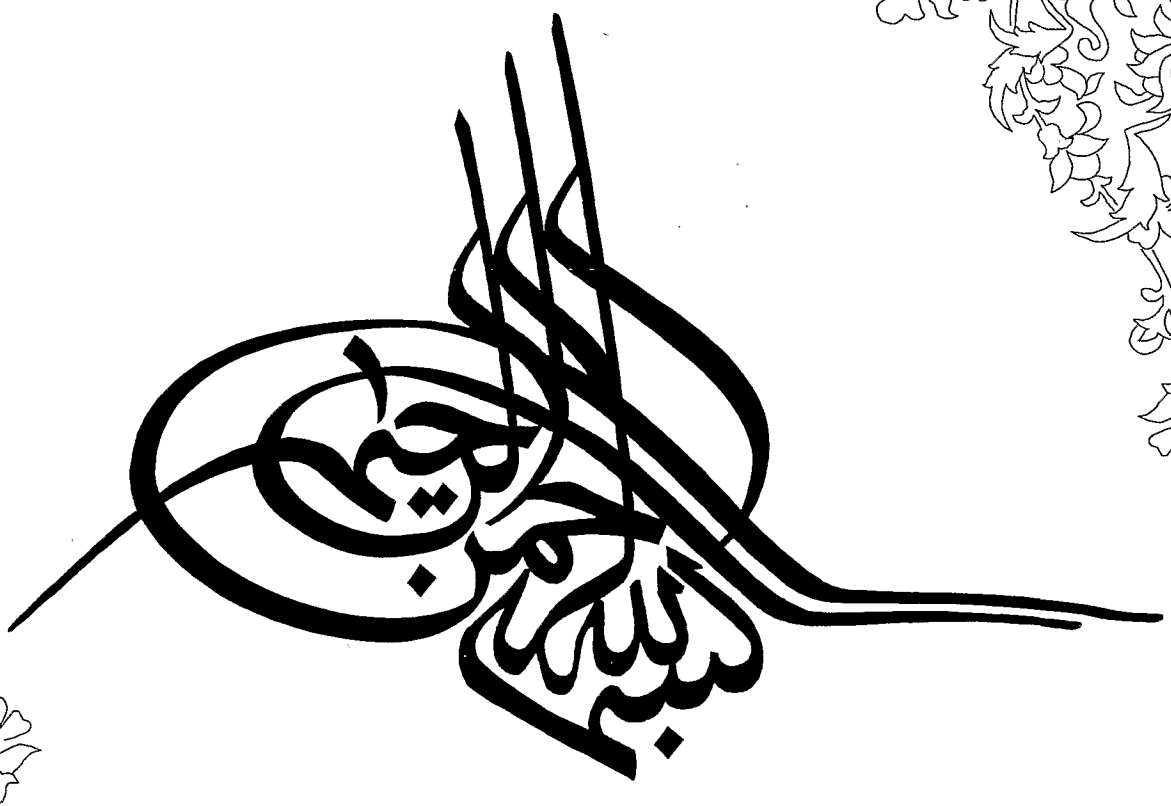

٩٤٢٨٩

دانشکده کشاورزی

ارزیابی تخمین رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوزه پلاسجان از زیرحوزه‌های رودخانه زاینده‌رود

پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی

علی عبدی

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

اساتید راهنما

دکتر مهدی نادری

دکتر احمد کریمی

خرداد ماه ۱۳۸۷

۹۴۲۸۹

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی آقای علی عبدی

تحت عنوان

ارزیابی تخمین رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوزه پلاسجان از زیرحوزه‌های رودخانه زاینده‌رود

در تاریخ۸۷/۳/۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر مهدی نادری
۲- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد کریمی
۳-استاد مشاور پایان نامه	دکتر سید جواد ساداتی‌نژاد
۴- استاد مشاور پایان نامه	دکتر کریم عباسپور
۵- استاد داور پایان نامه	دکتر مجید افیونی
۶- استاد داور پایان نامه	دکتر بهزاد قربانی
رئیس تحصیلات تکمیلی دانشکده کشاورزی	دکتر مجید اولیا

" من علمني حرفا فقد صيرني عبدا "

خداوند بزرگ را شاکرم که به من توفیق قدم نهادن در راه درک بخش ناچیزی از هستی بیکرانش را عطا فرموده و او را ستایش می‌کنم که به من توان انجام این تحقیق را عنایت فرمود.

بر خود لازم می‌دانم که از پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق من در امر تحصیل علم و دانش و در زندگی یار و یاورم بوده‌اند و دعای خیرشان همواره شامل حالم بوده تشکر کنم.

از همسر مهربانم که همواره مایه دلگرمی من بوده و در انجام این پایان‌نامه با صبر و دلسوزی همراهی‌ام نموده سپاسگزارم.

از پدر و مادر همسرم که همواره حامی و پشتیبان من بوده‌اند و از محبت صمیمانه انشان سپاسگزارم.

از اساتید راهنمای عزیز و گرانقدرم آقایان دکتر مهدی نادری و دکتر احمد کریمی که بدون راهنمائی‌های، حمایت‌ها و زحمات دلسوزانه آنها انجام این تحقیق ممکن نبود کمال تشکر و قدردانی را دارم و خود را رهین منت این بزرگواران می‌دانم . همچنین از مشاورت اساتید گرانقدر آقایان دکتر ساداتی‌نژاد و دکتر عباسپور در انجام این تحقیق بهره فراوان بردم که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

ازاساتید گرانقدر آقایان دکتر افیونی و دکتر قربانی که زحمت داوری و بازخوانی این تحقیق را بر عهده داشتن کمال تشکر و قدردانی را دارم.

