

تحلیل الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوزه آبخیز تهم زنجان

سعید نجفی^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*} و توبیاس هکمن^۳

^۱ دانشجوی دکترای گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس و ^۳ استاد، گروه جغرافیای فیزیکی دانشگاه کاتولیک اینگلوشتات، آلمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲

چکیده

برنامه‌های مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، نیازمند توجه به رسوب و فرایندهای مربوط به آن در قالب مدیریت رسوب هستند. در حالی که فرایندهای حاکم بر رفتار تولید رسوب در مقیاس حوزه‌های آبخیز کمتر مورد توجه بوده است. مدیریت رسوب شامل تمام اقداماتی است که فرسایش، انتقال، بازتوزیع و ترسیب رسوب را در راستای انحراف یا تله‌اندازی رسوب در سامانه‌های آبراهه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر همین اساس، اتصال رسوبی به‌عنوان مفهومی نوظهور در مدیریت رسوب، در چند سال اخیر برای بررسی انتقال رسوب در بخش‌های مختلف حوزه‌های آبخیز مورد توجه قرار گرفته است. حال آن که اتصال رسوبی به‌عنوان انتقال رسوب از میان تمام منابع رسوب به تمام مخازن رسوب ممکن در حوزه آبخیز طی فرایند فرسایش خاک تعریف می‌شود. بر همین اساس، اتصال ساختاری، مفهومی مشتق شده از اتصال رسوبی است که با بررسی آناتومی سامانه آبخیز، پتانسیل جابه‌جایی ذرات رسوب در سراسر سامانه آبخیز را مورد بررسی قرار می‌دهد. طبعاً با تعیین مناطق با الگوی اتصال ساختاری یکسان، اعمال نسخه‌های یکسان و یکپارچه مدیریت رسوب ممکن خواهد بود. از این رو، پژوهش حاضر به‌منظور بررسی شاخص اتصال ساختاری رسوب در سال ۱۳۹۳ در حوزه آبخیز تهم زنجان انجام شد. برای محاسبه شاخص اتصال ساختاری از لایه‌های مدل رقومی ارتفاعی، عامل پوشش گیاهی و بازدیدهای مکرر میدانی استفاده شد و ارزیابی‌های لازم برای آزمون نتایج به‌دست آمده صورت گرفت. نتایج ارزیابی صحت نمایش وضعیت اتصال ساختاری رسوب نشان داد که تطابق قابل قبولی بین شاخص اتصال میدانی و نقشه اتصال ساختاری وجود داشته است. نقشه اتصال ساختاری نیز با مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین به‌ترتیب ۱/۰۲، ۸/۲۴- و ۵/۹۵- نشان داد که ۳۲ درصد از حوزه آبخیز اتصال ساختاری بالایی دارد که عمدتاً در بخش‌های غربی آبخیز تمرکز داشته‌اند. به‌نظر می‌رسد با توجه به محاسبه سریع، هزینه کم، استفاده از داده‌های زودیاقت و کارایی مفهوم اتصال ساختاری در تعیین اولیه منابع رسوبی، این شاخص عامل بسیار مفیدی در مدیریت رسوب حوزه‌های آبخیز در ایران باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوب، شاخص اتصال رسوبی، فرسایش خاک، مدیریت رسوب، مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز

مقدمه

چند سال اخیر برای بررسی انتقال رسوب در بخش‌های مختلف سیمای سرزمین مورد توجه قرار گرفته است (Lexartza-Artza و Wainwright،

واژه "اتصال" به‌عنوان مفهومی نوظهور در هیدرولوژی و مدیریت و انتقال رسوب می‌باشد که در

شروع و به نقطه ب (مخزن) حرکت کند؛ احتمال (p_d) رسیدن رسوب به نقطه ب متناسب با فاصله پایین دست در طول خط جریان می‌باشد. طبیعی است هر چه رسوب تولیدی از سطح مشارکت بالادست بیشتر باشد، احتمال انتقال رسوبات به مخزن یا آبراهه نیز بیشتر می‌شود.

این رویکرد از دو جزء بالادست (D_{up}) و پایین دست (D_{dn}) تشکیل شده است. جزء پایین دست مربوط به انتقال رسوب از نقطه الف به نقطه ب می‌باشد که رابطه‌ای عکس با طول مسیر حرکت دارد. در دو مسیر با طول و شرایط ثابت، میزان رسوب تحویلی از مسیر دارای پوشش گیاهی بیشتر، به دلیل قدرت تله‌اندازی زیاد آن کمتر خواهد بود که به معنی کاهش اتصال رسوبی در شرایط پوشش گیاهی خوب است. به همین دلیل متغیر دیگری به نام عامل وزنی (W) نیاز است تا ویژگی‌های مسیر حرکت مانند زبری را نیز مورد توجه قرار گیرد. این متغیر عموماً به شرایط پوشش گیاهی مسیر نسبت داده می‌شود. عامل شیب نیز متغیر دیگری است که نقش مهمی در انتقال رسوبات دارد. بدیهی است مناطق با شیب کمتر مستعد شناسایی به‌عنوان مخازن و محل‌های انباشت رسوب خواهند بود. طبیعی است افزایش شیب و نبود یا کاهش پوشش گیاهی سبب افزایش نقش طول مسیر آبراهه در انتقال رسوبات خواهد شد. در مورد جزء بالادست نیز به‌طور کلی پتانسیل و احتمال انتقال رسوب تولیدی از سطح مشارکت بالادست مد نظر می‌باشد. همچنین، این جزء نیز متأثر از متغیرهایی است که در جزء پایین دست مورد بحث قرار گرفت با این تفاوت که محاسبات این بخش به سطح مشارکت بالادست تعمیم داده شده و میانگین شیب و عامل پوشش گیاهی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، برای یکسان‌سازی میزان تاثیر همه متغیرها در محاسبات، مجذور سطح مشارکت کننده در تولید رسوب، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

امروزه یکی از اهداف برنامه‌های مدیریت جامع در حوزه‌های آبخیز، دستیابی به تعادل اکولوژیکی آبخیزها هم‌زمان با ارتقای وضعیت اجتماعی و اقتصادی آبخیزنشینان است. از طرفی برنامه‌های مدیریتی آبخیزها متناسب با محل و شرایط اعمال و

