Investigating the Lateral Movement of Aras River from 2000-2014 (15 km away from West of Aslanduz City to Exit of the River in Iran's Border)

Rivers through production, movement and storage of sediments are one of the most important factors that are modifii gg the earth s srr face. Historically, some rivers selected as the bonnaary lines between the countries and have acquired additional importance. Rivers channel, particularly alluvial bed rivers are continuously changing and this can cause many problems. In this study, lateral movement of the Aras River, 15 km away from west of Aslanduz city to exit of the river in Ira s boreer, are ivvesti.. ted in too time eerioss, 0000 0nd ..... Tii s rieer has a rr. at importance in relation to water supply in the northwestern parts of the country. Moreover, in the large distances, forms Iran boundary line with the countries of Armenia and Azerbaijan. Therefore, research on the lateral changes of river becomes necessary. Topographic maps with scale of 1: 50,000, digital elevation model (DEM) with 27 m resolution, and satellite imagery (Landsat 7 ETM+ satellite sensor& Landsat 8 OLI satellite sensor) are most important materials in this research. Studied channel reach of Aras River for two time periods, 2000 and 2014 were extracted by processing satellite images. Then, channel based on morphology and changes trend was divided into 21 transects, and quantitative indicators were calculated for each transect. To analyze the river plan form, were used central angle and sinuosity coefficient. Finally, the average of channel migration rate was calculated during the past 14 years. Comparison of the central angle and sinuosity coefficient values of the river channel within each transect for the periods 2000 and 2014 represents an increasing trend for most of the transects, which indicates river meanders are active. In fact, large quantities and unusual migration rate in some transects related to the avulsion. Most likely, the avulsion caused by the river flooding, especially in the spring and disturbances due to the confluences. In some cases, combined these factors associated with interventions variables such as effects of confluences has caused the channel movement is very significant, and the unusual. Finally, it can be said that although channels have been changed continuously by lateral migration, cutoffs, and avulsion, But in 2014 compared to 2000, little change has occurred in the channel platform, and decrease or increase the number of bends, central angle and sinuosity coefficient are the result of natural function of meandering rivers. Therefore, the study river is close to dynamic equilibrium.

Keywords: Morphology, Channel, Lateral Migration, Meander, Avulsion, Aras River.

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, *Ph.D., Professor of Geomorphology, Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz.*

Mansour Keirizadeh, *Ph.D., Graduated from Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz*

Masoud Rahimi, *Ph.D. Student, Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz*

جغرافیـــا و برنامـــه‌ریـــزی محیطـــی
سـال ۲۷، پیـاپی ٦۳، شـماره ۳، پـاییز ۱۳۹۵

بررسی جابه‌جایی جانبی مجرای رودخانهٔ ارس از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ (از ۱۵ کیلومتری غرب شهر اصلاندوز تا خروج رودخانه از محدودهٔ سیاسی ایران)

محمدحسین رضائی‌مقدم*: استاد ژئومورفولوژی دانشکدهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، **تبریز، ایران**
منصور خیری‌زاده آروق: دانش‌آموختهٔ دکترای ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایرن
مسعود رحیمی:دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