افتخار شاگرد در محضر اساتید گروه خاکشناسی، آقایان دکتر محمدی، دکتر گیوی، دکتر رئیسی، دکتر حسین‌پور، دکتر بیگی و دکتر صالحی را داشتم که بدین وسیله از زحمات این بزرگواران تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

از دوستان خوبم آقایان مهندس، مهاجر و اشعری و خانم‌ها مهندس، رجائی، مرادی، اسماعیل‌پور و نبی‌زاده که همواره در انجام این تحقیق و دوران تحصیلی مرا یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم .

در پایان از همه کسانی که اینجانب را کمک کردند تا این تحقیق به انجام برسد ممنون و سپاسگزارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

و

همسر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	یک
فهرست نمودارها و اشکال	چهار
فهرست جداول	شش
چکیده	هفت

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱: مقدمه	۱
۱-۱-۱: تعریف فرسایش	۱
۱-۱-۲: اهمیت پدیده فرسایش و ضرورت انجام تحقیق	۱
۱-۱-۳: مدل‌ها و طبقه‌بندی آنها	۲
۱) مدل‌های فیزیکی وریاضی	۳
۲) مدل‌های پیوسته و ناپیوسته	۳
۳) مدل‌های ایستا و پویا	۳
۴) مدل‌های توصیفی و مفهومی	۳
۵) مدل‌های جمعی و توزیعی	۳
۶) مدل‌های جعبه سیاه و تقلید کننده ساختمانی	۴
۷) مدل‌های استوکاستیک و قطعی	۴
۸) مدل‌های رخدادی و تناوبی	۴
۱-۱-٤- مروری بر مدل‌های تخمین فرسایش	۵
۱) مدل ANSWERS	۵
۲) مدل GUEST	۵
۳) مدل WEPP	۵
۴) مدل EUROSEM	۶
۵) مدل KINEROS	۶

٦) مدل SWAT ۷
۱-۲: اصول تئوریکی مدل SWAT ۱۰
۱-۲-۱: تقسیم حوزه به زیر حوزه‌ها و شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک ۱۰
۱-۲-۲: محاسبه رواناب سطحی توسط مدل SWAT ۱۱
الف - روش منحنی SCS ۱۲
ب- روش نفوذپذیری گرین و آمپت ۱۲
۱-۲-۳: حداکثر رواناب ۱۴
۱-۲-۴: آب موجود در خاک ۱۵
۱-۲-۵: نفوذ عمقی ۱۶
۱-۲-۶: جریان جانبی ۱۶
۱-۲-۷: جریان آب زیر زمینی ۱۶
۱-۲-۸: تغذیه ۱۷
۱-۲-۹: آب زیر زمینی/جریان پایه ۱۷
۱-۲-۱۰: تبخیر مجدد ۱۸
۱-۲-۱۱: پمپاژ ۱۸
۱-۲-۱۲: عمق آب زیر زمینی ۱۸
۱-۲-۱۳: مدل ذوب برف ۱۹
۱-۲-۱۴: دمای خاک ۱۹
۱-۲-۱۵: فرسایش ۲۰
۱-۲-۱۶: فاکتور فرسایش پذیری خاک ۲۰
۱-۲-۱۷: فاکتور مدیریت و پوشش ۲۱
۱-۲-۱۸: فاکتور عملیات حفاظتی ۲۱
۱-۲-۱۹: فاکتور توپوگرافی ۲۱
۱-۲-۲۰: فاکتور سنگریزه درشت ۲۲
۱-۲-۲۱: روندیابی جریان ۲۲
الف) روش ذخیره متغیر ۲۲
ب) روش ماسکینگام ۲۳
۱-۲-۲۲: روند یابی رسوب ۲۳
۱-۲-۲۳: شاخص فرسایش دهندگی باران ۲۴
۱-۲-۲۴: تاخیر رسوب در رواناب سطحی ۲۵
۱-۲-۲۵: خصوصیات کانال ۲۵

۱-۲-۲۶: میزان جریان آب و سرعت آن ۲۵
۱-۲-۲۷: حرکت و انتقال نیتروژن ۲۶
۱-۳: ورودی‌های مدل SWAT ۲۷
۱-۳-۱: نقشه‌های ارتفاع رقومی (DEM) ۲۷
۱-۳-۲: نقشه‌های پوشش گیاهی یا کاربری اراضی ۲۷
۱-۳-۳: نقشه‌های خاک ۲۷
۱-۳-٤: داده‌های اقلیمی ۲۸
۱-۳-۵: تولید داده‌های اقلیمی ۲۹
۱-۳-٦: تولید داده‌های دما و تابش خورشیدی ۲۹
۱-۳-۷: محاسبه تبخیر ۳۰
۱-۴: اهداف ۳۰
۱-۵: بررسی منابع ۳۱

فصل دوم

مواد و روشها

۲-۱: توصیف منطقه مطالعاتی: ۳۴
۲-۲: تشکیل بانک اطلاعاتی منطقه ۳۷
۲-۲-۱: مدل ارتفاعی رقومی ۳۷
۲-۲-۲: نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی ۳۸
۲-۲-۳: نقشه خاک ۳۹
۲-۲-٤: نقشه شبکه جریان ۴۱
۲-۲-۵: داده های اقلی ۴۱
۲-۳: تحلیل داده‌های بارش ۴۲
۲-۴: تعیین زیر حوزه‌ها و واحدهای هیدرولوژیک ۴۵
۲-۵: واسنجی مدل ۴۶
۲-۶: آنالیز حساسیت ۴۶
۲-۷: اعتبار سنجی ۴۷
۲-۸: روشهای آماری ارزیابی مدل ۴۷
۲-۸-۱: ضریب ناش-ساتکلیف (NS) ۴۷
۲-۸-۲: ضریب تبیین(R^2) ۴۷