۲۰۰۹؛ Croke و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی، در مورد حوزه‌های آبخیز می‌توان به سه نوع اتصال سیمای سرزمین^۱ (جفت‌شدگی و ارتباط فیزیکی زمین‌ریخت‌ها)، هیدرولوژیکی^۲ (انتقال رواناب از بخشی از سیمای سرزمین به بخشی دیگر و ایجاد پاسخ‌های روانابی در بخش‌های مختلف آبخیز) و رسوبی^۳ (انتقال فیزیکی رسوب و آلودگی‌های مربوط به آن در سراسر حوزه آبخیز) اشاره کرد (Jain و Tandon، ۲۰۱۰). از آنجایی که در فرسایش آبی انتقال رسوب به‌وسیله نیروی محرکه آب و فرایندهای هیدرولوژی در شبکه آبراه‌های صورت می‌گیرد، لذا، مفهوم اتصال به حالتی از یک سامانه مانند حوزه آبخیز مربوط می‌شود که چگونگی و درجه آسانی انتقال مواد و انرژی در سراسر سامانه مذکور را تعیین می‌کند. به‌عبارتی دیگر، اتصال از پیوستگی یا ناپیوستگی مسیرهای رواناب و رسوب در زمان و مکانی مشخص حکایت دارد (Duvert و همکاران، ۲۰۱۱؛ Vigiak و همکاران، ۲۰۱۲؛ Croke و همکاران، ۲۰۱۳؛ Heckmann و Schwanghart، ۲۰۱۳؛ Kollongei و Lorentz، ۲۰۱۴). از طرفی اتصال رسوبی، انتقال رسوب از یک بخش به بخشی دیگر و پتانسیل جابه‌جایی برای یک ذره رسوب در سراسر سامانه آبخیز (درون‌دامنه‌ای، بین‌دامنه و آبراهه، درون‌آبراه‌های) گفته می‌شود. به‌طور کلی "اتصال رسوبی" به‌عنوان انتقال رسوب از میان تمام منابع رسوب^۴ ممکن به تمام مخازن رسوب^۵ پتانسیل در یک سامانه تحت فرایندهای جدایش، انتقال و ترسیب رسوب اطلاق می‌شود (Bracken و همکاران، ۲۰۱۴؛ Messenzehl و همکاران، ۲۰۱۴). بر همین اساس، اتصال ساختاری رسوب^۶ مفهومی مشتق شده از اتصال است که با بررسی آناتومی سامانه^۷ تحت بررسی، پتانسیل جابه‌جایی ذرات رسوب در سراسر سامانه آبخیز را مورد بررسی قرار می‌دهد. بر اساس شکل ۱، اگر فرض شود که رسوب از نقطه الف (منبع)

¹ Landscape Connectivity

² Hydrological Connectivity

³ Sedimentological Connectivity

⁴ Sediment Sources

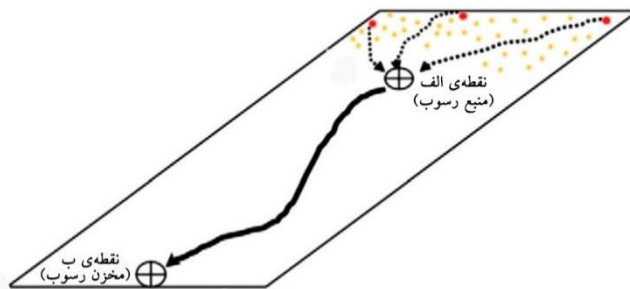
⁵ Sediment Sinks

⁶ Structural Connectivity

⁷ system's anatomy

Dragovich, ۲۰۰۸؛ Juracek و Ziegler, ۲۰۰۹؛ Hakimkhani و همکاران، ۲۰۰۸). بر همین اساس و برای رسیدن به اهداف فوق، درک جامع از منشأ، انتقال و سرنوشت رسوبات حاصل از منابع مختلف، شناخت مناطق با الگو و استعداد یکسان و مشابه در انتقال رسوب از الزامات مدیریت رسوب می‌باشد (Duvert و همکاران، ۲۰۱۱؛ Borselli و همکاران، ۲۰۰۸؛ Cavalli و همکاران، ۲۰۱۳؛ D'Haen و همکاران، ۲۰۱۳؛ Najafi و Sadeghi، ۲۰۱۳).

فارغ از تفاوت‌های آن‌ها، الزاماً دارای جزء و وجه مشترکی به نام مدیریت رسوب هستند که برای تفسیر فرایندهای حاکم بر تولید و انتقال رسوب، تحلیل عوامل اصلی موثر بر تولید و انتقال رسوب، حفاظت خاک و کنترل رسوب و نهایتاً مهار و کاهش زیان‌های برون و درون منطقه‌ای ناشی از رسوب کاربرد دارد (Collins و همکاران، ۱۹۹۷؛ Collins و همکاران، ۱۹۹۸؛ Walling و Collins، ۲۰۰۲؛ Krause و همکاران، ۲۰۰۳؛ Walling، ۲۰۰۵؛ Smith و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل ۱- مفهوم‌سازی ارتباط بین منبع رسوب (نقطه الف) و مخزن رسوب (نقطه ب) در مقطعی فرضی از یک دامنه (اقتباس Borselli و همکاران، ۲۰۰۸)

متر) بوده است. از طرفی بررسی مستندات پژوهشی داخل کشور نیز بیانگر عدم وجود پیشینه پژوهشی لازم در این زمینه می‌باشد. بنابراین پژوهش حاضر با هدف معرفی، کاربرد و نهایتاً تحلیل اتصال ساختاری رسوب با مرجع قرار دادن خروجی آبخیز، در قالب تهیه نقشه اتصال رسوبی در حوزه آبخیز تهم^۲ در استان زنجان با توجه به وجود مبانای اطلاعاتی اولیه و سد مخزنی تهم در خروجی اصلی آبخیز و همچنین، امکان بازدیدهای میدانی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: برای این مطالعه، حوزه آبخیز تهم با اقلیم نیمه‌خشک سرد و متوسط بارندگی سالیانه ۳۸۲/۴ میلی‌متر در فاصله ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان زنجان انتخاب شد. حوزه آبخیز مذکور با مساحت ۱۶۳ کیلومتر مربع، محیط و طول رودخانه اصلی به ترتیب ۶۳ و ۱۴/۵ کیلومتر، ارتفاع کمینه و

