



## **A Review of Fundamentals and Applications of Sediment Connectivity Index in Soil Erosion Studies**

**Zahra Gerami<sup>1</sup>, Mahmood Arabkhedri<sup>2</sup>✉, Ahmad Karimi<sup>3</sup>, Hossein Asadi<sup>4</sup>**

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: [z.gerami@yahoo.com](mailto:z.gerami@yahoo.com)

2. Corresponding Author, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: [arabkhedri@scwmri.ac.ir](mailto:arabkhedri@scwmri.ac.ir)

3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: [karimiahmad1342@sku.ac.ir](mailto:karimiahmad1342@sku.ac.ir)

4. Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Terhan, Karaj, Iran. Email: [ho.asadi@ut.ac.ir](mailto:ho.asadi@ut.ac.ir)

---

### **Article Info**

**Article type:** Review Article

**Article history:**

**Received:** July. 4, 2022

**Revised:** Sep. 21, 2022

**Accepted:** Oct. 2, 2022

**Published online:** Nov. 22, 2022

**Keywords:**

Structural connectivity,  
Functional connectivity,  
Temporal variation,  
Spatial variation,  
Weight factor.

---

### **ABSTRACT**

Identification of sediment production areas, patterns of its delivery from sources to the transport network and the location of deposition sinks are necessary to manage soil erosion. The term connectivity describes the relationship between the sources of runoff and sediment production in the upstream of the watershed and the corresponding sedimentation areas in the downstream. Based on the approach used, there are two types of structural connectivity and functional connectivity. Connectivity index (IC) is one of the most widely used indices to quantify sediment connectivity. The selection of an appropriate weighting factor is one of the challenging issues in IC calculation and it is chosen according to the conditions of each region, the characteristics of the soil surface and available data as well. Therefore, this study was conducted with the aim of reviewing, analysis and collecting past studies so far in order to have a comprehensive look at the methods of quantification of IC and introducing more appropriate approaches for future research in this field. This study reviewed 90 studies related to different dimensions of IC. The review of 25 studies on IC weighting factor published between 2008 to 2022 showed that the two frequently used variables are the C factor of USLE and surface roughness (31% and 25% respectively). It is also suggested that sediment connectivity can be investigated at different time scales, taking into account both structural and functional connectivity. As a result, with better understanding of sediment connectivity, it can be used as a tool for sustainable management of watersheds.

---

Cite this article: Gerami, Z., Arabkhedri, M., Karimi, A., Asadi, H. (2022). A review of fundamentals and applications of sediment connectivity index in soil erosion studies, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345385.669310>, 53 (9), 2191-2208.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345385.669310>



## مروری بر مبانی و کاربرد شاخص اتصال رسوبی در مطالعات فرسایش خاک

زهرا گرامی<sup>۱</sup>، محمود عرب‌خدری<sup>۲</sup>✉، احمد کریمی<sup>۳</sup> و حسین اسدی<sup>۴</sup>۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. ایمیل: [z.gerami@yahoo.com](mailto:z.gerami@yahoo.com)۲. نویسنده مسئول، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. ایمیل: [arabkhdri@scwmri.ac.ir](mailto:arabkhdri@scwmri.ac.ir)۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. ایمیل: [karimiamhad1342@sku.ac.ir](mailto:karimiamhad1342@sku.ac.ir)۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: [ho.asadi@ut.ac.ir](mailto:ho.asadi@ut.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله مروری

شناسایی مناطق تولید رسوب، الگوهای تحویل آن از منابع تولید به شبکه انتقال و در نهایت نهشتن آن در مخازن، برای مدیریت فرسایش خاک ضرورت دارد. واژه اتصال توصیف‌کننده ارتباط بین منابع تولید رواناب و رسوب در سراب حوزه‌های آبخیز و مخازن مربوطه در پایاب است. بر اساس نوع رویکرد، دو نوع اتصال ساختاری و کارکردی وجود دارد. شاخص اتصال رسوب (IC) از پرکاربردترین شاخص‌ها برای کمی‌سازی اتصال رسوب است. انتخاب عامل وزنی یکی از موضوعات چالش برانگیز در محاسبه IC است و متناسب با شرایط هر منطقه، ویژگی‌های سطح خاک و داده‌های موجود، انتخاب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی، مرور و تحلیل مطالعات گذشته در زمینه IC انجام شد تا بتوان بر مبنای آن نگاهی جامع به شیوه‌های کمی‌سازی اتصال رسوب داشت و رهیافت‌های مناسب‌تر را برای تحقیقات آینده در این زمینه معرفی کرد. در این مطالعه ۹۰ مرجع در رابطه با ابعاد مختلف IC مرور شده است. بررسی ۲۵ پژوهش روی عامل وزنی IC منتشر شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد که دو متغیر عامل C مدل USLE و زبری سطحی، به ترتیب با ۳۱ و ۲۵ درصد فراوانی، بیش‌ترین کاربرد را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به نتایج این پژوهش، بررسی اتصال رسوب با در نظر گرفتن همزمان اتصال ساختاری و کارکردی در مقیاس‌های زمانی متفاوت، پیشنهاد می‌شود. در نتیجه با شناخت بهتر IC، می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری برای مدیریت پایدار آبخیزها استفاده کرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱

## واژه‌های کلیدی:

اتصال ساختاری،

اتصال کارکردی،

تغییرات زمانی،

تغییرات مکانی،

عامل وزنی.

استناد: گرامی؛ زهرا، عرب‌خدری؛ محمود، کریمی؛ احمد، اسدی؛ حسین، (۱۴۰۱). مروری بر مبانی و کاربرد شاخص اتصال رسوبی در مطالعات فرسایش خاک، مجله تحقیقات

آب و خاک ایران، ۵۳ (۹)، ۲۲۰۸-۲۱۹۱. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345385.669310>DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345385.669310>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

فرسایش خاک پدیده‌ای است که ذرات خاک را از محل اولیه خود جدا و سپس با فرایندهای مختلف به مکان دیگری انتقال یافته و سپس رسوب می‌دهد (Poesen, 2018). فرسایش خاک اثرات نامطلوبی در محل وقوع فرسایش و خارج از آن دارد که رسوبدهی<sup>۱</sup> از مهمترین پیامدهای منفی این پدیده در خارج از محل وقوع فرسایش است (Refahi, 2016) و در این خصوص نسبت تحویل رسوب<sup>۲</sup> و عوامل موثر بر آن نقش مهمی دارد (Bayat and Moradi, 2014). بررسی مقدار و شناسایی مناطق مستعد تولید رسوب به دلیل اثرات آن بر محیط زیست، زمین‌های کشاورزی، شبکه‌های آبیاری، مخازن آب و تشدید اثرات سیلاب‌ها از درجه‌ی اهمیت بالایی برخوردار است (Gerami et al. 2017; FAO and ITPS, 2015).

محققان به دنبال درک، توصیف و کمی کردن جریان آب و رسوب، در مقیاس‌های مختلف زمانی مانند از یک رویداد بارندگی تا مدت زمان تکامل چشم‌انداز و مقیاس مکانی در اندازه ذرات خاک و خاکدانه‌ها تا قاره‌ها هستند (Renschler and Harbor, 2002; Kirchner et al. 2001). برای مدیریت فرسایش خاک و تولید رسوب، علاوه بر شناسایی عرصه‌های منبع تولید رسوب، باید الگوی تحویل بالقوه رسوب به شبکه آبراه‌ها نیز تهیه شود (Najafi et al. 2021). در دو دهه گذشته، مفهوم جدیدی به نام اتصال<sup>۳</sup> برای توصیف ارتباط داخلی بین منبع و رسوب در بالادست حوزه‌های آبخیز و مخازن مربوطه در پایین دست معرفی شد (Borselli et al. 2008) که ممکن است در مقیاس‌های متعددی از جمله اتصال ستون خاک، دامنه، دامنه-آبراهه، بین آبراهه‌های متعدد با یکدیگر، زیرحوزه آبخیز و حوزه آبخیز مورد استفاده قرار گیرد (Arabkhedri et al. 2021; Parsons et al. 2015).

ابتدا مفهوم اتصال در علوم ریاضی و فیزیک معرفی و سپس در علوم زمین به کار برده شد. در علوم زمین، مفهوم اتصال توسط زیست‌شناسان برای بررسی ارتباط بین گونه‌های مختلف پستانداران کوچک مطرح و به پیشرفت در هواشناسی در دهه ۱۹۵۰ نیز کمک کرد و بعدها توسط دانشمندان خاک برای توصیف فعل و انفعالات شیمیایی در ستون خاک مورد استفاده قرار گرفت (Keesstra et al. 2018). سپس، مفهوم اتصال به سایر حوزه‌های علم مانند زمین‌شناسی، شیمی و ژئومورفولوژی و هیدرولوژی نیز گسترش یافت (Burt and Gardiner, 1982; Bonham, 1980; Grisak et al. 1980). آغاز قرن بیست و یکم، با مطرح شدن مفهوم اتصال در هیدرولوژی و ژئومورفولوژی همراه بود (Keesstra et al. 2018; Bracken and Croke, 2007). اتصال رسوب نشان‌دهنده اتصال (و یا عدم اتصال) مسیرهای رواناب و رسوب در یک نقطه زمانی معین و در یک سامانه تحت فرایندهای جدایش، انتقال و رسوبگذاری است (Najafi et al., 2021). مفهوم اتصال رسوب اخیراً در مطالعات فرسایش خاک و رسوبدهی حوزه‌های آبخیز مورد کاربرد بیشتری قرار گرفته است که به دلیل جدید بودن مفاهیم اتصال در حوزه‌های آبخیز ضرورت دارد، اتصال رسوب و مفاهیم مرتبط با آن مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. در ادامه و به ترتیب، مباحثی شامل عوامل مؤثر، انواع، علت و مراحل توسعه، اجزاء، مقیاس مکانی و زمانی شاخص اتصال رسوب، عامل وزنی و دورنمای آن مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## عوامل مؤثر بر اتصال رسوب

تحقیقات اتصال در هیدرولوژی و ژئومورفولوژی در دهه گذشته رشد قابل توجهی را تجربه کرده است که اتصال سامانه‌های هیدرولوژیکی و فرسایشی به وسیله عوامل طبیعی و انسانی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. عوامل طبیعی شامل شرایط زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، آب و هوا، موجودات زنده، ویژگی خاک‌ها و عوامل انسانی شامل تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی بر روی زمین است (Zhang et al. 2021; Keesstra et al. 2018; Heckmann et al. 2018).

ویژگی زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی شامل مواد مادری، زمین‌لغزش‌ها و پستی و بلندی‌ها است که اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Zhang et al. 2021). شدت، مدت و فراوانی بارندگی از مهم‌ترین ویژگی‌های آب و هوایی است که به دلیل تغییرات مکانی و زمانی آن بر اتصال هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Liu et al. 2022; Bracken and Croke, 2007). در مرحله اولیه بارش، ابتدا سطح خاک مرطوب شده و با ادامه‌ی بارش خاک اشباع، خاکدانه‌ها شکسته و با ایجاد سله، رواناب تولید می‌شود (Bracken and Croke, 2007). گاهی وجود یک رویداد بارش حدی<sup>۴</sup> همراه با ضریب رواناب بالا (Arabkhedri, 2015)، منجر به اتصال بالا می‌شود که رویدادهای شدید

1 - Sediment yield

2 - Sediment delivery ratio

3 - Connectivity

4 - Extreme event

با مدت و توزیع مکانی متفاوت از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده اتصال هیدرولوژیکی در مقیاس دامنه و حوزه آبخیز هستند (Zhang *et al.* 2007; Bracken and Croke, 2008; Borselli *et al.* 2008).

