

بررسی کارکرد و توانایی مدل های تجربی در تخمین فرسایش و تولید رسوب (مطالعه موردی حوزه قلعه بنی شهرستان کهگیلویه)

منصوره قوام^{۱*}، علی آلبوعلی^۲، محمود دره رودی^۲

^۱ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
^۲ کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

فرسایش خاک از جمله فرآیندهایی است که منابع آب و خاک یک کشور را مورد تهدید قرار می دهد. فرآیند فرسایش بسیار پیچیده است و عوامل زیادی در آن دخیل بوده که مهمترین آنها عوامل اقلیمی، شیب زمین، پوشش گیاهی، مدیریت و نحوه کاربری اراضی می باشد. به دلیل عدم وجود اطلاعات در منطقه از بین روش های تجربی، چهار روش EPM، MPSIAC، FAO، BLM انتخاب و ارزیابی این چهار مدل در یکی از حوزه های استان کهگیلویه و بویر احمد (حوزه قلعه بنی) انجام پذیرفت. از بین چهار مدل مذکور دو مدل اولیه فرسایش و رسوب را به صورت کمی و دو مدل دیگر، فرسایش را به صورت کیفی برآورد می کنند. براساس روش MPSIAC میزان فرسایش سالانه حوزه ۳/۵۹ تن بر هکتار بر سال و روش EPM این مقدار ۲/۷۶ تن بر هکتار بر سال بدست آمد. در روش FAO، BLM امتیازهای نهایی مربوط به فرسایش برای کل حوزه به طور میانگین به ترتیب ۵۵/۹ و ۴۷/۹ محاسبه گردید. براین اساس در روش FAO میزان فرسایش در کلاس چهارم قرار می گیرد که نیاز به تغییرات وسیع و همه جانبه در اداره اراضی و محدود کردن عملیات ساختمانی دارد. نتایج بدست آمده بیانگر تفاوت بین مقادیر حاصل از مدل های مذکور می باشد. بر این اساس می توان تفاوت نتایج حاصل از مدل EPM، MPSIAC را ناشی از اختلافات ذاتی در برآورد فرسایش در مدل ها دانست. در رابطه با اختلافات مشاهده شده در مدل های FAO، BLM کیفی بودن پارامترها و امتیازدهی را می توان از جمله دلایل این اختلافات برشمرد. بررسی ها و تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که مدل EPM نتایج به واقعیت نزدیک تر را ارائه می دهد و می توان از آن برای حوزه های مشابه استفاده نمود.

کلید واژه ها: فرسایش، رسوب، EPM، MPSIAC، FAO

مقدمه

سالیانه مقدار زیادی خاک از سطح حوزه‌های آبخیز به وسیله آب شسته شده و از محل اصلی خود جابجا می‌شود. حجم زیادی از این رسوبات در پشت سدها، آب‌های ساکن، چاله های داخلی و یا دریاها و اقیانوس‌ها ته نشین می‌گردد، بخش زیادی از این رسوبات در اثر فرسایش خاک حاصلخیز سطحی ایجاد می‌شود که با بررسی و توجه بیشتر به چگونگی پیدایش خاک اهمیت این عنصر طبیعی مشخص خواهد شد (رفاهی، ۱۳۷۸: ۹۸). طبق برآورد کنفرانس بیابان زایی سازمان ملل،^۱ UNCOD، پدیده بیابان‌زایی آینده بیش از ۷۸۵ میلیون نفر انسان ساکن در مناطق خشک را که معادل ۱۷/۷ درصد جمعیت کل جهان می‌باشد، تهدید می‌کند. از این تعداد بین ۶۰ تا ۱۰۰ میلیون نفر از طریق کاهش حاصلخیزی اراضی، همراه با دیگر فرایندهای بیابان‌زایی، به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌گیرند (مشکوه، ۱۳۷۷). خاک طی فرآیندهای پیچیده‌ای که تحت تأثیر پنج عامل اصلی اقلیم، توپوگرافی، سنگ‌مادر، پوشش گیاهی و زمان است، تشکیل می‌شود (جعفری، سرمیدان، ۱۳۸۲). در صورت مساعد بودن چهار عامل اولی، زمان طولانی برای تشکیل خاک نیاز است. با توجه به اینکه آب و خاک مهمترین عوامل در تامین مایحتاج بشری می‌باشند، کوچکترین کم توجهی در حفظ و نگهداری این دو خسارات جبران ناپذیری را وارد خواهد کرد. عمده‌ترین دلیل تخریب منابع آب و خاک برهم خوردن تعادل طبیعی در یک منطقه است که علت اصلی آن دست کاری و دخالت انسان در آن است (احمدی، ۱۳۷۸: ۱۵۳). همچنین قابل ذکر است که فرسایش دارای دو جنبه‌ی مهم شامل کاهش قدرت تولیدی زمین و دیگری مزاحمت مواد فرسایش یافته می‌باشد (قدیری، ۱۳۷۲). سلاجقه و دلفاری با مقایسه روش های کیفی ژئومورفولوژی و کمی^۲ EPM به این نتیجه رسیدند که روش ژئومورفولوژی به علت در نظر گرفتن عوامل بیشتر دخیل در فرسایش نسبت به روش EPM در زیر حوضه‌ی خسبان حوضه‌ی آبخیز طالقان نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که در ۴۵/۶۵ درصد طبقات فرسایش مشخص شده حاصل از دو مدل مشابه بوده است (سلاجقه و دلفاری، ۱۳۶۶). جلالیان در ارزیابی مقدار رسوبدهی با مدل PSIAC^۳ در حوضه‌ی آبخیز شمال کارون به این نتیجه رسید که مدل PSIAC^۳ دارای همبستگی خوبی با مقدار رسوب حاصل از ایستگاه رسوب سنجی بوده است (جلالیان، ۱۳۷۱). باقرزاده و کریمی در پژوهشی در زیرحوضه‌ی اوزون‌دره از حوضه‌ی آبخیز قزل اوزن به این نتیجه رسیده‌اند که مدل PSIAC اندازه گیری شده مطابقت خوبی داشته و همچنین مدل EPM را مناسب برای سایر مناطق مشابه منطقه‌ی تحقیق دانسته است. صادقی نیز با پژوهشی در زیرحوضه‌ی اوزون‌دره برای تعیین میزان فرسایش و رسوب با استفاده از مدل‌های PSIAC، EPM، داگلاس، فورنیه و کرک بای^۴ به این نتیجه رسید که مدل PSIAC بهتر از سایر مدل‌ها بوده و همچنین مدل EPM نیز از دقت قابل‌قبولی برخوردار بوده است (صادقی، ۱۳۷۲). اسدی در بررسی کاربرد مدل PSIAC با بهره‌گیری از روش کیفی ژئومورفولوژی به این نتیجه رسید که در مناطق دارای آمار رسوب محدود، می‌توان با تفسیر عکس‌های هوایی و انجام مطالعات صحرائی با استفاده از روش کیفی ژئومورفولوژی، با تغییر ضرایب مدل با توجه به شرایط منطقه از

