زمان و رودخانه‌ها

ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ازسال ۱۹۶۰ تاکنون

نویسنده: آلن وهل، استاد دانشگاه کلرادو
مترجمان: هدیه دهستانی و سیاوش شایان: دانشگاه تربیت‌مدرس

قسمت دوم و آخر

اشاره

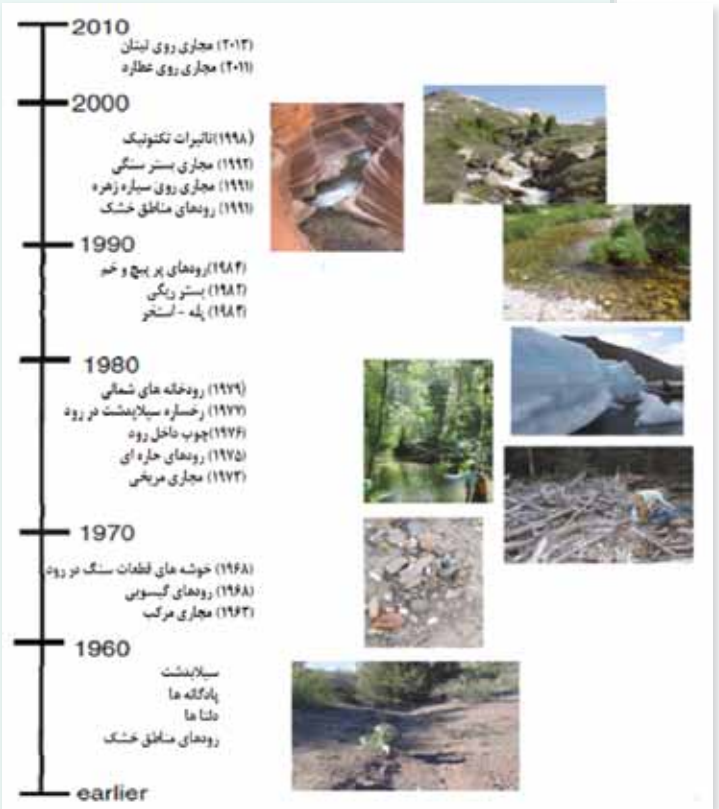
شروع دانش ژئومورفولوژی را بررسی تحولات رودخانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر تحول ناهمواری‌ها می‌دانند. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای یکی از موضوعات مهم و بین‌رشته‌ای را در برمی‌گیرد. به‌طوری که با تغییرات بنیادینی که در حجم آب‌های شیرین جهان و از جمله در کشور ما طی چند دهۀ اخیر صورت گرفته، مطالعات این رشته مورد توجه بسیار قرار گرفته است. نویسندۀ مقاله در بررسی علمی و دقیق خود تحولات این رشته در پنجاه سال اخیر را مورد مطالعه قرار داده که توجه به آن، به‌عنوان یکی از زیربناهای علمی این رشته، راه را برای پژوهشگران بعدی در این قلمرو می‌گشاید. به همین جهت فصل‌نامۀ رشد جغرافیا ترجمه و انتشار این مقاله را به محققانی تقدیم می‌کند که با پژوهش‌های رودخانه‌ای بعدی، با ارائۀ راهکارهای ارزشمند خود قدم‌های مؤثری را برای غلبه بر بحران آب در کشور برمی‌دارند.

در قسمت قبلی این مقاله، که در شمارۀ ۱۱۳ رشد آموزش جغرافیا منتشر شد، پس از بیان غرض نویسنده از تدوین این مقاله، به وضعیت جامعه، محیط زیست و علم در سال‌های ۱۹۶۰ پرداخته شد و سپس استنباط‌هایی که در آن سال‌ها از این شاخۀ ژئومورفولوژی می‌شد مورد بحث و بررسی قرار گرفت. آن‌گاه وضعیت جامعه و محیط زیست در سال ۲۰۱۰ و نیز استنباط‌های جدید از ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ارائه شد و مقایسه‌هایی برای درک تحولات این علم در فاصله پنجاه سال گذشته به عمل آمد. در آنجا گفتیم که در حوالی دهه ۱۹۶۰ موضوعاتی چون تعادل و یکنواختی و جریانان سیلابی در رودخانه‌ها از جمله مطالب مهمی بودند که توسط عالمان این علم مورد عنایت و بررسی واقع می‌شدند. اینک دنباله مقاله را می‌خوانیم که در آن مباحثی چون مقیاس‌های زمانی و مکانی، نگاه سیستمی به رودخانه‌ها، ابزارهای مطالعاتی ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای و بالاخره مجلات و انجمن‌های علمی این شاخه از ژئومورفولوژی در آن به بحث گذاشته شده است.

اگر چه در دهۀ ۱۹۵۰ مقالاتی منتشر می‌شد که در آن‌ها نویسندگان به نظریه سیستمی به‌طور کلی اشاره می‌کردند، اما **چورلی** در سال ۱۹۶۲ به‌طور روشمند مفاهیم این نظریه را در حوزۀ ژئومورفولوژی مورد بررسی قرار داد و **برتالنفی** «سیستم‌های بستۀ دارای محدودۀ مشخص» را تبیین کرد که در سراسر آن‌ها هیچ تبادل مواد یا انرژی رخ نمی‌دهد، چرا

که این‌گونه سیســـتم‌ها وســـیله یک منبع ثابت از مواد و انرژی پایدار می‌مانند. چورلی به شـــباهت بین «سیستم بسته و چرخهٔ فرســـایش **دیویس**» و «سیســـتم باز و مفهوم تعادل چشم‌انداز **گیلبرت**» اشاره می‌کند. چورلی (۱۹۶۲) همچنین اشاره می‌کند که سیســـتم‌های باز با اســـتفاده از پارامترهای سیستمی قادر به رسیدن به حالت هم نهایتی هستند. چرا که شرایط اولیهٔ متفاوت می‌تواند به نتایج مشـــابه منجر شود. **شوم** و **لیچتی** چگونگی در نظر گرفتن متغیرهای مستقل یا وابسته را با توجه به مقیاس‌های زمانی و مکانی در چارچوب سازگاری رودخانه بررسی کردند.

لئوپولـــد و همکاران (۱۹۶۰) چند عامـــل مختلف دخیل در مقاومت جریان را در مجاری دارای انحنا در کانال‌های کم‌شـــیب از هم تفکیک کردند: و این نگرشـــی بود که به‌طور گســـترده، با شروع دههٔ ۱۹۸۰، برای کانال‌های دارای شیب‌های تند و درشت دانه به کار گرفته شـــد. سیمونز و ریچاردسون (۱۹۶۶) به بررسی پیکربندی بستر کانال‌های آبرفتی در بررسی‌های میدانی و بررسی ایســـتگاه‌های اندازه‌گیری بتونی در روی رودها (flume) و شرایط رژیم جریان حداقل، با دبی مواد کوچک بستری و مقاوم در برابر جریان و شرایط رژیم جریانِ حداکثر، با تخلیه مواد بزرگ بستری و عمدتاً با مقاومت کمتر در برابر جریان، پرداختند.



لئوپولـــد و **میلـــر** (۱۹۵۴) بـــرای اولیـــن بـــار واژهٔ پالئوهیدرولـــوژی را ابـــداع کردنـــد؛ البتـــه پالئوهیدرولوژی رودخانه‌ای کمّی، با بررسی‌های برخی از محققان، در طی دهه ۱۹۶۰ توســـعه یافت. دیوری (۱۹۶۵) روابط کنونی بین طول موج مآندر و دبی لبریز را برای استنباط دبی مجراهای دیرینه مورد استفاده قرار داد. شوم (۱۹۶۵) جنبه‌هایی از شکل مجرا، انتقال رسوب و مورفومتری حوضهٔ زهکشی احتمالی را، که در واکنش به تغییرات اقلیمی طی کواترنر تغییر کرده است، مورد بررســـی قرار داد. وی از این استنباط‌ها، در چارچوب استفاده از هندســـهٔ مجرای پالئو، برای پی بـــردن به تغییرات در رژیم دبی اســـتفاده کرد. اما به‌طور مســـتقل، **کوزارسکی** (۱۹۶۲) و اســـتارکیل (۱۹۶۸) بودند که به‌طور همزمـــان اما جداگانه پژوهش‌های پالئوهیدرولوژیک رودخانه‌ای را در لهســـتان آغاز کردنـــد. اگر چه اکثر مقالات آن‌ها به ســـرعت در دســـترس دانشمندان در آمریکای شمالی و اروپای غربی قرار نمی‌گرفت. **بگنولد** (۱۹۶۶) متوجه عدم توافق در مورد پارامترهای جریان که باید با نرخ انتقال رســـوب مرتبط باشـــد و نیز فقدان یک فرمول تجربی قابل اجرای گســـترده برای انتقال رســـوب شد. وی از فیزیک عمومی استفاده کرد و پیشنهاد داد که از قدرت جریان کل و واحد به‌عنوان ســـنجه‌ای برای اندازه‌گیری انرژی در دسترس برای انتقال رسوب بهره‌گیری شود.