نفوذ آب در خاک، بافت خاک، مقدار سنگ‌ریزه، پایداری خاکدانه، رطوبت و زبری خاک، ویژگی‌هایی از خاک هستند که به‌طور قابل توجهی بر اتصال هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارند (Borselli *et al.* 2008; Cavalli *et al.* 2013). اتصال در شرایط خاک خشک و مرطوب تفاوت زیادی دارد. به‌طوری‌که با افزایش مقدار رطوبت پیشین خاک، به علت تولید رواناب، بین مسیرهای جریان متصل به دامنه، احتمال ایجاد اتصال بالایی فراهم می‌شود (Zanandrea *et al.* 2021). نفوذ آب در خاک یکی از دیگر عوامل مؤثر بر اتصال، است که بر جریان متصل رواناب در سطح دامنه تأثیر گذاشته و باعث ایجاد ناهمگنی مکانی در اتصال دامنه و حوزه آبخیز می‌شود (Bracken and Croke, 2015; Bracken *et al.* 2007).

زبری سطحی خاک از دیگر عوامل تأثیرگذار بر اتصال است (Borselli *et al.* 2008; Cavalli *et al.* 2013) که بررسی تولید رواناب و نهشت رسوبات به کمک زبری سطحی خاک نیز انجام می‌شود. به این صورت که رواناب با موانع و مقاومت بیشتری در اثر وجود زبری سطحی برای جاری شدن برخورد کرده و برای عبور از آن‌ها بخش عمده‌ای از انرژی خود را از دست داده و در نتیجه توانایی جابجایی ذرات رسوب را ندارد (Zheng *et al.* 2012) و موجب تله‌انداختن رسوبات منتقل شده از برجستگی‌های حاصل از خاکورزی در فرورفتگی‌های آن می‌شود. همچنین زبری سطحی به وسیله شیب کنترل می‌شود. به این صورت که، در سطوح ناهموار و زبر، شیب می‌تواند بر نهشت رسوبات و تولید رواناب تأثیر گذارد (Ding and Huang, 2017). در صورتی که نهشت و برداشت و تولید رواناب سطوح صاف و بدون زبری قابل توجه، به میزان زیادی تحت تأثیر شیب زمین قرار نمی‌گیرد (Zhang *et al.* 2021; Heckmann *et al.* 2018).

بافت خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک مؤثر در فرایندهای هیدرولوژی و فرسایش و انتقال رسوب است. از جمله میزان نفوذ آب در خاک از بافت خاک تأثیر می‌پذیرد (Morgan, 2005). همچنین بافت خاک نقش اساسی در حساسیت به جدا شدن ذرات خاک توسط قطرات باران دارد که به‌طور مثال جدا شدن ذرات توسط پاشمان قطرات باران با مقدار رس خاک، ارتباط مستقیم دارد (Jourgholami and Labelle, 2020). به‌طور کلی بیشترین مقاومت در برابر فرسایش در مورد ذرات خاک خیلی درشت و خیلی ریز است که مقاومتشان به دلایل متفاوتی است. درشت بافت‌ها به دلیل اندازه بزرگ‌تر و خاک‌های ریزبافت نیز به دلیل وجود نیروهای چسبنده یا پیوند شیمیایی بین مواد معدنی تشکیل شده از ذرات رسی نسبت به جدا شدن به وسیله قطرات باران و حرکت از محل خود مقاومت می‌کنند. در مقابل، مقاومت ذرات سیلت و شن ریز هم از نظر اندازه و هم از نظر چسبندگی نسبتاً کم است و مواد درشت‌تر و ریزتر از آن به دلیل اندازه و چسبندگی در برابر فرسایش مقاومتند (Wischmeier and Smith, 1978; Morgan, 2005).

مقدار و نوع پوشش گیاهی از دیگر عوامل اصلی مؤثر بر اتصال است که بر فرایندهای جدا شدن، حمل و رسوبگذاری ذرات تأثیر می‌گذارد (Zanandrea *et al.* 2021; Li *et al.* 2021; López-Vicente *et al.* 2021; Llana *et al.* 2019). پوشش گیاهی تأثیر قطرات باران را کاهش می‌دهد و مقدار نفوذ آب در خاک را افزایش می‌دهد (Morgan, 2005). رویدادهای بارندگی با شدت بالا، به جاری شدن مقدار زیادی رواناب در زمین‌های بدون پوشش منجر می‌شود، اما زمانی که رواناب به مناطقی با پوشش گیاهی می‌رسد، به خاک نفوذ کرده و اتصال را کاهش می‌دهد (Bracken and Croke, 2007). علاوه بر این، حیوانات حفار تأثیر متفاوتی بر اتصال دارند. گرازهای وحشی با بهم زدن سطح خاک، ذرات را برای جابجایی آماده می‌کنند، در صورتی که لانه مورچه‌ها به نفوذ عمیق و قطع شدن جریان سطحی کمک می‌کنند (Keesstra *et al.* 2018).

انسان با ایجاد تغییرات در سطح زمین و با تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز که کاربری کشاورزی دارند، بر اتصال اثر می‌گذارد. به دلیل تأثیرات قابل توجه فرسایش خاک و تولید رسوب بر بهره‌وری خاک زمین‌های کشاورزی و تأثیرات احتمالی مضر خارج از عرصه آن‌ها، تحقیقات بسیاری (Sun *et al.* 2021; Nouwakpo *et al.* 2021; Wang *et al.* 2021; Liu *et al.* 2021; Liu *et al.* 2020; He *et al.* 2002; Ventura *et al.* 2008; Houben, 2016) بر فرایندهای فرسایش خاک در دامنه‌های زراعی انجام شده است که نقش عامل انسانی در تولید رسوب در زمین‌های زراعی را اثبات می‌کند. متأسفانه به جنبه‌های مختلف تأثیرات انسانی، در فرایندهای مؤثر دامنه‌ها از طریق ایجاد زیرساخت‌های کشاورزی (جاده‌های خاکی، خاک‌ریزه‌ها)، عمل خاکورزی و مدیریت زمین که باعث افزودن غیرطبیعی رسوبات به جریان‌های دامنه‌ای شده است، کمتر توجه شده است (McCool and Williams, 2008). بررسی اتصال رسوب از مقیاس دامنه به حوزه آبخیز نشان می‌دهد، فعالیت‌های انسانی مانند تغییرات پوشش زمین (جنگل‌زدایی و شهرنشینی)، مهندسی توپوگرافی (سکوبندی)،

جاده‌ها، کانال‌ها، سدها و خاک‌ریزها)، زهکش‌های مصنوعی و نهایتاً تغییرات کاربری اراضی کشاورزی شامل خاک‌ورزی، از طریق تأثیر بر تولید رسوب و رواناب، بر اتصال رسوب مؤثر است (Heckmann *et al.* 2018).

### انواع اتصال رسوب

اتصال رسوب دارای دو نوع ساختاری و کارکردی است که نوع ساختاری آن، ارتباط و عدم ارتباط فیزیکی بین واحدهای چشم‌انداز را با یکدیگر در مقیاس زمانی و مکانی و یا هر دو بررسی می‌کند (Najafi *et al.* 2014). اتصال کارکردی فرایندهای فرسایش و تولید رسوب، نحوه برداشت، انتقال و انباشت رسوب را نیز در اجزای مختلف حوزه آبخیز در مقیاس زمانی و مکانی مناسب مدنظر در نظر می‌گیرد (Turley *et al.* 2021). به عبارت دیگر، اتصال ساختاری دارای اساس سخت افزاری است و به موارد فیزیکی آبخیز مانند شیب، شکل دامنه و فاصله از آبراهه مربوط می‌شود. در حالی که اتصال کارکردی، فرآیندمحور است که در آن فارغ از موارد فیزیکی حوزه آبخیز، فرایندهای پدیدهای مورد نظر مانند میزان تولید فرسایش ناشی از نوع خاک، فرسایش‌پذیری خاک، میزان نفوذ آب در خاک، فرسایش‌پذیری باران و نوع کاربری اراضی و تعیین فرایندهای منجر به ایجاد و ذخیره رسوب در مسیر انتقال رسوب، مورد بررسی قرار می‌گیرد (Najafi *et al.* 2014). مفاهیم اتصال ساختاری و کارکردی در ترسیم الگوهای مکانی توزیع رسوب، سرازیر شدن رسوب<sup>۱</sup> و مناطق تجمع و تخلیه رسوب<sup>۲</sup> مفید هستند. علیرغم افزایش قابل توجه تحقیقات اتصال رسوب، بیش‌تر مطالعات تا به امروز بر اتصال ساختاری (فیزیکی) متمرکز بوده و توجه کمتری به اتصال کارکردی (مبتنی بر فرایند) شده است (Heckmann *et al.* 2018) که برای کمی‌سازی اتصال رسوب، روش‌های مختلفی از جمله شاخص‌ها به کار گرفته شده است (Najafi *et al.* 2021).

### شاخص‌های اتصال

برای تعیین کمیت و ارزیابی اولیه از اتصال در مقیاس کرت، دامنه و حوزه آبخیز می‌توان از توابعی مانند بودجه رسوب، نسبت تحویل رسوب، مدل‌های موجود، نظریه گراف و شاخص‌های متفاوتی که برای ارزیابی اتصال ایجاد شده‌اند، بهره برد (Heckmann *et al.* 2018; Borselli *et al.* 2008; Fressard and Cossart, 2019; Di Stefano and Ferro, 2018; Heckmann *et al.* 2014). اغلب در مطالعات برای ارزیابی اتصال رسوب و کمی‌سازی آن، از شاخص‌ها استفاده می‌شود. شاخص‌های اتصال رسوب، راهکاری ضروری برای حرکت از ارزیابی کیفی به ارزیابی (نیمه) کمی انتقال رواناب و رسوبات در یک سامانه آبخیز هستند که از طریق سه رویکرد کلی انجام می‌شود که شامل شاخص‌های مبتنی بر رستر<sup>۳</sup>، رویکرد سطح آبخیز مؤثر<sup>۴</sup> و ارزیابی اتصال مبتنی بر شیء و شبکه<sup>۵</sup> است (Heckmann *et al.* 2018).

