU	JUL-ROU	AUG-ROU	SEP-
ROU	OCT-ROU	NOV-ROU	DEC-ROU	JAN-DIS	FEB-DIS	MAR-
DIS	APR-DIS	MAY-DIS	JUN-DIS	JUL-DIS	AUG-DIS	SEP-
DIS	OCT-DIS	NOV-DIS	DEC-DIS	WIND_H	RGL	SolAtn
	WndAtn	Trunk	COMMENT			
1	1	60.0	150.	3.400	3.400	3.500
				3.700	4.000	4.400
				4.400	4.400	4.300
				4.200	3.700	3.500
				3.400	0.12	0.12
				0.12	0.12	0.12
				0.12	0.12	0.12
				1.476	1.476	1.476
				1.476	1.476	1.476
				1.476	1.476	1.476
				1.476	1.476	1.476
				1.476	1.476	1.476
				8.04	8.04	8.04
				8.04	8.04	8.04
				8.04	8.04	8.04
				8.04	8.04	8.04
				8.04	8.04	8.04
				50.0	30	0.5
				0.2	0.5	0.5
				Evergreen	Needleleaf	

شکل ۳-۴. نمونه فایل ورودی کتابخانه گیاهی

۳-۲-۱-۵- داده‌های هواشناسی^۱

این داده مهم‌ترین و تأثیرگذارترین داده ورودی است. برای هر سلول نیاز است فایل جداگانه‌ای تعریف کرد که در نام آن، مختصات جغرافیایی مرکز سلول باید عنوان گردد تا مدل بتواند آن را شناسایی کند. این شناسایی منطبق با فایل ورودی خاک است. هر فایل به تعداد روزهای سری زمانی مدل‌سازی سطر دارد که هر سطر نشان‌دهنده اطلاعات یک روز می‌باشد. این داده‌ها شامل چهار قسمت است:

- بارش^۲ بر حسب میلی‌متر (mm) (ستون اول)
- حداکثر دما^۳ بر حسب درجه سانتی‌گراد (C) (ستون دوم)
- حداقل دما^۴ بر حسب درجه سانتی‌گراد (C) (ستون سوم)
- میانگین سرعت روزانه باد^۵ بر حسب متر بر ثانیه (m/s) (ستون چهارم)

در شکل ۳-۵، نمونه فایل ورودی هواشناسی نشان داده شده است.

^۱ Meteorological Forcing Data File

^۲ Precipitation

^۳ Maximum Temperature

^۴ Minimum Temperature

^۵ Daily Average Wind Speed

0	-1.177	-1.546	2.87
0	-1.177	-1.546	2.87
0	-2.174	-2.807	1.535
0	-1.36	-1.573	1.949
0	0.403	-0.396	1.053
2.6	-1.9	-2.37	2.611
1.5	-3.911	-4.336	2.63
1.4	-4.412	-5.169	1.702
1	-5.319	-5.943	2.133
3.3	-5.177	-5.458	1.187
0	-7.242	-8.638	0.357
0	-7.092	-8.001	1.268
0	-10.555	-11.52	2.336
0	-7.82	-8.517	0.626

شکل ۳-۵. نمونه فایل ورودی هواشناسی

۳-۲-۱-۶- باندهای ارتفاعی^۱

به صورت پیش فرض، مدل سلول را مسطح در نظر می گیرد که این باعث ایجاد اختلال در روند مدل سازی در ارتفاعات می گردد. برای جلوگیری از این اختلال هر سلول به باندهای ارتفاعی تقسیم می شود و در نهایت درصد هر باند ارتفاعی در این فایل به مدل ارائه می شود. این فایل یک فایل کمکی و غیر اجباری است که موجب درک صحیح مدل از فشار و نوع بارش در هر سلول می گردد. برای تهیه این فایل از اطلاعات رقومی استفاده می گردد. در شکل ۳-۶، نمونه ای از این فایل ارائه گردیده است.

86340	0.206	0.200	0.204	0.195	0.195	1148.8	1627.3	1814.2	1956.1	2117.4	0.160	0.202	0.217	0.209	0.212
86804	0.256	0.248	0.248	0.248	0.000	1230.8	1598.6	1852.9	2122.6	0.0	0.224	0.248	0.256	0.272	0.000
85875	0.205	0.200	0.200	0.200	0.195	904.0	1378.0	1680.2	1887.7	2149.6	0.160	0.194	0.208	0.217	0.221
86339	0.205	0.200	0.200	0.200	0.195	381.5	728.4	1129.1	1486.2	1909.1	0.153	0.173	0.204	0.238	0.232

شکل ۳-۶. نمونه فایل ورودی باندهای ارتفاعی و باندهای برف در ۵ باند برای ۴ سلول

در نهایت پس از تهیه و جمع آوری داده های ورودی، مدل اجرا می گردد و خروجی ها برای هر سلول به دست می آید. این خروجی ها شامل موارد زیر است:

^۱Elevation Bands

- تبخیر-تغرق^۱
- رواناب^۲
- جریان پایه^۳
- آب معادل برف^۴
- رطوبت خاک در هر لایه از خاک^۵

نکته قابل توجه این است که رواناب هر سلول در تعامل با سلول‌های اطراف است، بنابراین در مرحله دوم اجرای مدل باید روندیابی جریان^۶ انجام گیرد.

۳-۳- مدل روندیاب

این مدل که توسط لوهمان^۷ و همکاران [۴۶, ۴۵] توسعه یافت، یک نسخه از معادلات خطی سنت-ونان^۸ را حل می‌کند. این مدل متشکل از کدهایی در زبان فورترن^۹ می‌باشد که باید کامپایل شود. در ادامه به ورودی‌های این مدل پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی ورودی‌های این مدل فایل متنی هستند. در شکل ۳-۷ شماتیک مدل روندیاب نشان داده شده است.

^۱ Evapotranspiration

^۲ Runoff

^۳ Base Flow

^۴ Snow Water

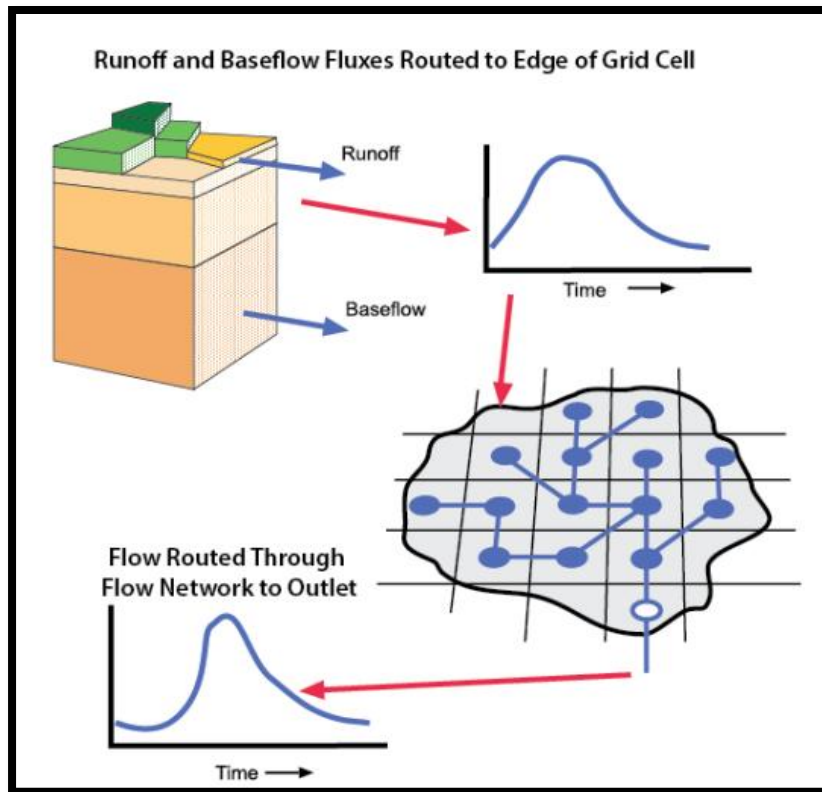
^۵ Soil moisture

^۶ Routing

^۷ Lohmann

^۸ Saint-Venant

^۹ Fortran



شکل ۳-۷. شماتیک مدل روندیاب [۴۵]

۳-۳-۱- ورودی‌های مدل روندیاب

۳-۳-۱-۱- فایل کنترل عمومی

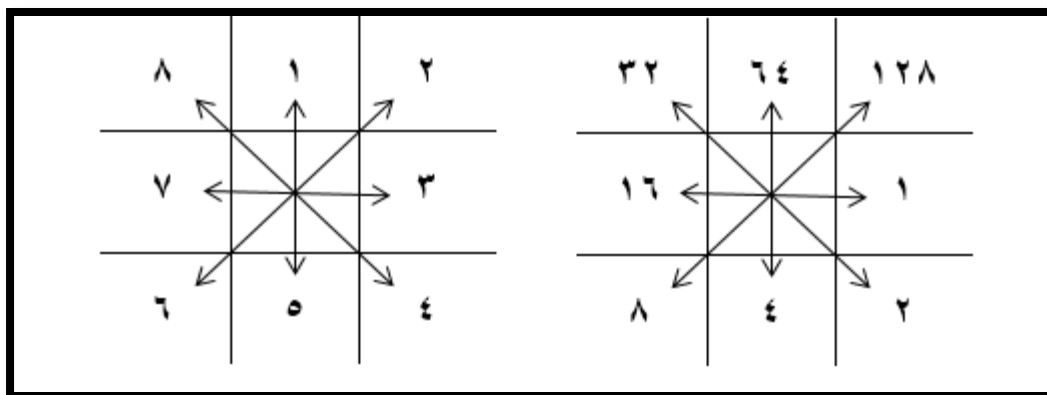
این فایل که یک فایل متنی می‌باشد، برای معرفی محل فایل‌های ورودی و خروجی، زمان شروع و پایان مدل‌سازی و غیره استفاده می‌شود.

۳-۳-۱-۲- مسیر جریان^۱

این فایل بیشترین تأثیر را در میزان رواناب دارد. برای این منظور به هر سلول عددی بین ۱ تا ۸ اطلاق می‌شود که بیان‌گر جهت رواناب خروجی آن سلول است. در شکل ۳-۸ جهت هر عدد مشاهده می‌شود که در این شکل جهت رواناب قابل قبول مدل و خروجی‌های نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ مقایسه شده است.

^۱ Flow Direction

^۲ Geographic information system



شکل ۳-۸. مقایسه جهت جریان در GIS (سمت راست) و VIC (سمت چپ)

۳-۱-۳-۳- فایل درصد مشارکت^۱

این فایل نشان‌دهنده میزان مشارکت هر سلول در رواناب خروجی از آن می‌باشد. به هر سلول عددی بین صفر تا یک اطلاق می‌گردد.

۳-۱-۳-۴- فایل ایستگاه خروجی^۲

این فایل شامل نام و مختصات ایستگاهی است که رواناب در آن برآورد می‌گردد. مختصات بر اساس شبکه‌بندی منطقه تعریف می‌گردد. به این صورت که تعداد سلول‌هایی که به صورت افقی و عمودی بین سلولی که ایستگاه در آن قرار دارد و سلول گوشه پایین سمت چپ، لحاظ می‌گردد.

۳-۱-۳-۵- فایل هیدروگراف^۳

این فایل که شامل ۱۲ سطر و ۲ ستون می‌باشد، نشان‌گر سهم هر ماه از رواناب کل سال است. این اعداد بین صفر تا یک هستند که جمع کل آن‌ها برابر یک می‌شود.

^۱ Fraction File

^۲ Station File

^۳ UH File

۳-۳-۱-۶- فایل اندازه سلول^۱

این فایل که یک ورودی اختیاری است، اندازه هر سلول بر حسب متر می‌باشد. علاوه بر موارد یاد شده، ورودی‌های دیگری نیز می‌توان به مدل معرفی کرد که آن‌ها نیز اختیاری هستند و در این مطالعه از آن‌ها استفاده نگردیده است. در این جا فقط از آن‌ها نام برده می‌شود.

- فایل انتشار^۲

- فایل سرعت جریان^۳

۳-۴- منطقه مطالعاتی

علی‌رغم اینکه مدل هیدرولوژیکی VIC بیشتر در حوضه‌های بزرگ استفاده می‌گردد، در این مطالعه سعی شد از مدل هیدرولوژیکی VIC در یک منطقه کوچک استفاده شود که علاوه بر در دسترس بودن اطلاعات کافی برای مطالعه، بکر نیز باشد. از آن جایی که در اکثر حوضه‌های آبریز کشور، سدهای بسیاری احداث شده و علاوه بر این در بیشتر این حوزه‌ها عملیات‌های آبخیزداری انجام گرفته است، انتخاب منطقه مطالعاتی کار دشواری بود که با راهنمایی کارشناسان و اساتید راهنما، منطقه حوزه آبریز حبله‌رود شمالی برای مطالعه انتخاب گردید. از دلایل انتخاب این حوضه آبریز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- وجود ۴ ایستگاه هیدرومتری قدیمی در سطح حوضه که باعث تسهیل فرآیند واسنجی مدل می‌گردد.
- وجود چندین ایستگاه باران‌سنجی قدیمی که باعث افزایش دقت مدلسازی می‌گردد.
- همکاری مسئولین دفتر مدیریت پایدار آب و خاک سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری جهت در اختیار دادن داده‌های موجود حوزه آبریز حبله رود.

^۱ Xmask

^۲ Diffusion

^۳ Vellocity

۳-۴-۱- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه حبله رود شمالی

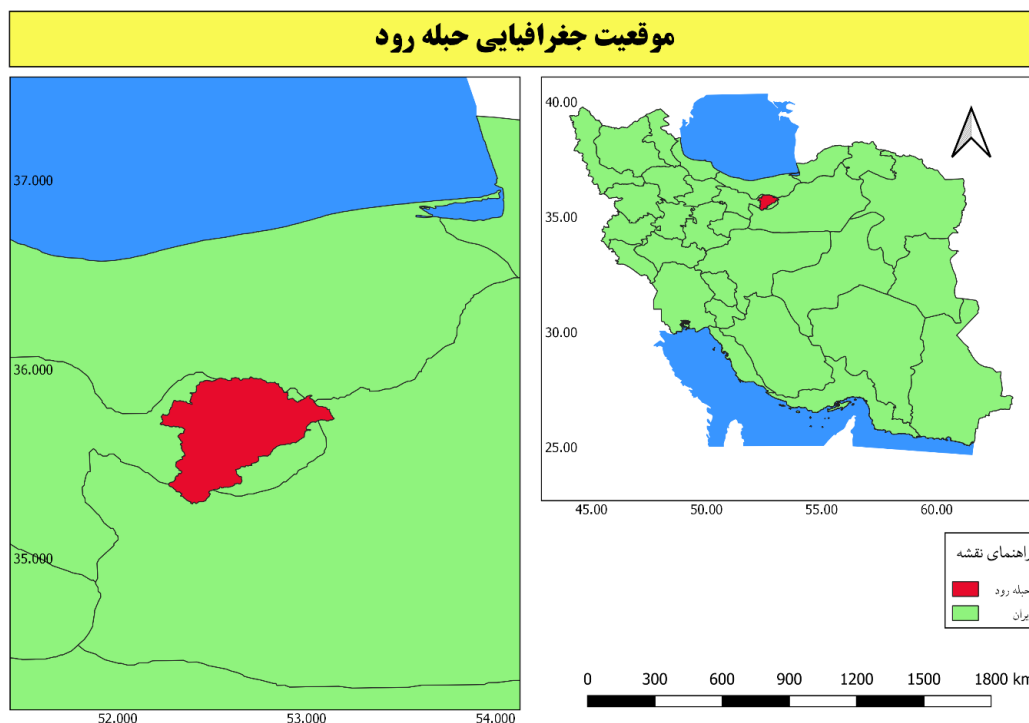
حوضه حبله رود در حاشیه جنوبی البرز مرکزی با مساحتی بالغ بر ۳۲۶۹۹۱ هکتار، بین ۵۲ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۳-۹). از نظر تقسیمات کشوری بخش اعظم آن در استان تهران و قسمتی از شمال آن در استان مازندران و قسمتی از جنوب آن در استان سمنان قرار گرفته است. بلندترین نقطه ارتفاعی این حوضه در قله کوه سفیدآب با ارتفاع مطلق ۴۰۵۷ متر و حداقل ارتفاع آن ۸۱۸ متر از سطح دریا می باشد که مربوط به مرز جنوبی حوضه و جاده گرمسار- سمنان است.

این محدوده از بخش شمالی به حوضه آبریز دریای خزر، از خاور به حوضه آبریز سمنان، از جنوب به جاده آسفalte گرمسار سمنان و از بخش باختری به حوضه آبریز رودخانه جاجرود منتهی می گردد. جاده آسفalte رودهن-فیروزکوه و خط آهن گرمسار-فیروزکوه، مهم ترین خطوط ارتباطی قلمرو مطالعاتی را تشکیل می دهند. در شکل ۳-۹ موقعیت حوضه مورد مطالعه در کشور نشان داده شده است.

۳-۴-۲- هواشناسی و اقلیم منطقه

بر اساس مطالعات انجام شده، میانگین بارندگی ۳۰ ساله در کل حوضه ۲۷۲ میلی متر می باشد. کمترین مقدار بارندگی در سال های آبی ۶۲-۶۳، ۷۸-۷۷ و ۸۳-۸۲ بوده که تغییرات نسبت به میانگین سالانه بارش حوضه بین ۱۲۲-۹۲ و بالاترین مقدار بارندگی در سال های آبی ۶۳-۶۴، ۶۵-۶۶، ۷۳-۷۴ و ۸۳-۸۴ دیده شده است. این رقم بین ۹۴-۸۹ میلی متر بالاتر از میانگین بارندگی حوضه است. اقلیم منطقه به روش دومارتن نیمه خشک بوده و توزیع فصلی بارندگی به صورت ۴۵ درصد زمستان، ۲۹ درصد بهار، ۲۲ درصد پاییز و ۳ درصد تابستان می باشد [۴۷].

در این مطالعه دوره واسنجی از سال آبی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ به مدت ۳ سال، تا سال آبی ۱۳۷۳-۱۳۷۲ و برای صحت-سنجی مدل، سال‌های آبی ۱۳۷۳-۱۳۷۴ و سال آبی ۱۳۷۴-۱۳۷۵ انتخاب گردید. دلیل این انتخاب این بود که قبل از این دوره اطلاعات ایستگاه‌ها کامل نبود و بعد از این دوره عملیات‌های آبخیزداری آغاز گردیده بود که روند مدل‌سازی را دچار مشکل می‌کرد.^۱



شکل ۳-۹. موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز حبله‌رود

۳-۴-۳- تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی حوزه آبریز

از نقطه نظر تقسیمات هیدرولوژیکی کشور، محدوده مطالعاتی بخشی از حوزه آبریز کویر مرکزی یا دشت کویر از حوزه آبریز فلات مرکزی به حساب می‌آید.

رودخانه حبله‌رود زهکش اصلی این حوزه، به همراه سایر رودخانه‌ها و آبراهه‌های ارتفاعات شمالی مشرف به جاده

^۱ <http://www.hablehroud.ir/fa/News/Item/About>

آسفالته گرمسار- سمنان (مرز جنوبی قلمرو مطالعاتی) در جهت عمومی شمال به جنوب و به موازات هم، زهکشی این محدوده را به عهده دارند. رودخانه‌های جاری در این حوزه از کوه‌ها و ارتفاعات شمالی و میانی سرچشمه گرفته و پس از قطع جاده گرمسار- سمنان در حوزه آبریز پایاب حبله‌رود و در رودخانه گلو تخلیه می‌گردد. حوضه حبله‌رود دارای ۵ ایستگاه هیدرومتری مهم شامل دلیچای، سیمین‌دشت، فیروزکوه، نمرود و بن‌کوه است. در این مطالعه بر اساس ایستگاه هیدرومتری بن‌کوه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. در شکل ۳-۱۰ موقعیت این ایستگاه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳-۱ مشخصات این ایستگاه ارائه گردیده است.

