پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال دهم، شماره ۲، پاییز ۱۴۰۰
صص. ۱۳۵-۱۲۰

به کارگیری شاخص‌های کمّی ژئومورفومتریکی در تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه و مدیریت دشت های سیلابی (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو، از روستای قدیرلو تا روستای لعل گنج)

مسعود رحیمی* – دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷ تائید نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

چکیده

رودخانه قره‌سو از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که در طی سال‌های اخیر، تحت تأثیر عوامل آنتروپوژنیک دست‌خوش تغییراتی قرارگرفته است. در این تحقیق سعی شده است با ارائه روش‌های کمی ژئومورفومتریکی، مطالعه دقیق‌تری نسبت به تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره‌سو در طی ۱۲ سال اخیر صورت گیرد و بینش جامعی نسبت به این تغییرات و روش‌های محاسبات آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارائه گردد. بخش وسیعی از دشت‌سیلابی رودخانه قره‌سو زیر کشت محصولات کشاورزی می‌باشد و در بخش‌های زیادی، شاهد دست اندازی‌های کشاورزان در قسمت بستر و حریم رودخانه و نیز تغییر کاربری هستیم. این دخل و تصرف در طول سال‌های اخیر سبب ایجاد تغییراتی در مورفولوژی مجرای رودخانه قره‌سو شده است. بررسی کمی این تغییرات با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریکی می تواند نقش مهمی در مدیریت دشت‌سیلابی این رودخانه ایفا کند. منطقه موردمطالعه ۳۱ کیلومتر از این رودخانه می‌باشد که از نزدیکی روستای قدیرلو شروع و تا نزدیکی روستای لعل گنج ادامه دارد. این پژوهش متکی بر تحقیقات کتابخانه‌ای و مطالعات میدانی می‌باشد. مهم‌ترین شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی مورد استفاده در این پژوهش شامل: شاخص‌های تغییرات در خط کناری مجرا، آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده، تغییرات در عرض رودخانه، میزان مهاجرت واقعی رودخانه و شاخص پایداری جانبی مجرا می‌باشد. نتایج بررسی شاخص‌های تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره‌سو نشان‌دهنده‌ی مقدار بالای شاخص تغییرات خط کناری کل (E) و مقدار پایین شاخص مهاجرت واقعی (M) می‌باشد که دلیل آن تغییرات در عرض مجرای رودخانه (تنگ‌شدگی مجرا) قره‌سو در طی ۱۲ سال اخیر بوده است. درواقع فعالیت کشاورزان در اطراف رودخانه و دست‌اندازی در بستر و حریم رودخانه قره‌سو سبب کانالیزه شدن مجرا شده است که این امر می‌تواند سبب تسریع آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور رودخانه گردد. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که تحرک بالا در میزان شاخص تغییرات خط کناری کل (E) و شاخص آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده (N) رودخانه قره‌سو در ارتباط با مهاجرت واقعی مجرا نبوده بلکه دارای ارتباط قوی با تغییرات در عرض مجرا می‌باشد. میزان آهنگ مهاجرت واقعی محاسبه‌شده برای رودخانه قره‌سو در طی ۱۲ سال گذشته در منطقه موردمطالعه تقریباً ۰/۳۶ متر در سال بوده است. استفاده از این شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی می‌تواند دید جامع و دقیقی نسبت به تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره سو ارائه داده و در پژوهش‌های مدیریت دشت‌های سیلابی این رودخانه مورداستفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق می تواند اطلاعات دقیقی نسبت به تغییرات موفولوژیکی مجرای رودخانه قره‌سو در طی سال‌های اخیر در اختیار شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل قرار داده و گامی در جهت آزادسازی بستر و حریم این رودخانه از دست اندازی‌های صورت گرفته بردارد.

واژگان کلیدی: تغییرات جانبی مجرا، شاخص‌های ژئومورفومتریکی، مهاجرت جانبی مجرا، رودخانه قره‌سو.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: Masoud.rahimi90@ut.ac.ir

مقدمه

سیستم رودخانه‌ای به‌صورت پیش‌رونده[1] در طی زمان زمین‌شناسی، درنتیجه فرایندهای عادی فرسایش و رسوب‌گذاری تغییر می‌کند و نسبت به تغییرات اقلیم، سطح اساس، تکتونیک و اثرات انسانی پاسخ می‌دهد(کاندولف و همکاران[2]،۲۰۰۳: ۱۰۵). مطالعه تغییرات تاریخی مجرا، بخش مهمی از شناخت سیستم‌های رودخانه‌ای است. تنها به‌واسطه شناخت گذشته می‌توان تغییرات اخیر و مداوم در شکل مجرا را بررسی کرده و اقدام به تحلیل عوامل پیچیده‌ای نمود که ماهیت رودخانه‌های امروزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند(وینترباتم[3] و همکاران،۲۰۰۰: ۱۹۵–۲۰۸). دشت‌های سیلابی به‌وسیله برهم‌کنش فرایندهای رودخانه‌ای شکل می‌گیرد. ویژگی‌ها و تکامل آن‌ها به توان رودخانه، رفتار رسوبات رودخانه و مشخصات کانال رودخانه وابسته است. دشت‌های سیلابی به‌صورت گسترده مورداستفاده فعالیت‌های انسانی (کشاورزی، سکونت و صنعت) قرارگرفته که نسبت به تغییرات مورفولوژیکی مجرا حساس هستند (تلدی[4] و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۶۴۴). تعدادی از فعالیت‌های انسانی شامل احداث سد، انتقال آب، تغییر کاربری اراضی، تغییر در ورودی آب و رسوب رودخانه می‌تواند بر مورفولوژی مجرای رودخانه تأثیر گذاشته و سبب بروز خسارات‌های مالی و اکولوژیکی شود(گوامن[5] و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۸۶). مطالعات زیادی پاسخ رودخانه به فعالیت‌های انسانی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات قابل‌ملاحظه‌ی مجرا عموماً به‌صورت تنگ‌شدگی مجرا و تغییر پلانفرم رودخانه اتفاق می‌افتد(سورین[6] و همکاران،۲۰۰۳: ۳۰۸). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مطالعه برهم‌کنش بین فرم و فرایندهای[7] مجرای رودخانه در یک مقیاس زمانی یا مکانی است (چالتون[8]،۲۰۰۸: ۱۳۵). درک فرایندهای مسئول در تغییرات کانال و ارزیابی پایداری رودخانه، موردعلاقه بسیاری از ژئومورفولوژیست‌ها و مهندسین رودخانه بوده است. بیشتر تحقیقات موجود در زمینه‌ی بررسی تغییرات جانبی مجرای رودخانه بر روی مهاجرت مجرا و فرسایش کناره مقعر مئاندر تمرکز دارد (ریچارد[9]،۲۰۰۱: ۱۰۹). بسته به شرایط ورودی، ژئومتری پلانفرم مجرای رودخانه، تغییرات جانبی مجرا می‌تواند شکل‌های متفاوتی چون مهاجرت کانال(مهاجرت مئاندر)، تغییرات در عرض رودخانه، تغییر مسیر مجرا و میان‌بر ظاهر شود (ریچارد، ۲۰۰۵: ۹۳۱). آهنگ جابجایی جانبی مجرا بستگی به مقاومت کناره مقعر در مقابل فرسایش، تداوم و بزرگی جریان، شعاع انحنا مجرا و ظرفیت جریان برای حمل رسوبات را دارد. مقدار مهاجرت جانبی رودخانه‌های بزرگ همچون برخی از مئاندرهای رودخانه می سی سی پی به ۲۰ متر در سال می‌رسد. بااین‌وجود، مقدار مهاجرت جانبی در رودخانه‌های متوسط نزدیک یک متر در سال اندازه‌گیری شده است (مگدالنو[10] و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۹۷). تغییرات مورفولوژیکی در مجرای کانال بیشتر شامل تنظیم و تعدیل عرض، عمق، شیب کانال و پلانفرم رودخانه است. تنظیم کانال وابسته به قدرت رودخانه، عملکرد دبی رودخانه و شیب دره و نیز اندازه و حجم مواد بستر و نیز مقاومت مواد کناره رودخانه و پوشش گیاهی رودکنار[11] است (لابی[12] و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۷۴). پایداری رودخانه و پاسخ آن به متغیرهای شرایط محیطی وابستگی شدیدی به نوع کانال، درجه آزادی رودخانه، رسوبات، تراکم پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی دارد. داده‌های سنجش‌ازدوری و تکنیک‌های GIS ابزار کلیدی برای پایش تغییرات ژئومورفولوژیکی در محدوده دشت‌سیلابی و کانال رودخانه است که جزئیات خوبی از شرایط تاریخی و تغییرات

---

1. progressively
2. Kondolf et al
3. Winterbottom
4. Tealdi
5. Geauman
6. Surian
7. Form & Process
8. Charlton
9. Richard
10. Magdaleno
11. Riparian
12. Labbe

کنونی رودخانه را بیان می‌کند(رامز[1] و همکاران،۲۰۱۱: ۲۶۹). پلانفرم و مقدار مهاجرت رودخانه با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری و تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی توسط محققین بسیاری موردبررسی و اندازه‌گیری قرارگرفته است(نیکول[2]،۲۰۰۹: ۳۹). در برنامه‌ریزی هرگونه پروژه‌ای در امتداد رودخانه‌ها، آگاهی از اصول ژئومورفولوژی رودخانه‌ای و فرایندهای مجرا به محققان اجازه می‌دهد تا رابطه بین فرم و فرایند در چشم‌انداز را درک کنند. ارزیابی‌های ژئومورفیک عموماً شامل جمع‌آوری داده‌ها، بررسی‌های میدانی و ارزیابی پایداری مجرا است که مبنایی برای تحلیل و طراحی تشکیل می‌دهد(کارگروه بازسازی رودخانه[3]، ۲۰۰۱: ۲۶).