۲-۸-۳ ضریب درصد تفاوت(D) ۴۸
۲-۹: مدل ۲- SUFI ۴۸
۲-۱۰: عدم قطعیت ۴۹
۲-۱۱: الگوریتم ۲-SUFI ۵۱
۲-۱۲: برنامه I-SWAT ۵۲

فصل سوم

بحث و نتایج

۳-۱: ارزیابی مدل ۵۴
۳-۲: برآورد میزان رواناب و ارزیابی آن ۵۴
۳-۲: واسنجی مدل ۵۶
۳-۲-۱: توصیف پارامتر های حساس به رواناب ۵۷
۳-۳: اعتبار سنجی رواناب ماهانه ۶۴
۳-۳-۱: برداشت از آبهای زیرزمینی ۶۶
۳-۴: رسوب ۶۷
۳-۴-۱: توصیف پارامترهای حساس در تخمین رسوب ۶۹

فصل چهارم

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۴
پیشنهادات ۷۵
منابع مورد استفاده ۷۶

اشکال و نمودارها

شکل ۱-۱: چرخه هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT ۱۱
شکل ۱-۲: چگونگی توزیع رطوبت خاک توسط مدل گرین و آمپت و نفوذ واقعی در خاک ۱۳
شکل۲-۱: موقعیت حوزه اسکندری در حوزه آبخیز زاینده رود و حوزه‌ها اطراف آن ۳۵
شکل ۲-۲: موقعیت ایستگاه هیدرومتری اسکندری در حوزه بالادستی سد زاینده رود ۳۶

پشکل۲-۳: نقشه مدل رقومی ارتفاعی حوز پلاسجان ۳۷
شکل۲-۴: نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی حوزه پلاسجان ۳۸
شکل۲-۵: نقشه خاک حوزه پلاسجان ۴۰
شکل۲-۶: نقشه شبکه آبراهه‌های حوزه پلاسجان ۴۱
شکل۲-۷: نمودار جرم مضاعف ایستگاه بادیجان ۴۳
شکل۲-۸: نمودار جرم مضاعف ایستگاه دامنه ۴۴
شکل۲-۹: نمودار جرم مضاعف ایستگاه سواران ۴۴
شکل۲-۱۰: نمودار جرم مضاعف ایستگاه سینگرد ۴۵
شکل ۲-۱۱: عملکرد دو مدل SWAT و ۲- SUFI ۴۹
شکل۲-۱۲: مفهوم تحلیل عدم قطعیت به صورت گرافیکی ۵۰
شکل ۳-۱: هیدروگراف ماهانه اندازه‌گیری شده ایستگاه اسکندری ۵۵
شکل ۳-۲: رابطه بین رواناب اندازه‌گیری شده و رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل ۵۵
شکل۳-۳: نمودار حساسیت عدد منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط ۵۸
شکل۳-۴: نمودار حساسیت ثابت کاهش جریان پایه ۵۸
شکل۳-۵: نمودار حساسیت فاکتور حداقل ذوب برف. ۵۹
شکل۳-۶: نمودار حساسیت مقدار آب قابل دسترس خاک ۶۰
شکل۳-۷: نمودار حساسیت فاکتور حداکثر ذوب برف ۶۱
شکل۳-۸: هیدروگراف ماهانه اندازه‌گیری شده ایستگاه اسکندری در مرحله کالیبراسیون ۶۲
شکل۳-۹: رابطه بین دبی رواناب اندازه‌گیری شده و دبی رواناب شبیه‌سازی شده ایستگاه اسکندری در مرحله کالیبراسیون ۶۲
شکل۳-۱۰: هیدروگراف ماهانه اندازه‌گیری شده ایستگاه اسکندری در مرحله کالیبراسیون توسط نرم‌افزارSUFI ۶۳
شکل ۳-۱۱: هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی ۶۵
شکل ۳-۱۲: رابطه بین دبی مشاهداتی با دبی شبیه‌سازی شده رواناب در مرحله اعتبار سنجی ۶۵
شکل۳-۱۳: سدی‌گراف شبیه سازی شده رسوب در مرحله کالیبراسیون ۶۸
شکل۳-۱۴: رابطه بین دبی رسوب مشاهده‌ای و رسوب شبیه‌سازی‌شده ۶۹
شکل۳-۱۵: نمودار حساسیت میزان رسوب به فاکتورعملیات حفاظتی(USLE-P) ۷۰
شکل۳-۱۶: نمودار حساسیت فاکتور پوشش کانال بر روی مقدار رسوب ۷۰
شکل۳-۱۷: نمودار حساسیت میزان رسوب به فرسایش‌پذیری کانال ۷۱
شکل۳-۱۸: نمودار حساسیت میزان رسوب به فاکتور SPCON ۷۱
شکل۳-۱۹: نمودار حساسیت میزان تولید رسوب به فاکتورSPEXP ۷۲

جداول

جدول ۱-۱: مشخصات گروه‌های هیدرولوژیکی خاک ۲۸

جدول ۲-۱: بعضی از مشخصات فیزیوگرافیک حوضه آبخیز پلاسجان ۳۶

جدول۲-۲: نام و درصد استفاده اراضی موجود در حوزه پلاسجان ۳۹

جدول۲-۳: ایستگاه‌های سازمان هواشناسی موجود در حوزه پلاسجان ۴۲

جدول۲-٤: مشخصات ایستگاه هیدرومتری اسکندری ۴۲

جدول۳-۱: ضرایب آماری محاسبه شده برای ارزیابی دبی رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل ۵۴

