

ارزیابی دینامیک مورفولوژیکی رودخانه بابلرود، استان مازندران

رضا اسماعیلی* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه مازندران.
علی شاکری نسب - کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه مازندران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

چکیده

خصوصیات مورفولوژی رودخانه‌ها به واسطه ویژگیهای دینامیکی آنها همواره دچار تغییرات هستند. تغییرات در الگو، نیمرخ عرضی و طولی رود می‌تواند نقش مهمی در پهنه‌بندی و تهیه نقشه خطر سیل داشته باشد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، قسمت پایکوهی و جلگه‌ای رودخانه بابلرود در استان مازندران است که هشت بازه از این رودخانه در مجموع به طول ۱۰/۵ کیلومتر به عنوان نمونه از موقعیت‌های مختلف انتخاب شدند و با استفاده از شاخص دینامیک مورفولوژیکی رودخانه (MDI) مورد مطالعه قرار گرفتند. هدف این پژوهش، طبقه‌بندی دینامیک مورفولوژیکی رودخانه و بررسی ارتباط آن با متغیرهای محیطی بوده است. روش MDI بخشی از چارچوب IDRAIM است که سه گروه از شاخص‌ها شامل مورفولوژی و فرایندها، شاخص‌های مصنوعی و تعدیل رود را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مقدار MDI در منطقه مورد مطالعه از ۰٫۶۴ در بازه‌های بالادست تا ۰٫۱۴ در بازه‌های پایین دست متغیر بوده است که نشان دهنده کاهش دینامیک مورفولوژیکی رود از بالادست به سمت پایین دست رود است. نقشه‌های ژئومورفولوژی رود و مقادیر MDI بالا در بازه‌های ۱ تا ۴ نشان دهنده پویایی مورفولوژیکی زیاد آنها است و تهیه نقشه خطر سیل باید با توجه به روند تغییرات پلان و ابعاد کانال رود انجام شود. عرض فعال رودخانه و درجه محدودیت رود به ترتیب ضریب همبستگی ۰٫۹۲- و ۰٫۷۸- با شاخص MDI داشته‌اند که نشان می‌دهد با افزایش هر یک از این دو متغیر دینامیک مورفولوژیکی رود کاهش یافته است. متغیرهای ارتفاع، شیب و شاخص محدودیت کانال هم به ترتیب ضریب‌های همبستگی ۰٫۶۸+، ۰٫۶۲+ و ۰٫۷۸+ با مقدار MDI داشته‌اند که بیانگر افزایش دینامیک مورفولوژیکی کانال با افزایش این متغیرها بوده است.

واژگان کلیدی: بابلرود، IDRAIM، شاخص پویایی مورفولوژیکی (MDI)، مازندران.

مقدمه

رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل شکل‌زایی در سطح زمین محسوب می‌شوند. جریان آب و انتقال رسوب نقش اساسی در فعالیت دینامیکی رودخانه‌ها دارند و در ارتباط با تنوع عوامل محیطی موجب بروز رفتارهای مختلف در رود می‌شوند. شناخت رفتار رود و بررسی تغییرات رودخانه در طی زمان می‌تواند درصد موفقیت طرح‌های مهندسی و بازایی رود را افزایش دهد. انواع رودخانه‌ها می‌توانند به صورت طبیعی نسبت به جریانهای مختلف و انتقال رسوب خود را تعدیل نمایند. تعدیل رود در سه گروه تعدیل بستر رود، تعدیل جانبی و تغییرات کلی رود قابل بررسی هستند (فریرس و بریرلی، ۲۰۱۲). تعدیل در بستر رود تغییرات مربوط به فرو سایی (پایین رفتن بستر در اثر فرسایش) و فرا سازی (بالا آمدن بستر در اثر رسوبگذاری) است. تعدیل جانبی تغییرات در شکل و اندازه بدون جابجایی موقعیت رود در دره است یعنی عرض کانال رود دچار پهن‌شدگی یا تنگ‌شدگی می‌شود. تغییرات کلی رود هم با جابجایی تالوگ رود، تغییر مسیر و مهاجرت کانال رود مشخص می‌شود. از این رو، تعدیل رود منجر به ایجاد تغییراتی در مورفولوژی رود شده و بالقوه می‌تواند در خطر وقوع سیل و سایر مخاطرات کانال رود نقش داشته باشد. در تهیه نقشه خطر سیلاب معمولاً ویژگیهای هیدرولوژیکی جریان یعنی فراوانی و بزرگی دبی جریان به صورت احتمالاتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و به عمق و سرعت جریان سیلابی توجه ویژه می‌شود. این رویکرد برای رودهای کم انرژی و رودهایی که شدیداً کنترل شده‌اند مناسب است. اما در رودخانه‌های کوهستانی و رودهای با بستر گراولی که دینامیک فعال تری دارند، با فرض ثابت بودن ابعاد کانال ارزیابی خطر سیلاب به درستی صورت نمی‌گیرد (مازورانا و همکاران، ۲۰۱۳). لذا تحلیل تغییرات مورفولوژیکی کانال با نگرشها و روشهای ژئومورفولوژیکی برای ارزیابی دینامیک و ناپایداری کانال می‌تواند این مشکل را کاهش دهد (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۵). در اغلب تحقیقات انجام شده پارامترهای مؤثر در تغییرات مورفولوژیکی و دینامیکی کانال رود به صورت منفرد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعه تغییرات مورفولوژیکی و دینامیکی الگو (پلان) رودخانه‌ها (مگدانلو و فرناندز یوست، ۲۰۱۱؛ آختر و همکاران، ۲۰۱۹؛ آنایات و سیل، ۲۰۲۰)، اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی بستر رود (ویزگا، ۲۰۰۷؛ لانگندوئن و همکاران، ۲۰۰۹؛ مارتین و همکاران، ۲۰۱۱) و ارزیابی تغییرات جانبی کانال رود (کلود و همکاران، ۲۰۱۴؛ وارد و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژیا و همکاران، ۲۰۱۹؛ خان و فریرس، ۲۰۲۰) نمونه‌ای از این نوع تحقیقات هستند.

در برخی از تحقیقات، انواع تغییرات کانال رود به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته و ویژگیها و میزان تغییرات در گروههای مختلفی طبقه‌بندی شده‌اند. رینالدی و همکاران (۲۰۱۵) چارچوبی را با عنوان *IDRAIM*^۱ را برای برنامه‌ریزی و مدیریت رود ارائه نمودند. شاخص کیفیت مورفولوژیکی رود (*MQI*) یکی از روشهای *IDRAIM* است که در تعدادی از رودهای ایتالیا مورد استفاده قرار گرفت (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس این روش تحقیقات دیگری در مناطق دیگر انجام شد که می‌توان به کارهای کامپانا و همکاران (۲۰۱۴)، ایونا تروپیماک و همکاران (۲۰۱۵)، بلتی و همکاران (۲۰۱۷)، گولفیری و همکاران (۲۰۱۸) اشاره نمود.

اسماعیلی و ولی خانی (۱۳۹۳) شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه لایوچ با استفاده از شاخص کیفیت مورفولوژیکی (*MQI*) مورد ارزیابی قرار دادند. در این روش سه مؤلفه اصلی کیفیت عملکرد مورفولوژیکی، سازه‌های مصنوعی و تعدیل کانال مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌های مورد مطالعه در این تحقیق کیفیت مورفولوژیکی مناسبی داشتند. ایلانلو و کرم (۱۳۹۹) ویژگیهای هیدرومورفولوژیکی رودخانه جاجرود را با روش *MQI* مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد تمامی بازه‌های مورد مطالعه در گروه ضعیف و خیلی ضعیف قرار گرفتند.