شاخص‌های مبتنی بر رستر بر مفهوم منطقه مشارکت‌کننده‌ی تولید رسوب<sup>۶</sup> تأکید دارند و به این معنی است که همه مناطق تولیدکننده رواناب (مناطق فعال) با شبکه آبراهه‌ها همراه نمی‌شوند و بنابراین مشارکت‌کننده هستند (Borselli *et al.* 2008). به عبارت دیگر، در این رویکرد تمامی مناطقی که در تولید رواناب مؤثر هستند، چه مناطقی که به آبراهه‌ها می‌رسند و یا به آبراهه متصل نمی‌شوند، را در نظر می‌گیرد. از جمله شاخص‌های اتصال در رویکرد مبتنی بر رستر، می‌توان به شاخص‌های<sup>۷</sup> SPI<sup>۷</sup>، DEBAS<sup>۸</sup> (Marchi and Dalla Fontana, 2005)، Slope-area (Wilson and Gallant, 2000) و<sup>۹</sup> IC (Borselli *et al.* 2008) و شکل‌های تغییریافته‌ی IC اشاره کرد. شاخص‌های ذکر شده می‌توانند بسته به اجزاء موجود در آن‌ها، ساختاری، کارکردی و یا هر دو باشند.

در رویکرد دوم (ECA)، هدف ترسیم و در نظر گرفتن بخشی از حوزه آبخیز است که به طور مؤثر به انتقال رسوب و تولید رواناب از منابع مختلف به آبراهه کمک می‌کند. در این رویکرد فقط مناطقی که در آن‌ها رواناب تولید شده به آبراهه‌ها متصل می‌شوند، را بررسی می‌کند. به این معنی که برخی از مناطقی که در تولید رواناب نقش دارند ولی در چاله‌ای متوقف و یا نفوذ می‌کنند و به آبراهه‌ها ختم نمی‌شوند را در نظر نمی‌گیرد. نتیجه رویکرد ECA، تعیین مکان و وسعت سطح آبخیز مؤثر در تولید رواناب و رسوب است که مستقیماً با

1 - Sediment cascades

2 - Sediment aggradation and degradation areas

3 - Raster-based connectivity indices

4 - Effective catchment area approaches (ECA)

5 - Object- and network-based connectivity assessment

6 - Sediment contributing area

7 - Simple Stream Power Index (SPI)

8 - stream power DEFicit on BASin slopes (DEBAS)

9 - Index of connectivity

استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی جریان بر روی DEMها به دست می‌آید و اندازه‌گیری یا شاخص خاصی از اتصال همان‌طور که در بالا تعریف شد، وجود ندارد (Babbie, 2013). بیشتر شاخص‌های اتصال بر اساس داده‌های رستری هستند و در بسیاری از آن‌ها اتصال برای هر یک از سلول‌های رستر محاسبه می‌شوند. با این حال، اتصال (عدم اتصال) نه در سلول رستری، بلکه در مقیاس لندفرم<sup>۱</sup> عمل می‌کند و سلول‌های رستر به تنهایی هیچ اهمیت ژئومورفولوژیکی ندارند. به همین علت در رویکرد سوم، اتصال هیدرولوژیکی و رسوبی را با در نظر گرفتن بخش‌های مختلف زمین مانند لندفرم‌ها (مخازن رسوب، مناطق حاشیه‌ای، بندها)، مزارع کشاورزی، رودخانه‌ها و بخش‌های یک دره، به‌طور پیوسته و شیء نگر مورد توجه قرار می‌دهند و اجزای زمین را به جهت استفاده از سلول‌های رستر با داشتن ویژگی‌های توپوگرافی تفکیک<sup>۲</sup> نمی‌کنند (Heckmann et al. 2018).

### علت توسعه شاخص اتصال رسوب

توسعه شاخص‌های اتصال رسوب و استفاده‌ی هر چه بیشتر از آن به دلایل مختلفی اتفاق افتاده که در این مقاله علل مهم آن بیان می‌شود. مدل‌ها عموماً فرسایش ناخالص را تخمین می‌زنند و دشواری اندازه‌گیری مستقیم نسبت تحویل رسوب (Bayat and Moradi, 2014) و آسان بودن استنباط اتصال در مقایسه با اندازه‌گیری رسوب‌دهی در خروجی یک زیرحوزه آبخیز، اولین علت توسعه شاخص‌های اتصال است. علت دیگر این‌که، رفتار غیر قابل پیش‌بینی حوزه‌های آبخیز در آینده یا در مناطقی که اندازه‌گیری‌های مناسب در دسترس نیست و نیاز به پیش‌بینی دارد، موجب افزایش کاربرد شاخص‌های اتصال شده است (Heckmann et al. 2018).

شاخص اتصال به‌عنوان نوعی اندازه‌گیری ترکیبی تعریف شده است که چندین مشاهده خاص را خلاصه و مرتب کرده و بُعد کلی‌تری را نشان می‌دهد. به‌طور خاص، شاخص اتصال شامل چندین متغیر است که از نظر مفهومی، الگوی مکانی و شدت جریان رسوب در یک چشم‌انداز را تبیین می‌کند (Babbie, 2013). با این حال، اندازه‌گیری برخی از این متغیرها در مقیاس‌های مکانی و زمانی مورد نیاز دشوار است. گاهی نیز برای بررسی کمی اتصال، انواع شاخص‌های پیچیده ایجاد شده است که پیچیدگی مفهوم اتصال را منعکس می‌کنند. تلاش‌ها برای کمی کردن اتصال رسوب با توجه به پیچیدگی دامنه و حوزه آبخیز کافی نیست و مستلزم پیشرفت در توسعه شاخص‌های مناسب و بررسی مجدد شاخص‌های موجود است (Heckmann et al. 2018).

### معرفی شاخص پیوستگی IC و اجزای آن

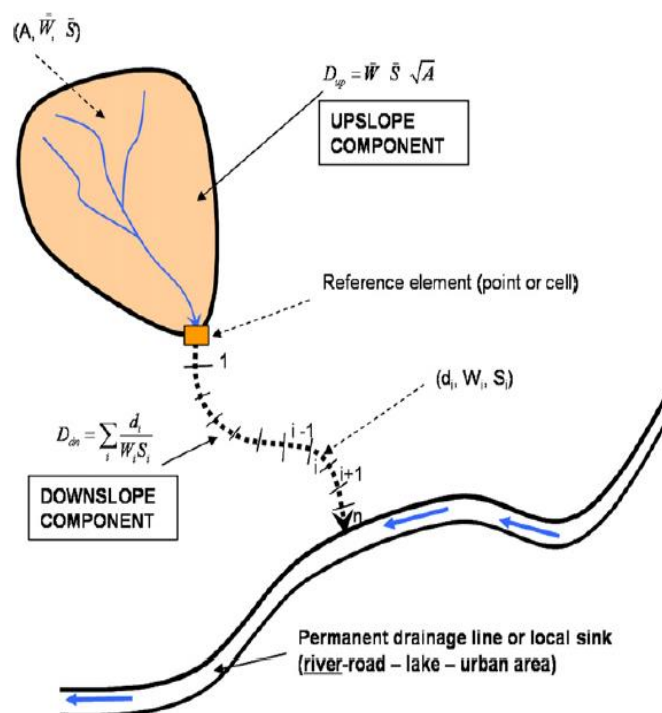
افزایش دسترسی به داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا در سال‌های اخیر و نیاز به درک الگوهای اتصال رسوب بین واحدهای چشم‌انداز، باعث شده تا شاخص‌های ژئومورفومتریک اتصال رسوب توسعه پیدا کنند. یکی از این شاخص‌ها، شاخص اتصال IC در زمینه مطالعات فرسایش خاک است و در حوزه آبخیز با کاربری غالب کشاورزی در ایتالیا توسط Borselli et al. (2008) معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. IC، شاخص اتصال ساختاری، با رویکرد مبتنی بر رستر است و بر تأثیر توپوگرافی بر اتصال رسوب، با در نظر گرفتن برخی از اطلاعات مربوط به سطح زمین تمرکز دارد و برای نشان دادن نقش فرایندهای اتصال رسوب کارکردی توسط Borselli et al. (2008) طراحی نشده است (Heckmann et al. 2018). شاخص IC از دو بخش عامل بالادست و پایین‌دست تشکیل می‌شود. برای محاسبه شاخص، فاصله از مخزن رسوب (یا انتهای دامنه یا محل اتصال به آبراهه اصلی)، ویژگی‌های مسیر حرکت رسوب، عوامل مؤثر بر جریان تجمعی رواناب و شرایط محلی در هر قسمت از جریان به‌صورت عامل وزنی W در نظر گرفته می‌شود (Borselli et al. 2008; Cantreul et al. 2018). جزء بالادست بیان می‌کند احتمال انتقال ذرات رسوب به وجود یا عدم وجود رواناب برای انتقال آن ذره بستگی دارد، که می‌تواند رواناب در محل تولید شود و یا از بالادست ناشی شود. جزء پایین‌دست نیز بیان می‌کند که احتمال رسیدن ذره به نزدیکترین مخزن بستگی به فاصله تا مخزن، ویژگی‌های مسیر و روانابی که در طول مسیر پایین‌دست تولید و یا از مسیر خارج می‌شود، دارد (Borselli et al. 2008).

شاخص اتصال (IC) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$IC_k = \log_{10} \left( \frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left( \frac{\overline{W}_K \overline{S}_K \sqrt{A_K}}{\sum_{i=k,nk} \frac{d_i}{W_i S_i}} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن،  $D_{up}$ : جزء بالادست،  $\overline{W}_K$ : میانگین عامل وزنی سطح مشارکت بالادست دامنه (بدون بعد)،  $\overline{S}_K$ : میانگین تندی شیب سطح مشارکت بالادست دامنه (متر بر متر)،  $A_k$ : سطح مشارکتی بالادستی (متر مربع)،  $D_{dn}$ : جزء پایین دست،  $d_i$ : طول مسیر به سمت پایین دست دامنه در سلول  $i$  ام نقشه شبکه‌ای مورد استفاده (به متر)،  $W_i$ : عامل وزنی سلول  $i$  ام (بدون بعد)،  $S_i$ : تندی شیب مربوط به سلول  $i$  ام (متر بر متر) است. اندیس  $k$  نشان می‌دهد که هر سلول مقدار IC خود را دارد که بر اساس رابطه ۱ محاسبه شده است (Borselli *et al.* 2008; Cantreul *et al.* 2018; Zanandrea *et al.* 2021). حداقل مقدار  $A$  برابر است با سطح سلول مرجع (اندازه سلول) است. برای جلوگیری از نتایج غیرواقعی در IC، حداقل و حداکثر شیب  $0.005$  و  $1$  متر بر متر در معادله در نظر گرفته شده است (Cavalli *et al.* 2021; Arabkhedri *et al.* 2013). اجزای شاخص اتصال (IC) به صورت شماتیک در شکل ۱ در یک دامنه نشان داده شده است.