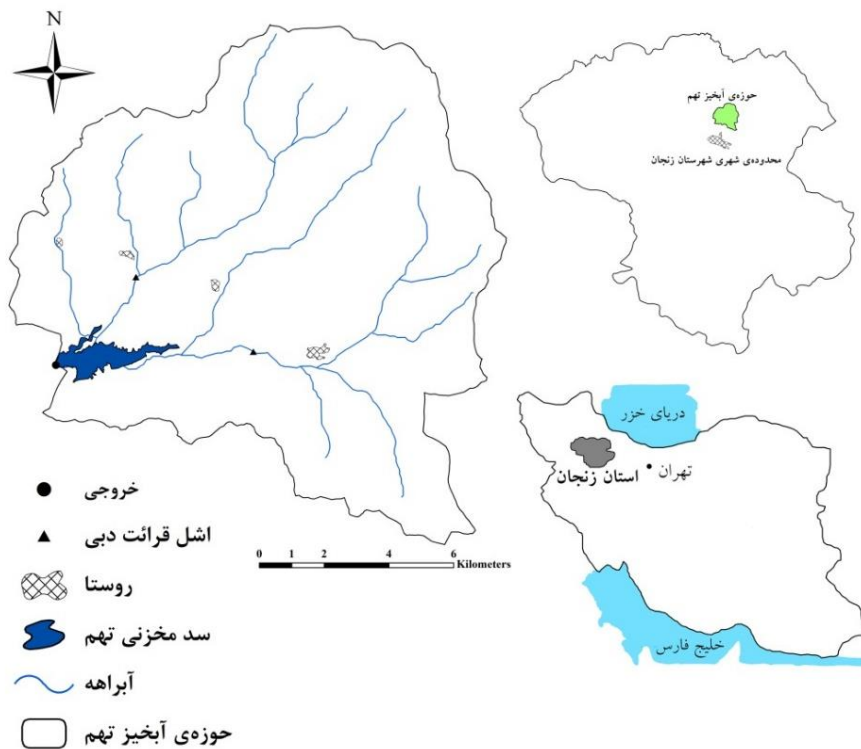
از همین‌رو، پیوند بین منابع رسوب و مناطق پایین‌دست، مسیرهای انتقال رسوب و نسبت تحویل رسوب، صفاتی کلیدی در مطالعه فرایندهای انتقال رسوب و مدیریت فرسایش خاک و رسوب در آبخیزها محسوب می‌شوند که بخش قابل توجهی از آن‌ها از طریق بررسی اتصال رسوبی قابل پاسخ‌گویی است. با وجود این، مطالعات مربوط در این خصوص بسیار محدود بوده و مراحل رشدی اولیه خود را سپری می‌نماید. در این مورد می‌توان به برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی اتصال فیزیکی و پتانسیل بخش‌های مختلف آبخیز در انتقال رسوب بر اساس شاخص اتصال^۱ و غالباً متأثر از توپوگرافی در مطالعه اتصال رسوبی (Marchi و Dan Fontana، ۲۰۰۵؛ Borselli و همکاران، ۲۰۰۸؛ Cavalli و همکاران، ۲۰۱۳؛ Heckmann و همکاران، ۲۰۱۵) اشاره کرد. بیشتر این مطالعات معطوف به استفاده از نقشه‌های با توپوگرافی با دقت بسیار بالا (در حد یک

² Taham Watershed

¹ Index of Connectivity

مهمترین معضلات موجود در منطقه، شخم در جهت شیب، شخم در دامنه‌های بیش از ۱۲ درصد، چرای زودرس و مفرط و تخریب ناشی از انتقال خط لوله گاز شهری را می‌توان نام برد. شکل ۲، نمایی کلی از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

بیشینه ۱۸۱۱ و ۲۸۷۰ متر از سطح آب‌های آزاد و شیب متوسط ۲۸ درصد از زیرآبخیزهای زنجان رود می‌باشد. کاربری اراضی موجود در حوزه آبخیز تهم را انواع مختلف مراتع، باغ، مخلوط باغ و زراعت و مراتع به همراه دیم‌کاری تشکیل می‌دهند که بیشترین وسعت آن (حدود ۵۶ درصد) مربوط به مراتع است. از



شکل ۲- موقعیت و سیمای عمومی حوزه آبخیز تهم در استان زنجان و کشور

گیاهی منطقه به‌عنوان یکی از شاخص‌های ضروری در تعیین اتصال رسوبی نیز از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 مربوط به چهارم خرداد ۱۳۹۳ استفاده شد. تهیه نقشه اتصال ساختاری رسوب: برای تهیه نقشه اتصال ساختاری، رویکرد مورد استفاده بر اساس فاصله از مخزن رسوب، ویژگی‌های مسیر حرکت رسوب و جریان تجمعی رواناب (Borselli و همکاران، ۲۰۰۸) مورد توجه قرار گرفت. بر همین اساس، در شاخص نهایی، احتمال ورود ذرات رسوبی از منبع رسوب به مخزن رسوب در نظر گرفته شد.

در این مطالعه، با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و سلول‌های ۱۰۰ مترمربعی و تعیین نقشه شیب، جهت جریان، جریان

روش پژوهش

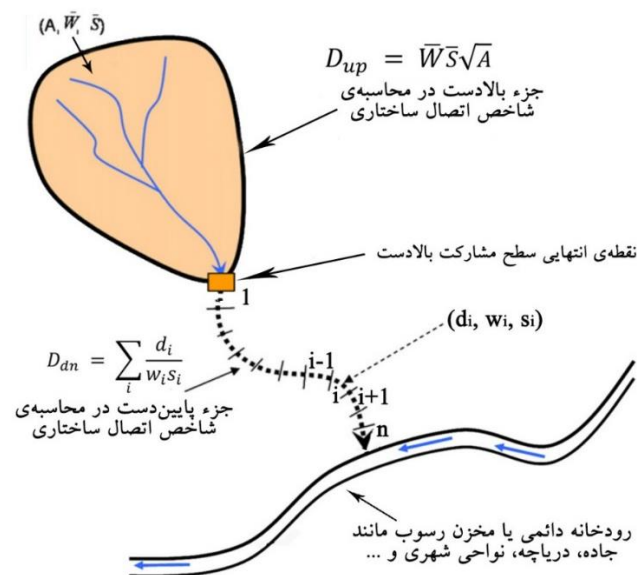
جمع‌آوری اطلاعات و نقشه‌های موجود: نقشه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی به‌ترتیب در مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه مورد نظر از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان تهیه شد. مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری حوزه آبخیز مورد مطالعه نیز از سازمان نقشه‌برداری کشور خریداری شد. برای اطلاع از وضعیت شیب آبخیز و نمونه‌برداری بر اساس آن، نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع^۱ مذکور و در طبقات صفر تا ۱۵، ۳۰-۱۵ و بیش از ۳۰ درصد تهیه شد. برای تعیین عامل پوشش

^۱ Digital Elevation Model

که در آن، D_{up} جزء بالادست شاخص اتصال، D_{dn} جزء پایین‌دست شاخص اتصال، \bar{W} میانگین عامل وزنی سطح مشارکت بالادست (بدون بعد)، \bar{S} میانگین تندی شیب سطح مشارکت بالادست (متر بر متر)، A سطح مشارکتی بالادست (مترمربع)، d_i طول مسیر به سمت پایین‌دست در سلول i ام نقشه رستری مورد استفاده (به متر)، W_i عامل وزنی سلول i ام، S_i تندی شیب مربوط به سلول i ام، k بیانگر شاخص اتصال محاسبه شده مخصوص به هر سلول می‌باشد (Foerster و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس رابطه ارائه شده، شاخص اتصال رسوبی از نظر ریاضی بدون حد بوده و در دامنه $\pm\infty$ قرار می‌گیرد. هر چه این شاخص مثبت‌تر باشد، اتصال ساختاری برای انتقال رسوب بیشتر و هر چه به سمت منفی میل کند این اتصال کاهش خواهد یافت.