مطالعهٔ پیشـــگامانه **ولمن** (۱۹۶۷) دربـــارهٔ چگونگی تأثیر تغییرات گیاهی، در یک حوضهٔ آبریز در مریلند، بر بار رســـوب و هندســـهٔ رود، منشأ تحقیقاتی با تمرکز بر روی تأثیرات انسان

شـــکل ۳: خط زمـــان محیط‌های جغرافیایـــی و نیپ‌های خاص رودخانه‌ها یا عوارض درون رودها که برای تحقیقات ژئومورفولوژیـــک جریانـــی در کانون توجه قـــرار گرفتند. عکس‌های درون شکل، در جهت عقربه‌های ساعت، از پایین عبارت‌اند از: یک مجرای موقت، در آریزونای مرکزی ایالات متحدهٔ امریکا، مجموعه‌ای از قطعات سنگی درون بستر رود در امتداد یک رودخانه با بستر سنگی، در قلمرو یوکن کانادا، یک بن‌بست، در مسیر بیگ تامسون در پارک ملی کوه‌های راکی (کلرادوی آمریکا)، انباشـــت چوب‌ها به شکل طولی، در کاتلوات در رشـــته‌کوه بروکز در آلاسکا (ایالات متحده)، قسمتی از یک مجرای بســـتر سنگی، در بخش علیای رود کلـــرادو در پارک ملی کوه‌های راکی (کلرادوی امریکا) یک رود کوهستانی، درکلرادوی آمریکا، یک شکاف سنگ بستر کانیـــون، در دیرکریک (در گراند کانیون آریزونای امریکا) و یک جویبار حاره‌ای مناطق پست، در کاستاریکا

شکل ۴: خط زمان برای ابزارهای مورد استفاده قرار گرفته در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای

شکل ۵: خط زمان مجلات علمی که در آن‌ها پژوهش‌های ژئومورفیک رودخانه‌ای منتشر شده است. تصاویر ارائه شده برخی از روی جلدهای مجلات منتخب را نشان می‌دهد. هر یک از اسم‌هایی که با حروف سیاه نوشته شده نشانگر مجله‌ای است که عمدتاً به ژئومورفولوژی اختصاص دارد*.

1. JGR - Earth Surface
2. Geography Compass
3. Nature Geoscience
4. Physical Geagraphy
5. Hydrological processes

6. Geomorphology
7. River Research & Applications
8. Quaternary Research
9. Catena
10. Earth Surface Processes & Landforms
11. Progress in physical Geography
12. Journal of Hydrology
13. JAm Water Resources Association
14. Water Resources Research
15. J Hydrology
16. AGU Transactions
17. Am j Science
18. Annals Assoc Am Geographers
19. ASCE J Hydraulics Division
20. Geografiska Annaler
21. Geographical Review
22. Geological Society America Bulletin
23. Geology
24.Journal of Geology
25. Nature
26.Professional Geographer
27. Science
28. Transactions Royal Society
29. Zeitschrift fur Geomorphologie

شکل ۶: خط زمانی انجمن‌های تخصصی منتخب و گروه‌های ویژه مرتبط با ژئومورفولوژی رودخانه‌ای. تصاویر نشانگر لوگوهای انجمن‌هاست.

○ رودها سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها سیل‌های مکرر (تقریباً سالانه) انتقال اغلب رسوبات را انجام می‌دهند.

○ رودها سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها روابط فرم ـ فرایند امروزی را می‌توان براساس فرم باقی ماندهٔ کنونی، برای پی بردن به بزرگی و فراوانی فرایندهای گذشته، مورد استفاده قرار داد.

یکی از دیدگاه‌های رو به رشد حاصل از دهه ۱۹۶۰ که به‌طور فزاینده‌ای اهمیت یافت شناسایی ماهیت اتفاقی یا تصادفی رفتار رودخانه بود که بر عدم قطعیت غیر قابل تقلیل در توانایی برای پی بردن به‌علت و معلول یا روندها در فرم و فرایند از طی زمان و در گسترهٔ فضا دلالت داشت.

بر روی رودخانه‌ها و به‌خصوص بر روی رسوبگذاری در کف دره و شکل مجرا شد. در ارتباط با همین امر، **شوم** (۱۳۶۹) اصطلاح متامورفوز رودخانه‌ای (دگرشکل شدن در رود river metamorphosis) را برای توصیف یک دگرگونی کامل مورفولوژی رودخانه‌ای که ناشی از تغییرات در دبی آب و بار رسوب، همراه با تنظیم رودخانه است ابداع کرد. آنچه از دهه ۱۹۶۰ به دست می‌آید این است که ژئومورفولوژی جریانی، صراحتاً، رودخانه‌ها را به شکل زیر مفهوم‌سازی کرد:

○ رودها سیستم‌های باز با مبادلات دائمی از ماده و انرژی هستند.

○ رودها دارای متغیرهای متعدد به هم وابسته‌ای هستند که میل به تنظیم هندسهٔ رودخانه نسبت به آب غالب و بار رسوب دارند، به نحوی که در پایین دست جریان تغییرات فرایند و فرم به حداقل رسانده شوند، اما ممکن است منجر به تغییرات سریع در فرم شود:

○ رودخانه‌ها سیستم‌هایی هستند در چارچوب یک چشم‌انداز؛ چنان که «دامنه» و «رود» متقابلاً یکدیگر را تنظیم می‌کنند، طوری که تمام عوارض توپوگرافیک با نرخ یکسان دچار فرسایش شوند.

طی دههٔ ۱۹۶۰، با توجه به عوارض محیط‌های رودخانه‌ای (شکل ۳) تحقیقات، با تأکید بر رودخانه‌های مناطق مرطوب و سرزمین‌های خشک، به‌خصوص بر مجاری رودهای کم شیب (کمتر از یک درصد) و عمدتاً با بستر شن و ماسه‌ای، تداوم یافت. همچنین، تحقیقات تفصیلی در خصوص فرایندهای موجود و ثبت رسوبات مرتبط با سیلاب‌دشت‌ها، دلتاها و تراس‌های آبرفتی قبل از دهه ۱۹۶۰ شروع شد و طی آن دهه ادامه یافت. مقالات اولیه خیلی دقیق و به روشنی نوشته شده بود و انتظار قانع‌کننده‌ای را به‌وجود آورده بود که اکثر سیلاب‌دشت‌ها به وسیلهٔ رشد پیوستهٔ نهشته‌های جانبی گسترش می‌یابند. به‌طور مثال، اغلب دلتاها در پی برجا ماندن نهشته‌ها در بستر بالایی، بستر پیشانی و بسترهای زیرین آب‌هایی ایجاد شده‌اند که در آنجا آب رود وارد یک پهنهٔ آبی ایستا با تراکمی مشابه شده است. (topset, foreset, and bottomset beds) مجموعهٔ بالا، جلو و پایین بستر، همراه با ورود آب رودخانه بدنه‌ای از آب ثابت با تراکم مشابه دارند. مطالعات موردی متعددی که با استنتاج از مدل‌های اولیه انجام شده بود در طی دهه‌ها روی هم انباشته شد تا آنکه ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای پذیرفتند که رودخانه‌ها با مدل‌های اولیه تطابق ندارند و اختلالاتی در این مطالعات وجود دارد.

دال سین (۱۹۶۸) اولین مطالعات سیستماتیک را از مشاهدهٔ خوشه‌بندی ذرات درشت دانه و ایجاد لایه‌های نهشته‌های آبرفتی رودها انجام داد (شکل ۳)، تحقیقات بر روی این اشکال در طول دههٔ ۱۹۸۰ و بعد از آن بسیار گسترده‌تر شد. رودخانه‌های آنستوموزینگ به وضوح به‌عنوان شکلی متفاوت از کانال‌های چند رشته‌ای و متفاوت از رودخانه‌های گیسویی شناخته شدند. **فانستوک**(۱۹۶۳) از اصطلاح کانال مرکب استفاده نکرد، بلکه جریانی یخچالی را توضیح داد که در طول زمان بین پیچان‌رود و گیسویی، به‌عنوان تابعی از تغییرات آب و بار رسوب از یخچال‌های طبیعی بالادست جایگزین می‌شود. این نوع شکل مجرا متعاقباً مجرای مرکب نامگذاری شد و در محیط‌های طبیعی دیگر تشریح گردید.

در میان ابزارهایی که قبل از دههٔ ۱۹۶۰ (شکل ۴) توسعه یافتند یکی هم سنجی رادیوکربن بود که به‌طور بسیار گسترده برای استفاده در کارهای تاریخ‌نگاری چینه‌شناسی جریانی، در طول دههٔ ۱۹۶۰، توسعه یافت. مدل «آبخیزداری استانفورد» اولین مدل آبخیزداری، با مؤلفه‌هایی برای نفوذ، رواناب و جریان آبراهه بود. اگر چه مدل‌های هیدرولیکی ارائه شده تا این اواخر توسعه نیافتند، فریز و هارلن (۱۹۶۹) مبنایی برای چنین مدل‌هایی طراحی کردند. در سال ۱۹۶۸ یک مدل تک بعدی از مدل هیدرولیک HEC - ۲stepbackwater منتشر شد و بعد از سازگاری با ریزرایانه‌ها (pc) در سال ۱۹۸۴، تا حد زیادی استفاده، از آن توسط ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای تسهیل گردید.

بسیاری از مجلات عمومی زمین‌شناسی، جغرافیا و مهندسی خروجی مهمی برای مقالات ژئومورفیکِ جریانی از زمان تأسیس‌شان بوده‌اند که از جملهٔ Geografiska Annaler Zeitschrift fur Geomorphologie عمدتاً به ژئومورفولوژی اختصاص داشته است. این فهرست در طول دههٔ ۱۹۶۰، با دو مجله، یکی مجلهٔ «تحقیقات منابع آب» و دیگری مجله «هیدرولوژی» که بالاترین تأثیر را در طیف گسترده‌ای از تحقیقات هیدرولوژیک داشتند، گسترش یافت. (شکل ۵)

در میان انجمن‌های تخصصی اصلی که ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای عضو آن هستند، تنها انجمن زمین‌شناسی آمریکا تقسیم‌بندی با تمرکز بر ژئومورفولوژی داشته است (شکل۶). در طول دهه ۱۹۶۰ تغییری در این زمینه به‌وجود نیامد.