جدول ۳-۱. مشخصات ایستگاه هیدرومتری بن‌کوه

نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
بن‌کوه	۴۷-۰۱۵	۵۴° ۲۵' ۵۴"	۳۵° ۱۸' ۱۹"	۱۰۴۰

جدول ۳-۲. مساحت اراضی کشاورزی به تفکیک زیر حوضه

نام زیر حوضه	مساحت (هکتار)	مساحت اراضی زراعی آبی (هکتار)	مساحت اراضی زراعی دیم (هکتار)	مساحت باغات (هکتار)
H1 (واحد گورسفید)	۸۳۶۴۶	۳۹۱۵	۱۱۰۵	۴۳۰
H2 (واحد نمرود)	۸۱۲۷۸	۳۷۲۰	۹۹۰	۸۸۰
H3 (واحد حبله رود)	۶۰۱۹۱	۷۲۰	۱۰۴	۱۰۸۵
H4 (واحد دلیچای)	۳۳۹۷۸	۷۷۰	۴۵۸	۷۹۵
H5 (واحد بن‌کوه)	۶۷۸۹۸	۳۷۵	۹۴۷	۲۳۵
کل	۳۲۶۹۹۱	۹۵۰۰	۳۶۰۴	۳۴۲۵

جدول ۳-۳. میزان بهره برداری از منابع آب در هر زیرحوضه

نام زیرحوضه	نهر(میلیون مترمکعب)	قنات(میلیون مترمکعب)	چشمه(میلیون مترمکعب)	چاه(میلیون مترمکعب)
H1 (واحد گورسفید)	۴۷,۴۷	۰,۴۱	۸,۵۱	۱۲,۱۵
H2 (واحد نمروذ)	۵۶,۵۹	۰,۳۹	۱۳,۳	۲,۷۷
H3 (واحد حبله رود)	۲۹,۲۲	۰	۹,۳۲	۰,۰۷
H4 (واحد دلیچای)	۲۵,۳۶	۰,۵	۵,۷۵	۰,۵۶
H5 (واحد بن کوه)	۷,۶۳	۱,۲۲	۲,۶۴	۰,۷۴
کل	۱۶۶,۲۷	۲,۵۲	۳۹,۵۲	۱۶,۲۹

۳-۴-۴- کشاورزی

این حوزه از نظر سوابق زراعی و باغی و مسائل اجتماعی و اقتصادی مربوط به آن در مجموع محدوده متنوعی است. بخش‌هایی از این محدوده مانند نواحی واقع در محدوده‌های دماوند و فیروزکوه، عمدتاً از سوابق غنی زراعی و باغی برخوردار بوده و در مجموع ترکیب کشت متنوع‌تر و تخصصی‌تری را ایجاد نموده‌اند. در این حوزه به دلیل وجود رودخانه‌ای دائمی و پر آب، کشاورزی رونق زیادی دارد به طوری که سالانه ۲۲۴,۶ میلیون متر مکعب آب جهت آبیاری ۱۲۹۲۹ هکتار از اراضی زراعی و باغی آبی این محدوده استحصال و به مصرف می‌رسد. در جدول ۳-۱ سطح زیرکشت هر زیرحوضه بیان گردیده است. از مجموع رقم آب مصرفی، ۱۶,۲۹ میلیون مترمکعب از طریق چاه‌ها، ۳۹,۵۲ میلیون مترمکعب از طریق چشمه‌ها، ۲,۵۲ میلیون مترمکعب از طریق قنات و ۱۶۶,۲۷ میلیون مترمکعب از طریق جریان‌ات سطحی تأمین می‌گردد. در جدول ۳-۲ به تفکیک زیرحوضه، بهره‌برداری از منابع آب منطقه جهت مصارف کشاورزی گزارش گردیده است (مطالعات مدیریت یکپارچه آب و خاک حوزه آبخیز

حبله‌رود، معاونت آبخیزداری-وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۷۵).

۳-۴-۵- جمعیت و شهرنشینی

در سال ۱۳۷۵ در حوزه آبریز، ۱۷۶ پارچه آبادی شناسایی شده‌است که ۹۰ پارچه آن خالی از سکنه و ۴ آبادی تک‌خانواری بوده‌اند. میانگین جمعیت آبادی‌های دارای سکنه در کل حوزه ۲۴۰ نفر و میانگین شعاع آبادی‌ها ۳۸ کیلومتر مربع است که مقایسه این ارقام با میانگین جمعیت آبادی‌های دارای سکنه در کل کشور (۲۳۸ نفر) و میانگین شعاع آبادی‌های آن (۲۴ کیلومتر مربع) نشان می‌دهد که این حوزه کم‌آبادی‌تر از نقاط دیگر کشور است و از آبادی‌هایی معمول برخوردار است.

جمعیت ساکن در حوزه آبریز بر اساس سرشماری، ۲۰۳۷۸ نفر بوده است. تعداد ۱۷۲۱۱ نفر بالای ده سال می‌باشند که از این تعداد، ۵۶۱۳ نفر از نظر اقتصادی فعال به حساب می‌آیند. از این تعداد فقط ۲۴ نفر بیکار هستند. بر اساس آمارگیری انجام گرفته، تعداد ۳۳۸۷ نفر کشاورز، ۴۰۲ نفر در بخش صنعت و معدن، ۲۳۳ نفر در حوزه ساختمان، ۱۴۵۲ نفر در بخش خدمات و تعداد ۱۱۵ نفر نیز در این طبقه‌بندی قرار نداشتند (مطالعات مدیریت یکپارچه آب و خاک حوزه آبخیز حبله‌رود، معاونت آبخیزداری-وزارت جهاد کشاورزی).

۳-۵- داده‌های استفاده شده در این مطالعه

در این بخش به ارائه داده‌های استفاده شده برای مدلسازی در دو قست مدل هیدرولوژیکی VIC و مدل روندیاب پرداخته خواهد شد.

۳-۵-۱- داده‌های مربوط به خاک

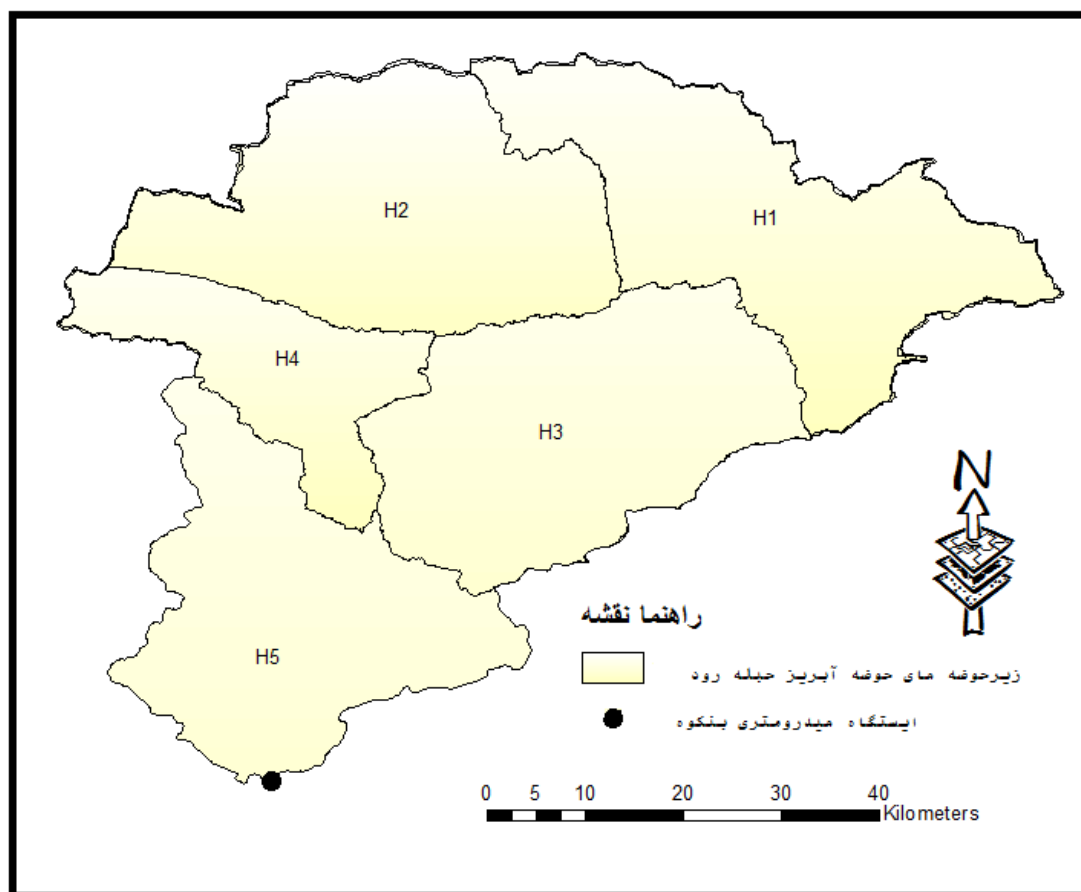
در این مطالعه اطلاعات مربوط به خاک منطقه از پایگاه داده^۱ HWSD از سایت فائو^۲ تهیه گردید که دارای ۳۶

^۱ Harmonized World Soil Database

^۲ <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>

کلاس است [۴۸]. پس از استخراج اطلاعات مربوط به منطقه مورد نظر از فایل اصلی، این اطلاعات در سیزده کلاس مثلث‌بندی خاک طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۳-۴).

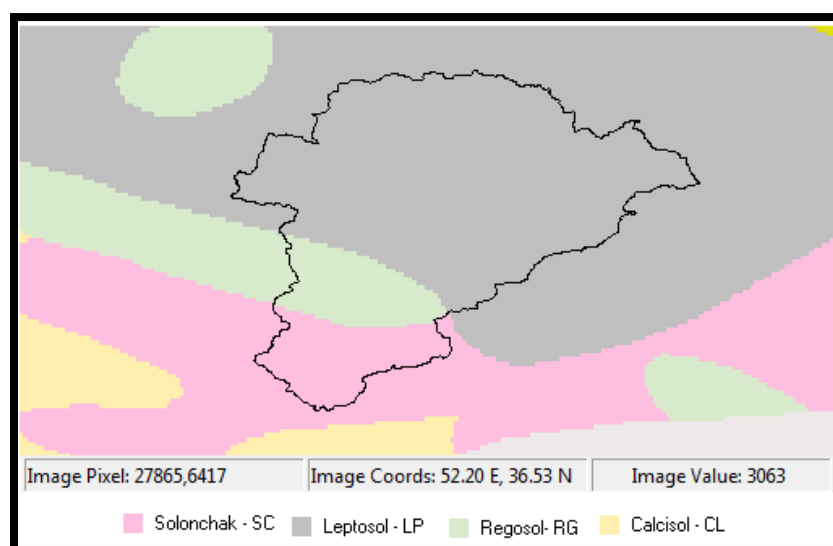
در منطقه حبله‌رود سه کلاس از این کلاس‌بندی وجود دارد که شامل Leptosol-LP، Solonchak-SC و Regosol-RG می‌شود و در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود. کلاس Leptosol-LP در کلاس‌بندی مثلث خاک در کلاس رس و هر دو کلاس Solonchak-SC و Regosol-RG در کلاس لوم قرار می‌گیرند. در شکل ۳-۱۲ لایه خاک بر اساس طبقه‌بندی مثلث خاک نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۰. نقشه زیرحوضه های حوضه آبریز حبله رود و موقعیت ایستگاه هیدرومتری بنکوه

جدول ۳-۴. لایه‌بندی خاک براساس مثلث خاک

شماره کلاس	نام کلاس	شماره کلاس	نام کلاس
۱	Clay (heavy)	۸	Sandy clay
۲	Silt clay	۹	Loam
۳	Clay	۱۰	Sandy clay loam
۴	Silty clay loam	۱۱	Sandy loam
۵	Clay loam	۱۲	Loamy sand
۶	Silt	۱۳	Sand
۷	Silt loam		



شکل ۳-۱۱. فایل خاک HWSD حوزه آبریز حبله رود در نرم افزار HWSD VIEWER براساس کلاس‌بندی ۳۶ طبقه‌ای

۳-۵-۲- داده‌های مربوط به پوشش گیاهی

داده‌های مربوط به پوشش گیاهی برای این منطقه از ماهواره مودیس^۱ و محصول MCD12Q1 تهیه گردید که بر اساس استاندارد IGBP^۲ در ۱۷ کلاس طبقه‌بندی شده است. این طبقه‌بندی در جدول ۳-۵ نشان داده شده است [۴۹]. در این منطقه ۵ کلاس مرتع باز (۰,۶٪)، بوته‌زار یکساله (۰,۷۴,۴٪)، منطقه کشاورزی (۰,۰۲٪)، منطقه شهری (۰,۱۲٪) و زمین بایر (۰,۲۴,۸٪) وجود دارد که در شکل ۳-۱۲، نشان داده شده است. پس از تهیه داده پوشش گیاهی منطقه، این داده‌ها به قالب مدل تبدیل شدند.

۳-۵-۲- داده‌های مربوط به کتابخانه گیاهی

در این مطالعه برای تهیه این فایل از داده‌های ماهواره مودیس استفاده شد. داده‌های ضریب سطح برگ از محصول MCD12Q1 و طبقه‌بندی IGBP تهیه گردید. برای تهیه داده‌های آلبدو از داده‌های ماهواره مودیس که با استفاده از الگوریتم تئوریستیکال^۳ استخراج شده بودند، استفاده شد [۵۰].

جدول ۳-۵. کلاس بندی پوشش گیاهی MCD12Q1 بر اساس استاندارد IGBP [49]

شماره کلاس	نام کلاس	شماره کلاس	نام کلاس
۱	جنگل همیشه سبز	۱۰	بوته‌زار یکساله
۲	جنگل پهن برگ	۱۱	تالاب
۳	جنگل برگ‌ریز سوزنی	۱۲	منطقه کشاورزی
۴	جنگل برگ‌ریز پهن برگ	۱۳	ساختمان و منطقه شهری
۵	جنگل مخلوط	۱۴	گیاهان چیده شده طبیعی
۶	بوته‌زار	۱۵	یخ و برف
۷	مرتع باز	۱۶	زمین بایر
۸	دشت بی‌درخت چوبی	۱۷	آب
۹	دشت بی‌درخت	۲۵۵	کلاس بندی نشده

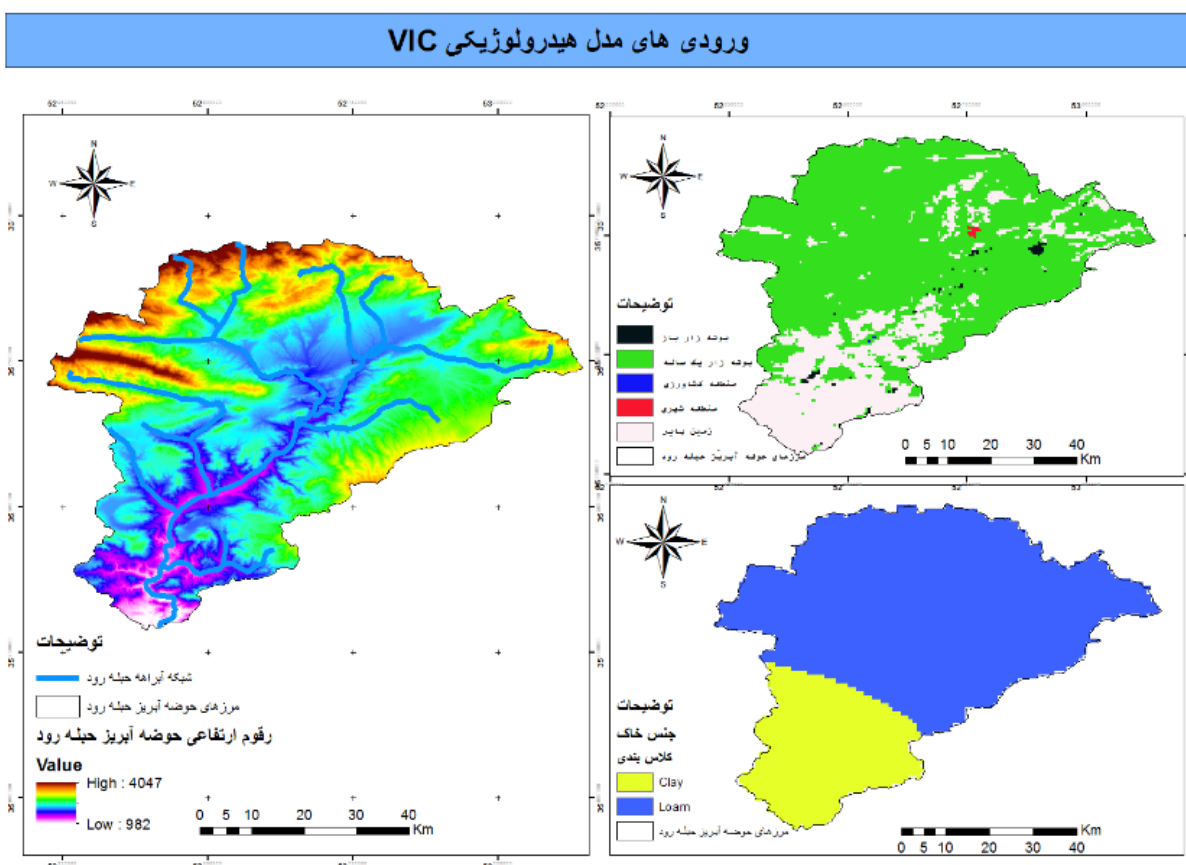
1 MODIS

2 International Geosphere-Biosphere Programme

۳ Algorithm Theoretical

۳-۵-۳- داده‌های باندهای ارتفاعی

همانطور که در شکل ۳-۱۲، نشان داده شده است، رودخانه حبله‌رود از کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و به سمت کویر سرازیر می‌گردد به‌طوری که تفاوت ارتفاع مرتفع‌ترین نقطه تا پست‌ترین نقطه در سطح حوزه ۳۰۶۵ متر است. اگر چه فایل ورودی باندهای ارتفاعی اختیاری است، اما در این منطقه ضروری است تا باندهای ارتفاعی به مدل معرفی گردد. برای تهیه این فایل از SRTM^۱ که یک مدل دیجیتالی ارتفاع (Dem^۲) می‌باشد، استفاده شد.



شکل ۳-۱۲. اطلاعات استفاده شده برای مدل هیدرولوژیکی VIC، اطلاعات رقومی (سمت چپ)، پوشش گیاهی (سمت راست بالا)، جنس خاک (سمت چپ پایین)

^۱ Shuttle Radar Topographic Mission

^۲ Digital Elevation model

۳-۵-۴- داده‌های هواشناسی

این ورودی شامل ۴ نوع داده است که به شرح منابع تهیه آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۵-۴-۱- داده‌های بارش

۳-۵-۴-۱-۱- داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی

برای داده بارش که مهم‌ترین و مؤثرترین جز داده‌های هواشناسی است از داده‌های ایستگاه‌های مشاهدات زمینی وزارت نیرو استفاده گردید. در این مطالعه از ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی که در داخل حوزه قرار داشتند استفاده شد که موقعیت آن‌ها در شکل (۳-۱۳) و مشخصات آن‌ها در جدول (۳-۶) نشان داده شده است. با توجه به موقعیت ایستگاه‌ها، برای مرکز هر سلول درونیابی به‌روش فاصله معکوس (IDW)^۱ انجام گرفت (رابطه ۳-۱). این ۱۰ ایستگاه از سال ۱۹۹۱ کامل هستند که مبنای آغاز دوره مدلسازی قرار گرفت. همچنین پایان دوره براساس آغاز دوره آبخیزداری در این منطقه بود که این عملیات‌ها از سال ۱۹۹۷ آغاز گردیده بودند. لذا سال ۱۹۹۱ برای گرم شدن^۲ مدل، سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۲ به‌عنوان دوره واسنجی و ۱۹۹۶-۱۹۹۵ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی تعیین گردید.