تجمعی، جزء بالادست مسیر شروع جریان در انتقال رسوب و جزء پایین‌دست در شبکه اتصال رسوبی محاسبه شدند. نهایتاً محاسبه شاخص اتصال با استفاده از رابطه (۱) صورت گرفت. این فرایند با توجه به سناریوی انتقال رسوب با توجه به خروجی آبخیز مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت (Borselli و همکاران، ۲۰۰۸؛ Cavalli و همکاران، ۲۰۱۳؛ Lu و Fu، ۲۰۱۶). رابطه (۱) به همراه شکل ۳ جزئیات مربوط به نحوه محاسبات در یک بخش فرضی از حوزه آبخیز و نیز مقایسه مترتب بر اتصال رسوبی را نشان می‌دهند.

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A}}{\sum_{i=k,n_k}^n \frac{d_i}{W_i S_i}} \right) \quad (1)$$



شکل ۳- اجزاء تشکیل دهنده و مورد محاسبه در تعیین شاخص اتصال ساختاری رسوب (اقتباس از Borselli و همکاران، ۲۰۰۸)

واحدهای کاری کمتر از پنج هکتار با واحدهای کاری مجاور ادغام شدند. اعتبارسنجی میدانی اتصال ساختاری (Borselli و همکاران، ۲۰۰۸) نیز در سطح حوزه آبخیز و با استفاده از مشخصه‌های موجود در جدول ۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. به طوری که پس از تعیین نقشه اتصال ساختاری، ۱۰ محل در پنج واحد مطالعاتی از ۱۴ واحد مطالعاتی تعیین شده روی نقشه بر اساس سهولت دسترسی، توزیع یک‌نواخت در

بازدیدهای میدانی: برای آشنایی با منطقه، شناخت اجمالی از پدیده‌های فرسایشی و بررسی کلی چگونگی اتصال ساختاری، بر اساس نقشه کاربری اراضی و زمین‌شناسی منطقه، اقدام به شش نوبت پیمایش و بازدید میدانی از آبخیز شد. برای تعیین محل‌های مورد نظر برای ارزیابی نقشه اتصال ساختاری رسوب، واحدهای مطالعاتی حاصل از ترکیب نقشه کاربری و زمین‌شناسی استفاده شد. در همین راستا، برخی از

به بخشی از آبخیز با اتصال ساختاری متوسط نسبت به بقیه بخش‌ها می‌باشد که آثار جریان رسوبی در آن در محل‌های منتهی به آبراهه و سطوح فرسایشی کاملاً مشهود است. اما همان‌طور که از شکل ۶- ب مشخص است، آثار انباشت رسوب تولیدی در بخش‌هایی از سطح محل مورد بررسی و نزدیک به شبکه رودخانه کاملاً مشهود است و اتصال ساختاری کمتری را نسبت به شکل ۶- الف نشان می‌دهد. شکل ۶- ج نیز منطقه با اتصال رسوبی بالا را نشان می‌دهد که زمین‌ریخت‌بخش مورد بررسی، نبود آثار ته‌نشست رسوبات ریزدانه و آثار جابه‌جایی رسوبات درشت و واریزه‌ای موید اتصال ساختاری زیاد در این بخش هستند. شکل ۷، نیز رابطه بین شاخص اتصال ساختاری مبتنی بر نقشه را با نتایج به‌دست آمده از شاخص اتصال میدانی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۴، عامل پوشش گیاهی عموماً در بخش مرکزی و غربی حوزه آبخیز مورد مطالعه دارای مقادیر زیادی بوده است که با الگوی نقشه‌ی شیب آبخیز، الگوی تقریباً یکسانی دارد. به‌طوری که مناطق کم‌شیب‌تر به‌ویژه در بخش مرکزی به‌دلیل دسترسی آسان از طریق چرای دام و دخالت‌های انسانی از پوشش گیاهی ضعیف‌تری برخوردار می‌باشند. این موضوع در تلفیق با میزان شیب که در این نواحی نیز به مراتب کمتر از بخش‌های دیگر می‌باشد، باعث ایجاد اتصال ساختاری کمتری در این قسمت‌ها از حوزه آبخیز شده است که در شکل ۵ کاملاً مشهود است. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، بخش‌های غربی، جنوب غربی و شمال غربی حوزه آبخیز، اتصال ساختاری شدیدتری نسبت به سایر مناطق آبخیز دارند که دلیل این امر علاوه بر شیب نسبی بیشتر و پوشش گیاهی کمتر، نزدیکی به خروجی آبخیز می‌باشد که پتانسیل انتقال رسوب را افزایش و تله‌اندازی آن را کاهش می‌دهد. نتایج بررسی‌های میدانی مطابق نمونه‌های ارائه شده در شکل ۶ نیز الگوی حاکم بر اتصال ساختاری به‌دست آمده را تایید می‌کند. در بررسی‌ها باید دقت نمود که مناطق مورد بررسی به‌صورت واحدی مجزا و قابل مدیریت مورد توجه و تفسیر قرار گیرند.

سطح آبخیز و نیز تنوع کاربری انتخاب شده و با مراجعه میدانی و بررسی شرایط واقعی حاکم در عرصه و تطبیق آن با نتایج حاصل در نقشه اتصال ساختاری به تعیین دقت و اعتبار نقشه حاصل اقدام شد.

نتایج و بحث

نقشه‌های عامل پوشش گیاهی و شیب: برای تعیین اتصال ساختاری و بر اساس روش‌های بیان شده، نقشه عامل پوشش گیاهی حوزه آبخیز تهم مربوط به سال ۱۳۹۳ تهیه و در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین وزنی مقدار عامل پوشش گیاهی مربوط به زمان مورد مطالعه ۰/۴۱ برآورد شد. همچنین، نقشه شیب حوزه آبخیز مورد مطالعه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نقشه شیب استنباط می‌شود، شیب مناطق مرزی آبخیز زیاد بوده، مناطق کم‌شیب نیز در بخش‌های مرکزی پراکنده شده است.

نقشه اتصال ساختاری رسوب: نقشه اتصال ساختاری رسوب حوزه آبخیز تهم مربوط به سال ۱۳۹۳ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده است. اطلاعات مندرج در نقشه مزبور نشان می‌دهد که مقادیر ۸/۲۴- و ۱/۰۲ به ترتیب برای کمینه و بیشینه اعداد شاخص اتصال به‌دست آمدند. همچنین، بر اساس نقشه‌های حاصل، بخش مرکزی حوزه آبخیز دارای اتصال ساختاری کمتری نسبت به بخش‌های دیگر حوزه آبخیز می‌باشد. مناطق غربی، جنوب غربی و شمال غربی حوزه آبخیز نیز اتصال ساختاری بالاتری نسبت به سایر بخش‌های آبخیز نشان می‌دهند. این مناطق با توجه به نزدیکی و مشرف بودن آن‌ها به سد مخرنی احداث شده در آبخیز از اهمیت زیادی برخوردار است.