وصـول: ۱۳۹۳/۱۰/۲۵ پـذیرش: ۱۳۹٤/۳/۱۹ ، صص ۳۲- ۱۵

چکیده

رودخانه‌ها به‌دلیل برداشت، انتقال و نهشته‌گذاری رسوبات، یکی از مهم‌ترین عوامل تغییردهندهٔ سطح زمین هستند. در طول تاریخ، برخی از رودخانه‌ها به‌عنوان خطوط مرزی بین کشورها انتخاب شده‌اند و اهمیت مضاعفی را کسب کرده‌اند. مجرای رودخانه‌ها، به‌خصوص رودخانه‌های با بستر آبرفتی، پیوسته در حال تغییر هستند و همین امر مسائل مختلفی را موجب می‌شود. رودخانهٔ ارس در زمرهٔ چنین رودخانه‌هایی به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، قسمتی از رودخانهٔ ارس از نظر جابه‌جایی جانبی مجرا در دو دورهٔ زمانی ۱۳۷۹ ه.ش (۲۰۰۰م) و ۱۳۹۳ ه.ش (۲۰۱٤م) بررسی شد. در این راستا، با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر سنجنده‌های ETM+ و OLI ماهواره‌های لندست ۷ و ۸) مجرای رودخانهٔ برای دو دورهٔ زمانی مورد مطالعه حاصل شد. سپس با توجه به مورفولوژی و روند تغییرات مجرا، کل رودخانهٔ به ۲۱ ترانسکت تقسیم شد. پلان‌فرم رودخانهٔ در هر ترانسکت با استفاده از دو شاخص ضریب خمیدگی و زاویهٔ مرکزی بررسی شد. با توجه به جابه‌جایی‌هایی که در مجرا صورت گرفته است، آهنگ مهاجرت کانال محاسبه شد. همچنین با توجه به تغییرات مساحت ترانسکت‌ها، مقدار اراضی ازدست‌رفته یا افزوده‌شده به هر دو جهت رودخانه محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد، رودخانهٔ ارس در بازهٔ مورد مطالعه از نوع مئاندری توسعه‌یافته است. مقادیر ضریب خمیدگی و زاویهٔ مرکزی در سال ۲۰۱٤ نسبت به سال ۲۰۰۰، روند افزایشی را نشان می‌دهد که گویای فعال‌بودن مئاندرهای رودخانه است. متوسط آهنگ مهاجرت مجرا، رقم چشمگیری درحدود ۸ متر را نشان می‌دهد و از این نظر رودخانهٔ بسیار پویایی محسوب می‌شود. جابه‌جایی مجرا در رودخانهٔ مورد مطالعه به دلیل فرسایش و پیشروی کناره مقعر مئاندرها، ایجاد میان‌بُرها و مخصوصاً تغییر مسیر بوده است. در قسمت‌هایی از رودخانه که زاویهٔ مرکزی دارای مقادیر بالایی است، مقدار آهنگ مهاجرت مجرا ارقام چشمگیری را نشان می‌دهد. برعکس، در قسمت‌هایی که رودخانه گرایش به یک الگوی مستقیم دارد، آهنگ جابه‌جایی کمتر بوده است. در طی دورهٔ ۱٤ ساله، در حدود ۲۵۳ هکتار از اراضی ایران درنتیجهٔ تغییرات مجرا از دسترس خارج شده و برعکس در حدود ۲۷۵ هکتار به اراضی در دسترس افزوده شده است و ازاین‌رو، نزدیک به ۲۳ هکتار به اراضی طرف ایران اضافه شده است.

واژه‌های کلیدی: مورفولوژی، مجرای رودخانه، مهاجرت جانبی، مئاندر، تغییر مسیر، رودخانهٔ ارس

***نویسنده مسؤول:** Rezmogh@Tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سیستم رودخانه‌ای به‌صورت پیش‌رونده[1] در طی زمان زمین‌شناسی، درنتیجهٔ فرایندهای عادی فرسایش و رسوب‌گذاری تغییر می‌کند و نسبت به تغییرات اقلیم، سطح اساس، تکتونیک و تأثیر ات انسانی پاسخ می‌دهد. ازاین‌رو، درطی زمان، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مورفولوژی و دینامیک سیستم رودخانه صورت می‌گیرد (Kondolf and Piegay, 2003: 105)؛ بنابراین، رودخانه‌ها در ابعاد عمودی، جانبی و کلی[2] دست‌خوش تغییر می‌شوند (Fryirs and Brierley, 2013: 205). تغییر و دگرگونی مستمر، از اصول حاکم بر هر رودخانه‌ای است که همگام با حرکت و جاری شدن آب و رسوب در بستر آن، تغییر و جابه‌جایی در سایر مشخصات هندسی رودخانه به‌وقوع می‌پیوندد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۱: ۱). خودتنظیمی[3] و تغییرپذیری[4] مجرای رودخانه‌ها ممکن است خطرهایی برای انسان‌ها به‌صورت سیلاب‌ها، فرسایش کناره یا آبشستگی بستر ایجاد کنند (Wohl, 2004: 29). لوین[5] (۱۹۷۷) تغییرات مجرا را به دو نوع تغییرات درون‌زاد[6] و تغییرات برون‌زاد[7] تقسیم‌بندی می‌کند. تغییرات درون‌زاد به‌صورت ذاتی در رژیم رودخانه وجود دارند که می‌توان به تغییر مسیر[8]، مهاجرت مجرا[9] و میان‌بُرها[10] اشاره کرد. تغییرات برون‌زاد، مواردی هستند که در پاسخ به تغییرات سیستم ازجمله نوسانات اقلیمی و تغییر بار رسوب یا دبی درنتیجهٔ فعالیت‌های انسانی به‌وجود می‌آیند (Garde, 2006: 315).