ناردی و رینالدی (۲۰۱۵) اثرات یک سیلاب شدید را با استفاده از چارچوب *IDRAIM* در رودخانه مگرا در ایتالیا مورد مطالعه قرار دادند. کمیتی و همکاران (۲۰۱۶) پهن‌شدگی کانال رود را پس از وقوع یک سیلاب شدید در چارچوب

^۱ - *IDRAIM* (IDRAIM, in Italian) and stream hydromorphological evaluation, analysis and monitoring system (in English)

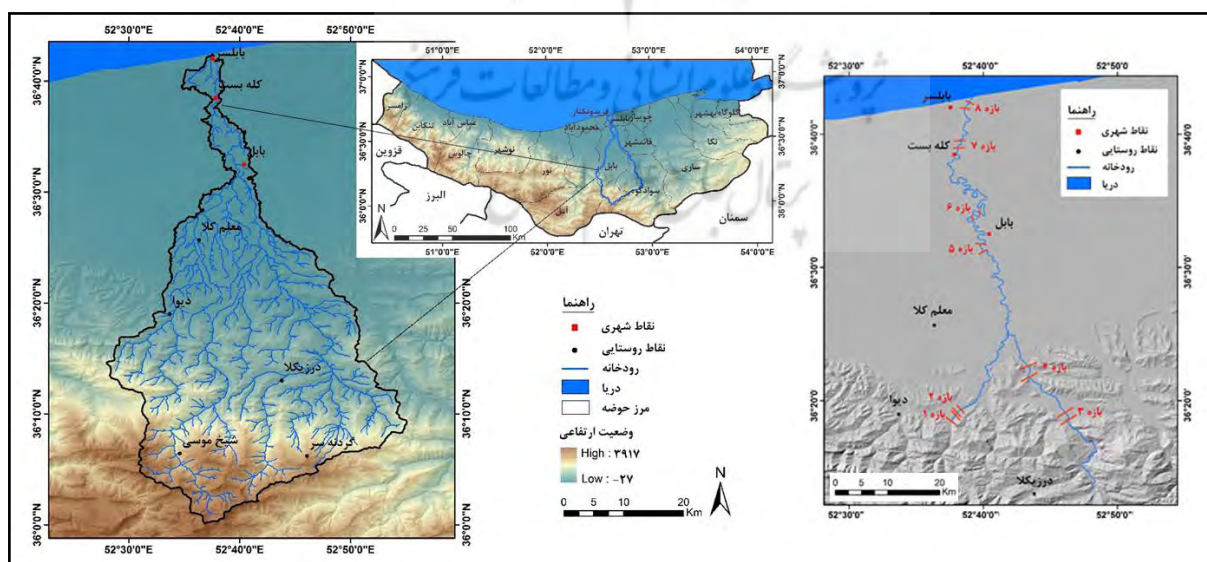
IDRAIM و با روش طبقه‌بندی دینامیکی حوادث (EDC) مورد ارزیابی قرار دادند. آلو و همکاران (۲۰۱۸) ویژگی‌های مورفولوژیکی رودخانه‌های پرنرزی را با ۱ شکل ژئومورفیک رودخانه باکر در پاتاگونیای شیلی با روش IDRAIM مورد بررسی و تحلیل قرار دادند.

ضرورت توجه به تغییرات مورفولوژی رود برای پهنه‌بندی خطر سیل، نقش مهمی در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر در امتداد رود دارد. لذا شناسایی مناطق با دینامیک مورفولوژیکی متفاوت می‌تواند در پهنه‌بندی صحیح منطقه خطر سیل مؤثر باشد و به عنوان یک متغیر مهم تلقی شود. لذا طبق نظر طراحان روش MDI، این روش با بررسی ویژگی‌های مختلف رود قادر به طبقه‌بندی دینامیک مورفولوژیکی رود است و تاکنون تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است.

در تحقیق حاضر هم سعی شده است دینامیک رودخانه بابل‌رود بر اساس ویژگی‌های فرم و فرایند رودخانه، عوارض مصنوعی و تعدیل رود با روش MDI^۱ که در قالب IDRAIM مطرح شده است مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، مهم‌ترین هدف این تحقیق طبقه‌بندی دینامیک مورفولوژی رودخانه بابل‌رود جهت مدیریت سیلاب و کانال رود است. همچنین بررسی ارتباط بین متغیرهای محیطی و دینامیک مورفولوژی رود هم از اهداف این پژوهش بوده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بابل‌رود در دامنه‌های شمالی البرز در استان مازندران واقع شده است (شکل ۱) و شاخه اصلی آن از ارتفاعات شمالی البرز سرچشمه گرفته و با عبور از شهرهای بابل و بابلسر وارد دریای خزر می‌شود. قسمت‌های کوهستانی حوضه در زون البرز شمالی و مناطق جلگه‌ای در زون گرگان-رشت قرار دارد. لیتولوژی حوضه در مناطق کوهستانی عمدتاً از شیل و ماسه سنگ سازند شمشک (ژوراسیک) و سنگهای آهکی و دولومیتی سازند الیکا (تریاس) و در مناطق جلگه‌ای از رسوبات آبرفتی کواترنری تشکیل شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۹۱۷ و ۲۷- متر از سطح آبهای آزاد قرار دارد. میانگین بارش سالانه حوضه ۷۹۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۳٫۳ سانتیگراد است. میانگین دبی بابل‌رود در یک دوره ۳۵ ساله ۱۶ مترمکعب در ثانیه بوده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز بابل‌رود و بازه‌های مورد مطالعه در استان مازندران

^۱ - Morphological Dynamics Index (MDI)

روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا هشت بازه از رودخانه بابل در موقعیت‌های مختلف از محدوده پایکوهی و جلگه‌ای با بررسی‌های میدانی و با استفاده از تصاویر گوگل ارث انتخاب شدند. نقشه ژئومورفولوژی لندفرم‌های رودخانه‌ای شامل کانال رود، موانع جانبی و پوینت بارها، دشت سیلابی و پادگانه‌های آبرفتی با استفاده از تصاویر گوگل ارث سال ۲۰۲۰ و بازدیدهای میدانی تهیه و ترسیم گردید. البته در این نقشه موقعیت سازه‌های مهندسی مانند پل‌ها، سدها (بندهای کوچک) و کناره‌ها حفاظت شده هم ثبت شد. جهت بررسی تغییرات کوتاه مدت نقشه لندفرم‌های رودخانه‌ای سال ۲۰۰۷ با استفاده از تصاویر گوگل ارث تهیه و ترسیم شد. تغییرات بلندمدت رودخانه از عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۵ و مطالعات انجام شده بوسیله سایر محققین مورد بررسی قرار گرفت. برخی از تغییرات مانند حفر بستر با توجه به شواهد زمینی ارزیابی شدند. جهت بررسی میزان محدودیت و توان جابجایی جانبی رودخانه از دو معیار درجه محدودیت^۱ (بریرلی و فریرس، ۲۰۰۵) و شاخص محدودیت^۲ (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۳) رود استفاده شد. درجه محدودیت، موقعیت رود را به سه حالت محدود، نسبتاً محدود و نامحدود (از طرفین آزاد) تقسیم‌بندی می‌نماید (بریرلی و فریرس، ۲۰۰۵) که به ترتیب بیش از ۹۰ درصد، ۱۰-۹۰ درصد و کمتر از ۱۰ درصد از طول کرانه رود در مجاورت مستقیم با دامنه یا تراس‌های قدیمی قرار دارند. شاخص محدودیت، نسبت عرض دشت آبرفتی (عرض رودخانه و دشت آبرفتی مجاور) به عرض کانال رود است. این شاخص به سه کلاس بالا (۱-۱,۵)، متوسط (۱,۵ - n) و پایین (بیش از n) طبقه‌بندی می‌شود که برای رودخانه‌های تک کانالی (مستقیم و سینوسی) n=۵ و برای رودهای چندکانالی n=۲ است (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۲). کلاس‌های محدودیت کانال رود بر اساس درجه و شاخص محدودیت در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: کلاس‌های محدودیت کانال رود (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۲)

توصیف	کلاس محدودیت
درجه محدودیت بیش از ۹۰ درصد	محدود
درجه محدودیت بین ۱۰ تا ۹۰ درصد و شاخص محدودیت کمتر از ۱,۵	
درجه محدودیت بین ۱۰ تا ۹۰ درصد و شاخص محدودیت بیش از ۱,۵	نسبتاً محدود
درجه محدودیت کمتر از ۱۰ درصد و شاخص محدودیت کمتر از n	
درجه محدودیت کمتر از ۱۰ درصد و شاخص محدودیت بیش از n	نامحدود

جهت بررسی دینامیک مورفولوژیکی رود از روش شاخص پویایی (دینامیک) مورفولوژیکی (MDI) رودخانه استفاده شد. این روش بخشی از روش IDRAIM^۳ است که برای ارزیابی هیدرومورفولوژیکی، آنالیز و پایش رودخانه‌ها (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) معرفی شده است. شاخص پویایی مورفولوژی رود با بررسی اشکال و فرایندهای رودخانه‌ای، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص‌های ارزیابی دینامیک مورفولوژیکی رودخانه به ۳ دسته شاخص‌های مربوط به مورفولوژی و فرایندها (M)، شاخص‌های مصنوعی (A) و شاخص‌های تعدیل (CA) تقسیم می‌شوند (جدول ۲). برای امتیازدهی به هریک از شاخص‌های فوق جدولی با سؤالات متعدد وجود دارد که با توجه به ویژگی‌های هر بازه امتیازات تعیین می‌شوند (جدول ۳، ۴ و ۵). برای اکثر شاخص‌ها پنج طبقه تعریف شده است که حداقل آن طبقه A با

^۱ - confinement degree^۲ - confinement index

پویایی ناچیز و حداکثر آن طبقه E با بیشترین دینامیک مورفولوژیک است. بدین ترتیب نمرات مرتبط به هر شاخص به تدریج از طبقه A تا E افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که امتیازدهی به هر یک از شاخص‌ها نیازمند درک مطلوب و مهارت کافی از ژئومورفولوژی رودخانه‌ای دارد تا خطای کار کاهش یابد. در ادامه هر یک از شاخص‌های مختلف MDI تشریح می‌شوند.