در خصوص پیشینه تحقیق منابعی غنی در دسترس می‌باشد. دانشمندان شاغل در سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده، مورفولوژی کوتاه‌مدت کانال‌های رودخانه را موردمطالعه قراردادند که ازجمله می‌توان به لانگبین[4]، لئوپلد[5] و ولمن[6] اشاره کرد. شوم[7]، موسلی[8] و ویور[9] سیستم‌های رودخانه‌ای را موردمطالعه قرار داده و آزمایشاتی را در محیط‌های آزمایشگاهی جهت مطالعه مورفولوژی رودخانه انجام دادند. آلن[10] کارهای گسترده‌ای در خصوص ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اشکال بستر و ساختمان‌های رسوبی با در نظر گرفتن دلتاها، مئاندرها و دشت‌های سیلابی انجام داده است. چورچ[11]، واربورتون[12] و هام[13] مطالعات گسترده‌ای را جهت کمی سازی تغییرات مجرا و دشت سیلابی با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام داده‌اند. همچنین در رابطه با مطالعات صورت گرفته داخلی بر روی مورفولوژی مجرای رودخانه می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد: روستایی و همکاران (۱۳۹۲) مورفولوژی مجرای رودخانه لیقوان را با روش طبقه‌بندی رزگن موردبررسی قراردادند. بر اساس نتایج آن‌ها رودخانه لیقوان، به‌جز چند بازه، در رده رودخانه‌های سینوسی جای می‌گیرد و بر اساس طبقه‌بندی رزگن، کل بازه‌ها دریکی از انواع E، C و B قرار می‌گیرند. رضائی‌مقدم و پیروزی‌نژاد (۱۳۹۳) به بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره در رودخانه گاماسیاب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سطوح فرسایش یافته در رودخانه گاماسیاب بیشتر از سطوح رسوب‌گذاری شده می‌باشد و این به دلیل جابجایی و تغییر مسیر رودخانه بوده است به‌طوری‌که رودخانه در بعضی از قسمت‌ها بیش از ۴۰۰ متر جابجایی داشته است. خطیبی و همکاران (۱۳۹۴) تغییرات زمانی و مکانی مجرای فعال رودخانه آجی چای را با استفاده از روش‌های تجربی موردبررسی قراردادند. نتایج تحقیق این محققان نشان داد که زمان جابجایی در تمامی طول مجرای رودخانه یکسان نبوده و در بخش‌هایی از مسیر، این زمان کوتاه‌تر از ۵ سال و در بخش‌هایی دیگر این زمان طولانی‌تر بوده است. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۶) میزان مهاجرت عرضی مجرای رودخانه ارس طی سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ با استفاده از روش ترانسکت موردبررسی قراردادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که میانگین مهاجرت جانبی مجرای رودخانه ارس ما بین سد خداآفرین و سد میل مغان در حدود ۴/۷۳ متر در سال بوده است. رضایی مقدم و همکاران(۱۳۹۶) مورفولوژی مجرای رودخانه قره‌سو را با استفاده از روش سلسله مراتبی رزگن مورد ارزیابی قراردادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اکثر مقاطع رودخانه قره‌سو در طبقه‌ی C و E مدل سلسله مراتبی رزگن قرارگرفته‌اند.

---

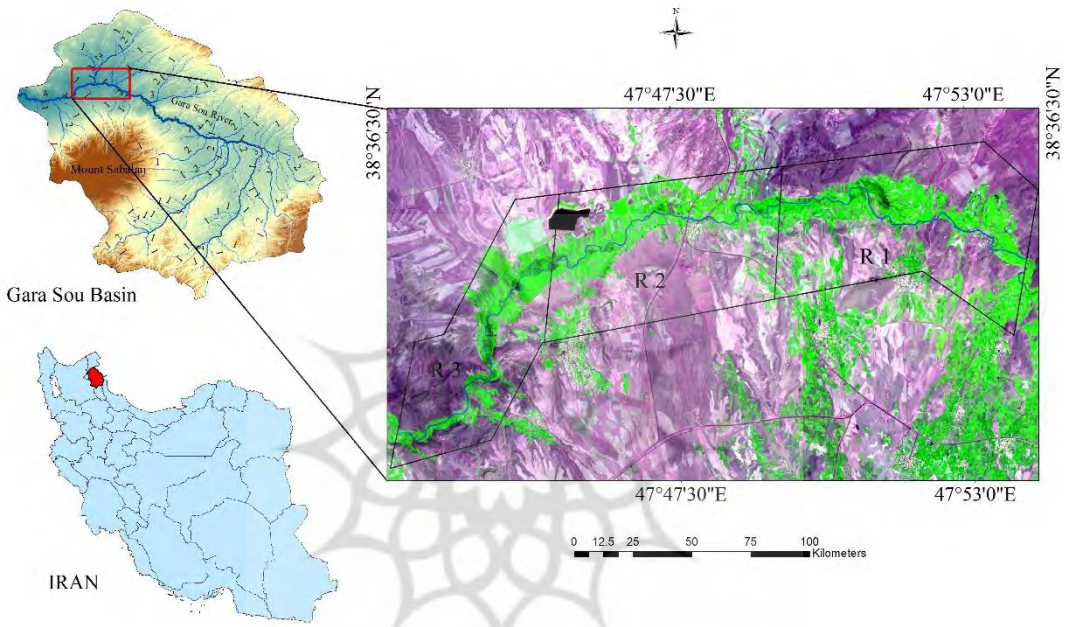
1 . Ramos
2 . Nicoll
3. The Federal Interagency Stream Restoration Working Group
4. W.B. Langbein
5. L.B. Leopold
6. M.G. Wolman
7. S.A. Schumm
8. M.P. Mosley
9. W.E. Weaver
10. J.R.L. Allen
11. Church
12 Warburton
13. Ham

