نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۴، شماره ۲، ۱۴۰۱، صفحات ۱۸۵-۲۰۱

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 14, Issue 2, 2022, Pages 185-201
DOI: 10.22092/ijwmse.2021.353586.1881

ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن با استفاده از روش HMQI

نیایش فندرسکی[۱]، محسن مسعودیان*[۲] و کلاوس راتچر[۳]

[۱] دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، [۲] دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و [۳] استاد گروه عمران، دانشگاه استفالیا، زودربرگ، آلمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

چکیده

طی دو دهه گذشته، نیاز به بازگرداندن رودخانه‌ها به شرایط طبیعی و نیمه‌طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین ابزار در راستای دستیابی به این هدف، ارزیابی تغییرات هیدرومورفولوژیکی رودخانه در اثر مداخلات انسانی است. در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن در قسمت میانه تا پایین‌دست (در محدوده شهر ساری) با استفاده از شاخص کیفیت مورفولوژیک (MQI) و هیدرومورفولوژیکی (HMQI)، هفت بازه در طول رودخانه در حریم ۵۰ متری، انتخاب و سه مؤلفه کیفیت عملکرد ژئومورفولوژیکی، مصنوعی‌سازی و تعدیل کانال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۳۵۳ لندست ۴ و سال ۱۳۹۸ لندست ۸، عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۸۵، داده‌های هیدرولوژیکی و بازدید میدانی بررسی شد. نتایج ارزیابی شاخص کیفی مورفولوژیک نشان داد که رودخانه تجن در بازه‌های مورد مطالعه عمدتاً در طبقه کیفی متوسط قرار گرفته، در حالی که از نظر شرایط هیدرومورفولوژیک در طبقه ضعیف گزارش شده که دلیل اصلی آن وجود سد در حوضه بالادست در محدوده ۳۰ کیلومتری (تمامی بازه‌ها به‌جز ۱ و ۷) و تغییرات دبی و رسوب، دخالت انسانی و تغییر کاربری اراضی است. همچنین، نتایج نشان داد که روش فوق در ارزیابی کلی مبتنی بر شاخص، تشخیص مشکلات هیدرومورفولوژیکی و درک صحیح و جامع پاسخ به فشارها مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: باززنده‌سازی، طبقه‌بندی رودخانه، مورفولوژی، مهندسی رودخانه، WFD

مقدمه

مداخلات انسانی در حریم رودخانه‌ها منجر به برهم زدن رژیم متعادل و پایدار رودخانه‌ها شده، چنان‌که رودخانه‌ها با عواملی مانند کاهش وضعیت کیفی آب، تغییرات مورفولوژیکی و به‌خطر افتادن زیستگاه جانوری مواجه شده‌اند (Tockner و همکاران، ۲۰۱۰). از این‌رو، در دو دهه اخیر نیاز به باززنده‌سازی[۱] و برگرداندن رودخانه به شرایط طبیعی[۲] مورد توجه قرار گرفته که یکی از مهمترین عوامل در جهت اجرای آن، ارزیابی تغییرات هیدرومورفولوژی رودخانه می‌باشد. در کشورهای اروپایی، لزوم برگرداندن آب‌ها به شرایط طبیعی با اجرای دستورالعمل چارچوب آب[۳] تسریع شده است. اصطلاح هیدرومورفولوژی در قالب یک موضوع میان رشته‌ای

[1] Restoration
[2] Renaturalization
[3] Water Framework Directive (WFD-2000/60/EC)

* مسئول مکاتبات: mohsen_masoudian@yahoo.com

(هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و اکولوژی)، برای اولین‌بار در این دستورالعمل با هدف بهبود اکوسامانه‌های آبی و رسیدن به وضعیت مطلوب اکولوژیکی معرفی شد (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۳) و عناصر کیفی در آن با توجه به رژیم هیدرولوژیکی، پیوستگی و مورفولوژی رودخانه تعریف می‌شود (European Commission، ۲۰۰۰).

تا کنون روش‌های زیادی برای ارزیابی وضعیت هیدرومورفولوژیکی آب‌های سطحی به‌وسیله کشورهای عضو اتحادیه اروپا ارائه شده که از نظر مفاهیم، مقیاس‌های مکانی و روش جمع‌آوری داده‌ها با یکدیگر متفاوت هستند. به‌عنوان مثال، می‌توان به روش بررسی زیستگاه رودخانه[1] در انگلیس (ENVIRONMENT AGENCY، ۲۰۰۳)، روش میدانی بررسی طبقه‌بندی کیفیت ساختار بدنه آب[2] در آلمان (LAWA، ۲۰۰۰) و روش ارزیابی هیدرومورفولوژیک جامع رودخانه‌های بزرگ مقیاس[3] در ایرلند اشاره کرد (Toland و Murphy، ۲۰۱۳). وجه مشترک همه آن‌ها، طبقه‌بندی هیدرومورفولوژیکی رودخانه بر اساس فاصله گرفتن از شرایط طبیعی رودخانه، نظارت بر وضعیت اکولوژیکی جریان و تلاش برای درک وضعیت کنونی رودخانه به‌منظور برنامه‌ریزی اقدامات باززنده‌سازی رودخانه‌ها می‌باشد. شایان ذکر است که روش‌های مذکور، تنها شرایط حال حاضر رودخانه را بررسی و پیش‌بینی وضعیت آینده در آن لحاظ نشده است. روش شاخص کیفیت مورفولوژیکی (MQI) یکی دیگر از روش‌های ارزیابی رودخانه است که به‌وسیله Rinaldi و همکاران در سال ۲۰۱۳ در کشور ایتالیا در غالب پروژه رفرم (باززنده‌سازی رودخانه‌ها با هدف مدیریت پایدار حوضه[4]) توسعه داده شده است (Belletti و همکاران، ۲۰۱۵). در نظر گرفتن فرایندهای موثر در ارزیابی رودخانه مانند تداوم انتقال رسوب، فرسایش در کناره‌ها و باریک یا عریض شدن کانال رودخانه از ویژگی‌های این روش است (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۳). وضعیت مورفولوژی تعدادی رودخانه در ایتالیا که طیف وسیعی از فشارهای انسانی آن‌ها را تحت تاثیر قرار داده بود، به‌وسیله این روش ارزیابی شد (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۹). Rigon و همکاران (۲۰۱۳) و Ioana-Toroimac و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش شاخص کیفی مورفولوژیکی، رودخانه‌هایی را در ایتالیا و رومانی تحلیل و ارزیابی کرده و اظهار داشتند که عوامل اصلی دور شدن رودخانه‌ها از شرایط طبیعی شامل اتصال ضعیف بین تراس و کریدور رودخانه و حضور عناصر مصنوعی به‌ویژه حفاظت از کناره و پوشش بستر است. نتایج مطالعات Campana و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که به‌منظور بازگرداندن رودخانه به شرایط طبیعی، اقداماتی چون حذف عناصر مصنوعی و عریض کردن کانال رودخانه پیشنهاد می‌شود، هر چند اقدامات مذکور نباید بدون ارزیابی وضعیت رودخانه انجام شود. Scorpio و همکاران (۲۰۱۴) اظهار داشتند که کیفیت مورفولوژی رودخانه‌ها و تغییرات آن در طی ۵۰ سال بر کیفیت زیستگاه تأثیرگذار بوده است. Belletti و همکاران (۲۰۱۵) ابتدا به بررسی و شناخت ویژگی‌های طبیعی و هیدرومورفولوژی رودخانه‌ها با استفاده از روش MQI پرداخته، بیان داشتند که تغییرات هیدرومورفولوژیکی اغلب یکی از علل اصلی تخریب سامانه رودخانه‌هاست. Belletti و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی دیگر، روش MQI برای پایش[5] را در مناطقی از اروپا با هدف تحلیل پاسخ هیدرومورفولوژیکی پس از اجرای اقدامات باززنده‌سازی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که در همه موارد اقدامات باززنده‌سازی، کیفیت مورفولوژیکی بازه‌ها رو بهبود بوده، اما درجه بهبود به عوامل زیادی از جمله شرایط اولیه مورفولوژی و نوع مداخلات انسانی بستگی دارد. در ایران، Hafezi Moghaddas و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی نقش عوامل تاثیرگذار در تغییرات مورفولوژیکی رودخانه سیستان و ارزیابی بازه‌های مختلف رودخانه از نظر پایداری پرداختند. Roustaee

[1] River Habitat Survey (RHS)
[2] Gewässergütekartierung
[3] River Hydromorphology Assessment Technique (RHAT)
[4] REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management)
[5] Morphological Quality Index for monitoring (MQIm)

و همکاران (۲۰۱۳) و Layeghi و Karam (۲۰۱۵) با استفاده از روش طبقه‌بندی رزگن[1] به‌ترتیب مورفولوژی رودخانه‌های لیقوان و جاجرود را بررسی کرده و نشان دادند که این روش، توانایی تمرکز روی برخی از ویژگی‌های فیزیکی رودخانه مانند نسبت عرض به عمق و مواد بستر را دارد. Rezaei Moghaddam و همکاران (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای از طریق محاسبه شاخص‌های شریانی و خمیدگی به بررسی تغییرات رودخانه گاماسیاب پرداخته و اظهار داشتند که رودخانه از حالت مآندری به مجاری به‌هم پیوسته تبدیل شده است. Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی تغییرات الگوی پیچان‌رودی و تحلیل هیدروژئومورفولوژی رودخانه مارون پرداخته، علت تغییر انحنا و جهت رودخانه را مسائل زمین‌شناسی و توپوگرافی، اقلیم و دبی بالای رودخانه بیان کردند. Esmaili و Valikhani (۲۰۱۵)، Nosrati و همکاران (۲۰۲۰) و Ilanlou و همکاران (۲۰۲۰) به‌ترتیب رودخانه‌های لاویج، طالقان و جاجرود را بر اساس شاخص کیفیت مورفولوژیکی طبقه‌بندی کردند. Yaghoub Nezhad Asl و همکاران (۲۰۲۰) وضعیت مورفولوژیک رودخانه طالقان را در بازه زمانی ۱۰ ساله با استفاده از روش شاخص کیفیت مورفولوژی بازبینی شده[2] ارزیابی و نتیجه گرفتند که رودخانه اصلاً وضعیت خوبی نداشته، دلیل اصلی آن تغییرات گسترده کاربری اراضی اطراف رودخانه است. روش ارزیابی شاخص کیفی مورفولوژیکی شامل جنبه‌های هیدرولوژیکی با تأثیر بر فرایندهای ژئومورفولوژیکی است، در حالی که تغییر رژیم هیدرولوژیکی باید از طریق روش‌های مستقل که از شاخص‌های خاص استفاده می‌کنند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. کاستی اصلی چنین روش‌هایی این است که نیاز به مجموعه داده و سری‌های طولانی دارند که غالباً در دسترس نیستند (Belletti و همکاران، ۲۰۱۵). از این‌رو، به‌منظور برطرف کردن این چالش و هم‌سویی بهتر با الزامات دستورالعمل چارچوب آب، اخیراً روش جدیدی معروف به شاخص کیفیت هیدرومورفولوژیکی (HMQI) به‌وسیله Rinaldi و همکاران (۲۰۱۷) توسعه داده شده است روش جدید علاوه‌بر بررسی شرایط مورفولوژی رودخانه، دارای یک شاخص اضافی است که مداخلات انسانی منجر به ایجاد تغییرات هیدرولوژیکی در جریان رودخانه را بررسی می‌کند که به‌طور اخص در مواردی که سد و سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه واقع شده، حائز اهمیت است (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۹).