^۱ United Nation Conference of Desertification

^۲ Erosion Potential Method

^۳ Pacific southwest inter-agency committee

^۴ Kirkby

مدل استفاده نمود (اسدی، ۱۳۷۴). فارگاس^۱ و همکاران روشی را ارائه نمودند که در آن با استفاده از دو عامل فرسایش پذیری نوع سنگ و تراکم زهکشی سعی در شناخت منابع منطقه ای رسوبزا (شدت فرسایش) در سطح منطقه ای نمودند محققین مذکور روش خود را در حوضه ی آبخیز Joaquin Costa در شمال شرقی اسپانیا با سطحی معادل 1500 km² آزمودند که دارای درست نمایی ۷۸/۵ درصد بود (فارگاس و همکاران، ۱۹۹۷). انواع اولیه مطالعه فرسایش خاک اساساً بصورت مفهومی بوده و اغلب شامل تهیه نقشه فرسایش از روی عکس های هوایی می شد که انواع فرسایش سطحی، شیاری و خندق های اتفاق افتاده در یک محل را در بر می گرفت (مورگان، ۱۹۹۶). SKokh-Sherstha در سال ۲۰۰۱ با استفاده از تصاویر ماهواره ای اقدام به پهنه بندی فرسایش و کاربری اراضی در حوزه خولا کشور نپال نمود و در نهایت مقدار فرسایش خاک رابه میزان ۰/۱ تا ۰/۴ تن در هکتار در سال در اراضی با کاربری کشاورزی و آبی و در نهایت میزان فرسایش خاک را ۱۲/۶ تن در هکتار برآورد کرد (SKokh-Sherstha, 2001). مختاری برای برآورد فرسایش با استفاده از مدل MPSIAC در حوضه های آبخیز فاقد آمار از تکنیک دور سنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز سه در شمال اصفهان استفاده کرد و نتیجه گرفت که این تکنیک برای تهیه لایه های اطلاعاتی و تلفیق اطلاعات، نقش عمده ای در افزایش سرعت و دقت پردازش، به خصوص برای آشکارسازی بهتر پوشش گیاهی و همچنین متمایز شدن اراضی مارنی داشته است (مختاری، ۱۳۷۶). پروسر نقشه فرسایش خندقی و کنار رودخانه ای را برای حوزه آبخیز موری- دارلینگ^۲ استرالیا با استفاده از عکس های هوایی و ایجاد مدل های شبیه سازی عددی تهیه کرده اند (پروسر، ۲۰۰۳). هم اکنون نیز مطالعات جهت برآورد کمی فرسایش خاک با بهره جویی از مدل های تجربی گوناگون مانند فورنیه^۳، مدل^۴ SLEMSA، روش دفتر مدیریت اراضی^۵ BLM روش جعبه سیاه، مدل EPM و غیره ادامه دارد (رفاهی، ۱۳۸۵). رنگزن و همکاران در تحقیقی در حوزه پگاه سرخ گنوند خوزستان، بعد از مقایسه دوروش EPM و^۶ MPSIAC به این نتیجه رسیدند که اگرچه نتایج بدست آمده از دو روش در اکثر مناطق انطباق زیادی با هم دارند اما نتایج مدل EPM برای شناسایی مناطق دارای فرسایش بالا به اندازه مدل MPSIAC، قابل اطمینان نمی باشد (رنگزن و همکاران: ۱۳۸۶).

تاجگردان و همکاران برای برآورد میزان رسوب در حوزه آبخیز زیارت از مدل MPSIAC داده های ماهواره ای و GIS^۷ استفاده کردند (تاجگردان و همکاران، ۱۳۸۶). همچنین در گذشته تحقیقاتی توسط محققین مختلف در این زمینه برآورد فرسایش و رسوب انجام گرفته است که می توان به کارهای (Hill & Tangestani, 1993)، (Gobin et al., 2005)، (Amini et al., 2010)، (Amiri, 2010)، (جلیلی و همکاران، ۱۳۸۳)، (رنگزن و مرادزاده، ۱۳۸۴)، (محمدیان شوئیلی و سرور، ۱۳۸۶)، (صالح ارخی و رحیم نظری، ۱۳۸۷) اشاره نمود. سلاجقه و دلفاری (۱۳۸۶) در مطالعه ای مشابه به مقایسه روش های کیفی ژئومورفولوژی و کمی Epm در برآورد فرسایش رسوب در زیر حوضه خسبان در حوزه آبخیز ظالقان به این نتیجه رسیده بودند که روش کیفی به علت در نظر گرفتن عوامل

¹ Fargas

² Murray-Darling

³ Fournier

⁴ Soil loss equation model for southern africa

⁵ Bureau of land management

⁶ Modified Pacific southwest inter-agency committee

⁷ Geographic information system

بیشتر دخیل در فرسایش نسبت به روش کمی در منطقه مطالعاتی نتایج بهتری را ارائه می دهد. صادقی (۱۳۷۲) با پژوهشی در زیرحوضه ی اوزون دره برای تعیین میزان فرسایش و رسوب با استفاده از مدل های تجربی به این نتیجه رسید که مدل EPM نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است. همچنین سینگ و همکاران (۲۰۱۰) در مدلسازی تجربی فرسایش در منطقه توربن فرانسه، کارا بودن این مدل ها در بررسی فرسایش و رسوب را به اثبات رسانده بودند برای تعیین روش های مبارزه با فرسایش و کاهش رسوب از سطح آبخیزها به دلیل عدم وجود آمار و اطلاعات کافی استفاده از روش های تجربی برآورد فرسایش و رسوب اجتناب ناپذیر است (سلاجقه و همکاران، ۱۳۸۶). با توجه به این مسئله که هر مدل در مکان های با ویژگی های خاص اقلیمی، زمین شناسی و ... کارایی دارد. این تحقیق بر اساس فرضیه های زیر انجام پذیرفته است

۱- توانایی مدل های تجربی در تخمین فرسایش و رسوب متفاوت است.