(رابطه ۳-۱):

$$P = \frac{\sum \left(\frac{P_i}{D_i} \right)}{\sum \left(\frac{1}{D_i} \right)}$$

که در این رابطه

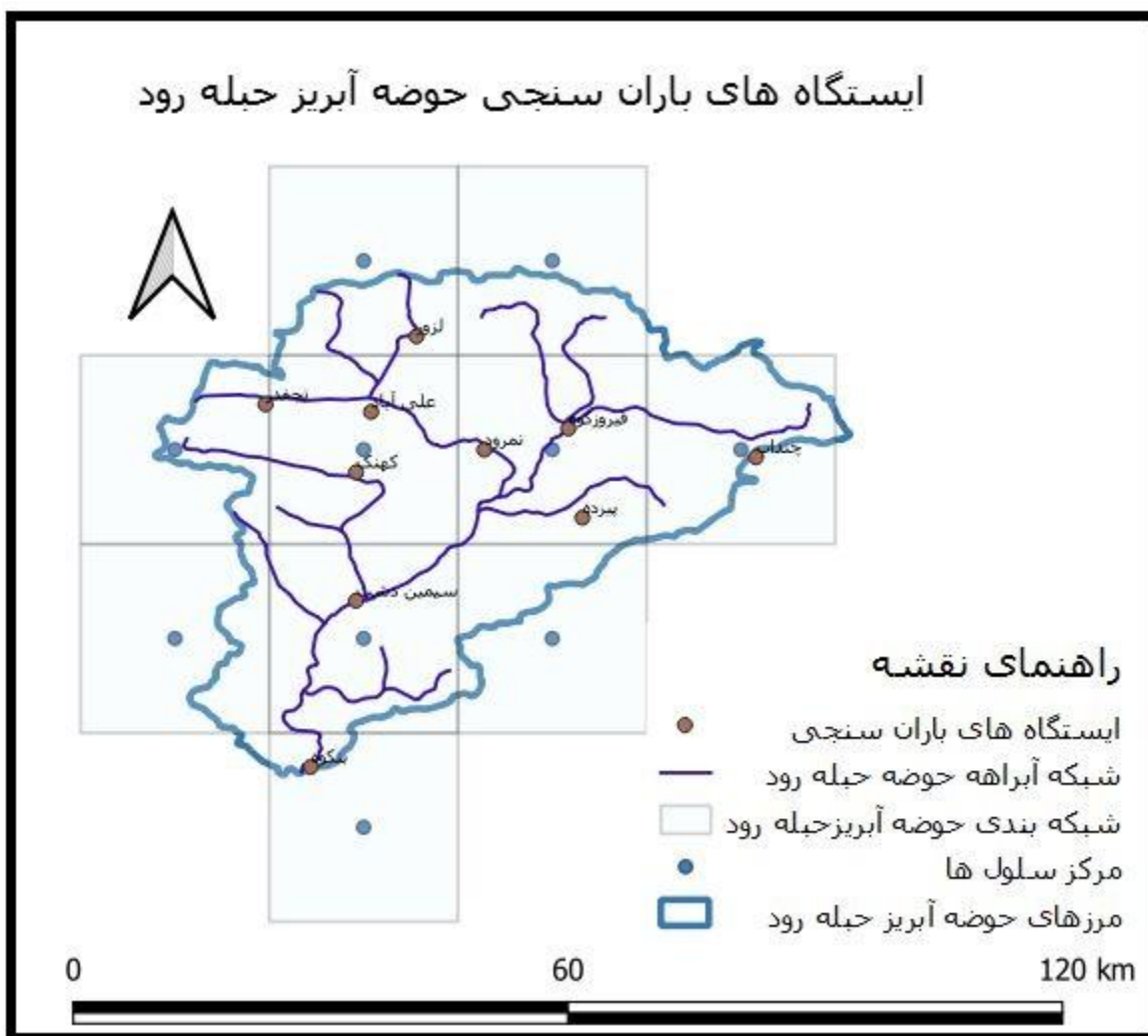
P مقدار بارش در نقطه مورد نظر؛

P_i بارش در ایستگاه i؛

D_i ایستگاه i تا نقطه مورد نظر می‌باشد.

^۱ Inverse Distance Weighting

^۲ Warm up



شکل ۳-۱۳. موقعیت ایستگاه های باران سنجی در سطح حوزه و شبکه آبراهه حبله رود

در شکل ۳-۱۳ موقعیت ایستگاه های این سری داده و ایستگاه های باران سنجی وزارت نیرو مشاهده می شود.

جدول ۳-۶. اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در این مطالعه

نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	میانگین (میلی‌متر)	انحراف از معیار (میلی‌متر)	طول دوره آماری
بن‌کوه	۴۷-۰۱۵	۵۲° ۲۵' ۵۴"	۳۵° ۱۸' ۱۹"	۱۰۴۰	۰,۳۸	۲,۲۳	۱۳۴۶ تا اکنون
پیرده	۴۷-۰۲۰	۵۲° ۴۷' ۴۴"	۳۵° ۳۹' ۴۱"	۲۲۸۳	۰,۵۱	۱,۷۲	۱۳۶۰ تا اکنون
سیمین دشت	۴۷-۰۱۳	۵۲° ۲۹' ۴۶"	۳۵° ۳۱' ۲۴"	۱۴۹۵	۰,۶۷	۲,۹۲	۱۳۵۱ تا اکنون
علی‌آباد	۴۷-۰۱۸	۵۲° ۳۰' ۰۶"	۳۵° ۴۶' ۱۱"	۲۱۳۳	۰,۹۴	۳,۴۴	۱۳۶۰ تا اکنون
لزور	۴۷-۰۱۴	۵۲° ۳۴' ۱۱"	۳۵° ۵۲' ۱۱"	۲۴۲۴	۱,۳۴	۴,۱۰	۱۳۶۰ تا اکنون
چنداب بشم	۴۷-۰۳۰	۵۳° ۰۱' ۳۱"	۳۵° ۴۲' ۴۵"	۲۳۳۰	۰,۹۵	۳,۹۵	۱۳۶۷ تا اکنون
نجفدر	۴۷-۰۱۶	۵۲° ۲۲' ۴۱"	۳۵° ۴۷' ۲۰"	۲۳۸۸	۱,۰۶	۴,۱۲	۱۳۶۱ تا اکنون
فیروزکوه	۴۷-۰۰۵	۵۲° ۴۶' ۲۲"	۳۵° ۴۵' ۳۵"	۱۹۶۵	۰,۹۲	۳,۴۰	۱۳۴۵ تا اکنون
نمرود	۴۷-۰۰۷	۵۲° ۳۹' ۳۹"	۳۵° ۴۳' ۱۶"	۱۸۱۶	۰,۹۳	۳,۵۲	۱۳۴۶ تا اکنون
کهنک	۴۷-۰۲۲	۵۲° ۲۹' ۲۲"	۳۵° ۴۱' ۲۲"	۲۳۲۱	۱,۲۶	۳,۷۶	۱۳۶۰ تا اکنون

۳-۵-۴-۱-۲- داده‌های بارش ماهواره‌ای

در این مطالعه علاوه بر بارش ایستگاه‌های مشاهداتی، داده‌های بارش ماهواره‌ای پایگاه ^۱CHRS نیز مورد استفاده قرار گرفت. داده مورد استفاده ^۲PERSIANN-CDR که دارای مقیاس زمانی روزانه و مقیاس مکانی $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$ درجه

^۱ Center for Hydrometeorology and Remote Sensing

^۲ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record

است [۵۱].

۳-۵-۲- داده‌های دما و سرعت باد

در این مطالعه داده‌های دما و سرعت باد از مرکز پیش‌بینی آب و هوا با دامنه متوسط اروپا^۱ تهیه گردید و به‌طور مشخص ERA-Interim [۵۲] محصولی بود که از آن استفاده گردید. برای این منظور داده‌های حداقل دما و حداکثر دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و همچنین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از این پایگاه اخذ گردید. از آن جایی که این داده‌ها در مقیاس مکانی ۵،۵*۵،۵ درجه هستن، لذا با استفاده از کتابخانه CDO^۲ [۵۳] این داده‌ها پردازش و با سلول‌بندی تعریف شده برای مدل هم‌اندازه و هم‌شکل گردیدند.

۳-۵-۵- داده‌های مورد استفاده برای اجرای مدل روندیاب

در این قسمت داده‌های ورودی برای روندیابی بیان خواهد گردید.

۳-۵-۵-۱- فایل مسیر جریان

برای تهیه این فایل دو ورودی نیاز است:

۱- مدل رقومی ارتفاع که از SRTM تهیه گردید؛

۲- مرزبندی حوضه آبریز که از پردازش بر روی مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار GIS تهیه گردید.

با استفاده از این دو فایل و پردازش در نرم‌افزار GIS فایل مسیرجریان تهیه گردید که در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.

۳-۵-۵-۲- فایل درصد مشارکت

با پردازش دو فایل مرزبندی حوزه و سلول‌بندی منطقه در نرم‌افزار GIS این فایل تهیه گردید.

در شکل ۳-۱۷ فایل‌های ورودی مدل روندیاب نشان داده شده است.

^۱ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

^۲ Climate Data Operators

ncols	4
nrows	3
xllcorner	52.25
yllcorner	35.25
cellsize	0.25
NODATA_value	0
4 5 6 7	
5 6 7 7	
5 7 0 0	

ncols	4
nrows	3
xllcorner	52.25
yllcorner	35.25
cellsize	0.25
NODATA_value	0
0.437248	0.79361325
0.68395925	0.997274
0.6076005	0.2799895
0.5105315	0.1425
0.60302475	0.054806
0	0

1 Bonkoooh	1 1 -9999
NONE	

شکل ۳-۱۴. ورودی های مدل روندیاب در حوضه آبریز حبله رود. مسیر جریان (بالاسمت چپ)، درصد مشارکت

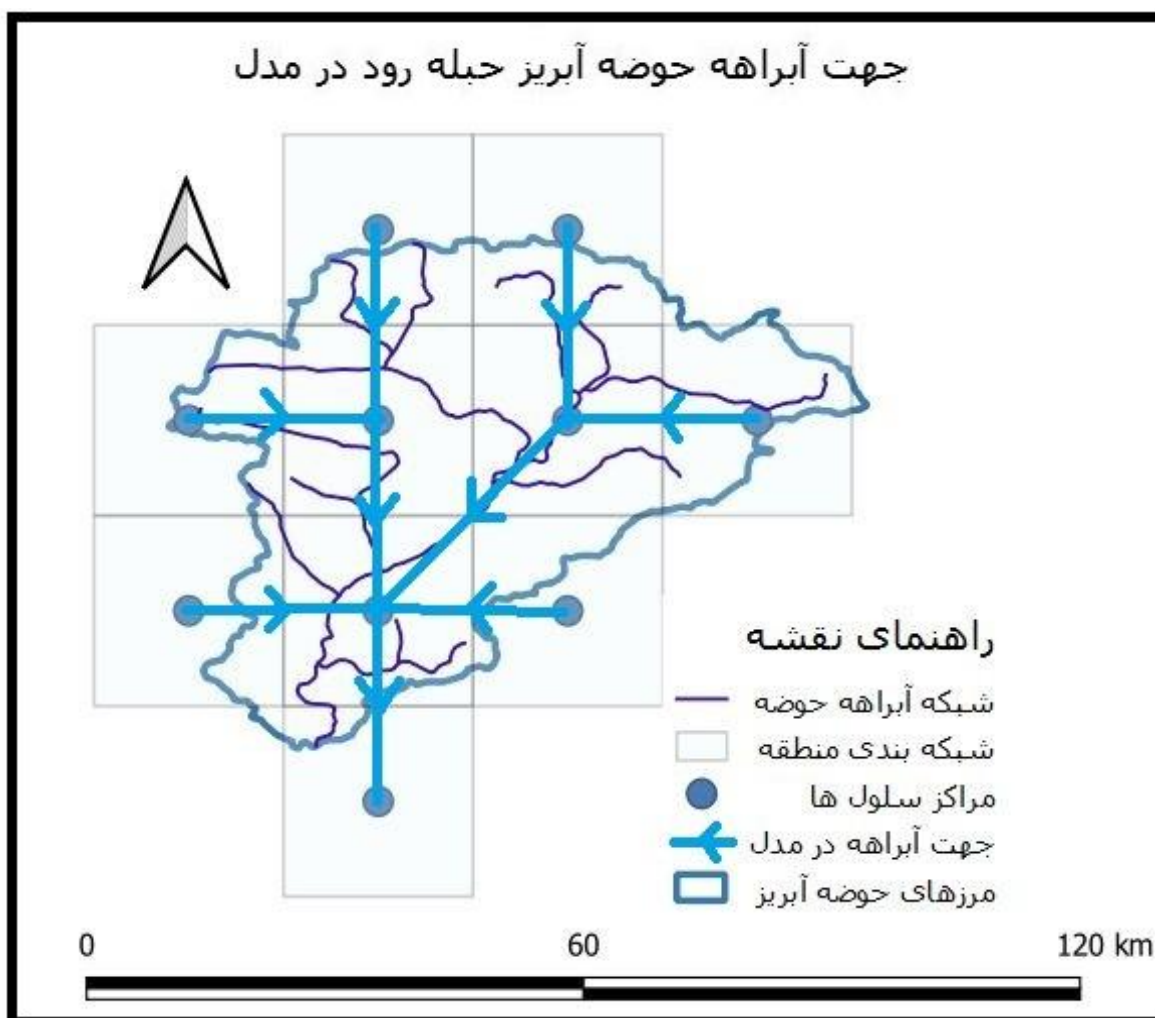
(بالاسمت راست) و موقعیت ایستگاه بنکوه در حوضه (پایین)

۳-۵-۵-۳- فایل هیدروگراف

این فایل نشان دهنده سهم رواناب هر ماه به رواناب کل سال است. جهت تهیه این فایل، رواناب روزانه در ایستگاه بنکوه به صورت ماهانه تبدیل گردید و با گرفتن نسبت به رواناب کل سالانه، سهم هر ماه در رواناب سالانه محاسبه شد. این فایل ورودی جز مواردی است که می توان در کالیبراسیون از آن استفاده کرد. در این مطالعه نیز مدل با فایل استخراج شده برای هر سال، مدل کالیبره شد و بهترین فایل هیدروگراف انتخاب گردید

جدول ۳-۷، نسبت راوناب ماهانه به راوناب کل سالانه

نسبت راوناب	شماره ماه
۰,۰۷۳۱۶۰۲۳۲	۱
۰,۰۶۵۴۷۴۷۲۷	۲
۰,۰۹۹۱۴۷۷۳۸	۳
۰,۱۴۶۱۹۵۶۰۲	۴
۰,۱۴۳۸۳۹۵۱۷	۵
۰,۰۸۴۷۴۷۹۳۴	۶
۰,۰۵۷۳۱۰۹۴۷	۷
۰,۰۴۴۰۳۸۱۵۶	۸
۰,۰۴۷۲۷۸۰۴۴	۹
۰,۰۷۰۳۹۹۷۰۴	۱۰
۰,۰۸۲۵۲۵۳۹۷	۱۱
۰,۰۸۵۸۸۲۰۰۴	۱۲



شکل ۳-۱۵. جهت رواناب تعریف شده در هر سلول

۳-۶- معیارهای ارزیابی

ارزیابی در این مطالعه در دو قسمت انجام می گیرد که هر کدام در ادامه شرح داده خواهند شد؛

۱- ارزیابی داده های بارش ماهواره ای

۲- ارزیابی عملکرد مدل با داده های ماهواره ای

۳-۶-۱- ارزیابی داده های بارش ماهواره ای

برای سنجش کیفیت داده های بارش ماهواره ای، تعداد ۴ ایستگاه با هم مقایسه خواهند شد که در این مقایسه

شاخص‌های آماری ضریب همبستگی^۱(CC)، ریشه میانگین مربعات خط^۲(RMSE)، خطای میانگین^۳(ME)، درصد انحراف نسبی^۴(PBIAS)، احتمال آشکارسازی^۵(POD)، نرخ اشتباه^۶(FAR) و شاخص آستانه موفقیت^۷(CSI) محاسبه گردید که روابط آن به شرح زیر است:

(رابطه ۳-۲):

$$CC = \left(\frac{\sum (S - \bar{S})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (S - \bar{S})^2 \sum (O - \bar{O})^2}} \right)$$

(رابطه ۳-۳):

$$RMSE = \sqrt{\sum (S - O)^2 / N}$$

(رابطه ۳-۴):

$$ME = \sum (S - O) / \sum (O)$$

(رابطه ۳-۵):

$$PBIAS = 100 * \sum (S - O) / (N * \sum (O))$$

(رابطه ۳-۶):

$$POD = n_{11} / (n_{11} + n_{10})$$

(رابطه ۳-۷):

$$FAR = n_{01} / (n_{11} + n_{01})$$

(رابطه ۳-۸):

$$CSI = n_{11} / (n_{11} + n_{10} + n_{01})$$

^۱ Correlation coefficient

^۲ Root Mean Squared Error

^۳ Mean Error

^۴ Percent Bias

^۵ Probability of Detection

^۶ False Alarm Ratio

^۷ Critical Success Index

که در این روابط؛

O: بارش گزارش شده در ایستگاه باران سنجی؛

S: بارش گزارش شده توسط ماهواره؛

n11: تعداد روزهایی که هم در ایستگاه باران سنجی و هم ماهواره بارش گزارش کرده‌اند؛

n10: تعداد روزهایی که در ایستگاه باران سنجی بارش گزارش شده است اما ماهواره بارش گزارش نکرده

است؛

n01: تعداد روزهایی که در ایستگاه باران سنجی بارش گزارش نشده است اما ماهواره بارش گزارش کرده

است؛

N: تعداد کل داده‌ها.

احتمال آشکارسازی (POD) بخشی از وقایع بارندگی است که ماهواره در میان تمام وقایع بارندگی تشخیص می‌دهد و نرخ اشتباه (FAR) نسبت وقایع بارندگی غیرواقعی در بین تمام بارش‌های تشخیص داده شده بوسیله ماهواره است. شاخص آستانه موفقیت (CSI) تابعی از POD و FAR است که ترکیبی از خطاهای اشتباه برآورد و رویدادهای از دست رفته است، بنابراین نتیجه متعادل‌تری است. این شاخص‌ها با توجه به پژوهش‌های مشابه انجام شده در سطح دنیا انتخاب شده‌اند. در این مطالعه برای ارزیابی داده‌های بارش ماهواره‌ای از داده‌های خروجی فرآیند درون‌یابی با روش IDW استفاده شد که از هر دو سری داده برای مدلسازی استفاده خواهد شد.

۳-۶-۲- ارزیابی عملکرد مدل با داده‌های ماهواره‌ای

در این مطالعه از سه ضریب نش-ساتکلیف (NSE)^۱ [۵۴] (رابطه ۳-۲)، ریشه میانگین خطای تبدیل شده باکس-کاکس (TRMSE)^۲ (رابطه ۳-۳) و ضریب تشخیص^۳ (R2) (رابطه ۳-۴) به عنوان معیارهای ارزیابی مدل استفاده

^۱ Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

^۲ Box-Cox Transformed Root Mean Squared Error

^۳ Coefficient of determination

می‌شود. مقدار بهینه ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تشخیص برابر با یک و برای ریشه میانگین خطای تبدیل شده عدد صفر می‌باشد. تابع TRMSE نسبت به تابع جذر میانگین خطا (RMSE) بهتر عمل می‌کند چرا که تأثیرات ناهمواریانسی در محاسبه RMSE را کاهش می‌دهد [۵۵]. این ضرایب بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو مقیاس روزانه و ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بن کوه محاسبه خواهد شد. ضرایب مورد بررسی براساس روابط زیر به‌دست می‌آیند:

رابطه ۳-۹:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_m - Q_o)^2}{\sum (Q_o - \overline{Q_o})^2}$$

رابطه ۳-۱۰:

$$TRMSE = \sqrt{\sum (Q^o_m - Q^o_o)^2 / N}$$

که در این رابطه:

رابطه ۳-۱۱:

$$Q^o = \frac{(1 + Q)^\lambda - 1}{\lambda}$$

رابطه ۳-۱۲:

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Q_m - \overline{Q_m})(Q_o - \overline{Q_o})}{\sqrt{\sum (Q_m - \overline{Q_m})^2 \sum (Q_o - \overline{Q_o})^2}} \right)^2$$

که در این روابط:

Q_m : دبی مدلسازی شده؛

Q_o : دبی مشاهداتی؛

$\overline{Q_o}$: میانگین دبی مشاهداتی؛

Q^om : دبی باکس-کاکس مدلسازی؛

Q^o : دبی باکس-کاکس مشاهداتی؛

N : تعداد داده‌ها می‌باشد.

در این مطالعه λ برابر با ۰,۳ در نظر گرفته شد. زمانی که این پارامتر ۰,۳ در نظر گرفته شود، همچون لگاریتم عمل کرده و جریان‌های کم را مد نظر قرار می‌دهد [۶۴].

۳-۷- روش واسنجی مدل

در این مطالعه از یک روش واسنجی چندهدفه^۱ براساس الگوریتم ژنتیک^۲ به نام NSGA-II^۳ استفاده شده است. این متد توسط دب و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۲ [۵۶] توسعه یافته است و توسط دانگ و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۲ برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC نیز مورد استفاده قرار گرفت که این کتابخانه در دسترس عموم قرار دارد [۵۷]. این کتابخانه به واسنجی ۷ پارامتر خاک که مربوط به مدل VIC و دو فایل اختیاری مربوط به سرعت و انتشار که مربوط به مدل روندیاب است می‌پردازد. به دلیل عدم استفاده از دو فایل اختیاری مربوط به مدل روندیاب، واسنجی فقط با استفاده از داده‌های مربوط به خاک انجام گرفت [۶۵].