هر چند در تحقیقات سال‌های اخیر وضعیت کیفی مورفولوژیکی تعداد محدودی از رودخانه‌های کشور ارزیابی شده، اما تا کنون تغییرات هیدرولوژیکی-مورفولوژیکی به‌خصوص با بهره‌گیری از روش HMQI بررسی نشده است. مسائلی چون تغییرات شدید کاربری اراضی، توسعه شهرنشینی در محدوده رودخانه، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه، احداث پارک ملل و کاناله کردن[3] بیش از دو کیلومتر از رودخانه در دو فاز اجرایی، منجر به ایجاد تغییرات چشم‌گیر رودخانه تجن شده که اهمیت مطالعه این رودخانه از منظر مورفولوژی و هیدرومورفولوژی را دو چندان می‌کند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل و ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن در یک دوره ۵۵ ساله (۱۳۹۸-۱۳۴۰) با استفاده از شاخص HMQI انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

روش ارزیابی MQI و HMQI: روش MQI در چارچوب سامانه ارزیابی و نظارت هیدرومورفولوژیکی جریان[4]، قرار داشته، به طبقه‌بندی وضعیت فعلی مورفولوژیکی رودخانه مبتنی بر یک سامانه امتیازدهی در دو مرحله جمع‌آوری اطلاعات و ارزیابی شرایط با استفاده از یک سری شاخص مشخص می‌پردازد. به‌منظور بررسی وضعیت هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن، ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی، شیب و کاربری اراضی حوضه و نیز داده‌های هیدرولوژی حوضه شامل داده‌های سری

[1] Rosgen
[2] Revisited Morphological Quality Index (rMQI)
[3] Channelization
[4] Stream hydromorphological evaluation, analysis and monitoring system

آبدهی، رسوب و سیلاب رودخانه از شرکت آب منطقه‌ای مازندران تهیه شد (Mazandaran Regional Water Company، ۲۰۱۵). همچنین، تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۵۳ متعلق به لندست ۴ و تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۹۸ متعلق به لندست ۸ با قدرت تفکیک شش متر از سازمان زمین‌شناسی آمریکا[1] و عکس‌های هوایی منطقه در سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۸۵ از سازمان نقشه‌برداری ایران تهیه شد. در فاز اول، موقعیت عمومی حوزه آبخیز بررسی شده و تعداد پنج واحد چشم‌انداز[2] با ترکیب نقشه زمین‌شناسی و خصوصیات فیزیولوژیکی (ارتفاع و شیب) تعریف شده که شامل مناطق کوهستانی، تپه-کوهستانی، دشت-تپه، دشت میانی و دشت کم ارتفاع (مناطق ساحلی) هستند. سپس، تعداد هفت بازه[3] (قرارگیری دست‌کم یک بازه در هر واحد چشم‌انداز) انتخاب شد (شکل ۱-ب). در گام بعدی، محدودیت عرضی رودخانه در جهت طولی و نسبت بین عرض دشت آبرفتی و عرض کانال (تحت عنوان درجه محدودیت[4])، برای هر بازه بررسی و فرم دره طبیعی رودخانه به سه شکل مختلف (محدود[5]، نیمه‌محدود[6] و نامحدود[7]) مجزا شد. اصطلاح درجه محدودیت درباره دره‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از طرفین پهنای آن‌ها به دامنه‌های طبیعی محدود شده و عوامل مصنوعی مانند سنگچین یا مناطق شهری به‌عنوان عوامل محدود کننده در نظر گرفته نمی‌شوند (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، شاخص‌های پیچان‌رودی[8] که نسبت بین اندازه طولی کانال به فاصله مستقیم آن، شریانی شدن[9] که تعداد کانال‌های فعال جداشده به‌وسیله موانع و واجریانی[10] که تعداد کانال‌های فعال جداشده با جزایر رسوبی با پوشش گیاهی را نشان می‌دهند، برای هر بازه محاسبه شد که در جدول ۵ آورده شده‌اند. تیپ مورفولوژی کانال رودخانه، در بازه‌های مورد مطالعه، طبق طبقه‌بندی این روش شامل هفت طبقه مستقیم-سینوسی[11]، مستقیم[12]، سینوسی[13]، پیچان‌رودی[14]، شریانی[15]، سرگردان[16] و انشعابی[17] که بر اساس شاخص محدودیت، تعدد و الگوی جریان و شاخص‌های پیچان‌رودی، شریانی شدن و واجریانی طبقه‌بندی شده، برای بازه‌ها تعیین شده، سپس، ناپیوستگی‌های موجود در کانال جریان (مانند وجود سازه‌های عرضی) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۴ و ۸ شناسایی شد. به‌منظور ارزیابی نهایی، بازدید میدانی در طول بازه‌ها در اردیبهشت و خرداد ماه ۱۳۹۸ انجام شد و سه جنبه پیوستگی طولی و عرضی، شرایط مورفولوژیکی (الگوی کانال، شکل مقطع عرضی و رسوبات بستر) و پوشش گیاهی را با استفاده از ۲۸ شاخص دسته‌بندی شده در سه مولفه ۱- عملکرد ژئومورفولوژیکی[18] (ارزیابی تغییرات فرایندهای مرتبط با خدمات رودخانه)، ۲- مصنوعی‌سازی[19] (ارزیابی حضور و فراوانی عناصر مصنوعی، فشارها) و ۳- تعدیل کانال[20] (ارزیابی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه) انجام شد. جدول ۱ شرح کامل هر شاخص و پارامترهای ارزیابی آن را نشان می‌دهد.

سامانه امتیازدهی این روش بدین‌گونه است که به هر شاخص، سه درجه تغییرات (تحت عنوان طبقه) تعلق می‌گیرد که درجه تغییرات شرایط کنونی نسبت به شرایط مرجع[21] (عدم وجود یا وجود ناچیز انسانی و عناصر مصنوعی، عملکرد کامل فرایندهای ژئومورفولوژیکی در بازه و عدم وجود تعدیل‌ها و تنظیمات مشخص در کانال رودخانه) را نشان می‌دهد.

[1] The United States Geological Survey (USGS)
[2] Landscape unit
[3] Reach
[4] Degree of confinement
[5] Confined
[6] Partly Confined
[7] Unconfined
[8] Sinuosity index (Si)
[9] Braiding index (Bi)
[10] Anastomosing index (Ai)
[11] Straight- Sinuous (SS)
[12] Straight (ST)
[13] Sinuous (S)
[14] Meandering (ME)
[15] Wandering (W)
[16] Braided (B)
[17] Anabranching (AN)
[18] Geomorphological Functionality (F)
[19] Artificiality (A)
[20] Channel Adjustment (CA)
[21] Reference condition

جدول ۱- شاخص‌ها و پارامترهای ارزیابی آن‌ها در روش شاخص کیفی مورفولوژی (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۶)

