تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۵، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۳ (ص ۵۱۸-۵۰۹)

استفاده از یک مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر توان جریان برای پهنه‌بندی فرسایش و رسوب‌خیزی حوضه‌های آبریز

علی‌رضا شکوهی[1*]، سحر بهشتی[2]

۱. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) قزوین

۲. کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) قزوین

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۱۲- تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۱)

چکیده

تأمین اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌های فرسایش و رسوب از مشکلات عمدهٔ به‌کارگیری این مدل‌هاست. در این پژوهش مدلی ژئومورفولوژیکی معرفی می‌شود که بر مبنای تئوری قدرت جریان توسعه یافته و برای محاسبهٔ پتانسیلِ فرسایشِ منجر به تولیدِ رسوبِ ورودی به رودخانه‌ها از دو پارامتر شیب و مساحت ویژهٔ زهکشی استفاده می‌کند. مدل مزبور فقط با تکیه بر نقشهٔ ارتفاعی رقومی قادر به ناحیه‌بندی حوضه بر اساس حساسیت به فرسایش است. برای ارزیابی نتایج مدل ژئومورفولوژیکی از مدل MPSIAC و برای واسنجی مدل مزبور، به کمک آمار رسوب ثبت‌شده و به روش حد وسط دسته‌ها، آورد رسوبی حوضه تعیین شد. ناحیه‌بندی انجام‌شده توسط دو مدل تطابقی مناسب دارند. از میان عوامل نه‌گانهٔ MPSIAC مجموع عوامل توپوگرافی و فرسایش سطحی بیشترین همبستگی را با مدل ژئومورفولوژیکی نشان می‌دهند. این امر بدان معنی است که نمی‌توان از مدل ژئومورفولوژیکی در مناطقی که فرسایش غالب در آن‌ها فرسایش خندقی و رودخانه‌ای است استفاده کرد.

کلیدواژگان: حساسیت به فرسایش، قدرت جریان، مدل ژئومورفولوژیکی، منحنی سنجهٔ رسوب، MPSIAC

مقدمه

در عصر حاضر منابع آبی و مسائل زیست‌محیطی یکی از پارامترهای مهم در زمینهٔ مدیریت حوضه است که در صورت نادیده‌گرفتن این عرصه پیامدهای مخرب آن دامن‌گیر طبیعت می‌شود که به تبع آن مشکلات عدیده‌ای برای بشر امروزی به‌وجود خواهد آمد. یکی از مسائل مطرح در این زمینه فرسایش و رسوب حوضه‌ای است؛ که در صورت مدیریت غلط می‌تواند خطرهای زیست‌محیطی و اقتصادی همچون کاهش محصول، رسوب در آبراهه‌ها، کاهش ظرفیت سدها، هدررفت خاک، و ... را به وجود آورد (Zanganeh *et al*, 2011). گفتنی است این مسئله در ایران به یک معضل بزرگ فرابخشی تبدیل شده که حل آن نیازمند مدیریت دقیق و اختصاص بودجهٔ لازم و کافی به این بخش است.

برای برآورد فرسایش و رسوب و همچنین تخمین میزان رسوب رسیده به پایین‌دست حوضه در دنیا مدل‌های بسیاری به‌کار می‌رود. در حال حاضر برای برآورد میزان رسوب رودخانه از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری موجود استفاده می‌شود و به کمک روش‌های آماری به برآورد میزان رسوب در حوضه می‌پردازند. اما از آنجا که چنین آمار و اطلاعاتی برای همهٔ رودخانه‌ها وجود ندارد، مهندسان با استفاده از مدل‌سازی این کمیت را ارزیابی می‌کنند. مسئلهٔ مهم دیگر در تشویق محققان به توسعه و استفاده از مدل‌های ریاضی فرسایش و رسوب آن است که استفاده از آمار رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری هیچ نوع اطلاعاتی از جزئیات فرسایش و نقش بخش‌های مختلف حوضه در تولید رسوب ورودی به رودخانه به‌دست نمی‌دهد. بر این اساس، طی سالیان متمادی، به علت پیچیدگی و اهمیت موضوع از یک طرف و توجه به داده‌های در دسترس از طرف دیگر، مدل‌های فرسایش و رسوب متنوعی برای بررسی میزان هدررفت خاک معرفی شده‌اند.

مدل‌های گوناگون اثر عوامل مختلف اعم از اقلیم، خاک، ناهمواری، کاربری اراضی، و ... را برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب درنظر می‌گیرند و بر این اساس از یک‌سری مزایا و معایب در قیاس با یک‌دیگر برخوردارند. در تحقیق حاضر سعی شده است مدلی ارائه شود که با درنظرگرفتن محدودیت‌هایی نظیر کمبود داده، هزینه، و زمان لازم برای تهیهٔ داده‌های مورد نیاز

* نویسندهٔ مسئول: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

برای برآورد فرسایش و رسوب حاصل از آن بتواند فقط به کمک عوامل توپوگرافیکی، که به‌سهولت از روی نقشه‌های رقومی ارتفاعی[1] قابل برآورد هستند، به بررسی وضعیت رسوب‌دهی حوضه بپردازد. نکتهٔ خاصی که در این تحقیق بر آن تمرکز شده است برآورد فرسایش‌پذیری حوضه به طور کلی نیست؛ هدف اصلی مدل‌سازی و شناسایی آن بخش از فرسایش حوضه‌ای است که به حرکت رسوب و ورود آن به رودخانهٔ پایین‌دست منجر می‌شود.

تحقیقات اصلی در زمینهٔ استفاده از اطلاعات ژئومورفولوژیکی به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد. در آن زمان، مدلی ارائه شد که می‌توانست رابطه‌ای بین عامل توپوگرافی و فرسایش ارائه دهد. نتایج حاکی از آن بود که شکل دامنه‌ها، شیب، طول شیب، و هم‌گرایی و واگرایی حوضه نقشی بسیار مهم در تعیین میزان هدررفت کل خاک از حوضه و نشست مجدد آن‌ها بازی می‌کنند. در روش استفاده‌شده، که تحقیقات حاضر نیز بر اساس آن است، از مفهوم قدرت جریان[2] استفاده شده است تا بتوان رابطه‌ای بین توپوگرافی و نحوهٔ گسترش مناطق فرسایش و رسوب پیدا کرد (Moore and Burch, 1986). مدل توسعه‌یافته توسط ایشان به‌خصوص برای مناطق دارای توپوگرافی متنوع کارایی دارد؛ ولی در عین حال به داشتن نقشه‌های رقومی ارتفاعی با توان تفکیک بالا نیز نیازمند است (Mitasova *et al*, 1996). در ادامهٔ مطالعات گذشته، در سال ۱۹۹۲ شاخص فرسایش بررسی شد. یکی از مزایای شاخص به‌دست‌آمده نمایش میزان فرسایش پیش‌بینی‌شده در محیط GIS بود. نتایج این مطالعه نشان داد می‌توان بین فاکتورهای مدل‌های فرسایش و رسوب فاکتوری را برگزید که بیشترین تأثیر را در حمل مواد فرسایش‌یافته دارد. به این وسیله می‌توان بر اساس شاخص LS از رابطهٔ جهانی هدررفت خاک شاخصی را ارائه کرد که با میزان فرسایش حوضه رابطه‌ای معنادار داشته باشد. این شاخص بدون بعد است و رابطه‌ای غیر خطی بین شیب و دبی ویژه برقرار می‌کند که به کمک آن می‌توان مناطق حساس به فرسایش منجر به تولید رسوب را شناسایی کرد. این شاخص قابل پردازش در محیط GIS است و می‌تواند در سه بعد نیز گسترش پیدا کند (Moore and Wilson, 1992).