جدول ۳-۲: پارامترهای مورد استفاده جهت کالیبراسیون مدل ۵۷

جدول ۳-۳: مقدار بهینه پارامترها در مرحله کالیبراسیون ۶۱

جدول ۳-٤: پارامترهای آماری بدست آمده برای شبیه‌سازی دبی در مرحله کالیبراسیون ۶۱

جدول ۳-۵: پارامترهای آماری تعیین شده در مرحله اعتبارسنجی دبی رواناب ۶۴

جدول۳-٦: میزان برداشت از آبخوان منطقه جهت مصارف مختلف ۶۷

جدول۳-۷: پتانسیل برداشت آب از آبخوان منطقه ۶۷

جدول۳-۸: نتایج به دست آمده در مرحله کالیبراسیون دبی رسوب ۶۸

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جهان است. طبق اطلاعات موجود، آسیا بیش از سایر قاره‌ها مشکل فرسایش دارد و در این میان ایران دارای میزان فرسایش خاک بالایی است. مدیریت حوزه‌های آبخیز در کاهش فرسایش مهم می‌باشد. در کشور ما اکثر حوزه‌های آبخیز فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی می‌باشند و اغلب ایستگاه‌ها فاقد آمار منظم و پیوسته هستند. به خاطر محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک کافی، مدل‌سازی حوزه‌ها نقش مهمی در شناخت و مدیریت حوزه دارد. در سال‌های اخیر، مدل‌های ریاضی هیدرولوژی حوزه‌ها به منظور بررسی رفتار حوزه به کار گرفته شده‌اند. در مطالعه حاضر توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان و رسوب حوزه پلاسجان (از زیر حوزه‌های زاینده‌رود) با مساحت ۱۶۶۷ کیلومتر مربع بررسی شد. این مدل برای پیش‌بینی تاثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوزه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. مدل برای دوره زمانی ۲۰۰۴-۱۹۹۰ اجرا شد و از داده ایستگاه هیدرومتری اسکندری برای ارزیابی نتایج مدل استفاده گردید. واسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل با استفاده از امکانات موجود در برنامه SWAT و همچنین از ویرایش دوم نرم‌افزار SUFI انجام پذیرفت. دو سوم از کل دادها (۱۰ سال) در مرحله واسنجی و یک سوم (۵ سال) در مرحله اعتبارسازی استفاده شد. شاخص‌های D فاکتور، R^2 و NS به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب به کار برده شدند. نتایج مدل SWAT برای متوسط رواناب ماهانه شاخص‌های D فاکتور، R^2 و ناش-ساتکلیف (NS) به ترتیب ۱۲۷/۷، ۰/۵ و۳/۳۷- و در مرحله واسنجی به ترتیب ۶۶/۹، ۰/۸۷ و ۰/۱ و در مرحله اعتبارسازی به ترتیب ۸۲، ۰/۹۳ و ۰/۲۶ به دست آمدند. نتایج نشان داد که مدل قادر به شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر نیست. این نتایج نشان می‌دهد که مدل میزان رواناب را بیشتر از مقادیر واقعی تخمین زده است. در مرحله واسنجی رسوب ماهانه ضرایب D فاکتور، R^2 و NS به ترتیب ۴۵/۱-، ۰/۴۱ و ۰/۲۴ به‌دست آمد. در مجموع، مدل در شبیه‌سازی رواناب خیلی بهتر از از رسوب عمل کرد. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب در بعضی از ماه‌ها می‌توان به خوب شبیه‌سازی نکردن ذوب برف برای این حوزه، تعداد کم داده‌ها و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی اشاره کرد. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب می‌توان به خوب شبیه‌سازی نکردن جریان، تعداد کم داده‌ها و صحت آنها اشاره کرد.

فصل اول

۱-۱: مقدمه

۱-۱-۱: تعریف فرسایش

کلمه فرسایش که در انگلیسی و فرانسه به آن اروژن و اروزیون[1] گفته می‌شود از ریشه لاتین ارودری[2] به معنی ساییدگی می‌باشد و عبارت است از ساییده شدن سطح زمین. زاخار[3] اظهار می‌دارد که این اصطلاح برای اولین بار توسط پنک[4] در سال ۱۸۹٤ در زمین‌شناسی و برای توضیح فرآیند شکل‌گیری دره‌ها، به کار رفته است. در همان زمان فرآیندهای ناشی از آب شستگی سطحی را ابلیشن[5] (از دسترس خارج شدن) می‌نامیدند. اما به تدریج در اوایل قرن بیستم اصطلاح فرسایش خاک توسط دانشمندانی از کشورهای مختلف به کار رفت. به طور کلی فرسایش به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ذرات خاک از بستر اصلی خود جدا شده و به کمک یک عامل انتقال دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شود. عامل جداکننده ذرات از بستر و انتقال آنها می‌تواند آب، باد و یا یخچال باشد که به ترتیب فرسایش آبی، بادی و یا یخچالی نامیده می‌شوند (۹).

۱-۱-۲: اهمیت پدیده فرسایش و ضرورت انجام تحقیق

فرسایش و رسوب یکی از مشکلاتی است که در حال حاضر بسیاری از کشورهای جهان با آن روبرو هستند. فرسایش خاک باعث فرسوده و شسته شدن تدریجی خاک شده و به مرور از ضخامت آن می‌کاهد، تا در نهایت از بین رود (۱۵). امروزه فرسایش خاک به عنوان خطری برای رفاه انسان و حتی برای حیات او به شمار می‌آید. در مناطقی که فرسایش کنترل نمی‌شود، خاک‌ها به تدریج فرسایش یافته، حاصلخیزی خود را از دست می‌دهند (۹). فرسایش خاک در ایران بسیار شدید است. در نقاط مختلف کشور انواع مختلف فرسایش مشاهده می‌شود. در مناطق شمالی، شمال شرقی و شمال غربی و همچنین در مناطق کوهستانی فرسایش آبی بیشتر و در مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی فرسایش بادی غالب است. با توجه به شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک بیشتر نقاط ایران، کوه‌ها فاقد پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی کم می‌باشند. نقاط مساعد از نظر شرایط آب و هوایی که می‌توانند دارای پوشش گیاهی غنی باشند، نیز اغلب بر اثر استفاده بی‌رویه انسان و چرای مفرط دام‌ها، لخت و یا دارای پوشش ضعیف شده‌اند. فقر یا