شاخص‌ها	پارامترهای ارزیابی
عملکرد ژئومورفولوژیکی (F)	
F1- پیوستگی شار رسوب و چوب	وجود سازه‌های عرضی (مانند سدها و پل‌ها) تغییردهنده پیوستگی طولی رسوب و چوب
F2- وجود یک دشت سیلابی جدید	طول و عرض دشت سیلابی
F3- پیوستگی راه‌رو رودخانه و دامنه	وجود و طول عناصر قطع‌کننده در دو طرف رودخانه مثلاً جاده در حریم ۵۰ متری از رودخانه
F4- فرایندهای پسروی کناره	وجود یا عدم وجود کناره جریان عقب‌نشینی کرده
F5- وجود راه‌رو فرسایش‌پذیر	عرض و طول کریدور فرسایش‌پذیر
F6- پیکربندی بستر مرتبط با شیب	شناسایی پیکربندی بستر و مقایسه با پیکربندی مورد انتظار بر اساس شیب دره
F7- فرم و فرایند خاص الگوی کانال	درصد طول مسیر با تغییرات طبیعی و ناهمگنی فرم الگوی کانال به‌دلیل مداخلات انسانی
F8- وجود فرم‌های مختلف رودخانه	وجود یا عدم وجود فرم رودخانه در دشت آبرفتی (مانند دریاچه نعل اسبی، جریان‌های ثانویه و ...)
F9- تغییرپذیری مقطع عرضی	درصد طول بازه‌ها با تغییرات طبیعی ناهمگن مقاطع عرضی مورد انتظار به‌دلیل مداخلات انسانی
F10- ساختار بستر کانال	وجود یا عدم وجود تغییرات در رسوبات بستر
F11– وجود چوب درون کانال	وجود یا عدم وجود چوب‌های بزرگ درون کانال در مسیر جریان
F12– محدوده گیاهان	میانگین عرض گیاهان درون راه‌رو فعال
F13– گسترش خطی پوشش گیاهی	طول کناره طولی دارای پوشش گیاهی
مصنوعی‌سازی (A)	
A1- تغییرات در بالادست جریان رودخانه	مقدار تغییرات دبی به‌دلیل وجود مداخلات انسانی در بالادست
A2- تغییر در بالادست دبی رسوب	وجود، نوع و محل قرارگیری سازه‌های مرتبط منجر به تله‌اندازی رسوب (سد و بند تنظیمی)
A3– تغییر جریان در بازه	مقدار تغییرات در دبی ایجاد شده به‌وسیله‌ی مداخلات انسانی
A4– تغییر دبی رسوب در بازه	نوع و تراکم بندهای تنظیمی، سدهای کوچک
A5– سازه‌های عرضی	تراکم سازه‌های عرضی(پل‌ها، شیب‌شکن، آب‌گذر، سیفون معکوس و ...)
A6– محافظت از کناره	طول کناره‌های محافظت شده (دیواره، پوشش سنگی، گابیون و ...)
A7- خاک‌ریزهای مصنوعی	طول و فاصله کانال از خاک‌ریزهای مصنوعی
A8– تغییرات مصنوعی مسیر رودخانه	درصدی از طول بازه با تغییرات مصنوعی مسیر رودخانه (قطع‌شدگی مآندر و ...)
A9- سازه‌های تثبیت‌کننده بستر	وجود، تراکم و نوع سایر سازه‌های تثبیت کننده‌ی بستر (مانند کف‌بند)
A10- جابه‌جایی و برداشت رسوبات	وجود و شدت نسبی: فعالیت و برداشت شن و ماسه با تمرکز بر ۲۰ سال گذشته
A11- جابه‌جایی چوب	وجود و شدت نسبی (جزئی یا کلی): برداشت چوب از درون کانال رودخانه طی ۲۰ سال گذشته
A12- مدیریت پوشش گیاهی	وجود و شدت نسبی: از بین رفتن پوشش گیاهی طی ۲۰ سال گذشته
تعدیل کانال (CA)	
CA1- تعدیل الگوی کانال	تغییرات در الگوی کانال از دهه ۱۹۶۰ بر اساس تغییرات شاخص‌های پیچان‌رودی، شریانی و واجریانی
CA2- تعدیل عرض کانال	تغییرات در عرض کانال از دهه۱۹۶۰
CA3- تعدیل سطح بستر	تغییرات سطح، مقطع عرضی یا پروفیل طولی؛ برداشت میدانی: نشانه‌ای از حفاری یا رسوب‌گذاری

درجه‌های تغییر برای هر شاخص به‌صورت، A: شرایط با تغییرات ناچیز (امتیاز کمینه)، B: تغییرات متوسط و C: شرایط بسیار تغییریافته (امتیاز بیشینه) گزارش می‌شوند. سپس، نمره کل یا S_{total} (مجموع امتیازات تعلق یافته به شاخص‌ها) محاسبه شده و شاخص تغییر مورفولوژیکی[1] به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود که در آن S_{max} بیشینه امتیاز (حالت قرارگیری تمام شاخص‌ها در طبقه C) است.

$$MAI = S_{total} / S_{\max} \quad (۱)$$

محدوده مقدار شاخص تغییر مورفولوژیکی از صفر (بدون تغییر) تا یک (بیشینه تغییر) بوده، روش MQI طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود. روش ارزیابی، طبقه و امتیاز اختصاص داده‌شده به هر یک از طبقه‌ها به‌عنوان نمونه، برای شاخص F1-پیوستگی طولی در شار رسوب و چوب در جدول ۲ آورده شده است.

$$MQI = 1 - MAI = 1 - \left(S_{total} / S_{max} \right) \quad (۲)$$

[1] Morphological Alteration Index

جدول ۲- طبقه‌ها و امتیازات شاخص F1 پیوستگی طولی در انتقال رسوب و چوب (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۶)

شاخص	روش ارزیابی	طبقه	امتیاز
F1- پیوستگی طولی در شار رسوب و چوب	سنجش از راه دور و بازدید میدانی (کیفی): شناسایی سازه‌های عرضی	A- عدم تغییرات در پیوستگی انتقال رسوب و چوب	۰
		B- تغییرات کم (وجود موانع درون جریان بدون جلوگیری از سیلاب)	۳
		C- تغییرات قابل ملاحظه (وجود موانع برای انتقال رسوب و چوب)	۵

روش شاخص کیفی مورفولوژیکی شامل ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی جریان‌های تشکیل‌دهنده کانال (دبی با دوره بازگشت ۱/۵ تا ۱۰ سال) یا بالاتر، به‌وسیله شاخص‌های A1- تغییرات در بالادست جریان رودخانه و A3- تغییرات در بازه است. در آخرین نسخه ارائه شده، این روش بسط داده شده تا بتواند شرایط کلی هیدرومورفولوژیکی یک جریان را ارزیابی کند. ارزیابی به روش MQI شامل جنبه‌های هیدرولوژیکی با تأثیرات قابل توجه بر روی فرایندهای ژئومورفولوژیک است، در حالی که تغییر رژیم هیدرولوژیکی کلی باید از طریق روش‌های مستقلی که از شاخص‌های خاص استفاده می‌کنند، تجزیه و تحلیل شود. در واقع در روش HMQI، پارامتر A1- تغییرات در بالادست جریان رودخانه، به دو قسمت $A1_M$ و $A1_H$ تقسیم می‌شود.

$A1_M$: این پارامتر تغییرات احتمالی شرایط جریان را که بر روی مورفولوژی کانال تاثیر دارد، ارزیابی می‌کند. جریان‌های با دبی با دوره بازگشت ۱/۵ تا ۱۰ سال که ممکن است به‌دلیل تنظیم مورفولوژیکی، اندازه دیواره کانال را تغییر دهند. وجود سازه‌هایی مانند سد، سدهای انحرافی و حوضچه‌های نگهداری در فاصله بیشینه ۳۰ کیلومتری بالادست بازه مورد مطالعه، منجر به تاثیر این پارامتر بر ارزیابی کلی می‌شوند.

$A1_H$: این پارامتر مربوط به تغییرات جریان آشکاری است که اگرچه برخی از فرایندهای بیولوژیکی را مختل می‌کند، اما تاثیر کمی بر مورفولوژی کانال دارد (جدول ۳). جریان‌هایی با دبی با دوره بازگشت کمتر از ۱/۵ سال که ممکن است، برخی از واحدهای ژئومورفیک را تغییر دهد، اما تأثیر قابل توجهی بر اندازه دیواره کانال ندارد. تغییرات جریان زیر شرایط آستانه فرسایش و انتقال رسوب، اگرچه باعث اختلال در برخی فرایندهای بیولوژیکی می‌شود، اما بر روی مورفولوژی کانال اثرات ناچیزی دارد (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۹). وجود سازه‌های آبی کوچک مانند سدهای کوچک و سازه‌های جمع‌آوری آب برای آبیاری، نیروگاه آبی و آب آشامیدنی منجر به تغییر جریان در بالادست بازه مورد مطالعه و تاثیر این پارامتر بر ارزیابی کلی می‌شود (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۳- تعریف، طبقه‌ها و امتیازهای شاخص $A1_H$ در روش شاخص HMQI (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۹)

شاخص	ارزیابی	
$A1_H$- تغییر بالادست جریان بدون اثرات بالقوه مرتبط در مورفولوژی کانال	میزان تغییرات جریان کم (بدون اثرات بالقوه روی مورفولوژی کانال) ناشی از مداخلات انسانی در بالادست. ارزیابی بر اساس وجود مداخلات و مورد استفاده آن‌ها (کیفی)	
طبقه‌ها	امتیاز	
	محدود	نسبتاً محدود-نامحدود
A- عدم وجود هر نوع سازه‌ای (مانند سدها یا سایر سازه‌های مربوط به آبیاری، نیروگاه آبی) در حوضه بالادست که دبی جریان را تغییر می‌دهند.	۰	۰
B- حضور یک یا چند سازه در حوضه بالادست که دبی را تغییر می‌دهد (سدها یا سایر سازه‌های مربوط به آبیاری، نیروگاه آبی).	۸	۱۱
C- محدوده بلافاصله در پایین‌دست یک مخزن آبی قرار دارد.	۱۶	۲۲

امتیاز اضافی شاخص $A1_H$ به جمع نمرات S_{total} اضافه شده، مقدار HMQI طبق رابطه (۳) محاسبه

می‌شود (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، طبقه کیفی موروفولوژیکی و هیدرومورولوژیکی رودخانه با مفهوم بیشینه عملکرد طبیعی، کمینه دستکاری مصنوعی و تغییرات کانال برای طبقه کیفی خیلی خوب (شرایط مرجع) مشخص می‌شود (جدول ۴).

$$HMQI = 1 - HMAI = 1 - \left(S_{total} / S_{max}\right) \quad (۳)$$

جدول ۴- طبقه‌های کیفی و محدوده امتیاز آن‌ها در شاخص‌های MQI و HMQI (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۷)