۲- یکی از مدل ها مقدار رسوب را در حوزه مورد مطالعه با دقت بالایی می تواند برآورد کند.

در این تحقیق به بررسی کارکرد و توانایی مدل های تجربی در تخمین فرسایش و تولید رسوب در حوزه قلعه بنی شهرستان کهگیلویه پرداخته می شود.

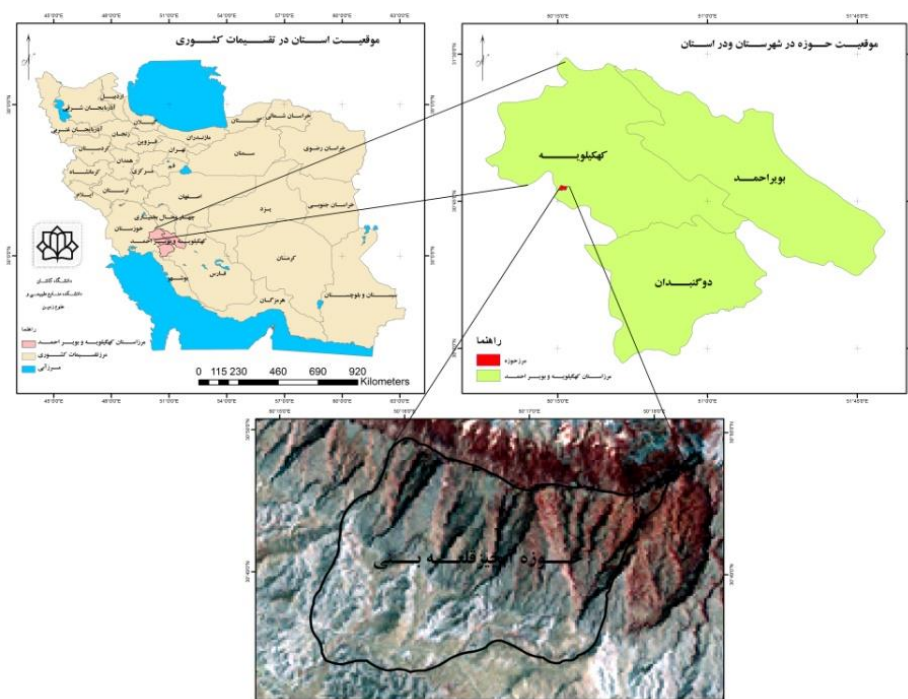
۱. مواد و روش ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قلعه بنی در شهرستان بهمئی در استان کهگیلویه و بویر احمد واقع شده است. مختصات UTM منطقه بین طول ۴۲۸۵۶۶ تا ۴۳۳۶۰۸ و عرض ۳۴۰۸۱۸۳ تا ۳۴۱۱۲۵۸ و مختصات جغرافیایی بین طول ۱۲ ۱۵ ۵۰ تا ۱۸ ۲۱ ۵۰ شرقی و عرض های ۱۶ ۴۸ ۳۰ تا ۵۷ ۴۹ ۳۰ شمالی قرار دارد (شکل ۱). مساحت و محیط حوزه به ترتیب ۸/۸۸ کیلومتر مربع و ۱۳/۲۵ کیلومتر می باشد. ارتفاع بلندترین نقطه از سطح دریا ۱۵۸۰ متر و کمترین ارتفاع ۵۲۰ متر می باشد که دارای ۳ زیرحوزه هیدرولوژیکی و یک زیر حوزه غیرهیدرولوژیکی می باشد. با توجه به وضعیت رخساره های فرسایشی استخراج شده از عکس های هوایی و ماهواره ای و تطبیق آن با واقعیت زمینی، نوع سازندهای استخراج شده از نقشه زمین شناسی، نقشه شیب (وجود ۵ کلاس شیب به ترتیب با طبقات ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ درصد) بدست آمده از نقشه توپوگرافی به مقیاس ۱/۵۰۰۰۰، حوزه آبخیز قلعه بنی به ۱۰ واحدکاری تقسیم گردید. در حوزه قلعه بنی تشکیلات زمین شناسی را سنگ های مربوط به دوران سنوزوئیک تشکیل می دهند که این سازندها عبارتند از :

سازند آسماری (این سازند از نظر لیتولوژی شامل آهک و آهک دولومیتی ریز دانه متوسط تا ضخیم لایه و توده ای، بارنگ خاکستری روشن می باشد). سازند پابده (از نظر لیتولوژی شامل شیل و مارن با لایه های نازکی از آهک در قسمت تحتانی می باشد که به قسمت فوقانی آن میزان لایه های نازک آهکی افزایش یافته و از ضخامت لایه های شیل و مارن کاسته می شود). سازند گچساران (متشکل از رسوبات تبخیری (کربنات کلسیم (آهک)، ژپس و انیدریت) ضخیم و گسترده همراه با میان لایه های دریایی و دریاچه ای قدیمی، ژپس با میان لایه های مارن قرمز و

خاکستری و آهک فسیل دار است). واحد نهشته‌های آبرفتی بستر رودخانه (عمدتاً از جنس آهک‌های سازندهای - قدیمی‌تر بوده و مقدار کمتری رسوبات ریزدانه مربوط به سازندهای مارنی و شیلی در سطح این آبرفت‌ها). واحد رسوبات مخروط افکنه‌ای (رسوبات آن شامل گراول، قلوه سنگ و قطعه سنگ بوده و ریزدانه‌های ماسه تا رس در ترکیب آنها بسیار کم می‌باشد). واحد تراس آبرفتی حاشیه رودخانه (رسوبات دارای عناصر به اندازه گراول، قلوه سنگ و قطعه سنگ بوده و ریزدانه‌های ماسه تا رس در ترکیب آنها بسیار کم است).