جدول ۲: شاخص‌های مورد استفاده در روش MDI (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۵)

مشخصه	شاخص	پارامترهای ارزیابی شده
M1	نوع کانال	تعریف الگوی کانال بر مبنای شاخص‌های سینوسی، شریانی و انشعابی
M2	فرسایش‌پذیری کناره	نوع کناره‌ها (چسبنده، غیر چسبنده)، درصد کناره‌های محافظت‌شده و پوشش گیاهی
M3	فرسایش‌پذیری بستر	نوع بستر (آبرفتی، رخنمون سنگ‌بستر)، درصد پوشش بستر
M4	فرایندهای فرسایش کناری	طول پسروری کناره‌ها و نرخ پسروری
M5	روند تغییرات عرض کانال	تغییرات عرض کانال طی ۱۰-۱۵ سال گذشته
M6	روند تغییرات سطح بستر	تغییرات سطح بستر طی ۱۰-۱۵ سال گذشته
A1	حفاظت کناره	طول کناره‌های محافظت‌شده
A2	حفاظت بستر	طول بستر محافظت‌شده توسط پوشش یا رمپ
CA1	تعدیل الگوی کانال	تغییرات الگوی کانال از دهه ۱۹۵۰ بر اساس تغییر در شاخص‌های سینوسی، شریانی و انشعابی
CA2	تعدیل عرض کانال	تغییر عرض کانال از دهه ۱۹۵۰
CA3	تعدیل سطح بستر	تغییر سطح بستر طی ۱۰۰ سال گذشته

*شاخص‌های تعدیل با توجه به وجود مستندات از دهه ۱۹۵۰ تعیین شده است که در ایران عکس‌های پوششی سال ۱۳۳۵ در این محدوده قرار داشته و قابل استفاده هستند.

الف) شاخص‌های مورفولوژی و فرایندها (M): این شاخص وضعیت مربوط به مشخصات کانال رودخانه (بررسی تغییرات الگوی کانال رودخانه)، فرسایش‌پذیری کناره‌ها (بررسی وضعیت حفاظت کناره‌ها)، فرسایش‌پذیری بستر (بررسی وضعیت پوشش بستر)، فرایندهای فرسایش کناری (بررسی وضعیت پسروری کناره‌ها)، روند تغییرات عرض کانال (بررسی تغییرات عرض کانال) و همچنین روند سطح بستر (بررسی تغییرات سطح بستر) را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (جدول ۳).

ب) شاخص‌های مصنوعی (A): این شاخص وضعیت حفاظت کناره‌های رودخانه را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این شاخص حفاظت کناره‌ها (بررسی طول کناره‌های محافظت‌شده) و حفاظت بستر (بررسی طول بستر محافظت‌شده) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (جدول ۴).

ج) شاخص‌های تعدیل کانال (CA): این شاخص به بررسی تغییرات الگوی کانال در طی سال‌های اخیر می‌پردازد. در این شاخص تعدیل الگوی کانال (بررسی تغییرات الگوی کانال از دهه ۱۹۵۰)، تعدیل عرض کانال (بررسی تغییرات عرض کانال از دهه ۱۹۵۰) و تعدیل سطح بستر (بررسی تغییرات سطح بستر در طی ۱۰۰ سال گذشته) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (جدول ۵).

سپس نمره کل از جمع نمرات همه شاخص‌ها بدست می‌آید و مقدار شاخص دینامیک مورفولوژیکی (MDI) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MDI = Stot/Smax$$

که Stot مجموع نمرات و Smax حداکثر نمره‌ای است که اگر همه شاخص‌ها در بالاترین طبقه قرار گیرند، حاصل می‌شود. بنابراین، مقدار MDI از ۰ (حداقل دینامیک مورفولوژیک) تا ۱ (حداکثر دینامیک مورفولوژیک) متغیر است و پنج طبقه زیر تقسیم می‌شوند: (الف) بسیار کم، $0 < MDI < 0.2$ ؛ (ب) کم، $0.2 \leq MDI < 0.4$ ؛ (پ) متوسط، $0.4 < MDI < 0.6$ ؛ $0.6 \leq MDI < 0.8$ ؛ (ت) بالا، $0.8 < MDI < 1$ ؛ و (ث) بسیار بالا، $1 \leq MDI \leq 0.8$.

جدول ۳: طبقات مربوط به شاخص مورفولوژی و فرایندهای و نحوه امتیازدهی آن‌ها (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۵)

امتیاز	طبقات	شاخص
۰	A- مورفولوژی کانال بسیار کم انرژی (بدون موانع)	M1
۳	B- مورفولوژی کانال کم انرژی (سینوسی یا متاندری، شاخه‌شاخه)	
۶	C- مورفولوژی کانال متوسط انرژی (سینوسی یا متاندری همراه با مانع طولی)	
۱۰	D- مورفولوژی کانال پرانرژی (سرگردان، شریانی)	
۰	A- کناره‌های آبرفتی غیرچسبنده فرسایش‌پذیر $\geq 10\%$ از کل طول کناره یا رسوبات چسبنده $\geq 33\%$	M2
۲	B- کناره‌های آبرفتی غیرچسبنده فرسایش‌پذیر $\geq 33\%$ از کل طول کناره یا رسوبات چسبنده $\geq 66\%$	
۴	C- کناره‌های آبرفتی غیرچسبنده فرسایش‌پذیر $\geq 66\%$ از کل طول کناره یا رسوبات چسبنده $\geq 90\%$	
۶	D- کناره‌های آبرفتی غیرچسبنده فرسایش‌پذیر $\geq 90\%$ از کل طول کناره یا چسبنده $< 90\%$	
۸	E- کناره‌های آبرفتی غیرچسبنده فرسایش‌پذیر $< 90\%$ از کل طول کناره	
۰	A- بستر آبرفتی فرسایش‌پذیر، با عدم حفاظت از بستر یا رخنمون سنگ‌بستر، در کمتر از 10% از طول بازه	M3
۲	B- بستر آبرفتی فرسایش‌پذیر $\geq 33\%$ از طول بازه	
۴	C- بستر آبرفتی فرسایش‌پذیر $\geq 66\%$ از طول بازه	
۶	D- بستر آبرفتی فرسایش‌پذیر $\geq 90\%$ از طول بازه	
۸	E- بستر آبرفتی فرسایش‌پذیر $< 90\%$ از طول بازه	
۰	A- عدم وجود کناره‌های در حال پسروی	M4
۲	B- کناره‌های در حال پسروی $\geq 5\%$ از کل طول کناره	
۴	C- کناره‌های در حال پسروی $\geq 33\%$ از کل طول کناره با نرخ پسروی ≥ 3 متر در سال	
۶	D- کناره‌های در حال پسروی $\geq 33\%$ از کل طول کناره با نرخ پسروی < 3 متر در سال یا $< 33\%$ از کل طول کناره ولی با نرخ پسروی ≥ 3 متر در سال	
۸	E- کناره‌های در حال پسروی $< 33\%$ از کل طول کناره با نرخ پسروی < 3 متر در سال	
۰	A- تغییر عرض کانال $\geq 10\%$ (تک شاخه) یا $\geq 5\%$ (سرگردان یا شریانی) طی ۱۵-۱۰ سال اخیر	M5
۴	B- تغییر عرض کانال $\geq 25\%$ (تک شاخه) یا $\geq 10\%$ (سرگردان یا شریانی) طی ۱۵-۱۰ سال اخیر	
۸	C- تغییر عرض کانال $< 25\%$ (تک شاخه) یا $< 10\%$ (سرگردان یا شریانی) طی ۱۵-۱۰ سال اخیر	
۰	A- شرایط پایدار غالب بستر طی ۱۵-۱۰ سال اخیر	M6
۴	B- شواهد برداشت (حفر) و انباشت موضعی طی ۱۵-۱۰ سال اخیر در طول بازه	