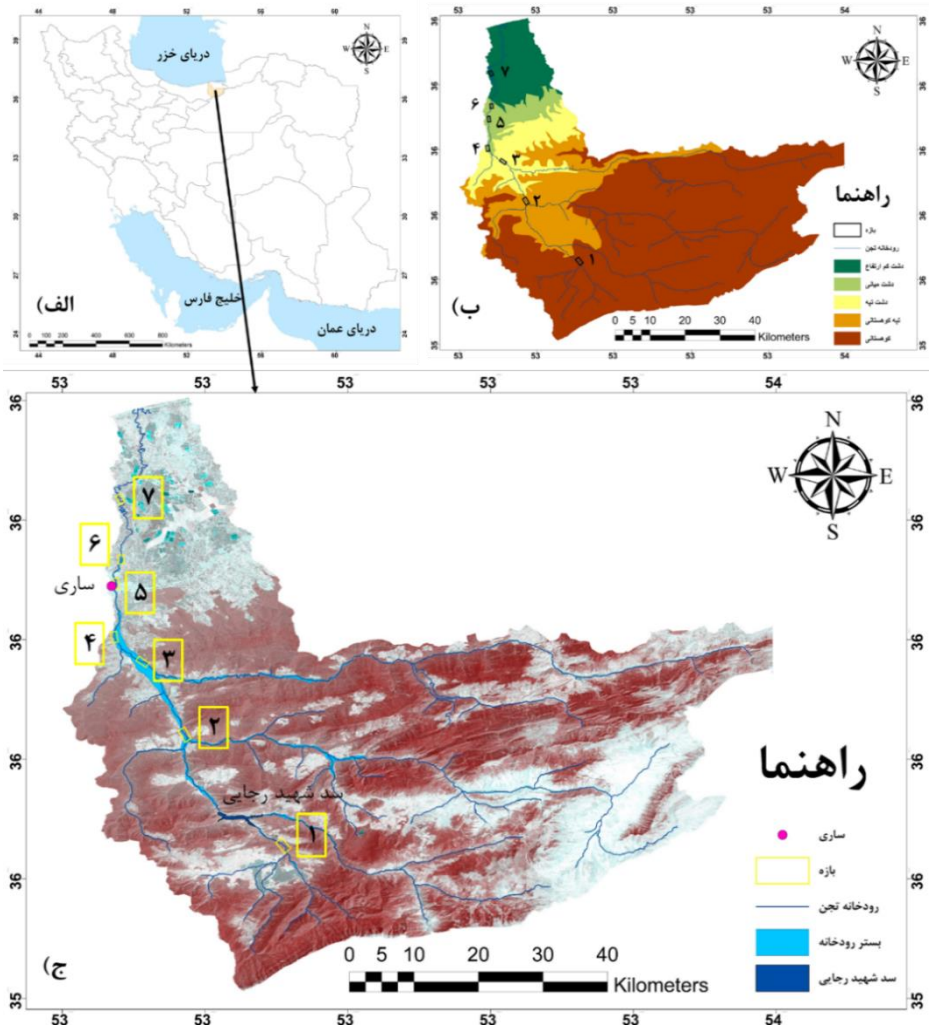
طبقه کیفی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
محدوده امتیاز	>۰/۸۵	۰/۷–۰/۸۵	۰/۵–۰/۷	۰/۳–۰/۵	۰-۰/۳

محدوده مورد مطالعه: رودخانه تجن از رودخانه‌های مهم حوزه آبخیز دریای خزر است که از ارتفاع ۳۲۵۱ متری کوه‌های هزار جریب در دامنه شمالی سلسله جبال البرز سرچشمه می‌گیرد. حوزه آبخیز این رودخانه از شمال به دریای خزر، از شرق به حوضه دارابکلا و نکارود، از جنوب به استان سمنان و از غرب به حوضه سیاه‌رود و تالار محدود می‌شود. طول شاخه اصلی رودخانه ۱۷۲ کیلومتر و بر روی آن سد مخزنی شهید رجایی و سد انحرافی تجن (در محدوده شهر ساری) اجرا شده است. مساحت حوضه تا ایستگاه کردخیل واقع در پایاب رودخانه حدود ۴۰۰۰ کیلومتر مربع و دارای شیب متوسط معادل ۲۴ درصد می‌باشد. رژیم جریان رودخانه برفی-بارانی بوده، دارای جریان پایه‌ای دائم و جریان آن در محدوده کوهستانی به‌صورت دره-رودخانه است. میزان متوسط دبی سالانه برای یک دوره آماری ۴۲ ساله منتهی به سال ۱۳۹۴ برابر ۱۲/۸۱ متر مکعب بر ثانیه و آورد سالانه آن ۴۶۰ میلیون متر مکعب برآورد شده است (Mazandaran Regional Water Company، ۲۰۱۵).

به‌منظور ارزیابی، تعداد هفت بازه برای حوضه رودخانه تجن به‌طوری‌که درجه محدودیت‌های مختلف، فرم جریان، مواد تشکیل‌دهنده بستر جریان و واحدهای چشم‌انداز مختلف را در برگیرند، انتخاب شد. مشخصات کلی بازه‌ها در جدول ۵ آورده شده، شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز تجن، شهر ساری، سد شهید رجایی، واحدهای چشم‌انداز و نیز بازه‌های مورد ارزیابی که در محیط نرم‌افزار ArcGis 10.1 تولید شده را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، بازه‌های مورد ارزیابی، طوری انتخاب شدند که در هر واحد چشم‌انداز یک بازه به‌منظور امکان مقایسه نتایج قرار گیرد.

نتایج و بحث

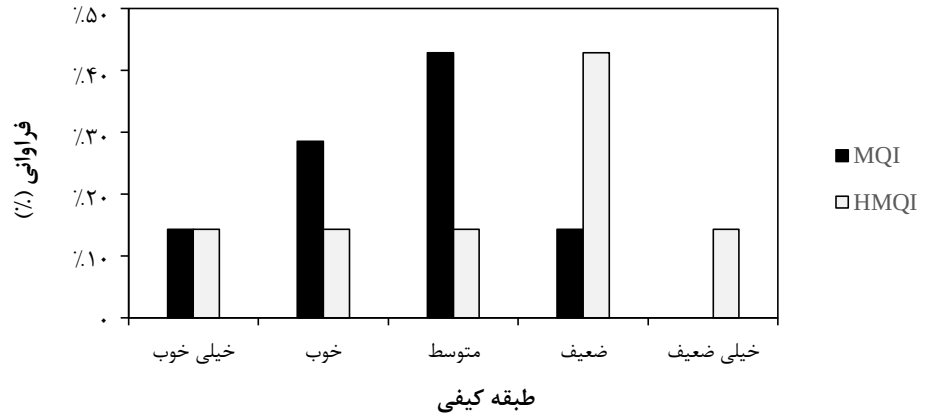
در جدول ۶ خلاصه‌ای از توصیف تمامی بازه‌ها شامل مواد بستر، پوشش گیاهی، ویژگی جریان، سازه‌های عرضی موجود در جریان، وضعیت دشت سیلابی و پوشش بستر و حفاظت از کناره‌ها آورده شده که نتایج بازدید میدانی از هر بازه بوده، با استفاده از آن‌ها به ارزیابی وضعیت کیفی مورفولوژیکی و هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن پرداخته شده است. اولین تحلیل متمرکز بر درصد وقوع طبقه‌ها برای هر شاخص منفرد می‌باشد. نتایج ارزیابی شاخص کیفی مورفولوژی و هیدرومورفولوژی در شکل‌های ۲ و ۳ با توجه به فراوانی هر طبقه در کل بازه‌ها و طبقه کیفی هر بازه نشان داده شده است. ارزیابی کلی شاخص کیفی مورفولوژیکی رودخانه تجن نشان می‌دهد که برای این رودخانه طبقه کیفی متوسط عمدتاً غالب بوده، لیکن بازه‌های ۲ و ۷ در طبقه کیفی خوب و بازه ۱ خیلی خوب طبقه‌بندی شده‌اند. این درحالی است که طبقه رودخانه تجن از نظر شرایط کلی هیدرومورفولوژیک پایین‌تر گزارش شده است (شکل ۳). دلیل این امر این است که تمامی بازه‌ها به‌جز ۱ و ۷ تحت تأثیر شاخص ($A1_H$- تغییر بالادست جریان بدون اثرات بالقوه مرتبط در مورفولوژی کانال) به‌دلیل وجود سد شهید رجایی در بالادست آن‌ها هستند.



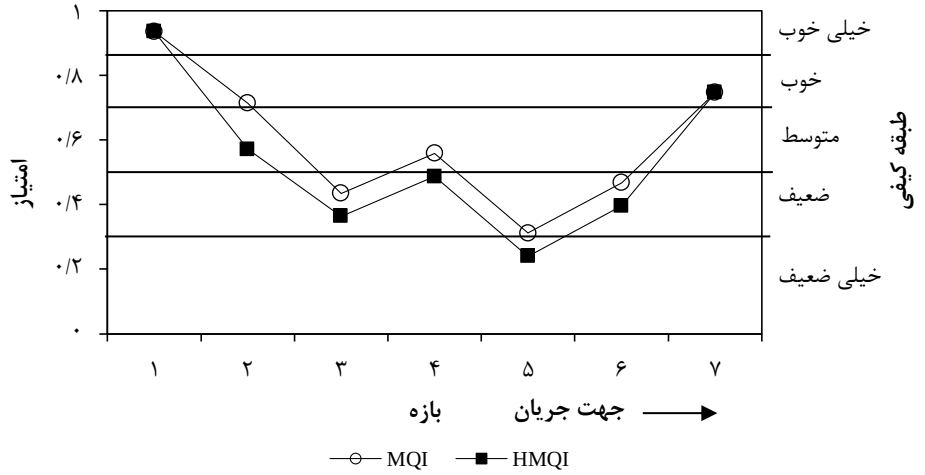
شکل ۱- الف) موقعیت حوزه آبخیز تجن، ب) واحدهای چشم‌انداز و موقعیت بازه‌ها در هر واحد چشم‌انداز و ج) تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سال ۲۰۱۹ (تهیه شده از USGS) حوضه تجن و موقعیت بازه‌های مورد ارزیابی، شهر ساری و سد شهید رجایی تولید شده در محیط ArcGis 10.1

جدول ۵- مشخصات بازه‌های مورد بررسی در روش شاخص HMQI (طبقه محدودیت با: C- محدود، PC- نسبتاً محدود، U- نامحدود، واحد چشم‌انداز با: M- کوهستان، HM- تپه-کوهستان، HP- دشت-تپه، IP- دشت میانی و LP- دشت کم ارتفاع و فرم جریان با: B- شریانی، ME- پیچان‌رودی، S- سینوسی و ST- مستقیم نشان داده شده است)