شکل ۱: موقعیت حوزه در استان و شهرستان

۲۰۲. تشریح مدل‌ها

۱.۲.۲. MPSIAC مدل

این روش در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط کمیته مدیریت آب در آمریکا برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک و نیمه‌خشک غرب ایالات متحده آمریکا ارائه شده و برای اولین بار در یک حوزه تحقیقاتی به نام Walnut Gulch واقع در جنوب شرقی ایالت آریزونا آمریکا آزمایش شد. این روش برای اولین بار در ایران در سال ۱۳۵۲ در حوزه آبخیز سد دز استفاده شد. سپس با توجه به دقت نسبتاً خوب آن در مقایسه با سایر روش‌ها و مدل‌های تجربی در برخی از حوزه‌های آبخیز کشور مانند کهیر، زاینده‌رود، مارون، هلیل‌رود، دز، سراوان، زبردان و اوزن‌دره مورد استفاده قرار گرفت. مدل پیشنهادی اولیه برای هر عامل حدود تغییراتی را مشخص کرده است که تا حدودی انتخابی بوده و متناسب با عامل رسوب‌دهی نیاز به قضاوت کارشناسی دارد. در سال ۱۹۸۲ طی تحقیقی جانسون و گمبهارت عوامل نه‌گانه این روش را به صورت معادلات عددی در آورده‌اند که در مطالعه حوزه آبخیز از این معادلات استفاده می‌شود. این عوامل ۹ گانه و معادلات مربوطه در جدول ۱ آمده است. با استفاده از فرم‌های

BLM نقشه‌های اشکال فرسایش تهیه شد. در بخش‌هایی از کشور ما که دارای بارندگی سالانه بیش از حدود ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند، عامل استفاده از زمین به دلیل کشت و کار غیر اصولی در اراضی کشاورزی و به خصوص اراضی دیم و همچنین چرای مفرط مراتع، بیش‌ترین تأثیر را در فرسایش خاک و تولید رسوب دارا می‌باشد. در مطالعه منطقه‌ای باید تشخیص داد چه عواملی در بین عوامل نه گانه بیش‌ترین تأثیر را در تولید رسوب داشته و ترتیب اهمیت این نه عامل چگونه است. بدیهی است این کار در دقت مطالعه تأثیر به سزایی دارد. پس از تعیین امتیاز هر یک از عوامل نه گانه در مدل حاصل جمع امتیاز آنها درجه رسوب دهی (R) خوانده می‌شود با استفاده از درجه رسوب دهی این امکان ایجاد می‌شود که هر یک از واحدهای مطالعاتی به لحاظ وضعیت فرسایش توصیف شوند و بر اساس آن میزان تولید رسوب در واحدهای مطالعاتی محاسبه گردد. برای محاسبه مقدار رسوب رابطه‌نمایی شماره (۱) پیشنهاد شده است که در این رابطه با درجه همبستگی ۰/۹۹۶۴ از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (رفاهی ۱۳۷۹).

$$Q_s = 0.253e^{0.036R} \quad (1)$$

که در آن Q_s میزان رسوب‌دهی سالانه بر حسب تن بر هکتار، R درجه رسوب‌دهی یعنی مجموع امتیازات عوامل مختلف در نظر گرفته شده در مدل پسیاک و e عدد نپر (۲/۷۱۸) می‌باشد.

جدول ۱: عوامل موثر در مدل MPSIAC و نحوه امتیاز دهی به آن

توضیحات	معادلات روش اصلاح شده	عوامل ۹ گانه	ردیف
$Y_1 =$ حساسیت سنگها به فرسایش (۰-۱۰)	$X_1 = Y_1$	زمین شناسی سطحی	۱
$K =$ حساسیت خاک به فرسایش در فرمول جهانی فرسایش خاک	$16.67 K = X_2$	خاک	۲
$P_2 =$ مقدار بارندگی ۶ ساعته با دوره برگشت دو سال	$= 0.2P_2 X_3$	آب و هوا	۳
$R =$ ارتفاع رواناب و $Q_p =$ دبی ویژه پیک سالیانه	$0.006R = X_4 + 10Q_p$	رواناب	۴
$S =$ شیب متوسط بر حسب درصد	$0.33S = X_5$	پستی و بلندی	۵
$P_b =$ درصد اراضی لخت و فاقد پوشش	$0.2P_b = X_6$	پوشش زمین	۶
$P_c =$ درصد تاج پوشش	$20 - 0.2P_c = X_7$	استفاده از زمین	۷
$SSF =$ فرسایش سطحی خاک با استفاده از روش BLM	$0.25SSF = X_8$	فرسایش سطحی	۸
$SSF_g =$ امتیاز عامل فرسایش خندقی در روش BLM	$1.67SSF_g = X_9$	فرسایش خندقی	۹

۲.۲.۲. EPM مدل

این روش با استفاده از اطلاعات حاصل از قطعه زمین های فرسایشی و اندازه گیری رسوب پس از ۴۰ سال تحقیقات در کشور یوگوسلاوی سابق به دست آمده و در سال ۱۹۸۸ در کنفرانس بین المللی رژیم رودخانه توسط گاوریلویچ ارائه شد (ضیایی، ۱۳۸۰). در این روش چهار مشخصه شامل: ضریب فرسایش حوزه آبخیز (ϕ) ضریب استفاده از زمین (X_a)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (Y) و شیب متوسط حوزه (I) در واحد های

ژئومورفولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است. از این روش در کارهای مهندسی در یوگسلاوی استفاده شد و مشخص شده است که در برآورد میانگین رسوب قابل اعتماد می‌باشد (نجفی نژاد، ۱۳۷۳). محاسبه شدت فرسایش و میزان فرسایش براساس روش EPM به صورت رابطه (۲ و ۳) ارائه گردیده است:

$$Z = Y \cdot Xa \cdot (\psi + I)^{0.5} \quad (2)$$

$$WSP = T \cdot P \cdot \pi \cdot Z^{1.5} \quad (3)$$

که در آن:

WSP: فرسایش ویژه ($m^3/km^2/year$)

T: ضریب دما که مقدار آن از رابطه بدست $T = (\frac{t}{10} + 0.1)^{0.5}$ می آید.

t: دمای متوسط سالانه (C)، (P): ارتفاع متوسط بارندگی π (mm): ۳/۱۴ و Z: ضریب شدت فرسایش می‌باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مدل در حوزه‌های بزرگ از دقت کمتری نسبت به سایر مدل‌های اشاره شده در برآورد رسوب برخوردار است. از دلایل عدم توفیق این مدل را می‌توان تطابق نداشتن جداول راهنما با شرایط ایران، اعمال نظرات کارشناسی در امتیازدهی عوامل تشکیل دهنده مدل و دخیل نکردن سایر عوامل مهم در تولید رسوب نظیر پوشش گیاهی، روان آب و خاک دانست. عدم کارایی مدل در مناطق با دمای متوسط سالانه کمتر از ۱- درجه سانتی‌گراد نیز از دیگر عواملی است که کاربرد این مدل را دچار مشکل می‌نماید.