---

[1] Erosion
[2] Eroderi
[3] Zachar
[4] Penk
[5] Ablation

عدم پوشش گیاهی، عدم ذخیره رطوبت کافی در خاک، توزیع نامناسب بارندگی و دیگر شرایط نامساعد موجب شدت فرسایش در نقاط مختلف است (۱۷). گل‌آلوده‌بودن رودخانه‌ها در مواقع بارندگی و ذوب‌شدن برف‌ها، از علائم فرسایش شدید خاک است. به عنوان مثال طغیان رودخانه کارون و جریان شدید سیلاب‌های ناگهانی با در نظر گرفتن دبی ۵۰۰۰ متر مکعب آب در ثانیه و طی حداقل ۵ روز، سالیانه حدود ۲۱۶ میلیون تن خاک از این حوزه خارج می‌کند (۱۷). جلالیان و همکاران (۱۳۷۳) در پژوهشی در حوزه آبخیز کارون، متوسط فرسایش خاک در ایران را ۲۵۰۰ تن بر کیلومتر مربع در سال برآورد نمودند که حدوداً ٤/۳ برابر متوسط فرسایش جهانی و ۲۰ تا ۳۰ برابر حد قابل‌قبول فرسایش می‌باشد. همچنین اطلاعات و آمار موجود نشان می‌دهد که ۵۹ درصد از ۱۷ حوزه مطالعه شده در ایران به شدت تخریب یافته‌اند (۵).

فرسایش خاک و رسوب، هرچند فرآیندهایی طبیعی هستند، اما می‌توانند به وسیله فعالیت‌های غیرصحیح انسان از قبیل جنگل‌تراشی، چرای بیش از حد و مدیریت ناپایدار کشاورزی تشدید شوند. تشدید این فرآیندها علاوه بر تخریب منابع طبیعی باعث مسائلی همچون رسوب‌گذاری در مزارع، دشت‌های سیلابی، دریاچه‌ها و سدها می‌شود (۹). بنابر آمار و اطلاعات موجود، قاره آسیا بیشتر از هر قاره دیگری از مسأله فرسایش خاک رنج می برد و در میان کشورهای آسیا، ایران دارای فرسایش خاک بیشتری است (۲۸). نظر به اهمیت موضوع جستجوی راه‌هایی موثر برای برآورد و کنترل فرسایش خاک ضرورتی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه شناخت مفاهیم مختلف فرآیند فرسایش خاک حاصل شده و به دنبال آن مدل‌های مختلف برآورد فرسایش و رسوب پا به عرصه وجود گذاشته است (٤). اساس مدل‌سازی فرسایش خاک، به درک موجود از قوانین فیزیکی و فرآیندهای صورت گرفته در جهان واقعی بستگی دارد. فرسایش خاک فرآیندی پیچیده و اندازه‌گیری مقدار واقعی آن دشوار است. در طی مدل‌سازی فرآیندهای فرسایش خاک به روابط ریاضی تبدیل می‌شوند.

۱-۱-۳: مدل‌ها و طبقه‌بندی آنها

به‌طور کلی مدل وسیله‌ای است که بخشی از واقعیت را شبیه‌سازی می‌کند. مدل یک پدیده را در ساده‌ترین حالت ممکن بررسی نموده و در صورت موفق بودن آن را به حالت‌های پیچیده تعمیم می‌دهد. در این حالت می‌توان پدیده‌های بسیار پیچیده را تفسیر نمود و پیشگویی‌های صحیحی به عمل آورد. مدل‌های ریاضی[1] نمایش‌های فرمولی هستند که با فرض‌های مشخصی روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی را تشریح می‌کنند.

ایجاد یک مدل ریاضی برای یک سیستم فیزیکی با تعریف یک مدل مفهومی[2] آغاز می‌شود. یک مدل ریاضی شامل واکنش‌های به هم پیوسته بوده که در حقیقت مکانیسم‌های شناخته شده‌ای هستند که در سیستم رخ می‌دهند (۱۲). یک واکنش مجزا به وسیله یک الگوریتم (یا یک سری از الگوریتم‌ها) که ترکیبی از معادلات یا عبارات ریاضی، شامل متغیرها و پارامترها هستند بیان می‌شود. یک متغیر در یک الگوریتم شامل یک مولفه ورودی به مدل (یا خروجی از مدل) وابسته به زمان می‌باشد که می‌تواند متغیر محیطی ورودی به مدل نظیر متغیرهای اقلیمی (بارندگی، دما، تشعشع خورشیدی) و یا یک متغیر خروجی (دبی رواناب، رسوب، آبشویی نیترات و...) باشد، در حالی که یک پارامتر ضریب ثابتی می‌باشد که در یک معادله یک خاصیت سیستم (نظیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک) را تشریح می‌کند. مدل‌ها به شکل‌های مختلفی طبقه‌بندی شده‌اند که از جمله می‌توان موارد ذیل را برای مدل‌های هیدرولوژی نام برد (٤٥):

---

[1] Mathematical model
[2] Coceptual model

۱) مدل‌های فیزیکی[1] وریاضی

مدل‌های فیزیکی بر پایه اصول تشابه توسعه پیدا کرده‌اند و برای مدل‌های با مقیاس کوچک به‌کاربرده می‌شوند. در حالی که مدل‌های ریاضی بر پایه مبانی ریاضی، سیستم را بررسی می‌کنند.به عبارتی، مدل‌های ریاضی نمایش های فرمولی هستند که با فرض های معینی روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی را تشریح می‌کنند.