کد بازه	بازه	طول (km)	متوسط ارتفاع (m)	عرض متوسط (m)	عمق متوسط (m)	میانگین سرعت جریان (m^2s^{-1})	میانگین شیب (mm^{-1})	ضریب پیچان‌رودی	ضریب شریانی	ضریب واحریانی	واحد چشم‌انداز	تیپ مورفولوژی کانال	طبقه محدودیت
۱	شیرین‌رود	۱	۷۱۵	۱۰	۰/۱۸	۰/۹۲	۰/۰۹	۲	۱	۱	M	ME	C
۲	تاکام	۱/۳	۳۳۴	۲۴/۵	۰/۳۷	۰/۸۷	۰/۰۰۵	۱/۱۲	۱	۱	HM	S	PC
۳	کارخانه چوب و کاغذ	۱/۲	۱۳۸	۳۴	۰/۶۱	۱/۱۳	۰/۰۱	۱/۰۹	۱	۱	HP	S	PC
۴	پل گردن	۱/۵	۱۱۹	۳۴/۵	۰/۵۴	۱	۰/۰۰۸	۱/۰۲	۱/۵	۱/۵	IP	ST	U
۵	بعد از پل تجن-ساری	۱/۵	۳۰	۴۰	۰/۴۸	۰/۹۶	۰/۰۰۶	۱/۰۴	۲	۱/۵	IP	ST	U
۶	عالیواک	۱/۱	۹	۲۳	۰/۴۳	۰/۹۲	۰/۰۰۵۵	۱/۲	۲	۱	IP	B	U
۷	روستای مرزرود	۱/۳۵	-۱۵	۱۸	۰/۳	۰/۷۱	۰/۰۰۸	۲/۰۲	۱	۱	LP	ME	U



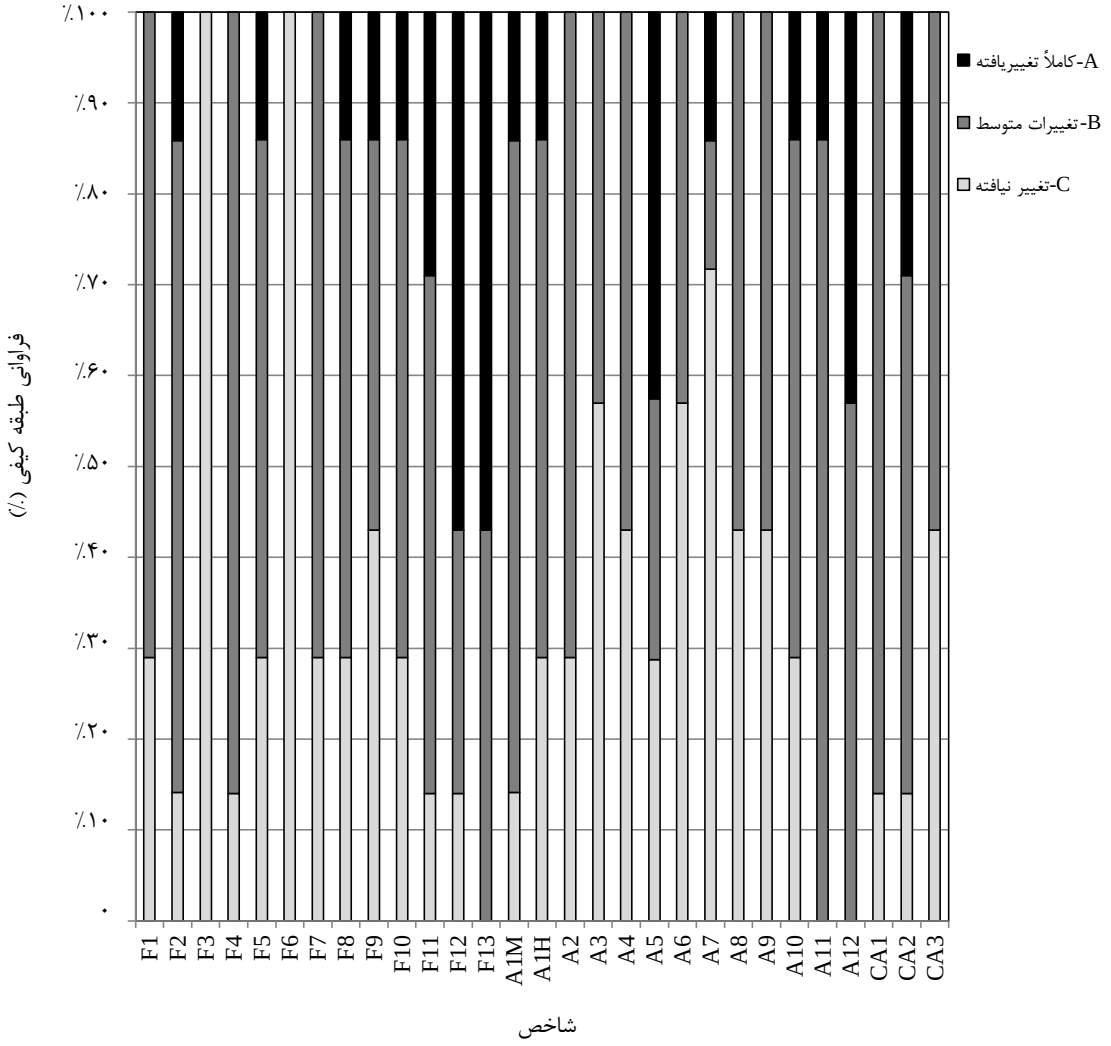
شکل ۲- فراوانی طبقه‌های کیفی در ارزیابی شاخص‌های کیفی مورفولوژی و هیدرومورفولوژی در کل بازه‌های مورد مطالعه رودخانه تجن



شکل ۳- نتایج طبقه‌بندی شاخص‌های MQI و HMQI در هر بازه

به‌علاوه، با توجه به شکل ۲، شرایط هیدرومورفولوژیکی برای ۴۳، ۱۴ و ۱۴ درصد از طول بازه‌های مورد بررسی به‌ترتیب در طبقه ضعیف، خیلی ضعیف و خیلی خوب قرار گرفته‌اند. در بازه ۵ به‌دلیل افزایش تأثیر شاخص‌های کنترل مصنوعی (به‌عنوان مثال، حفاظت از کناره‌های رودخانه و توسعه شهرنشینی منجر به تصرف دشت سیلابی، تغییر عرض کانال رودخانه و از بین رفتن پوشش گیاهی)، در طبقه خیلی ضعیف گزارش شده است (رجوع شود به جدول ۶ و شکل ۸- ب و ج). همچنین، شکل ۴ درصد تغییرات هر شاخص با در نظر گرفتن وقوع تجمعی آن‌ها در تمامی بازه‌ها که در سه طبقه کیفی کاملاً تغییر یافته (A)، با تغییرات متوسط (B) و تغییر نیافته (C) دسته‌بندی شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق، طبقه تغییرات متوسط (B) برای بیشتر شاخص‌ها (۷۵ درصد) به وقوع پیوسته و تنها در شاخص‌های F3- پیوستگی کریدور رودخانه و دامنه و F6- پیکربندی بستر مرتبط با شیب دره مشاهده نشده، این دو شاخص برای تمامی بازه‌ها، تغییری نشان نمی‌دهند. همچنین، بیشترین تغییرات برای شاخص‌های F1- محدوده گیاهان عملکردی، F13- گسترش خطی پوشش گیاهی عملکردی، A5- سازه‌های عرضی، A11- جابه‌جایی چوب و A12- مدیریت پوشش گیاهی گزارش شده که بیشتر مرتبط با پوشش گیاهی بازه‌ها بوده‌اند. سه حالت A- عدم مداخله انسان و قطع نکردن پوشش گیاهی کناره رودخانه (طی ۲۰ سال اخیر) و پوشش گیاهی آبزی (طی ۵ سال گذشته)، B- قطع موردی و یا از بین بردن پوشش گیاهی در کمتر از ۵۰ درصد طول بازه و به‌طور جزئی یا از بین نبردن پوشش گیاهی آبزی

(طی پنج سال گذشته) و C- از بین بردن کامل پوشش گیاهی در طول بیش از ۵۰ درصد بازه، به‌منظور طبقه‌بندی شاخص A12- مدیریت پوشش گیاهی پیشنهاد شده است (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۶). شواهد جمع‌آوری شده از بازدید میدانی، ثبت خصوصیات بازه‌ها و نیز طبقه‌بندی از طریق تصاویر هوایی نشان داد که پوشش گیاهی تنها در بازه‌های ۱ و ۷ قابل مشاهده بوده و برای این شاخص به‌جز در بازه‌های ۱ و ۷، بیشینه امتیاز (حالت C - قطع بیش از ۵۰ درصد پوشش گیاهی) گزارش شده است (شکل ۵).



شکل ۴ - فراوانی طبقه‌های کیفی گزارش شده در هر شاخص (طبقه کیفی، A- کاملاً تغییر یافته، B- تغییرات متوسط و C- تغییر نیافته)

شاخص $A1_M$- تغییرات در بالادست جریان رودخانه مربوط به تغییرات هیدرولوژیکی نشان‌دهنده مقدار تغییرات در دبی به‌علت مداخلات انسانی در بالادست رودخانه، غالباً در طبقه تغییرات متوسط (B) گزارش شده است. دلیل این امر، قرار گرفتن پنج بازه از کل بازه‌های مورد مطالعه، در فاصله ۳۰ کیلومتری از سد شهید رجایی است؛ با توجه به این‌که فاصله حد برای اثرگذاری سدهای بزرگ بر روی طبقه‌بندی به روش شاخص HMQI مساحت در برگیرنده سد تا ۳۳ درصد مساحت کل حوزه آبخیز در نظر گرفته می‌شود (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه‌بر این، شاخص $A1_H$- تغییر بالادست جریان بدون اثرات بالقوه مرتبط در مورفولوژی کانال، مورد استفاده در HMQI به‌جز بازه‌های ۱ و ۷، همواره در طبقه متوسط (B) قرار گرفته است که نشان‌دهنده تغییر قابل توجهی در جریان رودخانه است.