۸	C- شواهد برداشت (حفر) و انباشت گسترده طی ۱۵-۱۰ سال اخیر در طول بازه
---	---

جدول ۴: طبقات مربوط به شاخص مصنوعی و نحوه امتیازدهی به آن‌ها (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۵)

امتیاز	طبقات	شاخص
۰	A- حفاظت کناره در بیشتر قسمت‌های بازه، $< ۸۰\%$ از کل طول کناره‌های آبرفتی	A1
۴	B- حفاظت کناره $< ۶۶\%$ از کل طول کناره‌های آبرفتی	
۸	C- حفاظت کناره $< ۳۳\%$ از کل طول کناره‌های آبرفتی	
۱۲	D- حفاظت کناره $\geq ۳۳\%$ از کل طول کناره‌های آبرفتی	
۱۵	E- حفاظت موضعی کناره، به عبارتی $\geq ۵\%$ از کل طول کناره‌های آبرفتی	
۰	A- وجود پوشش‌ها در بیشتر قسمت‌های بازه، $< ۸۰\%$ از کل طول بازه	A2
۴	B- پوشش‌های بستر $< ۶۶\%$ از کل طول بازه	
۸	C- پوشش‌های بستر $< ۳۳\%$ از کل طول بازه و یا حضور گسترده سازه‌های عرضی	
۱۲	D- پوشش‌های بستر $\geq ۳۳\%$ از کل طول بازه و یا حضور موضعی سازه‌های عرضی	
۱۵	E- پوشش‌های بستر موضعی، به عبارتی $\geq ۵\%$ از کل طول بازه و عدم حضور کامل سایر سازه‌های عرضی	

جدول ۵: طبقات مربوط به شاخص تعدیل کانال و نحوه امتیازدهی به آن‌ها (رینالدی و همکاران ۲۰۱۵)

امتیاز	طبقات	شاخص
۰	A- عدم وجود تغییرات الگوی کانال از دهه ۱۹۵۰	CA1
۳	B- تغییر با یک الگوی کانال مشابه از دهه ۱۹۵۰	
۵	C- تغییر متفاوت الگوی کانال رود از دهه ۱۹۵۰	
۰	A- عدم تغییر یا تغییر جزئی ($\geq ۱۵\%$) از دهه ۱۹۵۰	CA2
۳	B- تغییر متوسط (۳۵٪ - ۱۵) از دهه ۱۹۵۰	
۵	C- تغییر شدید کانال ($< ۳۵\%$) از دهه ۱۹۵۰	
۰	A- تغییر قابل چشم‌پوشی سطح بستر ($\geq ۰/۵$ متر)	CA3
۳	B- تغییر محدود یا متوسط سطح بستر (۳ - ۰/۵ متر)	
۶	C- تغییر شدید سطح بستر (< ۳ متر)	
۱۰	D- تغییر بسیار شدید سطح بستر (< ۶ متر)	

بحث و یافته‌ها

هشت بازه رود در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱). بازه ۱ در ارتفاع ۲۰۰ متری و با شیب ۰,۰۱۸ متر بر متر در قسمت پایکوهی منطقه قرار گرفته است و بازه ۸ در ارتفاع ۲۵- متری از سطح دریا و با شیب ۰,۰۰۱ متر بر متر در محدوده جلگه ساحلی شهر بابلسر قرار دارد. سایر بازه‌ها در بین این محدوده ارتفاعی قرار داشته و شیب آنها از ۰,۰۰۱ تا ۰,۰۱۸ متر بر متر متغیر بوده است (جدول ۶). در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه بابلرود میانگین عرض کانال از ۱۲ تا ۷۷ متر و میانگین عرض بازه که شامل موانع درون کانالی و دشت سیلابی می‌شود از ۴۱ تا ۸۳ متر متغیر بوده است. لذا شاخص محدودیت رود بین ۱,۱ تا ۴,۴ بوده که به جز بازه هشت که در گروه محدودیت بالا قرار دارد، سایر بازه‌ها در گروه متوسط قرار گرفته‌اند. درجه محدودیت بازه‌ها هم بین ۱۸ تا ۱۰۰ درصد متغیر بوده است. در مجموع، بازه‌های مورد مطالعه رودخانه بابلرود از نظر محدودیت، عمدتاً در طبقه نسبتاً محدود قرار گرفته‌اند. علت قرارگیری در این طبقه، فرو سایی رود بین ترا سهای آبرفتی و پهن شدگی تدریجی رود است که موجب تشکیل دشت‌های سیلابی کوچک و ناپیوسته شده است. فقط بازه ۸ که در قسمت مصب این رود قرار گرفته است در طبقه محدود است. ضریب سینوسیته کانال از ۱ تا ۲,۲ متغیر بوده و الگوی رود در این هشت بازه به صورت مستقیم، سینوسی و متاندری (پیچانرودی) است (جدول ۶).

جدول ۶: ویژگی‌های بازه‌های مورد مطالعه از نظر محدودیت جانبی

شماره بازه	طول بازه (متر)	متوسط ارتفاع به متر	شیب کانال (متر/متر)	میانگین عرض بازه (متر)	میانگین عرض کانال (متر)	ضریب سینوسیته	الگوی رود	شاخص محدودیت	درجه محدودیت (درصد)	طبقه محدودیت
۱	۹۷۳	۲۰۰	۰,۰۱۸	۵۱,۲	۱۵,۱	۱,۰۳	مستقیم	۳,۴	۳۱	نسبتاً محدود
۲	۵۶۹	۱۶۵	۰,۰۱۴	۶۸,۸	۱۵,۵	۱,۰۲	مستقیم	۴,۴	۳۴	نسبتاً محدود
۳	۱۲۸۶	۱۰۵	۰,۰۰۷	۵۲,۳	۲۵,۱	۱,۱۹	سینوسی	۲,۱	۵۲	نسبتاً محدود
۴	۱۷۶۰	۵۰	۰,۰۰۵	۷۹,۳	۲۷,۴	۱,۱۱	سینوسی	۲,۹	۴۵	نسبتاً محدود
۵	۱۲۰۸	-۵	۰,۰۰۲	۵۴,۲	۲۰,۷	۱,۱۷	سینوسی	۲,۶	۱۸	نسبتاً محدود
۶	۲۶۲۰	-۱۱	۰,۰۰۲	۴۱	۱۲	۲,۲	متاندری	۳,۴	۳۳	نسبتاً محدود
۷	۱۲۸۰	-۲۰	۰,۰۰۱۵	۶۲,۷	۴۰,۱	۱,۲	سینوسی	۱,۶	۴۰	نسبتاً محدود
۸	۱۰۰۰	-۲۵	۰,۰۰۱	۸۲,۹	۷۷,۶	۱	مستقیم	۱,۱	۱۰۰	محدود

ارزیابی شاخص‌های دینامیک مورفولوژیکی رود (MDI): همان‌طور که اشاره شد روش MDI شامل سه گروه از شاخص‌ها (A, M, CA) است که در ادامه برای بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه بابلرود مورد ارزیابی قرار گرفتند. شاخص M1، مورفولوژی کانال رود را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در محدوده مورد مطالعه، الگوی رود در بازه‌های ۱ تا ۴ به صورت مستقیم و سینوسی با موانع طولی، در بازه ۵ و ۶ الگوی رودخانه به صورت سینوسی و پیچانرودی و بدون موانع طولی هستند (شکل ۲). بازه‌های ۷ و ۸ هم به علت شیب کم و فقدان موانع طولی در طبقه کم انرژی قرار گرفتند (جدول ۷).

شاخص M2، ویژگی‌های رسوبات کرانه رود را مورد بررسی قرار می‌دهد لذا گروه‌ها براساس درصد رسوبات آبرفتی منفصل و غیرچسبنده در کرانه رود طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۳ الف). بر اساس مشاهدات انجام شده در بازه‌های ۱ تا ۴،

بیش از ۸۰ درصد طول کرانه دارای رسوبات آبرفتی فرسایش‌پذیر بودند که در گروه D قرار می‌گیرند. در بازه‌های ۵ تا ۷ بیش از ۴۰ درصد (گروه C) و در بازه ۸ تقریباً هیچ رسوبات منفصلی (A) در کرانه رود وجود ندارد.