از مهم‌ترین ویژگی‌های این دهه انتشار کتاب‌درسی «فرایندهای رودخانه‌ای در ژئومورفولوژی» بود که توسط لئوپولد و همکاران او در سال ۱۹۶۴ انتشار یافت (شکل ۷). این کتاب درسی تأثیرگذار، مختصری از چیستی این رشته را در آن زمان بیان می‌کرد، و به روشن شدن مفهوم ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، به‌عنوان یک شاخه مجزا از تحقیقات ژئومورفیک بنیادی، اصول کمّی و چارچوب مفهومی آن، که در علوم فیزیک و مهندسی هیدرولیک ریشه داشت، کمک کرد. این کتاب که از وضوح و سادگی برخوردار و به خوبی سازمان‌دهی شده بود مجموعه‌ای از دانش و آگاهی در مسیر تحقیقات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای بود که انتظار می‌رود برای دهه‌های آینده و حتی تا نیم قرن پس از انتشار آن، یک متن مفید باقی بماند. در طی این دوره، مقالات تخصصی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده خروجیِ اصلیِ تحقیقات بنیادین ژئومورفیک رودخانه‌ای بود و زیر نظر **لئوپولد**، که رئیس هیدرولوژیست آن سازمان بود، منتشر می‌شد.

۲.۳. دههٔ ۱۹۷۰: پیچیدگی و عدم قطعیت

دههٔ ۱۹۷۰ دورهٔ تازه‌ای از افزایش قابل توجه درک مفاهیم فرم و فرایند رودخانه‌ای بود (شکل ۲ الف). مفاهیمی را که در شکل ۲ الف (در قسمت اول این مقاله) ذکر شده‌اند می‌توان به‌عنوان ادامهٔ توسعه ایده‌ها ازدهه ۱۹۶۰ طبقه‌بندی کرد، از جمله:

- بزرگی و فراوانی جریان‌هایی که رودخانه‌ها را شکل می‌دهند (تأثیرگذاری ژئومورفیک)
- تنظیم انرژی و شکل رودخانه طی زمان و در فضا (آستانه‌ها، وقفه و زمان واکنش، اشکال ماندگار و گذرا، واکنش‌های پیچیده) و
- تأثیر کاربری اراضی بر روی رودخانه‌ها (سدها).

بدین ترتیب، بررسی بزرگی و فراوانی جریان‌هایی که رودخانه‌ها را شکل می‌دهند گسترش یافت و بر هندسهٔ مجرا تمرکز پیدا کرد. تنظیم رابطهٔ بین انرژی و شکل رودخانه طی فضا و زمان، بر پیچیدگی تغییرات ناگهانی، که با گذر از آستانه‌های عبور صورت می‌گیرد، مورد تأکید قرار گرفت. تعداد زیادی از مقالات بعدی بر مبنای همین ایده‌های گسترش یافته بنا شدند: به‌طور مثال، **بول** (۱۹۷۹) آستانه‌ای از توان بحرانی رود را برای تشخیص شرایطی که تحت آن رود به فرسایش در برابر انباشت می‌رسد پیشنهاد کرد. مفهوم‌سازی دستکاری در رودخانه نیز به‌طور صریح پیچیدگی‌هایی را به وجود می‌آورد که با تأخیر در تغییر در متغیرهای خارجی و واکنش سیستم رودخانه شناخته می‌شود، برخی از جنبه‌های تغییر شکل در رودخانه‌ها، نسبت به دیگر جنبه‌ها زمان طولانی‌تری بر جای می‌مانند، و فقدان همزمانی در تغییرات مجرای یک رودخانه با دیگر شاخه‌های رود در همان شبکه، از جمله مسائل مطرح شده در این زمان است. تشخیص این عوامل پیچیده، ارزیابی این مسئله را که آیا فرضیهٔ حدّی، مثل شبه تعادل و انرژی مصرفی یکسان، به‌طور دقیق سازگاری رودخانه را توصیف می‌کند یا خیر با مشکل مواجه ساخت.

ولمن (۱۹۶۷) پیشـــگام مطالعه بر روی اثرات سدها بر روی فرم و فرایند مجرا بود. توجه به چگونگی تأثیرات ســـدها بر روی رودخانه‌ها عمدتاً در طول دهۀ ۱۹۷۰ و اوایل دهۀ ۱۹۸۰ گسترش یافـــت و این امر، به‌عنوان کانون اصلـــی توجهات، در حال حاضر نیز ادامه دارد. دیگر مفاهیم پیشـــرفتۀ جدید در طول دهۀ ۱۹۷۰ عبارت بودند از:

- کمیت هیدرولوژی سیلاب‌های قدیمی؛
- مدل‌هایی از مجاری کم‌عمق ـ مخزنی (معکوس شدن سرعت، فاصله‌گیری مخازن از یکدیگر)
- بودجۀ رسوب؛
- کمّی کردن ارتباط بین شـــیب دامنه و مجراها با توجه به آب و رسوب؛
- شروع مجراسازی؛ و
- جریان آب در آبراهه.

استفاده از مدل‌های هیدرولیک تک‌بعدی و نیز افزایش کاربرد سن‌ســـنجی رادیو کربن باعث تسهیل گسترش مطالعات کمیّت هیدرولوژی سیلاب‌های قدیمی شد. اگرچه عبارت «هیدرولوژی سیلاب قدیمی» برای دهه‌های بعد دیگر مورد استفاده قرار نگرفت، اما رویکردهای زمین‌محور و تکنیک‌های مدل‌ســـازی هیدرولیکِ این مطالعات، در دهه ۱۹۷۰، پیشگام بودند.

محققان توجه بیشـــتری به کانال‌هایی با بســـترِ درشتِ تراز رسوبات در اندازۀ ماسه کردند. مطالعۀ سیستماتیک از توالی مخزنِ کم‌عمق به تنداب، به ارائه مدل‌هایی از ســـرعتِ بازگشت و فاصلۀ ثابتِ از مخازن، در رابطه با عرض کانال، منجر شـــد. این مدل‌ها بعداً به‌طور گسترده‌ای در احیای رودخانه‌ها، طی دهه ۱۹۹۰ و در آغاز قرن بیســـت و یکم، به‌کار گرفته شدند. هرچند مقالات قبلی منابع و الگوهای فضایی از رســـوب را، در حوضۀ زهکشـــی، مورد بررسی قرار داده بودند اما **دانی** و **دیتریچ** (۱۹۷۸) اولین بررسی کمّی از الگوی رســـوب وسعت حوضه را، که به‌طور صریح بودجۀ رســـوب نامیده می‌شد، منتشر کردند. استفاده از چارچوب بودجۀ رســـوب بعداً در زمینه مدیریت منابع و بهبود و توسعۀ روش‌های جدید با سنجش از دور، باستان‌شناسی و نیز ردیابی رسوب به‌کار گرفته شد.

مطالعات فرم و فرایند شـــیب دامنه بر معادلاتی تأکید کرد که می‌توانند برای تعیین ارتباط کمّی بین شیب و کانال‌ها مورد اســـتفاده قرار گیرند. مدل‌های مفهومی از شـــروع حفر مجرا، به جای تمرکز درجه اول بر روی رواناب ســـطحی و فرســـایش، به فرایندهای زیرســـطحی توجه بیشتری نشـــان داد. در چارچوب کاربرد ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، زیست‌ماهی‌شناسان به تعیین حداقـــل دبی مورد نیاز که می‌بایســـت در یک کانال برای حفظ گونه‌هـــای ماهی باقی بماند پرداختنـــد. این تأکیدها زمینه‌های تغییرات اجتماعی ـ سیاسی را فراهم کرد و در قوانینی همچون قانـــون آب پـــاک و گونه‌های در معرض خطـــر (Clean Water Act and Endangered Species Act) و قانون ملی خط‌مشـــی محیط‌زیست (National Environmental Policy Act) بازتاب یافت.

با خـــروج از دهۀ ۱۹۷۰، ژئومورفولوژیســـت‌های رودخانه‌ای به‌طور صریح رودخانه‌ها را به‌عنوان سیســـتم‌های پیچیده با رفتار غیرخطی و فرایندهای نوظهور مفهوم‌ســـازی کردند، هرچند که این مفهوم‌ســـازی در دو دورۀ بعد و حتی تـــا خیلی بعدتر مورد استفادۀ گسترده قرار نگرفت. تأکید فزاینده‌ای بر روی فرایندهای تصادفی و اتفاقی، وجود آستانه‌های درونی، و محدودیت‌هایی برای پیش‌بینی ســـازگاری رودخانه‌ای از طرق زمان و مکان قرار شده بود.

