



شبیه‌سازی تولید رسوب حوضه آبریز رودخانه کن با استفاده از مدل SWAT-CUP و SWAT

نازنین حق پرست^۱، میثم کمالی^۲، مهدی احمدی^۳، مسعود تجریشی^۴

۱، ۲، ۴ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳ - دانشکده مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه A&M تگزاس

N_haghparsat@mehr.sharif.ir

خلاصه

از مسائل مطرح در مدیریت آب در حوضه‌های آبریز، برآورد میزان تولید رسوب هر یک از زیرحوضه‌ها و شناسایی زیرحوضه غالب در تولید رسوب است. اخیراً حوضه آبریز کن بدون توجه به شناسایی محل‌های تولید رسوب بشدت مورد توجه ساخت و ساز قرار گرفته است که بهره‌برداری طولانی‌مدت از این حوضه و تأسیسات روی رودخانه را با مشکلات جدی روبرو می‌نماید. در این مقاله با استفاده از مدل SWAT، تولید رسوبات رودخانه کن شبیه‌سازی گردید. واسنجی و اعتبارسنجی رواناب و رسوب این مدل با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های رندان، کیگا، کشار و سولقان به کمک مدل SWAT-CUP انجام گرفت. نتایج مدل‌سازی انجام شده از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲، مقدار رسوبدهی رودخانه را حدود $115 \text{ ton/year/km}^2$ برآورد می‌کند که عمدتاً ناشی از زیرحوضه رندان است. این مقدار بدلیل اقدامات حفاظتی انجام گرفته در سال ۲۰۰۲، در مقایسه با مقدار متداول رسوب رودخانه‌ها (400 تا $500 \text{ ton/year/km}^2$) مقدار کمی است.

کلمات کلیدی: حوضه آبریز کن، تولید رسوب، واسنجی، SWAT، SWAT-CUP

۱. مقدمه

یکی از مسائل روز مطرح در حوضه‌های آبریز، برآورد میزان تولید رسوب و در نتیجه تأثیر آن بر حمل رسوب می‌باشد. حمل رسوب از جمله ویژگی‌های شاخص رودخانه‌ها در شرایط طبیعی است. مواد رسوبی حمل شده به پیروی از تغییر ویژگی‌های هندسی رودخانه و خصوصیات جریان، فرصت ترسیب یافته و این فرآیند به صورت پدیده تراز افزایشی یا رسوبگذاری در بازه‌های مختلف رودخانه خودنمایی می‌کند. در این تحقیق به برآورد میزان بار رسوب با منشا حوضه‌ای پرداخته شده است [۱].

وضعیت کاربری اراضی حوضه‌های آبریز از جمله عوامل تأثیرگذار در تغذیه رسوبی رودخانه‌ها بوده و بر ظرفیت انتقال رسوب اثر می‌گذارد. با توجه به آنکه اخیراً حوضه آبریز کن بشدت مورد توجه ساخت و ساز قرار گرفته است، لذا با تغییر کاربری منطقه شاهد رسوبگذاری در بستر رودخانه بوده‌ایم. مهمترین عواقب ایجاد رسوب در رودخانه‌ها، در عوارض اقتصادی حاصل از آن است. از این رو شبیه‌سازی میزان تولید و انتقال رسوب و شناسایی زیرحوضه غالب در تولید آن، به منظور بهره‌برداری حداکثری از رودخانه و به حداقل رساندن اثرات منفی آن و تامین اطلاعات مورد نیاز برای اقدامات مدیریتی جهت کاهش میزان رسوب ورودی و جلوگیری از فرسایش به منظور حفظ طبیعت امری ضروری می‌باشد.

با توجه به توضیحات فوق هدف این پژوهش مدل‌سازی میزان تولید رسوب حوضه آبریز کن می‌باشد. در بین مدل‌های موجود، از مدل شبیه‌سازی SWAT که یکی از پرکاربردترین مدل‌ها جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز می‌باشد استفاده شده است [۲ و ۳]. بتری و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مدل‌سازی میزان حمل رسوب حوضه آبریز رودخانه بلو پرداختند که نتایج رضایت بخشی دربر داشت [۴] مانوژ و همکاران در سال ۲۰۰۴ از این مدل در تخمین میزان رسوب تولیدی حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی استفاده کرده‌اند [۵].

واسنجی مدل SWAT در عین اهمیت بسیار وقت گیر است، لذا به منظور تسریع مراحل واسنجی و ارزیابی عدم قطعیت نتایج مدل از نرم‌افزار SWAT-CUP که توسط عباس پور در سال ۲۰۰۹ توسعه یافته استفاده شده است [۶]. به این مدل از روش‌های گوناگونی برای واسنجی پارامترها استفاده می‌کند. عباس پور و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش SUFI عدم قطعیت ۹۵ درصدی نتایج رواناب و رسوب توسط مدل SWAT را بررسی و به نتایج رضایت بخشی در خصوص برآورد رسوب توسط این مدل دست یافتند [۷].