خیری‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی تغییرات مجرای رودخانه زرینه‌رود را با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده افت چشمگیر دینامیک جانبی مجرا در طی ۱۵ سال گذشته بوده است. این محققان بیان نموده اند که شاخص‌های ژئومورفومتریکی برای بازه‌های پایاب سد نوروزلو نشان‌دهنده دینامیک بسیار پایین و تنگ‌شدگی مجرا در طی این بازه زمانی می‌باشد که دلیل اساسی این امر مربوط به کاهش شدید دبی رودخانه و فعالیت‌های انسانی بوده است. ولی پور و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی به برآورد نرخ جابجایی عرضی کانال رودخانه لاویج بر پایه سن سنجی درختان حاشیه رودخانه چمستان پرداختند. نتایج این محققان نشان‌داد که سن درختان با افزایش فاصله از کانال اصلی و افزایش تراز ارتفاعی سطوح نسبت به کانال فعال افزایش می‌یابد. جابه‌جایی کانال مرتبط با جریان‌هایی با دوره بازگشت طولانی‌تر است. درواقع دبی‌های استثنایی همزمان با سیلاب‌های نادر به‌طور موقت موجب کوتاه‌تر و عریض‌تر شدن کانال می‌شوند. یزدانی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی به ارزیابی ناپایدرای کانال رودخانه بیدواز اسفراین با استفاده از مدل جانسون پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که از سمت بالا دست رودخانه به سمت پایین دست، میزان فرسایش کناره‌ای و بستر افزایش می‌یابد. علت بالا بودن میزان فرسایش در قسمت پائین دست رودخانه، شیب زیاد کرانه کانال و عدم چسبندگی خاک آن بوده است. در میان ۱۳ پارامتر، برخی از پارامترها مانند فعالیت حوضه آبریز و دشت سیلابی و مشخصات آن (پارامتر۱) و حالت جریان (پارامتر۲) وجه مشترک ناپایداری در تمامی مقاطع بوده است. در مجموع، کانال های مربوط به مقاطع ۷، ۸ و ۹ دارای بیشترین آسیب پذیری هستند. حسینی و همکاران(۱۴۰۰) در پژوهشی با استفاده از روابط رگرسیونی شاخص مورفولوژی زاویه مرکزی را با پارامترهای چندفرکتالی الگوی تکامل پیچان‌رودی مورد مقایسه قرار داده اند. نتایج بررسی آنها نشان داد که در الگوی تکاملی بازه شماره ۱ رودخانه که دارای ریتم منظم تر قوس‌های متوالی نسبت به دو بازه دیگر یعنی بازه‌های ۲ و۳ بوده، تفاوت‌های چشمگیری در نتایج حاصله پدید آمد که همگی این‌ها نشانگر این است که همواره زاوایای مرکزی قوس‌ها در رودخانه از اهمیت بسزایی برخوردار هستند و در چگونگی نحوه شکل گیری آنها بسیار موثراند. در این پژوهش با به کارگیری شاخص‌های کمّی ژئومورفومتریکی تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره‌سو به طول ۳۱ کیلومتر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی مورداستفاده در این پژوهش، بینش مهمی را در زمینه نوع و چگونگی محاسبه میزان پایداری و تغییرات جانبی مجرا مشخص می‌کند. در واقع در این مقاله سعی خواهد شد، مفاهیمی چون: تغییرات جانبی مجرا، پایداری مجرا، تغییرات در عرض مجرا و مهاجرت مجرای رودخانه از هم تفکیک‌شده و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نحوه محاسبه‌ی هر یک از این شاخص‌ها به صورت کمی ارایه گردد. همچنین، از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به تلاش در جهت کمی‌سازی هر چه بیشتر مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، اشاره نمود.

منطقه موردمطالعه

رودخانه قره‌سو یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که از دامنه‌های شمالی کوه سبلان سرچشمه گرفته و پس از اتصال رودخانه اهر چای به‌عنوان رودخانه دره رود شناخته‌شده و در نزدیکی شهرستان اصلاندوز به رودخانه ارس ملحق می‌شود. منطقه موردمطالعه در بین عرض‌های′۵۶ °۳۸ ″۳۲ تا″۳۴ °۳۸ ′۳۴ شمالی و طول‌های ′۴۸ °۴۷ ′۴۳ تا″۲۱ °۴۷ ′۵۲ شرقی واقع‌شده است. از رودخانه‌های مهمی که قبل از پیوستن اهر چای به رودخانه قره‌سو می‌ریزند می‌توان به رودخانه‌های بالیخلی چای و خیاوچای اشاره کرد. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه رودخانه قره‌سو به ترتیب ۷۶۰ و ۴۷۸۱ متر بوده و متوسط ارتفاع حوضه نیز ۱۷۶۵ متر می‌باشد. همچنین متوسط شیب حوضه قره‌سو نیز ۱۳/۶۸ درصد اندازه‌گیری شده‌است. درواقع بخش عمده ناهمواری‌های حوضه رودخانه قره‌سو مربوط به ارتفاعات سبلان می‌باشد که در جنوب غرب حوضه قرارگرفته است. بخش دیگر ناهمواری‌های حوضه نیز مربوط به ارتفاعات باغرو داغ بوده که در قسمت جنوب شرق حوضه قره‌سو قرارگرفته است. در این محدوده رودخانه قره‌سو وارد دشت سیلابی شده و از روی آبرفت های جدید کواترنر (Qal)

عبور می‌کند. دامنه تغییرات بارش سالانه حوضه رودخانه قره‌سو بین ۲۹۹ تا ۴۰۲ میلی‌متر بوده است. همچنین بیشترین مقدار بارش دریافتی در ناحیه جنوبی حوضه مشاهده‌شده و مناطق شمالی دارای مقدار بارش کمتری نسبت به سایر نواحی است. منطقه موردمطالعه در این پژوهش جهت بررسی تغییرات مجرا بر اساس شاخص‌های ژئومورفومتریکی، بازه‌ای از این رودخانه است که از نزدیکی روستای قدیرلو شروع‌شده و در نزدیکی روستای لعل گنج به پایان می‌رسد. طول تقریبی رودخانه در این بازه ۳۱ کیلومتر می‌باشد. جهت بررسی دقیق‌تر، مجرای رودخانه قره‌سو بر اساس اثرات آنتروپوژنیک و تغییرات عرض دشت سیلابی به ۳ بازه تقسیم‌شده و سپس موردمطالعه قرار گرفت(شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه موردمطالعه در شمال غرب کشور

روش تحقیق

مهم‌ترین داده‌های مورداستفاده در این پژوهش عبارت‌اند از: نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس(۱:۲۰۰۰) شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای IRS سازمان جغرافیایی(با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ و ۵ متر) و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 2A (باقدرت تفکیک مکانی ۱۰متر) سازمان فضایی اروپا می‌باشد. نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش نیز شامل نرم‌افزارهای Sas Planet، ENVI، Arc GIS و افزونه‌ی Planform Statistics می‌باشد. همچنین باید اشاره کرد که مطالعات میدانی به‌عنوان پایه و اساس تمامی کارهای ژئومورفولوژیکی در این پژوهش نیز مورداستفاده قرارگرفته است. این مطالعات شامل مشاهدات میدانی از نحوه دخل و تصرف در بستر و حریم رودخانه قره‌سو توسط کشاورزان محلی و نیز جمع‌آوری نمونه‌های تعلیمی جهت استخراج دقیق نقشه کاربری اراضی حاشیه رودخانه می‌باشد. تغییرات جانبی[1] و پایداری جانبی[2] مجرای رودخانه از مهم‌ترین شاخص‌هایی می‌باشند که در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای موردبررسی قرار می‌گیرند. تغییرات جانبی به‌وسیله اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناری مجرا قابل‌محاسبه می‌باشد. شاخص پایداری مجرا نیز بر اساس محاسبه مقدار مساحت مجرای فعال تغییریافته و همچنین مقدار مساحت مجرای فعال تغییرنیافته در طول بازه زمانی

1. Lateral Mobility (Movement)
2. Lateral Stability

موردبررسی، قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد(ریچارد، ۲۰۰۱: ۱۰۸). تغییرات جانبی مجرا به دو بخش اصلی تغییرات در عرض رودخانه و مهاجرت مجرا تقسیم می‌گردد. چهار شاخص تغییرات جانبی با اندازه‌گیری تغییرات خط کناری کلی قابل‌محاسبه است. این چهار شاخص شامل: تغییرات در خط کناری کل[۱]، آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده[۲]، تغییرات در عرض رودخانه[۳] و مهاجرت واقعی[۴] می‌باشد. هر یک از این شاخص‌ها دید متفاوتی از جابجایی مجرای رودخانه را ارائه می‌دهند. نحوه محاسبه هر یک از این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشد(ریچارد، ۲۰۰۱: ۱۲۰-۱۱۰):

شاخص تغییرات خط کناری کل(E)

این شاخص با تقسیم مجموع جابجایی جانبی بیرونی‌ترین خط کناره راست و چپ رودخانه در طول بازه زمانی مشخص از طریق رابطه زیر قابل‌محاسبه می‌باشد:

$$E = \frac{\Delta r + \Delta l}{t_2 - t_1}$$ رابطه (۱)

در این فرمول $\Delta r(dr)$ تغییر جانبی بیرونی‌ترین خط کناره راست رودخانه، $\Delta l(dl)$ تغییر جانبی بیرونی‌ترین خط کناره چپ رودخانه، t_2 سال اول مساحی و t_1 سال دوم مساحی می‌باشد.

- شاخص آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده(N)

آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده به‌وسیله تقسیم متوسط تغییرات کناره راست و چپ رودخانه بر متوسط تغییرات مجرای فعال رودخانه در طول بازه زمانی موردمطالعه بر اساس رابطه زیر قابل‌محاسبه می‌باشد:

$$N = \frac{\left[\frac{(\Delta r + \Delta l)/2}{(W_1 + W_2)/2}\right]}{\Delta t} = \frac{\left[\frac{\Delta r + \Delta l}{W_1 + W_2}\right]}{\Delta t}, (\%\ width / year)$$ رابطه (۲)

در این فرمول t_1 و t_2 طول دوره زمانی مساحی شده، $\Delta r(dr)$ تغییرات جانبی بیرونی‌ترین خط کناره راست رودخانه، $\Delta l(dl)$ تغییرات جانبی بیرونی‌ترین خط کناره چپ رودخانه، W_1 عرض مجرای فعال رودخانه برای دوره زمانی اول و W_2 عرض مجرای فعال رودخانه برای دوره زمانی دوم می‌باشد. باید توجه داشت که تغییرات بالای اندازه‌گیری شده به‌وسیله شاخص E و N بیشتر از مقدار مهاجرت رودخانه در ارتباط با تغییرات در عرض مجرای رودخانه می‌باشد.