در این مطالعه دو ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین خطای تبدیل شده باکس-کاکس (TRMSE)، به عنوان اهداف واسنجی مدل تعریف گردید. جواب به دست آمده از این روش کالیبراسیون به جواب پارتو^۶ معروف است که در کل جواب بهینه در هر دو معیار کالیبراسیون است.

^۱ Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs)

^۲ Genetic Algorithm

^۳ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

^۴ Deb, K. et al.

^۵ Dang, T. D., et al.

^۶ Parto

۳-۸- نرم افزارها و زبان های برنامه نویسی مورد استفاده

در این مطالعه در قسمت های مختلف از تهیه داده های ورودی تا نمایش نتایج مدلسازی، از نرم افزارهای مختلفی استفاده خواهد شد که به شرح آن پرداخته می شود.

۳-۸-۱- نرم افزار GIS

نرم افزار GIS یک نرم افزار قوی در پردازش داده ها و همچنین نمایش تصویر است. در این مطالعه نیز در مراحل زیر از آن استفاده شده است:

- استخراج داده های پوشش گیاهی و تغییر سیستم مختصات آنها
- استخراج و پردازش فایل مدل رقومی ارتفاع جهت ایجاد مرزهای حوضه
- ایجاد شبکه آبراهه ها
- تهیه داده های جهت جریان، و همچنین داده های ورودی مدل روندیاب
- نمایش فایل های پوشش گیاهی، جنس خاک و آبراهه ها

۳-۸-۲- زبان برنامه نویسی پایتون

این زبان یک زبان برنامه نویسی تفسیری، سطح بالا و همه منظوره است که به دلیل داشتن کتابخانه های غنی و کامل مورد توجه توسعه دهندگان قرار گرفته است. از این زبان برنامه نویسی در این مطالعه به صورت زیر استفاده شده است:

- تغییر کلاس بندی لایه خاک
- تبدیل داده های پوشش گیاهی، داده های کلاس بندی خاک و مدل رقومی ارتفاع به قالب تعریف شده برای

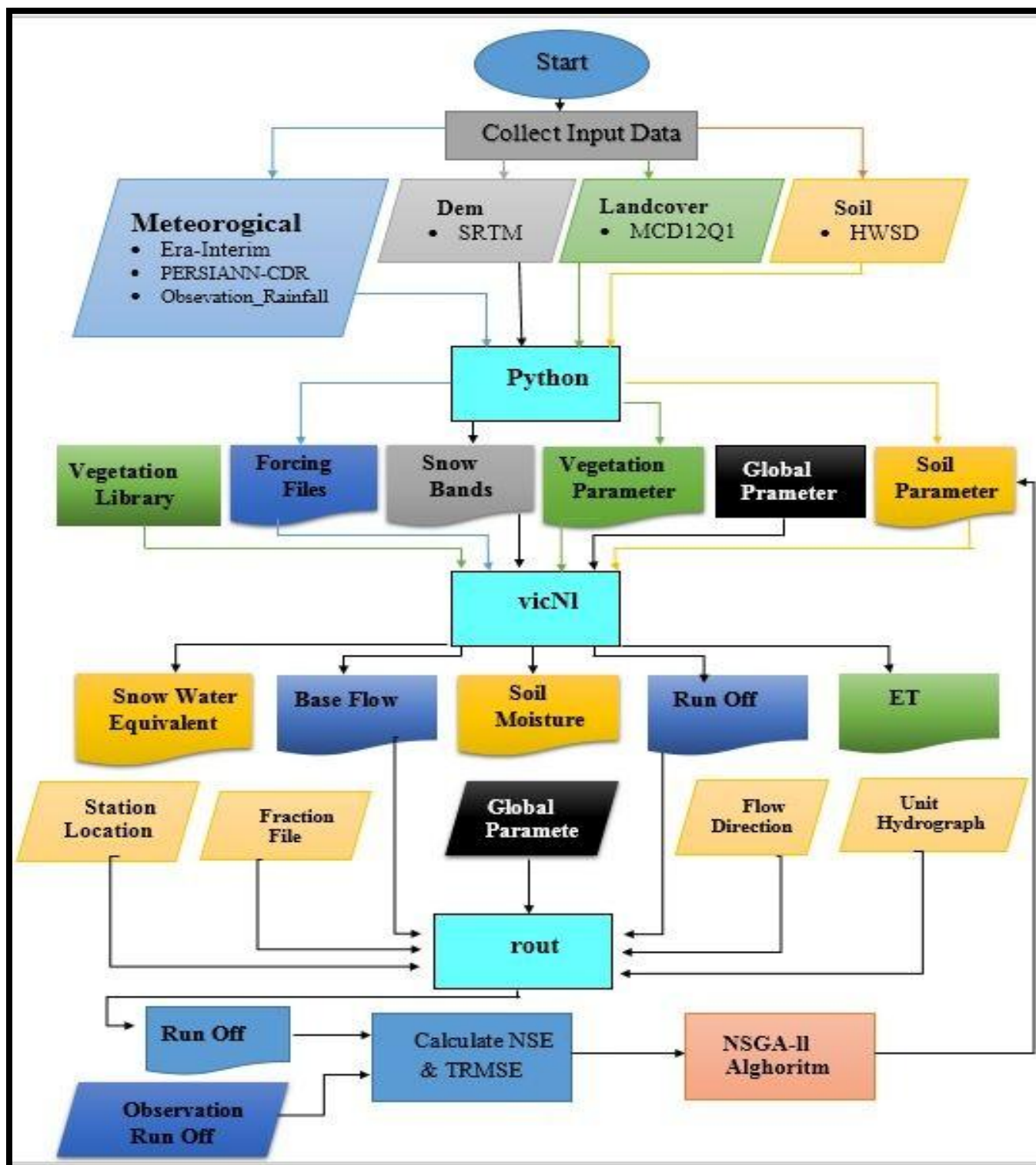
مدل

- تبدیل خروجی‌های مدل به لایه‌هایی به فرمت^۱ NetCDF

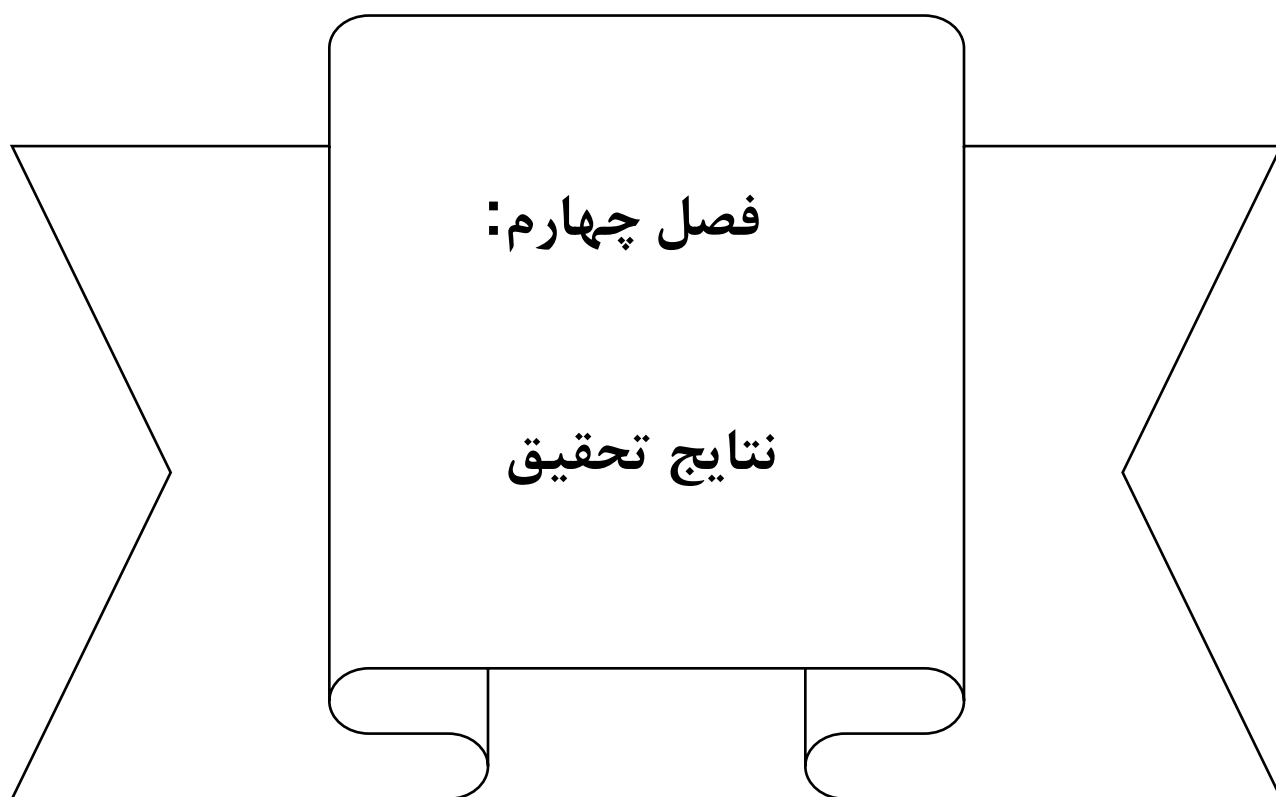
- واسنجی مدل با استفاده از کتابخانه NSGA-II

در شکل ۳-۱۹، شماتیک روند مدلسازی در این مطالعه بر اساس الگوریتم NSGA-II ارائه گردیده است. این حلقه به تعداد تعریف شده در فایل واسنجی انجام می‌گیرد تا نتایج به حد قابل قبول برسد.

^۱ Network Common Data Form



شکل ۳-۱۶. شماتیک مدلسازی استفاده شده در این تحقیق بر اساس الگوریتم NSGA-II



۴-۱- مقدمه

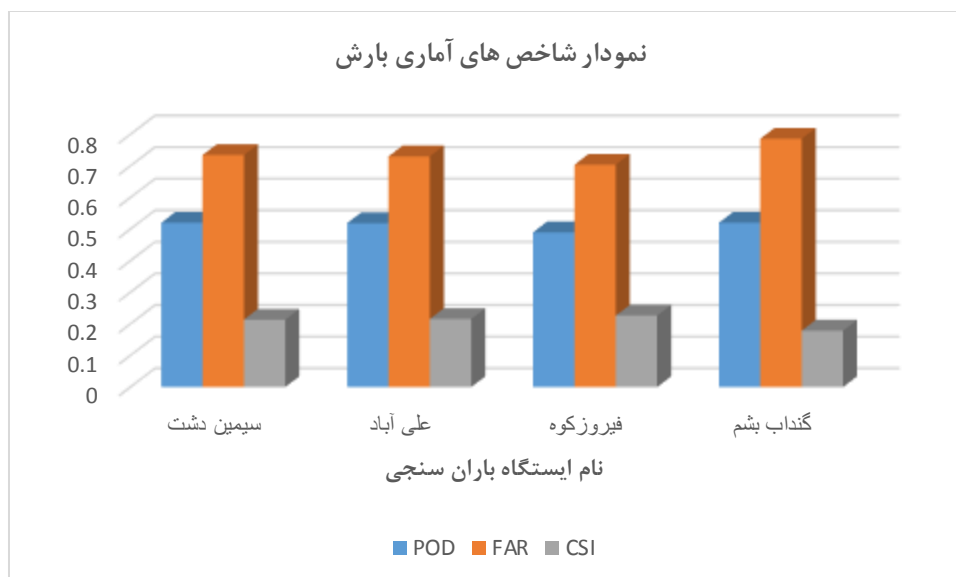
در این فصل به ارائه نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای در دو بخش بارش ماهواره‌ای و عملکرد داده‌های ماهواره‌ای در مدل هیدرولوژیکی VIC پرداخته می‌شود.

۴-۲- عملکرد داده‌های بارش ماهواره‌ای

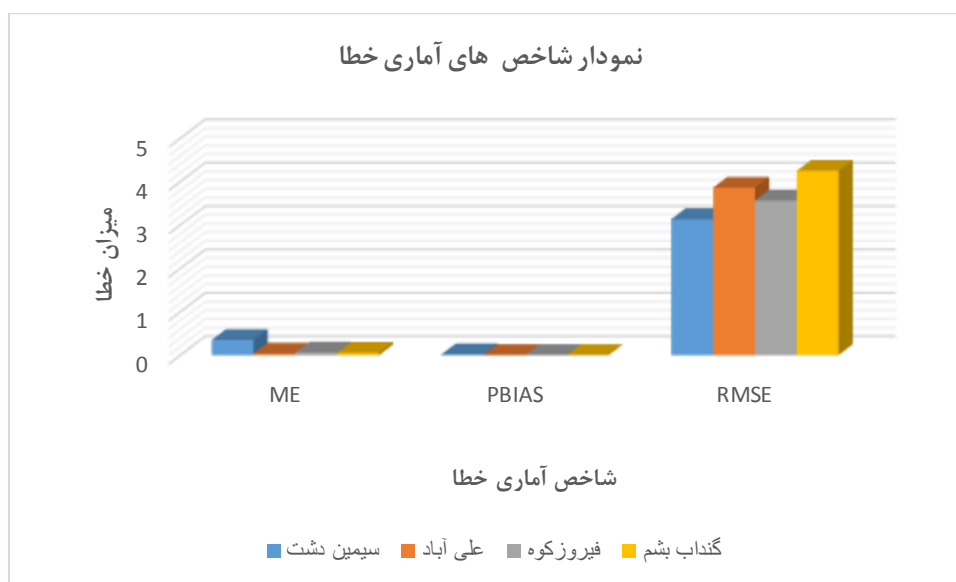
همانطور که در فصل سوم گفته شد، ابتدا داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR با ۴ ایستگاه باران‌سنجی زمینی منتخب، مقایسه گردید. معیار انتخاب این ۴ ایستگاه کامل‌تر بودن آن‌ها نسبت به دیگر ایستگاه‌ها بود. نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۴-۱ ارائه گردیده است و نمودار این شاخص‌های آماری در شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱. نتیجه مقایسه داده بارش ایستگاه‌های زمینی با داده ماهواره ای PERSIANN-CDR

تعداد داده مفقود (Missing)	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	خطای میانگین (ME)	انحراف نسبی (PBIAS)	احتمال آشکار سازی (POD)	نرخ اشتباه (FAR)	شاخص آستانه موفقیت (CSI)
$[-\infty, \infty]$	$[-1, 1]$	$[0, \infty]$	$[-\infty, \infty]$	$[-\infty, \infty]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$
بازه							
۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱
مقدار بهینه							
۷۶	۰,۲۸	۳,۵۶	۰,۰۶	۰,۰۰۳	۰,۴۹	۰,۷	۰,۲۲۶
فیروزکوه							
۷۶	۰,۲۲	۳,۸۶	۰,۰۳۵	۰,۰۰۲	۰,۵۲	۰,۷۳	۰,۲۱۵
علی‌آباد							
۷۶	۰,۱۶۶	۴,۲۵	۰,۰۵۲	۰,۰۰۳	۰,۵۲	۰,۷۸	۰,۱۸
چنداب بشم							
۷۶	۰,۳۳	۳,۱۳	۰,۳۴	۰,۰۲	۰,۵۲	۰,۷۳	۰,۲۱
سیمین دشت							



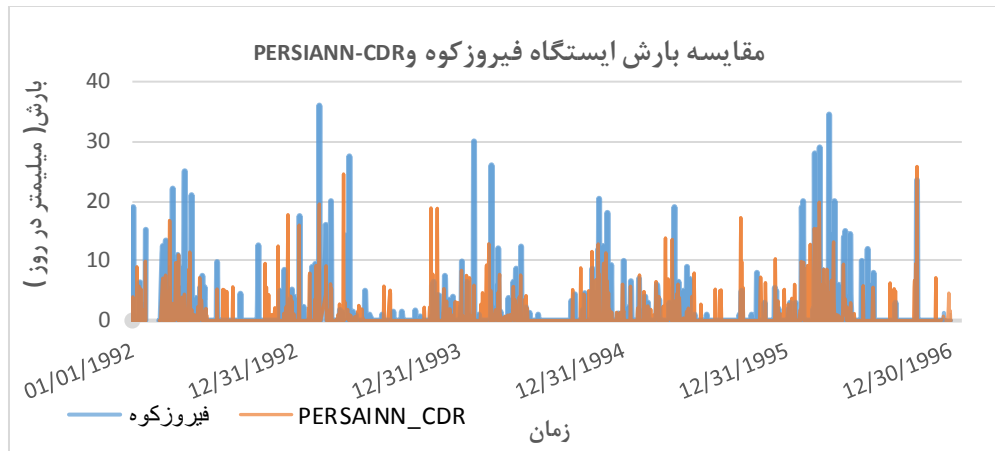
شکل ۴-۱. نمودار شاخص های آماری احتمال آشکارسازی (POD)، نرخ اشتباه (FAR) و شاخص آستانه موفقیت (CSI) برای داده های بارش ماهواره ای PERSIANN-CDR



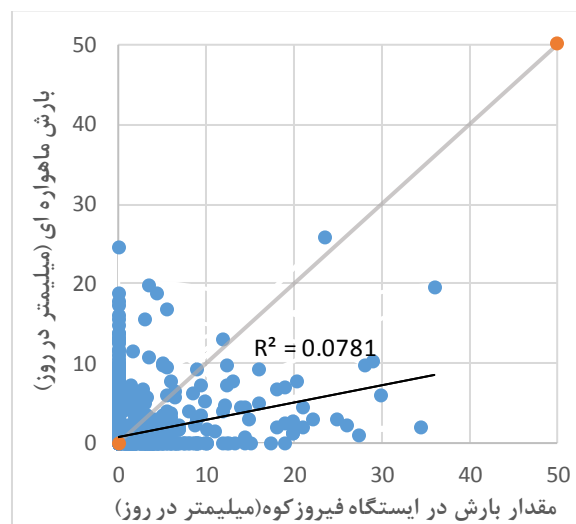
شکل ۴-۲. نمودار شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای میانگین (ME)، درصد انحراف نسبی (PBIAS) در داده های بارش ماهواره ای PERSIANN-CDR

در شکل های ۴-۱ و ۴-۲، داده های بارش ایستگاه فیروزکوه و ماهواره ای نشان داده شده است. با توجه به مقدار نرخ اشتباه بالای ۰,۷، باید گفت ۰,۷ تشخیص بارش توسط داده ماهواره ای خطا بوده است و احتمال آشکارسازی در حدود ۰,۵ نشان می دهد نیمی از بارش ها را تشخیص داده و نیمی را تشخیص نداده است. بنابر نتایج خطای

میانگین و درصد انحراف نسبی می‌توان گفت این ایستگاه از نظر میزان بارش، بارش را بیشتر از میزان رخ داده نشان می‌دهد.