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش محیط زیست

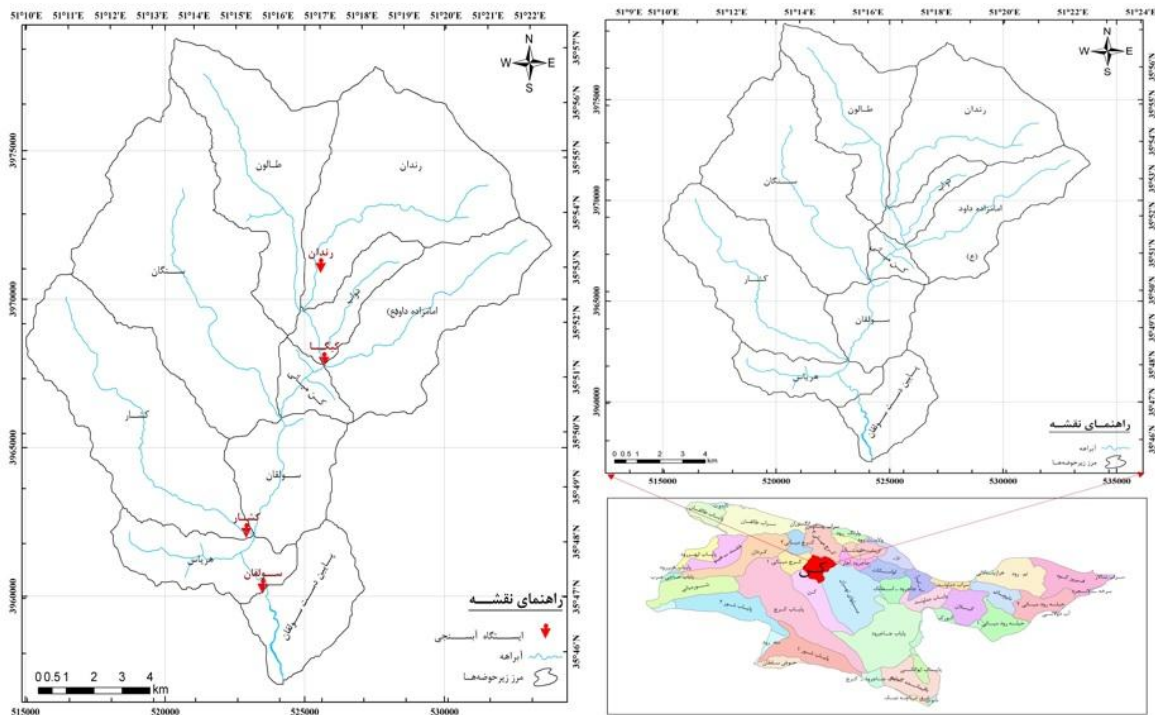
^۳ پست دکتری مهندسی عمران گرایش محیط زیست

^۴ استاد دانشکده مهندسی عمران

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبریز کن، از حوضه‌های شمالی شهر تهران می‌باشد و از شمال و غرب به حوضه کرج و از شرق و جنوب به دشت تهران می‌رسد. این رودخانه به طول ۳۳ کیلومتر با بده متوسط ۲۷۰۰ لیتر بر ثانیه، پرآب‌ترین رود تهران است و سالانه حدود پنج میلیون متر مکعب از آب این رودخانه برای دریاچه چیتگر منطقه ۲۲ اختصاص می‌یابد. ارتفاع متوسط حوضه ۲۳۷۷ متر از سطح دریای آزاد است. مرتفع‌ترین نقطه حوضه با ۳۸۲۲ متر در زیرحوضه امامزاده داوود (ع) واقع شده است و پست‌ترین نقطه با ۱۳۲۷ متر در زیرحوضه پایین دست سولقان قرار دارد [۸]. حوضه کن تا خروجی مورد مطالعه (محل تقاطع رودخانه کن با اتوبان همت) دارای مساحت ۲۱۶ کیلومتر مربع، طول ۱۵ کیلومتر و شیب متوسط ۰.۶٪ از شمال به جنوب می‌باشد. آزمایش‌های مکانیک خاک مصالح تشکیل دهنده رودخانه را درشت‌دانه و هموزن نشان می‌دهد [۹]. شکل ۱ موقعیت حوضه مطالعاتی کن در استان تهران به همراه رودخانه‌های اصلی و زیرحوضه‌های آن و شکل ۲ ایستگاه‌های سنجش دبی و رسوب را نشان می‌دهد.



شکل ۱ ایستگاه‌های سنجش دبی و رسوب منطقه مطالعاتی کن

شکل ۲ حوضه مطالعاتی کن، رودخانه‌ها و زیرحوضه‌های آن

۲-۲ معرفی مدل

SWAT مدلی جامع برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان آب رودخانه، پاسخ حوضه آبریز به تغییرات کاربری اراضی و اقلیم و آثار عملیات مدیریت حوضه بر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در حوضه‌های پیچیده می‌باشد و به شبیه‌سازی فرآیندهای مربوط به هیدرولوژی می‌پردازد که در این پژوهش مولفه رسوب مورد مطالعه قرار گرفته است. این مدل مفهومی به شبیه‌سازی فرآیندها (حرکت آب، رسوب، رشد گیاه و غیره) می‌پردازد. به این منظر مدل نیازمند اطلاعات هیدرولوژیکی، مدل رقوم ارتفاعی (DEM)، خاک و کاربری اراضی در سطح حوضه است. در مدل SWAT حوضه بر اساس نقشه ارتفاعی، DEM به تعدادی زیرحوضه و هر زیرحوضه با توجه به نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به واحدهای واکنش هیدرولوژیکی مشابه، HRU تقسیم می‌شود. در ابتدا مقدار رطوبت خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر HRU شبیه‌سازی شده و در نهایت این خصوصیات برای هر زیرحوضه متوسط وزنی گرفته می‌شود.