۳.۲.۲. روش FAO

بطور کلی بر اساس روش FAO برآورد شدت فرسایش با ارزیابی صحرائی در مورد ۶ عامل زمین‌شناسی، خاک، توپوگرافی، پوشش خاک، کاربری اراضی و وضعیت فعلی فرسایش انجام می‌شود. که هر یک از این عوامل، با نمرات مشخص کننده شدت فرسایش می‌باشند (جدول شماره ۲).

جدول ۲: مشخصات عوامل و امتیازات نشان دهنده شدت فرسایش در روش FAO

نمره مشخص کننده شدت فرسایش	عامل	رتبه
۱-۲۰	حفاظت سطح خاک یا پوشش خاک	۱
۱-۱۸	سنگ مادر (زمین شناسی سطحی)	۲
۱-۱۶	توپوگرافی و شیب	۳
۱-۱۶	ساختمان و بافت خاک (دانه بندی خاک)	۴
۰-۱۵	عملیات کشت زراعی (عملیات کشاورزی) نحوه استفاده از اراضی در حوزه	۵
۰-۱۵	وضعیت فعلی فرسایش در حوزه آبخیز	۶
۴-۱۰۰	جمع کل	۷

همچنین توسط جدول شماره ۳ می توان شدت فرسایش را از این مدل محاسبه نمود. از معایب این روش این است که محدوده نمره گذاری هر عامل زیاد بوده و با توجه به اینکه نظارت کارشناسی متفاوت است نمی توان به نتایج بدست آمده اطمینان نمود. دیگر اینکه پوشش گیاهی که عامل مهمی در فرسایش است به صورت مشترک با سایر عناصر سطحی خاک در نظر گرفته شده است. از دیگر معایب این روش که از اهمیت بالایی نیز برخوردار است، و این است که شدت فرسایش به صورت کیفی ارزیابی می شود و میزان رسوب تولیدی به صورت کمی بیان نمی شود.

جدول ۳: طبقه بندی میزان فرسایش به روش FAO

عملیات اصلاحی	نمره امتیاز ارزیابی شده	کلاس میزان فرسایش
عملیات و اقدامات فعلی قابل قبول است	۰-۸	I
تجدید نظر در مدیریت اراضی، همراه با عملیات حفاظتی خاک	۹-۲۰	II
اعمال مدیریت جدید، همراه با افزایش عملیات حفاظت خاک	۲۱-۴۰	III
تغییرات وسیع و همه جانبه در اداره اراضی و اعمال عملیات اصلاحی و محدود کردن کارهای ساختمانی	۴۱-۶۵	IV
محدود کردن عملیات روی زمین و ارزیابی مجدد راجع به استفاده از اراضی و استفاده از عملیات ساختمانی برای حفاظت	۶۶-۸۵	V
محدودیت در مالکیت اراضی، حداکثر عملیات ساختمانی	> ۸۶	VI

۴.۲.۲. روش BLM

روش BLM براساس ارزیابی ۷ عامل حرکت خاک، وجود لاشبرگ در سطح زمین، وضعیت سنگ ها، قطعات سنگی تحکیم یافته، وجود فرسایش شیاری، فرم آبراهه ها و وجود فرسایش خندقی و یا دادن امتیاز بین صفر تا پانزده برحسب میزان تاثیر آنها در فرسایش استوار است (ضیایی، ۱۳۸۶). مجموع امتیازات عوامل مختلف در این بخش به ۱۰۰ می رسد (جدول شماره ۴). نهایتاً میزان فرسایش را به پنج بخش تقسیم می نماید. در این روش ارزیابی عوامل موثر در فرسایش در ابتدا به صورت کمی انجام می شود ولی تقسیم بندی در پایان به صورت کیفی ارزیابی می گردد و این خود از معایب این روش است. بنابراین همانند روش FAO اعمال مدیریت مناسب به دلیل کیفی بودن ارزیابی نهایی و سلیقه های مختلف به طور دقیق امکان پذیر نمی باشد.

جدول ۴: وضعیت فرسایش بر حسب جمع نمرات هفت عامل

وضعیت فرسایش	جمع نمرات عوامل هفتگانه
خیلی کم	۰-۲۰
کم	۲۱-۴۰
متوسط	۴۱-۶۰
زیاد	۶۱-۸۰
خیلی زیاد	۸۱-۱۰۰

۳.۲. روابط فرسایش و رسوب

فرسایش تنها در تولید رسوب خلاصه نمی‌شود و چه بسا مقادیر زیادی از خاک در داخل حوزه جابجا می‌شود ولی در زمره رسوب محسوب نمی‌شود. لذا برای محاسبه فرسایش خاک در حوزه باید از ضرایب خاصی استفاده نمود که در ادامه از آن صحبت می‌شود.

۱.۳.۲. فرسایش ویژه در مدل MPSIAC

در این مدل برای محاسبه فرسایش ویژه از ضریب SDR استفاده می‌شود. رابطه شماره (۴) نحوه محاسبه این روش را نشان می‌دهد.

$$\text{Log SDR} = 1/8768 - 0/14191 \log A \quad (۴)$$

در این رابطه SDR نسبت رسوب به فرسایش می‌باشد و A مساحت زیر حوزه برحسب مایل مربع و Log علامت لگاریتم می‌باشد. با به دست آوردن این رابطه و با استفاده از رابطه (۱) می‌توان میزان فرسایش را محاسبه نمود.