در ادامهٔ تحقیقات انجام‌شده، فاکتور LS در رابطهٔ USLE و RUSLE مقایسه و بررسی شد. نتایج نشان داد اهمیت این شاخص در رابطهٔ RUSLE بیشتر است (Moore and Wilson, 1992). مرور پیشینهٔ این مبحث نشان می‌دهد از روش‌های مبتنی بر شاخص حمل رسوب[3] و به‌خصوص استفاده از یک شاخص توپوگرافیکی در ارزیابی رسوب رسیده به پایین‌دست حوضه چندان بهره‌برداری نشده است.

با توجه به استفاده از مدل MPSIAC برخی تجربیات در زمینهٔ استفاده از این مدل بیان می‌شود. در حوضهٔ آبخیز تنگ‌گشت از مدل‌های تجربی EPM و MPSIAC استفاده شد و پس از تقسیم منطقه به چهار زیرحوضه داده‌های مورد نیاز، که عبارت بودند از لایه‌های عوامل فرسایش در محیط GIS، تهیه شدند. این مطالعه نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر مدل MPSIAC نسبت به مدل EPM است (Rastgoo *et al*, 2012). در تحقیقی دیگر دو مدل EPM و MPSIAC مقایسه شدند و به کمک آن‌ها میزان رسوب تولیدی در حوضه برآورد شد. نتایج نشان داد روش MPSIAC مناسب‌تر است (Khodabakhsh *et al*, 2010). از دیگر تحقیقاتی که اخیراً در زمینهٔ ارزیابی مدل‌های PSIAC و MPSIAC صورت گرفته است می‌توان به کار Mansouri *et al* اشاره کرد که میزان رسوب حوضهٔ تحت مطالعه را به وسیلهٔ دو مدل و به کمک داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی برآورد کردند. نتایج حاکی از آن بود که هر دو روش مناسب‌اند (Mansouri *et al*, 2012). در تحقیقی دیگر، برای برآورد فرسایش و رسوب در حوضهٔ کسیلیان به کمک یک روش ویژهٔ ژئومورفولوژیکی مبتنی بر مدل MPSIAC، نتایج این روش در حوضه مناسب و در عین حال غیر دقیق شناخته شد. علت این عدم دقت نیز استفاده از امتیازدهی کیفی و تبدیل داده‌های کیفی به کمّی اعلام شد؛ که باعث ایجاد خطا می‌شود (Mohseni and Razzaghian, 2013).

از آنجا که رسوب ورودی به رودخانه مسئله‌ای متفاوت با برآورد میزان فرسایش در حوضهٔ بالادست است، در مدلی که در این مقاله معرفی می‌شود از معیار شاخص حمل رسوب در سطح حوضه استفاده شد. مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر در مقایسه با سایر تحقیقات انجام‌شده در زمینهٔ فرسایش و رسوب استفاده از شاخص حمل رسوب برای تخمین و ارزیابی و متعاقب آن پهنه‌بندی حوضه از منظر فرسایش منجر به تولید رسوب با استفاده از اطلاعات ژئومورفولوژیکی قابل استخراج از نقشه‌های DEM است. در این زمینه و به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل ژئومورفولوژیکی از مدل فرسایش و رسوب شناخته‌شدهٔ

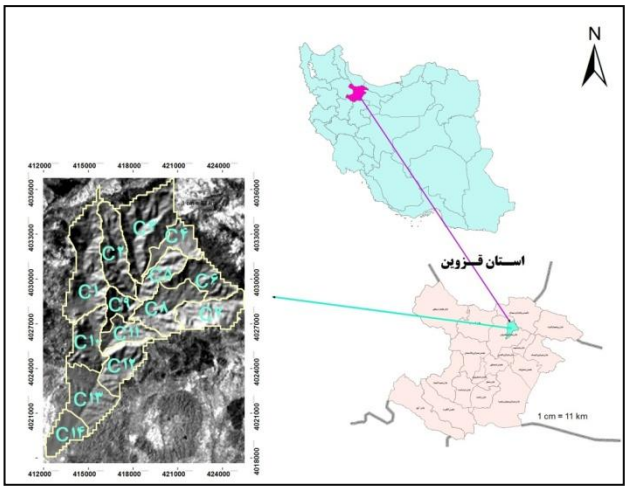
1. Digital Elevation Model; DEM
2. Stream Power
3. Sediment Transport Index; STI

MPSIAC برای مقایسهٔ نتایج استفاده شد. در این حالت برای واسنجی مدل MPSIAC از آمار رسوب اندازه‌گیری‌شده در منطقهٔ مطالعاتی و روش منحنی سنجه (روش میانگین دسته‌ها) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

حوضهٔ مطالعه‌شده

حوضهٔ مطالعاتی این تحقیق حوضهٔ آبخیز باراجین بود که با مساحت ۱۰۸۰۹٫۷۶ هکتار در شمال شرقی استان قزوین قرار دارد. موقعیت این حوضه در شکل ۱ قابل ملاحظه است.



شکل ۱. موقعیت حوضهٔ باراجین و زیرحوضه‌های آن

حوضهٔ باراجین یک ایستگاه هیدرومتری در پایین‌دست حوضه دارد. این ایستگاه با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح آزاد دریاها در سال ۱۳۴۴ تأسیس شده و در ۵۰ درجه و ۲ دقیقه و ۴۴ ثانیهٔ شرقی و ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و ۵۹ ثانیهٔ شمالی واقع است. در این ایستگاه اطلاعات دبی، بارندگی، و دما به صورت روزانه و اطلاعات رسوب و کیفیت رودخانهٔ باراجین به صورت ادواری برداشت می‌شود. به کمک داده‌های رسوب همین ایستگاه هیدرومتری مقدار رسوب حوضه که به رودخانه می‌رسد برآورد شد.