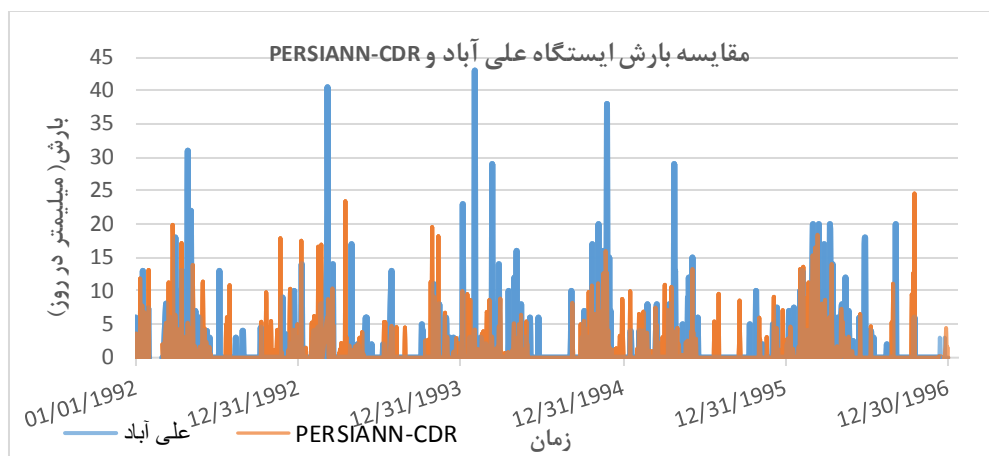
شکل ۳-۴. نمودار مقایسه بارش ایستگاه فیروزکوه و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در طول دوره مدلسازی



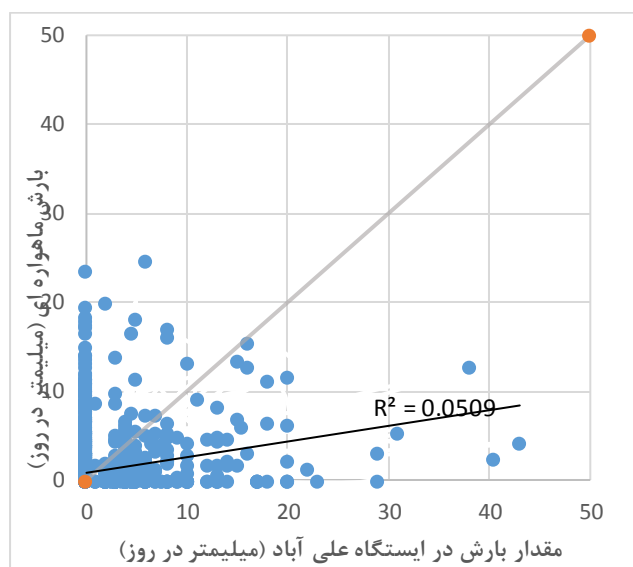
شکل ۴-۴. نمودار مقدار بارش ایستگاه فیروزکوه (محور افقی) در برابر بارش ماهواره‌ای (محور عمودی)

در شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴ میزان داده بارش ایستگاه علی‌آباد و بارش ماهواره‌ای با هم مقایسه شده‌اند. در این ایستگاه، بارش ماهواره‌ای در تشخیص توانسته بیش از نیمی (۵۲٪) از بارش رخ داده را تشخیص دهد، اما میزان خطا در تشخیص بارش رخ داد بالا بوده و ۷۳٪ از اعلام بارش خطا بوده‌است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده، اگر چه در تخمین درست بارش‌های بیشینه عملکرد مناسبی نداشته‌است و همواره بارش را کمتر تشخیص داده

است، اما به دلیل بالا بودن میزان نرخ اشتباه، میزان بارش تخمین زده شده از میزان بارش واقعی بیشتر بوده است و ماهواره بیش برآورد داشته است، اما این مقدار زیاد نیست.



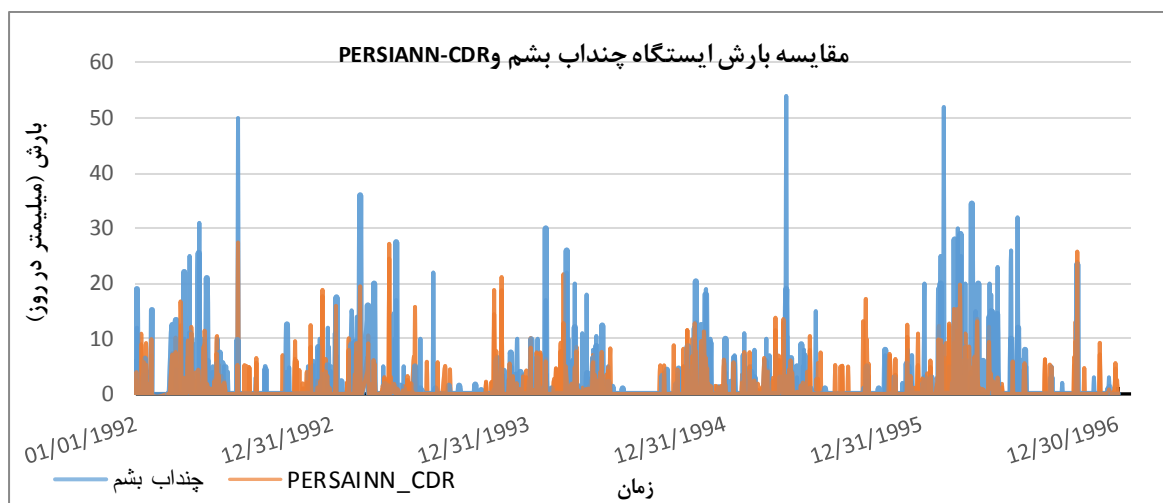
شکل ۴-۵. نمودار مقایسه بارش ایستگاه علی آباد و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در طول دوره مدلسازی



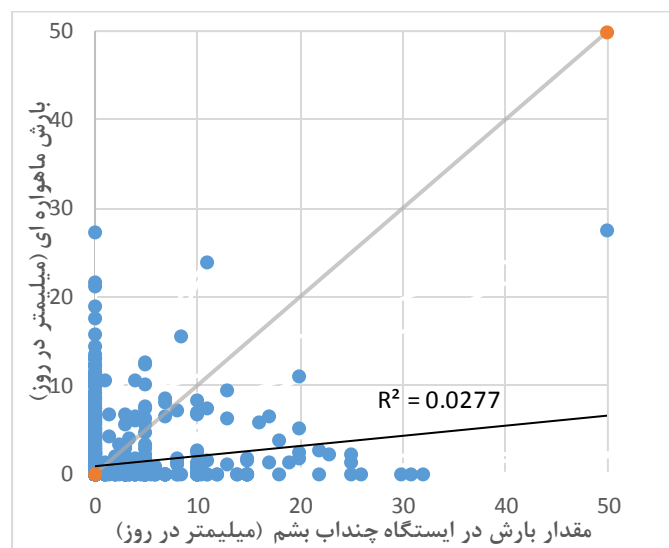
شکل ۴-۶. نمودار مقدار بارش ایستگاه علی آباد (محور افقی) در برابر بارش ماهواره‌ای (محور عمودی)

شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ نشانگر مقایسه بارش در ایستگاه چندآب بشم و داده بارش ماهواره‌ای است. بر اساس احتمال آشکارسازی، ۵۲٪ بارش را به درستی تشخیص داده است اما نرخ اشتباه بسیار بالاست (۰,۷۸) که این در محور عمودی شکل (۴-۸) مشاهده می‌گردد. بر اساس همین نمودار می‌توان گفت در تشخیص مقدار بارش بیشینه

عملکرد مناسبی نداشته است و مقدار آن‌ها را پایین تخمین زده است. از نمودار (۷-۴) نیز می‌توان همبستگی پایین که مقدار آن برابر با ۰,۱۶ است را تشخیص داد. بارش ماهواره‌ای بیش برآورد داشته که این هماهنگی با نرخ اشتباه بالا، میانگین خطا و انحراف نسبی است.

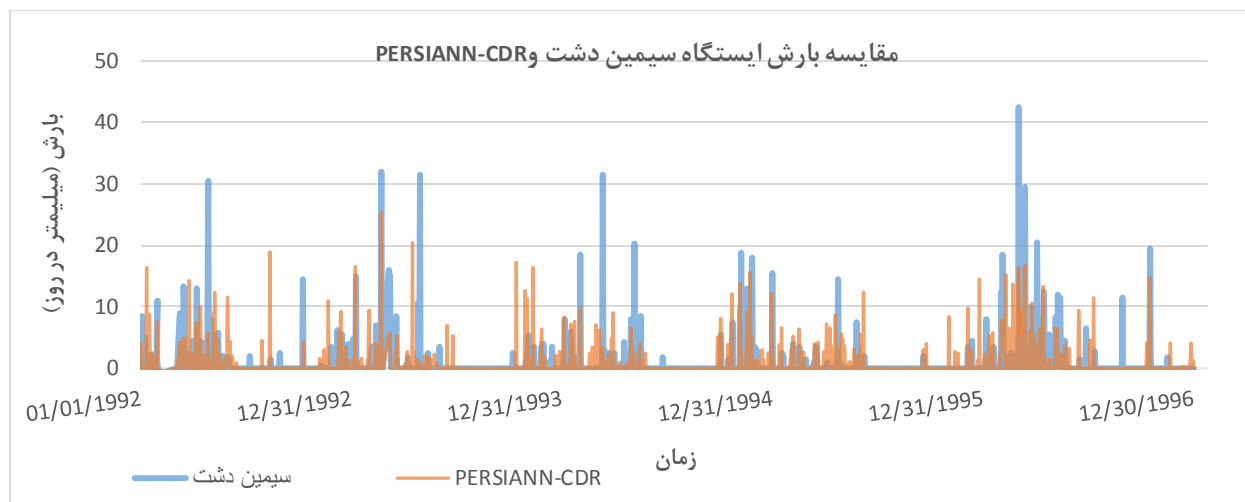


شکل ۷-۴. نمودار مقایسه بارش ایستگاه چنداب بشم و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در طول دوره مدلسازی



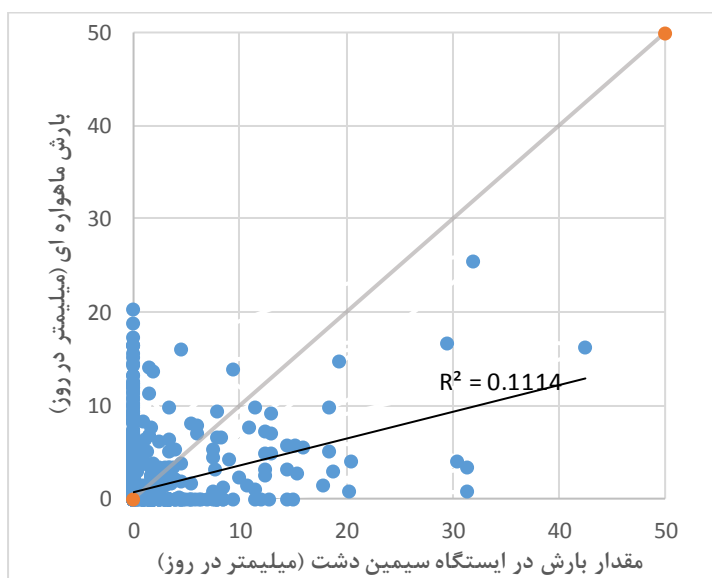
شکل ۸-۴. نمودار مقدار بارش ایستگاه چنداب بشم (محور افقی) در برابر بارش ماهواره‌ای (محور عمودی) در شکل ۷-۴ و ۸-۴، بارش ماهواره‌ای با ایستگاه سیمین‌دشت مقایسه شده است. در این نمودارها می‌توان عملکرد ضعیف ماهواره را در تشخیص بارش‌های بیشینه مشاهده کرد. البته داده بارش ماهواره‌ای در این ایستگاه بهترین

ضریب همبستگی را نشان می‌دهد که این نیز با نمودارها مطابقت دارد. براساس وجود نقاط زیاد در محور عمودی شکل (۴-۱۰) و مقدار نرخ اشتباه (۰,۷۳) می‌توان به خطای زیاد در تشخیص بارش توسط ماهواره پی برد. البته ماهواره در تشخیص ۵۲٪ بارش‌ها درست عمل کرده‌است. ماهواره در این ایستگاه نیز همانند دیگر ایستگاه‌ها برآورد بیشتری نسبت به واقعیت دارد.



شکل ۴-۹. نمودار مقایسه بارش ایستگاه سیمین دشت و بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در طول دوره

مدلسازی



شکل ۴-۱۰. نمودار مقدار بارش ایستگاه سیمین دشت (محور افقی) در برابر بارش ماهواره‌ای (محور عمودی)

با توجه به نمودارها و جداول ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت، میزان توانایی ماهواره در تشخیص بارش پایین بوده است که این را می‌توان از احتمال آشکارسازی پایین در ۴ ایستگاه متوجه شد. همچنین تعداد روزهایی که ایستگاه بارشی را گزارش نکرده اما ماهواره دچار خطا شده و بارش تشخیص داده است بسیار بالا است که این هم دقت پایین ماهواره را نشان می‌دهد (شکل ۴-۱). پایین بودن میزان همبستگی ایستگاه‌ها و داده ماهواره‌ای در راستای عدم تشخیص مناسب وقوع بارش توسط ماهواره است. از طرفی میزان درصد خطای میانگین، مثبت است (شکل ۴-۲) که این نشان‌دهنده برآورد بیشتر از واقعیت ماهواره است. در تمامی ۴ ایستگاه ماهواره بارش‌های بیشینه را یا تشخیص نداده است یا مقدار آن را پایین تخمین زده است.

۴-۳- عملکرد داده‌های ماهواره‌ای در مدل هیدرولوژیکی VIC

در این مطالعه برای ارزیابی بهتر داده بارش ماهواره‌ای، ابتدا واسنجی مدل با داده‌های بارش ایستگاه زمینی انجام گرفت، سپس واسنجی مدل با داده‌های ماهواره‌ای انجام گرفت. در این پژوهش واسنجی به صورت سلول به سلول انجام گرفت و بهترین پارامترهای خاک برای هر سلول انتخاب گردید که برای دو سری داده بارش در جدول زیر ارائه گردیده است.

جدول ۴-۲. پارامترهای واسنجی شده برای هر سلول با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی

شماره سلول	Binf [N/A] (0-1)	Ds [Fraction] (0-1)	Dsmax [mm/day] (0-30)	Ws [Fraction] (0-1)	D1 [m] (0.01-0.25)	D2 [m] (0.25-2.5)	D3 [m] (0.25-2.5)
0	0.0002136	0.000121	22.64839	0.207716	0.111001	0.500093	0.44217
1	0.2973658	0.326809	0.379084	0.022412	0.10187	0.797096	1.49952
4	0.1326221	0.559883	2.457023	0.713497	0.059188	0.300321	1.49983
5	0.0841144	0.260012	0.39542	0.004324	0.03912	1.4003	0.79367
6	0.0650034	0.191033	0.060011	0.00782	0.0611	1.52001	1.1978
7	2.32E-05	0.82308	0.428149	0.145488	0.237983	1.364134	1.11128
8	0.0182303	0.410453	0.465757	0.006748	0.101636	1.040404	0.34517
9	0.0662251	0.45289	0.368536	0.067118	0.244486	1.210169	1.55154
10	0.0971234	0.3897	0.22903	0.006919	0.062122	1.3112	1.28913
11	0.02792	0.171022	0.290012	0.020229	0.058223	0.97889	1.4487

جدول ۴-۳. پارامترهای واسنجی شده برای هر سلول با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای

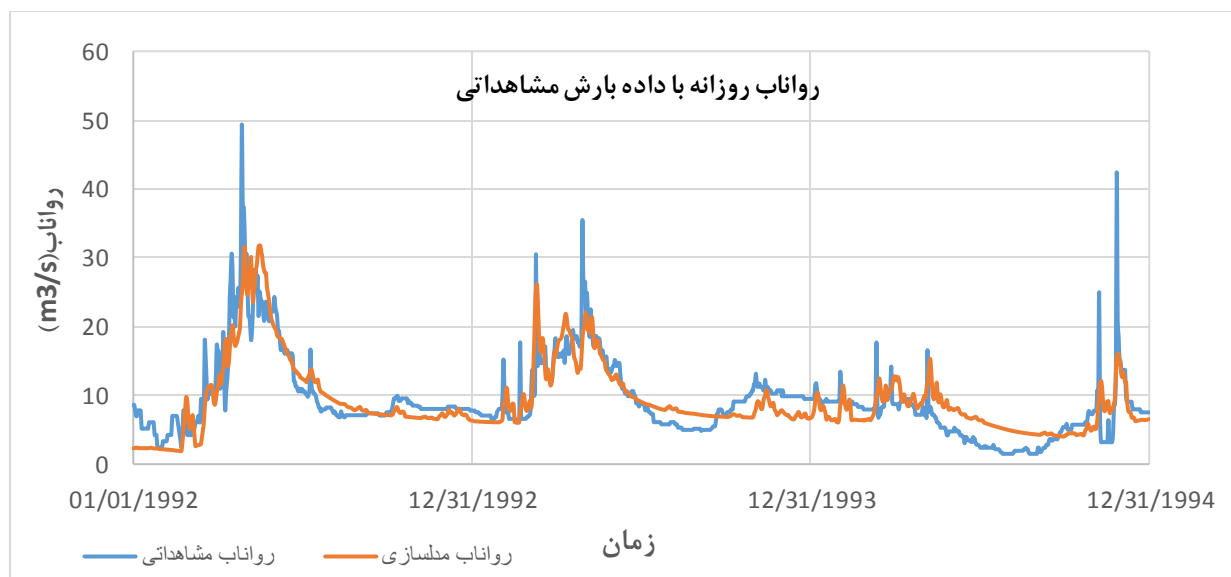
شماره سلول	Binf [N/A] (0-1)	Ds [Fraction] (0-1)	Dsmax [mm/day] (0-30)	Ws [Fraction] (0-1)	D1 [m] (0.01-0.25)	D2 [m] (0.25-2.5)	D3 [m] (0.25-2.5)
0	0.896931	0.203801	1.387068	0.889712	0.163765	0.362189	1.727663
1	0.896931	0.203801	1.387068	0.889712	0.163765	0.362189	1.727663
4	9.22E-05	0.677815	7.438167	0.351062	0.050785	1.195986	0.516223
5	0.003817	0.132065	0.326383	0.027851	0.144303	1.436471	1.135356
6	0.000603	0.244256	11.35798	0.89102	0.232244	0.78287	1.998872
7	0.42087	0.919256	2.233964	0.056296	0.130322	0.575862	1.03657
8	0.005034	0.24533	14.53099	0.053253	0.050186	1.605144	1.017011
9	0.04089	0.001859	0.820557	0.517061	0.058863	1.846394	1.471865
10	0.003643	0.03601	22.98218	0.577867	0.099356	1.693752	0.695253
11	0.011716	0.230637	0.001395	0.827352	0.194529	1.493723	1.750849

در جداول ارائه گردیده، B_{in} : منحنی نفوذ متغیر، D_{smax} : حداکثر سرعت جریان پایه در هر سلول شبکه، D_s : کسری از D_{smax} هنگامی که جریان پایه غیرخطی می‌شود، W_s : درصدی از حداکثر رطوبت خاک هنگامی که جریان پایه غیرخطی رخ می‌دهد، D_1 : عمق بالاترین لایه خاک، D_2 : عمق لایه دوم خاک و D_3 : عمق لایه سوم خاک هستند که در فصل سوم به آن‌ها پرداخته شده است.

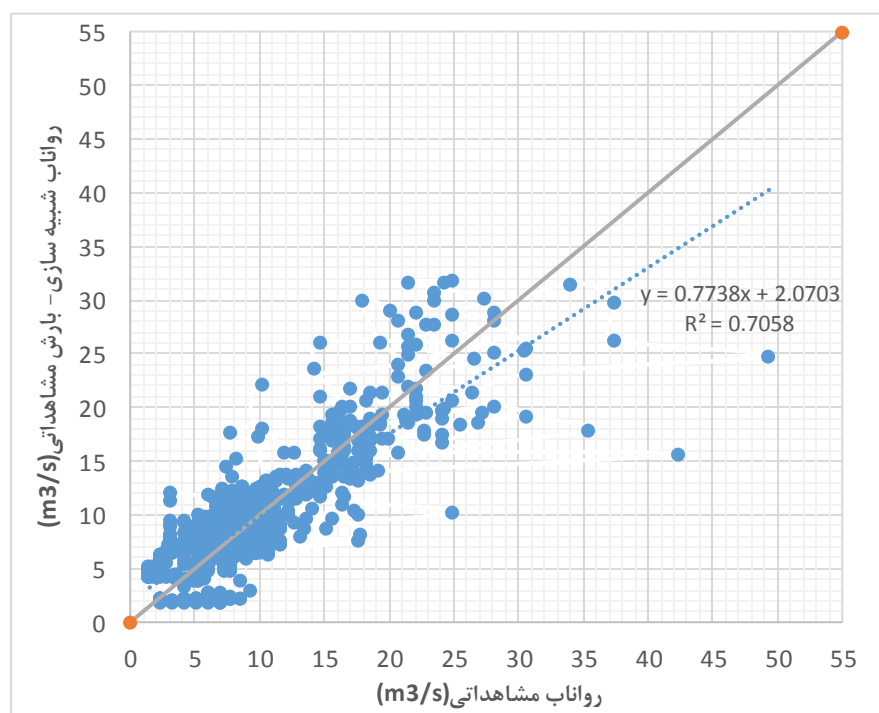
نتایج به دست آمده با استفاده از پارامترهای ارائه گردیده برای هر سری داده بارش در مقیاس روزانه در جدول (۴-۴) و شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) برای داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) برای داده‌های بارش ماهواره‌ای در دوره واسنجی و شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) برای داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) در دوره صحت‌سنجی ارائه گردیده است.