۲) مدل‌های پیوسته[2] و ناپیوسته[3]

این مدل‌ها با در نظر گرفتن تشابه فیزیکی تعدادی مدل‌های دیجیتالی از نظر پیوستگی بدست می‌آید زیرا فرآیندهایی که رخ می‌دهند و یا مشاهده می‌شوند، پیوسته هستند. بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی دیجیتالی به خاطر مزیت تقسیم زمان و فاصله به اجزای محدود[4] توسعه پیدا کرده‌اند که مدل‌های ناپیوسته نامیده می‌شوند (مانند روندیابی سیلاب در مخزن یک سد به روش ذخیره‌ای).

۳) مدل‌های ایستا[5] و پویا[6]

این طبقه‌بندی بر پایه تغییرات زمانی مدل است. مدل‌های ایستا بیان کننده فرآیندهای مستقل از زمان بوده و مدل‌های پویا فرآیندهایی را که تغییرات آن‌ها طی زمان اتفاق می‌افتد را بیان می‌کنند.

۴) مدل‌های توصیفی[7] و مفهومی[8]

در این گونه مدل‌ها شبیه‌سازی بر پایه فرموله کردن سیستم می‌باشد. مدل‌های توصیفی برای در نظرگرفتن پدیده‌های مشاهده شده از راه تجربه و استفاده از فرض‌های اساسی مانند پیوستگی و بقای جرم و انرژی طراحی شده‌اند. از طرف دیگر، مدل‌های مفهومی برای تفسیر پدیده‌ها، به جای ارائه فرآیندهای فیزیکی، شدیدا از تئوری استفاده می‌کنند، یعنی مدل‌هایی هستند که بر مبنای تئوری احتمال استوار هستند.

۵) مدل‌های جمعی[9] و توزیعی[10]

تغییرات مکانی پارامترهای مدل، اساس این‌گونه مدل‌ها را به وجود می‌آورد. مدل‌های جمعی تغییرات مکانی را در سیستم در نظر نمی‌گیرند، در حالی که مدل‌های توزیعی تغییرات رفتار سیستم را از یک نقطه به نقطه دیگر محاسبه می‌کنند.

---

[1] Physical model
[2] Continous model
[3] Discrete model
[4] Finite increments
[5] Static model
[6] Dynamic model
[7] Descriptiv model
[8] Conceptual model
[9] Lumped model
[10] Distributed model

۶) مدل‌های جعبه سیاه[1] و تقلید کننده ساختمانی[2]

این طبقه‌بندی بر پایه روند تحلیلی سیستم می‌باشد. در مدل‌های جعبه سیاه تغییرات ورودی به خروجی از تکنیک‌هایی تاثیر می‌پذیرند که اساس فیزیکی شناخته‌شده‌ای ندارند. مدل‌های تقلید کننده ساختمانی بر پایه قوانین مهم و معنی‌دار مکانیک سیالات و هیدرو لیک برای تسهیل این تغییر طراحی شده‌اند.

از مدل‌های جعبه خاکستری می‌توان به معادله جهانی تلفات خاک[3] (USLE) اشاره نمود که امروزه به دلیل منطقه‌ای بودن و نیازمندی به داده‌های فراوان و دراز مدت، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار مدل‌های جعبه سیاه برقراری ارتباط بین میزان تلفات خاک با عوامل موثر بر روی آن است. این عوامل از طریق مشاهده، اندازه‌گیری‌های تجربی و تجزیه تحلیل آماری بدست می‌آیند. بررسی‌های اخیر نشان داده است که این روش کارآیی چندانی ندارد، زیرا اطلاعات ما از فرآیند فرسایش و تاثیر متقابل عوامل موثر بر آن، مرتب در حال فزونی است (٤٥).

۷) مدل‌های استوکاستیک[4] و قطعی[5]

نوع فرآیند درگیر در تغییر نهاده‌ها به خروجی اساس این مدل‌ها می‌باشد. مدل‌های قطعی بر اساس فرآیندهای معین و مدل‌های استوکاستیک بر اساس فرآیندهای احتمالاتی می‌باشند. روش‌های قطعی مدل‌سازی رفتار هیدرولوژیک یک حوزه، در عمل بسیار پرطرفدار می‌باشد. چرخه هیدرولوژی در این مدل به وسیله روابط ریاضی و اثرات متقابل فازهای مختلف این چرخه توصیف می‌شود.

۸) مدل‌های رخدادی[6] و تناوبی[7]

طبقه‌بندی این مدل‌ها بر پایه دامنه زمان مدل است. در مدل‌های شبیه‌سازی رخدادها، چهارچوب زمانی کوتاه است. در مدل‌های تناوبی، چهارچوب زمانی شبیه‌سازی طولانی می باشد، مثل بارش- رواناب که برای سه یا چهار سال یا بیشتر اجرا می‌شود.

۱-۱-٤: مروری بر مدل‌های تخمین فرسایش

با توسعه انواع مدل‌های ریاضی و کامپیوتری در سال‌های اخیر مطالعات گسترده و دامنه‌داری با در نظر گرفتن دورنمای مسائل و مشکلات زیست محیطی آینده صورت گرفته و یا در حال انجام است. مدل‌های شبیه‌سازی در طول چند دهه اخیر جایگاه خاصی در دانش بشری به خود اختصاص داده‌اند.

از توانایی این مدل‌ها، پردازش حجم بالای داده‌ها در مدت زمان کوتاه می‌باشد. در ادامه به برخی از این مدل‌ها به اختصار اشاره می‌شود.

---

[1] Blach-box model
[2] Strucure–imitating model
[3] Universal Soil Loss Equation
[4] Stochastic model
[5] Deterministic model
[6] Event model
[7] Sequential models

۱) مدل ANSWERS[1]

این مدل از نوع مدل‌های قطعی بوده و با استفاده از عامل‌های توزیعی یا پخشی در یک حوزه و با استفاده از داده‌های تک رخدادی به شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک می‌پردازد. این مدل برای حوزه‌های کوچک به راحتی قابل اجرا می‌باشد.