منحنی سنجهٔ حد وسط دسته‌ها

برداشت آمار رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری بیشتر در دبی‌های پایه انجام می‌گیرد (Jansson, 1996). در شرایط طغیان و مواقع سیلابی، علاوه بر اینکه تعداد نمونه‌برداری کمتر است، آمار، به علت مشکلات نمونه‌برداری در زمان طغیان، دقت کافی ندارد (Zorratipour *et al*, 2007). از این رو، برای برقراری رابطهٔ صحیح بین دبی رسوب و دبی رودخانه از رگرسیون آماری استفاده می‌شود تا منحنی سنجهٔ رسوب رودخانه تولید شود (Horowits, 2002; Varvani *et al*, 2008). همان‌طور که در مقدمه گفته شد، در این تحقیق برای تعیین آورد رسوب حاصل از فرسایش حوضه روش حد وسط دسته‌ها، که Jansson (1996) آن را توسعه داده است، به‌کار رفت. گفتنی است از دسته‌بندی احتمالاتی دبی برای وزن‌دهی به دبی‌ها استفاده شد. این روش، به جای استفادهٔ مستقیم از منحنی سنجه، با مقادیر دبی و وزن احتمالاتی داده (Asadi *et al*, 2012) و عملاً با گرفتن امید ریاضی از منحنی سنجه متوسط آورد رسوب را برآورد می‌کند.

مدل MPSIAC

مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب طیف وسیعی از مدل‌های تجربی و فیزیکی و جعبه‌های سیاه و سفید تا خاکستری را تشکیل می‌دهند و از میان آن‌ها می‌توان USLE، FAO، Musgrave، فورنیه، مورگان، EPM، و MPSIAC را نام برد. با توجه به شرایط حوضهٔ باراجین، که در ایامی از سال دمای منطقه به زیر صفر نزول پیدا می‌کند، در این تحقیق از روش MPSIAC استفاده شد.

مدل MPSIAC کلاً برای تخمین فرسایش خاک و تولید رسوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته و در آن از نه عامل مختلف برای محاسبه و برآورد رسوب استفاده شده است. این عوامل شامل زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب‌وهوا، رواناب، پستی‌وبلندی[1]، پوشش زمین[2]، استفاده از زمین[3]، وضعیت فرسایش[4]، و فرسایش رودخانه‌ای[5] است. هر یک از عوامل نه‌گانه دارای محدودهٔ مشخصی از نمرهٔ تأثیری است که به وسیلهٔ آن می‌توان تأثیر این عوامل را به صورت کمّی بیان کرد (Refahi, 2003).

عامل LS در رابطهٔ جهانی خاک

رابطهٔ جهانی خاک (USLE) معادله‌ای است تجربی که عملاً برای محاسبهٔ تلفات خاک در اراضی کشاورزی توسعه یافته است. تاکنون صورت‌های مختلفی از این معادله برای به‌کارگیری آن در GIS ارائه شده است. در این معادله تأثیر توپوگرافی بر فرسایش از طریق فاکتور LS شبیه‌سازی می‌شود که در واقع بیانگر این واقعیت است که میزان فرسایش با افزایش طول و زاویهٔ شیب زیاد می‌شود. رابطهٔ استفاده‌شده برای فاکتور LS به

1. Topography
2. Ground Cover
3. Land use
4. UP land Erosion
5. Channel erosion and sediment transport

صورت رابطهٔ ۱ است (Wischmeier and Smith, 1978):

(رابطهٔ ۱)

$$Ls=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{t}.(65.4\sin^{2}\beta+4.65\sin\beta+0.0654)$$

λ تصویر افقی طول شیب (m)، t ضریبی وابسته به مقدار شیب، و β زاویهٔ شیب (درجه) است. این عامل، معرف اثر توپوگرافی بر فرسایش، به منظور اعمال اثر تقعر و تحدب و به طور کلی انحنای زمین در رابطهٔ RUSLE اصلاح شده است. در حالی که هر دو رابطهٔ USLE و RUSLE فقط به محاسبهٔ فرسایش در امتداد خطوط جریان می‌پردازند (Mitasova *et al*, 1996) نمی‌توانند اثر هم‌گرایی یا واگرایی جریان را، که از نظر هیدرولیکی به‌شدت بر میزان تلاطم جریان و لذا قدرت فرسایش جریان مؤثرند، ببینند.

روش ژئومورفولوژی

اساس مطالعات انجام‌شده در این تحقیق مدلی ژئومورفولوژیکی است که Moore *et al* (1992) ارائه کردند. همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، بنیان این روش استفاده از نظریهٔ توان جریان است که در آن به کمک اطلاعات پایهٔ توپوگرافی می‌توان مناطق مستعد به فرسایش و تولید رسوب رودخانه را نمایش داد. توان جریان، که در واقع معرف توانایی و پتانسیل کار جریان آب بر زمین است، بیانگر توانایی آب از نظر پهن‌کردن مسیر، شکافتن، و هموارکردن مسیر برای حمل رسوب است. بر این اساس و با دیدگاهی که در این تحقیق وجود دارد، پتانسیل جریان آب در مسیر در واقع توانایی بالقوهٔ جریان آب در فرسایش و ترسیب مواد در مسیر خود است.

نظریهٔ Stream Power می‌تواند به کمک عوامل ژئومورفولوژیکی پتانسیل حرکتی هر قطرهٔ آب را بررسی و پیش‌بینی کند. منشأ این مدعا نیز این حقیقت مسلم است که در هر نقطه از حوضهٔ آبریز حرکت آب به شیب زمین و جهت این شیب وابستگی مستقیم دارد. در واقع آب در محلی که شیب بیشتری دارد حرکت سریع‌تری خواهد داشت و این حرکت منجر به فرسایش خواهد شد. بر این اساس، نقشه‌های توپوگرافی، که معرف رقوم ارتفاعی هر نقطه از حوضه‌اند، فقط دادهٔ مورد نیاز برای اجرای این مدل‌اند. نقشه‌های رقومی این قابلیت را دارند که از طریق آن‌ها نقشه‌های شیب، مساحت قابل زهکشی، و مسیرهای جریان آب را تولید کرد. گفتنی است این روش فقط پتانسیل بالقوهٔ حوضه را برای مطالعات اولیه به‌دست می‌دهد. زیرا هرچند عامل شیب فاکتوری اصلی در فرسایش و رسوب است، یگانه فاکتور دخیل در این امر نیست و پس از اجرای این مدل و تخمین و موقعیت‌یابی اولیه لازم است مقدار فرسایش با درنظرگرفتن سایر عوامل مؤثر در فرسایش در واحدهای کوچک کاری محاسبه شود.