شاخص M3، برمبنای فرسایش‌پذیری رسوبات در بستر رود طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به درصد رسوبات آبرفتی فرسایش‌پذیر در بستر رودخانه بابل رود، بازه‌های ۱ تا ۴ در گروه E، بازه‌های ۵ و ۶ در گروه D و بازه ۷ و ۸ هم به ترتیب در گروه‌های C و B قرار گرفتند.

شاخص M4، براساس طول کرانه فرسایش‌پذیر و میزان پسروری کرانه‌های رود ارزیابی می‌شود (شکل ۳). بر این اساس بازه‌های ۱ تا ۳ در گروه C، بازه‌های ۴ تا ۷ در گروه B و بازه ۸ در گروه A قرار گرفته است.

شاخص M5، تغییرات عرض کانال را طی ۱۰ تا ۱۵ سال اخیر مورد بررسی قرار می‌دهد. با مقایسه تصاویر گوگل ارث در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۲۰ و نقشه‌های ژئومورفولوژی رود این تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲). بر این اساس بازه‌های ۴ تا ۶ تغییراتی بین ۱۰ تا ۲۵ درصد داشته که در گروه B قرار گرفته‌اند و سایر بازه‌ها به علت تغییرات کمتر از ۱۰ درصد در گروه A قرار گرفتند.

شاخص M6، نتایج حاصله از بازدیدهای میدانی بیانگر این است که بازه‌های ۱ تا ۴ با حفر و برداشت در طول بازه همراه بوده‌اند و همچنین میزان حفر و برداشت در بازه‌های ۵ تا ۸ به صورت موضعی بوده است. بر این اساس از نظر این شاخص، بازه‌های ۱ تا ۴ دارای امتیاز ۸ و بازه‌های ۵ تا ۸ دارای امتیاز ۴ هستند.

شاخص A1، درصد حفاظت از کرانه رود را که بوسیله سازه‌های انسانی مانند دیواره‌های بتنی، گابیون، ریپ‌رپ و غیره ایجاد شده است را ارزیابی می‌کند. کرانه‌های بازه‌های ۱ تا ۷ از شش تا پانزده درصد تحت حفاظت سازه‌های انسانی قرار داشته‌اند (شکل ۵). لذا در گروه D جای می‌گیرند. کرانه‌های رود در بازه ۸ به علت قرارگیری در محدوده شهری به طور کامل با سازه‌های بتنی حفاظت شده و در گروه A قرار گرفته است.

شاخص A2، وضعیت بستر رودخانه را که بوسیله سنگچین‌ها، سازه‌های عرضی و غیره حفاظت می‌شوند، ارزیابی می‌کند. بازه‌های ۴، ۷ و ۸ به علت داشتن سازه‌های عرضی در رودخانه در گروه D قرار گرفته (شکل ۳ س) و سایر بازه‌های به علت عدم وجود سازه‌های حفاظت‌کننده از بستر در گروه E قرار گرفتند.

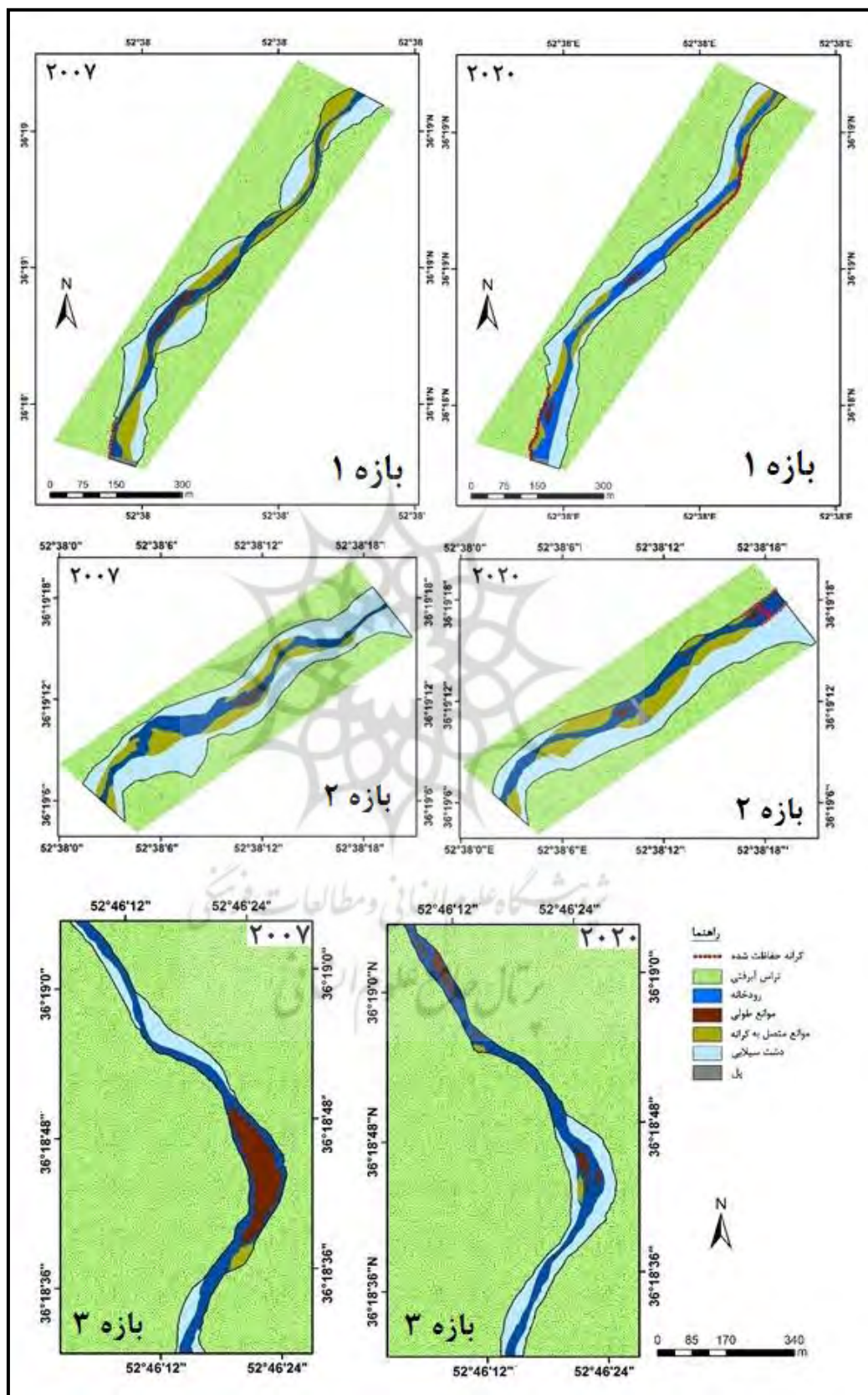
شاخص CA1، تغییرات بلندمدت الگوی کانال رود را مورد بررسی قرار می‌دهد. در رودخانه بابل رود بازه‌های ۱ تا ۴ تغییراتی را تجربه کرده‌اند اما پلان آنها مشابه الگوی قبلی است و در گروه B قرار می‌گیرند. بازه‌های ۵ تا ۸ طی سال‌های ۱۳۷۳-۱۳۳۴ از نظر الگو هیچ تغییر مشخصی نداشته (یمانی و حسین‌زاده، ۱۳۸۲) و تاکنون نیز ثابت مانده است. لذا در گروه A قرار گرفته‌اند.

شاخص CA2، تغییرات عرض کانال رود را به صورت بلندمدت مورد بررسی قرار می‌دهد. در مطالعه‌ای که توسط یمانی و همکاران (۱۳۹۴) در بخش‌هایی از رودخانه بابل رود انجام دادند، بازه‌های ۳ تا ۵ در اثر فعالیت‌های انسانی (تغییرات کاربری اراضی، کشاورزی و شهرنشینی) دچار تغییراتی از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۹۳ شده‌اند. بر این اساس بازه ۳ در گروه A و بازه‌های ۴، ۵ در گروه B قرار گرفتند. بازه‌های ۱ و ۲ هم به علت تغییرات کمتر از ۳۵ درصد در گروه B و بازه‌های ۷ و ۸ با تغییرات کمتر از ۱۵ درصد در گروه A قرار گرفتند.