مطالعهٔ تغییرات تاریخی کانال، بخش مهمی از شناخت سیستم‌های رودخانه‌ای است. فقط به‌واسطهٔ شناخت گذشته می‌توان تغییرات اخیر و مداوم در شکل کانال را بررسی و اقدام به تحلیل عوامل پیچیده‌ای کرد که بر ماهیت رودخانه‌های امروزی تأثیر می‌گذارند (Winterbottom, 2000: 195-208). در میان روش‌های موجود، رویکردهای مبتنی بر تفسیر عکس‌ها و تصاویر تاریخی مزایایی ازقبیل زمان، هزینه، اثرات مقیاس و کارایی عملی را نشان داده‌اند. در حقیقت، منابع اطلاعات تاریخی شامل نقشه‌ها، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و مساحی‌های مقاطع عرضی، گنجینه‌ای از اطلاعات برای پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی و زیربنای بسیاری از مطالعات در مورد تغییر مجرای رودخانه هستند (Aswathy et al, 2007: 173˚180, Heo et al., 2009: 155-165). داده‌های مربوط به مورفولوژی رودخانه اطلاعاتی را شامل می‌شود که پلان‌فرم (شکل مسطحاتی)، شکل مقاطع عرضی و نیمرخ طولی کانال رودخانه را تعریف می‌کند. همچنین، شامل اطلاعاتی دربارهٔ دشت‌سیلابی ازقبیل عرض، شیب و عوارضی همچون تراس‌هاست. در مقیاس بزرگتر، اطلاعات مورفولوژیکی به تعاریف شبکهٔ رودخانه و حوضهٔ زهکشی تعمیم داده می‌شود. بسیاری از داده‌های مورفولوژیکی از روی نقشه‌های توپوگرافی موجود، عکس‌های هوایی و به‌صورت روزافزونی داده‌های سنجش از دور استخراج می‌شوند (Sear et al., 2003: 22). در این پژوهش، جابه‌جایی جانبی بخشی از مجرای رودخانهٔ ارس از ۱۵کیلومتری غرب شهر اصلاندوز تا خروج رودخانه از محدودهٔ سیاسی ایران بررسی شده است. این رودخانه علاوه بر اهمیت

---

1 - progressively
2 - wholesale
3 - self-adjustment
4 - variability
5 - Lewin
6 - autogenic
7 - allogeneic
8 - avulsion
9 - channel migration
10 - cut-offs

فراوانی که در رابطه با تأمین آب بخش‌هایی از مناطق شمال‌غرب کشور دارد، در مسافت‌های زیادی خط مرزی ایران با کشورهای آذربایجان و ارمنستان را ترسیم می‌کند و درنتیجه پژوهش در زمینهٔ تغییرات جانبی رودخانه ضرورت می‌یابد.