جدول ۴-۴. نتایج دبی روزانه ایستگاه بنکوه با رواناب شبیه سازی شده با داده بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای

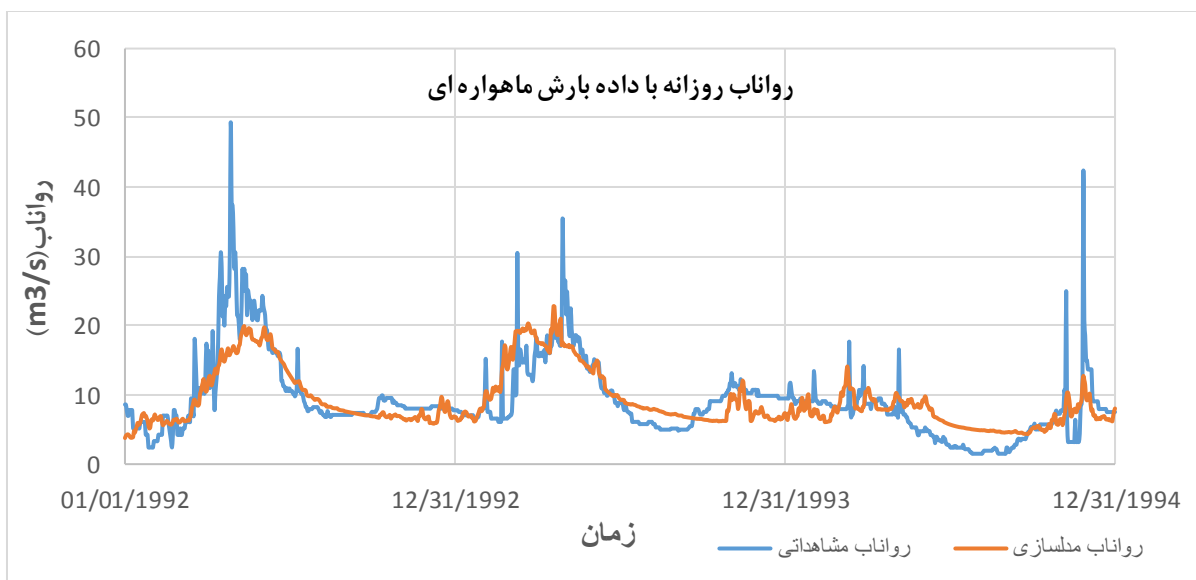
واسنجی		صحت سنجی		نوع بارش
باران سنجی	CDR	باران سنجی	CDR	
۹,۱۹		۸,۸۸		میانگین رواناب مشاهداتی (m/s)
۹,۱۹	۹,۲۱	۸,۶۷	۹,۳۲	میانگین رواناب مدل سازی (m/s)
۰,۷۲	۰,۶	۰,۷۲	۰,۶۲	ضریب نش-سائقلیف
۰,۷۲	۰,۶۱	۰,۷۳	۰,۶۷	ضریب تبیین
۰,۶۲	۰,۶۲	۰,۵۲	۰,۵۸	خطای TRMSE



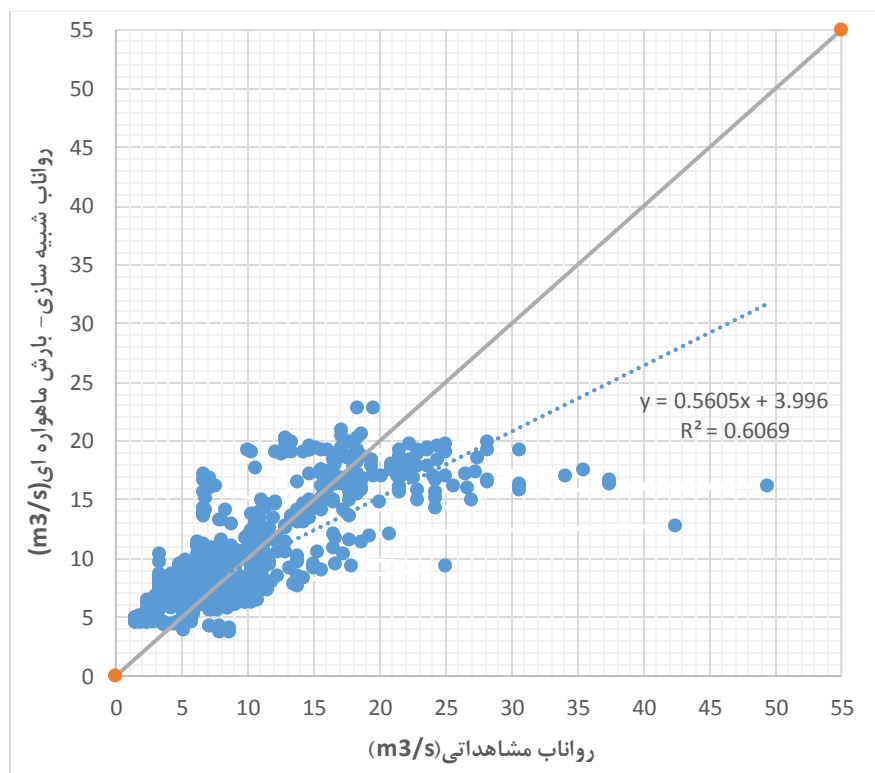
شکل ۴-۱۱. هیدروگراف رواناب مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره واسنجی با استفاده از ایستگاه‌های باران - سنجی



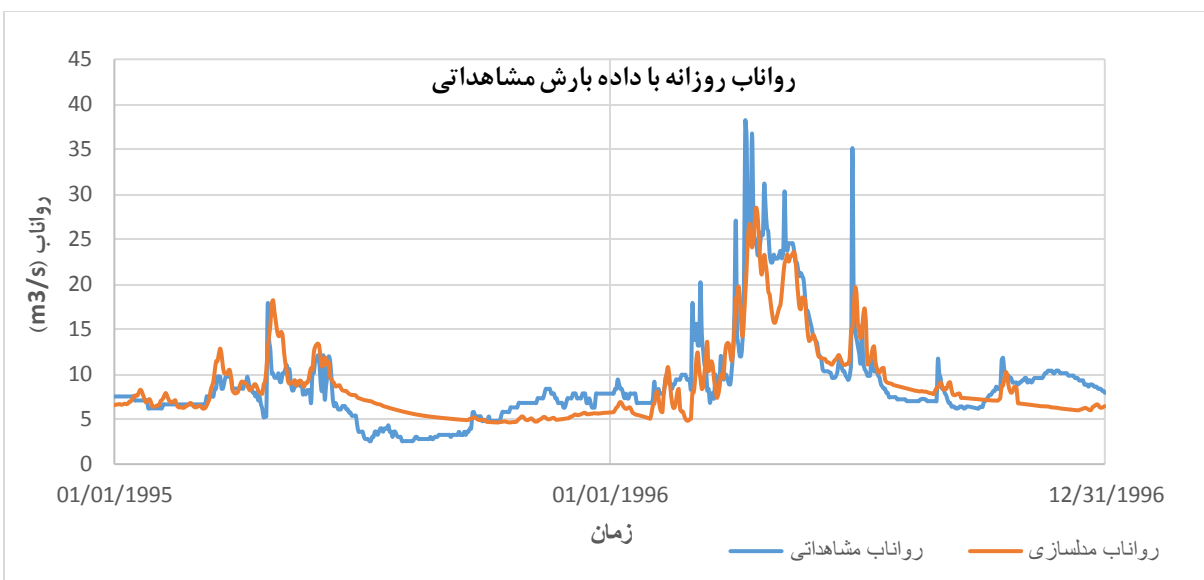
شکل ۴-۱۲. نمودار رواناب روزانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه سازی شده با استفاده از داده بارش مشاهداتی در دوره واسنجی (محور عمودی)



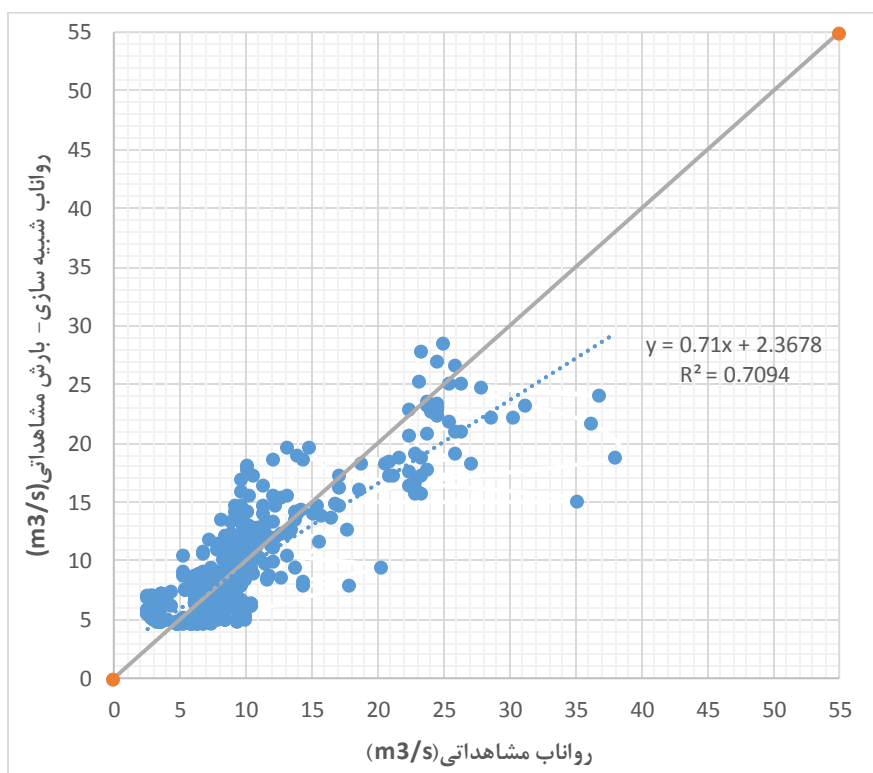
شکل ۴-۱۳. هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره واسنجی با استفاده از داده های ماهواره ای



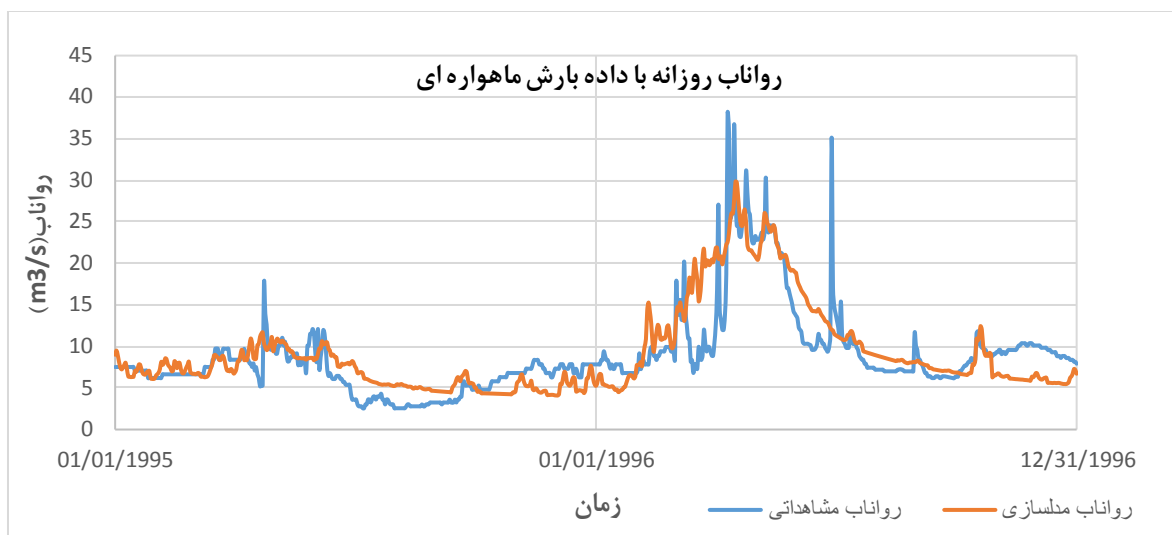
شکل ۴-۱۴. رواناب روزانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه سازی شده با استفاده از داده بارش ماهواره ای (محور عمودی) در دوره واسنجی



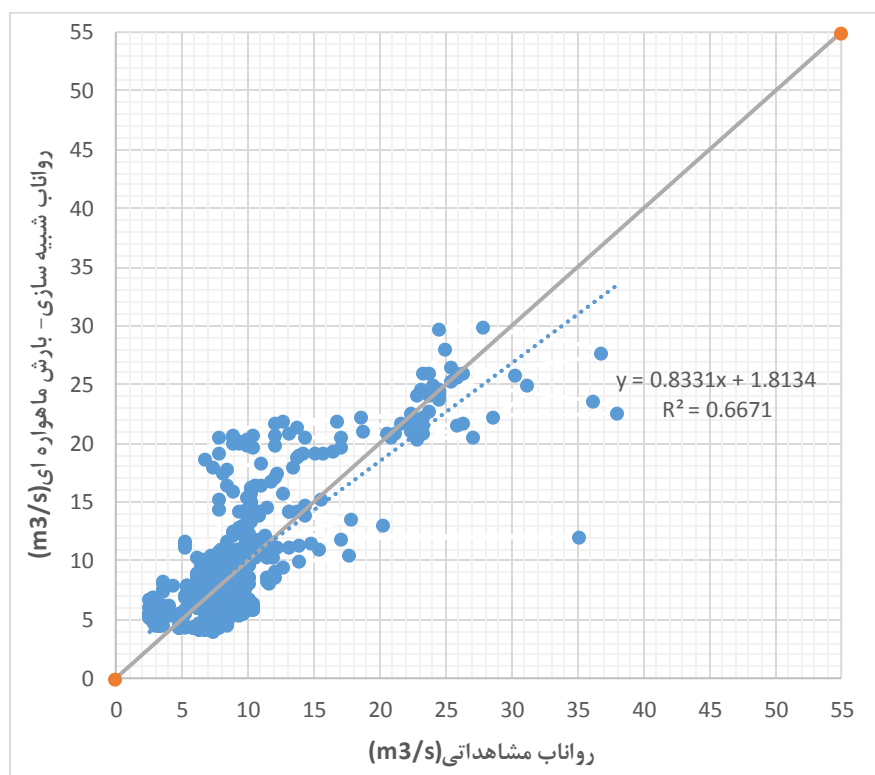
شکل ۴-۱۵. هیدروگراف رواناب روزانه مشاهداتی و مدل سازی شده در دوره صحت سنجی با استفاده از ایستگاه - های باران سنجی



شکل ۴-۱۶. رواناب روزانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه سازی شده با استفاده از داده بارش مشاهداتی (محور عمودی) در دوره صحت سنجی



شکل ۴-۱۷. هیدروگراف رواناب روزانه مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره صحت‌سنجی باداده‌های بارش ماهواره‌ای



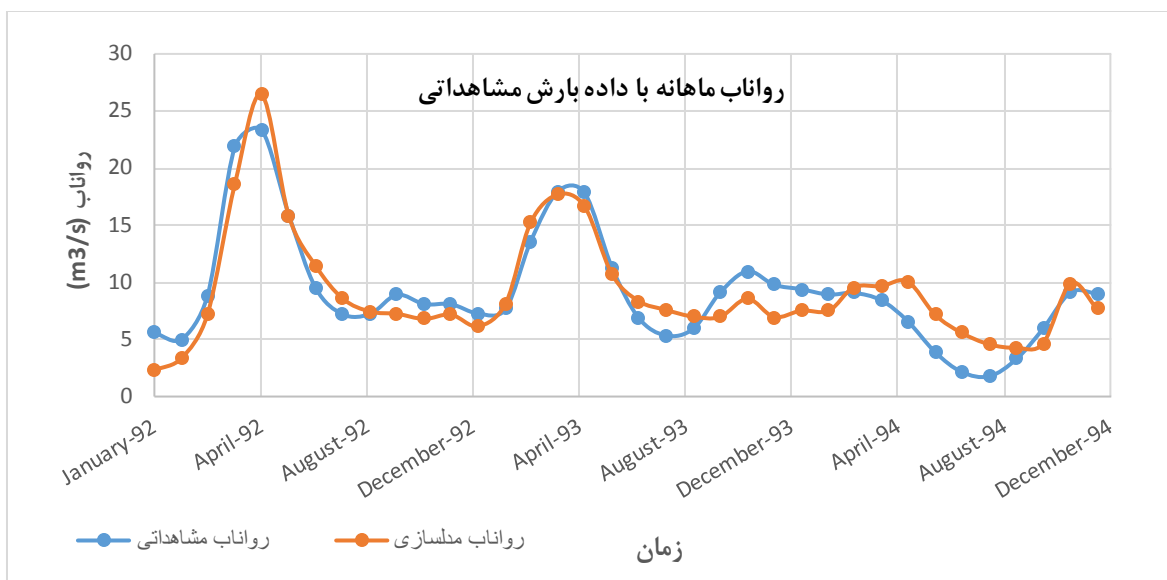
شکل ۴-۱۸. رواناب روزانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده بارش ماهواره‌ای (محور عمودی) در دوره اعتبارسنجی

همان‌طور که در شکل‌های ارائه شده، مشاهده گردید، مدل در شبیه‌سازی رواناب در فصول آبیاری دچار خطا شده

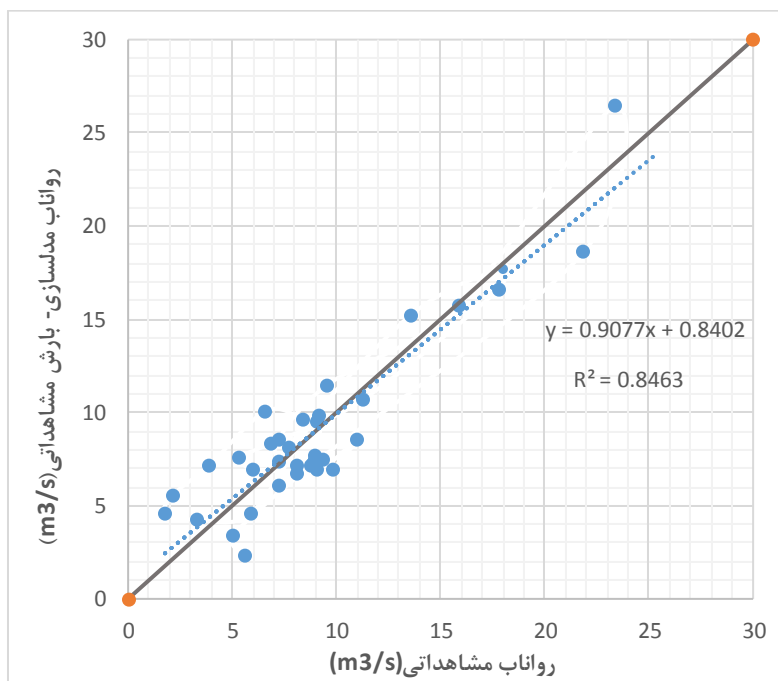
است و نتوانسته شبیه‌سازی کند. این می‌تواند ایرادی باشد که به مدل وارد است، چرا که نمی‌توان برداشت را به مدل وارد کرد. پس از پایان دوره برداشت آب جهت مصارف کشاورزی، میزان دبی رودخانه افزایش می‌یابد اما باز هم مدل نمی‌تواند به خوبی این تغییرات را شبیه‌سازی کند. در مورد دبی‌های بیشینه همانطور که در شکل‌های ارائه شده مشاهده می‌گردد، مدل در هر دو سری داده بارش عملکرد مناسبی نداشته است و به خوبی جوابگوی این جریانات نبوده است. این در هر دو سری داده و هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی مشهود است. همانطور که در نمودارهای ارائه شده نیز مشاهده شده بود، مدل با استفاده از هر دو سری داده در تخمین درست رواناب بیشینه ناتوان بوده است اما مدل با داده بارش مشاهداتی عملکرد بهتری داشته است. پس از بررسی مدل‌سازی در مقیاس روزانه، نتایج ماهانه در جدول (۴-۶) و شکل‌های (۴-۱۹) تا (۴-۲۶) ارائه می‌گردد.