۲.۳.۲. ضریب رسوب‌دهی به روش EPM

ضریب رسوب‌دهی عبارت اند از نسبت مقدار مواد فرسایش یافته که در هر مقطع از رودخانه جابجا می‌شود به مقدار کل فرسایش در سطح حوزه و با رابطه شماره (۵) بیان می‌شود.

$$\text{Ru} = \frac{(P \cdot D)0.5}{L + 10} \quad (۵)$$

که در آن:

P: محیط حوزه آبخیز بر حسب کیلومتر

L: طول حوزه یا بزرگترین آبراهه بر حسب کیلومتر D: اختلاف ارتفاع بر حسب متر

بعد از تعیین RU مقدار رسوب ویژه از روابط شماره (۶) و (۷) حاصل می‌شود.

$$\text{GSP} = \text{WSP} \cdot \text{RU} \quad (۶)$$

$$\text{GS} = \text{GSP} \cdot \text{A} \quad (۷)$$

که در آنها:

GSp: دبی رسوب ویژه بر حسب متر مکعب بر کیلومتر مربع بر سال

WSP: مقدار فرسایش ویژه بر حسب متر مکعب بر کیلومتر مربع بر سال و RU: ضریب رسوب‌دهی

GS: دبی رسوب کل بر حسب متر مکعب بر سال و A: مساحت حوزه بر حسب کیلومتر مربع

یافته های پژوهش

پس از انجام محاسبات لازم برای هر مدل، میانگین ضرایب مورد نیاز در هر مدل در هر زیر حوزه و کل حوزه محاسبه شد و براساس روابط و جدول های موجود میزان فرسایش و کلاس هر کدام محاسبه گردید.

۱.۳. مدل MPSIAC

جدول شماره (۵) میانگین ضرایب در حوزه قلعه بنی را به روش MPSIAC را نشان می دهد. بعد از تعیین ضرایب برای هر واحد کاری حوزه مجموع ضرایب برای کل حوزه محاسبه گردید، بر این اساس میانگین های محاسبه شده مقدار آن برابر با ۶۵/۸۹ برای کل حوزه بدست آمده است. به این ترتیب با استفاده از رابطه شماره (۱) میزان شدت رسوب دهی برای کل حوزه قلعه بنی از طریق روش MPSIAC برابر با ۲/۷۱ تن بر هکتار بر سال به دست آمد و شدت فرسایش کل حوزه ۳/۵۹ تن بر هکتار بر سال به دست آمد که با مقایسه اعداد به دست آمده با جدول های موجود (ضیایی، ۱۳۸۶) مبین کلاس فرسایش متوسط برای حوزه آبخیز قلعه بنی می باشد.

جدول ۵: میانگین ضرایب (R) در حوزه قلعه بنی به روش MPSIAC

عامل	میانگین ضرایب (R)
مساحت (km ²)	۰/۸۸۹۸۹
زمین شناسی	۶/۴۵
خاک	۵/۳۹۸
اقلیم	۳/۳۳۶
روان آب	۵۸/۴۷۴
توپو گرافی	۷/۲۵۱۵
پوشش زمین	۷/۲۹
کاربری اراضی	۱۷/۰۷۶
فرسایش سطحی	۱۲/۰۲۵
فرسایش رودخانه ای	۴/۸۴۳
R	۶۵/۸۹
شدت رسوب دهی	متوسط

۲.۳. روش EPM

جدول شماره (۶) میانگین ضرایب در هر زیرحوزه قلعه بنی را به روش EPM نشان می دهد. با توجه به مقادیر جدول فوق مقدار Z برای کل حوزه به میزان ۰/۵۹ محاسبه شد که با توجه به آن کلاس فرسایشی خاک در گروه متوسط قرار گرفت. همچنین ضریب T برای حوزه به میزان ۱/۴۴ و مقدار P به مقدار ۴۰۷/۱۷ میلی متر از ایستگاه هواشناسی گزارش شده است. میزان فرسایش ۲/۷۶ تن در هکتار در سال می باشد. در

زیر حوزه‌های غیر هیدرولوژیک به لحاظ اینکه رسوبات به خارج از حوزه نیز انتقال می‌یابند امکان ارائه رسوب ویژه مقدور نمی‌باشد، از این رو رسوب ویژه تنها برای زیرحوزه‌های هیدرولوژیک محاسبه گردید.

جدول ۶: میانگین ضرایب، مقدار ضریب شدت فرسایش، کلاس آن و مقادیر رسوب ویژه مربوط به روش EPM

قلعه بنی	حوزه	
۰/۶۷	Ψ	
۰/۵۵	Xa	
۰/۹۲	Y	
۰/۲۵	I	
۰/۵۹	Z	ضریب شدت فرسایش
متوسط	کلاس فرسایشی	
۸۳۴/۷۷	WSP(M3/Km2/yr)	
۱۲/۵۳	WSP(Ton/ha/yr)	
۰/۲۲	RU	
۱۸۳/۶۵	GSP (M3/Km ² /yr)	
۲/۷۶	GSP(Ton/ha/yr)	
۱۶۳۰/۸۱	GS(M3/yr)	
۲۴/۵۱	Ton /yr(GS)	

۳.۳. روش FAO

با توجه به جدول‌های موجود در این روش (رفاهی، ۱۳۷۹، ضیائی، ۱۳۸۶) ضرایب مربوط به روش FAO برای حوزه قلعه بنی محاسبه شد که در جدول شماره (۷) موجود می‌باشد.

جدول ۷: ضرایب مربوط به روش FAO در حوزه قلعه بنی

عامل	حفاظت کننده سطح خاک	سنگ مادر و سنگ شناسی	شیب	ساختمان و دانه بندی خاک	عملیات زراعی	فرسایش در وضعیت فعلی	جمع امتیازات	کلاس فرسایش
امتیاز	۱۱/۷	۱۳/۱	۶/۷	۹/۵	۵/۶	۹/۳	۵۵/۹	IV

با توجه به امتیازات در جدول شماره (۷) مجموع امتیازات برای حوزه قلعه بنی به مقدار ۵۵/۹ محاسبه شد لذا با توجه به جدول های موجود (ضیایی، ۱۳۸۶) این مقدار در کلاس چهارم جدول قرار گرفته است. که براین اساس حوزه به تغییرات وسیع و همه جانبه در اداره اراضی و اعمال عملیات اصلاحی و محدود کردن کارهای ساختمانی نیاز دارد.

۴.۳. مدل BLM

با توجه به جدول های موجود در این روش (رفاهی، ۱۳۸۶) امتیازات هرکدام از هفت عامل مربوط به آن برای هر واحد کاری و کل حوزه قلعه بنی محاسبه شد، که به شرح جدول شماره (۸) میانگین کل حوزه مشخص شده است.