نتایج و تصاویر مربوط به ارزیابی تطابق یافته‌های نقشه اتصال ساختاری با واقعیت‌های میدانی مربوط به سه نقطه با شرایط خاص^۱ از لحاظ اتصال ساختاری نیز در شکل ۶ ارائه شده است. مکان‌های نشان داده شده در این شکل بر اساس نقشه اتصال ساختاری به‌ترتیب نمونه‌ای از محل‌های دارای اتصال متوسط، کمتر و بیشتر را نشان می‌دهند. شکل ۶- الف متعلق

^۱ Hotspots

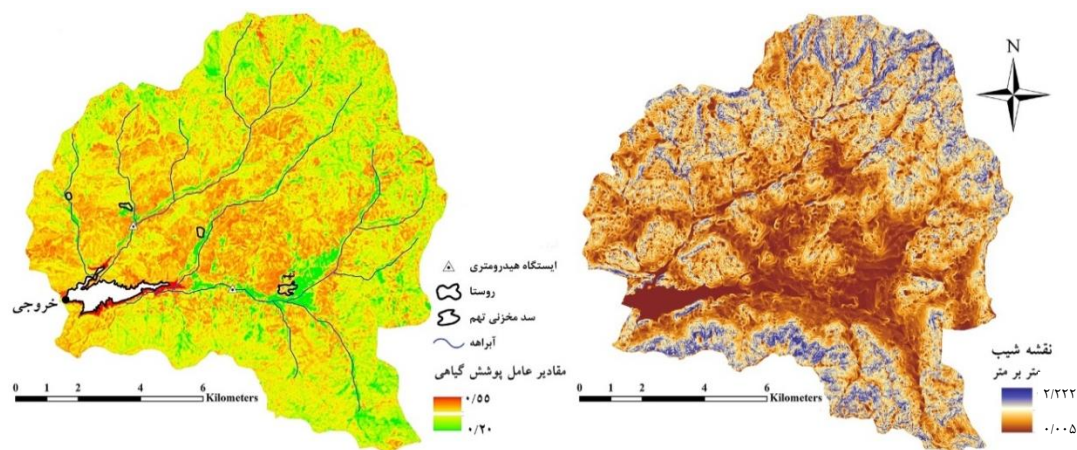
جدول ۱- فرم ارزیابی میدانی و سریع اجزای شاخص اتصال میدانی مورد بررسی برای برآورد اتصال ساختاری رسوب (اقتباس از Borselli و همکاران، ۲۰۰۸)

امتیاز	محدوده	عوامل جزء بالادست اتصال
۰	$A < 0.1$	۱- سطح مشارکت بالادست A به هکتار (Au)
۱۵	$0.1 < A < 0.5$	
۳۰	$0.5 < A < 1.0$	
۴۵	$1.0 < A < 2.0$	
۶۰	$A > 2.0$	
۰	ترسیب رسوب زیاد	۲- وجود شواهد ترسیب رسوب در سطح مشارکت بالادست (Bu) توضیح: در صورت فقدان علائم فرسایش نمره صفر اختصاص می‌یابد.
۵	شواهد مشخص و زیاد از ترسیب رسوب	
۱۰	شواهد گسسته اما زیاد از ترسیب رسوب	
۱۵	شواهد و نشانه‌های کم از ترسیب رسوب	
۲۰	عدم وجود شواهد ترسیب رسوب	
۰	$RR > 4$	۳- سطح خاک لخت (Cu1)
۵	$2 < RR < 4$	توضیح: با استفاده از میانگین زبری سطح بالادست مورد بررسی، محاسبه می‌شود. انحراف معیار (Sd) ارتفاعات نرمال به سطح خاک، به سانتی‌متر یا میزان زبری تصادفی ^۱ در طول ترانسکت‌های سه متری محاسبه می‌شود.
۱۰	$1 < RR < 2$	
۱۵	$0.3 < RR < 1$	
۲۰	$RR < 0.3$	
۰	$80 < VC < 100$	۴- اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (Cu2) توضیح: این مشخصه به‌عنوان پوشش گیاهی ^۲ در سطح زمین و با استفاده از میانگین درصد تاج پوشش + سطح پایه گیاه به درصد مورد محاسبه قرار می‌گیرد.
۵	$60 < VC < 80$	
۱۰	$40 < VC < 60$	
۱۵	$20 < VC < 40$	
۲۰	$VC < 20$	
$Su = Au + Bu + wuCu1 + (1 - wu) \times Cu2$		جمع امتیازات جزء بالادست (Su)
Wu بخشی از سطح خاک که عاری از پوشش گیاهی می‌باشد. محدوده این عدد بین یک تا صفر می‌باشد.		
امتیاز	محدوده	عوامل جزء پایین دست اتصال
۰	$d > 100$	۱- فاصله (Distance) از مخزن رسوبی محلی (Ad) به متر
۱۰	$50 < d < 100$	
۲۰	$10 < d < 50$	
۳۰	$10 < d < 5$	
۴۰	$d < 5$	
۰	عرض کاشت نواری بیش از چهار متر و متراکم	۲- وجود نوارهای گیاهی سپری ^۳ در انتهای مسیر انتقال رسوب (Bd)
۵	ردیف‌های گیاهی متصل و انبوه	
۱۰	کشت ردیفی گسسته و پراکنده	
۱۵	شواهد کم از وجود کشت ردیفی	
۲۰	نبود نوارهای گیاهی	
۰	ترسیب رسوب زیاد	۳- وجود علائم ترسیب رسوب در طول مسیر پایین دست (Cd) توضیح: در صورت فقدان علائم فرسایش نمره صفر اختصاص می‌یابد.
۵	شواهد مشخص و زیاد از ترسیب رسوب	
۱۰	شواهد گسسته اما زیاد از ترسیب رسوب	
۱۵	شواهد و نشانه‌های کم از ترسیب رسوب	
۲۰	عدم وجود شواهد ترسیب رسوب	
۰	$RR > 4$	۴- سطح خاک لخت (Dd ₁)
۵	$2 < RR < 4$	توضیح: با استفاده از میانگین زبری در طول مسیر پایین دست مورد بررسی، محاسبه می‌شود. (انحراف معیار (Sd) ارتفاعات نرمال به سطح خاک، به سانتی‌متر یا میزان زبری در طول ترانسکت‌های سه متری محاسبه می‌شود.
۱۰	$1 < RR < 2$	
۱۵	$0.3 < RR < 1$	
۲۰	$RR < 0.3$	
۰	$80 < VC < 100$	۵- اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (Dd2) این مشخصه به‌عنوان پوشش گیاهی در سطح آبراهه و با استفاده از میانگین درصد تاج پوشش + سطح پایه گیاه به درصد مورد محاسبه قرار می‌گیرد.
۵	$60 < VC < 80$	
۱۰	$40 < VC < 60$	
۱۵	$20 < VC < 40$	
۲۰	$VC < 20$	
$Sd = Ad + Bd + Cd + wdDd_1 + (1 - wd)Dd_2$		جمع امتیازات جزء بالادست
Wd بخشی از سطح خاک که عاری از پوشش گیاهی می‌باشد. محدوده این عدد بین یک تا صفر می‌باشد.		
$FIC = (Su + Sd) / 2$		شاخص اتصال میدانی حاصل از جمع امتیازات جزء بالادست و پایین دست