معادله اصلی برآورد رواناب معادله بیلان آب است. به روش شماره منحنی SCS، ابتدا رواناب سطحی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی HRU شبیه‌سازی و بر اساس آن کل رواناب حوضه روندیابی می‌شود. برای تعیین سرعت جریان در آبراه‌ها و روندیابی به ترتیب از معادله مانینگ و روش



ماسکینگام^۱ یا ذخیره متغیر استفاده شده است. شبیه‌سازی تولید رسوب در مدل بر اساس معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک MUSLE انجام می‌شود که بر اساس آن برای هر روز با بارندگی و رواناب مشخص میزان تولید رسوب هر HRU در حوضه تعیین می‌گردد [۱۰]. در این پژوهش با استفاده از DEM ۳۰ متری حوضه آبریز بر اساس مساحت زهکش هر بخش به ۱۰ زیرحوضه و براساس یکسانی مکانی ویژگی‌های کاربری اراضی و خاک به ۱۰۴۶ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شد. واسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2 انجام گرفت. این نرم‌افزار از نتایج مدل SWAT استفاده کرده و با تعریف پارامترهای مورد نظر و با توجه به مقادیر مشاهده‌ای ایستگاه‌های موجود، مراحل واسنجی را انجام می‌دهد. در ابتدا پارامترهای مربوط به دبی تعریف شده و واسنجی دبی انجام گرفت و در گام بعد با استفاده از نتایج آن واسنجی رسوب انجام شد. در نهایت مقادیر پارامترهای واسنجی شده توسط مدل SWAT-CUP به مدل SWAT وارد شده و خروجی نهایی حاصل می‌گردد. روش SUFI-2 میزان عدم قطعیت مدل‌سازی را توسط معیار p-factor (که بیانگر معیار درصد داده‌های اندازه‌گیری شده درون باند ۹۵٪ است) ارزیابی می‌کند. پارامترهای بکار رفته در این پژوهش جهت واسنجی دبی و رسوب با توجه به تحقیقات قبلی در این زمینه به شرح جدول‌های ۱ و ۲ می‌باشد [۱۱].

جدول ۱ پارامترهای بکار رفته در کالیبراسیون دبی

نام پارامتر	شرح پارامتر	دامنه تغییرات		واحد
CN2	SCS ضریب شماره منحنی	۰/۲	-۰/۲	
ALPHA-BF	ضریب جریان پایه آب زیرزمینی	۱	۰	days
GWQMN	حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن جریان پایه	۳۰۰۰	۰	days
GW_REVAP	فاکتور مربوط به انتقال آب از سفره آب زیرزمینی به منطقه ریشه	۰/۲	۰	
ESCO	فاکتور تصحیح تبخیر خاک	۱	۰/۵	
CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰/۳	۰	
CH-K2	ضریب هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های اصلی	۵۰	۱۰	mm/hr
CH-K1	ضریب هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های فرعی	۶۰	۱۰	mm/hr
SFTMP	دمای آستانه بارش	۵	-۵	C
SMFMN	حداقل میزان ذوب برف به ازای ۱درجه سانتی‌گراد تغییر دما در روز	۱۰	۰	mm H ₂ O/C * day
SMFMX	حداکثر میزان ذوب برف به ازای ۱درجه سانتی‌گراد تغییر دما در روز	۱۰	۰	mm H ₂ O/C * day
SMTMP	دمای ذوب توده برف (درجه سانتی‌گراد)	۵	-۵	C
SNOCOVMX	حداقل ارتفاع برف برای پوشش ۱۰۰٪ سطح حوضه	۵۰۰	۰	mm H ₂ O
TIMP	فاکتور تاخیر دمای توده برف	۱	۰	

جدول ۲ پارامترهای بکار رفته در کالیبراسیون رسوب

نام پارامتر	شرح پارامتر	دامنه تغییرات		واحد
HRU-SLP	میانگین شیب سرازیری	۱	۰	m/m
SLSUBBSN	فاکتور طول شیب	۱۵۰	۱۰	
USL-P	فاکتور اقدامات حفاظتی	۱	۰	
USL-C	فاکتور پوشش گیاهی	۰/۵	۰/۰۰۱	
USL-K	فاکتور فرسایش پذیری خاک	۰/۵	-۰/۵	
ADJ-PKR	فاکتور تصحیح نرخ حداکثر برای روندیابی رسوب در آبراهه‌های فرعی	۲	۰/۵	
SPCON	ضریب خطی برای محاسبه حداکثر مقدار رسوب	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	
SPEXP	پارامتر توان در برآورد بار رسوب آبراهه	۱/۵	۱	
CH-COV1	فاکتور فرسایش آبراهه	۰/۶	۰	
CH-COV2	فاکتور پوشش آبراهه	۱	۰	
CH-ERODMO	فاکتور فرسایش پذیری آبراهه	۱	۰	cm/hr/pa
LAT_SED	تمرکز رسوب در جریان جانبی و زیرزمینی	۵۰۰۰	۰	mg/l
PRF	فاکتور تصحیح نرخ حداکثر برای روندیابی رسوب در آبراهه اصلی	۲	۰	

¹ Muskingam

۳. اطلاعات ورودی مدل

برای ساخت مدل SWAT اطلاعات زیر به عنوان ورودی‌های مدل جهت شناساندن زیرحوضه رودخانه کن به نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته است:

توپوگرافی: DEM منطقه با اندازه پیکسل های ۳۰×۳۰ متر از سایت استر (Aster) اخذ شده است [۱۲].