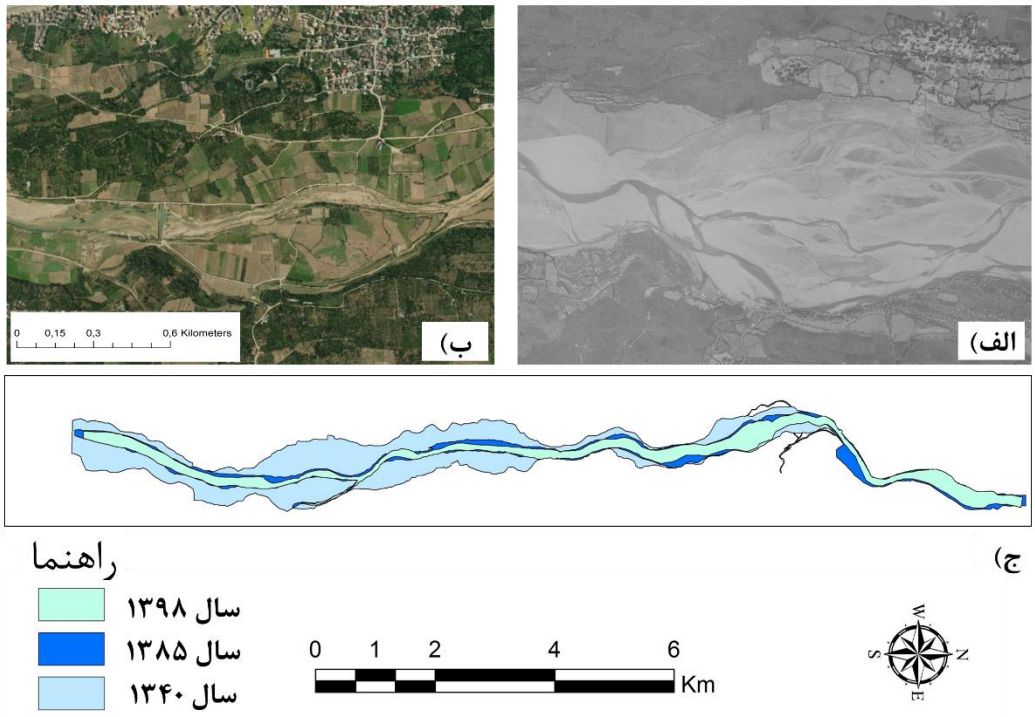
وجود سد منجر به کاهش بار بستر و نیز افزایش مقدار نهشته در پایین‌دست نیز می‌شود (شکل ۶-الف). این مشاهدات به‌وسیله شاخص A2- تغییر در دبی رسوب (تقریباً در طبقه کیفی متوسط) محاسبه شده است. در منطقه مورد مطالعه به غیر از سدها، وجود سایر سازه‌های عرضی متعدد در داخل جریان (سرریز، شیب‌شکن و پل‌ها) باعث افزایش این تغییرات و ایجاد ناپیوستگی طولی به‌خصوص در بازه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ شده است (جدول ۶ و شکل ۷). قرارگیری ۷۲ درصد بازه‌ها در طبقه تغییرات متوسط برای شاخص F1- پیوستگی طولی در انتقال رسوب و چوب این امر را به خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۶- خلاصه‌ای از خصوصیات و ویژگی‌های بازه‌های مورد بررسی گردآوری شده از بررسی‌های میدانی

	مواد بستر	پوشش گیاهی	ویژگی جریان	سازه عرضی	دشت سیلابی	پوشش بستر یا حفاظت از کناره
۱	قلوه‌سنگ و قطعه سنگ با قطر ۶۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر	هر دو سمت متراکم شامل مازو، توسکا، سپیدار و انجیلی	واریزه چوبی و موانع سنگی درون جریان- چالاب-خیزاب و آبشار طبیعی	فاقد سازه	۲۵۰ متر از دشت سیلابی بازه در سمت راست را اراضی کشاورزی و در سمت چپ کاملاً محدود به کوه	فاقد
۲	عموماً قلوه‌سنگ-های با سایز متوسط و جلبک	سمت راست (فاقد پوشش)، سمت چپ شامل گیاهان سریع‌الرشد مانند توسکا	توالی سکو-چالاب، موانع رسوبی جانبی، تنگ-شدگی مشهود جریان	فاقد سازه	سمت راست به‌علت مجاورت با کوه کاملاً محدود، در سمت چپ پیوسته و کاربری اراضی شالیزاری (پهنای ۲۰۰ متر)	فاقد
۳	رسوبات با قطر کمتر از ۳۰ میلی-متر	ناچیز	چالاب-خیزاب و آبشار مصنوعی، موانع رسوبی(طولی و جانبی) و جزایر درون جریان، وجود قطعات بزرگ بتنی و سنگی	پل و شیب-شکن، کانال انحراف جریان، آبراه ماهی	نیمی از سمت راست به‌علت مجاورت با کوه کاملاً محدود و دشت سیلابی در مابقی بازه (هر دو سمت) پیوسته و کاربری زمین‌های کشاورزی و یا اراضی بایر	کناره جریان حفاظت شده (دیواره بتنی) و پوشش بستر مصنوعی (۲۰ متر)
۴	رسوبات با قطری بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر و قلوه‌سنگ	ناچیز	چالاب-خیزاب متوالی و موانع رسوبی طولی و جانبی (قلوه‌سنگی و خمیره‌ای از رس و سیلت)	پل و شیب-شکن، کانال انحراف جریان	کانال رودخانه متصل به دشت سیلابی در دو سمت، عرض ۱۰۰ متر، اراضی شالیزاری	فاقد
۵	شن و ماسه (قطر تقریبی پنج تا ۱۰ میلی‌متر)	گونه گندمیان (چمن) و پهن برگ علفی با تراکم بالا	دو شاخه شدن جریان با جزیره با پوشش گیاهی به طول ۳۵۰ متر	پل، آبگیر و سد تنظیمی	سمت راست زمین بایر (محل انباشت زباله ساختمانی)، سمت چپ حاشیه شهر ساری، برداشت شن و ماسه	کناره راست حفاظت شده (دیواره بتنی)
۶	شن و ماسه (قطر تقریبی پنج تا ۱۰ میلی‌متر)	سمت راست (گونه-های درختی مانند توسکای قشلاقی و یا سرخس پنجه‌ای) سمت چپ (پوشش ناچیز)	چالاب-خیزاب‌های متوالی و موانع رسوبی جانبی	سیفون معکوس و شیب‌شکن	کانال متصل به دشت سیلابی، تراس آبرفتی با ارتفاع ۱۵ متر از کف کانال	کناره چپ حفاظت شده (دیواره بتنی- ۱۰۰ متر)
۷	بسیار ریزدانه (خمیره رس و سیلت)	هر دو سمت (سرخس پنجه‌ای و پهن برگ علفی)	بستر کانال هموار	فاقد سازه	کانال متصل به دشت، کاربری اراضی کشاورزی و باغ	فاقد

شکل ۵- الف) بار رسوبی درون کانال جریان و پوشش گیاهی در بازه ۴، ب) اراضی کشاورزی در مجاورت جریان و پوشش گیاهی در بازه ۶ و ج) موانع رسوبی جانبی و اراضی کشاورزی در دشت سیلابی و از بین رفتن پوشش گیاهی در بازه ۳

مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیرمستقیم ژئومورفولوژیکی به تغییرات ایجاد شده به وسیله مداخلات انسانی، بر روی مورفولوژی و پویایی کانال اثرگذار است، به‌عنوان مثال، بار بستر کم، پویایی جریان را کاهش داده، فرایند فرسایش کناره افزایش می‌یابد. افزایش این فرایند به‌وسیله شاخص F4- فرایند پس‌روی در کناره‌ها که (۸۴ درصد) در طبقه تغییرات متوسط، F11- وجود تنه (واریزه‌های چوبی) درخت درون کانال رودخانه، به‌ترتیب (۵۷ و ۳۰ درصد) در طبقه تغییرات متوسط (شکل ۱۲- ج) و کاملاً تغییریافته برای رودخانه تجن مشاهده می‌شود که تحت تاثیر تغییرات ایجاد شده روی مورفولوژی رودخانه تجن به‌عنوان مثال، تغییر شدید اراضی کاربری و پوشش گیاهی است (شکل ۷). علاوه‌بر این، کاهش بار بستر اغلب باعث تعدیل مورفولوژی کانال و همگنی هندسه پروفیل شده، در نتیجه، با کاهش تنوع در سرعت جریان که امری حیاتی برای موجودات زیست-محیطی بوده، تنوع زیستگاه آبزی رودخانه تجن به خطر افتاده است. وضعیت مذکور بیشتر در شاخص F9- تغییرپذیری مقطع عرضی (درصد طول بازه‌ها با تغییرات طبیعی ناهمگن مورد انتظار برای آن نوع رودخانه که به‌وسیله عوامل انسانی) منعکس می‌شود. برای رودخانه تجن این شاخص، به‌ترتیب (۴۳ و ۱۴ درصد) در طبقه تغییرات متوسط و کاملاً تغییر یافته، ثبت شده است.



شکل ۶- الف) عکس هوایی سال ۱۳۴۰ بازه ۴ (سازمان نقشه‌برداری ایران)، ب) تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۹۸ بازه ۴ (USGS) و ج) تعدیل کانال و جابه‌جایی بستر رودخانه بین سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۹۸ در بازه‌های ۴، ۵ و ۶ استخراج شده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای

به غیر از وجود سد، مداخله انسانی دیگر شامل کانالیزه کردن رودخانه و اصلاح کانال، تاثیر به‌سزایی بر روی شاخص تعدیل کانال دارد. این امر برای رودخانه تجن، به‌خصوص در طول مسیر رودخانه در بازه ۵ (شهر ساری) کاملاً مشهود است (شکل ۸- ج). امتیازدهی به این شاخص، نیازمند استفاده هم‌زمان از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی قدیمی (۵۰ سال گذشته) و بازدید میدانی به‌منظور یافتن شواهدی از حفاری یا انباشت رسوب (ارزیابی به‌صورت کیفی یا کمی) (شکل ۱۱- الف و ب) است. عکس‌های هوایی منطقه در سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۸۵ (سازمان نقشه‌برداری ایران) و تصاویر ماهواره‌ای منطقه در سال ۱۳۵۳ و ۱۳۹۸ (سازمان زمین‌شناسی آمریکا)، تهیه و تحلیل شد. در این روش، با استفاده از ابزار طبقه‌بندی نظارت شده در محیط ArcGIS 10.1، فرم کانال جریان استخراج شده و تغییرات آن‌ها برای بازه‌های ۴، ۵ و ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۶- الف تا ج، به‌ترتیب عکس هوایی سال ۱۳۴۰ و تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۹۸ بازه ۴ و فرم کانال رودخانه در طول بازه‌های ۴، ۵ و ۶، استخراج شده از تصاویر ارجاع زمینی شده عکس‌های هوایی برای سه سال متوالی ۱۳۴۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۸را نشان می‌دهد.