مدل‌های ریاضی که برای تخمین رواناب و رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: مدل‌های میانگینی و مدل‌های توزیعی. در مدل‌های میانگینی، معدل پارامترهای یک حوزه به صورت داده‌هایی به مدل وارد می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تابعی از زمان است و به داده‌های ۳ تا۵ ساله نیاز است. لذا تغییرات در نوع خاک، حاصلخیزی، نحوه کشت، نوع پوشش گیاهی و بارندگی می‌توانند دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرند. مدل ANSWERS برای تک‌رخدادهای حوزه به‌کارگرفته می‌شود و قادر است حداکثر سیل، کل حجم رواناب سطحی و فرسایش حاصل از بارندگی‌ها را در حوزه‌های آبخیز[2] کشاورزی پیش‌بینی نماید (۶و۳۲).

۲) مدل GUEST[3]

این مدل توسط رز[4] (۱۹۸۳) ابداع و سپس در سال ۱۹۹۲ توسط میسرا[5] و رز بسط داده شد. اساس این مدل ریاضی- فیزیکی است و برای پیش‌بینی عواملی نظیر فرسایش‌پذیری و تغییرات آن، غلظت رسوب، رواناب، فرسایش خندقی و فرسایش توده‌ای در طول زمان کاربرد دارد (۴۲). این مدل تک‌رخدادی بوده و برآورد آن بر اساس ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد و با اندازه‌گیری این ویژگی‌ها می‌توان پارامترهای فرسایش‌پذیر را تخمین زد. داده‌های ورودی این مدل شامل موارد زیر می‌باشد (۴۲ و ۶۷):

ویژگی‌های ژئومتری شامل طول، عرض ، شیب وتراکم شیارها،

ویژگی‌های رسوب شامل چگالی رسوب، توزیع اندازه خاکدانه ها و سرعت ته نشینی،

ویژگی‌های زبری شامل ضریب زبری مانینگ[6]،

ویژگی‌های فرسایش‌پذیری شامل پارامتر فرسایش‌پذیری خاک و

ویژگی‌های هیدرولیکی شامل سرعت رواناب موثر و مقدار کل رواناب.

خروجی‌های مدل GUEST شامل تعیین مقدار فرسایش خاک، تخمین اطلاعات مربوط به هیدرولوژی مثل شدت رواناب و یا شدت بارندگی می‌باشد.

۳) مدل WEPP[7]

این مدل از نوع مدل‌های پخشی است که پارامترهای آن با زمان و مکان تغییر می‌نمایند. پارامترهای این مدل عبارت از مقدار و شدت بارندگی، بافت خاک، رشد گیاه، اثرات خاک‌ورزی بر خصوصیات خاک، مقدار بقایای گیاهی، شکل شیب، جهت‌یابی و فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. WEPP فرسایش و رسوب را در واحد زمان و مکان در حوزه آبخیز شامل تپه، کانال و آبگیر، شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌های مدل WEPP شامل اطلاعات مربوط به آب و هوا، یخ زدن خاک، تجمع برف و ذوب شدن آن،

---

[1] Arial Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation
[2] Catchment Area
[3] Griffih University Erosion System Template
[4] Rose
[5] Misra
[6] Manning
[7] Water Erosion Prediction Project

آبیاری، نفوذ، هیدرولیک جریان سطحی، تراز آبی، رشد گیاه، تجزیه بقایای گیاهی و عملیات کشت وکار می‌باشد (۶ و۲۷). خروجی‌های مدل شامل فرسایش یا رسوب خالص، فرسایش شیاری یا رسوب در شیارها، فرسایش یا رسوب بین شیارها و بار رسوب است.

۴) مدل EUROSEM[1]

در کشورهای اروپائی که سالانه چند بارش منجر به فرسایش شدید می‌گردد، به یک مدل دینامیکی نیاز است که فرسایش را مدل‌سازی نماید. این مدل حاصل تلاش ۲۵ محقق از ده کشور اروپائی است که برای سنجش خطر فرسایش و ارزیابی روش‌های حفاظت خاک و آب به کار می رود (۴۳).

یوروزم یک مدل فرسایشی دینامیکی و گام به گام است که میزان رواناب، فرسایش و رسوب‌گذاری را در فرآیندهای شیاری و بین‌شیاری در باران‌های تک‌رخداد برای مزارع و حوزه‌های آبخیز کوچک مدل‌سازی می‌کند. این مدل با دریافت اطلاعاتی در قالب فایل‌های ورودی، مقدار کل رواناب، کل فرسایش، هیدروگراف[2] رواناب و سدی‌گراف[3]، پیک رواناب، زمان پیک رواناب و رسوب را در قالب فایل‌های خروجی به ما می‌دهد. امروزه برای حساسیت بیشتر این مدل نسبت به تغییرات رگبارها و برای کاربرد آن در حوزه‌های بزرگتر، از دو مدل MWISED و SPIES جهت ترکیب کردن EUROSEM با GIS استفاده می‌شود. EUROSEM مدل تک رخدادی است که قادر به برآورد رواناب و فرسایش در زمان‌های هر چند کوتاه یک دقیقه ای می‌باشد (٤٤). در این مدل یک حوزه آبخیز بر اساس اطلاعات نقشه توپوگرافی، کاربری اراضی، پوشش‌گیاهی، شیب و نقشه موقعیت جاده‌ها و کانال‌ها به اجزایی با مشخصات ویژه تقسیم می‌گردد. به هر کدام از این اجزاء، المان که واحد پایه مدل است اطلاق می‌شود (۳۸). ورودی مدل در هر المان شامل موارد زیر می‌باشد:

خصوصیات اقلیمی،

خصوصیات هندسی،

خصوصیات خاک و

خصوصیات پوششی.