مطالعـــات میدانـــی از «رودخانه‌های مناطـــق معتدل» به «رودخانه‌هـــای حـــاره‌ای و مناطـــق خارج شـــده از زیر یخ‌ها» گســـترش یافت. گرچه مطالعات مجرای رودخانه‌ها قبل از دهه ۱۹۷۰ در عرض‌های پایین و بالا مـــورد توجه بود، اما مطالعات موردی بیشـــتری که در این مناطق انجام شد به‌طور فزاینده‌ای تفـــاوت معنـــاداری از نظر فـــرم و فرایند رودخانـــه‌ای بین این محیط‌هـــای طبیعـــی و رودهای عرض‌های معتدل نشـــان داد. **میال** (۱۹۷۷) ویژگی‌های رخســـاره‌های دشت سیلابی را برای رودخانه‌های گیسویی، مشـــابه رخساره‌های فعلی، که به سمت بالا لایه‌هایشـــان ریزتر می‌شـــود و تحولات جانبی آن‌ها که به خوبی برای رودخانه‌های مآندری شـــده، توصیف کرد. **میلتون** و **بیکر** (۱۹۷۴) و **میلتون** (۱۹۷۳) به ســـرعت تصاویری برای مریخ طراحی کردند و بررســـی‌های کمّی و سیستماتیک خود را از ویژگی‌های رودخانه‌ای فرضی در ســـیارات دیگر آغاز کردند. شـــاید از همه مهم‌تر، تحقیقات بعدی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای از نظر حجم بود که بر زمینه‌هایی مانند احیای رودخانه متمرکز شـــد. ژئوموفورلوژیست‌های جریانی شروع به درک نقش فیزیک و اکولوژی (محیط‌زیســـت) چوب‌های درون جریان رود در طول دهۀ ۱۹۷۰ کردنـــد. در دهۀ بعد، مطالعـــات ژئومورفیک چوب درون جریان با تحقیقات میدانی، در ایالات متحده، شمال غربی اقیانوس آرام و بریتیش کلمبیای کانادا، غلبه داشـــت؛ سپس در طی دهۀ ۱۹۹۰، محققان شـــروع به مستندسازی اثرات متقابل بین چوب و فرم و فراینـــد رودخانه در یک محدوده جغرافیایی بسیار گسترده کردند. از اهمیت‌های ویژۀ دهه ۱۹۷۰، گسترش ابزارهای موجود بـــرای ژئومورفولوژیســـت‌های رودخانه‌ای بود (شـــکل ۴). بسیار پیشتر، اولین تلۀ برداشـــت بارِ بستر، بر روی یک رود نصب شـــده بود، اما بعداً تله‌هـــای لوله‌ایِ ـ گردابیِ بارِ بستر قابلیت قابلیت استفاده از این روش را، برای اندازه‌گیری بارِ

بستر در یک عملیات میدانی، بهبود داد. فناوری جایگزین برای اندازه‌گیری رسوبات معلق، شامل اندازه‌گیری پراکنش پراکندگی بعدی صوتی، در اواخر دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت. پرتاب ماهوارهٔ لندست[1] در سال ۱۹۷۰ به‌طور مداوم اولین مجموعهٔ به دست آمده از داده‌های سنجش از دورِ مبتنی بر زمین از فضا، از محیط زمین را به دست داد. اگرچه به‌طور خاص تخمین فرسایش در زمین‌های زراعی گسترش یافت، ابزاری جدید به منظور تخمین ذخیره رسوب از مناطق مرتفع ارائه شد. رادیوکلوئیدهایی مانند ^{137}Cs که توسط آزمایش‌های جوّی از سلاح‌های اتمی ایجاد شده بود، به‌عنوان شاخص توالی تاریخی از توالی رسوبات اخیر مورد استفاده قرار گرفتند. این امر تکنیک‌های تاریخ‌نگاری زمین قابل دسترس را گسترش داد و تاریخ دقیق‌تری برای رسوبات جوان‌تر از سال ۱۹۵۴ میلادی ارائه کرد. ردیاب‌های هیدروژیکی برای درک ارتباط مناطق بالادست کانال و سطح ـ زیرسطح بود به‌کار گرفته شد. مدل‌های گردش عمومی آتمسفری برای شبیه‌سازی عددی فرایندهای اتمسفری و اقلیمی توسعه یافتند. توسعه سریع رایانه‌های شخصی موجب افزایش استفاده از تجزیه‌وتحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی مبتنی بر رایانه شد. ارزش دارد که بر نوآوری در تصاویر سنجش از دور، زمان‌سنجی زمین و قدرت محاسباتی در طول دهه ۱۹۷۰ نیز تأکید کنیم.

این تحولاتِ ژئومورفولوژی جریانی به مسیری که **بیکر** (۱۹۸۸) توصیف کرد انجامید؛ یعنی برخورد بین مطالعات مسئله‌محور و مطالعات روش‌محور. مطالعات مسئله‌محور بر چگونگی تشکیل لندفرم و شناسایی و تبیین ناهنجاری‌هایی که می‌تواند درک ویژگی‌های تحت بررسی را به سؤال درآورد، تمرکز می‌کند؛ اما در مطالعات روش‌محور تأکید بر پیش‌بینی‌های مفید است ضمن اینکه انتخاب مناسب مسئله پژوهش، توسط روش‌ها هدایت می‌شود. به هر حال در تعادل بین این دو محور تحقیقی، ابداعات سریع فناورانه که از دهۀ ۱۹۷۰ آغاز شد و تا امروزه ادامه دارد، افق تحقیقات را برای ژئومورفولوژیست‌های جریانی، با اجازه دادن به آن‌ها برای طرح فرضیه‌هایی که نمی‌تواند به‌طور مستقیم و قبل از این آزمایش شوند، گسترش داد. تأسیس چندین مجلهٔ جدید در دهۀ ۱۹۷۰ امکانات چاپ و نشر را برای ژئومورفولوژیست‌ها گسترش داد. دو نمونه از این مجله‌ها بر روی ژئومورفولوژی تمرکز می‌کردند (شکل ۵). یکی مجلهٔ «*فرم‌ها و فرایندهای سطح زمین*» ـ گروه پژوهشی ژئومورفولوژی بریتانیا ـ و دیگری مجلهٔ «*انجمن منابع آب آمریکا*» که تمایل جوامع متخصص را به تأسیس مجله‌های خاص خود، که قبل از سال ۱۹۶۰ تأسیس شده بودند ـ از جمله، تحت عنوان *انجمن سلطنتی لندن*، *انجمن زمین‌شناسی آمریکا*، *انجمن جغرافی‌دانان آمریکا*، *اتحادیه ژئوفیزیک آمریکا* و *انجمن مهندسان عمران آمریکا* ـ منعکس می‌کردند.

چهار کتاب درسی جدید ژئومورفولوژی جریانی منتشر شد (شکل ۷). انتشار کتاب ژئومورفولوژی رودخانه‌ای شوم در سال ۱۹۷۷، با ظهوری مؤثرتر از دیگر کتاب‌های درسی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای چارچوب مفهومی مفیدی برای فهم تمایزات فرم و فرایند در مقیاس کل حوضه فراهم شد. دانی و لئوپولد (۱۹۸۷) با انتشار کتاب درسی *کاربرد ژئومورفولوژی رودخانه‌ای*، که همچنان به‌طور گسترده برای درک اهمیت فرم و فرایندهای رودخانه‌ای در زمینه برنامه‌ریزی محیطی استفاده می‌شوند، توانایی خود را نشان دادند.

۳. ۳. دهۀ ۱۹۸۰: مجاری دارای بستر شن و ماسه‌ای و دینامیک بار بستر

مفهوم‌سازی‌های انجام‌یافته طی دهۀ ۱۹۸۰ بیشتر متمرکز بر فرایندها و فرم‌های خاص رودخانه به جای قوانین قابل اجرا بود (شکل ۲ ب). در این میان، آنچه در کانون پژوهش‌های عمده و تحولات مهم قرار داشت عبارت بود از:

- مطالعهٔ رودخانه‌هایی که اندازهٔ دانه‌ها در آن‌ها مختلط بود؛
- مدل‌های تحول مجرا (کانال)؛
- هیدرولوژی سیلاب‌های قدیمی؛
- مدل‌سازی نیروی جریان در برش کانال و سنگ بستر.

برخی از این تأکیدها حاکی از افزایش تمایل به مشاهدهٔ رودخانه، به‌عنوان یک اکوسیستم به جای سیستمی کاملاً فیزیکی است. همچنین نیاز رو به رشد برای درک تأثیرات عملیات مهندسی رودخانه در گذشته، توجه به کاهش عواقب منفی سدها و قوانین جریان و مدیریت رودخانه‌ها ـ با وضع قوانینی مانند قانون آب پاک، قانون گونه‌های در معرض خطر انقراض و قانون سیاست ملی محیط‌زیست ـ اهمیت یافت. همچنان که محققان همت بیشتری را صرف مطالعهٔ رودخانه‌های با توزیع اندازهٔ دانه‌های مختلط کردند، معادلاتی نیز برای انتقال اندازهٔ دانه‌های دونمایی[2] ارائه شد. همچنین، در مقالات متعددی چگونگی ورود رسوب به کانال‌های به شکل دانه‌های درشت مورد بحث قرار گرفت. محققان همچنین مکانیسم‌های متعددی را برای تبیین چگونگی ایجاد لایه‌های سطحی درشت دانه، که به‌طور گسترده در کانال‌های با بستر شن و ماسه‌ای مشاهده می‌شد، پیشنهاد کردند. در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای کاربردی، شوم و همکاران (۱۹۸۴) اولین مدل تحول کانال رود را برای شناسایی مراحل برش و پایداری گودال یا بستر جریان خشکرودهای بیابانی[3] ارائه دادند. چندی بعد از آن ایراداتی درباره این مدل مطرح شد، اما روش اولیه تقریباً به‌طور گسترده در مدیریت رودخانه به‌کار برده شد. **کوچیل** و **بیکر** (۱۹۸۲)