نقشه خاک^۱: اطلاعات مربوط به پروفیل خاک منطقه بر اساس نقشه‌های dwg.* و اطلاعات اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی با استفاده از نرم‌افزار SPAW، به صورت یک لایه ورودی در نرم‌افزار Arc GIS و به انضمام آن یک فایل اطلاعاتی (*dbf) حاوی مشخصات خاک استخراج شد.

نقشه کاربری اراضی^۲: اطلاعات مربوط به کاربری اراضی منطقه با توجه به نقشه‌های ماهواره‌ای Landsat 8 (برداشت در تاریخ ۱۸ دسامبر ۲۰۱۳) به فرمت لایه ورودی در نرم‌افزار Arc GIS و همچنین یک فایل اطلاعاتی (*dbf) حاوی مشخصات مربوط به کاربری اراضی استخراج شده است.

شیب حوضه: با توجه به شیب زیاد حوضه آبریز کن، شیب این حوضه به پنج دسته ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ تقسیم شده است.

اطلاعات هواشناسی: اطلاعات بارش و دمای ایستگاه‌های هواشناسی (اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور) در دوره آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ استفاده گردید. مقادیر تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی نیز توسط مدل شبیه‌سازی شد. جدول ۳ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۳ مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در مدل

ایستگاه	طول شرقی	عرض شمالی	ارتفاع (m)	میانگین بارش ماهانه (mm)	میانگین حداکثر دمای ماهانه (°C)	میانگین حداقل دمای ماهانه (°C)
رندان	۳۵ ۸۸	۵۱ ۲۸	۱۸۷۰	۴۵/۶۵	۱۷/۰۸	۷/۹۹
کیگا	۳۵ ۸۶	۵۱ ۳۱	۱۸۰۰	۶۳/۲۷	۱۷/۱۱	۸/۱۵
کشار	۳۵ ۸۲	۵۱ ۲۳	۱۸۰۰	۳۲/۹۶	۱۹/۰۹	۸/۴۹
چیتگر	۳۵ ۷۳	۵۱ ۱۷	۱۳۰۵	۲۲/۳۹	۲۲/۴۵	۱۲/۳۶
مهرآباد	۳۵ ۶۸	۵۱ ۳۲	۱۱۹۰	۲۰/۳۸	۲۳/۶۳	۱۳/۷۶

اطلاعات هیدرومتری: واسنجی مدل با استفاده از اطلاعات مشاهداتی رواناب و رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای) مطابق جدول ۴ استفاده شده است. بدلیل کمبود اطلاعات مشاهداتی مربوط به رسوب، مقادیر رسوب روزانه در طول دوره مطالعاتی به کمک نرم‌افزار Loadest و با استفاده از اطلاعات دبی و رسوب روزانه موجود و روش‌های آماری در دسترس، بدست آمد و برای واسنجی استفاده گردید.

جدول ۴ مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شده در واسنجی

نام ایستگاه هیدرومتری	رندان	کیگا	کشار	سولقان
میانگین رواناب ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	۱/۱۲۴	۰/۲۹۳	۰/۲۷۶	۲/۴۵۵
میانگین رسوب ماهانه (تن بر کیلومتر مربع در روز)	۱۳/۰۴	۸/۲۱	۳/۴۵	۶۹/۵۵

۴. نتایج و بحث

این بخش به بررسی نتایج مدل‌سازی می‌پردازد. ارزیابی با استفاده از ضریب تبیین (R^2) و ضریب NS^2 و معیارهای r-factor و p-factor به روش SUFI-2 صورت گرفته است. مقدار p-factor بین ۰ و ۱ تغییر می‌نماید و مقادیر بزرگتر مطلوب‌تر است و برای I-factor مقادیر کوچکتر از ۱/۵ مطلوب است [۳]. عدم قطعیت نتایج مدل توسط معیارهای نام برده و به روش انجام شده است.

۴-۱ کالیبراسیون و اعتبارسنجی

جدول‌های ۵ و ۶ حاوی مقادیر بدست آمده برای پارامترهای دبی و رسوب پس از واسنجی مدل می‌باشد.

^۱ نقشه‌های خاک و کاربری اراضی منطقه از دفتر مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف اخذ شده است.

^۳ Nash and Sutcliffe



جدول ۵ مقادیر کالیبره شده پارامترهای رواناب

پارامتر	مقادیر کالیبره شده				
	رندان	کیگا	کشار	سولقان	پل قدیمی
CN2	-۰/۱۰۸	۰/۱۰۹	-۰/۰۳۷	۰/۰۴۹	۰/۱۸۴
ALPHA-BF	۰/۴۱۹	۰/۳۵۸	۰/۵۱۲	۰/۲۳۷	۰/۶۳۹
GWQMN	۲۰۵/۸۶	۱۱۵۱/۴۳	۷۶/۷۱	۲۳۸۵	۱۶۶۷/۹۲
GW_REVAP	۰/۰۶۶	۰/۰۵۹	۰/۱۳۴	۰/۰۸۸	۰/۰۷۵
ESCO	۰/۷۶۹	۰/۸۳۳	۰/۵۷۷	۰/۹۵	۰/۹۳۸
CH-N2	۰/۰۰۹	۰/۰۷۸	۰/۱۳۳	۰/۱۶۴	۰/۱۹۹
CH-K2	۲۰/۶۶	۱۷/۱۱	۱۰/۲۶۷	۴۷/۶۳	۳۶/۹۷
CH-K1	۲۶/۷۱	۴۵/۴۵	۴۹/۹۳	۱۱/۸۸	۱۱/۴۸
SFTMP	۴/۳۹	۴/۳۹	۴/۳۹	۴/۳۹	۴/۳۹
SMFMN	۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۲
SMFMX	۶/۲۷	۶/۲۷	۶/۲۷	۶/۲۷	۶/۲۷
SMTMP	۰/۵۱۶	۰/۵۱۶	۰/۵۱۶	۰/۵۱۶	۰/۵۱۶
SNOCOV MX	۳۹۱/۳	۳۹۱/۳	۳۹۱/۳	۳۹۱/۳	۳۹۱/۳
TIMP	۰/۴۴۸	۰/۴۴۸	۰/۴۴۸	۰/۴۴۸	۰/۴۴۸