عامل توپوگرافی بر اساس توان جریان

تحقیقات نشان می‌دهد می‌توان از رابطهٔ عمومی حمل رسوب برای شبیه‌سازی اثر توپوگرافی بر فرسایش استفاده کرد. رابطهٔ عمومی حمل رسوب به صورت رابطهٔ ۲ است (Julien and Simon, 1985):

$$q_s=\Phi q^{m}(\sin\beta)^{n}i^{\delta}(1-\frac{\tau_0}{\tau})^{\varepsilon}$$ (رابطهٔ ۲)

q_s دبی رسوب بر حسب Kg/m.s، q دبی جریان بر حسب m^3/m.s، β زاویهٔ شیب، i شدت رگبار بر حسب m/s، τ و τ_0 به‌ترتیب تنش برشی بحرانی و تنش برشی بر حسب پاسکال، و Φ و n و m و n و δ و ε پارامترهای تجربی یا دارای مبنای فیزیکی‌اند.

در رابطهٔ حمل رسوب اثر توپوگرافی عملاً به وسیلهٔ مؤلفه‌های $q^{m}(\sin\beta)^{n}$ بیان می‌شود. حال اگر فرض شود بارش مازاد به صورت یکنواخت بر حوضه ببارد و جریان سطح‌الارضی[1] به حالت ماندگار[2] رسیده باشد، دبی جریان (q) را می‌توان با رابطهٔ ۳ به‌دست آورد:

$$q=Ai_e$$ (رابطهٔ ۳)

A مساحت ویژهٔ زهکشی، یعنی مساحت بالادست مشارکت‌کننده در تأمین جریان در واحد عرض بر حسب m2/m ، و i_e شدت بارش مؤثر بر حسب m/s است.

با داشتن رابطهٔ ۳ می‌توان پذیرفت که در رابطهٔ ۲ عامل جریان به واسطهٔ مرتبط‌بودن با مساحت ویژهٔ زهکشی می‌تواند معرف اثر توپوگرافی بر فرسایش و لذا حمل رسوب باشد. مساحت ویژهٔ زهکشی دارای این خاصیت مهم است که می‌تواند به‌خوبی واگرایی و هم‌گرایی جریان را نشان دهد. حال اگر دو عامل معرف اثر توپوگرافی در رابطهٔ ۲ به صورت بدون بعد نوشته شوند، می‌توان ظرفیت حمل رسوب بدون بعد را با رابطهٔ ۴ به‌دست آورد (Moore and Burch, 1986):

$$T=\left(\frac{A}{22.13}\right)^{m}\left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{n}$$ (رابطهٔ ۴)

حال اگر در رابطهٔ ۴ مساحت ویژهٔ زهکشی برابر m^2/m A=۲۲/۱۳ و شیب معادل ۹ درصد باشد، مقدار T معادل واحد

1. Overland flow
2. Steady State

می‌شود و بدان اصطلاحاً قدرت جریان واحد[1] می‌گویند که عملاً همان نقش LS را در رابطهٔ جهانی فرسایش خاک ایفا می‌کند، با این تفاوت که می‌تواند اثر هم‌گرایی و واگرایی جریان را نیز ببیند.

شاخص حمل رسوب

اساس کار مدل ژئومورفولوژیکی پیشنهادی رابطهٔ ۴ است که با دادن ضرایبی معین به پارامترهای m و n در رابطهٔ مزبور شاخصی به نام شاخص حمل رسوب[2] را مطابق رابطهٔ ۵ به‌دست می‌دهد:

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.56}\left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.22} \quad \text{(رابطهٔ ۵)}$$

اعداد ۰٫۵۶ و ۱٫۲۲ مربوط به عامل LS در رابطهٔ جهانی فرسایش‌اند. در شرایطی که جریان کم‌عمق فرض شود، توان این معادله به‌ترتیب به ۰٫۹ و ۱٫۰۵ تغییر می‌یابد (Moore *et al*, 1992). A_s در GIS از روی نقشه‌های تجمع جریان[3] با درنظرگرفتن جهت جریان حاصل از اعمال الگوریتم D_8 قابل محاسبه است (Lindsay, 2010). ß زاویهٔ شیب منطقه است که به کمک نقشهٔ شیب تهیه می‌شود و می‌توان مقدار آن را به‌دست آورد. بر این اساس می‌توان گفت این شاخص در واقع آثار توپوگرافی را بر هدررفت خاک و به عبارت دیگر پتانسیل فرسایش را در هر نقطه از حوضه برآورد می‌کند. البته برآورد این شاخص از فرسایش در مسیر جریان‌های اصلی معقول نیست و باید از محاسبات حذف شود (Mitasova *et al*, 1996).

در حالی که روش MPSIAC از ۹ فاکتور برای تخمین فرسایش و رسوب استفاده می‌کند، با توجه به ساختار رابطهٔ ۵ می‌توان گفت مزیت بزرگ مدل ژئومورفولوژیکی، نسبت به دیگر روش‌های برآورد پتانسیل فرسایش و رسوب، سهولت محاسبات آن است که فقط به کمک یک DEM در محیط GIS قابل اجراست.

یافته‌ها و بحث

تعیین رسوب ورودی به رودخانه با استفاده از منحنی سنجه

در مرحلهٔ اول بین دبی رودخانهٔ باراجین و رسوب رابطهٔ رگرسیونی برقرار شد که نتیجه در شکل ۲ می‌آید.

در روش حد وسط دسته‌ها، به دبی‌های با احتمال رخداد بالا ارزش بیشتری داده شده و بر این اساس دبی‌های جریان با یک نمو معین به تعدادی دسته تقسیم و برای دبی متوسط هر دسته دبی رسوب متوسط اندازه‌گیری‌شدهٔ همان دسته از روی شکل ۲ تعیین می‌شود (Alizade, 2007). با توجه به نتایج روش حد وسط دسته‌ها، میزان رسوب روزانهٔ رودخانهٔ باراجین ۵۸ تن برآورد شد.