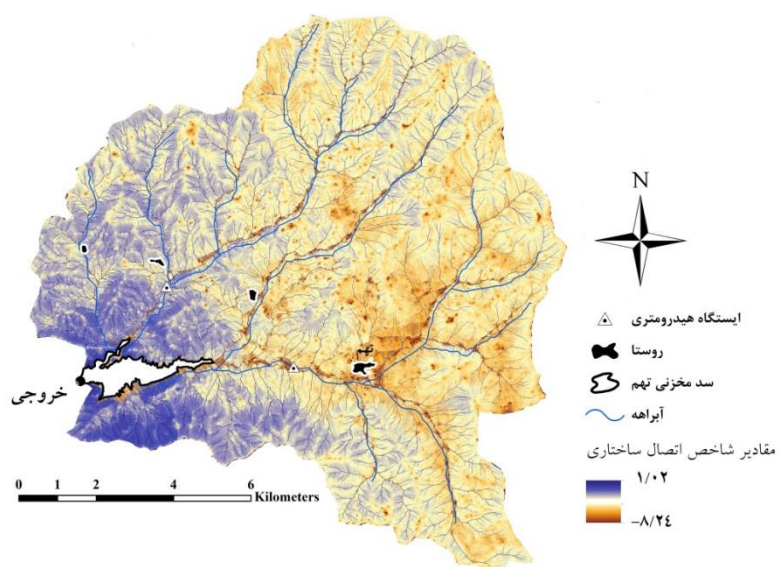
¹ Random Roughness (RR)

² Vegetation Cover (VC)

³ Buffer



شکل ۴- نقشه شیب (راست) و پراکنش مقادیر عامل پوشش گیاهی (چپ) در خرداد ۱۳۹۳ در حوزه آبخیز تهم در استان زنجان

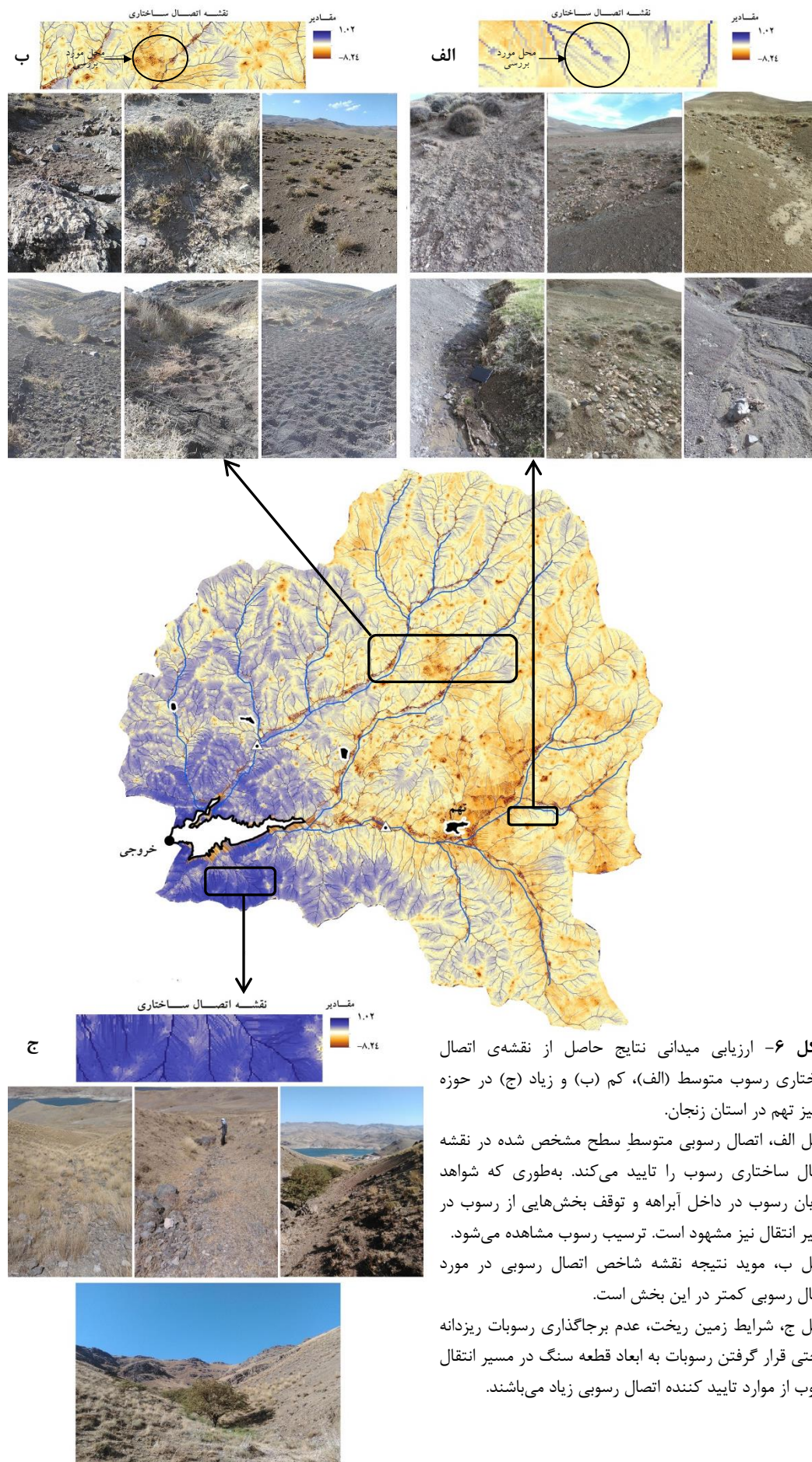


شکل ۵- نقشه‌های اتصال ساختاری رسوب در سال ۱۳۹۳ در حوزه آبخیز تهم در استان زنجان

می‌باشد. البته ممکن است در نگاه اول نبود علائم ترسیب رسوب به عدم تولید رسوب در این بخش‌ها ارتباط داده شود و نتیجه‌گیری از آن در مورد اتصال ساختاری رسوب را با تردید همراه سازد. اما بایستی توجه داشت که در این بخش‌ها از آبخیز مورد مطالعه، شواهد قرارگیری رسوبات درشت‌دانه و حتی در حد قطعه‌سنگ در مسیر جریان رواناب بیان‌گر توان بالای هیدرولوژیکی این نواحی و اتصال بالای آن‌ها به خروجی آبخیز می‌باشد. نتایج ارزیابی میدانی در مورد نتایج به‌دست آمده در نقشه‌های اتصال رسوبی بر اساس انتخاب ۱۰ محل مورد بررسی، همان‌طور که در شکل ۷ ارائه شده است، توافق قابل قبولی بین داده‌های اتصال رسوبی میدانی و اتصال ساختاری رسوب در نقشه را نشان می‌دهد.