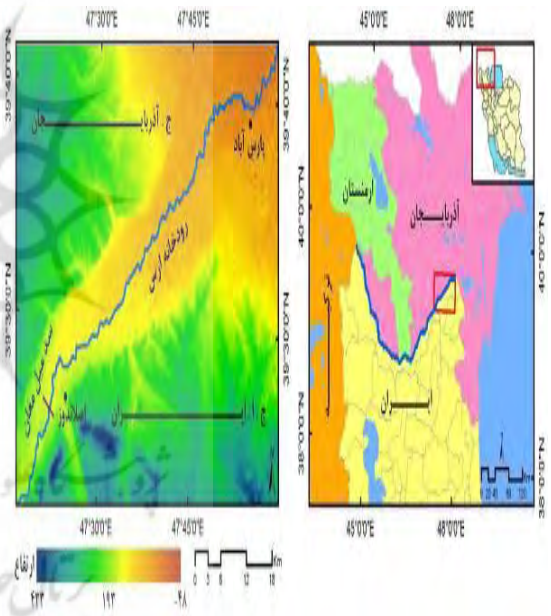
در خصوص پیشینهٔ پژوهش، منابعی غنی در دسترس است. دانشمندان شاغل در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، مورفولوژی کوتاه‌مدت کانال‌های رودخانه را مطالعه کردند که ازجمله می‌توان به لانگبین[1]، لئوپلد[2] و ولمن[3] اشاره کرد. شوم[4]، موسلی[5] و ویور[6] سیستم‌های رودخانه‌ای را مطالعه کردند و آزمایشاتی را در محیط‌های آزمایشگاهی برای مطالعهٔ مورفولوژی رودخانه انجام دادند. آلن[7] کارهای گسترده‌ای درخصوص ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اشکال بستر و ساختمان‌های رسوبی با درنظرگرفتن دلتاها، مئاندرها و دشت‌های سیلابی انجام داده است. پژوهشگران بسیاری از جمله گرگوری[8]، لوین، بیکر[9] و استارکل[10] اثرات اقلیم و هیدرولوژی دیرینه را بر روی کانال‌های رودخانه بررسی کردند (Garde, 2006: 9). ارشد و همکاران (۱۳۸٦)، روند تغییرات مورفولوژیکی بخشی از رودخانهٔ کارون را براساس تصاویر ماهواره‌ای مطالعه کردند. یمانی و همکاران (۱۳۸۹)، عوامل ژئومورفولوژیک مؤثر بر تغییرات بستر بخش میانی رودخانهٔ اترک و دامنهٔ این تغییرات را تحلیل کردند. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از هندسه فراکتال به تحلیل تغییرات الگوی هندسی بخشی از رودخانهٔ قزل‌اوزن پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، الگوی هندسی رودخانه در هر سه بازه، خاصیت فراکتالی دارد و بنابراین، تغییرات الگوی هندسی رودخانه در سال‌های مختلف، با هندسه فراکتال تحلیل می‌شود. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی نقش عوامل ژئومورفیک و زمین‌شناختی بر شکل هندسی رودخانهٔ قزل‌اوزن و علل خمیدگی بستر در بازه دشتی و کوهستانی پرداختند. نتیجهٔ این پژوهش نشان داد، طول زیاد رودخانه و عبور از تشکیلات مارنی و فرسایش‌پذیر، باعث شده است که هندسهٔ رودخانه در بازه دشتی به‌شدت با تأثیر از لیتولوژی بستر شکل بگیرد و فرسایش کناری و توان رودخانه نقش عمده در مئاندری‌شدن رودخانه داشته باشد. در بازه کوهستانی مسائل زمین‌ساختی اهمیت دارد. یمانی و فخری (۱۳۹۱) در پژوهشی، تغییرات مجرای رودخانهٔ جگین در سطح جلگهٔ ساحلی مکران را بررسی کردند. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرودینامیکی مسیر این رودخانه از جمله شیب کم دلتا، ریزدانه بودن رسوبات، طغیانی‌بودن رودخانه و عوامل تکتونیکی، از عوامل اصلی ناپایداری مجرای رودخانهٔ جگین هستند. رضائی‌مقدم و پیروزی‌نژاد (۱۳۹۳) به بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره در رودخانهٔ گاماسیاب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سطوح فرسایش‌یافته در رودخانهٔ گاماسیاب بیشتر از سطوح رسوب‌گذاری‌شده است و این به دلیل جابه‌جایی و تغییر مسیر رودخانه بوده است؛ به‌طوری‌که رودخانه در بعضی از قسمت‌ها بیش از ٤۰۰ متر جابه‌جایی داشته است.