جدول ۶ مقادیر کالیبره شده پارامترهای رسوب

پارامتر	مقادیر کالیبره شده			
	رندان	کیگا	کشار	سولقان
HRU-SLP	۰/۰۶۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	-۰/۰۶۷
SLSUBBSN	۰/۱۱۸۹	-۰/۰۵۷	۰/۰۹۵	۰/۱۷۲
USL-P	۰/۰۵۱	۰/۰۴۸	۰/۰۳	۰/۰۹۵
USL-C	۰/۳۶۷	۰/۱۵۹	۰/۳۶۱	۰/۰۵۰
USL-K	-۰/۰۴۶	۰/۰۳۶	-۰/۲۸۷	۰/۰۳۸
ADJ-PKR	۰/۸۶۳	۰/۸۶۳	۰/۸۶۳	۰/۸۶۳
SPCON	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
SPEXP	۱/۸۶۳	۱/۸۶۳	۱/۸۶۳	۱/۸۶۳
CH-COV1	۰/۴۰۹	۰/۲۴۴	۰/۳۳	۰/۵۲۵
CH-COV2	۰/۴۹۵	۰/۵۷۷	۰/۵۴۵	۰/۴۲۶
CH-ERODMO	۰/۳۳۷	۰/۶۷۳	۰/۳۸۲	۰/۱۹۳
LAT-SED	۵۲۵	۵۱/۲۵	۳۱۰	۵۱۲/۲
PRF	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶

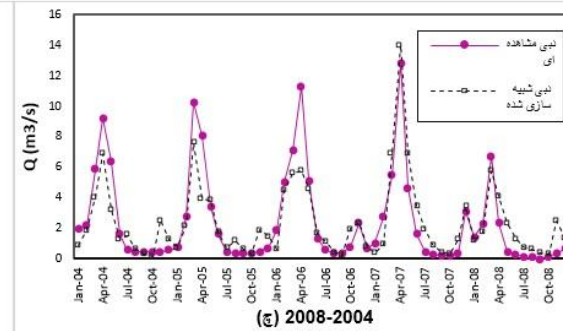
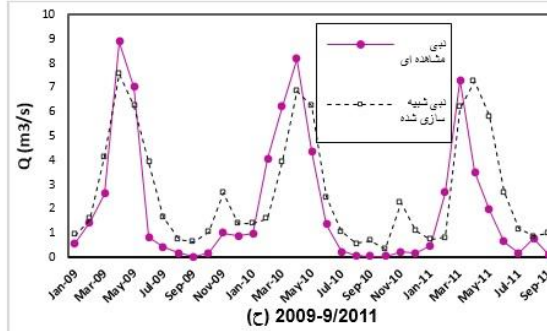
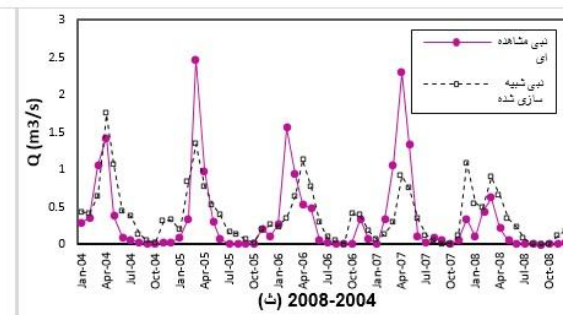
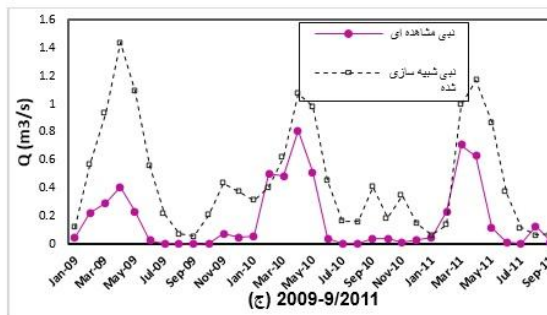
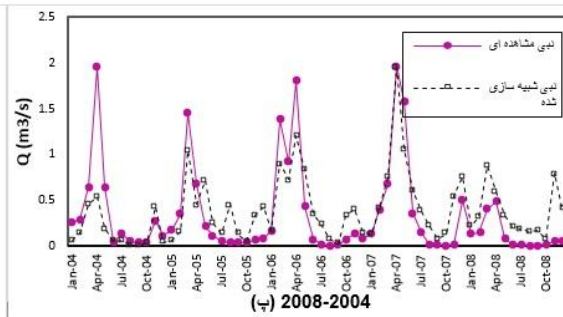
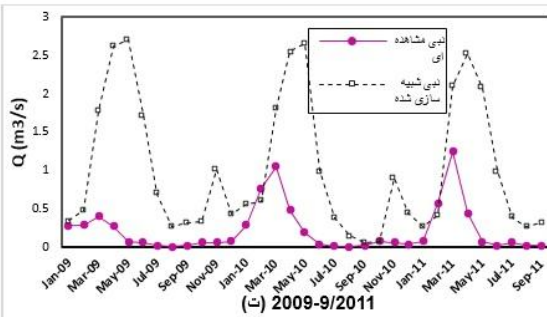
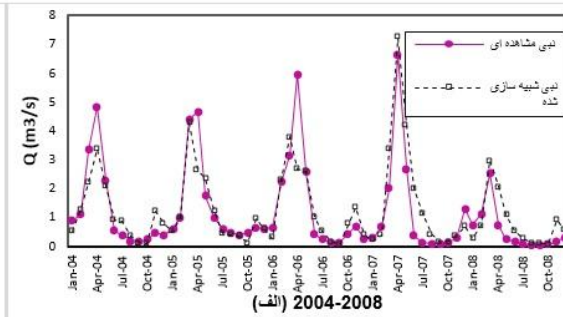
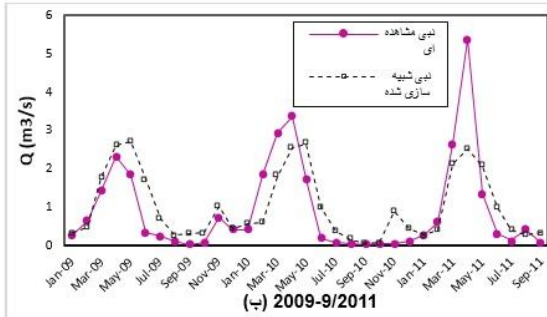
دوره زمانی مورد استفاده جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل و همچنین مقادیر ضریب تبیین (R^2) و ضریب NS حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی رواناب هریک از زیرحوضه‌ها^۱ به شرح جدول ۷ می‌باشد. شکل ۳ نشان‌دهنده نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی حوضه آبریز می‌باشد.