شاخص اتصال مقادیر بین مثبت تا منفی بی‌نهایت را در برمی‌گیرد و مقادیر بزرگتر IC افزایش اتصال رسوب را نشان می‌دهد. برای محاسبه IC و تهیه نقشه‌ی آن از ابزاری که در نرم افزار Arc/GIS10.7.1 Arc/Connectivity Toolbox for ArcGIS10.3 قابل افزودن است و توسط Cavalli *et al.* (2013) منتشر شده است، استفاده می‌شود. ورودی این ابزار شامل مدل رقومی از نظر هیدرولوژیکی تصحیح شده با حذف چاله‌ها، اندازه‌ی پیکسل در DEM ورودی و عامل وزنی است که Cavalli *et al.* (2013) از شاخص زبری<sup>۲</sup> به‌عنوان عامل وزنی اولیه استفاده کرده‌اند. شاخص اتصال بسته به نوع عامل وزنی انتخابی، می‌تواند شاخص ساختاری و یا ساختاری-کارکردی در نظر گرفته شود. به‌طور مثال با در نظر گرفتن زبری سطحی به‌عنوان عامل وزنی، شاخص اتصال ساختاری و اگر عامل وزنی فرساینده‌ی باران در نظر گرفته شود، شاخص اتصال ساختاری-کارکردی است. عامل وزنی به‌عنوان یک جزء مهم در شاخص اتصال رسوب، جداگانه بحث خواهد شد.



شکل ۱- اجزای بالادست (منبع رسوب) و پایین دست (مخزن رسوب) رابطه شاخص IC و متغیرهای مربوط به آن در دامنه (برگرفته از Borselli *et al.* 2008)

### مقیاس مکانی اتصال رسوب

مقیاس مکانی از دو جنبه‌ی وضوح مکانی<sup>۳</sup> و اندازه منطقه‌ی مرجعی<sup>۴</sup> که برای آن شاخص اتصال محاسبه می‌شود، بررسی شده است (Najafi *et al.* 2021). وابستگی اتصال رسوب به وضوح مکانی و اطلاعات توپوگرافی سطح خاک (Balaguer-Puig *et al.* 2017) به

1 - Pits Removed  
2 - Roughness Index (RI)  
3 - Resolution  
4 - Area of reference





این علت است که اکثر عامل‌های IC از طریق شبکه‌ی داده‌های زمینی<sup>۱</sup> با استفاده از مدل رقومی ارتفاع<sup>۲</sup> (DEM) محاسبه می‌شوند (Heckmann *et al.* 2018).

تعیین وضعیت توپوگرافی با استفاده از تهیه مدل رقومی ارتفاع در مقیاس‌های حوزه آبخیز، دامنه، کرت صحرایی و آزمایشگاهی، با تجهیزات مختلفی صورت می‌گیرد (Florinsky, 2016). مقیاس حوزه آبخیز از تصاویر ماهواره‌ای و مجموعه داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا به کمک لیزر اسکن هوایی<sup>۳</sup> متصل به هواپیما و یا پهپاد، و در مقیاس دامنه و زیرحوزه آبخیز با تکنیک‌های اسکن لیزری زمینی<sup>۴</sup> یا فتوگرامتری دیجیتال مبتنی بر پهپاد به‌عنوان مثال الگوریتم‌های ساختار حرکت مینا<sup>۵</sup> که برای پردازش تصاویری که با استفاده از پهپاد به کار می‌رود، به دست می‌آید (Heckmann *et al.* 2018). مقیاس کوچک در اندازه کرت صحرایی یا آزمایشگاهی، داده‌های میکروتوپوگرافی سطحی خاک با تکنیک‌های تماسی و غیرتماسی تهیه می‌شود (Balaguer-Puig *et al.* 2017). تکنیک‌های تماسی به ابزارهای خاصی مانند زنجیر غلتکی (Saleh, 1993) یا پین متر (Jester and Klik, 2005) نیاز دارند و تکنیک‌های غیرتماسی به استفاده از نوعی دستگاه الکترونیکی بستگی دارند که شامل فتوگرامتری (Hohle, 2009)، انواع اسکنرهای لیزری (Favey *et al.* 2003) و پروفیل‌مترهای لیزری (Bertuzzi *et al.* 1990) می‌شوند که بسته به امکانات در دسترس و مقیاس مورد نظر برای بررسی توپوگرافی یکی از روش‌های ذکر شده انتخاب می‌شود که امروزه استفاده از روش‌های فتوگرامتری (Laburda *et al.* 2021) و LiDAR (Turley *et al.* 2021) گسترش قابل توجهی پیدا کرده است.

وضوح مکانی به معنی اندازه پیکسل در مدل رقومی ارتفاع<sup>۶</sup> و یا زمین<sup>۷</sup> مورد استفاده است که منبع اطلاعاتی مهمی برای تعیین اتصال ساختاری است (Heckmann *et al.* 2018). اندازه پیکسل مدل رقومی ارتفاع در برخی از مطالعات (Gerami *et al.* 2022; Wang and Zhang, 2022; Zingaro *et al.* 2021; Lopez-Vicente *et al.* 2021; Cantreul *et al.* 2018; Kedich *et al.* 2021; Goldin *et al.* 2016; Lu *et al.* 2019; Batista *et al.* 2020; Borselli *et al.* 2008; Grauso *et al.* 2018; Gay *et al.* 2016; Fernández *et al.* 2020; Upadhayay *et al.* 2020; Uber *et al.* 2020; Llana *et al.* 2019; Liu *et al.* 2022; Liu *et al.* 2021; Arabkhedri *et al.* 2021; Zhao *et al.* 2020; Wu *et al.* 2021; Zingaro *et al.* 2019; Lizaga *et al.* 2016; Turley *et al.* 2021; Buter *et al.* 2020; Zandrea *et al.* 2021; Mishra *et al.* 2019; Cavalli *et al.* 2016; Persichillo *et al.* 2018; Andreazzini *et al.* 2021; Ortíz-Rodríguez *et al.* 2017; Foerster *et al.* 2014; Mahoney *et al.* 2020; Najafi *et al.* 2017) در محدوده‌ی یک تا ۷۵ سانتی‌متر (۱، ۲، ۵، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر) و در برخی دیگر (Wang and Zhang, 2022; Zingaro *et al.* 2021; Lopez-Vicente *et al.* 2021; Cantreul *et al.* 2018; Kedich *et al.* 2021; Goldin *et al.* 2016; Lu *et al.* 2019; Batista *et al.* 2020; Borselli *et al.* 2008; Grauso *et al.* 2018; Gay *et al.* 2016; Fernández *et al.* 2020; Upadhayay *et al.* 2020; Uber *et al.* 2020; Llana *et al.* 2019; Liu *et al.* 2022; Liu *et al.* 2021; Arabkhedri *et al.* 2021; Zhao *et al.* 2020; Wu *et al.* 2021; Zingaro *et al.* 2019; Lizaga *et al.* 2016; Turley *et al.* 2021; Buter *et al.* 2020; Zandrea *et al.* 2021; Mishra *et al.* 2019; Cavalli *et al.* 2016; Persichillo *et al.* 2018; Andreazzini *et al.* 2021; Ortíz-Rodríguez *et al.* 2017; Foerster *et al.* 2014; Mahoney *et al.* 2020; Najafi *et al.* 2017) در محدوده‌ی یک تا ۲۵۰ متر (یک، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۴، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر) به کمک ابزار تصویربرداری شامل تصاویر هوایی، تصاویر رادار<sup>۸</sup> SRTM، پهپاد، تصاویر ماهواره‌ای، LiDAR و لیزر اسکنر زمینی و هوایی بوده است. اغلب مطالعات انجام شده، بسته به سطح مورد پژوهش، هدف بررسی عوارض جزئی، امکانات تصویربرداری، صحت نسبی مدل رقومی ارتفاع و سرعت پردازش اطلاعات، اندازه پیکسل‌های مختلفی را مورد استفاده قرار داده‌اند. در صورت امکان اندازه پیکسل باید به گونه‌ای انتخاب شود که کوچکترین اندازه پیکسل موجود باشد و در مقایسه با اندازه پیکسل‌های بزرگتر اطلاعات بیشتری تولید کند.

مفهوم اتصال و مقیاس اندازه‌گیری آن به هم مرتبط هستند، زیرا بر اساس مقیاس مورد پژوهش، با تغییر اتصال، مقدار انتقال آب و رسوب نیز تغییر می‌کند (Keesstra *et al.* 2018). اتصال را می‌توان در مقیاس‌های مختلف مانند کرت، دامنه و حوزه آبخیز مورد بررسی قرار داد. دامنه‌ها در سیستم آبخیز نقش کلیدی دارند که پیش‌بینی تولید رسوب در مقیاس دامنه از چالش‌های اصلی تحقیق‌های ژئومورفولوژی است، به این علت که دامنه‌ها محل آغازین تولید و انتقال رسوب در فرایند فرسایش و تحویل رسوب به پایین‌دست هستند (Poesen, 2018). ویژگی‌های هر دامنه در میزان تحویل رسوب خالص به رودخانه‌ها و بستر دره‌ها نقش موثری دارند، زیرا بر ته‌نشست رسوبات و اتصال اثر می‌گذارند (Houben, 2008). سهم دامنه‌ها در تأمین رسوب خروجی از حوزه آبخیز به خوبی روشن نشده است و بسیاری از مطالعات اتصال رسوب، در درجه‌ی اول به درک چگونگی اتصال رسوب مانند حرکت رسوب بین دامنه و آبراهه یا در یک شبکه جریان می‌پردازد (Wohl *et al.* 2019).

1 - Geodata grided  
2 - Digital Elevation Model (DEM)  
3 - Light Detection and Ranging (LiDAR)  
4 - Terrestrial Laser Scanning (TLS)  
5 - Structure-from-Motion (SFM)  
6 - Digital Elevation Model (DEM)  
7 - Digital Terrain Model (DTM)  
8 - Shuttle Radar Topographic Mission



اتصال رسوب در مقیاس حوزه آبخیز از پیوند اجزای تشکیل دهنده‌ی حوزه آبخیز مانند دامنه و آبراهه با توجه به انتقال رسوب پدید می‌آید که شامل اتصال عرضی (اتصال در دامنه و دامنه به آبراهه)، اتصال طولی (یعنی درون شبکه آبراهه) و اتصال عمودی (اتصال سطحی به زیر سطح) است (Poepl et al. 2020; Keesstra et al. 2018; Bracken et al. 2015; Fryirs et al. 2007). جریان مداوم رواناب و توانایی آن در انتقال مواد بین بالادست و پایین‌دست و مسیره‌های جریان پیوسته که می‌تواند عبور جریان آب را تضمین کند، موجب اتصال بالای طولی در آبراهه‌ها می‌شود (Zhang et al. 2021). اتصال‌های عرضی، طولی و عمودی در مقیاس حوزه آبخیز با هم ترکیب می‌شوند یا برهم کنش دارند و انتقال رسوب به خروجی حوزه آبخیز را تعیین می‌کنند. همچنین حوزه آبخیز را می‌توان به اجزایی تقسیم کرد و اتصال را در آن‌ها مورد بررسی قرار داد. برای مثال پیکسل‌های DEM، لندفرم‌ها و محدوده‌های مشخص‌شده بر روی نقشه ژئومورفولوژی، شیب، واحدهای هیدرولوژیکی و زیرحوزه‌های آبخیز اجزای پیشنهادی هستند (Heckmann et al. 2018).