۱-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانهٔ ارس به طول ۹۱/۵ کیلومتر در محدودهٔ بین ۱۵ کیلومتری غرب شهر

[1] - W.B. Langbein
[2] - L.B. Leopold
[3] - M.G. Wolman
[4] - S.A. Schumm
[5] - M.P. Mosley
[6] - W.E. Weaver
[7] - J.R.L. Allen
[8] - K.J. Gregory
[9] - V.R. Baker
[10] - L. Starkel

اصلاندوز تا خروج رودخانه از محدودهٔ سیاسی ایران است (شکل۱). این منطقه با مختصات جغرافیایی □۰۰□۲۲ ۳۹ تا □٤۰ □٤۲ ۳۹ عرض شمالی و □۳۰ □۱۵ ٤۷ تا □۳۰□۵۹ ٤۷ طول شرقی در امتداد نوار مرزی ایران و آذربایجان واقع شده است. رودخانهٔ ارس یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران است. این رودخانه از ارتفاعات بین‌گؤل‌داغ ترکیه سرچشمه گرفته است و پس از پیمودن مسافتی درحدود ۱۰۰۰ کیلومتر به رود کورا و در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه بیش از ٤۰۰ کیلومتر از مرز مشترک ایران با جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان را ترسیم می‌کند.



شکل۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در شمال غرب کشور

۱-۲- مواد و روش‌ها

نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، تصویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک تقریباً ۲۸ متر مربوط به ماهواره استر[1] و تصاویر ماهواره‌ای شامل تصاویر سنجنده +ETM ماهواره لندست ۷ (مربوط به تابستان ۲۰۰۰م) و تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ (مربوط به تابستان سال ۲۰۱٤م) مهم‌ترین مواد این پژوهش هستند. مجرای بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس برای دو دورهٔ زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱٤ میلادی از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای حاصل شد. در این زمینه، روش‌های مختلفی برای تفکیک آب از سایر عوارض وجود دارد که از جمله می‌توان به تبدیل تسلدکپ[2]، تحلیل مؤلفه‌های اصلی[3] و استفاده از از شاخص‌های مختلفی مانند تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده[4] (NDVI)، شاخص آب[5] (WI)، شاخص تفاضل آب نرمال شده[6] (NDWI) و شاخص اصلاحی اصلاحی تفاضل آب نرمال‌شده[7] (MNDWI) اشاره کرد (Xu, 2007: 1381-1391, Pires-Luiz & Maillard, 2010: 463-468, Xu, 2006: 3025-3033) (شکل۲):

رابطهٔ (۱) $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$

رابطهٔ (۲) $WI = (B_1 + B_2 + B_3) / (B_4 + B_5 + B_7)$

رابطهٔ (۳) $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$

رابطهٔ (٤) $MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$

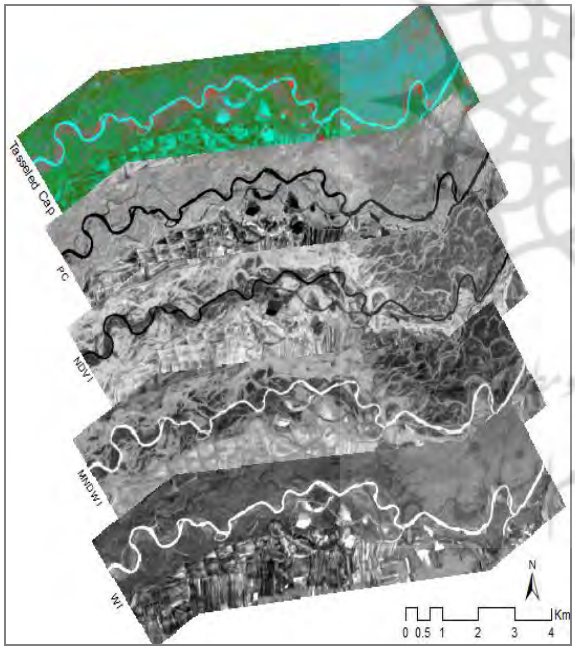
در روابط بالا NIR یک باند مادون قرمز نزدیک؛ MIR یک باند مادون قرمز میانی؛ Red باند قرمز؛ Green باند سبز و $\mathbf{B_i}$ شمارهٔ باند در تصاویر +ETM است.