جدول ۸: میانگین ضرایب مربوط به روش BLM در حوزه قلعه بنی

عامل	حرکت خاک	لاشبرگ سطحی	پوشش سنگی	سنگ های تحکیم یافته	شیارها	نرم آبراه ای	فرسایش خندقی	جمع
امتیاز	۲/۶	۹/۸	۸/۵	۷/۸	۸/۶	۸/۸	۷/۲	۹/۴۷

با توجه به جدول فوق مجموع امتیازات در روش BLM برابر با ۴۷/۹ محاسبه شد. با توجه به جدول وضعیت فرسایش مربوط به روش BLM که بر اساس جمع بندی نمرات هفت عامل به دست می آید کلاس فرسایشی در گروه متوسط قرار می گیرد.

بحث و نتیجه گیری

در بین چهار مدل مذکور که به تفکیک بررسی شدند. دو مدل EPM و MPSIAC فرسایش و رسوب را به صورت کمی برآورد می کنند، در حالی نتایج مدل های FAO و BLM به صورت کیفی می باشند. بر اساس مطالعات انجام شده در حوزه مورد مطالعه که از سطح حوزه به عمل آمد به نظر می رسد که میزان فرسایش و رسوبزایی حوزه قلعه بنی در حد متوسط باشد که با مقدار برآورد شده در ۲ مدل EPM و MPSIAC مطابقت دارد ولی میزان برآورد فرسایش در روش EPM به واقعیت نزدیک تر می باشد زیرا محاسن این مدل کارایی آن در شرایط گرم و خشک است. از این رو در مناطق نواحی گرم و خشک (قلعه بنی) نتایج بهتری ارائه می دهد. برای افزایش دقت در رابطه فوق نیاز به داده های هیدرومتری می باشد که متأسفانه در اکثر حوزه های کشور آمار لازم موجود نیست. میزان برآورد شده رسوب به وسیله مدل MPSIAC بیشتر از میزان رسوب و فرسایش منطقه می باشد و نمی توان گفت که میزان برآورد در مدل EPM بسیار دقیق است فقط به واقعیت زمینی نزدیکتر می باشد ولی هر دو مدل شدت

فرسایش را در کلاس متوسط برآورد کرده‌اند و این اختلاف عددی بین این دو مدل شاید بخاطر شرایط خاصی است که این دو مدل دارند. از دیگر عواملی که تایید کننده کاربرد مدل EPM می‌باشد سهولت و سادگی استفاده از این مدل نسبت به مدل MPSIAC و هم چنین کم هزینه بودن آن است ضمن سرعت عمل در مدل EPM نسبت به MPSIAC بیشتر واز دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. مدل BLM و FAO هر دو مدل‌های کیفی هستند که با توجه به ضرایب بدست آمده برای آنها و مقایسه آنها با روش‌های کمی مذکور، می‌توان گفت که میزان فرسایش بدست آمده از آنها کمتر از روش‌های کمی محاسبه شده است. البته به دلیل نبودن آمار و اطلاعات لازم نمی‌توان نظر قطعی ارائه داد ولی با توجه به مشکلات مدل‌های مذکور می‌توان چنین بیان نمود که دقت لازم در آنها فقط در حد یک دید کلی از فرسایش منطقه مناسب است که این امر هم منوط به دقت و تامل در نظرات کارشناسی می‌باشد. از مشکلات مدل FAO می‌توان به عوامل زیر اشاره نمود:

محدوده نمره‌گذاری هر عامل زیاد بوده و با توجه به اینکه نظرات کارشناسی متفاوت است، لذا نمی‌توان به مقادیر بدست آمده مطمئن بود. پوشش گیاهی که عامل مهمی در فرسایش است به صورت مشترک با سایر عناصر سطحی خاک در نظر گرفته شده است. استفاده از اراضی که بین ۰-۱۵ نمره در نظر گرفته شده است، در نمره دادن مشکل ایجاد خواهد نمود، چون عوامل زیادی در تعیین این عامل دخالت دارند، از طرف دیگر سیستم استفاده از اراضی در کشورها متفاوت است. در نهایت، شدت فرسایش بصورت کیفی ارزیابی می‌شود که خود از معایب این روش محسوب می‌گردد. در مدل BLM نیز اگرچه در ابتدا با دادن امتیاز بین ۰ تا ۱۵ به هفت عامل موثر در فرسایش، ارزیابی را به صورت کمی ارائه می‌دهد ولی در نهایت تقسیم بندی شدت فرسایش در آن به صورت کیفی می‌باشد و این مشکل در همه مدل‌های کیفی وجود دارد ولی از مزیت‌های این مدل این است که پارامترهای بیشتری را در مقایسه با مدل FAO در نظر می‌گیرد اما به دلیل کیفی بودن و سلیقه‌ای بودن نظرات کارشناسی، بازهم نمی‌توان انتظار داشت که نتایج از دقت لازم برخوردار باشد و تنها نقطه قوت آن نسبت به مدل FAO در نظر گرفتن عوامل بیشتر است، که این خود باعث می‌شود نمای کلی از منطقه ارائه می‌دهد با در نظر گرفتن نظرات درست کارشناسی از دقت بیشتری برخوردار باشد. نتایج این تحقیق با نتیجه تحقیق سلاجقه و دلفاری (۱۳۸۶) مطابقت داشت. ایشان در مطالعه ای مشابه به مقایسه روش‌های کیفی ژئومورفولوژی و کمی Epm در برآورد فرسایش رسوب در زیر حوضه خسبان در حوزه آبخیز ظالقان به این نتیجه رسیده بودند که روش کیفی به علت در نظر گرفتن عوامل بیشتر دخیل در فرسایش نسبت به روش کمی در منطقه مطالعاتی نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. صادقی نیز با پژوهشی در زیرحوضه‌ی اوزون دره برای تعیین میزان فرسایش و رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی به این نتیجه رسید که مدل EPM نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است که بایافته‌های نتایج مطالعه حاضر موافق بوده است. همچنین نتایج سینگ^۱ و همکاران (۲۰۱۰) در مدلسازی تجربی فرسایش در منطقه توربن فرانسه، کارا بودن این مدل‌ها در بررسی فرسایش و رسوب را به اثبات رسانده بودند. در مجموع به دلیل عدم وجود ایستگاه هیدرومتری در سطح حوزه قلعه بنی، اطلاعاتی از میزان رسوب در سطح حوزه در دسترس نبوده است، اما با توجه به نتایج حاصله از بررسی‌های حوزه مجاور (حوزه آبخیزتشان)، نتایج ارائه شده در بین این چهار مدل، باز دیده‌های صحرائی،

^۱ singh

قضاوت های کارشناسی و تحقیقات صورت پذیرفته می توان انتظار داشت که مدل EPM نتایج رضایت بخش تری را ارائه نماید. که این امر منوط به آزمایشات و تحقیقات بیشتر در این زمینه و هم چنین در مناطق مشابه منطقه مورد مطالعه (حوزه قلعه بنی) دارد. نزدیکی نتایج حاصل از مدل های مورد بررسی با نتایج ضبط شده در نزدیک ترین ایستگاه هیدرومتری به حوضه مورد مطالعه (ایستگاه هیدرومتری حوضه تشان) نشان داد که با استفاده از برخی مشاهدات صحرائی و تصاویر ماهواره ای می توان مقدار رسوب را در حوزه مورد مطالعه با دقت بالایی برآورد نمود.