شاخص تغییرات در عرض رودخانه (dw)

دو روش اندازه‌گیری برای تغییرات در عرض رودخانه وجود دارد که شامل تغییر در عرض مجرای فعال[۵] و تغییر در عرض مجرای کل[۶] می‌باشد. عرض مجرای فعال شامل مجرای بدون پوشش گیاهی، پشته‌های نقطه‌ای میانی و جزایر میانی می‌باشد. شاخص تغییر در عرض مجرای فعال توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$dW_{act} = \frac{\Delta W_{act}}{\Delta t} = \frac{W_{act-2} - W_{act-1}}{t_2 - t_1}, (m / year)$$ رابطه (۳)

---

1. Total Bank Line Change
2. . Normalized Lateral Movement Rates
3. .Width Change
4. True Migration
5. Change in Active Channel Width
6. .Change in Total Channel Width

در این رابطه dw_{act} مقدار تغییرات در عرض مجرای فعال، t_1 و t_2 طول دوره مساحی، Δw_{act} تغییر کلی در عرض مجرای فعال، w_{act-1} عرض مجرای فعال در دوره زمانی اول و w_{act-2} عرض مجرای فعال در دوره زمانی دوم است. عرض مجرای کلی شامل مجرای همراه با پشته‌ها و جزایر میانی رودخانه بوده که از طریق محاسبه اختلاف بین تغییرات عرض مجرای کلی در طول دوره زمانی انتخاب‌شده بر اساس رابطه زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$dW_{tot} = \frac{\Delta W_{tot}}{\Delta t} = \frac{W_{tot-2} - W_{tot-1}}{t_2 - t_1}, (m / year)$$ رابطه (۴)

در این رابطه نیز dw_{tot} مقدار تغییرات در عرض مجرای اصلی، t_1 و t_2 طول دوره مساحی، Δw_{tot} تغییر در عرض مجرای اصلی، w_{tot-1} عرض مجرای اصلی در دوره زمانی اول و w_{tot-2} عرض مجرای اصلی در دوره زمانی دوم است. بر این اساس، ارزش منفی این دو شاخص، نشان‌دهنده تنگ‌شدگی مجرا و ارزش مثبت این دو شاخص نشان‌دهنده بازشدگی مجرا در طول دوره زمانی می‌باشد.

- شاخص آهنگ مهاجرت جانبی یا واقعی(M)

این شاخص از طریق تفریق شاخص عرض مجرای کل (dw_{tot}) از شاخص تغییرات خط کناری کل (E) بر اساس رابطه زیر اندازه‌گیری می‌شود:

را بطـه

$$M = \frac{\Delta r + \Delta l}{t_2 - t_1} - \left| \frac{W_{tot-2} - W_{tot-1}}{t_2 - t_1} \right| = E - |dW_{tot}|, (m / year)$$

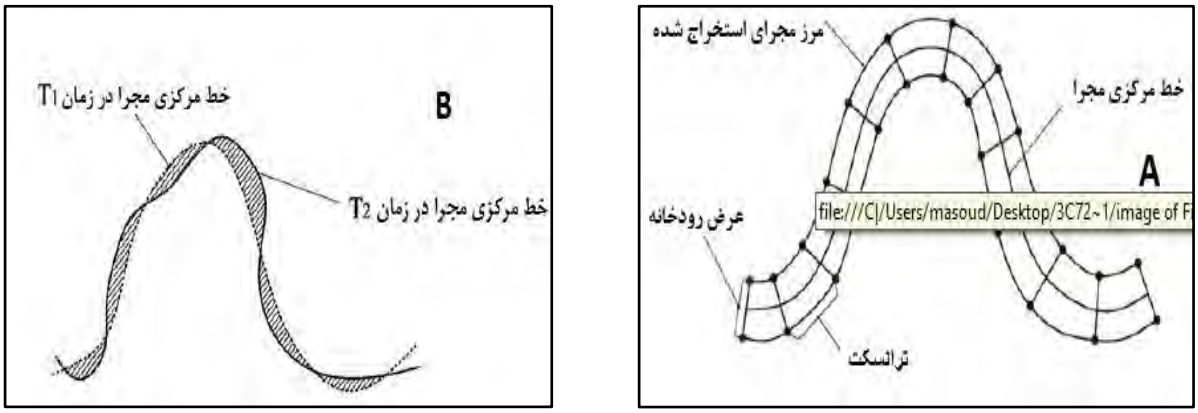
(۵)

در این رابطه M مقدار مهاجرت مجرای رودخانه، t_1 و t_2 دوره زمانی مساحی شده، w_{tot-1} عرض مجرای کلی در بازه زمانی اول و w_{tot-2} عرض مجرای کلی در بازه زمانی دوم می‌باشد. همچنین برای محاسبه آهنگ مهاجرت مجرا می‌توان از روش دیگری که توسط شیلدز[1] و همکاران ارائه‌شده استفاده کرد (شکل ۲). این روش با استفاده از رابطه زیر قابل‌محاسبه می‌باشد(گیاردینو[2] و همکاران،۲۰۱۱: ۸ ؛ شیلدز[3] و همکاران، ۲۰۰۰: ۵۴-۶۶):

$$Rm = (A / L) / y$$ رابطه(۶)

که در آن: Rm آهنگ مهاجرت؛ A مساحت موجود بین دو خط مرکزی مجرا؛ L طول خط مرکزی مجرا در زمان $t1$؛ و y تعداد سال می‌باشد. در این زمینه، برای افزایش دقت کار در رابطه با محاسبه خط مرکزی مجرا و سایر محاسبات از افزونه[4]Planform Statistics کمک گرفته شد.

1. Shields
2. Giardino
3. Shields
4. Add In



شکل ۲: (a) نحوه درون‌یابی خط مرکزی مجرای رودخانه، (b) نحوه استخراج آهنگ مهاجرت رودخانه (ماگدالنو،۲۰۱۱: ۲۰۰)

-شاخص پایداری جانبی مجرا

پایداری جانبی مجرا بر اساس تغییر در مجرای فعال بدون پوشش گیاهی رودخانه در طول بازه زمانی موردمطالعه، محاسبه می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر شاخص پایداری جانبی[1]، از طریق تقسیم مساحت مجرای فعال تغییرنیافته[2] به مساحت مجرای فعال پیشین[3] قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد.

$$\text{Lateral Stability Index}=\frac{\text{Unchanged Active Channel Area}}{\text{Previous Active Channel Area}}$$ رابطه (۷)

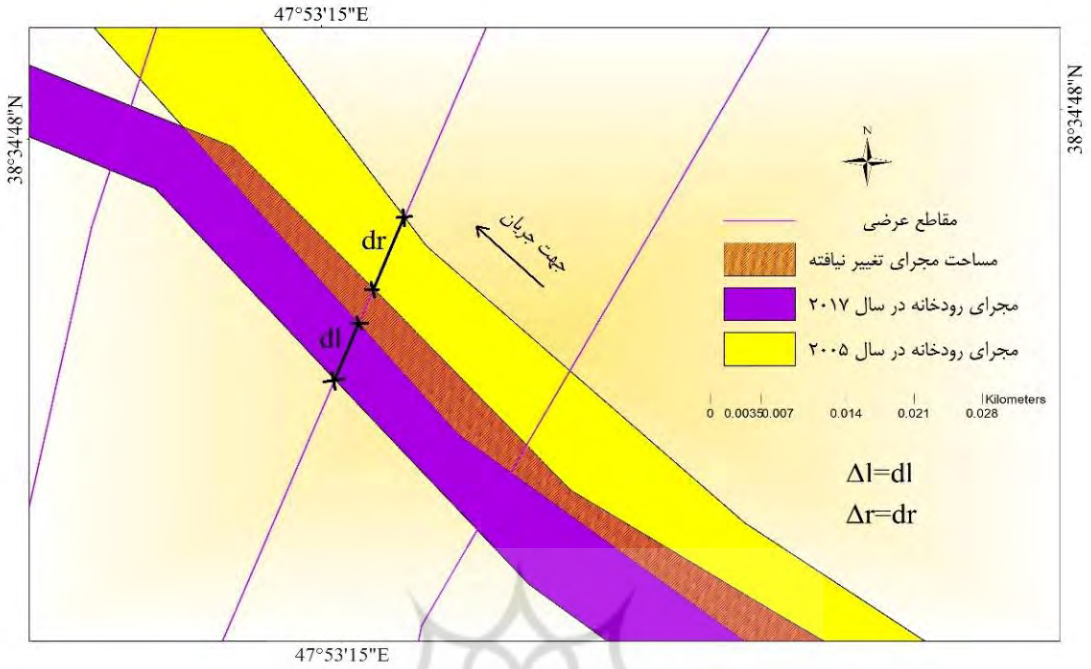
عدد خروجی این شاخص هرچقدر به واحد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عدم‌تغییر و هرچقدر به واحد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تغییر در بازه زمانی موردمطالعه می‌باشد. هر یک از این شاخص‌های اشاره‌شده در بالا اطلاعات زیادی را درباره چگونگی تغییرات و پایداری جانبی مجرای رودخانه در اختیار قرار می‌دهد که به‌راحتی به‌وسیله تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با دقت بالا قابل‌اندازه‌گیری می‌باشند.