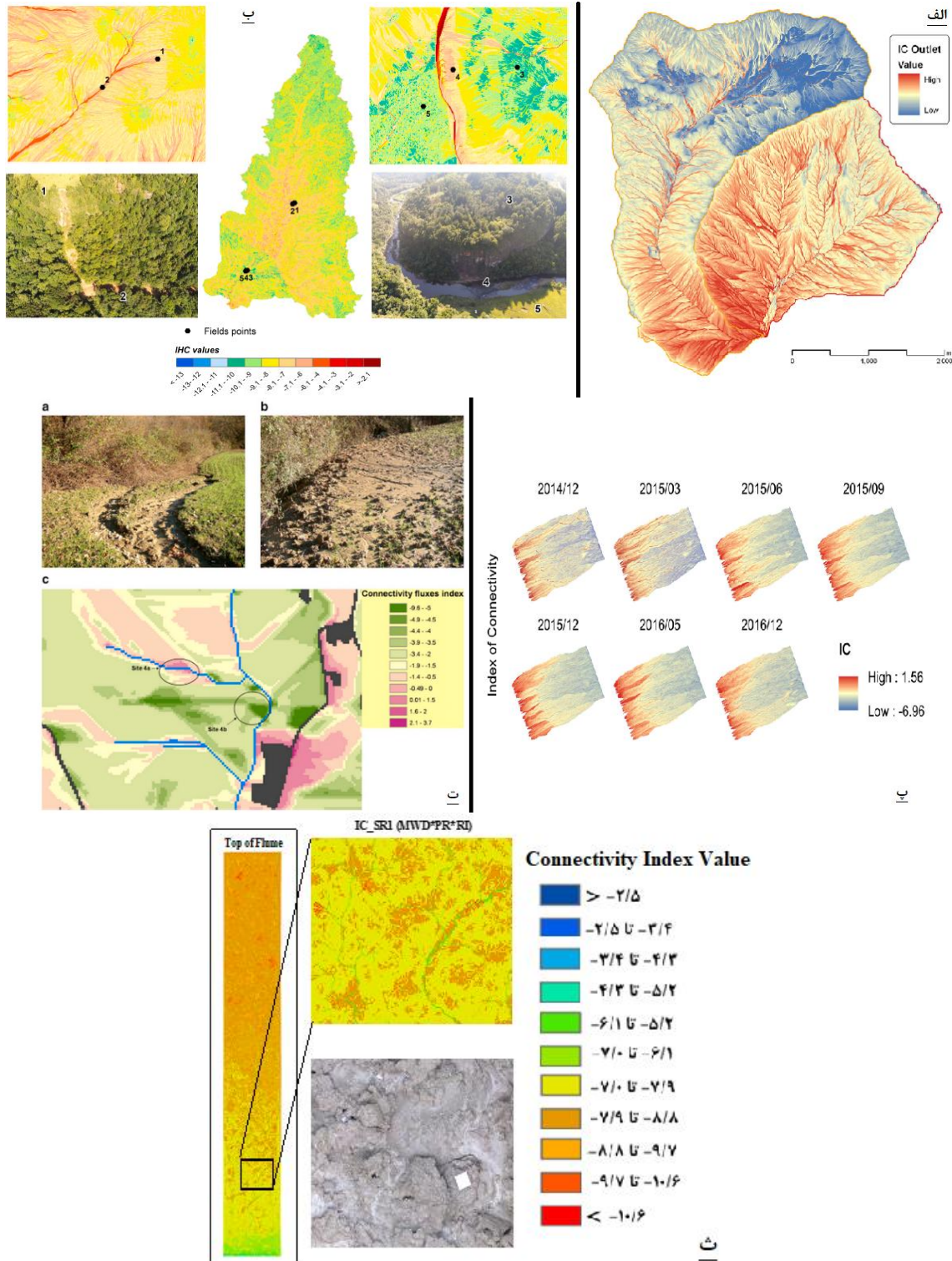
پژوهشگران به بررسی شاخص اتصال رسوب در مناطق مختلف پرداختند و الگوهای مکانی مختلفی از اتصال ساختاری را با توجه به ویژگی مناطق مورد بررسی منعکس کرده‌اند (Gerami et al. 2022; Wang and Zhang, 2022; Liu et al. 2022; Zhang et al. 2021; Andreazzini et al. 2021; Turley et al. 2021; Zanandrea et al. 2021; Upadhayay et al. 2020; Wu et al. 2021; Gay et al. 2016; Baartman et al. 2013; Najafi et al. 2017).

اغلب محققین با تأکید بر وابستگی IC به توپوگرافی، بیان کردند که بالاترین اتصال رسوب در مناطق با شیب زیاد دیده شده است، زیرا درصد شیب با تأثیر بر میزان انرژی در دسترس برای جریان سطحی، سرعت جریان را افزایش می‌دهد و بر اتصال ساختاری اثر می‌گذارد (Liu et al. 2022; Turley et al. 2021; Zhang et al. 2021; Heckmann et al. 2018; Reaney et al. 2014). با افزایش پیچیدگی و ناهمواری‌های سطح زمین<sup>۱</sup>، اتصال رسوب کاهش و ارتباط غیرخطی بین پیچیدگی مورفولوژی زمین و انتقال رسوب وجود دارد (Baartman et al. 2013). در پژوهشی دیگر (Wang and Zhang (2022) نشان دادند که تغییرات مکانی IC توسط پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی کنترل می‌شود. (Jing et al (2022) در بررسی اثر جاده و شبکه آبراهه‌ها بر روی اتصال رسوب بیان کردند که اتصال رسوب با افزایش فاصله از جاده کاهش می‌یابد و تغییر در مسیر جریان به علت وجود جاده، منجر به افزایش اتصال می‌شود. مطالعه‌ی اتصال در مقیاس حوضه توسط Liu et al (2022) نشان داد که بالاترین مقدار IC در طول آبکندها بود و مقادیر پایین‌تر از میانگین در دامنه‌ها دیده شد که این نتیجه بیان‌کننده ظرفیت بالقوه بیشتر تولید رسوب در آبکندها نسبت به دامنه‌ها است. نتایج این محققین نشان داد که الگوی توزیع مکانی و نوع کاربری زمین نه تنها بر جدا شدن رسوب، بلکه بر مسیر انتقال بالقوه، فاصله و سرعت انتقال رسوب نیز تأثیر می‌گذارد. مناطق با اتصال کم را می‌توان به وجود تغییرات در زمین و پوشش گیاهی در منظر با شیب کم نسبت داد که به‌طور مؤثر عملکرد هیدرولوژیکی دامنه‌ها را تضعیف و مانع از انتقال رسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-الف و پ مشاهده می‌شود، مقدار کم‌تر IC در بالادست حوزه آبخیز (الف) و دامنه (ب) صورت گرفته است که به معنی احتمال کم‌تر رسیدن ذرات فرسایش یافته به خروجی است. به عبارت دیگر، می‌توان این‌گونه بیان کرد که سهم زیادی از ذرات فرسایش یافته در همان محل ترسیب می‌شوند. در مقابل، با حرکت به سمت خروجی حوزه آبخیز یا دامنه، مقدار IC بیش‌تر می‌شود که به معنی احتمال بیش‌تر انتقال ذرات فرسایش یافته به خروجی است. علت آن است که هرچه جریان رواناب راحت‌تر به خروجی برسد، منبع و مخزن رسوب به‌هم متصل می‌شوند، از این‌رو، شاخص اتصال رسوب در مخزن بیش‌تر است. علاوه بر این، در مسیر آبراهه‌ها به علت سهولت در جابه‌جایی رسوبات، اتصال رسوب مقدار بالایی دارد (شکل ۲-ب و ت a) و در نقاطی که رسوبگذاری صورت گرفته است (شکل ۲-ت b)، مقدار IC کمتر است. (Gerami et al (2022) در مطالعه‌ی بررسی پیوستگی رسوب در فلوام آزمایشگاهی نیز نشان دادند، مقدار کم‌تر IC در بالای فلوام و به سمت خروجی فلوام مقدار IC بیشتر می‌شود.

در خصوص ارتباط مستقیم میزان بارش و اتصال، نتایج تحقیقات Zanandrea et al (2021) نشان دادند که میزان ارتباط از نظر مکانی به منطقه تحت تأثیر بارش بستگی دارد. مناطق جنگلی واقع در بخش پایینی حوزه آبخیز نزدیک به رودخانه اصلی، تنها زمانی که تحت تأثیر رویدادهای بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر در ساعت و رطوبت پیشین بالا قرار می‌گیرند، دارای مقدار اتصال بالا بوده‌اند. همچنین Gay et al (2016) بیان کردند عامل‌های توپوگرافی موجود در IC، مانند شیب، طول مسیر و ضریب زبری<sup>۲</sup>، اتصال رسوب واقعی را در اراضی پست به خوبی منعکس نمی‌کنند و عامل‌های مورد استفاده در محاسبه اتصال رسوب در تراس‌ها، دره‌های V شکل و دشت‌های سیلابی باید با یکدیگر متفاوت باشند.

1 - Morphological Complexity

2 - Roughness Index (RI)



شکل ۲- تصاویری از حوزه آبخیز، دامنه و فلوام آزمایشگاهی در مناطق مختلف برای نشان دادن تغییرات مکانی IC، الف: حوزه آبخیز کوهستانی (Cavalli *et al.* 2013)، ب: حوزه آبخیز کوهستانی (Zanandrea *et al.* 2021)، پ: دامنه بدون پوشش (Lu *et al.* 2019)، ت: حوزه آبخیز کشاورزی (Borselli *et al.* 2008) و ث: فلوام آزمایشگاهی (Gerami *et al.* 2022)

### مقیاس زمانی اتصال رسوب

مقیاس زمانی اتصال مربوط به بزرگی رویدادها، فراوانی فرایندهای انتقال رسوب، تغییرات کاربری اراضی و مدیریت زمین در طول زمان است. رویدادهای بزرگ و یا چند رویداد پی در پی با غلبه بر آستانه‌های فیزیکی و زیستی می‌توانند مسیرهای جریان که پیونددهنده‌ی دامنه‌ها به مخازن رسوب هستند، را ایجاد کنند (Borselli *et al.* 2008). بنابراین، اتصال رسوب، نه تنها به ویژگی‌های ساختاری ذاتی،

مانند توپوگرافی، ویژگی‌های مرتبط با خاک، و الگوی چشم‌انداز که تعیین‌کننده سرعت و هم‌گرایی/واگرایی جریان هستند، بستگی دارد، بلکه به محرک‌هایی مانند آتش‌سوزی (Fernández et al. 2020)، تغییرات توپوگرافی در اثر سکوبندی (Llena et al. 2019)، شدت و مدت بارندگی، فعالیت‌های انسانی و تغییرات اتصال بین یک رویداد بارندگی تا چندین سال نیز مرتبط است (Liu et al. 2022).