نتایج اجرای مدل MPSIAC برای برآورد رسوب حوضه

برای برآورد پارامترهای مدل MPSIAC به اطلاعات اقلیمی، پوشش گیاهی، و نقشه‌های زمین‌شناسی و خاک‌شناسی نیاز است (Feiznia, 1995). با تهیهٔ این منابع و همچنین بازدیدهای محلی گسترده، به منظور برآورد بهتر عوامل نه‌گانهٔ مدل، حوضهٔ باراجین به ۱۴ زیرحوضه تقسیم شد. محاسبات روش MPSIAC برای هر یک از زیرحوضه‌ها به طور مجزا انجام شد و در نهایت میزان رسوب برای کل حوضه به‌دست آمد. رسوب برآوردشده توسط مدل عدد ۱٫۸۰۷ تن بر هکتار بر سال معادل ۵۳٫۶ تن بر روز است که در مقایسه با نتایج آمار ایستگاه هیدرومتری پذیرفتنی است. می‌توان این اختلاف را به فرسایش رودخانه‌ای نسبت داد که اصولاً نمی‌تواند در محاسبات MPSIAC دیده شود.

نتایج اجرای مدل ژئومورفولوژیک (استفاده از شاخص حمل رسوب STI)

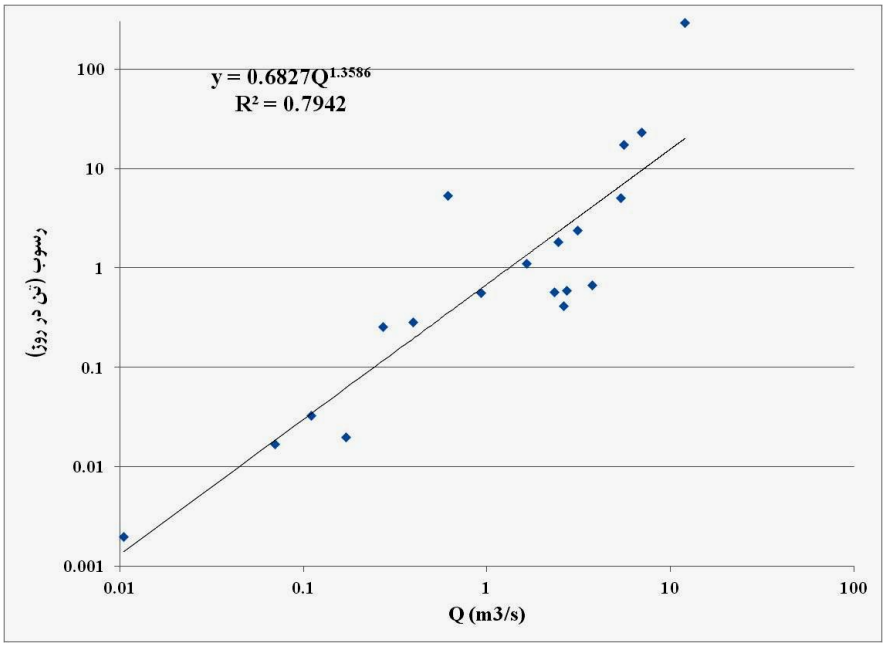
پس از واردکردن لایهٔ DEM به محیط GIS، لایه‌های مورد نیاز شامل جهت جریان، تجمع جریان، مساحت ویژه، و شیب حوضه تهیه و سپس از طریق رابطهٔ STI لایهٔ شاخص حمل رسوب (شکل ۳) استخراج می‌شود. نقشه‌ای که در شکل ۳ می‌آید نقشهٔ پتانسیل فرسایش در حوضهٔ باراجین است.

همان‌طور که در شکل ۳ آمده، هر نقطه از حوضه دارای یک مقدار عددی است که عملاً بیان‌کنندهٔ درجهٔ حساسیت آن نقطه به فرسایش است. با جمع این مقادیر عددی، میزان حساسیت هر منطقه (در اینجا زیرحوضه) به فرسایش به‌دست خواهد آمد.

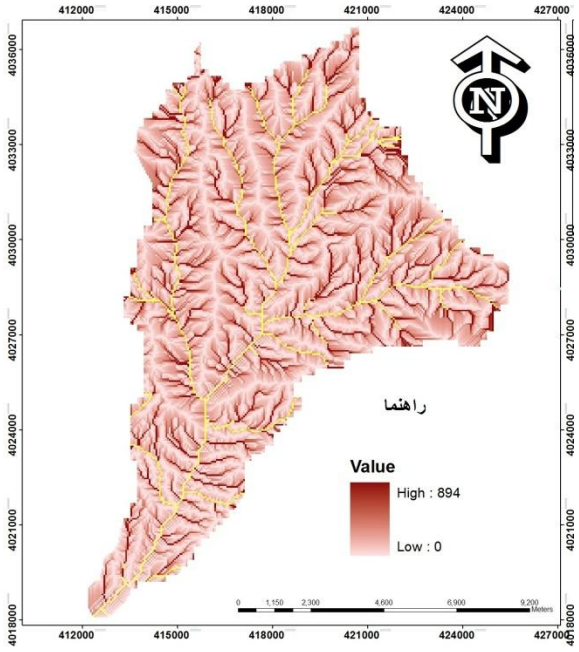
با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در مرحلهٔ قبل، تحت عنوان حساسیت به فرسایش، می‌توان نسبت به اولویت‌بندی حوضه‌ها از نظر حساسیت به فرسایش و تولید رسوب اقدام کرد. در واقع در این حالت زیرحوضه‌هایی که دارای مقادیر بالاتری هستند نسبت به فرسایش منجر به تولید رسوب حساس‌ترند. شکل ۴ اولویت‌بندی حوضهٔ باراجین را از نظر حساسیت به فرسایش نشان می‌دهد. در این شکل حوضهٔ با اولویت ۱ کمترین