شکل ۷ خط زمانی کتب درسی منتخب ژئومورفولوژی رودخانه‌ای. عکس‌ها نشانگر روی جلد کتاب‌ها هستند (مورساوا، ۱۹۶۸؛ گرگوری و وایلین، ۱۹۷۳؛ تور نیتس، ۱۹۷۹؛ پیت، ۱۹۸۳؛ پیت و فوستر، ۱۹۸۵؛ شوم و همکاران، ۱۹۸۷؛ کینگتون، ۱۹۹۸؛ چالتون، ۲۰۰۷؛ فریس و بریری، ۲۰۱۲)

اصطلاح *هیدرولوژی* سیلاب قدیمی را برای توصیف مدل‌سازی هیدرولیک از وقایع مجزا براساس مدارک ژئومورفیک و رسوبی به‌کار بردند. این امر موجب شد ادبیات گسترده‌ای برای بازسازی تاریخ سیل‌های بزرگ در رودخانه‌های مجزا ارائه شود و با استفاده از آن، اطلاعات فراوانی دربارهٔ سیل، تجزیه‌وتحلیل، و استنباط تغییرات اقلیم دیرینه و نقش سیل‌ها در سازگاری محیط متمرکز به دست آمد. مدل نیروی جریان هواردز (۱۹۸۰) از برش کانال در درون سنگ بستر، از یک معادلهٔ سادهٔ ریاضی تهیه شد که طی دهه بعدی تحقیقاتی میدانی بسیار و مدل‌هایی عددی از برش کانال سنگ بستر و تکامل چشم‌انداز را موجب شد. در تحقیقات متعددی شرایطی که تحت آن نیمرخ طولی بر اثر فرسایش یک نقطه بریدگیِ شیب را به وجود می‌آورد مورد بررسی قرار گرفت و قلمروهای مکان‌هایی که در آن سایش ـ پسروی در نقطهٔ بریدگی شیب[۴] انجام می‌شود و مکانیزم‌های مختلف فرسایش رودخانه‌ای از سنگ بستر ارائه گردید که موجب رقابت چندین مدل شد که هر کدام نقل و انتقال و یا جدا شدن یا فرسایش را در مدل خود محدود می‌کردند.

تورنس (۱۹۸۳) رفتار درازمدت لندفرم‌ها در چارچوب تئوری سیستم‌های دینامیک را، متمایز از سیستم‌های غیرخطی و پیچیده، کشف کرد. این موضوع بعدها به‌طور گسترده‌تری بالا گرفت، چون هیدرولوژیست‌ها متوجه شدند که آب می‌تواند قبل از اینکه در طی دوره‌های بارش و ایجاد رواناب سطحی و یا زیرسطحی درون مجرا وارد شود، مدت قابل توجهی از لایه‌های زیرسطحی زمین‌های بالادست عبور کند. اکولوژیست‌های رودخانه‌ای، الگوهایی طولی از شرایط فیزیکی را پیشنهاد کردند که باعث بروز ویژگی‌های قابل پیش‌بینی از اکوسیستم‌های رودخانه و سپس پالایش مفهوم پیوستگی رودخانه از جمله حوضه‌ها[۵] می‌شود. اکولوژیست‌های رودخانه‌ای همچنین برای نخستین بار بر اهمیت تناوب، پایداری ارتباط جانبی بین کانال و سیلابدشت و مفهوم نبض سیل، که پس از آن گسترش یافت تأکید کردند. طی سال‌های ۱۹۸۰ توجه به آبراهه‌هایی با دانه‌های درشت‌تر و با سطوح شیبدارتر نسبت به آبراهه‌های با

بستر ماسه‌ای گسترش پیدا کرد (شکل ۳) و مجموعه مقالاتی در مورد رودخانه‌های با بستر شن و ماسه‌ای، هر ۵ سال یک بار در کنفرانس «رودخانه‌های ماسه‌ای» منتشر شد. اگرچه در مقالات سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ چالاب‌ها مورد توجه قرار گرفته بود، اما توجه بیشتر به آن‌ها طی دهه ۱۹۸۰ صورت گرفت. همچنین مقاله‌هایی در باب تأثیر گیاهان بر ویژگی‌های کنار رودخانه، پایداری جریان و شکل کانال در دهه‌های قبلی منتشر شده بود. به هر حال تشخیص مناطق کنار رودخانه به‌عنوان یک محیط مجزا که شدت سیلاب کانال‌ها، فرم‌ها و فرایندها در داخل کانال‌ها و اجتماعات حیات گیاهان و جانوران را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، در محیط‌های رودخانه‌ای، در دهۀ ۱۹۸۰ به سرعت رشد پیدا کرد.[۶]

در پی آن، مجله‌های پیشرو و قدیمی مربوط به ژئومورفولوژی رودخانه‌ای شروع به افزایش کرده و توسعه پیدا کردند که از جمله شامل دو مجله‌اند که توجه و تأکیدشان بر ژئومورفولوژی است (ژئومورفولوژی و جغرافیای طبیعی) (شکل ۵).

گروه‌هایی نیز جامعۀ جدید «ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای» و اتحادیۀ انجمن‌های ژئوفیزیک‌دانان آمریکایی و جغرافی‌دانان را تشکیل دادند (شکل ۶). اتحادیۀ انجمن ژئومورفولوژیست‌ها در سال ۱۹۸۹ ایجاد شد و تعداد کتاب‌های رودخانه‌ای نیز به‌طور گسترده‌ای توسعه پیدا کرد. (شکل ۷)

۳.۴ دهه ۱۹۹۰، بازسازی رودخانه و تحول چشم‌انداز

مدل‌های مفهومی را که در طول دهه ۱۹۹۰ (شکل ۲ ب) مطرح شدند می‌توان به این شرح طبقه‌بندی کرد:

- توزیع انرژی بر اثر شکل رودخانه (شبکه مناسب کانال)
- تحول چشم‌انداز
- بازسازی رودخانه و جریان‌های محیطی
- اتصال
- تمایز مکانی درون شبکه‌های رودخانه (فرایندهای دامنه‌ای)

ارائه مدل‌های مفهومی توصیفی توزیع انرژی و شکل رودخانه‌ای حاصل از آن ادامه یافت. چنان‌که فرضیات وقایع حدّی قبلی منجر به مطالعات متعددی برای ارزیابی تأثیر وقایع حدّی بر شبکه‌های کانال مجزا شد. برخی از اولین شبیه‌سازی‌های عددی برای تحول چشم‌انداز به‌عنوان محور برش مجرا، در دهه ۱۹۹۰ منتشر شدند. چارچوب مفهومی زیربنایی این شبیه‌سازی‌ها مبتنی بر کارهای منتشر شده در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ بود، اما پیشرفت روزافزون در قدرت محاسباتی کامپیوترها، برنامه‌ها را گسترده‌تر و آزمایش مدل‌های تحول چشم‌انداز را تسهیل کرد.

توجه مستمر به کانال‌های درشت دانه با شیب بستر تندتر (شکل ۳) به تعیین اشکال مختلفی از آشفتگی و ارتباط در توزیع سرعت و تنش برشی منجر شد. اگرچه محققان پیشین به اهمیت درک آشفتگی در کانال‌های طبیعی پی برده بودند، اما در دهه ۱۹۹۰ بررسی خصوصیات و تعیین مقادیر کمّی آشفتگی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت و با توسعۀ مداوم ابزارهای دقیق هیدرولیکی و قدرت محاسباتی رایانه‌های شخصی تسهیل گردید.

بررسی مجراهایی که به جای آبرفت عمدتاً از سنگ بستر تشکیل شده‌اند، به‌طور فزاینده‌ای نشان داد که مدل‌های استاندارد دینامیک رسوب و تغییرات مرزی مجرا به اندازۀ کافی مقاومت مجراها را توصیف نمی‌کند. در این میان مهم‌ترین ایده‌های ارائه شده مربوط به برش کانال سنگ بستری، مدل پوشش ـ ابزار به وسیلۀ سایش بود. مقالات بعدی آزمایش‌های فیزیکی و کانال‌های طبیعی را مورد آزمایش مجدد قرار دادند. عقاید پیشین درباره افتراق مکانی فرایندهای غالب در حوضۀ زهکشی منجر به بیان مفهوم فرایند ژئومورفیک دامنه‌ای شد. **میترز** (۱۹۹۷) عبارت «perirheic zone» را برای توصیف منطقه‌ای ممتد از ترکیب جریان آب رودخانه بر روی سیلابدشت ابداع کرد. در مورد اثرات ژئومورفیک چوب‌های درون جریان، شناختِ محل‌های انباشت الوار در رود[۷] مورد بررسی قرار گرفت که در مکان‌ها نیروی آب به تشکیل الگوی کانال چند منظوره منجر می‌شود.

برخی از تکنیک‌های مورد استفادۀ ژئومورفیک در احیای رودخانه‌ها به مدت بیش از یک قرن به‌کار می‌رفت تا اینکه اکولوژیست‌ها بازسازی رودخانه‌ها را از دهه ۱۹۷۰ بررسی کردند. انجمن ژئومورفیک تا دهۀ ۱۹۸۰ دخالت‌های گسترده‌ای در احیای رودها نداشت، گرچه با عنوان «بازسازی رودخانه» به‌طور گسترده‌ای در امریکای شمالی و دیگر مناطق با درآمد بالا مانند انگلستان و غرب اروپا اعمال‌نظرهایی می‌شد. در دهه ۱۹۷۰ مفهوم «جریان درون‌نهری» به‌عنوان یک جریان آب پایۀ حداقلی برای حفظ محیط‌زیست و تغذیۀ کانال، در جهت حفظ ویژگی‌های زیستگاه آن، تعریف شد و به‌عنوان نسبتی از رژیم جریان طبیعی آب مورد نیاز رودخانه برای حفظ ویژگی‌های خاص ارزشمند اکوسیستمی رودخانه، به تدریج گسترش پیدا کرد. در پی آن، بوم‌شناسان استفاده از اصطلاح «مهندسی اکوسیستم» را برای توصیف گیاهان و جانورانی که محیط طبیعی را تغییر می‌دهند و زیستگاه برای موجودات دیگر ایجاد می‌کنند در کارهای خود باب کردند.