به‌عنوان مثال شکل ۶- ب گویای این واقعیت است که فرایند انتقال رسوب در سراسر محل مورد بررسی به‌عنوان یک واحد مدیریتی از دامنه به کانال و یا از بخشی به بخش دیگر در جریان می‌باشد. اما از نظر کلی و بر اساس یک نقطه هدف مانند خروجی آبخیز، این محل به‌عنوان مخزن رسوب، حداقل در کوتاه‌مدت مطرح می‌باشد. چنین تفسیری برای شکل ۶- الف و ج نیز صادق است.

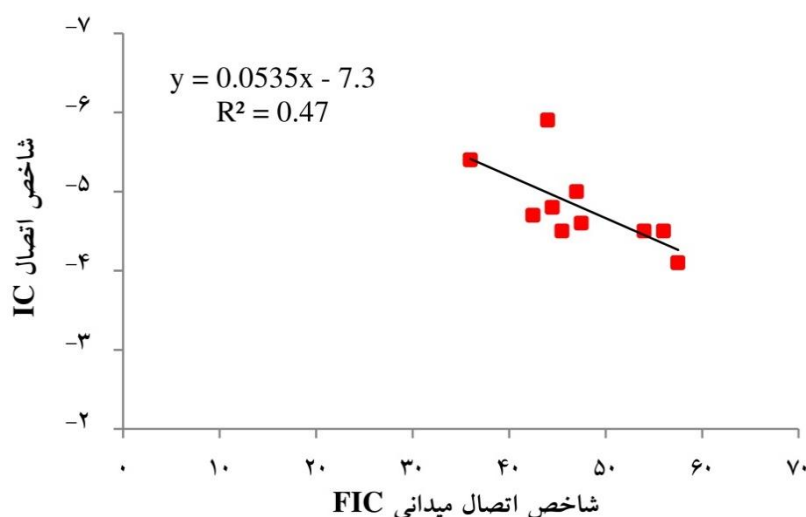
مناطق نزدیک خروجی آبخیز که نمونه‌ای از آن در شکل ۶- ج نشان داده شده است عموماً به‌دلیل کوتاهی مسیر انتقال رسوب و زمین‌ریخت‌های پرشیب، بخش‌های با اتصال قوی به خروجی آبخیز از نظر انتقال رسوب را ایجاد کرده‌اند که نبود آثار ترسیب رسوب در این بخش‌ها تأییدی بر وجود اتصال قوی



شکل ۶- ارزیابی میدانی نتایج حاصل از نقشه‌ی اتصال ساختاری رسوب متوسط (الف)، کم (ب) و زیاد (ج) در حوزه آبخیز تهم در استان زنجان.

شکل الف، اتصال رسوبی متوسط سطح مشخص شده در نقشه اتصال ساختاری رسوب را تایید می‌کند. به طوری که شواهد جریان رسوب در داخل آبراهه و توقف بخش‌هایی از رسوب در مسیر انتقال نیز مشهود است. ترسیب رسوب مشاهده می‌شود. شکل ب، موبد نتیجه نقشه شاخص اتصال رسوبی در مورد اتصال رسوبی کمتر در این بخش است.

شکل ج، شرایط زمین ریخت، عدم برجاگذاری رسوبات ریزدانه و حتی قرار گرفتن رسوبات به ابعاد قطعه سنگ در مسیر انتقال رسوب از موارد تایید کننده اتصال رسوبی زیاد می‌باشند.



شکل ۷- مقایسه نتایج متناظر دو شاخص اتصال رسوبی میدانی و مبتنی بر نقشه

نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد یکی از کاربردهای استفاده از نتایج بررسی اتصال ساختاری در مدیریت رسوب حوزه‌های آبخیز استفاده از نتایج آن در تعیین محل‌های مستعد از نظر انتقال بار رسوب باشد. همچنین، یک برآورد اولیه و کلی از مناطقی که در الویت اقدامات مدیریت رسوبی هستند را نشان می‌دهد (Cavalli و همکاران، ۲۰۱۳). به طور کلی بر اساس نتایج تحقیق حاضر، بررسی اتصال ساختاری رسوب را می‌توان معیاری برای بررسی کلی پراکنش مناطق محتمل منابع تولید رسوب و مخازن اولیه و موقت انباشت رسوب دانست. با توجه به محاسبه سریع، هزینه کم، استفاده از داده‌های زودیافت و کارایی مفهوم اتصال ساختاری در فهم فرایندهای انتقال رسوب، به نظر می‌رسد این شاخص عامل بسیار مفیدی در نحوه مدیریت رسوب در بخش‌های مختلف حوزه‌های آبخیز باشد (Messenzehl و همکاران، ۲۰۱۴). بر همین اساس در ایران و با لحاظ محدودیت‌های مالی و امکاناتی در زمینه اقدامات حفاظت از منابع طبیعی و فرسایش خاک و تولید رسوب حاکم بر آن، این رویکرد با ایجاد امکان اولویت‌بندی اولیه و ساختاری از محتمل‌ترین مناطق انتقال رسوب، درک بهتر و منطقی‌تری از جانمایی اقدامات حفاظتی به‌ویژه در بخش سازه‌ای را برای کنترل و مدیریت رسوب فراهم می‌کند. اگرچه انجام مطالعات تفصیلی‌تر و گسترده‌تر و به‌خصوص در

هر چند در برخی موارد بی‌نظمی‌هایی دیده می‌شود اما به‌طور کلی با افزایش میزان اتصال ساختاری محاسبه شده در نقشه، میزان اتصال رسوبی میدانی به‌دست آمده با بازدهی‌های کارشناسی نیز افزایش داشته است که با یافته‌های پژوهشگران دیگر مانند Fryirs و همکاران (۲۰۰۷)، Borselli و همکاران (۲۰۰۸) و Cavalli و همکاران (۲۰۱۳) هم‌خوانی دارد. البته بایستی به این نکته توجه داشت که به‌طور کلی بررسی اتصال رسوبی و صحت‌سنجی آن نیاز به کار میدانی جامع، دقت و اختصاص زمان کافی برای بررسی در قالب سیمای سرزمین را می‌طلبد که مورد تاکید پژوهشگران مربوطه نیز بوده است (Borselli و همکاران، ۲۰۰۸؛ Lexartza-Artza و Wainwright، ۲۰۰۹؛ Jain و Tandon، ۲۰۱۰؛ Cavalli و همکاران، ۲۰۱۳؛ Messenzehl و همکاران، ۲۰۱۴؛ Fu و Lu، ۲۰۱۶).