1. Unit Stream Power
2. Sediment Transport Index
3. Flow Accumulation

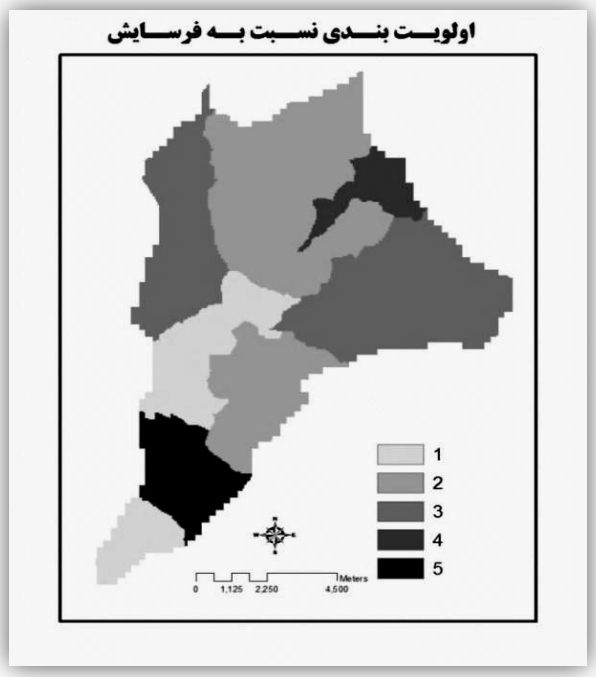
مشکل و حوضهٔ شمارهٔ ۵ بیشترین حساسیت را به فرسایش دارند. بررسی میدانی به‌عمل‌آمده در حوضهٔ باراجین تقریباً نتایج به‌دست‌آمده را تأیید می‌کند. منطقهٔ با اولویت ۵ در محدوده‌ای قرار دارد که به سبب وجود دانشگاه آزاد اسلامی و دفاتر دانشگاه بین‌المللی امام خمینی بیشترین تعرض به پوشش گیاهی و تغییر کاربری را داشته است. منطقهٔ با اولویت ۴ در نقطه‌ای از حوضه قرار دارد که دچار فرسایش خندقی شدید است. این منطقه از خاک‌های سست تشکیل شده و پوشش گیاهی مناسبی ندارد و در عین حال شیب اراضی در این ناحیه نسبتاً زیاد است. دو منطقهٔ دارای اولویت ۳ آبراهه‌های فرعی متعددی دارد که آمادگی زمین را برای فرسایش سطحی نشان می‌دهد. ولی در مقایسه با منطقهٔ دارای اولویت ۴ از پوشش گیاهی مناسب‌تری برخوردار است.



شکل ۲. منحنی سنجهٔ دبی‌ـ رسوب رودخانهٔ باراجین



شکل ۳. نقشهٔ پتانسیل فرسایش حوضهٔ آبخیز باراجین



شکل ۴. اولویت‌بندی زیرحوضه‌های باراجین در برابر فرسایش بر اساس مدل ژئومورفولوژیک

ارزیابی نتایج مدل ژئومورفولوژیک با استفاده از مدل MPSIAC

با استفاده از نتایج مدل MPSIAC در محاسبهٔ آورد رسوبی حوضهٔ باراجین، فرض بر آن است که می‌توان از آن برای ارزیابی نتایج مدل ژئومورفولوژیکی در زون‌بندی مناطق حساس به فرسایش استفاده کرد. گفتنی است روش MPSIAC فرسایش خندقی و رودخانه‌ای را نیز در میان عوامل نه‌گانهٔ خود دارد؛ حال آنکه روش ژئومورفولوژیکی فقط به عوامل منجر به فرسایش سطحی حوضه می‌پردازد. ولی با توجه به اینکه مهم‌ترین عامل فرسایش حوضه‌ای در باراجین می‌تواند فرسایش سطحی باشد، نتایج این دو مدل را مقایسه می‌کنیم. بدیهی است موفقیت روش ژئومورفولوژیکی در برآورد حساسیت حوضه به فرسایش، با توجه به پارامترهای اندک استفاده‌شده و سرعت عمل آن، می‌تواند راهگشای مطالعات مرحلهٔ اول فرسایش و رسوب با هدف مدیریت حوضه‌های آبریز باشد و از این نظر بسیار درخور اهمیت است. در روش MPSIAC از فرسایش ویژه بر حسب تن در روز برای تعیین مناطق حساس به فرسایش استفاده شد.

در شکل ۵ اولویت‌بندی حوضهٔ آبریز باراجین با استفاده از هر دو مدل MPSIAC و ژئومورفولوژیکی ملاحظه می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود تطابق بسیار مناسبی میان دو روش در تشخیص اولویت‌های ۴ و ۵ وجود دارد. بیشترین اختلافی که میان دو روش دیده می‌شود منطقهٔ انتهایی حوضهٔ باراجین است که در آنجا بیش از هر چیز فرسایش رودخانه‌ای غالب است و مطابق آنچه گفته شد روش ژئومورفولوژیک قادر به ارزیابی آن نیست. در مقابل، تناسب کلی و تغییرات اولویت‌بندی در روش ژئومورفولوژیکی با مشاهدات عینی بیشتر منطبق است و تغییرات در این مدل آهنگ بهتری دارد؛ مثلاً در روش MPSIAC در وسط و کنار مناطق دارای اولویت ۱ و ۲ منطقه‌ای با اولویت ۵ وجود دارد که در روش ژئومورفولوژیک دیده نمی‌شود که با واقعیت‌های حوضه هم منطبق است.

هر دو روش MPSIAC و مدل ژئومورفولوژیکی دارای ۵ اولویت‌اند که موقعیت آن‌ها در شکل ۵ می‌آید. مساحت مناطق دارای اولویت‌های پنج‌گانه در هر دو روش محاسبه شده و در جدول ۱ می‌آید.

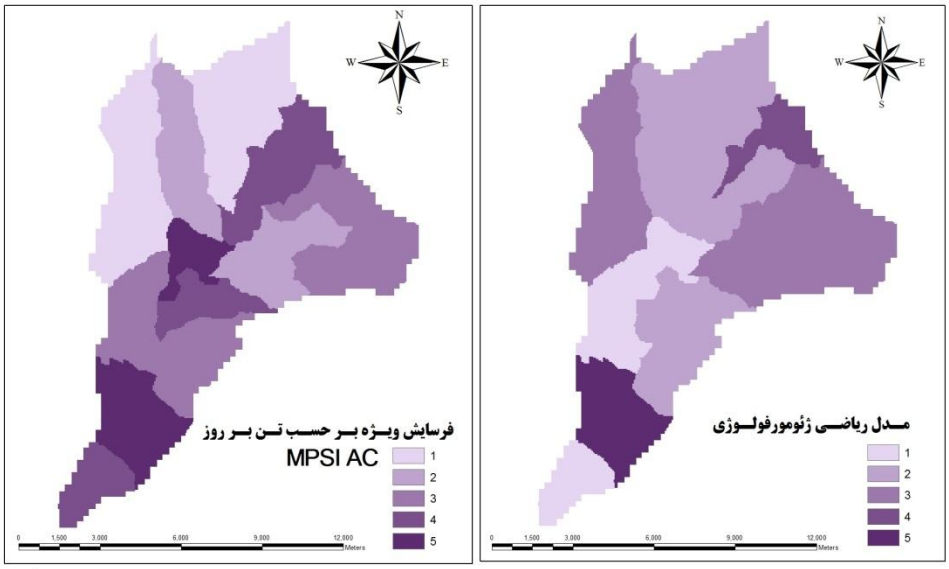
جدول ۱. مساحت محدود به مناطق اولویت‌بندی‌شدهٔ روش‌های MPSIAC و ژئومورفولوژیکی