شکل ۷- الف) شیب‌شکن و پوشش بستر در بازه ۶، ب) سد انحرافی و راه ماهی در بازه ۵ و ج) سازه شیب‌شکن در بازه ۳

شکل ۸- الف) ایجاد پوشش کناره سنگ‌چین در بازه ۵، ب) ایجاد پوشش بتنی کناره در بازه ۵ و ج) کانال‌سازی جریان و از بین رفتن پوشش گیاهی در بازه ۵

با توجه شاخص CA1- تعدیل الگوی کانال، ۸۶ درصد از بازه‌ها، تغییرات در الگوی کانال در ۵۰ سال گذشته بر اساس تغییرات شاخص‌های شریانی و واجریانی را نشان می‌دهند. تاثیر شاخص CA2- تعدیل عرض کانال بر روی رودخانه تجن با توجه به فرم کانال‌های استخراج شده در طی ۵۰ سال مشهود است. در ۵۷ درصد موارد، باریک شدن کانال به‌طور متوسط (۱۵ تا ۳۵ درصد از طول بازه) در طول بازه و در ۲۹ درصد موارد تغییرات شدید (بیش از ۳۵ درصد از طول بازه) مشاهده شده است. همچنین، بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که تغییرات سطح بستر در بخش‌های مورد بررسی رودخانه تجن گسترده است. لذا، برای شاخص CA3- تعدیل سطح بستر، ۵۷ درصد از بازه‌ها در طبقه تغییرات متوسط (تغییرات بین ۰/۵ تا سه متر) قرار دارند که منجر به قطع اتصال رودخانه با دشت سیلاب اطراف شده و باعث مختل شدن ویژگی‌های زیست‌محیطی و عملکرد رودخانه (به‌عنوان مثال تنوع زیستگاه و پوشش کناره) شده است (شکل ۹- الف و ب). این مشکل در رودخانه تجن، به‌دلیل ساخت تعداد زیادی سازه عرضی در مسیر رودخانه و عدم وجود راه‌ماهی، طراحی نامناسب آن و یا عدم سرویس و رسیدگی، بیشتر نمود پیدا کرده است (شکل ۷- ب).

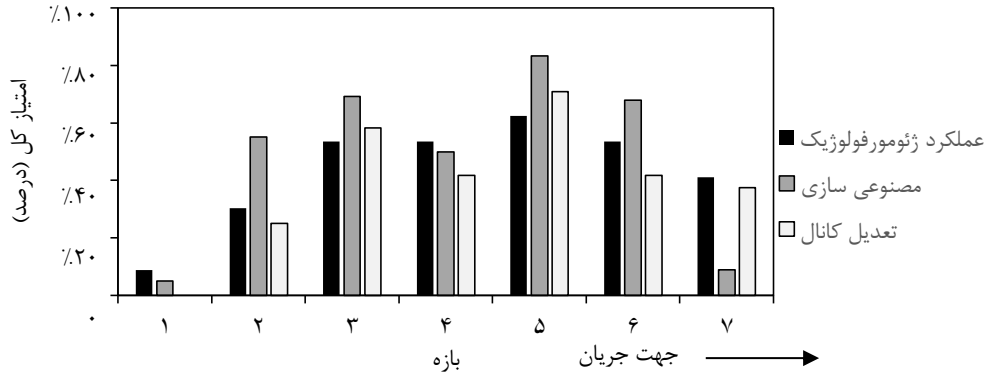
شکل ۹- تراس‌های مشاهده شده در رودخانه تجن، الف) بازه ۶، ب) بازه ۳ و ج) فرسایش شدید در بازه ۶

در بازه‌های مورد مطالعه، سیلاب‌دشت به تراس تبدیل شده (شکل ۹- الف و ب) و در برخی از مناطق (به‌خصوص بازه ۶) در نتیجه رسوب، یک دشت سیلابی جدید ایجاد شده، سیلاب‌دشت اصلی به‌طور فشرده تحت کشت (اراضی شالیزار و باغ‌های میوه) است. این نوع نهشته‌گذاری غالباً در طول رودخانه تجن اتفاق افتاده، اما در بیشتر موارد باریک و ناپیوسته است (شاخص F2- پیوستگی با دشت سیلابی، ۷۱ درصد بازه‌های مورد مطالعه دستخوش تغییرات متوسط و ۱۴ درصد کاملاً تغییر یافته). فشار آشکار دیگر بر روی سامانه رودخانه، تغییر کاربری اراضی است. افزایش تدریجی کشاورزی و جنگل‌زدایی بی- وقفه منجر به افزایش چشم‌گیر فرسایش خاک (شکل ۹- ج) و در نتیجه، ورود مقدار زیادی رسوبات ریزدانه به داخل رودخانه شده است. منشأ این فشار در ساختار بستر رودخانه بوده که به‌دلیل حفاظت در پایین‌دست سد و باقی سازه‌ها به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است. بررسی میدانی حضور گسترده سنگ و نهشته را در طول تمامی بازه‌ها نشان می‌دهد. در نتیجه، برای شاخص F10- ساختار بستر جریان که در بهترین حالت دارای ناهمگنی طبیعی رسوبات بستر و عدم وجود بستر مسدود یا پوشیده شده، نزدیک به ۳۰ درصد از بازه‌های مورد مطالعه در شرایط تغییر نیافته گزارش شده است (شکل ۱۰).

شکل ۱۰- الف) مواد بستر سنگ در بازه ۱، ب) مواد بستر شنی در بازه ۳ و ج) مواد بستر ریزدانه در بازه ۷

در امتداد محدوده شهری ساری (به‌خصوص بازه ۵)، مستقیم‌سازی کانال رودخانه، منجر به مصنوعی سازی فرم کانال شده است. علاوه‌بر این، حفاری و برداشت رسوب در طی سال‌های گذشته (به غیر از بازه‌های ۱ و ۷) باعث تغییر فرم کانال و الگوی جریان از شرایط طبیعی رودخانه شده است. این فعالیت نشان‌دهنده ایجاد یک تغییر اضافی در بستر جریان است که به‌وسیله شاخص A10- جابه‌جایی و برداشت رسوبات نشان داده می‌شود که برداشت رسوب در طی ۲۰ سال گذشته را بررسی می‌کند. این شاخص برای رودخانه تجن، ۵۷ درصد در طبقه تغییرات متوسط را نشان می‌دهد. حفاظت از کناره (شاخص A6) ۴۳ درصد از طبقه تغییرات متوسط با توجه به ایجاد پوشش کناره کامل در بازه ۵ و طول کمی در بازه‌های ۳ و ۶ (رجوع شود به جدول ۶ و شکل ۸) و شاخص A7- خاک‌ریزهای مصنوعی بیش از ۸۰ درصد در طبقه تغییر نیافته قرار گرفته است. پوشش گیاهی به دلیل کشاورزی فشرده در فاصله بسیار نزدیک با کانال جریان رودخانه در بسیاری موارد کم و در منطقه شهری به‌طور کامل از بین رفته است (F12-محدوده‌ی گیاهان عملکردی تنها در ۱۴ درصد موارد در طبقه کیفی تغییر نیافته گزارش شده) و برای شاخص F13- گسترش خطی پوشش گیاهی عملکردی، ۴۳ درصد تغییرات متوسط و ۵۷ درصد تغییر یافته، گزارش شده است (جدول ۶).

شکل ۱۱- الف) انباشت رسوب در بازه ۲، ب) حفاری و برداشت رسوب در بازه ۴ و ج) جمع‌آوری چوب در بازه ۶



شکل ۱۲- امتیاز سه مولفه عملکرد ژئومورفولوژیک، مصنوعی‌سازی و تعدیل کانال به‌صورت درصدی از بیشینه امتیاز هر مولفه در هر بازه

پس از بررسی شاخص‌های منفرد و تاثیر تک تک آن‌ها بر روی رودخانه تجن، سه گروه مولفه (عملکردی، مصنوعی‌سازی و تعدیل کانال) با ثبت نمره کل هر مولفه به‌عنوان درصدی از بیشینه نمره ممکن برای هر گروه به‌طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۱۲). هر چه امتیاز مولفه بیشتر باشد، تغییرات گزارش شده برای آن مولفه کمتر است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که متوسط مولفه‌های عملکرد ژئومورفولوژیک (F)، مصنوعی‌سازی (A) و تعدیل و تنظیم کانال (CA) به‌ترتیب ۴۳، ۴۹ و ۴۰ درصد بوده، نمرات کلی اختصاص یافته به مولفه های عملکرد ژئومورفولوژیک و تعدیل کانال نسبتاً کمتر از نمره کلی مولفه مصنوعی‌سازی (تقریباً ۵۰ درصد از بیشینه نمره بالقوه) است. بیشترین مقدار مولفه‌ها همواره در بازه ۵ و ۳ و کمترین مقدار مولفه‌ها در بازه ۱ است. دلیل این امر، عدم وجود مداخلات انسانی زیاد، از جمله ایجاد تغییر در شکل رودخانه، عرض و بستر کانال، ایجاد سازه‌ها و تغییر جریان به خصوص در بازه ۱ است (جدول ۶).