تعداد کمی از مطالعات اتصال رسوب، تغییرات زمانی را بررسی کرده‌اند (Liu et al. 2022; Liu et al. 2021; Zandrea et al. 2021; Fernández et al. 2020; Wu et al. 2021; Zhao et al. 2020; Lu et al. 2019; Llena et al. 2019; Cavalli et al. 2017; Goldin et al. 2016; Najafi et al. 2017; Lizaga et al. 2016; al. 2016) و بیشتر مطالعات، تغییرات مکانی اتصال را مورد ارزیابی قرار می‌دهند (Williams et al. 2016; Cislighi and Bischetti, 2019). (Najafi et al. 2021). دلیل اصلی این تفاوت را به ویژگی‌های ایستای اتصال رسوب ساختاری مربوط می‌دانند، که بررسی تغییرات زمانی در این شکل از اتصال را در مقیاس‌های زمانی کوتاه بی‌اهمیت می‌کند. همچنین به دلیل ماهیت مبتنی بر فرایند اتصال رسوب کارکردی، پتانسیل بالایی برای تحقیقات در مقیاس زمانی مختلف (مبتنی بر رویداد، ماهانه، فصلی و سالانه) وجود دارد، اما مشکلات ارزیابی اتصال کارکردی منجر به کمبود کلی چنین مطالعاتی می‌شود. Heckmann et al. (2018) بیان کردند که اتصال ساختاری در طول زمان تغییر اساسی نمی‌کند. در برخی منابع مقدار تغییرات زمانی IC را ۲۵ درصد پس از گذشت یک سال از آتش‌سوزی (Fernández et al. 2020)، ۲۲ درصد در اثر تغییرات پوشش گیاهی و ۳۵ درصد در اثر تغییرات توپوگرافی با سکوبندی به ترتیب در مدت ۳۳ و ۵۳ سال (Llena et al. 2019) و حدود شش درصد تغییرات پوشش گیاهی در طی ۱۴ سال (Liu et al. 2021) ذکر کرده‌اند. البته باید به این نکته توجه شود که مقیاس‌های مکانی و زمانی مستقل از یکدیگر نیستند (Heckmann et al. 2018).

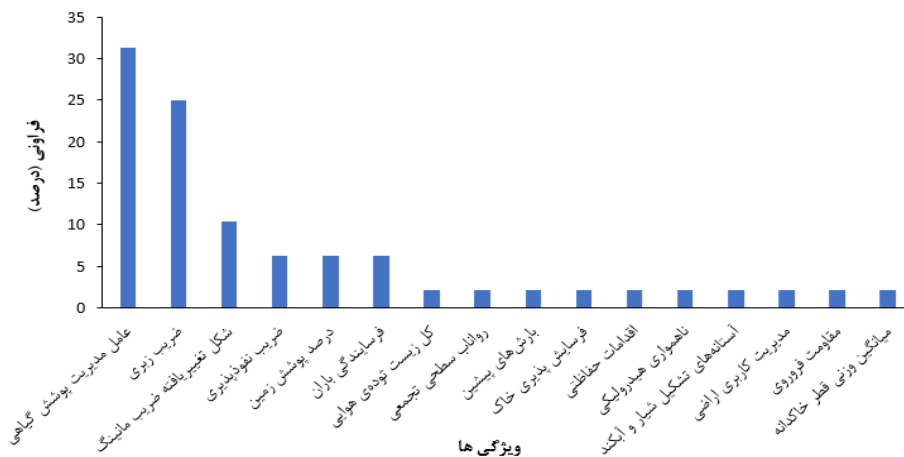
#### عامل وزنی IC

در مطالعه شاخص اتصال، به علت تفاوت در عامل وزنی آن از شکل‌های مختلف این شاخص استفاده شده است. بررسی ۲۵ پژوهش انجام شده در طی بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ که بر عامل وزنی IC تأکید داشتند، نشان می‌دهد که متغیرهای متفاوتی به‌عنوان عامل وزنی W، انتخاب کرده‌اند که در جدول ۱ آمده است. Borselli et al. (2008) ویژگی‌های پوشش گیاهی (نوع، تاج پوشش، لاشبرگ)، خاک (سنگ‌دار بودن، ظرفیت نفوذ، پایداری خاکدانه)، مدیریت کاربری اراضی (عمل خاک‌ورزی و زمان آخرین عملیات خاک‌ورزی)، شاخص‌های ناهمواری هیدرولیکی، آستانه‌های تشکیل شیار و آب‌کند، عامل C در مدل اصلاح شده جهانی فرسایش (Wischmeier and Smith, 1978) را برای عامل وزنی پیشنهاد داده‌اند. محققان بسته به ویژگی‌ها و اطلاعات موجود از محل مورد پژوهش و بسته به مقیاس مورد مطالعه ویژگی‌های متفاوتی را پیشنهاد کرده‌اند که برخی از عوامل مانند فرسایش باران، فرسایش‌پذیری خاک، بارش‌های پیشین، رواناب سطحی تجمعی و نفوذپذیری از جمله عواملی هستند که در اتصال کارکردی در نظر گرفته می‌شوند.

درصد فراوانی هر ویژگی که به‌عنوان عامل وزنی در مطالعات به‌کار رفته در شکل ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که عامل C در مدل USLE با ۳۱ درصد فراوانی و ضریب زبری (RI) با ۲۵ درصد فراوانی، بیش‌ترین استفاده به‌عنوان عامل وزنی را در بین ویژگی‌های مورد استفاده در بین ۲۵ پژوهش مرور شده داشته است. علت می‌تواند سهولت در محاسبه و در دسترس بودن داده‌ی عامل C در مدل USLE و RI بوده است. Borselli et al. (2008) عامل C را برای اراضی کشاورزی و با پوشش مناسب دانسته است و Cavalli et al. (2013) عامل زبری سطحی (RI) را مناسب اراضی بدون پوشش معرفی کرده است. عامل وزنی W، به دلیل ویژگی‌های کاربری اراضی و سطح خاک، مقاومت در برابر رواناب و رسوب را نشان می‌دهد که کارایی تحویل رسوب به رودخانه‌ها را کنترل می‌کند (Liu et al. 2022; Zandrea et al. 2021; Borselli et al. 2008). از این رو، باید خصوصیات سطح که در فرایندهای رواناب و جریان رسوبات در یک حوزه آبخیز یا دامنه مؤثرند، اخذ شود. زبری سطحی، سرعت جریان و تحویل رسوب را کنترل می‌کند که پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک، بسته به محدوده‌ی زمان و مقیاس، در سهم خود در ایجاد زبری و مقاومت در برابر جریان، نقش‌های مختلفی را ایفا می‌کنند. همچنین عامل وزنی، باید موانع حرکت رسوب را نشان دهد و با ویژگی‌های قابل‌مشاهده و قابل‌اندازه‌گیری کاربری، خاک و مدیریت اراضی مرتبط باشد و باید در قسمت‌های بالا و پایین دست شیب هر نقطه مشخص در امتداد هر شیب قابل‌اجرا باشد (Cantreul et al. 2018). پیدا کردن یک عامل با مجموعه این خصوصیات، ساده نیست. علاوه بر این، توسعه چنین عاملی برای تنها هدف از مطالعه اتصال، سال‌ها به مشاهده در محل‌های مورد مطالعه سراسر جهان نیاز دارد. از این رو، بهترین گزینه جایگزین عامل‌های موجود برگرفته از مدل‌های دیگر است (Borselli et al. 2008).

**جدول ۱- عوامل وزنی در مطالعات مختلف**

ردیف	نام محقق	سال	عامل وزنی
۱	Borselli و همکاران	۲۰۰۸	پوشش گیاهی (نوع، تاج پوشش، لاشبرگ)، خاک (سنگ‌دار بودن، ظرفیت نفوذ، پایداری خاکدانه)، مدیریت کاربری اراضی (عمل خاک‌ورزی و زمان آخرین عملیات خاک‌ورزی)، شاخص‌های ناهمواری هیدرولیکی، آستانه‌های تشکیل شیار و آب‌کند، عامل C در مدل RUSLE
۲	Cavalli و همکاران	۲۰۱۳	ضریب زبری
۳	Foerster و همکاران	۲۰۱۴	عامل C مدل USLE
۴	Messenzehl و همکاران	۲۰۱۴	ضریب زبری
۵	Gay و همکاران	۲۰۱۶	عامل C مدل USLE و ضریب نفوذپذیری - هر کدام به طور جداگانه
۶	Goldin و همکاران	۲۰۱۶	شکل تغییر یافته ضریب مانینگ
۷	Cavalli و Trevisani	۲۰۱۶	ضریب زبری
۸	Lizaga و همکاران	۲۰۱۶	کل زیست توده‌ی هوایی و ضریب زبری
۹	Ortiz-Rodríguez و همکاران	۲۰۱۷	عامل C مدل USLE و ضریب زبری - هر کدام به طور جداگانه
۱۰	Najafi و همکاران	۲۰۱۷	عامل C مدل USLE
۱۱	Persichillo و همکاران	۲۰۱۸	شکل تغییر یافته ضریب مانینگ و ضریب زبری - هر کدام به طور جداگانه
۱۲	Cantreul و همکاران	۲۰۱۸	عامل C مدل USLE
۱۳	Llena و همکاران	۲۰۱۹	شکل تغییر یافته ضریب مانینگ
۱۴	Mishra و همکاران	۲۰۱۹	عامل C مدل USLE و ضریب زبری - هر کدام به طور جداگانه
۱۵	Lu و همکاران	۲۰۱۹	ضریب زبری
۱۶	Liu و همکاران	۲۰۲۰	فرسایش‌دهی باران و عامل C مدل USLE
۱۷	Zanandrea و همکاران	۲۰۲۰	شکل تغییر یافته ضریب مانینگ، عامل C مدل USLE و ضریب زبری (RI) - هر کدام به طور جداگانه
۱۸	Upadhayay و همکاران	۲۰۲۰	ضریب زبری و درصد پوشش زمین - هر کدام به طور جداگانه
۱۹	Zhao و همکاران	۲۰۲۰	عامل C مدل USLE
۲۰	Fernández و همکاران	۲۰۲۰	عامل C مدل USLE
۲۱	Zanandrea و همکاران	۲۰۲۱	رواناب سطحی تجمعی، شکل تغییر یافته ضریب مانینگ، بارش‌های پیشین
۲۲	López-Vicente و همکاران	۲۰۲۱	فرسایش‌دهی باران، ضریب زبری، عامل C مدل USLE و نفوذپذیری
۲۳	Arabkhedri و همکاران	۲۰۲۱	عامل C مدل USLE
۲۴	Liu و همکاران	۲۰۲۲	فرسایش‌دهی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی مدل RUSLE
۲۵	Gerami و همکاران	۲۰۲۲	ترکیب مقاومت فروری، میانگین وزنی قطر خاکدانه و ضریب زبری (RI)



شکل ۳- درصد فراوانی ویژگی‌های عامل وزنی در مطالعات انجام شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲

## دورنمای آینده اتصال رسوب

پژوهش‌های اتصال رسوب با روندی تصاعدی در حال افزایش است. مطالعات اتصال رسوب با چالش‌هایی چند در آینده مواجه است که در ادامه به طور مختصر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱- شناسایی، کمی‌سازی و تهیه الگوی اتصال در یک چشم انداز توسط رویکردهای مختلفی از جمله شاخص اتصال رسوب صورت می‌گیرد که استفاده از این شاخص نیازمند داده‌های پایه، اعتبارسنجی، توانایی تشخیص قطع اتصال، تغییرپذیری اتصال در طول زمان، تشخیص رسوب از اتصال جریان و وضوح نمایش مکان‌های با اتصال بالاتر و یا کمتر است.