نمرهٔ اولویت	مساحت (ha)	
	فرسایش ویژه MPSIAC (تن بر روز)	مدل ژئومورفولوژیک
۱	۱۷٫۳۰۳۹	۲۹٫۱۶۷۵
۲	۸۳٫۱۸۶۸	۴۳٫۴۲۳۳
۳	۳۰۲٫۳۰۲۳	۸۳٫۳۹۵۹
۴	۹۲۷٫۲۰۶۰	۷۳٫۵۲۴
۵	۵۲۷٫۸۱۷	۴۸٫۴۱۶

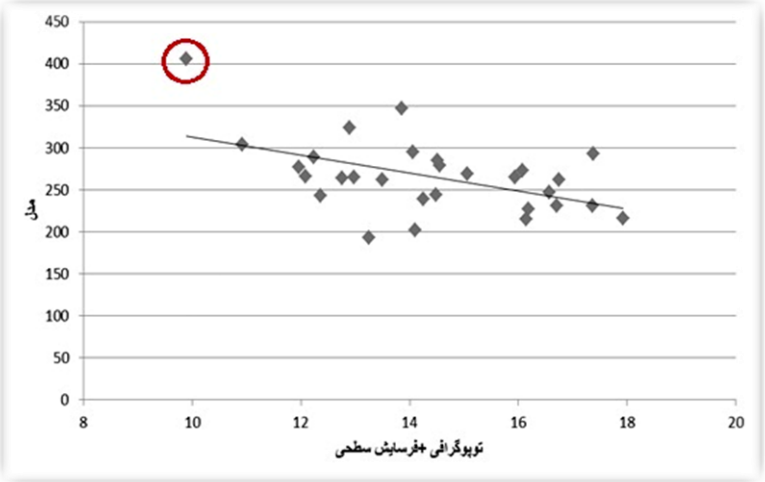
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این نتایج دقیقاً بر هم منطبق نیستند؛ مثلاً مساحت منطقهٔ دارای اولویت ۵ در روش MPSIAC دوبرابر روش ژئومورفولوژیکی به‌دست آمده است. نکتهٔ جالب توجه آن است که مجموع مساحت مناطق دارای اولویت ۳ به بالا در دو روش تقریباً نزدیک به هم است. بر اساس نتایج این مقایسه و بررسی‌های صحرایی به‌عمل‌آمده، می‌توان گفت مدل ژئومورفولوژیکی روشی مناسب جهت برآوردهای اولیه در حوضه و اولویت‌بندی آن برای مدیریت فرسایش و رسوب است.

برداشت اولیهٔ این تحقیق آن است که روش ژئومورفولوژیک با توجه به آنکه از پارامترهایی مانند مساحت ویژهٔ زهکشی و شیب زمین استفاده می‌کند معرف فرسایش سطحی حوضه است. بنابراین با برخی پارامترهای مدل MPSIAC رابطهٔ نزدیک‌تری دارد و عملاً می‌تواند به ارزیابی اهمیت پارامترهای مدل MPSIAC در برآورد فرسایش حوضه‌ای کمک کند. در واقع می‌توان به جای برقراری ارتباط بین عوامل نه‌گانهٔ مدل MPSIAC با مدل ریاضی ژئومورفولوژیکی رابطهٔ میان چند پارامتر خاص را بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند پارامترهای توپوگرافی و فرسایش سطحی مدل MPSIAC می‌تواند ارتباطی معنادار با مدل ژئومورفولوژیک برقرار کند.

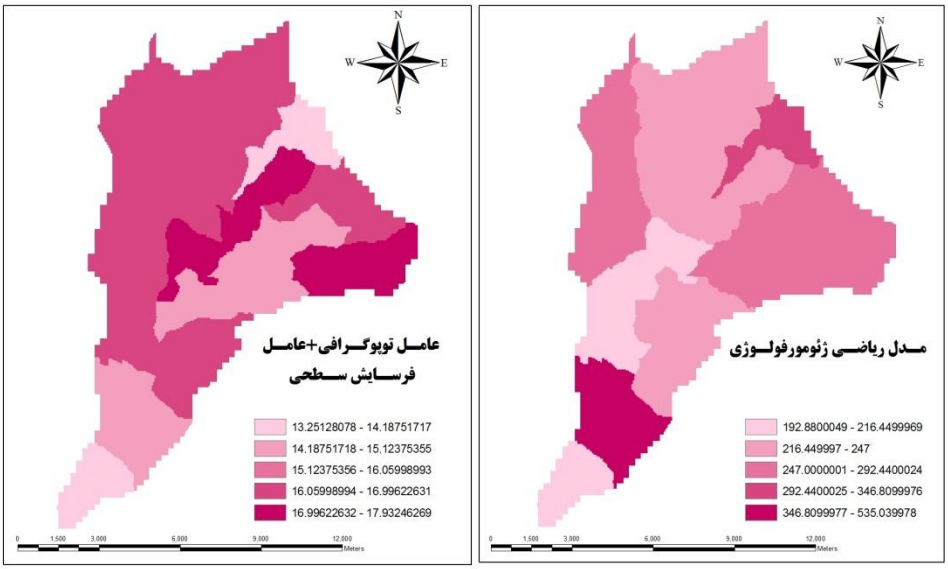
اگر از دادهٔ پرتی که در شکل ۶ آمده صرف‌نظر شود، ضریب تعیین رابطهٔ رگرسیونی میان نتایج مدل ژئومورفولوژیکی و دو عامل فرسایش و توپوگرافی معادل ۰/۷۵ به‌دست خواهد آمد. شکل ۷ نشان‌دهندهٔ نزدیکی ناحیه‌بندی حوضه از نظر مجموع دو عامل توپوگرافی و فرسایش سطحی MPSIAC و حساسیت به فرسایش حاصل از مدل ژئومورفولوژیکی است.