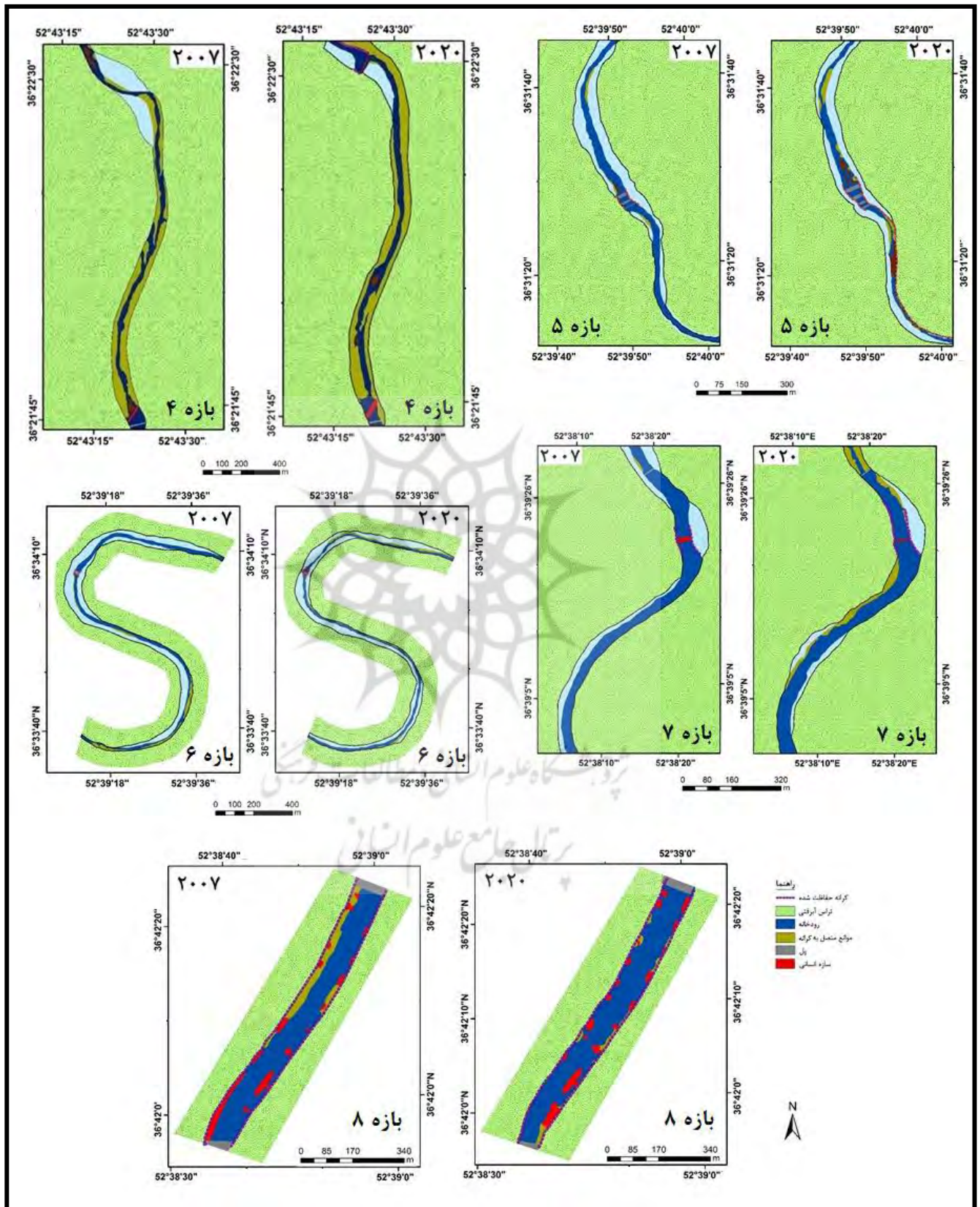
شاخص CA3، تغییرات بستر رود را طی دوره ۱۰۰ ساله طبقه‌بندی می‌کند. اغلب بازه‌های (۱ تا ۷) مورد مطالعه، تغییرات بستر محدود و متوسط (۰٫۵-۳ متر) داشته‌اند که در گروه B قرار گرفته (شکل ۳ ب) و بازه ۸ به علت تغییرات ناچیز در گروه A قرار گرفت. مستندات مکتوب برای اندازه‌گیری این تغییرات بسیار کم است. با این وجود با استفاده از شواهد میدانی مانند حفر بستر رود در پایه پل‌ها مانند شکل ۳ ب، حداکثر عمق کانال به دیواره تراسه‌های آبرفتی مجاور و ایجاد تراسه‌های جدید درون کانالی استفاده شده است.

جدول ۷: امتیازدهی شاخص‌های مختلف MDI در بازه‌های مختلف بابلرود

بازه ۸	بازه ۷	بازه ۶	بازه ۵	بازه ۴	بازه ۳	بازه ۲	بازه ۱	شاخص‌ها	بازه‌ها
۰	۰	۳	۳	۶	۶	۶	۶	امتیاز	M1
A	A	B	B	C	C	C	C	کلاس	
۰	۴	۴	۴	۶	۶	۶	۶	امتیاز	M2
A	C	C	C	D	D	D	D	کلاس	
۴	۴	۶	۶	۸	۸	۸	۸	امتیاز	M3
B	C	D	D	E	E	E	E	کلاس	
۰	۲	۲	۲	۲	۴	۴	۴	امتیاز	M4
A	B	B	B	B	C	C	C	کلاس	
۰	۰	۴	۴	۰	۰	۰	۰	امتیاز	M5
A	A	B	B	A	A	A	A	کلاس	
۰	۰	۰	۴	۴	۴	۴	۴	امتیاز	M6
A	A	A	B	B	B	B	B	کلاس	
۰	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	امتیاز	A1
A	D	D	D	D	D	D	D	کلاس	
۱۲	۱۲	۱۵	۱۵	۱۲	۱۵	۱۵	۱۵	امتیاز	A2
D	D	E	E	D	E	E	E	کلاس	
۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۳	امتیاز	CA1
A	A	A	A	B	B	B	B	کلاس	
۰	۰	۳	۳	۳	۰	۳	۳	امتیاز	CA2
A	A	B	B	B	A	B	B	کلاس	
۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	امتیاز	CA3
A	B	B	B	B	B	B	B	کلاس	
۰,۱۴	۰,۳۷	۰,۵۲	۰,۵۶	۰,۶۱	۰,۶۱	۰,۶۴	۰,۶۴	مجموع امتیازات	
بسیار کم	کم	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	کلاس	



شکل ۲: نقشه‌های ژئومورفولوژی رودخانه بابلرود در بازه‌های مورد مطالعه در دو سال ۲۰۰۷ و ۲۰۲۰

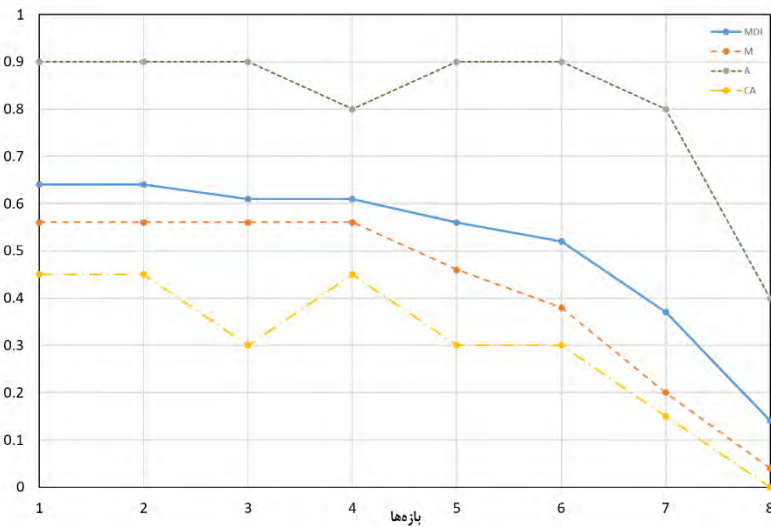


ادامه شکل ۲: نقشه‌های ژئومورفولوژی رودخانه بابلرود در بازه‌های مورد مطالعه در دو سال ۲۰۰۷ و ۲۰۲۰