قبل از اعمال نسبت‌های باندی برای استخراج

[1] - ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

[2] - Tasseled Cap
[3] - Principal Components
[4] - Normalized difference water index (NDVI)
[5] - Water index
[6] - Normalized difference water index (NDWI)
[7] - Modified Normalized difference water index (MNDWI)

شاخص‌های فوق، باندهای موردنیاز با استفاده از باند پانکروماتیک تصاویر لندست با قدرت تفکیک ۱۵ متر (باند۸) شارپ[۱] شدند. برای انتخاب بهترین شاخص، از تصویر Google Earth منطقه با قدرت تفکیک بسیار بالا (کمتر از ۵۰ سانتی‌متر) استفاده شد که در این میان، شاخص WI بهترین تفکیک را انجام داد و درنتیجه، مبنای استخراج مجرا قرار گرفت. به دو دلیل عمده، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای بررسی جابه‌جایی عرضی مجرای بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس مناسب هستند: نخست اینکه، عرض مجرای رودخانهٔ ارس در بازهٔ مورد مطالعه در بیشتر قسمت‌ها بیش از ۸۵ متر است. به‌طوری‌که، مقایسهٔ خطوط کناره استخراج‌شده از شاخص WI مربوط به سال ۲۰۱٤ با تصویر گوگل‌ارث منطقه (در قسمت‌هایی که تغییرات اندکی بین فاصله زمانی دوساله اتفاق افتاده) نشان‌دهندهٔ انطباق نسبتاً خوب خطوط کناره مجرا با تصویر گوگل‌ارث است. به‌خصوص، در قسمت‌های عریض‌تر مجرا، دقت‌های نسبتاً بالایی دیده می‌شود؛ دوم اینکه، میزان جابه‌جایی عرضی مجرای بازهٔ مورد مطالعه بسیار چشمگیر است که خود را به‌صورت ایجاد میان‌بُرها و تغییر مسیر نشان داده است. به‌طوری‌که، کانال‌های متروک و نعل‌اسبی در حاشیهٔ مجرا بسیار معمول است که در شرایط مناسب، دریاچه‌های نعل‌اسبی نیز تشکیل شده است (برای مثال در شکل ۳ در تصاویر CوD دریاچه‌های نعل‌اسبی به‌دلیل وجود آب، به‌صورت سفیدرنگ دیده می‌شوند). بنابراین، به‌دلیل عریض‌بودن و پویایی زیاد مجرا، استفاده از این تصاویر پاسخگوی اهدف پژوهش هستند. جابه‌جایی جانبی مجرای رودخانهٔ ارس در بازهٔ مورد مطالعه، یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات منطقه محسوب می‌شود، به‌طوری‌که در بازه‌های مختلف این رودخانه، صحبت از ده‌ها و حتی صدها متر جابه‌جایی مجرا فقط در طی چند سال است. درواقع، دلیل اصلی انتخاب بازه زمانی کوتاه‌مدت این پژوهش هم مربوط به این مسأله بوده است . برای نمونه، در شکل (۳)، میزان جابه‌جایی مجرا در برخی بازه‌ها در طی دو دورهٔ زمانی نشان داده شده است. میزان جابه‌جایی مجرا در برخی از این تصاویر بین ۵۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰ متر می‌باشد؛ حتی در مواردی که میزان جابه‌جایی کم بوده، توسعه و پیشروی مئاندرها به وضوح قابل تشخیص است.