بحث و یافته‌ها

جهت اندازه‌گیری دینامیک عرضی مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. بدین منظور ۲۷۱ مقطع عرضی بر روی ۳۱ کیلومتر از مجرای رودخانه قره‌سو ترسیم شده و مقدار هر یک از شاخص‌های ژئومورفومتریکی برای تک‌تک مقاطع عرضی جداگانه محاسبه گردید. در رابطه با جابجایی جانبی مجرای رودخانه‌ها، مخصوصاً نرخ مهاجرت جانبی مجرا، روش‌ها و شاخص‌های مختلفی با مبنای محاسباتی متفاوت وجود دارد. آهنگ حرکت جانبی مجرای رودخانه از طریق اندازه‌گیری حرکت کناره‌های چپ و راست مجرا در طول خطوط انباشت/کاوش در طی دوره زمانی مطالعاتی محاسبه شد. هر معیار یا سنجه حرکت جانبی، ویژگی‌های مختلفی از نحوه حرکت مجرا را آشکار می‌سازند. شاخص حرکت کل کناره مجرا (E) ترکیبی از تغییرات عرض و مهاجرت جانبی مجرای رودخانه است. شاخص (E) میانگین نبوده بلکه درواقع مجموع تغییرات خط کناره رودخانه را نشان می‌دهد، ازاین‌رو مقدار این شاخص دو برابر مقدار نرخ مهاجرت در سایر مطالعات می‌باشد. مقدار شاخص(E) بر اساس رابطه (۱) برای بازه اول ۰/۸۶، برای بازه دوم ۱ و برای بازه سوم ۰/۸۹ محاسبه‌شده است. مقدار بالای شاخص (E) با تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو قابل توجیه است. بدین‌صورت که در طی تنگ‌شدگی مجرا، کناره‌های رودخانه تغییرات زیادی داشته و این باعث افزایش مقدار شاخص (E) در هر سه بازه علی‌الخصوص بازه دوم شده است(شکل۳).

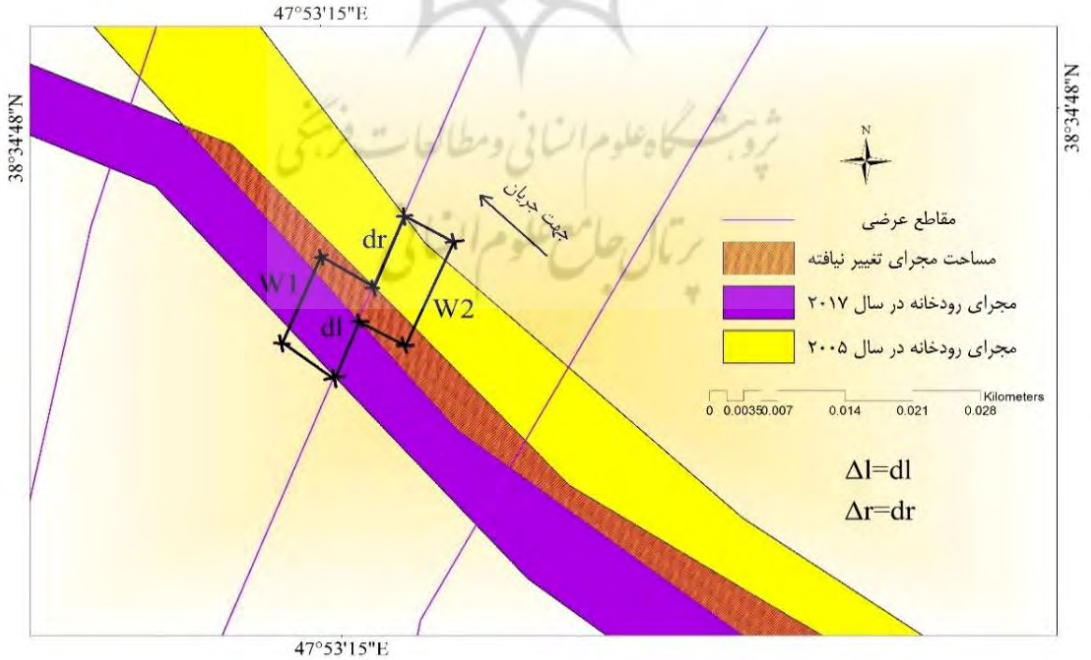
---

[1]. Lateral Stability Index
[2] .Unchanged Active Channel Area
[3]. Previous Active Channel Area



شکل۳: نحوه محاسبه شاخص تغییرات خط کناری کل (E) در نرم‌افزار Arc GIS

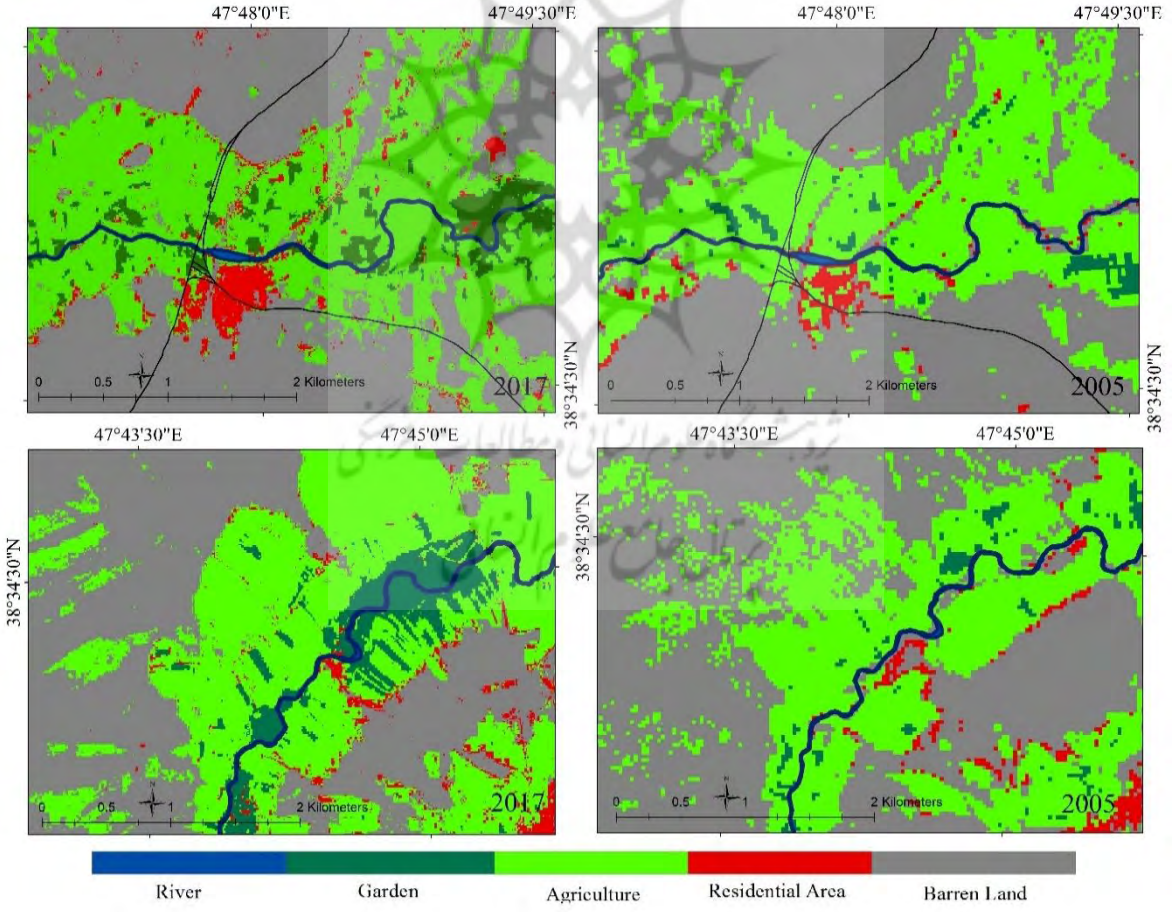
شاخص آهنگ حرکت جانبی نرمال شده (N) تغییرات عرض و مهاجرت جانبی را ترکیب کرده و برای اندازه رودخانه، نرمالیزه می‌سازد. این شاخص برای هر نوع رودخانه قابل‌محاسبه می‌باشد. میانگین نتایج به‌دست‌آمده از این شاخص بر اساس رابطه (۲) برای بازه اول ۰/۰۴۸ درصد، برای بازه دوم ۰/۲ درصد و برای بازه سوم ۰/۰۵۷ درصد محاسبه‌شده است(شکل۴).