جدول ۴-۵، نتایج رواناب ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه

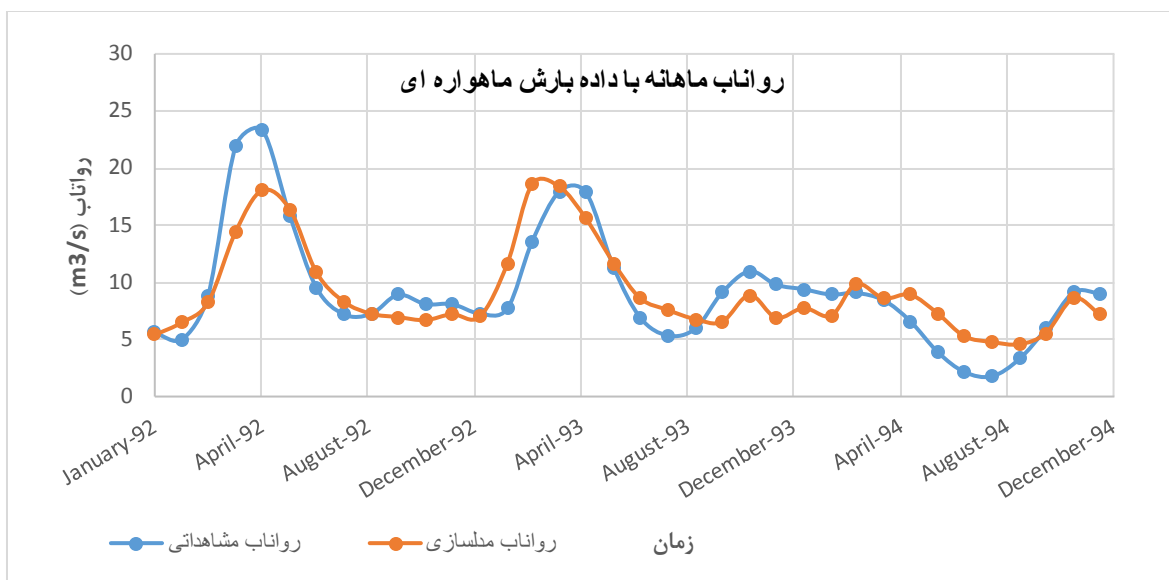
واسنجی		صحت‌سنجی		نوع بارش
باران سنجی	CDR	باران سنجی	CDR	
۹,۱۹		۸,۸۸		میانگین رواناب مشاهداتی (m/s)
۹,۱۹	۹,۲۱	۸,۶۷	۹,۳۲	میانگین رواناب مدل‌سازی (m/s)
۰,۸۴	۰,۷۴	۰,۸۴	۰,۷۸	ضریب نش-سانکلیف
۰,۸۵	۰,۷۵	۰,۸۴	۰,۸۲	ضریب تبیین
۰,۴۷	۰,۴۹	۰,۴۲	۰,۴۶	خطای TRMSE



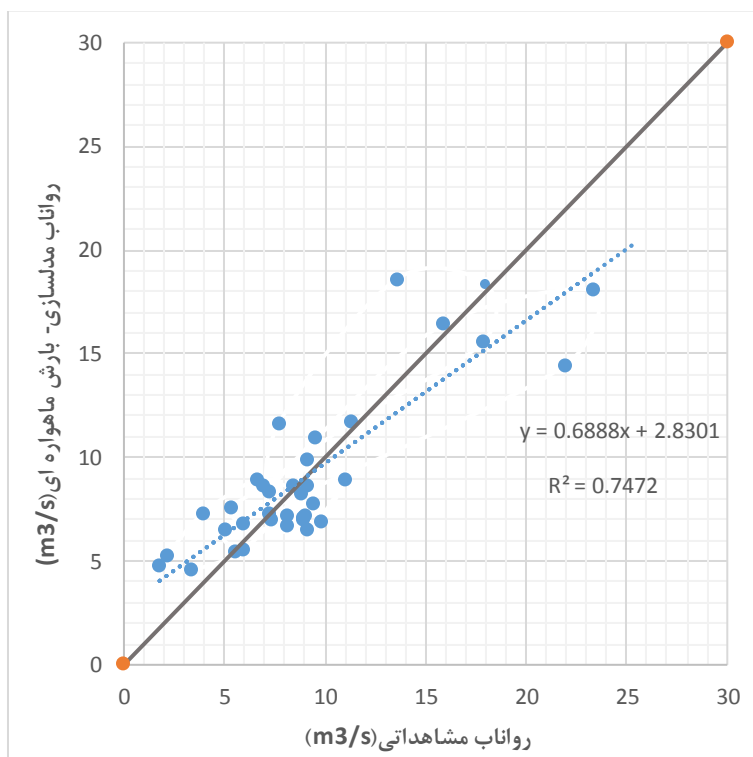
شکل ۴-۱۹. هیدروگراف رواناب ماهانه مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره واسنجی با استفاده از ایستگاه‌های داده‌های بارش مشاهداتی



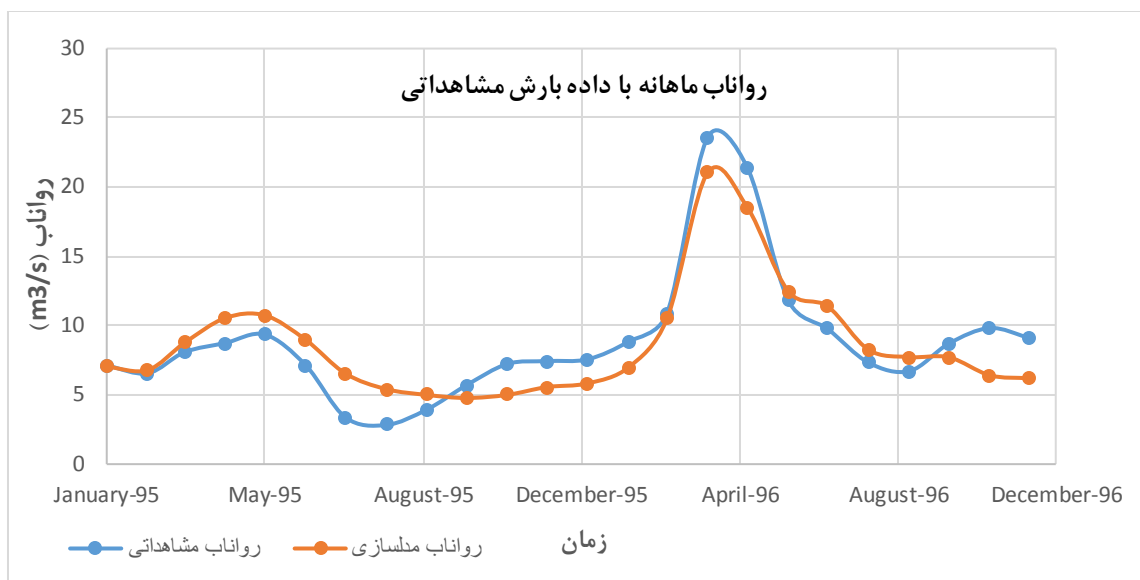
شکل ۴-۲۰. رواناب ماهانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده بارش مشاهداتی (محور عمودی) در دوره واسنجی



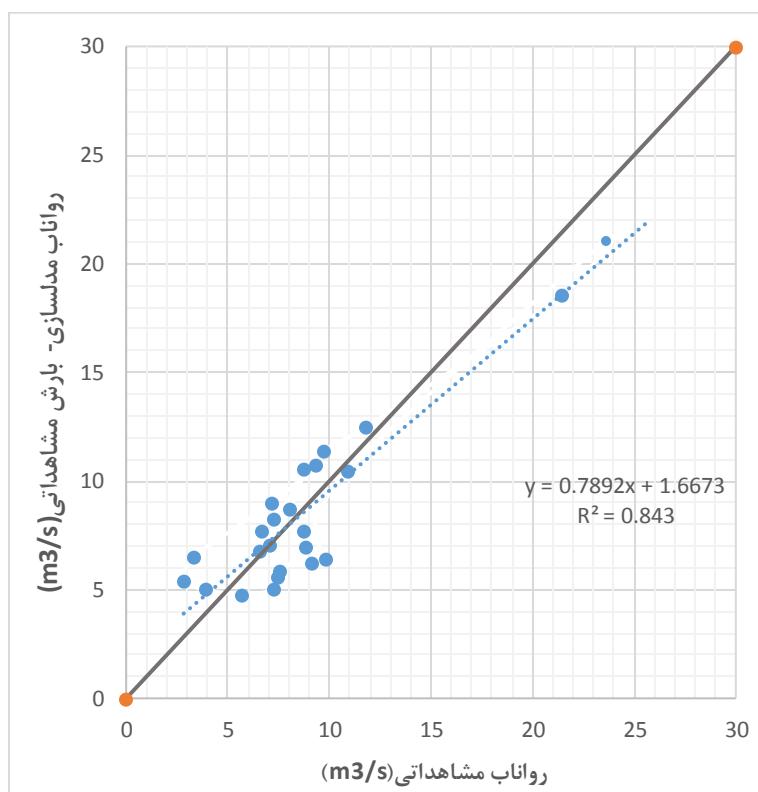
شکل ۴-۲۱. هیدروگراف رواناب ماهانه مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در دوره واسنجی با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای



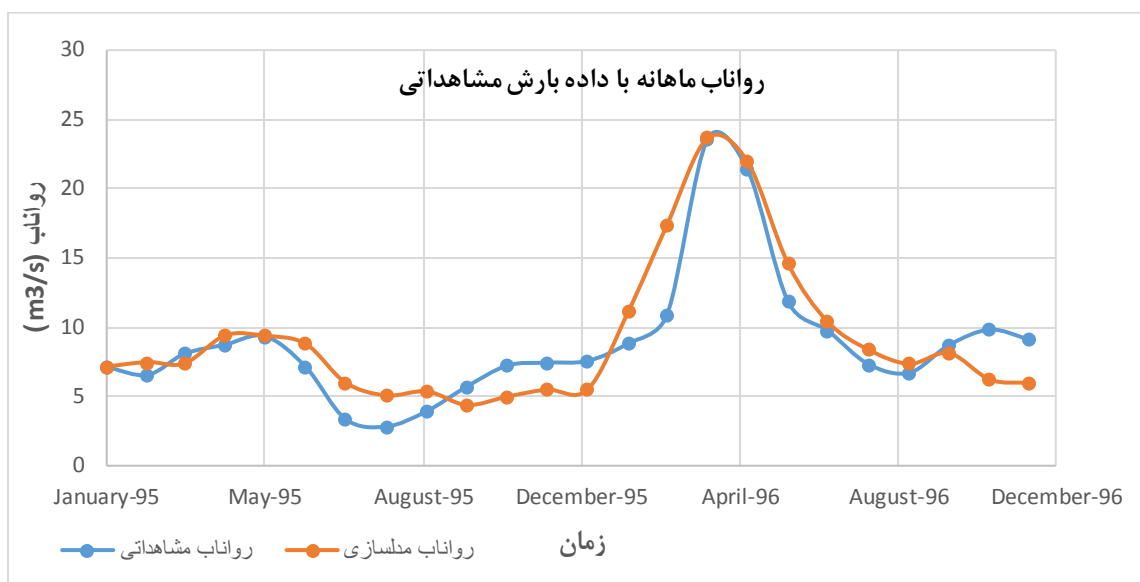
شکل ۴-۲۲. رواناب ماهانه مشاهده‌ای (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده بارش ماهواره‌ای (محور عمودی) در دوره واسنجی



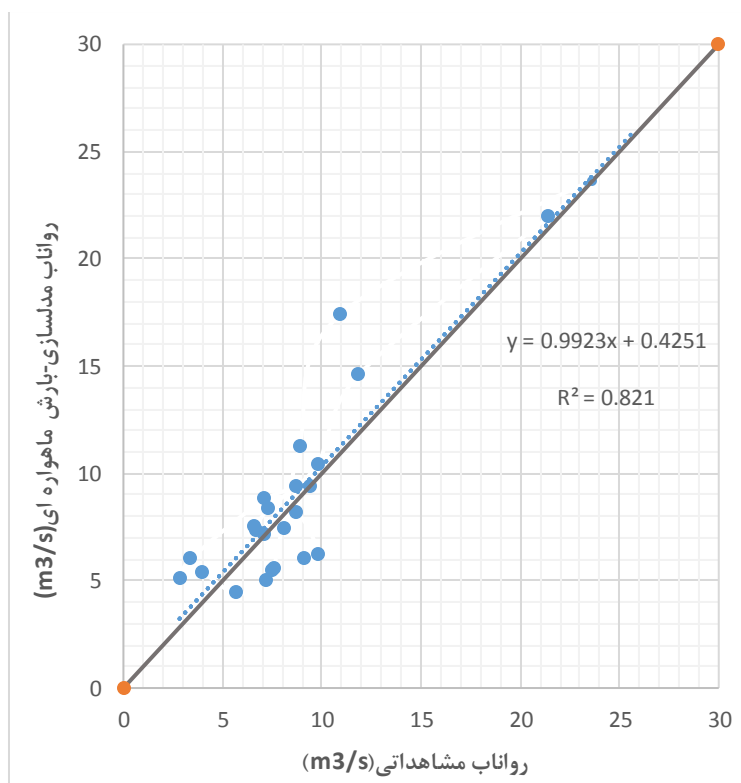
شکل ۴-۲۳. هیدروگراف رواناب ماهانه مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش مشاهدات زمینی



شکل ۴-۲۴. رواناب ماهانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده بارش مشاهداتی (محور عمودی) در دوره اعتبارسنجی



شکل ۴-۲۵. هیدروگراف ماهانه رواناب مشاهداتی و مدلسازی شده در دوره صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای



شکل ۴-۲۶. رواناب ماهانه مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده بارش ماهواره‌ای (محور عمودی) در دوره اعتبارسنجی

با توجه به شکل‌ها و جدول‌های ارائه شده، ملاحظه می‌شود که مدل در حالت ماهانه نتایج دقیق‌تری نسبت به گام زمانی روزانه دارد. همانطور که بر طبق نتایج روزانه انتظار می‌رفت، مدل‌سازی با داده‌های بارش مشاهداتی زمینی عملکرد بهتری نسبت به داده‌های بارش ماهواره‌ای داشته است. همچنان مدل با دو سری بارش در شبیه‌سازی دوره برداشت آب جهت مصارف کشاورزی ضعیف عمل کردند و این برداشت باعث گردیده مدل در دوره برداشت و چند ماه بعد از آن دچار خطا شود. در تخمین دبی بیشینه، مدل عملکرد بهتری نسبت به مقیاس روزانه داشته است.

از جدول (۴-۶) این‌گونه برداشت می‌شود که مدل با داده‌های بارش مشاهداتی در دوره واسنجی و با داده بارش ماهواره‌ای در دوره صحت‌سنجی عملکرد بهتری داشته است. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که مدل در تخمین رواناب بیشینه با هر دو سری بارش، توانایی بیشتری نسبت به مقیاس روزانه دارد.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

هدف از این مطالعه، استفاده حداکثری از داده‌های ماهواره‌ای جهت واردسازی و اجرای مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC بوده است. در این فصل از پژوهش جمع‌بندی نتایج این تحقیق ارائه شده‌است و در ادامه پیشنهاداتی جهت توسعه تحقیق حاضر در آینده ارائه می‌گردد.

۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی بر آن بود که از داده‌های ماهواره‌ای جهت ورود به مدل VIC استفاده شود. منطقه انتخاب شده یک منطقه مناسب از جنبه وجود داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی بود اما به‌خاطر برداشت‌های کشاورزی تاکنون در این منطقه با مدل هیدرولوژیکی VIC مدل‌سازی انجام نگرفته بود. بنابراین برای بررسی توان مدل هیدرولوژیکی VIC در این منطقه، ابتدا با داده‌های بارش مشاهدات زمینی مدل‌سازی انجام گرفت، سپس نتایج این مدل‌سازی، با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با داده بارش ماهواره‌ای مقایسه گردید که نتایج آن در فصل چهارم ارائه گردید.

ابتدا به توانایی مدل هیدرولوژیکی VIC در شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری بنکوه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای پرداخته خواهد شد. سپس نتایج مقایسه داده بارش ماهواره‌ای با ایستگاه‌های مشاهداتی بررسی می‌گردد.

۵-۲-۱- تحلیل رواناب مدل‌سازی شده

موضوع قابل تأملی که در این مطالعه وجود داشت، برداشت زیاد آب در بخش کشاورزی بود که این امر مدل‌سازی را دچار خطای زیادی کرد. این برداشت‌ها به تناوب و بسته به شرایط هر زیر حوزه، از اردیبهشت ماه آغاز و تا آبان ماه ادامه داشت، اما از خرداد ماه تا مهر ماه به‌صورت یکپارچه در سطح حوزه انجام می‌گرفت (براساس مطالعات مدیریت یکپارچه آب و خاک حوزه آبخیز حبله‌رود، معاونت آبخیزداری-وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۷۵)

رواناب ایجاد شده توسط داده بارش ماهواره‌ای و ایستگاه‌های مشاهداتی توسط ۳ پارامتر مورد بررسی قرار گرفتند

که به تفصیل بیان گردیده‌اند.

۵-۲-۱-۱- ضریب تبیین (R2)

این پارامتر به بررسی همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدلسازی شده می‌پردازد و حد آن بین صفر تا یک است. مشکل این پارامتر غیرمتریک بودن آن است که بیش‌برآورد و کم‌برآورد مدلسازی را بررسی نمی‌کند و فقط به همبستگی می‌پردازد که نیاز است در کنار آن پارامتر دیگری نیز مورد سنجش قرار گیرد [۵۸]. حد قابل قبول برای این پارامتر برابر با ۰,۵ می‌باشد [۵۹].

مقادیر برای داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس روزانه در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰,۶ و ۰,۶۷ و در مقیاس ماهانه برابر با ۰,۷۵ و ۰,۸۲ می‌باشد که در این پارامتر توانایی مدل و داده‌های ماهواره‌ای تأیید می‌گردد. این مقادیر برای مدلسازی با داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهداتی در مقیاس روزانه برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر است با ۰,۷۲ و ۰,۷۳ می‌باشد. برای مقیاس ماهانه برابر است با ۰,۸۵ و ۰,۸۴ که این نتایج با نتایج به‌دست آمده با داده‌های بارش ماهواره‌ای اختلاف چشمگیری ندارد.

۵-۲-۱-۲- ضریب نش-ساتکیف (NSE)

این پارامتر یک پارامتر متریک است و دید مناسب و کلی برای هیدروگراف ارائه می‌دهد بنابراین می‌توان این شاخص را عنوان بهترین هدف واسنجی می‌توان در نظر گرفت [۶۰]. این پارامتر به دلیل انعطاف‌پذیری در مدل‌های ریاضی، یک پارامتر خوب در هیدرولوژی به شمار می‌رود [۶۱]. مقدار بهینه آن برابر با یک است و در بازه $[-\infty, 1]$ متغیر است. مقدار کمتر از صفر به این معنی است که میانگین داده‌های مشاهداتی برآورد بهتری نسبت به مدلسازی می‌باشد. به‌طور کلی مقدار NSE کمتر از ۰,۵ غیرقابل قبول، $0,5 > NSE > 0,65$ رضایت‌بخش، $0,65 > NSE$ می‌باشد. خوب و $0,75 > NSE$ بسیار خوب می‌باشد و اگر مقدار R^2 بیشتر از ۰,۶ و ضریب نش-ساتکیف بیشتر از ۰,۵ باشد نتایج مدلسازی قابل قبول است [۶۲].

در این پژوهش مقدار ضریب نش-ساتکیف به‌دست آمده برای داده‌های بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه و دوره

واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰,۶ و ۰,۶۲ می‌باشد و برای مقیاس ماهانه برابر است با ۰,۷۴ و ۰,۷۸ می‌باشد که این نتایج با توجه به مقدار ضریب تبیین بیشتر از ۰,۶ در هر دو مقیاس روزانه و ماهانه رضایت‌بخش می‌باشد.

مقدار ضریب نش-ساتکلیف برای مدلسازی با داده‌های مشاهداتی در مقیاس روزانه و هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی برابر است با ۰,۷۲ می‌باشد که با ضریب تبیین ۰,۷۲ می‌توان گفت نتایج کاملاً رضایت‌بخش است و در مقیاس روزانه که برابر با ۰,۸۴ می‌باشد، نتایج بسیار خوب است.

علی غلام‌پور و همکاران (۱۳۹۶)، طی مدلسازی که در مقیاس ماهانه با مدل SWAT^۱ برای دوره ۱۹۹۸-۲۰۱۱ در این منطقه انجام دادند، به ضرایب نش-ساتکلیف ۰,۶۳ در دوره واسنجی و ۰,۵۸ در دوره صحت‌سنجی، ضریب تبیین ۰,۶۸ در دوره واسنجی و ۰,۶۵ در دوره صحت‌سنجی رسیدند [۶۳].