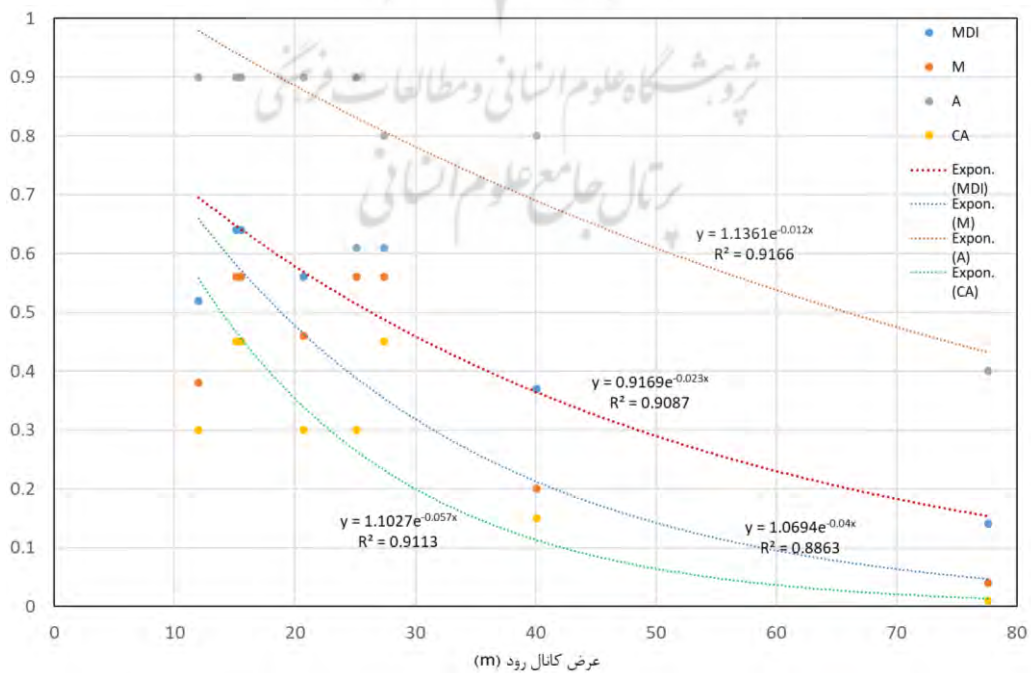
شکل ۳: الف) بستر و کرانه آبرفتی بازه ۱، ب) فروسایی بستر در پایه پل در بازه ۱، ج) پسروری کرانه آبرفتی در بازه ۲، د) بستر بازه ۳، ه) دیوار حفاظتی در بازه ۴، و) بخشی از بازه ۵، ز) کرانه و بستر بازه ۶، س) وجود سد لاستیکی در بازه ۷، ع) تجاوز به حریم رود در بازه ۸.

بر اساس مجموع امتیازات MDI، بازه‌های ۱ تا ۴ در طبقه زیاد، بازه‌های ۵ و ۶ در طبقه متوسط و بازه‌های ۷ و ۸ به ترتیب در طبقات کم و بسیار کم از دینامیک مورفولوژیکی رود قرار گرفتند (جدول ۷).
 با محاسبه نسبت هر گروه از شاخص‌ها به مقدار حداکثر همان گروه، مقدار نسبی هر گروه بدست آمد. مقدار MDI از بازه‌های بالادست به سمت پایین دست کاهش یافته (شکل ۴) که نشان‌دهنده کاهش پویایی مورفولوژیکی رود در قسمت‌های پایین دست است. شاخص گروه M که اشکال و فرایندهای رود را نشان می‌دهند تقریباً هم‌راستای مقدار MDI بوده و نزدیکترین حالت را به آن داشته‌اند. شاخص‌های گروه A که عناصر مصنوعی در رود را مورد توجه قرار می‌دهند بیشترین نسبت امتیاز را به مقدار کل خود داشته‌اند، یعنی بیشتر بازه‌ها امتیاز نسبتاً بالایی از این گروه کسب کرده‌اند که نشان‌دهنده دخالت کم انسان در این بازه‌ها بوده است.



شکل ۴: مقادیر MDI و شاخص‌های M، A و CA در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه بابلرود

روند تغییرات MDI و شاخص‌های تشکیل دهنده آن با عرض کانال رود بیشترین تطبیق را با رگرسیون نمایی داشته است. ضرایب این رگرسیون و نمودار آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس ضریب b رگرسیون نمایی برای شاخص‌های MDI و CA، A ، M به ترتیب 0.96 ، 0.988 ، 0.944 و 0.977 محاسبه شد که برای همه آنها $b < 1$ بوده و بیانگر روند نمایی کاهش است. این روند تغییرات برای شاخص مورفولوژی و فرایند رودخانه و شاخص تعدیل رود ابتدا سریع‌تر بوده و بعد روند ملایم‌تری دارد. بدین ترتیب بازه‌های بالادست از نظر دینامیک مورفولوژیکی فعال‌تر از بازه‌های پایین دست بوده و رابطه معناداری را با عرض کانال رود نشان می‌دهند.



شکل ۵: روابط رگرسیونی بین عرض کانال رود و شاخص‌های MDI

ارتباط شاخص MDI با پارامترهایی شامل ارتفاع، شیب، عرض رود، شاخص محدودیت، درجه محدودیت مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به ارتباط بالای شیب و ارتفاع، همبستگی این دو متغیر در شاخص‌های MDI به جز شاخص مصنوعی (A) خوب بوده است (شکل ۶). ضریب همبستگی ارتفاع و شیب رود با مقدار MDI به ترتیب ۰,۶۸ و ۰,۶۲ بدست آمده است که نشان می‌دهد با کاهش ارتفاع و شیب رود مقدار MDI کاهش یافته است. عرض رود با MDI ضریب همبستگی ۰,۹۲- داشته است که بیانگر ارتباط معکوس بین این دو متغیر است. درجه محدودیت رود ارتباط معکوسی ($r = -0.78$) را با مقدار MDI نشان می‌دهد. این بدین معنی است که در بازه‌های پایین دست با افزایش عرض کانال رود در صد اتصال رود با تراسه‌های آبرفتی بیشتر شده و مقدار محدودیت افزایش یافته است. شاخص‌های مصنوعی هم با افزایش عرض کانال افزایش یافته و یک ارتباط مستقیم و بالا (۰,۹۷) را نشان می‌دهد. شاخص محدودیت با MDI ضریب همبستگی ۰,۷۸ داشته که نشان می‌دهد با کاهش نسبت محدوده آبرفتی به عرض کانال رود میزان پویایی مورفولوژیکی کانال هم کاهش می‌یابد و برعکس. درجه محدودیت رود با همه شاخص‌های MDI رابطه معکوس و بالا را نشان می‌دهد. درحالی که شاخص محدودیت کانال رابطه مستقیم و بالایی را با شاخص‌های MDI نشان می‌دهد (شکل ۶).

همبستگی بالای (۰,۹۴) شاخص‌های گروه M با گروه CA نشان دهنده تأثیر بالای مورفولوژی و فرایندهای طبیعی رود بر میزان تعدیل بوده و عوامل مصنوعی (سازه‌ها) به علت گستردگی کم در طول بازه‌ها نتوانستند تأثیری زیادی بر ویژگیهای طبیعی رود داشته باشند.

ارتفاع									
شیب	۰,۹۸								
عرض رودخانه	-۰,۵	-۰,۴۹							
شاخص محدودیت	۰,۶۴	۰,۶۶	-۰,۸۲						
درجه محدودیت	-۰,۳۹	-۰,۳۱	۰,۹	-۰,۶۵					
شاخص پویایی مورفولوژیکی (MDI)	۰,۶۸	۰,۶۲	-۰,۹۲	۰,۷۸	-۰,۷۸				
فرم و فرایند رود (M)	۰,۷۲	۰,۶۴	-۰,۸۴	۰,۷۴	-۰,۶۷	-۰,۹۸			
شاخص مصنوعی (A)	۰,۴۶	۰,۴۲	-۰,۹۷	۰,۶۸	-۰,۹۲	۰,۹	-۰,۸۱		
شاخص تعدیل (CA)	۰,۷۲	۰,۷۰	-۰,۸۵	-۰,۸۶	-۰,۷	۰,۹۵	۰,۹۴	۰,۷۷	
	ارتفاع	شیب	عرض رودخانه	شاخص محدودیت	درجه محدودیت	شاخص پویایی مورفولوژیکی (MDI)	فرم و فرایند رود (M)	شاخص مصنوعی (A)	شاخص تعدیل (CA)

شکل ۶: ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مختلف و شاخص‌های پویایی مورفولوژیکی رود در رودخانه بابلرود

در مطالعات آلو و همکاران (۲۰۱۸) در رودخانه باکر شیلی، ضریب همبستگی بین درجه محدودیت و شاخص محدودیت ۰٫۵۶- و همبستگی درجه محدودیت با عرض کانال ۰٫۵۳- بدست آمد که این دو ضریب در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰٫۶۵- و ۰٫۸۲- بدست آمد که ارتباط معکوس این متغیرها را نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها در بازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر بالای MDI می‌تواند در رابطه با رودخانه‌های نسبتاً پراثرژی با کنترل مصنوعی محدود و ناپایداری کانال طی ۱۰-۱۵ سال اخیر و یا قبل‌تر باشد. متقابلاً مقادیر کم MDI در ارتباط با بازه‌های پایدار (رودخانه‌های مناطق پست با شیب بسیار ملایم و کناره‌های چسبنده پایدار) و یا بازه‌های تحت کنترل مصنوعی پلانیمتری و آلتیمتری شدید است. این نتیجه در اهداف مدل (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۵) هم مورد نظر بوده است که با نتایج بدست آمده از این تحقیق همسو می‌باشد.