شکل۴: نحوه محاسبه شاخص آهنگ حرکت جانبی نرمال شده (N) در نرم‌افزار Arc GIS

عرض مجرای رودخانه شامل عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل می‌باشد. عرض مجرای فعال، پشته‌ها یا جزایر داخل مجرا را شامل نمی‌شود و به‌عنوان معرف مجرای شکل‌گرفته توسط رژیم غالب رسوب و آب در نظر گرفته می‌شود.

تغییر در عرض مجرای فعال رودخانه درواقع حرکت مجرا به سمت تعادل عرضی را نشان می‌دهد. عرض مجرای کل، پشته‌ها و جزایر داخل مجرا را شامل می‌شود. برای یک رودخانه‌ای با الگوی مئاندری تک مجرایی (تک شاخه‌ای) همچون بیشتر قسمت‌های رودخانه قره‌سو، عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل برابر می‌باشند. بنابراین در این تحقیق نتایج به‌دست‌آمده از شاخص (dw_{act}) با نتایج به‌دست‌آمده از شاخص (dw_{tot}) کاملاً یکسان می‌باشد. میانگین شاخص تغییر عرض کانال فعال(dw_{act}) برای بازه اول ۰/۵-، برای بازه دوم۰/۶۷- و برای بازه سوم۰/۵۱- محاسبه‌شده است. با توجه به این‌که مقدار منفی این شاخص نشان‌دهنده تنگ‌شدگی مجرا و مقدار مثبت آن نیز نشان‌دهنده بازشدگی (عریض شدگی) مجرا می‌باشد، مجرای رودخانه قره‌سو در هر سه بازه موردبررسی در طی ۱۲ سال گذشته (۲۰۰۵-۲۰۱۷) دچار فرایند انباشت و پرشدگی شده و تنگ‌شدگی مجرا اتفاق افتاده است. انجام فعالیت‌های کشاورزی در اطراف رودخانه قره‌سو و دست‌اندازی در بستر و حریم رودخانه و به‌تبع آن کانالیزه کردن مجرای رودخانه، منجر به تنگ‌تر شدن مجرای رودخانه و تسریع در آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور در هنگام وقوع سیلاب می‌شود. دراین‌باره باید افزود که باوجود احداث سد سبلان با توجه به تلاقی رودخانه‌های مهمی چون خیاوچای، قطورچای، آلنی‌چای و رودخانه چای‌لاغ در پایین‌دست سد سبلان که اغلب همراه با رژیم سیلابی به‌ویژه در فصل بهار می‌باشند، بخش وسیعی از رودخانه قره‌سو هنوز تحت تأثیر مخاطره سیلاب قرار دارد(شکل۵).



شکل۵: تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو در اثر توسعه اراضی کشاورزی در بخش بستر و حریم رودخانه(بازه دوم و سوم)

روش‌های مختلفی جهت محاسبه آهنگ مهاجرت رودخانه توسط محققان مختلف ارائه‌شده است. یکی از اندازه‌گیری‌های مهم در مقدار مهاجرت مجرای رودخانه مقایسه تغییرات خط مرکزی کانال است که بر پایه اندازه‌گیری میزان جابجایی خط

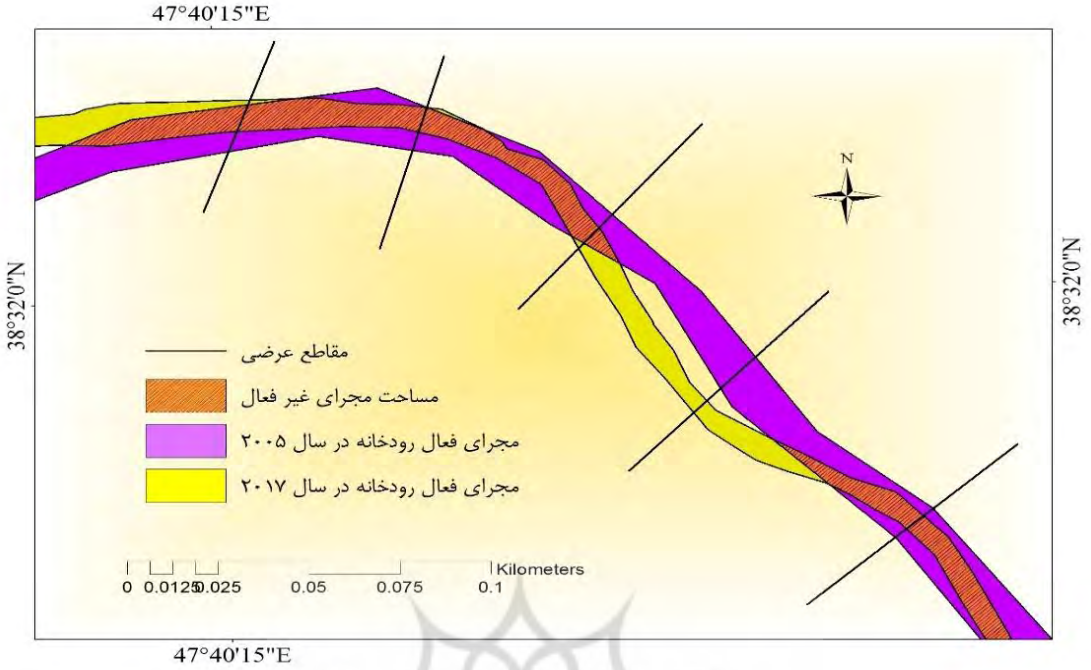
مرکزی کانال صورت می‌گیرد(شیلدز[1] و همکاران، ۲۰۰۰؛ هوک[2]،۱۹۷۷؛ مکدونالد[3]،۱۹۹۱). در این تحقیق مقدار مهاجرت مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی برای هر یک از مقاطع عرضی محاسبه شد. میزان مهاجرت عرضی مجرای رودخانه به مقاومت کناره‌های مستعد به فرسایش، مدت و بزرگی جریان و شعاع انحنای مجرا و نیز توانایی جریان در انتقال رسوب بستگی دارد. چنان چه مقدار شاخص حرکت کل کناره مجرا (E) را از مقدار شاخص تغییر عرض کانال فعال (dw_{act}) کم کنیم، شاخص دیگری به نام شاخص آهنگ مهاجرت واقعی (M) قابل‌محاسبه می‌باشد. میانگین شاخص مهاجرت واقعی (M) با استفاده از رابطه (۵) برای بازه اول ۰/۳۶ متر در سال، برای بازه دوم ۰/۳۳ متر در سال و برای بازه سوم ۰/۳۹ متر در سال اندازه‌گیری شده است. همچنین نتایج بررسی میزان آهنگ مهاجرت رودخانه قره‌سو با استفاده از روش اندازه‌گیری میزان جابجایی خط مرکزی مجرا (رابطه ۶) نشان داد که در طول ۱۲ سال اخیر در بازه اول، میزان آهنگ مهاجرت رودخانه ۰/۴۷متر در سال، بازه دوم۰/۵۴ متر در سال و بازه سوم ۰/۴۶متر در سال بوده است. مقایسه مقدار هر دو روش محاسبه میزان آهنگ مهاجرت رودخانه نشان می‌دهد که نتایج هر دو روش به هم خیلی نزدیک بوده و هر دو روش، مقدار پایینی از مهاجرت مجرا را برای رودخانه قره‌سو نشان می‌دهد. کاهش دبی رودخانه بر اثر احداث سد سبلان در بالادست رودخانه و به‌تبع آن دخل و تصرف‌های انسانی در بستر و حریم مجرای رودخانه قره‌سو در طی ۱۲ سال اخیر سبب شده است که مقدار مهاجرت مجرای رودخانه در هر سه بازه موردمطالعه عددی پایینی را به خود اختصاص دهد.