بر همین اساس بروز برخی بی‌نظمی‌ها در الگوی تطابق نتایج میدانی مبتنی بر جدول ۱ با داده‌های اتصال ساختاری نقشه با توجه به پیچیدگی‌های حاکم بر فرایندهای فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز، اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. حتی در مورد پر کردن فرم‌های مربوط به جدول ۱، بعضی مواقع لازم است تا از طریق مراجعه‌های مکرر به عرصه مورد نظر و یا عکس‌برداری از مناطق مورد بررسی و مقایسه هم‌زمان آن‌ها با یکدیگر، به تکمیل فرم‌ها اقدام نمود.

شرایط مختلف ژئومورفولوژیک زمین‌های لازم برای جمع‌بندی‌های نهایی را فراهم خواهد ساخت.

منابع مورد استفاده

1. Borselli, L., P. Cassi and D. Torri. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3): 268–277.
2. Bracken, L.J., L. Turnbull, J. Wainwright and P. Bogaart. 2014. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2): 177-188.
3. Cavalli, M., S. Trevisani, F. Comiti and L. Marchi. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188: 31–41.
4. Collins, A.L. and D.E. Walling. 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment source in river basins. *Journal of Hydrology*, 261: 218-244.
5. Collins, A.L., D.E. Walling and G.J.L. Leeks. 1997a. Sediment sources in the Upper Seven catchment: A fingerprinting approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(3): 509-521.
6. Collins, A.L., D.E. Walling and G.J.L. Leeks. 1997b. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena*, 29: 1-27.
7. Collins, A.L., D.E. Walling and G.J.L. Leeks. 1998. Use of composite fingerprinting to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 31-52.
8. Croke, J., K. Fryirs and C. Thompson. 2013. Channel–floodplain connectivity during an extreme flood event: implications for sediment erosion, deposition, and delivery. *Earth Surface Process and Landforms*, 38: 144-1456.
9. D’Haen, K., B. Duser, G. Verstraeten, P. Degryse and H. De Brue. 2013. A sediment fingerprinting approach to understand the geomorphic coupling in an eastern Mediterranean mountainous river catchment. *Geomorphology*, 197: 64–75.
10. Duvert, C., N. Gratiot, R. Anguiano-Valencia, J. Némery, M.E. Mendoza, T. Carlón-Allende, C. Prat and M. Esteves. 2011. Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico. *Catena*, 87(1): 129–140.
11. Foerster, S., C. Wilczok, A. Brosinsky and K. Segl. 2014. Assessment of sediment connectivity from vegetation cover and topography using remotely sensed data in a dryland catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Soils and Sediments*, 14: 1982–2000.
12. Fryirs, K.A., G.J. Brierley, N.J. Preston and M. Kasai. 2007. Buffers, barriers and blankets: The (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70(1): 49–67.
13. Hakimkhani, Sh., H. Ahmadi and J. Ghayoumian. 2008. Determining geologic units contributions to sediment yield using sediment fingerprinting technique in Pouldasht watershed. *Journal of Engineering Geology*, 2(1): 63-75 (in Persian).
14. Heckmann, T. and W. Schwanghart. 2013. Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment-Exploring sediment cascades using graph theory. *Geomorphology*, 182: 89–103.
15. Heckmann, T., W. Schwanghart and J.D. Phillips. 2015. Graph theory: recent developments of its application in geomorphology. *Geomorphology*, 243: 130-146.
16. Juracek, K.E. and A.C. Ziegler. 2009. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry lake basin, Kansas, USA. *International Journal of Sediment Research*, 24: 108-125.
17. Jain, V. and S.K. Tandon. 2010. Conceptual assessment of (dis) connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology*, 118: 349-358.
18. Kollongei., K.J. and S.A. Lorentz. 2014. Connectivity influences on nutrient and sediment migration in the Wartburg catchment, KwaZulu-Natal Province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67-69: 12–22.
19. Krause, A.K., S.W. Franks, J.D. Kalma, R.J. Loughran and J.S. Rowan. 2003. Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena*, 53: 327-348.
20. Lexartza-Artza, I. and J. Wainwright. 2009. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications. *Catena*, 79: 146-152.
21. Lu, Y. and B. Fu. 2016. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 66: 259-268.
22. Marchi, L. and G.D. Fontana. 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48: 218-228.
23. Messenzehl, K., T. Hoffmann and R. Dikau. 2014. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Müschauns, Swiss National Park-linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. *Geomorphology*, 221: 215–229.

24. Najafi, S. and S.H.R. Sadeghi. 2013. Comparative study of applying soil erosion mapping, fingerprinting and field measurement techniques in estimation of sediment sources. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(3): 165-178 (in Persian).
25. Smith, H.G. and D. Dragovich. 2008. Improving precision in sediment source and erosion process distinction in an upland catchment, south-eastern Australia. *Catena*, 72: 191-203.
26. Vigiak, O., L. Borselli, L.T.H. Newham, J. McInnes and A.M. Roberts. 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138(1): 74-88.
27. Walling, D.E. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 344: 159-184.

Analyzing structural sediment connectivity pattern in Taham Watershed, Iran

Saeed Najafi¹, Seyed Hamidreza Sadeghi^{*2} and Tobias Heckmann³

^{*} PhD Student, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, ² Professor, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran and ³ Physical Geography, Catholic University of Eichstaett-Ingolstadt, Eichstaett, Germany

Received: 11 April 2016

Accepted: 12 December 2016

Abstract

Comprehensive watershed management programs need to take into account the sediment and related process in sediment management paradigm. Whilst, the dominant processes on sediment yield has not been considered in watershed scale yet. Accordingly, sediment connectivity is an emerging concept in sediment management that has been accounted in recent years to investigate the sediment transfer from different sections of watersheds. Sediment connectivity is defined as the integrated transfer of sediment across all possible sources to all potential sinks in a system over the continuum of detachment, transport and deposition processes. The structural connectivity is therefore a concept derived from sediment connectivity which investigates potential of sediment particles displacement across a watershed on the base of anatomy of watershed's system. Naturally, identifying sectors with similar sediment connectivity patterns support applying similar and integrated sediment control mitigation strategies. The present research was planned to investigate the structural sediment connectivity in Taham Watershed in Zanjan Province for year 2014. To calculate the structural sediment connectivity, the Digital Elevation Model (DEM) and C Factor layers were used and the results were assessed according to field observations and surveying in several times. The results of the validity of the structural sediment connectivity map showed there were acceptable agreement between Field Index of Connectivity (FIC) and Index of Connectivity (IC). In addition, IC map with respective max, min and mean values of 1.02, -8.24 and -5.95, showed 32 percent of the study area had a high structural sediment connectivity that generally have been dispersed in western parts of the study area. Regarding to rapid appraisal and being low cost of IC calculation as well as identification of primary sediment sources, the structural sediment connectivity is a very useful concept for sediment management of watersheds of Iran.

Key words: Index of sediment connectivity, Integrated watershed management, Sediment management, Sediment transfer, Soil erosion

* Corresponding author: sadeghi@modares.ac.ir