جدول ۷ خلاصه نتایج کالیبراسیون رواناب

زیرحوضه	واسنجی				اعتبارسنجی			
	رندان	کیگا	کشار	سولقان	رندان	کیگا	کشار	سولقان
دوره مطالعاتی	۲۰۰۸ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۸ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۸ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۸ تا ۲۰۰۴	۹/۲۰۱۱ تا ۲۰۰۹	۹/۲۰۱۱ تا ۲۰۰۹	۹/۲۰۱۱ تا ۲۰۰۹	۹/۲۰۱۱ تا ۲۰۰۹

^۱ منظور از زیرحوضه‌های رندان، کیگا، کشار و سولقان زیرحوضه‌هایی است که به ترتیب در ایستگاه‌های هیدرومتری رندان، کیگا، کشار و سولقان واسنجی و اعتبارسنجی می‌شوند.

ضرب R^2	۰/۷۵	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۴۳	۰/۶۲
ضرب NS	۰/۷۵	۰/۶	۰/۴۷	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۶۸



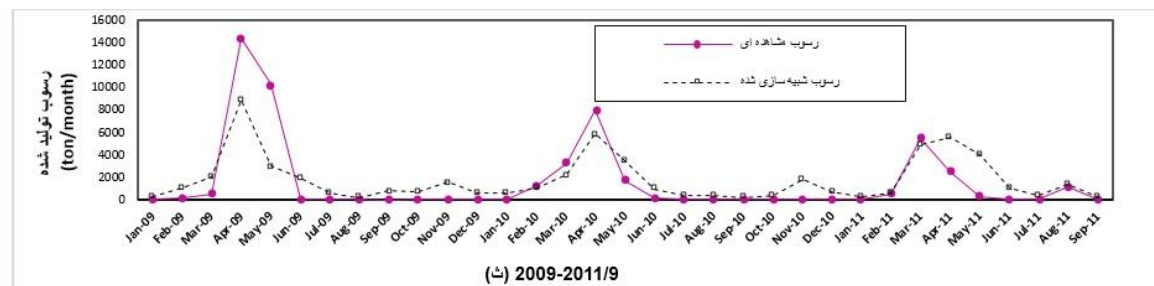
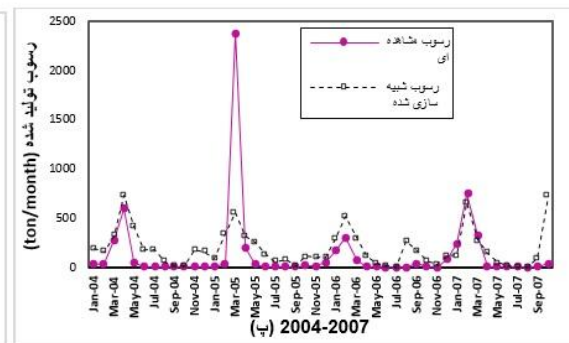
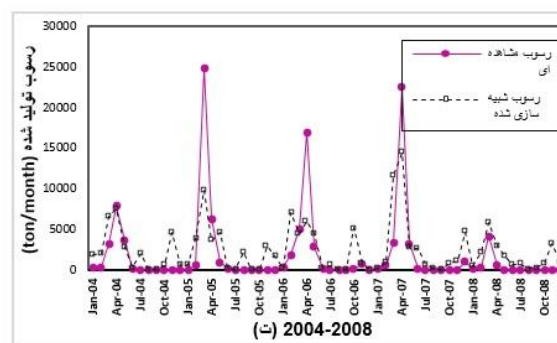
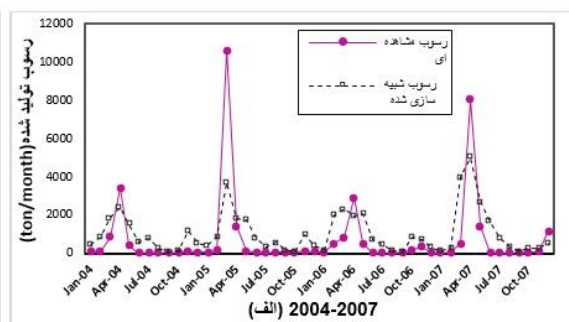
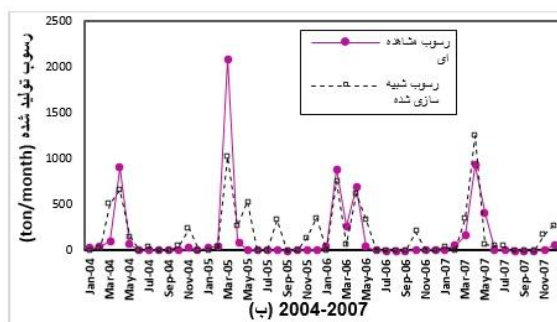
شکل ۳ مقادیر جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (الف): واسنجی زیر حوضه رندان (ب): اعتبارسنجی زیر حوضه رندان (پ): واسنجی زیر حوضه کیگا (ت): اعتبارسنجی زیر حوضه کیگا (ث): واسنجی زیر حوضه کشار (ج): اعتبارسنجی زیر حوضه کشار (چ): واسنجی زیر حوضه سولقان (ح): اعتبارسنجی کل حوضه آبریز در زیر حوضه سولقان