در طول دهه ۱۹۹۰ در میان محیط‌های رودخانه‌ای، بستر رود، رودخانه‌های کوهستانی و فرم‌های رودخانه‌ای در سیارات

دیگر، مورد توجه بیشتری واقع شد و تحقیقات بیش از پیش بر روی مقاومت ـ کناره‌ای مجرای رود متمرکز گردید. همچنین با استفاده از تغییراتِ مکانیِ مشخصات طولی و عرضی رودخانه، فعل و انفعالات بین رودخانه و تکتونیک مشخص شد. محققان به مشاهده برش سنگ بستر کانال، به‌عنوان عامل اصلی محدودکنندهٔ سازگاری چشم‌اندازِ نسبتِ تغییرات سطح استان پرداختند و مقالات بسیاری در مورد آزمایش شرایطی که تحت آن قانون قدرت جریان هوارد (۱۹۸۰) انجام شده بود ـ به اندازه کافی نیمرخ طولی و برش سنگ بستر را بیان نمی‌کرد، منتشر شد و تحقیقات بر روی هیدرولیک، دینامیک رسوب و اشکال کانال از رودخانه‌های با شیب زیاد در محیط‌های کوهستانی به فراوانی و گوناگونی افزایش یافت. اگرچه مهم‌ترین ابزارهای در دسترس در طول دهه ۱۹۹۰ DEMها، یعنی مدل‌های رقومی ارتفاع بودند ولی GPS واحد (سیستم موقعیت‌یاب جهانی) به آسانی قابل حمل بود. هر دوی این‌ها تا حد زیادی موجب بهبود دقت تصاویر گرفته شده از سطح زمین شد و در نتیجه فرصتی ایجاد شد برای شناسایی ویژگی‌هایی که قبلاً شناخته نشده بود. باید دانست که به ویژه DEMها، پژوهش‌های چشم‌انداز در سطح ژئومورفولوژی رودخانه‌ای را تسهیل کرد؛ از جمله پژوهش در الگوی فضایی در شیب رودخانه، تراکم زهکشی یا توزیع نقاط بریدگی شیب، به‌خصوص در رابطه با توزیع فضایی مقدار بالاآمدگی.[۸]

در جامعهٔ علمی امروز مجلات آنلاین می‌توانند به سرعت منتشر شده و از راه دور دیده شوند. نمایه‌های اِسنادی برای مقالات علمی منتشر شده در مجلات آکادمیک نخستین بار در سال ۱۹۶۰ ابداع شد. اما نمایه‌سازی تا اواخر دههٔ ۱۹۹۰ خودکار نشد. و از آن پس بود که استفاده از نمایه‌های اسنادی و عوامل تأثیرگذار به‌عنوان معیاری برای کیفیت یک مجله و بهره‌وری فردی تسهیل شد. استفاده از ایمیل شخصی به‌طور فزاینده بر برقراری ارتباط نزدیک و آنی در سراسر قاره‌ها و نیم‌کره و تبادل فایل‌های پیوست مانند تصاویر، مجموعهٔ داده‌ها و نشریات تأثیر گذاشت (شکل ۴). اسلایدها و پوسترهایی که در برنامه‌های نرم‌افزاری تولید شد، مانند پاورپوینت ماکروسافت، در طول سخنرانی‌های علمی جایگزین استفاده از اسلایدهای ۳۵ میلی‌متری و یا طلق‌های شفاف شد. این امر ویرایش را ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر ساخت و موجب سخنرانی‌های ادامه‌دار و در دسترس به‌صورت آنلاین طولانی‌تر از سخنرانی‌های واقعی شد. در مجامع حرفه‌ای، بخش هیدرولوژی در اتحادیه ژئوفیزیک کانادا تأسیس گشت (شکل ۶). تنها کتاب کاملاً رودخانه‌ای جدید کتاب «منظری از رود» بود که در دههٔ ۱۹۹۰ به قلم لئوپولد (۱۹۹۴) انتشار یافت و خلاصه‌ای از یک عمر تحقیقات رودخانه‌ای او بود (شکل ۷). برخی از آموزش‌های تخصصی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای و کارهای تازه و خلاصه کتاب‌های دقیق چند دهه قبل در مطالعات رودخانه در دسترس خوانندگان قرار گرفت. **نایتون** نیز کتاب «متون رودخانه‌ای» را با ویرایش جدید منتشر ساخت که استفاده از آن از سال ۱۹۹۸ به‌طور وسیع گسترش یافت.

۳. ۵ دهه ۲۰۰۰: منطقهٔ حیاتی در آنتروپوسن

برخی از مدل‌های مفهومی در طول دههٔ اول قرن بیست و یکم (شکل ۲ ب) به وضوح براساس سنت‌های اولیه ساخته شده‌اند. این‌ها مدل عبارت‌اند از:

- مقدار جریان مواد (قوانین حمل و نقل ژئومورفیک)؛
- پیچیدگی در رفتار سیستم (خواص نوظهور)؛
- مدل‌های توسعهٔ چشم‌انداز (حالت ماندگار در مقابل حالت گذرای مناظر)؛
- تغییرات انسانی سیستم‌های رودخانه (رسوبات به‌جا مانده، اثرات به‌جا مانده آنتروپوسن پایداری، یکپارچگی فیزیکی).

دیتریش و همکاران (۲۰۰۳) به منظور توسعهٔ قوانین حمل ژئومورفیک برای کمّی‌سازی مقدار مواد و انرژی در اجزای مختلف، موضوعات تصریح شده در چشم‌انداز را که در دههٔ ۱۹۶۰ توسط لئوپولد و همکاران ارائه شده بود به شدت مورد تأکید قرار دادند که با توجه به اهمیت کمّی کردن و ریاضی‌سازی موضوع، فرایندهای ژئومورفیک قابل پیش‌بینی شد. استفادهٔ مشترک فزاینده در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای از عباراتی مانند خواص نوظهور و رفتار غیرخطی، که زمان آن به بیش از یک قرن باز می‌گردد، صورت گرفت که تأکید دههٔ ۱۹۷۰ بر پیچیدگی‌های رودخانه‌ای و بازگشت به ایده‌های کشف شده توسط تورنز (۱۹۸۳) را از نو مطرح می‌کرد. تمایز بین حالت ماندگار مناظر، که توپوگرافی و نرخ تخریب ثابت **ویپل** (۲۰۰۱) را حفظ می‌کند، و تجدیدنظر در نرخ فرسایش چشم‌انداز (ویپل و همکاران، b ۲۰۰۰) را می‌توان به ایده‌های توسعهٔ چشم‌انداز توسط **گیلبرت** (۱۸۷۷) و **هک** (۱۹۶۰) نسبت داد که تمایزی با بهره‌گیری از DEM و GIS است. این بدان معنا نیست که مدل‌های مفهومی بعدی مشتق شده هستند، بلکه بدین معناست که بنای فکری آن‌ها به بیش از چند دهه تفکر ژئومورفیک رودخانه‌ای باز می‌گردد.

در طول دههٔ ۲۰۰۰، تحولات در محیط‌زیست تأکیدات مفهومی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای کاربردی را به خود جلب کرد. برای تشخیص آنچه به‌طور گسترده به‌عنوان سلامت رودخانه‌ها شرح داده شده تلاش‌هایی انجام شد. مثلاً ژئومورفولوژیست‌های رودخانه مفاهیم انعطاف‌پذیری، پایداری و

یکپارچگی محیط‌زیست را بر رودخانه‌ها، به‌عنوان سیستم‌های ژئومورفیک، تطبیق دادند (به‌عنوان مثال، باتر و همکاران، ۲۰۱۳).

انعطاف‌پذیری عبارت از ظرفیت یک اکوسیستم برای پاسخ به اختلال و مقاومت در برابر تغییر و بهبود سرعت است. یک سیستم هنگامی انعطاف‌پذیر است که به احتمال زیاد در صورت اغتشاش به شرایط اولیه بازگردد. پایداری اشاره به منابع انسانی است که تنوع و بهره‌وری از سیستم را حفظ می‌کند. اکوسیستم زمانی دارای انسجام است که قادر به حفظ و حمایت از جامعه‌ای از موجودات زنده باشد که دارای ترکیب گونه، تنوع، و سازمان کاربردی در مقایسه با زیستگاه‌های طبیعی در یک منطقه هستند (کر، ۱۹۸۱). گراف (۲۰۰۱) از مدل‌های قبلی رودخانه به‌عنوان مجموعه‌ای از فرایندها و اشکال برقراری ارتباط، برای توسعهٔ مفهوم انسجام فیزیکی استفاده کرد. وی انسجام فیزیکی رودخانه را «مجموعه‌ای از فرایندهای فعال رودخانه‌ای و تغییرات سطح زمین در اثر عوامل طبیعی» تعریف کرد، به طوری‌که رودخانه به‌صورت تعادل پویا، با تنظیماتی نه بیش از محدودیت‌های تعریف شده، توسط ارزش‌های اجتماعی حفظ شد. افزایش تأکید بر جنبه‌های متنوعی از *سلامت رودخانه* که در زمینه‌های سیاسی اجتماعی با تأکید بر رودخانه به‌عنوان اکوسیستم رخ داده است، منجر به تلاش دانشمندان و مدیران برای تعیین کمیّت خدمات اکوسیستم ارائه شده توسط رودخانه‌ها گردید.