شاخص پایداری جانبی

شاخص پایداری جانبی با اندازه‌گیری مقدار مساحت مجرای فعال تغییرنیافته و نیز مقدار مساحت مجرای فعال قبلی قابل‌محاسبه می‌باشد. مقدار نزدیک به عدد ۱ شاخص پایداری جانبی نشان می‌دهد که مجرا تحرکی نداشته و نسبتاً پایدار بوده و نیز مقدار کوچک‌تر این شاخص نشان‌دهنده‌ی تغییر موقعیت مجرای فعال رودخانه می‌باشد. بر اساس فرمول شاخص پایداری، میزان پایداری جانبی بازه‌های انتخابی رودخانه قره‌سو نیز محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد که میزان شاخص پایداری جانبی برای بازه ، بازه اول ۰/۳، بازه دوم ۰/۲۱، بازه سوم ۰/۲۲ می‌باشد. مقدار پایین شاخص پایداری بازه‌های مختلف رودخانه قره‌سو با توجه به آهنگ مهاجرت پایین آن نشان‌دهنده میزان پایین مساحت مجرای فعال تغییرنیافته در طول دوره موردبررسی می‌باشد که علت آن نیز تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو بوده است(شکل۶).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[1]. Shields
[2] . Hooke
[3]. Macdonald



شکل۶: نحوه محاسبه شاخص پایداری جانبی رودخانه قره‌سو در بخشی از بازه پنجم

تأثیر احداث سد سبلان بر مورفولوژی پایین‌دست رودخانه قره‌سو

به‌طورکلی احداث سد سبلان بر روی رودخانه قره‌سو به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم مورفولوژی مجرای رودخانه را تحت تأثیر قرار داده است. در بررسی نقش مستقیم سد سبلان بر مورفولوژی پایین‌دست سد، می‌توان گفت که با احداث سد سبلان، هرچند کاهش جریانات لب‌پری و لب‌ریزی و به‌تبع آن جریانات مؤثر، به‌عنوان دبی‌های شکل‌دهنده مجرا، باعث کاهش دینامیک جانبی مجرای رودخانه شده است. اما همین امر، مجموعه‌ای از تغییرات مورفولوژیکی، به‌ویژه به‌صورت تغییر الگوی رودخانه، کاهش مساحت سطح مقطع عرضی، تثبیت پشته‌های کناری و میانی و نیز کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا، را به همراه داشته است. الگوی برداری مستخرج از بررسی تصاویر ماهواره‌ای 1RS باقدرت تفکیک ۲/۵ متر برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۷ (قبل و بعد از احداث سد) نشان داد که مجرای رودخانه قره‌سو در اکثر بازه‌های موردمطالعه دچار تنگ‌شدگی شده است. همچنین، به‌صورت غیرمستقیم، وجود سد سبلان و اندازه حجم مخزن آن سبب افزایش تجاوزات به حریم و بستر اصلی جریان شده و ایمنی کاذبی برای پائین‌دست سد ایجاد کرده است. درواقع با احداث سد سبلان بخش وسیعی از اراضی حریم و بستر رودخانه قره‌سو (به‌ویژه پشته‌های کناری خم رودخانه) توسط کشاورزان منطقه به کاربری کشاورزی تبدیل‌شده که یکی از عوامل اصلی در تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو به شمار می‌آید(شکل۷).

شکل۷: تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو در اثر کشت محصولات کشاورزی در محدوده بستر و حریم رودخانه قره‌سو

رودخانه قره‌سو در محدوده موردمطالعه وارد دشت‌سیلابی شده که عمده رسوبات کناری آن را رسوبات چسبناک از نوع رس و سیلت تشکیل می‌دهد. الگوی رودخانه قره‌سو بر روی این دشت‌سیلابی تک‌مجرایی می‌باشد. همچنین بررسی تغییرات تاریخی مجرای رودخانه در طی ۱۲ سال اخیر نشان دهنده تنگ‌شدگی کلی مجرا می باشد. کنترل جریان پایه توسط سد سبلان باعث رشد گیاهان و تثبیت پشته‌های رسوبی موجود در بستر و کناره های رودخانه قره‌سو شده است. اکثر قسمت‌های دشت‌سیلابی قره‌سو زیر کشت محصولات کشاورزی بوده و در بخش های زیادی شاهد دست‌اندازی‌های کشاورزان در قسمت بستر و حریم رودخانه و تغییر کاربری هستیم. تعداد طبقات کاربری اراضی موجود در منطقه موردمطالعه شامل: رودخانه و پهنه‌های آبی، کاربری مناطق مسکونی، کاربری بایر، کاربری باغ و درختچه و کاربری زراعت می باشد. بررسی تغییرات پوشش کاربری اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ حاکی از آن است که در این فاصله مساحت هر چهار کاربری زراعت، کاربری باغ و درختچه، کاربری مسکونی، کاربری رودخانه و پهنه‌های آبی افزایش‌یافته و به‌تبع آن از مساحت کاربری بایر در منطقه کاسته شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پایداری و تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره‌سو به طول ۳۱ کیلومتر، با استفاده از شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی و مطالعات میدانی موردبررسی قرار گرفت. شاخص‌های ژئومورفومتریکی مورداستفاده در این تحقیق، بینش مهمی را در زمینه نوع و چگونگی محاسبه میزان پایداری و تغییرات جانبی مجرا مشخص کرد. تمامی این شاخص‌های کمی با استفاده از ایجاد یک ژئودیتابیس[1] و ترکیب توابع مختلف GIS با دقت بالا برای مجرای رودخانه در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۱۷ محاسبه گردید. در این تحقیق تغییرات جانبی مجرا به دو بخش اصلی: تغییرات در عرض رودخانه و مهاجرت مجرا تقسیم گردید. چهار شاخص تغییرات جانبی شامل: تغییرات در خط کناری کل(E)، آهنگ تغییرات جانبی نرمال شده(N)، تغییرات در عرض رودخانه (dw) و مهاجرت واقعی (M) با اندازه‌گیری تغییرات خط کناری کلی محاسبه شد. تحرک بالا در میزان شاخص (E) و شاخص (N) در ارتباط با مهاجرت واقعی مجرا نبوده بلکه دارای ارتباط قوی با تغییرات زیاد در عرض مجرا می‌باشد. نتایج بررسی شاخص‌های تغییرات جانبی مجرای رودخانه قره‌سو نشان‌دهنده‌ی مقدار بالای شاخص (E) و مقدار پایین شاخص(M) می‌باشد که دلیل آن تغییرات در عرض مجرای رودخانه (تنگ‌شدگی مجرا) قره‌سو در طی ۱۲ سال اخیر بوده است. درواقع در اثر احداث سد سبلان و تجاوز به بستر و حریم رودخانه مقدار مهاجرت عرضی رودخانه قره‌سو کم شده و در عوض مقدار شاخص (E) عدد بالایی را برای هر سه بازه موردمطالعه نشان می‌دهد.