منابع

- ۱- احمدی، حسن، ۱۳۷۸، ژئومورفولوژی کاربردی، فرسایش آبی، ویرایش اول، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۶۸۸.
- ۲- ارخی صالح، نظری رحیم، ۱۳۸۷، پهنه بندی شدت فرسایش و تولید رسوب با استفاده از مدل پسیاک اصلاح شده در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ایلام)، مجله پژوهش آب ایران، سال دوم، شماره سوم، پاییز و زمستان ۱۳۸۷.
- ۳- تاجگردان تکتیم، ایوبی شمس ا...، شتایی جویباری، شعبان، ۱۳۸۶، برآورد فرسایش و رسوب به کمک تصاویر ماهواره ای و GIS با استفاده از مدل MPSIAC (مطالعه موردی حوزه آبخیز زیارت)، نشریه پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۹.
- ۴- جعفری محمد، سرمیدیان، فریدون، ۱۳۸۲، مبانی خاک شناسی ورده بندی خاک، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۷۸۸.
- ۵- رنگرن کاظم، زرازوندی، علیرضا، حیدری، ارسلان، ۱۳۸۶، مقایسه دو مدل EPM و MPSIAC در برآورد فرسایش و رسوب حوزه پگاه سرخ گتوند خوزستان با استفاده از تکنیک های RS و GIS، نشریه پژوهش های جغرافیایی، شماره ۶۴.
- ۶- رفاهی حسینقلی، ۱۳۷۸، فرسایش آبی و کنترل آن، ویرایش اول، چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۵۵۱.
- ۷- زهتابیان غلامرضا، طباطبائی، محمدرضا، ۱۳۷۸، بررسی روند بیابان زایی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره ای (IP) و سیستم اطلاعات جغرافیائی (GIS) مجله بیابان، جلد ۴، شماره ۲، ص ۶۷-۵۷.
- ۸- سلاجقه علی، دلفاری، صادق، ۱۳۸۶، مقایسه روش های کیفی ژئومورفولوژی و کمی Epm در برآورد فرسایش رسوب (مطالعه موردی زیر حوزه خسبان، حوزه آبخیز طالقان). چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران مدیریت حوزه های آبخیز، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج. اسفند ۱۳۸۶.
- ۹- سلیمانی کریم، بیات، فاطمه، ۱۳۸۴، به کارگیری داده های ماهواره ای در ارزیابی فرسایش و رسوب در زیر حوضه سفید آب هراز، نشریه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۶، ص ۱۰۷.

- ۱۰- مهدوی محم، ۱۳۸۸، هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، ویرایش اول، چاپ ششم انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۴۰۱.
- ۱۱- مشکوه محمدعلی، ۱۳۷۷، روشی موقت برای ارزیابی و تهیه نقشه بیابان زایی، سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (فائو)، برنامه محیط زیست ملل متحد (یونپ)، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع.
- ۱۲- مختاری، احمد، ۱۳۷۶، بررسی امکان برآزش مدل تجربی پسیاک در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبخیز فاقد آمار با استفاده از سنجش از دور و سیستم GIS و مطالعه موردی حوضه آبخیز سه واقع در شمال اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۱۳- محمدیان شوئیلی محمدحسین، جلیل الدین سرور، ۱۳۸۶، روش‌های برآورد فرسایش و رسوب براساس مدل‌های رایج تجربی (PSIAC, MPSIAC, EPM) در حوضه آبخیز گوهر رود، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، مدیریت حوزه‌های آبخیز.
- 14- Amini, S, Rafiei, B, Khodabakhsh, S, Heydari, M (2010). Estimation of erosion and sediment yield of Ekbatan Damdrainage basin with EPM, using GIS. Iranian Journal of Earth Sciences.
- 15- Amiri, Kazem (2010). Estimate of Erosion and Sedimentation in Semi-arid Basin using Empirical Models of Erosion Potential within a Geographic Information System. Air, Soil and Water Research 2010.
- 16- Fargas, D., Martinez, J. A, and Poch. R.M (1997) Identification Of Critical Sediment.
- 17- Hill J (1993). Land Degradation and Soil Erosion Hazard Mapping in Mediterranean Environment With Operational Earth Observation Satellites. Proceedings of the international symposium of Operationalization of remote sensing, 9, 19-23 April, Enschede, The Netherlands.
- 18- Hughes, A.O. and Prosser, I.P. (2003). Gully and riverbank erosion mapping for the Murray-Darling basin. CSIRO land and water, Canberra, Technical report 3/03.
- 19- Kokh-Sherstha, M., 2001; Soil erosion modeling using Remote Sensing and GIS: A case study of Jhikhu Khola watershed, Nepal, M. Tech. Thesis, Andhra University, 78p.
- 20- Morgan, R.P.C. (1996). Soil erosion and conservation. Second Edition, 198 pp.
- 21- Tangestani, M. H (2001). Integration Geographic Information System in Erosion and Sediment Yield Application Using the Erosion Potential Method of (EPM) Proceeding of the GIS Research UK.
- 22- Tangestani, M.H (2005). Comparison of EPM and PSIAC models in Gis for erosion and sediment yield assessment in a semi arid environment: Afzar catchment, Fars Province, Iran.
- 23- Biraj Singh Thapa, B, Thapa. B, Dahlhaug. O. G (2010). Empirical modelling of sediment erosion in Francis turbines, 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2010. Volume 41, Issue 1, May 2012, Pages 386-391.