مطالعات متعددی که بر روی اثرات تغییر در پوشش زمین انجام می‌گیرد اساساً همان تکرار و گسترش توضیحات ولمن (۱۹۶۷) از تغییرات رسول و هندسهٔ کانال در مریلند است. مطالعات متمرکزی دربارهٔ تأثیر انسان بر روی رودخانه‌ها، به منظور تأکید بر ویژگی‌هایی مانند چوب داخل جریان رود، کنارهٔ رودخانه، مجراسازی، پوشش گیاهی در منطقه ساحلی، تهاجم پوشش گیاهی ساحلی غیربومی و بسیاری از فعالیت‌های دیگر، گسترش یافت. ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای به‌طور فزاینده‌ای، تاریخ طولانیِ حضورِ همه‌جانبهٔ انسان در تغییر رودخانه را به رسمیت شناخته‌اند. این به رسمیت شناختن منجر به استفاده از عبارت «میراث رسوبات» و «میراث اثر» به ترتیب برای رسوبات یا شکل کانال‌ها، ناشی از استفاده‌های گذشته از زمین شد. پیدایش ایدهٔ اثرات مداوم انسان بر روی سیستم‌های رودخانه‌ای به چند دهه قبل باز می‌گردد، اما از دههٔ اول قرن بیست و یکم به‌طور فزاینده‌ای به مشخصه‌ای جالب توجه تبدیل شده است.

در چارچوبی گسترده‌تر از ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، اصطلاح «انسان‌مداری» که اولین بار توسط **کروتز** و **استورمر** (۲۰۰۰) پیشنهاد شد، امروز به‌طور گسترده‌ای در معرفی اثر مقاومت‌ناپذیر فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌ها و مناظر مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین مقالهٔ شاخص ارائه شده که براساس آن، در حال حاضر انسان شدیداً بر حرکت جهانی، آب و مواد مغذی و همچنین بر آب و هوای جهان تأثیر می‌گذارد. شناخت شدت و فراگیری اثرات انسانی باعث تقویت چارچوب مطالعات متمرکز بر تعیین کمیت شرایط زیست‌محیطی و احیای رودخانه‌ها می‌شود.

پژوهش بر روی فعل و انفعالاتی که بین فرایندهای فرسایشی و نیروهای تکتونیکی وجود دارد منجر به مفهوم «*آنوریسم تکتونیکی*» شده که چگونگی تأثیر رودخانه را، بر ساختار قشری در کمربندهای کوه‌ها، از طریق تغییر توزیع فشار، جریان گرما، و مواد مذاب در پوسته و گوشتهٔ فوقانی، توصیف می‌کند. در تعریف متخصصان آب‌شناسی، محیط‌های مرتفع شامل مخازن سطحی و زیرسطحی مختلفی هستند که می‌توانند با تغییر ورودی بارش با زمان و مکان روشن و خاموش شوند و آستانه‌هایی در افت حرکت آب با پر و سرریز شدن مخازن منفرد ایجاد کنند. اگرچه در مطالعات قبل از دههٔ اول قرن بیست و یکم شواهد فزاینده‌ای در مورد ناایستایی آب وجود دارد، میلی و همکاران (۲۰۰۸) «ناقوس مرگ» را با خلاصه قاطعانهٔ شواهدی به صدا در آوردند که ناایستایی همیشه یک فرضیهٔ مناسب، اما غیردقیق بوده است. استفاده از عبارت «منطقهٔ بحرانی» (منطقه‌ای که اکثر حیات خاکی را حفظ می‌کند) در طول دههٔ اول قرن بیست و یکم، به‌عنوان تشخیص صریح و روشن پیچیدگی و ارتباط فیزیکی، شیمیایی، و فرایندهای بیولوژیک در طول گسترهٔ فضایی از محدودیت‌های خارجی پوشش گیاهی تا منطقهٔ آب‌های زیرزمینی شروع شد. عبارت‌هایی مانند «ویژگی‌های پدید آمده» و «رفتار غیرخطی» متداول‌تر شدند، اگرچه این عبارت‌ها به‌طور مستدل رفتار شناخته شده سیستم حداقل در اوایل دهه ۱۹۷۰ در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای را توصیف می‌کنند.

در پژوهش‌های ژئومورفیک رودخانه‌ای به‌طور فزاینده‌ای ویژگی‌های سطحی مربوط به رودخانه‌ها در سایر لیدار هوایی، که هدف را با لیزر نشان داده و نور منعکس شده را تجزیه‌وتحلیل می‌کند، در اصل در دههٔ ۱۹۶۰ ایجاد شد اما تا اوایل قرن بیست و یکم به‌صورت گسترده در سیستم‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار نگرفت (شکل ۴). توسعهٔ لیدار نفوذی در خاک و آب، توانایی بررسی در وضوح فضایی بسیار بالا را بیشتر افزایش می‌دهد. با وجود اینکه لیدار یک ابتکار جدید در فناوری است، در همین مدت کوتاه تأثیر بسیاری در ارتقای توانایی ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای، در مشاهده و تفسیر

شـــکل‌ها و فرایندهای معاصر و قبلی رودخانه‌ای داشته است. در همین دهه نیز، سنجش از دور ابر طیفی و نوری منفعل، به‌عنوان وسیله‌ای برای ارزیابی مشـــخصاتی مانند توزیع زیستگاه آبزیان برای رودخانه‌های متوسط استفاده شدند.

مجله‌های جدیدی نیز به وجود آمده اســـت (شـــکل ۵) که یکی از آن‌ها «مجلهٔ تحقیقات ژئوفیزیک ســـطوح زمین» است که عمدتاً بـــه ژئومورفولوژی می‌پردازد. اتحادیهٔ زمین‌شناســـی اروپا هم در ســـال ۲۰۰۲ تأســـیس شـــد، که دارای یک بخش مورفولوژی اســـت. یک گروه متمرکز بـــر ژئومورفولوژی نیز در اتحادیـــهٔ ژئوفیزیک امریکا ایجاد شـــد (شـــکل ۶). هفت کتاب ژئومورفولوژی رودخانه‌ای دیگر هم منتشـــر شدند (شکل ۷). با تأکید بر جنبه‌های خاصـــی از رودخانه‌ها در برخی از کتاب‌ها ـ هیدرولیک و دینامیک رسوبات، چینه‌شناسی و دینامیک رسوب ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ـ مقالات رو به رشد و گستردهٔ مربوط به ژئومورفولوژی رودخانه‌ای را منعکس کردند.

به‌طور خلاصه، در دههٔ اول قرن بیست و یکم، ژئومورفولوژی رودخانه‌ای تا حدودی یک علم بین رشـــته‌ای تلقی می‌شد که بر تعاملات اساســـی زمین‌شناســـی (مثلاً تکتونیک، آب و هوا، و توپوگرافـــی) و جریان‌های مواد و تغییرات مرتبط در شـــکل (مثلاً قوانین انتقال ژئومورفیک) تأکید دارد و از جمله شـــامل تحقیقاتی اســـت که درخصوص تعاملات رودخانه‌ای انســـانی (مثلاً رسوبات قدیمی) و دانش ژئومورفیک رودخانه‌ای استفاده شـــده در موضوعـــات اجتماعی حاضر (مثلاً احیـــای رودخانه، جریان‌های محیطی) انجام می‌شـــود. در این تحقیقات، تفکیک بین مطالعات مشـــکل‌محور و مطالعـــات روش‌محور همچنان وجـــود دارد. چنین اختلافی در تأکید و روش تحقیقاتی حاکی از رشـــد و نظم پویای این رشته است. گسترش ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ســـبب شـــد تا آرایـــهٔ متنوع‌تـــری از محیط‌های رودخانه‌ای نســـبت به آرایه‌هـــای متمرکز بـــر تحقیق، که در دههٔ ۱۹۶۰ رایج بود، شـــناخته شود. البته، این امر چالش‌هایی را در فرضیـــات طولانی‌مـــدت در مورد اهمیت نســـبی بزرگی و بســـامدهای مختلف جریـــان، توزیع نیروهـــای هیدرولیک، شـــرایط حمل و انتقال رسوب، و حالتی که در آن رودخانه‌های جدا شـــده تمامی توصیف رودخانه‌ها را به انـــدازهٔ کافی بیان نمی‌کنند، ایجاد کرد.

طیف گسترده‌ای از ابزارهای جدید، مجموعه داده‌های زمانی و فضایی با وضوح بالا در پیکربندی خاکی، چینه‌شناسیِ نزدیک به سطح، جریان‌های آب و رســـوب در محیط‌های متغیر بالا، و توزیع ســـرعت و نیروهای هیدرولیک در کانال‌ها را تسهیل کرد. ایـــن ابزارها تعیین کمیت نیروهـــا و جریان‌های عمل‌کنندهٔ آب و در نهایت مقیاس‌هـــای فضایی و زمانی از نیروهای لحظه‌ای و حرکت یک دانه شـــن تا تکامل زهکشـــی‌ها در هیمالیا در طول دورهٔ سنوزوئیک را ممکن ساختند. زمان‌سنجی دقیق چهارگانهٔ فرسایش، رسوب، و تغییرات قابل توجه در شکل کانال با توسعهٔ هرچه بیشتر فنون مختلف باستان‌شناسی زمین افزایش می‌یابد.