به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج حاصل از کالیبراسیون رسوب، علاوه بر بکارگیری شاخص‌های ضریب رگرسیون و ضریب NS، از شاخص آماری PBIAS نیز برای سنجش صحت شبیه‌سازی رسوب استفاده شده است. مقدار بهینه PBIAS صفر می‌باشد که صحت شبیه‌سازی مدل را تایید می‌کند.

حد مجاز آن مقادیر بین ۵۵٪ و ۵۵٪ می‌باشد. دوره زمانی مورد استفاده جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل و همچنین مقادیر ضریب تبیین (R^2) و ضریب NS و شاخص آماری PBIAS حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی رسوب هریک از زیرحوضه‌ها به شرح جدول ۸ می‌باشد. شکل ۴ نشان‌دهنده نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رسوب حوضه آبریز می‌باشد.

جدول ۸ خلاصه نتایج کالیبراسیون رسوب

اعتبارسنجی	واسنجی				زیرحوضه
	سولقان	کشار	کیگا	رندان	
دوره مطالعاتی	۲۰۰۸ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۷ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۷ تا ۲۰۰۴	۲۰۰۷ تا ۲۰۰۴	دوره مطالعاتی
ضریب R^2	۰/۵۶	۰/۳	۰/۶۳	۰/۵۲	ضریب R^2
ضریب NS	۰/۵۱	۰/۲۶	۰/۶۲	۰/۴۷	ضریب NS
PBIAS	۸/۰۳٪	-۲۸/۷۹٪	-۲۱/۱۹٪	-۳۲/۳۶٪	PBIAS



شکل ۴ مقادیر رسوب تولید شده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (الف): واسنجی زیرحوضه رندان (ب): واسنجی زیرحوضه کیگا (پ): واسنجی زیرحوضه کشار (ت): واسنجی زیرحوضه سولقان (ث): اعتبارسنجی کل حوضه آبریز در ایستگاه سولقان نتایج میزان تولید رسوب هریک از زیرحوضه‌ها به شرح جدول ۹ می‌باشد.

جدول ۹ میزان تولید رسوب هریک از زیرحوضه‌های حوضه آبریز کن

زیرحوضه	رندان	طالون	سنگان	دوآب	کن میانی	امامزاده داوود	کشار	سولقان	هریاس	پایین دست سولقان
میزان تولید رسوب (ton/year/km^2)	۱۸۶	۱۵۲	۱۱۰	۱۳۸	۱۱۵	۱۰۵	۵۹	۱۰۱	۱۳۰	۳۹



۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- ۱- شبیه‌سازی رواناب و رسوب به ترتیب با توجه به نتایج واسنجی و اعتبارسنجی کل حوضه در ایستگاه سولقان رضایت بخش بوده است.
- ۲- نتایج مدل‌سازی انجام شده از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲، مقدار رسوبدهی رودخانه را در حدود $115 \text{ ton/year/km}^2$ برآورد می‌کند که بدلیل شیب بالای زیرحوضه رندان، عمدتاً ناشی از آن است (مطابق جدول ۹). این مقدار بدلیل اقدامات حفاظتی و راهکارهای مدیریتی انجام گرفته در حوضه آبریز کن در سال ۲۰۰۲، در مقایسه با مقدار متداول رسوب رودخانه‌ها ($400 \text{ ton/year/km}^2$ تا $500 \text{ ton/year/km}^2$) مقدار کمی است.
- ۳- با توجه به اختلاف ارتفاع و شیب نسبتاً زیاد در کل حوضه، دمای زیرحوضه‌ها دارای اختلاف نسبتاً بالایی است که عمدتاً منجر به شکل‌گیری بارش به صورت برف در فصل‌های سرد سال در زیرحوضه‌های مرتفع‌تر می‌شود، لذا مطابق اشکال ۳ و ۴ رواناب و رسوب حداکثری این زیرحوضه‌ها در فصل بهار شکل می‌گیرد.
- ۴- مدل SWAT به علت ضعف در شبیه‌سازی تغییرات تبخیر تعرق، رطوبت خاک و وضعیت ذوب برف؛ رواناب و رسوب در فصل بهار را به میزان کمتری نسبت به واقعیت پیش‌بینی می‌کند، در حالیکه برای فصل پائیز این مقدار بیشتر از مقدار واقعی است. این مطلب در نمودارهای دبی و رسوب اشکال ۳ و ۴ نیز به چشم می‌خورد. لذا نقاط اوج نمودارهای مشاهده‌ای که عمدتاً در فصل بهار رخ می‌دهد پائین‌تر از نقاط اوج نمودارهای شبیه‌سازی نظیر آنها می‌باشد.
- ۵- زیرحوضه رندان دارای مساحت متوسط و ارتفاع و شیب نسبتاً بالایی می‌باشد. لذا تاثیر بسزایی در رواناب و رسوب کل حوضه آبریز به خصوص در فصل بهار دارد. در مقابل زیرحوضه کیگا علاوه بر ارتفاع بالا به دلیل کوچکی نقش ناچیزی در خروجی‌های حوضه آبریز ایفا می‌کند. زیرحوضه کشار نیز علیرغم مساحت بالا دارای سهم رواناب و در نتیجه رسوب کمتری می‌باشد. زیرحوضه سولقان دارای بیشترین سطح و ارتفاع متوسط در مقابل سایر زیرحوضه‌ها بوده و بدلیل شیب نسبتاً کم تاثیر کمتری در رواناب و رسوب خروجی حوضه آبریز دارد.
- ۶- با توجه به آنکه این مدل در شرایط سال‌های خشک عملکرد بهتری نسبت به سال‌های تر دارد، میزان بازده اعتبارسنجی در تمام زیرحوضه‌ها کمتر از بازده واسنجی می‌باشد که علت آن را می‌توان در تر بودن سال‌های اعتبارسنجی دانست.
- ۷- با توجه به کوچکی حوضه آبریز و هر یک از زیرحوضه‌ها و در نتیجه کوچکی دبی آنها، حساسیت پارامترهای آماری (ضریب رگرسیون و ضریب NS) به تغییرات کوچک دبی، اندکی عدم دقت مدل در شبیه‌سازی دبی منجر به افت قابل ملاحظه این ضرایب در مقایسه با حوضه‌های پرآب‌تر گردد.
- ۸- با تحلیل نتایج حاصل از واسنجی رواناب، مشاهده شد که پارامترهای حساس در هر یک از زیرحوضه‌ها متفاوت هستند. به طور کلی زیرحوضه‌های رندان و کیگا به ترتیب نسبت به پارامترهای ذوب برف، روندیابی رواناب و آب زیرزمینی دارای حساسیت بالایی می‌باشند و زیرحوضه‌های کشار و سولقان به ترتیب نسبت به پارامترهای ذوب برف، جریان آب زیرزمینی و روندیابی رواناب حساسیت بیشتری دارند که علت آن را می‌توان ارتفاع بیشتر زیرحوضه کیگا و پوشش غالباً سنگی آن دانست. از طرفی این نکته قابل توجه است که کل حوضه آبریز نسبت به پارامترهای مربوط به برف از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد.

۶. فهرست مراجع

۱. عمانی، ن. (۱۳۹۰)، "مدل‌سازی تخمین پتانسیل رسوبات ورودی به مخازن سدها به کمک تصاویر ماهواره ای و مدل SWAT" پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف
2. Lee, M., Park G., Park M., Park J.Y., and Lee J., Kim S. 2010. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying Best Management Practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery. Journal of Environmental Sciences, 22:6.826-833
3. Tuppad, P., Kannan, N., Srinivasan, R., Rossi, C.G., and Arnold, J.G. 2010. Simulation Agricultural Management Alternatives for Watershed Protection. Water Resour Manage, 24: 3115-3144
4. Betrie, G. D., Griensven, A. Mohamed, Y. A. Popesco, I. 2012. Linking SWAT and SOBEK using open modeling interface (OPENMI) for sediment transport simulation in the Blue Nile river basin. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-003
5. Neitsch, S. (.) -L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment tool Theoretical Documentation Version 2005.
6. Abbaspour, K. 2009. SWAT-CUP2; SWAT Calibration and Uncertainty Programs user manual.
7. Abbaspour, K., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine watershed using SWAT. Journal of Hydrology 333:413-430.
8. www.wikipedia.org



۹. بزرگی، ع. پورجعفر، م. بمانیان، م. (۱۳۸۳) "روند برنامه ریزی در جهت احیای رود دره های شهر تهران، مورد مطالعه رود دره کن" اولین همایش منطقه ای توسعه منابع آب

10. Manoj, Jha, Philip, W.Gassman, Jeffrey, G. Arnold, Silvia, S., Secchi, Todd Campbell, Catherine, L. Kling., (2004). "Hydrologic modeling of the upper Mississippi river basin using SWAT", Paper number 042069, 2004 ASAE Annual Meeting..

11. Kati, L. White and Indrajeet Chaubey, (2005). "Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable SWAT Model", Journal of the American Water Resources Association. 41(5):1077-1089.

12. www.asterweb.jpl.nasa.gov