[1] .Geodatabase

آهنگ مهاجرت مجرای رودخانه قره‌سو بر اساس دو روش مختلف اندازه‌گیری شد. روش اول شاخص آهنگ مهاجرت واقعی (M) بود که از تفاضل شاخص عرض مجرای کل (dw_{tot}) و شاخص تغییرات خط کناری کل (E) محاسبه گردید. شاخص دیگر مورداستفاده، شاخص ارائه‌شده توسط شیلدز و همکاران بود که از نسبت مساحت موجود بین دو خط مرکزی مجرا بر طول خط مرکزی مجرا، برای رودخانه قره‌سو اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش (رابطه ۵ و ۶) مقادیر بسیار پایینی از آهنگ مهاجرت را برای هر سه بازه نشان داد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار پایین شاخص پایداری جانبی مجرای رودخانه قره‌سو در هر سه بازه موردمطالعه، نشان‌دهنده مقدار پایین مساحت مجرای تغییرنیافته به دلیل کاهش مساحت مجرای رودخانه قره‌سو در سال ۲۰۱۷ (تنگ‌شدگی مجرا) می‌باشد. همچنین نتایج مقایسه میزان تغییرات جانبی در سه بازه انتخابی نشان داد که بازه دوم دارای بیشترین تغییرات جانبی مجرا بوده و بعدازآن بازه‌های اول و سوم در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. به‌عبارت‌دیگر در بازه دوم با توجه به تأثیر حداکثری عوامل آنتروپوژنیک[1] (تجاوز به بستر و حریم رودخانه) شاخص تغییرات جانبی بیشترین مقدار و شاخص پایداری جانبی نیز کمترین مقدار را از خود نشان داده است. نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی در طی ۱۲ سال گذشته یک‌روند افزایشی در تراکم کاربری زراعت و باغ و درختچه را در منطقه رودکنار و دشت‌سیلابی رودخانه قره‌سو نشان می‌دهد. درواقع به علت احداث سد سبلان و به‌تبع آن کاهش دبی، کاربری اراضی پایین‌دست سد دچار تغییرات بسیار زیادی شده‌است. کشاورزان منطقه با افزایش فعالیت‌های کشاورزی همچون زارعت و باغداری، بستر و حریم رودخانه قره‌سو را مورد دست اندازی قرار داده‌اند. دست‌اندازی به بستر و حریم رودخانه قره‌سو، علاوه بر مشکلات و تنش‌های اجتماعی ناشی از آن، به دلیل کاستن عرض مجرا، سبب کاهش ظرفیت انتقالی جریانات سیلابی برای سیلاب‌های با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال شده است. با توجه به بازدیدهای میدانی صورت گرفته دخل و تصرفات حتی به داخل مجرای اصلی رودخانه نیز رسیده و تلاش برای افزایش سطح زمین‌های کشاورزی، باعث کاهش عرض مجرای رودخانه شده و این به معنی افزایش ریسک خطرات ناشی از سیلاب‌های بزرگ می‌باشد. در واقع با توجه به تلاقی رودخانه‌های مهمی چون قطورچای، آلنی چای و رودخانه چای لاغ در پایین‌دست سد سبلان که اغلب همراه با رژیم سیلابی به‌ویژه در فصل بهار می‌باشند، بخش وسیعی از رودخانه قره‌سو هنوز تحت تأثیر مخاطره سیلاب قرار دارد. با توجه به این که در مدیریت رودخانه، مطالعات ژئومورفولوژیکی مقدم بر اقدامات مهندسی می باشد، تمامی اقدامات برنامه‌ریزی شده در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست دشت های سیلابی جهت جلوگیری و کاهش خسارات ناشی از دخل و تصرف در بستر و حریم رودخانه و تغییر کاربری اراضی به عنوان مدیریت مخاطرات سیلابی شناخته می‌شود که عموما به صورت تعدیل و تغییر فیزیکی در قسمت مجرا و دشت سیلابی رودخانه انجام می‌پذیرد. امروزه با توجه به اهمیت روزافزون مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، استفاده از شاخص‌های کمی ژئومورفومتریکی می‌تواند دید جامع و دقیقی نسبت به تغییرات جانبی مجرای رودخانه ارائه داده و در پژوهش‌های مدیریت دشت‌های سیلابی مورداستفاده تصمیم گیران و محققین قرار گیرد.

منابع

- اسفندیاری، ف.، رحیمی، م.، رحیمی، م.،۱۳۹۶. تحلیل میزان مهاجرت عرضی مجرای رودخانه ارس با استفاده از روش ترانسکت در طی سال‌های ۱۹۸۷ الی ۲۰۰۶ از سد خداآفرین تا سد میل مغان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۵، شماره ۴، صص ۵۸-۴۱.
- حسینی، ع.، فتاحی، م.،۱۴۰۰. بررسی مقایسه ای شاخص مورفولوژی زاویه مرکزی(A) با پارامترهای چند فرکتالی الگوی تکامل پیچان رودها با استفاده از روابط رگرسیونی (مطالعه موردی: رودخانه قره آقاج در استان فارس)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دوره ۹، شماره ۴، صص ۱۱۱-۹۶.

[1] .Anthropogenic

- خطیبی، م.،۱۳۹۴. بررسی تغییرات زمانی و مکانی کانال فعال در مسیر پیچان دار با استفاده از روش‌های تجربی و با استناد به لایه‌بندی رسوبات کناری، (مطالعه موردی: مسیر پیچان دار آجی چای)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. دوره ۲۶، شماره ۲، صص۶۵-۴۹.
- خیری زاده، م.، رضایی مقدم، م.، رجبی، م.، دانش فراز، ر.، ۱۳۹۶. تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه‌رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۵، شماره ۴، صص ۱۰۲-۷۶.
- رضایی مقدم، م.، پیروزی نژاد، ن.،۱۳۹۳. بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، جغرافیا و برنامه‌ریزی. دوره ۱۸، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- رضایی مقدم، م.، نیکجو، م.، یاسی، م.، رحیمی،م.،۱۳۹۶. تحلیل ژئومورفولوژیکی مجرای رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل سلسه‌مراتبی رزگن(پایین‌دست سد سبلان تا تلاقی رودخانه اهر چای)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۶، شماره ۲، صص ۱۴-۱.
- روستایی، ش.، خورشید دوست، ع.، خالقی، س.، ۱۳۹۲. ارزیابی مورفولوژی مجرای رودخانه لیقوان با روش طبقه‌بندی راسگن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دوره ۱، شماره ۴، صص ۱۶-۱.
- ولی پور، ط.، حسین زاده، محمد.، اسماعیلی.، بیرانوند، س.، ۱۳۹۹. برآورد نرخ جابجایی عرضی کانال رودخانه لاویج بر پایه سن سنجی درختان حاشیه رودخانه چمستان، مازندران، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دوره ۹، شماره ۲، صص ۵۹-۴۴.
- یزدانی، ت.، بهرامی، ش.، حسین زاده، م.، ۱۳۹۹. ارزیابی ناپایدرای کانال رودخانه بیدواز اسفراین با استفاده از مدل جانسون، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دوره ۹، شماره ۳، صص ۴۹-۳۴.
- *Charlton, Rosemary (2008). Fundamental of fluvial geo morphology, first edition, Routledge, London and New York.*
- *Gaeuman, D., Schmidt, J. C., & Wilcock, P. R. (2005). Complex channel responses to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah. Geomorphology, 64(3-4), 185-206.*
- *Ghoshal, S., James, L. A., Singer, M. B., & Aalto, R. Channel and floodplain change analysis over a 100-year period: Lower Yuba River, California. Remote Sens. 2, 1797–1825 (2010). Gilbert, GK: Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada.*
- *Giardino, John R and Lee, Adam A. (2011). Rates of channel migration on the Brazos River. Submitted to the Texas Water Development Board. Department of Geology & Geophysics, Texas A & M University.*
- *Ham, D.G.; Church, M. Bed material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, BC. Earth Surf. Process. Landf. (2000), 25, 1123-l142.*
- *Kondolf, G. Mathias & Piegay, Herve. (2003). Tools in fluvial geomorphology. John Wiley & Sons Ltd. 688 P.*
- *Labbe, J. M., Hadley, K. S., Schipper, A. M., Leuven, R. S., & Gardiner, C. P. (2011). Influence of bank materials, bed sediment, and riparian vegetation on channel form alongia gravel-to-sanditransition reach of the Upper Tualatin River, Oregon, USA. Geomorphology, 125(3), 374-382.*
- *Magdaleno, F., & Fernández-Yuste, J. A. (2011). Meander dynamics in a changing river corridor. Geomorphology, 130(3-4), 197-207.*

- *Nicoll, T. J., & Hickin, E. J. (2010). Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian prairies. Geomorphology, 116(1-2), 37-47.*
- *Ramos, J., & Gracia, J. (2012). Spatial–temporal fluvial morphology analysis in the Quelite River: It's impact on communication systems. Journal of hydrology, 412, 269-278.*
- *Richard, Gigi A. (2001). Quantification and prediction of lateral channel adjustmet ts downstream from Cochiti Dam, Rio Grande, NM. Dissertation In partial fulfillment of the requirements For the Degree of Doctor of Philosophy, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 229p.*
- *Richard, Gigi. A; Julien, Pierre. Y; Baird, Drew. C. (2005). Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico. Geomorphology, Vol. 71, pp. 139-155.*
- *Schumm, Stanley A. (2005). River variability and complexity. Cambridge University Press. 220p.*
- *Shields, F. Douglas., Simon, Andrew, Steffen, Lyle J. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration. Environmental Conservation, Vol. 27, No. 1, pp. 54–66.*
- *Surian, N., & Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology, 50(4), 307-326.*
- *Tealdi, S., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2011). Long-term morphological river response to hydrological changesmAdvances in water resources, 34(12), 1643-1655.*
- *The Federal Interagencys Stream Restorati Workingt Group. (2001). Stream corridory restoration: principles, processes, and practices. USDA-Natural Resources Conservation Service.*
- *Warburton, J.; Danks, M.; Wishart, D. Stability of an upland gravel-bed stream, Swinhope Burn, Northern England. Catena (2002), 49, 309-329.*
- *Winterbottom, S. J. (2000). Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay anduTmmel, Scotland. Geomorphology, 34(3-4), 195-208A*