ارتباط ســـریع و آســـان، موجب ســـرعت انتشـــار نتایج تحقیقـــات شـــد و دامنـــهٔ جغرافیایـــی جامعـــهٔ ژئومورفیک رودخانـــه‌ای را شـــدیداً گســـترش داد. طیف‌هـــای گوناگون مجله‌های منتشرکنندهٔ مقالات ژئومورفیک رودخانه‌ای، یافتن یک خروجی مناســـب بـــرای هر مجموعه نتایـــج تحقیقات را آسان‌تر می‌ســـازد. اما چالش‌هایی هم برای برخی افراد ایجاد می‌کنـــد. ژئومورفولوژیســـت‌ها مکان‌های رفیعـــی در جوامع حرفه‌ای دارند، اما این نیز گردهمایی‌های مرتبط ســـالیانه را با چالش‌هایی برای نظم ماندن ایجاد می‌کند.

تنهـــا کتاب مؤثر دههٔ ۱۹۶۰ (لئوپولـــد و همکاران، ۱۹۶۴) به چندین کتاب مفید که بـــر جنبه‌های مختلف ژئومورفولوژی رودخانه‌ای تأکید دارد، تقســـیم می‌شـــود. هرچند، به استثنای مدیریـــت رودخانه تأکید نســـبی در این کتاب‌هـــا بر جنبه‌های مختلف ژئومورفولـــوژی رودخانه‌ای هیچ تغییر واضحی در طول زمان نشان نمی‌دهد.

۴. ملاحظات

همان‌گونه که در بخش مقدماتی ذکر شـــد، ژئومورفولوژی رودخانه‌ای عمده‌ترین شاخه از رشتهٔ ژئومورفولوژی است. یک دلیل آن نســـبت مقالات رودخانه‌ای منتشر شده در مجله‌های پیشـــرو و منظم: «ژئومورفولوژی» و «فرایندهای سطحی زمین و شـــکل طبیعی زمین» (شـــکل ۸) نســـبت به مقالات دیگر است. از زمان شروع انتشار این مجلات، مقالات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای به‌طـــور میانگین ۶۳ درصد از تعـــداد کل مقالات منتشـــر شـــده در مجله «ژئومورفولـــوژی» و ۳۵ درصد از کل مقالات منتشر شـــده در «فرایندهای ســـطحی زمین و شکل طبیعی زمین» را داشته‌اند. مقالات دیگر اگرچه کمتر از نیمی از کل مقـــالات در این مجله اســـت، بیشـــتر از هر حوزهٔ دیگر ژئومورفولوژی است.

براساس میزان علاقهٔ دانش‌آموزان و محققان دیگر رشته‌ها، ژئومورفولـــوژی رودخانه‌ای آیندهٔ روشـــنی دارد. به‌عنوان مثال، در ســـال ۲۰۰۶ حدود ۶۱ درصـــد از تمام فارغ‌التحصیلان علوم زمین‌شناســـی در ایالات متحدهٔ امریکا در شـــاخهٔ AGI صنعت محیطی اســـتخدام شـــدند (AGI، ۲۰۰۹). این شاخه می‌تواند شـــامل رشته‌های فرعی فراتر از ژئومورفولوژی رودخانه‌ای باشد، اما بینشـــی برای توزیـــع متخصصان علوم زمین‌شناســـی ارائه

می‌کند.

برای بیـــش از نیم قرن، ژئومورفولوژیســـت‌های رودخانه‌ای مدل‌های مفهومی کیفی و کمّی موارد زیر را ایجاد کردند:

- جریان‌های آب، رســـوب و امـــلاح در کانال‌ها و بین کانال‌ها و محیط‌های مجاور؛
- معیارهای پیچیدگی محیطی، پیچیدگی مرزی کانال، زیستگاه آبزیان، قابلیت نگهداری رودخانه‌ای آب، رسوب و املاح؛
- واکنش کانال به مزاحمت‌های طبیعی و انسانی برای پایداری کانال؛
- منطقه‌بندی فضایی فرایند رودخانه‌ای و تشکیل در حوضه‌های زهکشی؛ و
- معیارهای یکپارچگی فیزیکی.

ایـــن دانـــش بـــرای درک و مدیریـــت رودخانه‌ها، شـــامل بازگرداندن مشـــخصه‌های مورد نظر رودخانه‌ای اســـت که یا از طریق اســـتفاده از گذشته زمین و یا مهندسی رودخانه از دست رفته‌اند؛ همچنین توسعهٔ اســـتراتژی‌هایی برای توسعهٔ پایدار و جامع است (Mora، ۲۰۱۳). جنبه‌های کاربردی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ســـال ۱۹۶۰ رشـــد کرده اســـت، زیرا جوامع عمومی و علمی به‌طـــور فزاینده‌ای از اثرات تجمعی انسان‌ها بر سیســـتم‌های رودخانه‌ای آگاه شده و نگران آن هســـتند. در دههٔ اول قرن بیست و یکم، این موضوع به‌طور میانگین ۱۱ درصد از محتـــوای کتاب‌های اصلیِ رودخانه‌ای را تشـــکیل می‌داد. (برخلاف کتاب‌های اختصاصـــاً مدیریت‌محور، مثل بریری و فریس، ۲۰۰۵).

با این حال، ژئومورفولـــوژی رودخانه‌ای با چالش‌های جدی در حفظ ارتباط اجتماعی در یک محیط تحت ســـلطهٔ انســـانی روبه‌روســـت. به‌عنوان مثال، ژئومورفولوژی رودخانه‌ای کاربردی با هیدرولیک و هیدرولوژی مهندســـی عمران همپوشانی دارد و مهندسان این رشته تاکنون نقش فعال و برجسته‌تری نسبت به ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای در احیای رودخانه‌ای و کاهش خطرات طبیعی داشته‌اند.

براساس تحقیقات انجام شـــده، من افزایش توجه نسبت به موارد زیر را، در طول دههٔ بعد، پیش‌بینی می‌کنم:

- توجه به رودخانه‌هایی که سرچشـــمهٔ آن‌هـــا در محیط‌های کوهستان و دشت اســـت، به‌عنوان اثرات مهم بر هیدرولوژی در مقیاس شبکه، دینامیک رسوب، تنوع زیستی، و سلامت رودخانه؛
- توجه به شکل و فرایندهای رودخانه‌های بزرگ شامل احیای رودخانه‌های وسیع در مقیاس کل حوضهٔ زهکشی؛
- توجه به نقش رودخانه‌ها در مقدار کربن و دینامیک نیتروژن در مقیاس محلی تا جهانی؛
- توجـــه به رودخانه‌ها در چارچوب انســـانی (همان‌طور که در اولین شماره از مجلهٔ انسان‌شناسی در سال ۲۰۱۳، با سردبیری «آن چیین» ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای، بیان شده است)، با تأکید ویژه بر معیارهای کمّی ســـلامت رودخانه یا یکپارچگی زیســـت‌محیطی و فیزیکی به علت نیاز به مدیریت رودخانه‌ها در یک چارچوب نظارتی؛ مانند راهنمای مقررات آب اتحادیهٔ اروپا؛
- توجه به شکل و فرایند کانال سنگ بستر در چارچوب تکامل مناظر، و
- توجه به شاخص‌های کمی اشکال مختلف اتصال در شبکه‌های رودخانه‌ای و بین آن‌ها.

این‌ها نمونه‌های برجســـته از موضوعات تحقیقی با گســـترهٔ متنوع هســـتند که بدون شـــک به ســـرعت و گاهی در جهات غیرمنتظـــره تغییر می‌یابد. همان‌گونه که **چرچ** (۲۰۱۳، صفحهٔ ۱۹۰) در بررسی اخیر خود بیان کرده، ژئومورفولوژی رودخانه‌ای از ســـال ۱۹۵۰ با پیدایش تکنولوژی‌های جدید برای مشاهده و تجزیه‌وتحلیل پیوسته به میزان قابل توجهی در حال تغییر بوده است.

با بررسی نکات برجسته در این مقاله، می‌توانم ژئومورفولوژی را، از سال ۱۹۶۰ تا سال ۲۰۱۰، به‌عنوان رشتهٔ علمی متمرکز بر ایجاد یـــک علم کمّی و منظم معرفی کنم. تأکید کمّی همچنان قوی باقـــی ماند، اما اعضای جامعهٔ ژئومورفولوژی رودخانه‌ای نیز فعالانه به دنبال ایجاد یک علم یکپارچه‌اند تا جامعه و رشـــته‌ای برای مدیریـــت مرتبط محیط و رویارویی با چالش‌های انطباق و پایداری ذاتی در دنیای شلوغ، مهندسی شده و متغیر قرن بیست و یکم ایجاد کنند.

پی‌نوشت‌ها

1. Land sat
2. bimodal
3. arroyos
4. Knickpoint recession
5. impoundments

۶. در این قســـمت از مقاله، مطالبی درباره ورود فنون مختلف مطالعاتی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ذکر شـــده بود که به علت تغییر وسیع آن‌ها طی دهه اخیر از متن ترجمه شده حذف گردید (مترجم)

7. log jams

۸. در این قسمت نیز، در متن اصلی، مطالبی دربارهٔ فنون مختلف مطالعاتی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای ذکر شده بود که به علت تغییر وسیع آن‌ها طی دهه‌های اخیر از متن ترجمه شده حذف گردید (مترجمان)