۲- چالش بعدی اتصال رسوب، استفاده از عامل وزنی متناسب با سطح اراضی است. بسیاری از مطالعات برای بررسی اتصال، از عوامل وزنی متفاوت به‌عنوان ورودی شاخص اتصال استفاده کرده‌اند. با توجه به پیچیدگی دامنه و حوزه آبخیز، اتصال رسوب نیازمند معرفی عامل وزنی فراگیر است. به طوری که در اغلب شرایط مانند دامنه‌ی با پوشش گیاهی و بدون آن، پاسخگوی تغییرات اتصال رسوب باشد.

۳- محققان باید به‌طور مؤثر وضعیت اتصال و عدم اتصال را بین واحدهای مختلف چشم انداز در مکان و زمان با استفاده از طیف وسیعی از رویکردهای عددی و مدل‌سازی‌ها بررسی کنند.

۴- تأثیر فعالیت‌های انسان بر پیوستگی که باعث تغییر واحدهای منظر می‌شود مانند تغییر در کاربری اراضی و سیستم‌های ژئومورفولوژیکی و افزایش قابل توجه تقاضای انسان برای منابع آبی در آینده، توسط محققان بررسی شود. همچنین لازم است محققان عدم قطعیت‌هایی که در مورد تأثیر شبکه‌های جاده‌ای در جنگل، کشاورزی، مرتع و مناطق مسکونی بر میزان اتصال هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه آبخیز وجود دارد، را بررسی کنند.

۵- تغییرات آب و هوایی همچنین می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر وضعیت اتصال هیدرولوژیکی تأثیر بگذارد که نیازمند بررسی‌های جامع است. به‌طور مثال به دلیل تغییر اقلیم، رویدادهای حدی با ضریب رواناب بالا، افزایش می‌یابد که منجر به اتصال بالا می‌شود.

در خاتمه باید به این نکته توجه نمود که چالش‌های مطالعه اتصال رسوب محدود به موارد ذکر شده فوق نخواهد بود و در هر شرایط جدید باید چالش‌های موجود به دقت مورد توجه قرار گیرند.

## نتیجه‌گیری

مفهوم اتصال به‌عنوان واژه‌ای برای توصیف ارتباط داخلی بین منبع تولید رواناب و رسوب در بالادست حوزه‌های آبخیز و مخازن مربوطه در پایین‌دست استفاده می‌شود. اتصال در مقیاس‌های متعددی از جمله اتصال ستون خاک، دامنه، دامنه-آبراهه، بین آبراهه‌های متعدد با یکدیگر، زیرحوزه آبخیز، حوزه آبخیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داد اتصال سامانه‌های هیدرولوژیکی و فرسایشی به‌وسیله عوامل طبیعی و انسانی کنترل می‌شود و دارای تغییرات زمانی و مکانی است. برای تعیین کمیت و ارزیابی اولیه از اتصال در مقیاس کرت، دامنه و حوزه آبخیز می‌توان از توابعی مانند بودجه رسوب، نسبت تحویل رسوب، مدل‌های موجود، نظریه گراف و شاخص‌های متفاوتی که برای ارزیابی اتصال ایجاد شده‌اند، بهره برد. ارزیابی اتصال رسوب و کمی‌سازی آن به کمک شاخص‌ها انجام می‌شود. شاخص‌های اتصال رسوب، راهکاری برای ارزیابی نیمه کمی انتقال رواناب و رسوبات در یک سامانه آبخیز هستند که شامل سه رویکرد اصلی انجام می‌شود که شامل شاخص‌های مبتنی بر رستر، رویکرد سطح آبخیز مؤثر و ارزیابی اتصال مبتنی بر شیء و شبکه است. این شاخص‌ها به‌دلیل افزایش در دسترس بودن مدل رقومی ارتفاع و سایر داده‌هایی که به کمک سنجش از دور به‌دست می‌آیند و می‌توانند به‌عنوان شاخصی برای تعیین کمیت مؤثرترین عوامل تأثیرگذار بر اتصال رسوب عمل کنند، ایجاد شده‌اند. شاخص‌های مبتنی بر رستر مانند IC از جمله شاخص‌های پرکاربرد در مطالعات است که به علت تفاوت در عامل وزنی آن از شکل‌های مختلف این شاخص استفاده شده است. این مطالعه ۹۰ مرجع در رابطه با ابعاد مختلف IC را بررسی کرد که بررسی ۲۵ مطالعه که بر عامل وزنی IC تأکید داشتند، نشان داد عامل C مدل USLE و زبری سطحی، بیش‌ترین کاربرد را با ۳۱ و ۲۵ درصد فراوانی در بین ۲۵ پژوهش به‌عنوان عامل وزنی IC داشته‌اند. علیرغم اینکه برای تعیین کمیت IC از چندین روش تاکنون استفاده شده است، اما همچنان در مورد این موضوع امکان مطالعات بیشتری برای بهبود تعیین کمیت اتصال رسوب وجود دارد. تعیین عامل وزنی IC متناسب با ویژگی‌های سطح خاک و داده‌های موجود هر منطقه، موضوعی چالش برانگیز برای تحقیقات آینده است و باید سعی شود از عوامل موجود در مدل‌های موجود فرسایش و رسوب کمک گرفت. با توجه به پیچیدگی دامنه و حوزه آبخیز، استفاده از شاخص‌های ساختاری به‌تنهایی کافی نیست، زیرا در بسیاری مطالعات عوامل شاخص‌های ساختاری توانایی لازم برای تعیین اتصال رسوب را ندارند و باید شاخص‌های موجود را مورد بازبینی قرار داد و همزمان از





اتصال ساختاری و کارکردی استفاده کرد. باید در نظر داشت که استفاده از عوامل جدید، پیچیدگی شاخص اتصال را افزایش ندهد تا کمیت مطمئن تری از اتصال داشته باشیم. از آنجایی که تعیین IC در یک محدوده مطالعاتی نیازمند DEM با قدرت تفکیک بالاست، دسترسی به DEM مورد نظر یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعات اتصال رسوب، علاوه بر تعیین عامل وزنی است. همچنین، در مطالعات آینده جنبه‌های مختلفی از بررسی مکانی اتصال مانند منابع رسوب در حوزه آبخیز، وضعیت مسیر جریان تا خروجی، نقاط حساس و بحرانی فرسایش و رسوب، بررسی روش‌های کنترل اتصال، شناسایی مکان‌های قطع کننده اتصال، تأثیر فعالیت‌های انسانی، و اثرات تغییرات آب و هوایی مانند بارندگی، فصول و عوامل دیگر بر اتصال می‌تواند مورد توجه باشد. درک اتصال، فهم ما از فرایندهای چشم‌انداز را افزایش می‌دهد و امکان توسعه روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی بهتر را فراهم می‌کند. این رویکردهای اندازه‌گیری و مدل‌سازی به نوبه خود منجر به پتانسیل بهتری برای اجرای مفهوم اتصال رسوب به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در حوزه آبخیز می‌شود و موجب در دسترس بودن و کاربرد واقعی شاخص‌های اتصال رسوب در مدیریت پایدار آبخیزها شود. شناسایی اتصال رسوب، پتانسیل راه‌حلی جامع‌تر را در حوزه آبخیز فراهم می‌کند و می‌تواند به طراحی اقدامات حفاظت خاک در دامنه‌ها کمک کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S. B. Benito, M. E. and Echevarria, K. V. (2021). Development and application of a sediment connectivity index to small fluvial catchments: a case study in Arenoso stream, Córdoba, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 80(8), 1-20.
- Arabkhedri, M. (2015). The possibility of estimation of long-term average annual erosion based on measurements of erosion from a few rainfall events. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 7-1. (In Farsi)
- Arabkhedri, M., Heidary, K. and Parsamehr, M. R. (2021). Relationship of sediment yield to connectivity index in small watersheds with similar erosion potentials. *Journal of Soils and Sediments*, 21(7), 2699–2708.
- Baartman, J. E. M., Masselink, R. Keesstra, S. D. and Temme, A. J. A. M. (2013). Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 1457–1471.
- Babbie, E. R. (2013). *The practice of social research*. Wadsworth Cengage Learning: Belmont, CA. 608 pages.
- Balaguer-Puig, M., Marqués-Mateu, A. LuisLerma, J. and Ibáñez-Asensio, S. (2017). Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with structure from motion photogrammetry. *Geomorphology*, 295, 285-296.
- Batista, P., Fiener, P. Scheper, S. and Alewell, C. (2021). A conceptual model-based sediment connectivity assessment for patchy agricultural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 231, 1-33.
- Bayat, R. and Moradi, S.H. (2014). Review of research conducted on the sediment delivery ratio. *Extension and Development of Watershed Management*, 2(5), 27-26. (In Farsi)
- Bertuzzi, P., Rauws, G. and Courault, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17, 87-99.
- Bonham, L. C. (1980). Migration of hydrocarbons in compacting basins. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64 (4), 549–567
- Borselli, L., Cassi, P. and Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75, 268–277.
- Bracken, L. J., Turnbull, L. Wainwright, J. and Bogaart, P. (2015). Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177–188.
- Bracken, L. J. and Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21(13), 1749–1763.
- Burt, T.P. and Gardiner, A. T. (1982). The permanence of stream networks in Britain: some further comments. *Earth Surface Processes Landforms*, 7(4), 327–332.
- Buter, A., Spitzer, A. Comiti, F. and Heckmann, T. (2020). Geomorphology of the Sulden River basin (Italian Alps) with a focus on sediment connectivity. *Journal of Maps*, 16(2), 890–901.
- Cantreul, V., Bielders, C. Calsamiglia, A. and Degré, A. (2018). How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4), 884-893.