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت مدلسازی با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای حد قابل قبولی را در این ضریب کسب می‌کند و نتایج تفاوت چندانی با مدلسازی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهدات زمینی ندارد.

۵-۲-۱-۳- ریشه میانگین مربعات خطای کاکس-باکس (TRMSE)

این پارامتر بیشتر به جریان‌های پایین توجه دارد و همان‌طور که از نمودارها و نتایج استنباط می‌گردد مدل در شبیه‌سازی جریان‌های پایین عملکرد خوبی داشته است و اختلاف ناچیزی با نتایج حاصل از داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهداتی داشته است. غضنفری مقدم و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای که در حوضه آبریز قره‌سو انجام دادند به خطای ۱,۴۸ و ۱,۱ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی رسیدند که نتایج حاصل از این پژوهش در حوضه آبریز حبله‌رود میزان کمتری را گزارش می‌دهد [۵۵].

۵-۲-۱-۴- رواناب بیشینه

مدل در تخمین رواناب بیشینه در مقیاس روزانه عملکرد مناسبی نداشت. این برداشت برای هر دو سری بارش

^۱ Soil & Water Assessment Tool

صدق می‌کند. اما در مقیاس ماهانه میزان ضریب تبیین، ضریب نش-ساتکلیف و ریشه میانگین خطای کاکس-باکس مدل عملکرد بهتری داشت، در تخمین رواناب بیشینه نیز عملکرد بهتری داشت و مدل با هر دو سری بارش به نسبت بهتر عمل کرد.

در جمع‌بندی کلی می‌توان عنوان کرد با توجه به عملکرد مدل هیدرولوژیکی VIC با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهداتی به‌عنوان شاخص در این حوزه آبریز، عملکرد مدل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مثبت ارزیابی می‌گردد و می‌توان در این حوضه آبریز با استفاده از این داده‌های ماهواره‌ای و مدل هیدرولوژیکی VIC مدل‌سازی انجام داد.

۵-۲-۲- تحلیل داده‌های بارش ماهواره‌ای

همانطور که در جدول ۴-۱ نشان داده شد، توانایی تشخیص بارش ماهواره‌ای در هر ۴ ایستگاه بررسی شده با توجه به مقدار POD و FAR، بسیار کم است. مقدار بالای نرخ خطا به این معنی است که داده ماهواره‌ای روزهای زیادی وقوع بارش را گزارش داده است اما در ایستگاه مشاهداتی بارشی گزارش نشده است. اما خطای محاسبه شده در پارامترهای BIAS و ME عددی مثبت است و این بدان معنی است که این سری داده بارش برآورد بیشتری نسبت به ایستگاه‌های مشاهداتی داشته است. نتایج نشان دادند بارش ماهواره‌ای ضریب همبستگی پایینی دارد و این یک نقطه ضعف دیگری برای این پایگاه داده در این منطقه به حساب می‌آید. به‌طور کلی این نتایج توانایی داده‌های بارش در این حوضه از لحاظ تشخیص صحیح بارش پایین ارزیابی می‌شود اما میزان بارش تخمین زده شده خطای چندانی ندارد. یکی از علل عدم توانایی تخمین صحیح رواناب بیشینه توسط مدل با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای، عدم تخمین صحیح بارش بیشینه در این منطقه بود.

۵-۳- بررسی فرضیه‌ها

در پایان مطالعه به رد یا اثبات فرضیه‌های مطرح شده در ابتدای تحقیق پرداخته می‌شود.

❖ فرضیه ۱:

داده‌های ماهواره ای دقت مناسبی نسبت به داده‌های مشاهداتی دارند؛

با بررسی داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR مشخص گردید این داده‌ها دقت مناسبی در تشخیص بارش نداشته و بارش بیشتری نسبت به میزان بارش رخ داده در منطقه گزارش می‌دهد. ممکن است این داده‌ها دقت مناسبی در حوضه دیگری داشته باشند اما در این حوضه این‌گونه نبود بنابراین این فرضیه رد می‌شود.

❖ فرضیه ۲:

با استفاده از داده‌های مشاهداتی و مدل هیدرولوژیکی VIC می‌توان رواناب را با دقت مناسبی

شبیه‌سازی کرد؛

با توجه به نتایج به دست آمده از ۳ شاخص R^2 , NSE و TRMSE مشخص شد مدل هیدرولوژیکی VIC در این منطقه توانایی خوبی در تخمین رواناب داشته است بنابراین این فرضیه در این مطالعه قبول می‌گردد.

❖ فرضیه ۳:

استفاده حداکثری از داده‌های ماهواره‌ای و مدل هیدرولوژیکی می‌تواند منجر به تخمین مناسب

رواناب مشاهداتی شود؛

نتایج شبیه‌سازی رواناب با کمک داده‌های ماهواره‌ای اگر چه از دقت داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی ضعیفتر بود اما نتایج آن قابل قبول بود و فاصله چشم‌گیری با داده‌های مشاهداتی نداشت لذا این فرضیه نیز در این منطقه قبول می‌گردد.

۵-۴ - پیشنهادات برای تحقیقات آینده

همانطور که ملاحظه شد، مدلسازی رواناب توسط مدل هیدرولوژیکی VIC با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای PERSIANN-CDR و بارش ایستگاه‌های مشاهداتی انجام گرفت. با توجه به نتایج این پژوهش و نقاط ضعف و قوت تحقیق حاضر، پیشنهاداتی جهت ادامه و تکمیل کار برای فعالیت‌های پژوهشی آینده ارائه می‌شود. برخی از مهم‌ترین این پیشنهادها به شرح زیر می‌باشند:

- محاسبه برداشت مصارف کشاورزی و بازسازی رواناب ایستگاه بنکوه و مدلسازی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC با توجه اطلاعات کامل در این حوضه آبریز و در دسترس بودن آن‌ها؛
- استفاده از این مدل در مقیاس مکانی کوچکتر و بررسی اثر اندازه سلول‌ها؛
- واسنجی مدل به صورت زیر حوضه ای با توجه به وجود ۳ ایستگاه دیگر در بالادست بنکوه؛
- تحلیل و بررسی دیگر خروجی‌های مدل از قبیل رطوبت خاک و تبخیر-تعرق؛
- استفاده از مدل هیدرولوژیکی دیگری که توانایی محاسبه برداشت کشاورزی داشته باشد و مقایسه نتایج این دو مدل؛
- مدلسازی در دوره آبخیزداری شده با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در این دوره و بررسی اثر آبخیزداری در این منطقه و واسنجی مدل؛
- استفاده از داده‌های مدل‌های اقلیمی و بررسی سناریوهای مختلف بر خروجی‌های مدل؛
- واسنجی مدل با استفاده از توابع هدف متفاوت و بررسی اثر حالات متفاوت استفاده از این توابع روی نتایج مدلسازی؛
- استفاده از داده‌های برف حاصل از سنجش از دور برای کالیبراسیون مدل و بررسی اثرات آن با توجه به شرایط حوضه
- تغییر دوره مدلسازی و استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای دیگر از قبیل TRMM, IMERG, PERSIANN-CCS

۱. Kumar, M., *Toward a hydrologic modeling system*. 2009.
۲. گودرزی, et al, مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT, IHACRES و SIMHYD در شبیه سازی رواناب حوضه قرهسو. مدیریت آب و آبیاری, ۲۰۱۲. ۲(۱): p. 25-40.
۳. Nepal, S., et al, *Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model*. Hydrological Processes, 2014. **28**(3): p. 1329-1344.
۴. شفیع, قراری, and شروان, مروری بر مفاهیم مدل سازی هیدرولوژی در حوضه های آبریز: بخش اول معرفی فرآیند مدل سازی. آب وتوسعه پایدار, ۲۰۱۷. ۴(۲): p. 95-102.
۵. Beven, K., *Causal models as multiple working hypotheses about environmental processes*. Comptes Rendus Geoscience, 2012. **344**(2): p. 77-88.
۶. Savenije, H.H., *HESS Opinions" The art of hydrology"*. Hydrology & Earth System Sciences, 2009. **13**(2): p.
۷. Abbaspour, K., et al, *A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters*. Water Resources Research, 1997. **33**(8): p. 1879-1892.
۸. Refsgaard, J.C. and J. Knudsen, *Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models*. Water Resources Research, 1996. **32**(7): p. 2189-2202.
۹. CHAI, S., C. CHAW, and T. WEI, *THE INFLUENCE OF STIMULATING CAROTID BODY CHEMORECEPTORS ON LYMPHOCYTIC COUNT OF BLOOD AND ITS RELATION TO ADRENAL CORTEX*. Sheng li xue bao:[Acta physiologica Sinica], 1964. **27**: p. 91-95.
۱۰. Kauffeldt, A., et al, *Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level*. Environmental Modelling & Software, 2016. **75**: p. 68-76.
۱۱. Liang, X., et al, *A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994. **99**(D7): p. 14415-14428.
۱۲. Milly, P., et al, *Terrestrial water-storage contributions to sea-level rise and variability*. Understanding Sea-Level Rise and Variability, 2010: p. 226-255.
۱۳. Freeman, M.C., C.M. Pringle, and C.R. Jackson, *Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales 1*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2007. **43**(1): p. 5-14.
۱۴. Islam, M.S., et al, *A grid-based assessment of global water scarcity including virtual water trading*. Water Resources Management, 2007. **21**(1): p. 19.
۱۵. Sayama, T. and J.J. McDonnell, *A new time - space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale*. Water Resources Research, 2009. **45**(7): p.

۱۶. لاله, پ., *et al*., ارزیابی عملکرد مدل تلفیقی ظرفیت نفوذ متغیر و روندیابی جریان در حوضه آبریز سفید رود.
۱۷. میری, *et al*., معرفی و ارزیابی مدل جهانی همسان سازی داده های زمینی با داده های مشاهده ای در ایران. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر», ۲۰۱۸, ۲۶(۱۰۴): p. 5-17.
۱۸. اصغر, ع. and ش. علیرضا, ارزیابی مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC-3L برای شبیه سازی دبی رودخانه و تحلیل حساسیت آن در مقیاس های زمانی مختلف (مطالعه موردی: حوضه آبریز چالوس).
۱۹. کوهی, *et al*., واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC-3L با استفاده از داده های ماهواره ای رطوبت سطحی خاک. تحقیقات منابع آب ایران, ۲۰۱۹, ۱۵(۴): p. 0-0.
۲۰. عزیزیان, *et al*., ارزیابی کارائی منابع بارشی بازتحلیل شده و مبتنی بر تکنیکهای سنجش از دور جهت مدل سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل بزرگ مقیاس VIC-3L. تحقیقات منابع آب ایران, ۲۰۱۹, ۱۵(۲): p. 0-0.
۲۱. Stamm, J.F., E.F. Wood, and D.P. Lettenmaier, *Sensitivity of a GCM simulation of global climate to the representation of land-surface hydrology*. Journal of Climate, 1994. 7(8): p. 121. ۱۲۳۹-۸.
۲۲. Cayan, D.R., et al., *Future dryness in the southwest US and the hydrology of the early 21st century drought*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010. 107(50): p. 21271-21276.
۲۳. Dadhwal, V., S. Aggarwal, and N. Mishra, *Hydrological simulation of Mahanadi river basin and impact of land use/land cover change on surface runoff using a macro scale hydrological model*. 2010: na.
۲۴. Wang, G., et al., *Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model*. Hydrology and Earth System Sciences, 2012. 16(1): p. 231.
۲۵. Xia, Y., et al., *Evaluation of multi-model simulated soil moisture in NLDAS-2*. Journal of Hydrology, 2014. 512: p. 107-125.
۲۶. Najafi, M.R. and H. Moradkhani, *Multi-model ensemble analysis of runoff extremes for climate change impact assessments*. Journal of Hydrology, 2015. 525: p. 352-361.
۲۷. Lievens, H., et al., *SMOS soil moisture assimilation for improved hydrologic simulation in the Murray Darling Basin, Australia*. Remote Sensing of Environment : ۱۶۸, ۲۰۱۵, p. 146-162.
۲۸. Bi, H., et al., *Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016. 121(6): p. 2658-2678.
۲۹. Markert, K.N., et al., *spatial modeling of land cover/land use change and its effects on hydrology within the Lower Mekong Basin*, in *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia*. 2018, Springer. p. 667-698.
۳۰. Majumder, R., R. Walid, and J. Zheng, *Assessing Water Budget Sensitivity to Precipitation Forcing Errors in Potomac River Basin Using the VIC Hydrologic Model CyberTraining: Big Data+ High-Performance Computing+ Atmospheric Sciences*. UMBC Faculty

- Collection, 2019.
- . ۳۱ McPherson, R., *Impacts of Climate Change on Flows in the Red River Basin*. Final Report to the South Central Climate Science Center, Norman, OK, Report, 2016(G13AC00386).
 - . ۳۲ Hengade, N., T. Eldho, and S. Ghosh, *Climate change impact assessment of a river basin using CMIP5 climate models and the VIC hydrological model*. Hydrological Sciences Journal, 2018. **63**(4): p. 596-614.
 - . ۳۳ Lu, W., et al., *Hydrological projections of future climate change over the source region of Yellow River and Yangtze River in the Tibetan Plateau: A comprehensive assessment by coupling RegCM4 and VIC model*. Hydrological Processes, 2018. **32**(13): p. 2096-2117.
 - . ۳۴ Clifton, C.F., et al., *Effects of climate change on hydrology and water resources in the Blue Mountains, Oregon, USA*. Climate Services, 2018. **10**: p. 9-19.
 - . ۳۵ Mallakpour, I., M. Sadegh, and A. AghaKouchak, *A new normal for streamflow in California in a warming climate: Wetter wet seasons and drier dry seasons*. Journal of Hydrology, 2018. **567**: p. 203-211.
 - . ۳۶ Rakovec, O., et al., *Diagnostic Evaluation of Large-Domain Hydrologic Models Calibrated Across the Contiguous United States*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019. **124**(24): p. 13991-14007.
 - . ۳۷ Kratzert, F., et al., *Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets*. Hydrology & Earth System Sciences, 2019. **23**(12): p. 1-12.
 - . ۳۸ Gauch, M., et al. *Streamflow prediction with limited spatially-distributed input data*. in *Proceedings of the NeurIPS 2019 Workshop on Tackling Climate Change with Machine Learning*. 2019.
 - . ۳۹ Li, J., et al., *Flash droughts in the Pearl River Basin, China: Observed characteristics and future changes*. Science of The Total Environment, 2020. **707**: p. 136074.
 - . ۴۰ Ahmad, S.K. and F. Hossain, *Maximizing energy production from hydropower dams using short-term weather forecasts*. Renewable Energy, 2020. **146**: p. 1560-1577.
 - . ۴۱ Sabzi, H.Z., et al., *Comparison of projected water availability and demand reveals future hotspots of water stress in the Red River basin, USA*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019. **26**: p. 100638.
 - . ۴۲ Zhang, B., et al., *Evaluation and comparison of multiple evapotranspiration data models over the contiguous United States: Implications for the next phase of NLDAS (NLDAS-Testbed) development*. Agricultural and Forest Meteorology, 2020. **280**: p. 107810.
 - . ۴۳ Bhattacharya, T., D. Khare, and M. Arora, *Evaluation of reanalysis and global meteorological products in Beas river basin of North-Western Himalaya*. Environmental Systems Research, 2020. **9** : (۱) p. 1-29.
 - . ۴۴ Andreadis, K.M. and D.P. Lettenmaier, *Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model*. Advances in water resources, 2006. **29**(6): p. 872-886.
 - . ۴۵ Lohmann, D., et al., *Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model*. Hydrological sciences journal, 1998. **43**(1): p. 131-141.
 - . ۴۶ Lohmann, D., R. NOLTE - HOLUBE, and E. Raschke, *A large - scale horizontal routing*

- model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus A*, 1996. **48**(5): p. 708-721.
۴۷. سیدعلی، س.س.، *et al*، تحلیل روند عوامل هیدروکلیماتولوژی و کاربری اراضی بر منابع آب حوزه آبخیز حبله رود. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۳۹۵. ۲۳(۳): p# ۰۰۰۴۶۷. -
۴۸. Nachtergaele, F., et al., *Harmonized World Soil Database* (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2009.
۴۹. Sulla-Menashe, D. and M.A. Friedl, *User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product*. USGS: Reston, VA, USA, 2018: p. 1-18.
۵۰. Strahler, A.H., et al, *MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version 5.0*. MODIS documentation, 1999. **23**(4): p. 42-47.
۵۱. Ashouri, H., et al., *PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015. **96**(1): p. 69-83.
۵۲. Berrisford, P., et al., *The ERA-Interim archive, version 2.0*. 2011.
۵۳. Schulzweida, U., L. Kornblueh, and R. Quast, *CDO user's guide*. Climate data operators, Version, 2006. **1**(6): p. 205-209.
۵۴. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, *River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles*. Journal of hydrology, 1970. **10**(3): p. 282-290.
۵۵. مقدم، غ، *et al*، واسنجی چند هدفه مدل هیدرولوژیکی مفهومی مبتنی بر هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیکی (مطالعه موردی: زیر حوضه قره سو). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰۱۸. ۲۵(۳): p. 161-175.
۵۶. Deb, K., et al., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002. **6**(2): p. 182-197.
۵۷. Dang, T.D., et al., *A software package for the representation and optimization of water reservoir operations in the VIC hydrologic model*. Environmental Modelling & Software, 2020. **126**: p. 104673.
۵۸. Krause, P., D. Boyle, and F. Bäse, *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. 2005.
۵۹. Van Liew, M., J. Arnold, and J. Garbrecht, *Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models*. Transactions of the ASAE, 2003. **46**(6): p. 1539.
۶۰. Servat, E. and A. Dezetter, *Selection of calibration objective fonctions in the context of rainfall-runoff modelling in a Sudanese savannah area*. Hydrological Sciences Journal, 1991. **36**(4): p. 307-330.
۶۱. Gupta, H.V. and H. Kling, *On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash - Sutcliffe Efficiency type metrics*. Water Resources Research, 2011. **47**(10): p. 10206.
۶۲. Moriasi, D.N., et al., *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, 2007. **50**(3): p. 885-900.

۶۳. علی، غ. پ.، مدلسازی حوضه آبریز حبله رود با استفاده از مدل هیدرولوژیک SWAT, in دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. ۱۳۹۶.

- ۶۴. Wagener, T., Van Werkhoven, K., Reed, P., & Tang, Y. (2009). *Multiobjective sensitivity analysis to understand the information content in streamflow observations for distributed watershed modeling*. *Water resources research*, 45(2).
- ۶۵. Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Lettenmaier, D. P., Lohmann, D., & Wood, E. F. (2001). Predicting the discharge of global rivers. *Journal of Climate*, 14(15), 3307-3323.

Abstract

In this study, runoff was simulated by ground Earth observation satellite data and VIC hydrological model. The site is the Hablehroud catchment located in the east of Tehran province in the period of 1992 to 1996. The VIC model is a mesoscale hydrological model that was used in this study in water balance mode. It is calibrated using the NSGA-II multi-objective optimization algorithm, which aimed to reduce the transformed root of the mean square of the error (TRMSE) and increased the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE). To evaluate the ability of the model, simulations were performed with the precipitation data from ground observation stations and the coefficient of determination (R^2), NSE coefficient and TRMSE in the calibration period (1992-1992) were equal to 0.72, 0.72 and 0.62, respectively. In the validation period (1995-1996) it was equal to 0.73, 0.72 and 0.52. Also, these coefficients on monthly scale in the calibration period were equal to 0.85, 0.84 and 0.47 and for the validation period were equal to 0.84, 0.84 and 0.42. After evaluating the model's ability to calibrate the model with the PERSIANN-CDR satellite precipitation data, the coefficients of R^2 and NSE and TRMSE were equal to 0.61, 0.60 and 0.62 in the calibration period and equal to the validation period, respectively 0.67, 0.62 and 0.58. On monthly scale, these coefficients were 0.75, 0.74 and 0.49 for the calibration period and 0.82, 0.78 and 0.46 for the validation period. The results showed proper estimation of runoff by the VIC hydrological model using earth observational satellite data in the Hablehroud catchment, which is confirmed by the obtained coefficients.

Keywords: VIC hydrological model, NSGA-II multi-objective optimization algorithm, Ground observation satellites, Satellite precipitation data, PERSIANN-CDR



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

Title of the Thesis:

**Feasibility study of using the VIC hydrologic model based on Earth
observation satellite data**

By:

Hossein Salehi

Supervisors:

Dr. Saeid Gharechelou

Dr. Saeed Goilan

October, 2020