این اطلاعات در قالب داده‌های اقلیمی و حوزه به مدل وارد می‌شوند. علاوه بر داده‌های فوق، اطلاعات مربوط به رواناب و رسوب مشاهده شده نیز به مدل داده می‌شود.

۵) مدل KINEROS

برآورد شدت و حجم رواناب و مقدار فرسایش آبخیزها، جهت حفاظت خاک از اهمیت خاصی برخوردار است. برای بدست آوردن رفتار هیدرولوژیک حوزه از مدل‌های نوینی که بر اساس فیزیک رواناب استوارند استفاده می‌شود (۱۵). از سال ۱۹۷۰، نظریه موج جنبشی، برای تخمین رواناب سطوح و کانال‌ها به کار گرفته شد. با این که این روش از جنبه تئوری، احتیاج به فرضیات ساده‌کننده‌ای داشت، اما خواص هیدرولیکی آن به خوبی معرفی و اثبات شده و این مدل به طور گسترده در نقاط زیادی مورد

---

[1] European Soil Erosion Model
[2] Hydrograph
[3] Sedigraph

آزمایش قرار گرفت (۵۰ و ۳۸). نظریه موج جنبشی توسط رووی[1] و همکاران (۱۹۷۷) در قالب شبکه‌ای از سطوح مسطح و کانال‌ها به صورت یک مدل کامپیوتری به نام KINGEN به‌کاربرده شد و سپس اصلاحاتی روی بخش نفوذ، گنجاندن المان آبگیر، برآورد فرسایش و انتقال رسوب صورت گرفت واین مدل به KINEROS معروف شد (۵۲). کینرز مدلی فیزیکی است که بر پایه اصول فیزیکی مانند بقای جرم و انرژی جنبشی استوار بوده و علاوه بر آن نیز یک مدل توزیعی است که، سطح حوزه آبخیز و شبکه کانال‌ها را به صورت مجموعه‌ای از زمین‌های مسطح و کانال‌ها نشان می‌دهد. همچنین این مدل استوکاستیک است که با داشتن شرایط رطوبتی اولیه و بارندگی، رواناب سطحی و فرسایش یک رگبار را محاسبه می‌نماید این مدل می‌تواند رفتار حوزه آبخیز را در هر رخداد نشان دهد و برای انواع مختلف آبخیزهای کوچک شبیه آبخیزهای زراعی، طبیعی و شهری کاربرد دارد. در این مدل به وسیله مکانیزم هورتون که در آن سرعت بارندگی از ظرفیت نفوذ بیشتر است، رواناب ایجاد می‌شود. بر این اساس برای حوزه‌هایی که جریان‌های عمقی زیاد دارند مناسب نیست. در این مدل فرآیند فرسایش، با در نظر گرفتن فرآیندهای برگاب، نفوذ و رواناب نشان داده می‌شود. در این مدل معادلات دیفرانسیل که بیانگر جریان داخل کانال‌ها، فرسایش و انتقال رسوب هستند، به وسیله روش انتقال محدود حل می‌گردد.

در ادامه آنچه گفته شد بایستی اشاره نمود که برای ارزیابی فرسایش در مدل‌های سیستم خطی مانند معادله جهانی فرسایش از پارامترهای میزان فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، شیب و روش بهره‌برداری از اراضی استفاده می‌کنند. در این مدل اطلاعاتی در مورد مکان‌های دارای قابلیت فرسایش ارائه می‌شود که این اطلاعات به سرعت فرسایشی خاصی مربوط می‌شود. برای بکارگیری معادله جهانی تلفات خاک به عنوان تکنیکی برای برآورد سرعت فرسایش و ارزیابی استراتژی‌های حفاظت‌خاک، تحقیقات زیادی در اروپا صورت گرفته‌است. تحقیقات نشان داده است که معادله جهانی فرسایش نیازمند اطلاعات دقیقی در مورد عامل‌های بارش (R) و فرسایش‌پذیری خاک (K) است.

علاوه بر آن کارآیی USLE پایین است، زیرا این مدل رسوب‌گذاری را در فرآیند فرسایش در نظر نمی‌گیرد و قادر به پیش‌گویی رسوب‌گذاری مجدد و شیارهای ایجاد شده به وسیله جریان آب نمی‌باشد. برای برآورد میزان و زمان رسیدن به شدت اوج رواناب و رسوب از شیب تپه به طرف رودخانه‌ها به یک مدل دینامیکی نیاز است. در صورتی که USLE قادر به این کار نیست و فقط متوسط فرسایش سالانه خاک را ارائه می دهد. مدل‌های CREAMS و WEPP نیز که برای بارندگی‌های تک‌رخداد به کار گرفته می‌شوند صرفاً کل خاک ازدست‌رفته توسط بارندگی را شبیه‌سازی می‌کنند. در این مدل‌ها فرض می‌شود که جریان سطحی حالت استاتیکی دارد و نمی‌توانند سدی‌گراف که دبی رسوب را در هر لحظه نشان می‌دهد، ترسیم نمایند. کاستی‌های موجود در مدل‌های پیشین سبب شده‌است که تلاش برای ارائه مدل‌هایی با کارایی و دقت بیشتر و نواقص کمتر همواره مد نظر محققان قرار داشته باشد.

۶) مدل SWAT[2]

مدل SWAT مدلی در مقیاس حوزه آبریز است که توسط دکتر آرنولد[3] برای موسسه تحقیقات کشاورزی آمریکا[1] توسعه داده شده است (۴۷). این مدل از توسعه مستقیم مدل SWRRB[2] به دست آمده است.

---

[1] Rovey
[2] Soil and Water Assessment Tool
[3] Arnold