- Cavalli, M., Trevisani, S. Comiti, F. and Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31–41.
- Cislaghi, A. and Bischetti, G. B. (2019). Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. *Science of the Total Environment*, 652, 1168–1186.
- Di Stefano, C. and Ferro, V. (2018). Modelling sediment delivery using connectivity components at the experimental SPA2 basin, Sicily (Italy). *Journal of Mountain Science*, 15(9), 1868–1880.
- Ding, W. and Huang, C. (2017). Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. *Geomorphology*, 295, 801-810.
- FAO and ITPS. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Favey, E., Geiger, A. Gudmundsson, G. H. and Wehr, A. (2003). Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 81(4), 555-561.
- Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M. and Vega, J. A. (2020). Exploring the effect of hydrological connectivity and soil burn severity on sediment yield after wildfire and mulching. *Land Degradation and Development*, 31(13), 1611-1621.
- Florinsky, I. V. (2016). Digital Elevation Models. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 77–108.
- Foerster, S., Wilczok, C. Brosinsky, A. and Segl, K. (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(12), 1982–2000.
- Fressard, M. and Cossart, E. (2019). A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: Development and application in the Mercurey vineyards (France). *Science of the Total Environment*, 651, 2566–2584.
- Fryirs, K. A., Brierley, G. J. Preston, N. J. and Kasai, M. (2007). Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70(1), 49–67.
- Gay, A., Cerdan, O. Mardhel, V. and Desmet, M. (2016). Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils Sediments*, 16(1), 280–293.
- Gerami, Z., Arabkhedri, M. Asadi, H. and Bayat, R. (2017). Suspended sediment changes under the influence of rainfall erosivity cycle in Sorkhab watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 11(38), 61-72. (In Farsi)
- Gerami, Z., Arabkhedri, M. Karimi, A. and Asadi, H. (2022). An appropriate weighting factor for calculating sediment connectivity index in bare tilled soils. *Watershed Management Research Journal*, in publishing. (In Farsi)
- Goldin, B., Rudaz, B. and Bardou, E. (2016). Application of a sediment connectivity GIS-based index in a basin undergoing glacier retreat: the case study of the Navizence catchment. *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, 39, 35-38.
- Grauso, S., Pasanisi, F. and Tebano, C. (2018). Assessment of a Simplified Connectivity Index and Specific Sediment Potential in River Basins by Means of Geomorphometric Tools. *Geosciences*, 8(2), 48.
- Grisak, G. E., Pickens, J. F. and Cherry, J. A. (1980). Solute transport through fractured media: 2. Column study of fractured till. *Water Resources Research*, 16(4), 731–739.
- He, S., Qin, F. Zheng, Z. and Li, T. (2018). Changes of soil microrelief and its effect on soil erosion under different rainfall patterns in a laboratory experiment. *Catena*, 162, 203–215.
- Heckmann, T., Cavalli, M. Cerdan, O. Foerster, S. Javaux, M. Lode, E. Smetanová, A. Vericat, D. and Brardinoni, F. (2018). Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187, 77–108.
- Heckmann, T., Schwanghart, W. and Phillips, J. D. (2014). Graph theory — recent developments of its application in geomorphology. *Geomorphology*, 243, 130–146.
- Hohle, J. (2009). DEM generation using a digital large format frame camera. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(1), 87-93.
- Houben, P. (2008). Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany. *Geomorphology*, 101, 172–191.
- Jester, W. and Klik, A. (2005). Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation. *Catena*, 64(2-3), 174–192.



- Jing, Y., Zhao, Q. Lu, M. Wang, A. Yu, J. Liu, Y. and Ding, S. (2022). Effects of road and river networks on sediment connectivity in mountainous watersheds. *Science of The Total Environment*, 826, 154189.
- Jourgholami, M. and Labelle, E. R. (2020). Effects of plot length and soil texture on runoff and sediment yield occurring on machine-trafficked soils in a mixed deciduous forest. *Annals of Forest Science*, 77, 19.
- Kedich, A., Uspensky, M. Tsyplenkov, A. Kharchenko, S. and Golosov, V. (2021). Sediment connectivity in the Koiyavgan glacier's cirques (Adyl-Su river basin, Caucasus, Russia). *European Geosciences Union*, 21-16175.
- Keesstra, S., Nunes, J. P. Saco, P. Parsons, T. Poepl, R. Masselink, R. and Cerdà, A. (2018). The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?. *Science of The Total Environment*, 644, 1557–1572.
- Kirchner, J. W., Finkel, R. C. Riebe, C. S. Granger, D. E. Clayton, J. L. King, J. G. and Megahan, W. F. (2001). Mountain erosion over 10 yr, 10 ky, and 10 my time scales. *Geology*, 29(7), 591–594.
- Laburda, T., Krása, J. Zúmr, D. Devátý, J. Vrána, M. Zambon, N. Johannsen, L. L. Klik, A. Strauss, P. and Dostál, T. (2021). SfM-MVS Photogrammetry for Splash Erosion Monitoring under Natural Rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(5), 1067–1082.
- Liu, W., Shi, C. Ma, Y. and Wang, Y. (2022). Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 408, 115566.
- Liu, W., Shi, C. Ma, Y. Li, H. and Ma, X. (2021). Land use and land cover change-induced changes of sediment connectivity and their effects on sediment yield in a catchment on the Loess Plateau in China. *Catena*, 207, 105688.
- Lizaga, I., Quijano, L. Palazón, L. Gaspar, L. and Navas, A. (2016). Enhancing Connectivity Index to Assess the Effects of Land Use Changes in a Mediterranean Catchment. *Land Degradation and Development*, 29(3), 663–675.
- Llena, M., Vericat, D. Cavalli, M. Crema, S. and Smith, M. W. (2019). The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. *Science of the Total Environment*, 660, 899-912.
- López-Vicente, M., Kramer, H. and Keesstra, S. (2021). Effectiveness of soil erosion barriers to reduce sediment connectivity at small basin scale in a fire-affected forest. *Journal of Environmental Management*, 278, 111510.
- Lu, X., Li, Y. Washington-Allen, R. A. and Li, Y. (2019). Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope. *Science of the Total Environment*, 655, 1479–1494.
- Mahoney, T., Fox, J. Al-Aamery, N. and Clare, E. (2020). Integrating connectivity theory within watershed modelling part I: Model formulation and investigating the timing of sediment connectivity. *Science of The Total Environment*, 740, 140385.
- Marchi, L. and Dalla Fontana, G. (2005). GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48(2), 218–228.
- McCool, D. K. and Williams, J. D. (2008). Soil Erosion by Water. *Encyclopedia of Ecology*, 3284–3290.
- Messenzehl, K., Hoffmann, T. and Dikau, R. (2014). Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschans, Swiss National Park — linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. *Geomorphology*, 221, 215–229.
- Mishra, K., Sinha, R. Jain, V. Nepal, S. and Uddin, K. (2019). Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. *Science of The Total Environment*, 661, 251-265.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Third edition. Blackwell Publishing. 320 pages.
- Najafi, S., Dragovich, D. Heckmann, T. and Sadeghi, S. H. R. (2021). Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196, 104880.
- Najafi, S., Sadeghi, S. H. R. and Heckmann, T. (2017). Temporospatial Variations of Structural Sediment Connectivity Patterns in Taham-Chi Watershed in Zanjan Province, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(3), 131-147.
- Najafi, S., Sadeghi, S. H. R. and Heckmann, T. (2014). Concept and Role of structural and functional sediment connectivity in sediment management of watersheds. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(8), 53-58. (In Farsi)
- Nouwakpo, S., Huang, C. Bowling, L. Owens, P. and Wetz, M. (2021). Inferring sediment transport capacity from soil microtopography changes on a laboratory hillslope. *Water*, 13(7), 929.
- Ortíz-Rodríguez, A. J., Borselli, L. and Sarocchi, D. (2017). Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. *Catena*, 157, 90–111.

- Parsons, A. J., Bracken, L. Poeppl, R. E. Wainwright, J. and Keesstra, S. D. (2015). Introduction to special issue on connectivity in water and sediment dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1275–1277.
- Persichillo, M. G., Bordoni, M. Cavalli, M. Crema, S. and Meisina, C. (2018). The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. *Catena*, 160, 261–274.
- Poeppl, R. E., Fryirs, K. A. Tunnicliffem, J. and Brierley, G. J. (2020). Managing sediment (dis)connectivity in fluvial systems. *Science of the Total Environment*, 736, 139627.
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 64-84.
- Reaney, S.M., L.J. Bracken and M.J. Kirkby. (2014). The importance of surface controls on overland flow connectivity in semi-arid environments: results from a numerical experimental approach. *Hydrological Processes*, 28(4), 2116–2128.
- Refahi, H. G. H. (2016). Water erosion and its control. Tehran: University of Tehran Press, (Sixth ed.). 672 pages. (In Farsi)
- Renschler, C. S. and Harbor, J. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47(2), 189–209.
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529.
- Sun, L., J.L. Zhou, Q. Cai, S. Liu and J. Xiao. (2021). Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(4), 520-531.
- Trevisani, S. and Cavalli, M. (2016). Topography-based flow-directional roughness: potential and challenges. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 343–358.
- Turley, M., Hassan, M. A. and Slaymaker, O. (2021). Quantifying sediment connectivity: Moving toward a holistic assessment through a mixed methods approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(12), 2501-2519.
- Uber, M., Nord, G. Legout, C. and Cea, L. (2020). How do modeling choices and erosion zone locations impact the representation of connectivity and the dynamics of suspended sediments in a multi-source soil erosion model?. *Earth Surface Dynamics*, 9, 123–144.
- Upadhayay, H. R., Lamichhane, S. Bajracharya, R. M. Cornelis, W. Collins, A. L. and Boeckx, P. (2020). Sensitivity of source apportionment predicted by a Bayesian tracer mixing model to the inclusion of a sediment connectivity index as an informative prior: Illustration using the Kharka catchment (Nepal). *Science of The Total Environment*, 713, 136703.
- Ventura, E., Nearing, M. A. Amore, E. and Norton, L. D. (2002). The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. *Catena*, 48, 149-161.
- Wang, C. and Zhang, G. (2022). Spatial variation in sediment connectivity of small watershed along a regional transect on the loess plateau. *Catena*, 217: 106473.
- Wang, L., Zheng, F. Liu, G. Zhang, X. J. Wilson, G. V. Shi, H. and Liu, X. (2021). Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region. *International Soil and Water Conservation Research*, 9, 394-404.
- Williams, C. J., Pierson, F. B. Robichaud, P. R. Al-Hamdan, O. Z. Boll, J. and Strand, E. K. (2016). Structural and functional connectivity as a driver of hillslope erosion following disturbance. *International Journal of Wildland Fire*, 25, 306–321.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000). Terrain analysis: Principles and applications, Terrain analysis: Principles and applications. New York, NY: John Wiley and Sons. 512 pages.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses — a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, 537. U.S. Department of Agriculture. 58 pages.
- Wohl, E., Brierely, G. D. Cadol, T. J. Coulthard, T. Covino, K. A. Fryirs, G. Grant, R. G. Hilton, S. N. Lane, F. J. Magilligan, K. M. Meitzen, P. Passalacqua, R. E. Poppl, S. Rathburn, L. and Sklar, L.S. (2018). Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 4-26.
- Wu, J., Baartman, J. E. M. and Nunes, J. P. (2021). Comparing the impacts of wildfire and meteorological variability on hydrological and erosion responses in a Mediterranean catchment. *Land Degradation and Development*, 32(2), 640-653.
- Zanandrea, F., Michel, G. P. and Kobiyama, M. (2020). Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment. *Geomorphology*, 351, 106962.



- Zanandrea, F., Michel, G. P. Kobiyama, M. Censi, G. and Abatti, B. H. (2021). Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. *Catena*, 204, 105380.
- Zhang, Y., Huang, C. Zhang, W. Chen, J. and Wang, L. (2021). The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 52724–52743.
- Zhao, G., Gao, P. Tian, P. Sun, W. Hu, J. and Mu, X. (2020). Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena*, 185, 104284.
- Zheng, Z. C., He, S. Q. and Wu, F. Q. (2012). Relationship between soil surface roughness and hydraulic roughness coefficient on sloping farmland. *Water Science and Engineering*, 5(2), 191-201.
- Zingaro, M., Refice, A. D'Addabbo, A. Hostache, R. Chini, M. and Capolongo, D. (2020). Experimental Application of Sediment Flow Connectivity Index (SCI) in Flood Monitoring. *Water*, 12(7), 1857.
- Zingaro, M., Refice, A. Giachetta, E. D'Addabbo, A. Lovergine, F. De Pasquale, V. Pepe, G. Brandolini, P. Cevasco, A. and Capolongo, D. (2019). Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Science of the Total Environment*, 672, 763-775.