نتیجه‌گیری

ارزیابی تغییرات مورفولوژیکی رود کاربرد زیادی در مدیریت سیلاب رودخانه و مخاطرات کانال رود دارد. این تحقیق با هدف طبقه‌بندی پویایی مورفولوژیکی رود (MDI) و بررسی نتایج آن با سایر متغیرها در رودخانه بابلرود انجام شد. در این کار، روش MDI با داده‌های واقعی زمینی مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب همبستگی خوب بین متغیرهای مختلف بیانگر صحت و دقت این مدل است. اگرچه طبقه‌بندیها به ظاهر ساده هستند اما امتیازدهی به آنها مستلزم مطالعات ژئومورفولوژیکی میدانی و وجود مستندات مناسب و کافی از منطقه است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در بازه‌های با شاخص پویایی مورفولوژیکی (MDI) متوسط و بالا که پلان رود و ابعاد هندسی کانال امکان تغییرات بیشتری دارد با شناسایی مسیر قبلی رود و ابعاد کانال می‌توان سناریوهای مختلفی را برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه خطر سیل ارائه نمود. برای مثال درمورد تغییرات ارتفاعی بستر، در بازه‌های ۱ و ۲ حفر بستر در طی زمان موجب شده است که ظرفیت کانال افزایش یافته و وقوع سیلابهای فراکانالی کاهش یابد. بررسی ارتباط متغیرهای مختلف با شاخص‌های پویایی مورفولوژیکی (MDI) نشان دهنده تغییرات مشخص از بالادست به سمت پایین دست رود است و کاهش مقدار MDI به سمت پایین دست و ضرایب همبستگی بالا بین متغیرها با الگویی که در مدل ارائه شده است همخوانی دارد. لذا این مدل در مناطق جغرافیایی مشابه منطقه مورد مطالعه قابلیت استفاده دارد و برای سایر مناطق هم می‌تواند مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار بگیرد.

منابع

- اسماعیلی، رضا؛ ولی‌خانی، ساره، ۱۳۹۳، ارزیابی و تحلیل شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه ی لاریج با استفاده از شاخص کیفیت مورفولوژیکی، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، سال دوم شماره ۴، صص. ۳۷-۵۳.
- / ایلانلو، مریم؛ کرم، امیر، ۱۳۹۹، ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با استفاده از روش MQI، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۵۶، صص. ۳۵-۵۳.
- یمانی، مجتبی؛ حسین‌زاده، محمدمهدی، ۱۳۸۲، روشهای بررسی تغییرات بستر و الگوی رودخانه بابل در محدوده جلگه ساحلی، نشریه علوم جغرافیایی، جلد ۲ شماره ۲، صص. ۵۱-۷۲.
- یمانی، مجتبی؛ گورابی، ابوالقاسم؛ عابدینی، مریم، ۱۳۹۴، تحلیل روند تغییرات مورفولوژیکی الگوی آبراهه بابلرود از طریق نیمرخ‌های متساوی البعد (ترانسکت)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۳، صص. ۱۳۷-۱۵۷.
- Agnesi, V., Angileri, S., Cama, M., Conoscenti, C., and Rotigliano, Eñ, 2015. Indicators of rivers geomorphological functionality, application of the EU Water Framework Directive in Sicily (Italy). In IGU Regional Conference "Geography, Culture and Society for Our Future Earth" (pp. 1515-1515).

- Akhter, S., Eibek, K. U., Islam, S., Islam, A. R. M. T., Chu, R., and Shuanghe, S., 2019. Predicting spatiotemporal changes of channel Morphology in the reach of Teesta River, Bangladesh using GIS and ARIMA Modeling. *Quaternary International*, 513, pp.80-94.
- Annayat, W., and Sil, B. S., 2020. Assessing channel Morphology and prediction of centerline channel Migration of the Barak River using geospatial techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(10), pp.5161-5183.
- Belletti, B., Rinaldi, M., Bussettini, M., Comiti, F., Gurnell, A. M., Mao, L., and Vezza, P., 2017. Characterizing physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology*, 283, pp.143-157.
- Brierly, G. J., and Fryirs, K. (2005). *Geomorphology and river management. Applications of the river styles framework*, Blackwell Pub.
- Campana, D., Marchese, E., Theule, J. I., and Comiti, F., 2014. Channel degradation and restoration of an Alpine river and related morphological changes. *Geomorphology*, 221, pp.230-241.
- Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J. G., Tassi, P., & Jugé, P., 2014. Interactions between flow structure and Morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France. *Water Resources Research*, 50(4), pp.2850-2873.
- Comiti, F., Righini, M., Nardi, L., Lucia, A., Amponsah, W., Cavalli, M., and Borga, M., 2016. Channel widening during extreme floods: how to integrate it within river corridor planning. *INTERPRAEVENT*, Lucerne, Switzerland, pp.477-486.
- Fryirs, K. A., and Brierley, G. J., 2012. *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*. John Wiley & Sons.
- Golfieri, B., Surian, N., and Hardersen, S., 2018. Towards a more comprehensive assessment of river corridor conditions: A comparison between the Morphological Quality Index and three biotic indices. *Ecological Indicators*, 84, pp.525-534.
- Ioana-Toroimac, G., Zaharia, L., and Minea, G., 2015. Using pressure and alteration indicators to assess river morphological quality: case study of the Prahova River (Romania). *Water*, 7(6), pp. 2971-2989.
- Khan, S., and Fryirs, K., 2020. An approach for assessing geomorphic river sensitivity across a Catchment based on analysis of historical Capacity for adjustment. *Geomorphology*, 359, pp.107-135.
- Langendoen, E. J., Wells, R. R., Thomas, R. E., Simon, A., and Bingner, R. L., 2009. Modeling the evolution of incised streams. III: Model application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), pp.476-486.
- Magdaleno, F., and Fernández-Yuste, J. A., 2011. Meander dynamics in a changing river corridor. *Geomorphology*, 130(3-4), pp.197-207.
- Martin, J., Cantelli, A., Paola, C., Blum, M., and Wolinsky, M., 2011. Quantitative Modeling of the evolution and geometry of incised valleys. *Journal of Sedimentary Research*, 81(1), pp.64-79.
- Mazzorana, B., Comiti, F., and Fuchs, S., 2013. A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams. *Natural hazards*, 67(3), pp. 991-1009.
- Nardi, L., and Rinaldi, M., 2015. *The Magra River (Italy): Effects of the 25th October 2011 Flood Event and a Preliminary Application of the IDRAIM Framework. In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3 (pp. 297-300)*. Springer, Cham.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., 2012. Guidebook for the Evaluation of Stream Morphological Conditions by the Morphological Quality Index (MQI). Version 1.1. 85 pp IstitutoSuperiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

<http://www.isprambiente.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/guidebook-for-the-evaluation-of-stream>

- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., and Bussettini, M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*, 180, pp.96-108.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., and Bussettini, M., 2015. A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management. *Geomorphology*, 251, pp.122-136.
- Ulloa, H., Mazzorana, B., Batalla, R. J., Jullian, C., Iribarren-Anacona, P., Barrientos, G., and Iroumé, A., 2018. Morphological characterization of a highly-dynamic fluvial landscape: The River Baker (Chilean Patagonia). *Journal of South American Earth Sciences*, 86, pp.1-14.
- Ward, A. S., Schmadel, N. M., and Wondzell, S. M., 2018. Simulation of dynamic expansion, contraction, and connectivity in a Mountain stream network. *Advances in Water Resources*, 114, pp.64-82.
- Wyzga, B. (2007). 20 A review on channel incision in the Polish Carpathian rivers during the 20th century. *Developments in Earth Surface Processes*, 11, pp.525-553.
- Xiao, F., Gao, G., Shen, Q., Wang, X., Ma, Y., Lü, Y., and Fu, B., 2019. Spatio-temporal characteristics and driving forces of landscape structure changes in the Middle reach of the Heihe River Basin from 1990 to 2015. *Landscape Ecology*, 3(4), pp.755-770.