نتیجه‌گیری

موقعیت رودخانه تجن و عبور آن از مناطق کوهستانی مرتفع، دشت و مناطق ساحلی و نیز اقلیم مدیترانه‌ای آن، از انطباق مناسبی با شرایط مرجع ذکر شده در ارزیابی به روش شاخص HMQI برخوردار است. از طرفی، تامین منابع آب شرب و کشاورزی منطقه، اقلیم مناسب و عبور از شهر ساری، سبب ایجاد تغییرات در بستر و کانال رودخانه شده است. ارزیابی کیفی مورفولوژیک و هیدرومورفولوژیک رودخانه تجن با استفاده از سنجش از راه دور (تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۳۵۳ لندست ۴ و سال ۱۳۹۸ لندست ۸، عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۸۵ سازمان نقشه‌برداری ایران)، داده‌های هیدرولوژیکی حوضه تهیه شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران و بازدیدهای میدانی، در هفت بازه انجام شد. نتایج کلی ارزیابی شاخص HMQI رودخانه تجن نشان داد که این رودخانه در بازه‌های مورد مطالعه عمدتاً در طبقه کیفی ۴- ضعیف، به‌دلیل وجود مداخلات انسانی مانند، از بین بردن پوشش گیاهی، فرسایش عرضی و نهشته‌گذاری طولی و تغییر کاربری اراضی قرار گرفته است. با توجه به موارد ذکر شده و به‌منظور جلوگیری از فرسایش، اقدامات غیرسازه‌ای و حفاظت از کناره طبیعی مانند استفاده از سنگ‌چین و چوب که پوشش گیاهی و اکولوژیکی را به‌دلیل ایجاد فضا برای رشد

پوشش گیاهی و حفظ زیستگاه جانوری فضای مناسب برای زیستگاه، در معرض خطر قرار نمی‌دهد، به‌خصوص در بازه‌های ۴، ۵ و ۶ پیشنهاد می‌شود. هر چند این اقدامات، ب‌دلیل هزینه زیاد، در طول کل بازه، اجرایی نبوده، ولی در طولی از بازه، تحت تاثیر فرسایش شدیدتر، پیشنهاد می‌شود. در روش مورد مطالعه نمی‌توان به‌طور جزیی طول شدیدتر تحت فرسایش را به‌دلیل (مقیاس طولی پیشنهاد شده در این روش، یک تا ۱۰ کیلومتر) مشخص کرد، با این‌حال، به‌منظور مشخص کردن دقیق این بازه‌ها، می‌توان از روش LAWA-OS توسعه یافته در کشور آلمان (ارزیابی هیدرومورفولوژیکی رودخانه در طول بازه‌های ۱۰۰ تا ۵۰۰ متری) استفاده کرد (LAWA، ۲۰۰۰). وضعیت رودخانه تجن از نظر شاخص کیفی مورفولوژیکی، متوسط است، جایی که کل امتیازات اختصاص یافته به مولفه مصنوعی‌سازی با متوسط وقوع ۵۰ درصد در طول هفت بازه در مقایسه با نمرات مربوط به مولفه‌های عملکردی و تعدیل کانال بیشتر است. این در حالی است که طبقه رودخانه تجن از نظر شرایط کلی هیدرومورفولوژیک پایین‌تر و عمدتاً در طبقه کیفی ۴- ضعیف گزارش شده است. دلیل این امر این است که همه بازه‌ها به‌جز بازه‌های ۱ و ۷ تحت تأثیر شاخص مرتبط با تغییرات دبی جریان به‌دلیل وجود سد در حوضه بالادست در محدوده ۳۰ کیلومتری (کاهش دبی جریان و افزایش وقوع جریان‌های کم) هستند. همچنین، نتایج نشان داد که روش فوق در ارزیابی کلی مبتنی بر شاخص، تشخیص مشکلات هیدرومورفولوژیکی و درک صحیح پاسخ به فشارها مؤثر است. اخیراً روش شاخص کیفی مورفولوژیکی را بسط داده شده، به‌طوری‌که به ارزیابی فشارها و تغییرات در طول رودخانه با استفاده از شاخص‌های مداخلات انسانی تحت عنوان روش شاخص کیفیت مورفولوژی بازبینی‌شده (rMQI) می‌پردازد که در برنامه‌ریزی اقدامات باززنده‌سازی بسیار موثر است. لذا، پیشنهاد می‌شود که وضعیت کیفی مورفولوژیکی رودخانه تجن با استفاده از این روش توسعه یافته نیز بررسی شود. شایان ذکر است که ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی با استفاده از روش HMQI، تنها شرایط حال حاضر رودخانه را به‌منظور برنامه‌ریزی اقدامات باززنده‌سازی بررسی و پیش‌بینی وضعیت آینده در آن لحاظ نمی‌شود. در نهایت، با توجه به تعداد زیاد پارامترهای مورد بررسی در این روش، به‌منظور بررسی شدت تاثیر هر پارامتر بر ارزیابی کلی هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن، استفاده از روش‌های آماری مانند آزمون همبستگی رتبه دو طرفه اسپیرمن پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از خانم‌ها مهندس وحیده لطفی، مهندس مهدیه باقری و آقای مهندس مجید میرعمادی که در بازدیدها ما را همراهی کردند، تشکر می‌نمایند. همچنین، از نظرات گران‌بهای آقای دکتر اسماعیل کردی در ویرایش پژوهش حاضر کمال قدردانی را دارند.

منابع مورد استفاده

1. Belletti, B., M. Rinaldi, A.M. Gurnell, A.D. Buijse and E. Mosselman. 2015. A review of assessment methods for river hydromorphology. Environmental Earth Sciences, 73(3): 2079–2100.
2. Belletti, B., L. Nardi, M. Rinaldi, M. Poppe, K. Brabec, M. Bussettini, F. Comiti, M. Gielczewski, B. Golfieri, S. Hellsten, J. Kail, E. Marchese, P. Marcinkowski, T. Okruszko, A. Paillex, M. Schirmer, M. Stelmaszczyk and N. Surian. 2018. Assessing restoration effects on river hydromorphology using the process-based morphological quality index in eight European river reaches. Journal of Environmental Management, 61(1): 69-84.
3. Campana, D., E. Marchese, J.I. Theule and F. Comiti. 2014. Channel degradation and restoration of an Alpine river and related morphological changes. Geomorphology, 221(2): 230-241.
4. Environment Agency. 2003. River habitat survey in Britain and Ireland. Field Survey Guidance Manual, Bristol, England, 136 pages.
5. Esmaili, R. and S. Valikhani. 2015. Evaluation and analysis of the hydromorphological condition of Lavij River using MQI Method. Quantitative Geomorphological Research, 2(4): 37-53 (in Persian).
6. European Commission. 2000. Directive 2000/60/EC, Establishing a framework for community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 327: 1, Brussels,

Belgium, 72 pages.
7. Hafezi Moghaddas, N., H. Solouki, R. Jalilvand and J. Rahnamarad. 2012. Geomorphological study of river engineering of Sistan River. Journal of Geotechnical Geology, 8(1): 1-18 (in Persian).
8. Ilanlou, M. and A. Karam. 2020. Evaluating the hydromorphological condition of Jajroud River using MQI Method. Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 20(56): 35-53 (in Persian).
9. Ioana-Toroimac, G., L. Zaharia and G. Minea. 2015. Using pressure and alteration indicators to assess river morphological quality, case study of the Prahova River (Romania). Journal of Water, 7(6): 2971-2989.
10. LAWA. 2000. Gewässerstrukturgütebewertung in der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren für kleine und mittlegroße Fließgewässer. Berlin, Germany, 145 pages.
11. Layeghi, S. and A. Karam. 2015. Hydro-geomorphological classification of Jajroud River using Rosgen Model. Journal of Quantitative Geomorphological Research, 3(3): 130-143 (in Persian).
12. Maghsoudi, M., S.M. Zamanzadeh, M. Yamani and A. Hajizadeh. 2017. Assessing the changes in the Maroon River sinuosity pattern and hydrogeomorphological analysis of the case study area: Maroon River (from the source to entrance to the Jarahi River). Journal of Natural Geography, 10(1): 1-28 (in Persian).
13. Mazandaran Regional Water Company. 2015. Tajan River hydrological study report. Sari, Iran, 56 pages (in Persian).
14. Nosrati, K., M. Rostami and Z. Etminan. 2020. Evaluating the hydromorphological condition of Taleghan River using morphological quality index. Journal of Hydrogeomorphology, 6(21): 133-154 (in Persian).
15. Rezaei Moghaddam, M.H., I. Jabbary and N. Pirozynezhad. 2016. A study of meandering, braided and anabranching channel planforms, using sinuosity and braided indexes in Gamasiab River. Journal of Watershed Management Research, 7: 272-283 (in Persian).
16. Rigon, E., J. Moretto, F. Delai, L. Picco, D. Ravazzolo, R. Rainato and M. Lenzi. 2013. Application of the new morphological quality index in the Cordevole River (BL, Italy). Journal of Agricultural Engineering, 44(2): 48-53.
17. Rinaldi, M., N. Surian, F. Comiti and M. Bussettini. 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: the morphological quality index. geomorphology, 180(181): 96–108.
18. Rinaldi, M., M. Bussettini, N. Surian, F. Comiti and A.M. Gurnell. 2016. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI). Version 2. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Florence, Italy, 177 pages.
19. Rinaldi, M., B. Belletti, M. Bussettini, F. Comiti, B. Golfieri, B. Lastoria, E. Marchese, L. Nardi and N. Surian. 2017. New tools for the hydromorphological assessment and monitoring of European streams. Journal of Environmental Management, 202(2): 363-378.
20. Rinaldi, M., R. Baena-Escudero, L. Nardi, I.C. Guerrero-Amador and B. García-Martínez. 2019. An assessment of the hydromorphological conditions of the middle and lower Guadalquivir River (Southern Spain). Physical Geography, 41(3): 1-18.
21. Roustaee, Sh., A. Khorshiddoost and S. Khaleghi. 2013. Evaluation of Lighvan River duct morphology using Rosgen classification method. Quantitative Geomorphological Research, 1(4): 1-16 (in Persian).
22. Scorpio, V., A. Loy, M. Di Febbraro, A. Rizzo and P. Aucelli. 2014. Hydromorphology meets mammal ecology river morphological quality, recent channel adjustments and otter resilience. River Research and Applications, 32(3): 1-13.
23. Tockner, K., M. Pusch, D. Borchardt and M.S. Lorang. 2010. Multiple stressors in coupled river–floodplain ecosystems. Freshwater Biology, 55(3): 135–151.
24. Toland, M. and M. Murphy. 2013. River Hydromorphology Assessment Technique (RHAT) training manual. Version 2, Northern Ireland Environment Agency. Belfast, England, 97 pages.
25. Yaghoubnezhad Asl, N., F. Esfandyari Dorabad Sayyad and S. Asghari Sareskanroud. 2020. Evaluation of morphological condition of Taleghan River between 2006 to 2016. Journal of Quantitative Geomorphological Researches, 9(1): 67-85 (in Persian).