شکل ۵. مقایسهٔ اولویت‌بندی دو مدل ژئومورفولوژی و MPSIAC



شکل ۶. رابطهٔ بین مجموع عوامل توپوگرافی و فرسایش سطحی MPSIAC و مدل ژئومورفولوژی



شکل ۷. مقایسهٔ مجموع عوامل توپوگرافی و فرسایش سطحی و نتیجهٔ مدل ژئومورفولوژیکی در ناحیه‌بندی حوضه از نظر حساسیت به فرسایش

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد یک مدل ژئومورفولوژیکی در برآورد حساسیت به فرسایشِ منجر به تولید رسوب رودخانه‌ای در سطح حوضه معرفی و ارزیابی شد. مدل مزبور فقط بر اساس پارامترهای شیب حوضه و مساحت ویژهٔ زهکشی عمل می‌کند و محاسبات اشاره‌شده را در محیط GIS انجام می‌دهد. این مدل با استفاده از نقشه‌های شبکه‌بندی‌شده برای تأمین اطلاعات مورد نیاز خود فقط متکی بر استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاعی (DEM) است و از این لحاظ مزیت‌های ویژه‌ای در مقایسه با سایر مدل‌های ریاضی موجود دارد. برای صحت‌سنجی عملکرد مدل ژئومرفولوژیکی از یک مدل شناخته‌شده، یعنی MPSIAC، استفاده شد. با تأمین اطلاعات مورد نیاز برای عوامل نه‌گانهٔ مدل مزبور در محیط GIS، برای برآورد بار رسوبی حاصل از فرسایش حوضهٔ مورد مطالعه اقدام شد. برای واسنجی مدل MPSIAC از آمار ایستگاه هیدرومتری موجود در انتهای حوضهٔ مطالعاتی استفاده شد. از مقایسهٔ نتایج حاصل از MPSIAC و متوسط رسوب روزانه که از طریق روش وسط دسته‌ها محاسبه شد برای واسنجی این مدل استفاده شد. در این تحقیق نشان داده شد که می‌توان با استفاده از نتایج مدل ژئومورفولوژیکی حوضه را بر حسب حساسیت به فرسایش و اولویت‌گذاری اولیه برای حفاظت ناحیه‌بندی کرد. بررسی مناطق حساس به فرسایش حاصل از اعمال مدل MPSIAC تطابق خوبی با نتایج مدل ژئومورفولوژیکی نشان داد. در همین ارتباط با توجه به نوع پارامترهای استفاده‌شده در مدل ژئومورفولوژیکی و یافتن محدودیت‌های احتمالی کاربرد این مدل بین پارامترهای مختلف MPSIAC و نتایج مدل مزبور رابطهٔ رگرسیونی بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین همبستگی میان مدل مزبور و عوامل نه‌گانهٔ MPSIAC در مورد مجموع عوامل توپوگرافی و فرسایش سطحی دیده می‌شود. این امر گویای آن است که از مدل مزبور نمی‌توان در مناطقی که دارای فرسایش خندقی یا رودخانه‌ای گسترده هستند استفاده کرد.

REFERENCES

Alizadeh, A. (2006). *Principles of Applied Hydrology*. (19th ed.). Ferdowsi University of Mashhad. In Farsi.

Asadi, F. Z., Fazlavvali, R., and Emadi, A. R. (2012). Extraction and Selection of Proper Relationship to Estimate Suspended Sediments in Rivers. In: proceeding of *11th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction*.18-20 Feb.Kerman, Iran, pp.1-9.

Feiznia, S. (1995). Rocks resistant to erosion in Iran different climates. *Journal of Iran Natural Resources*, 47, (95-116). (In Farsi)

Horowits, A. J. (2002). The use of rating curves to predict suspended sediment concentration: a matter of temporal resolution. Turbidity and other sediment surrogates workshop, U.S. Geological Survey, GA. 770-903.

Jansson, M. B. (1996). Estimating Sediment Rating Curves of the Reventazon River at palomo using logged mean loads within dischege classes, *Journal of Hydrology*, 183, 227-241.

Julien, P. Y. and Simons, D. B. (1985). Sedimemt transport capacity of overlandfow. *Tranaction of*

the American Society of agricultural engineers, 28, 755-762.

Khodabakhsh, S., Mohammadi, A., Rafie, B., and BozorgZadeh, I. (2010). Comparison of erosion and sediment yield estimation in Sezar subbasin (Dez drainage basin) by MPSIAC and EPM empirical methods, using GIS, *Iranian Journal of Geology*, 12, 51-61.

Lindsay, J. (2010). Whitebox Geospatial Analysis Tools, project Lead Developer, The Centre for Hydrogeomatics, The university of Guelph, Guelph, Canada, Tutorial3: Streams and Watershed Extraction.

Mansouri Daneshvar, M. R. and Bagherzadeh, A. (2012). Evaluation of sediment yield in PSIACand MPSIAC models by using GIS at Toroq Watershed, Northeast of Iran, Front. *Earth Sci*., 6(1), 83-94.

Mitasova, H., Hofierk, J., Zlocha, M., and Iverson, L. (1996). Modelling Topographic Potential For Erosion And Deposition Using GIS. *INT.J.Geographical Information System*, 10(5), 629-641.

Mohseni, B. and Razaghian, H. (2013). Estimation of soil erosion and sediment production in Basin of Kasilian, Using Geomorphological method based on MPSIAC model in GIS environment. *Journal of the Iran Society of Irrigation and Water*, 18(2), 49-57. (In Farsi)

Moore, D. and Wilson, J. (1992). Length-Slop factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simolified method of estimation. *Soil and Water Cons*., 47(5), 423-428.

Moore, I. D. and Burch, G. J. (1986). Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *American Society of Agricultural Engineers*, 1, 1624-1640.

Moore, I. D., Wilson, J. P., Bozeman, Ciesiolka, C. A. and Toowoomba. (1992). Soil Erosion Prediction and GIS: Linking Theory and Practice., 2-11 June, Taiyuan, Shanxi Province, China

Rastgoo, S., Ghahraman, B., Sanei Nejad, H., Davari, K., and Khodashenas, S. R. (2006). Estimation of Erosion and Sedimentation of Tang-e-Kenesht Basin with Empirical Models of MPSIAC and EPM Using GIS. *JCPP*, 10 (1), 91-105. (In Farsi)

Refahi, H. (2003). *Water erosion and its control*.Tehran University Press. (In Farsi)

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*. Agriculture handbook No. 537. Washington D.C. U.S. departmet of agriculture.

Varvani, J., Najafi Nejad, A., and Mirmoini Karahroudi, A. (2008). Improving of sediment rating curve using minimum variance unbiased estimator. *J. Agric. Sci. Natur. Resour*., 15(1), 1-13. (In Farsi)

Zanganeh, M. E., Mosaedi, A., Meftah Halghi, M., and Dehghani, A. A. (2011). Determination of Suitable Method for Estimating Suspended Sediments Discharge in Arazkoose Hydrometric Station (Gorganrood Basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(2), 85-104. (In Farsi)

Zorratipour, A., Sigaroudi, Sh., and Shamsolmaali, N. (2007). Effectiveness of mean load within discharge classes methods compared to one and two rating curves in estimating suspended sediment. (Case study: Taleghan Watershed). 4th *International Conference on Integrated Watershed Management*.21-22 Jan. Karaj, Iran, 1-11. (In Farsi)