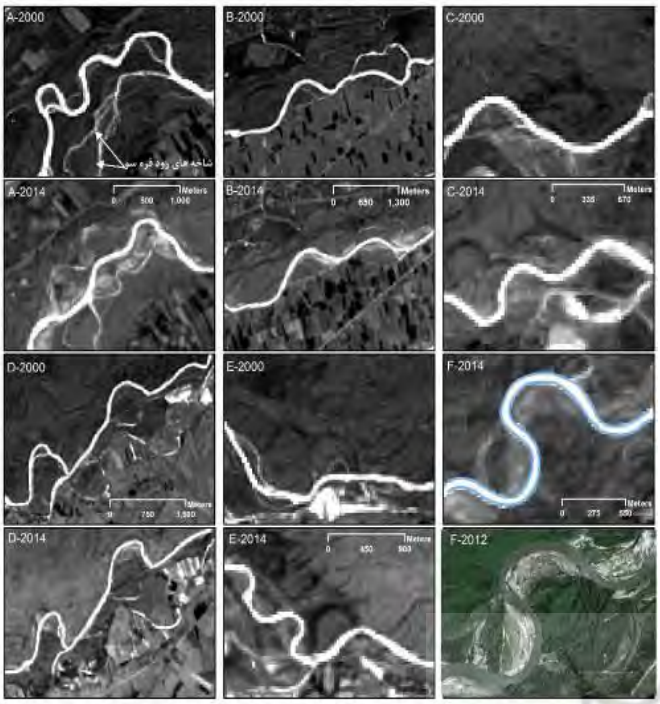


شکل ۲- بارزسازی مجرای رودخانه با استفاده از شاخص‌های مختلف در محدودهٔ ترانسکت‌های ۱۷ تا ۲۰

روش‌های مختلفی برای بررسی تغییرات و جابه‌جایی‌های صورت‌گرفته در مجرای رودخانه

[۱] - Image Sharpening

وجود دارد که می‌توان به تحلیل پلیگون[1]، روش شعاع انحنا[2] و روش ترانسکت[3] اشاره کرد (Rapp & Abbe, 2003., Giardino & Lee, 2011). در این پژوهش، با توجه به روش ترانسکت، خطوطی با فواصل مشخص از هر دو طرف مجرا به‌عنوان خطوط مبنا ترسیم شد. این خطوط برای دوره‌های زمانی مورد مطالعه ثابت بود و ازاین‌رو می‌توان جابه‌جایی‌های مجرا نسبت به این خطوط را به صورت کمّی محاسبه کرد. هنگامی‌که مجرا در جهت راست (به سمت ایران) جابه‌جا شود، مساحت ترانسکت سمت راست مجرا کاهش پیدا می‌کند و بر مساحت ترانسکت سمت چپ مجرا (طرف آذربایجان) افزوده می‌شود و برعکس. در این پژوهش، مجرای بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس براساس مورفولوژی و روند تغییرات مجرا به ۲۱ ترانسکت تقسیم‌بندی (شکل٤) و شاخص‌های کمّی برای هر ترانسکت محاسبه شد.



شکل۳- جابه‌جایی‌های چشمگیر در قسمت‌های مختلف مجرای رودخانهٔ ارس درنتیجهٔ مهاجرت مئاندرها، ایجاد میان‌بُرها و تغییر مسیر مجرا در دو دورهٔ زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱٤م؛ در دو تصویر F، مجرای رودخانهٔ حاصل از شاخص WI و تصویر Google Earth با فاصلهٔ زمانی دوساله مقایسه شده است (اختلافات زیاد عرض مجرا در تصاویر به‌دلیل نمایش تصاویر با مقیاس‌های مختلف است).

برای تحلیل شکل مسطحاتی[4] رودخانه، از دو شاخص ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی استفاده شد. ضریب خمیدگی یک رودخانه نسبت طول رودخانه (در امتداد مرکز کانال یا خط‌القعر) به طول دره‌ای است که رودخانه در آن جریان دارد و با استفاده از رابطهٔ زیر برای هر قوس تعیین می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۹٤-۲۷۵ و رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۲-۸۵):

[1] - Polygon Analysis
[2] - Radius of Curvature
[3] - Transect Method
[4] - platforms

رابطهٔ (۵) $$P = \frac{L}{\lambda/2}$$

که در این رابطه: L طول آبراهه و λ طول موج مئاندر است.

زاویهٔ مرکزی کورنیس[1]، معیاری برای تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه مئاندری یک رودخانه است. این ضریب به دو روش محاسبه می‌شود؛ در روش اول با در اختیارداشتن طول قوس و شعاع خمیدگی با استفاده از رابطهٔ زیر، زاویهٔ مرکزی قوس اندازه‌گیری می‌شود:

رابطهٔ (٦) $$A = \frac{180L}{R\pi}$$

در این رابطه A زاویهٔ مرکزی، L طول قوس و R شعاع خمیدگی است. در روش دوم بر اساس دوایر مماس بر قوس‌ها، زاویه مرکزی اندازه‌گیری می‌شود. برای این کار، ابتدا نقاط عطف قوس‌ها را مشخص و سپس از مرکز دوایر مماس بر قوس، خطوطی را بر نقاط عطف عمود کرده و زاویه مرکزی قوس‌ها محاسبه می‌شود (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۱۱). درنهایت، متوسط آهنگ مهاجرت مجرا در طی ١٤ سال گذشته محاسبه شد. سه روش برای پیش‌بینی مهاجرت مئاندر وجود دارد: شیوه‌های همپوشانی دستی، شیوه‌هایی که با کامپیوتر پشتیبانی می‌شوند و شیوه‌های اندازه‌گیری و برون‌یابی[2] مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی. در این میان، شیوه‌های مبتنی بر GIS به‌واسطهٔ استفاده از نقشه‌برداری دیجیتال و فناوری پایگاه داده حاصل شده است. اندازه‌گیری دیجیتال و تحلیل فضایی در GIS، برای اندازه‌گیری شعاع خم، مرکز ثقل خم، عرض کانال، طول موج خم و ... به‌کار گرفته می‌شود (Heo et al, 2008: 155-165). به این دلیل، در مطالعهٔ کنونی، شیوه‌های مبتنی بر GIS برای ارزیابی تاریخی و پیش‌بینی مهاجرت خم استفاده قرار می‌شود. برای محاسبهٔ آهنگ جابه‌جایی کانال از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود (Giardino & Lee, 2011: 8., Shields et al, 2000: 54-66., Magdaleno and Yuste, 2011: 197-207):

رابطهٔ (۷) $$R_m = (A / L) / y$$

که در آن: R_m آهنگ مهاجرت؛ A مساحت موجود بین دو خط مرکزی کانال؛ L طول خط مرکزی کانال در زمان t_1؛ و y تعداد سال است. در این زمینه، برای افزایش دقت کار در رابطه با محاسبهٔ خط مرکزی مجرا و سایر محاسبات از افزونه[3] Platform Statistics (Lauer, 2006) کمک گرفته شد.

۲- یافته‌های پژوهش

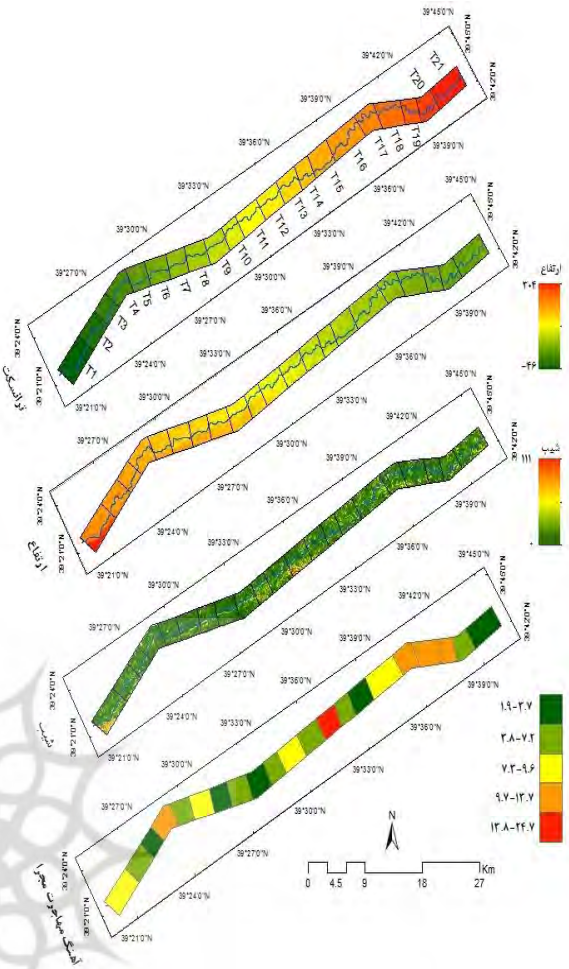
۲-۱- شکل مسطحاتی مجرا

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کانال رودخانه پلان‌فرم یا شکل مسطحاتی آن است. پلان‌فرم مشخص‌کنندهٔ نوع فرایندهای حاکم بر مجرای رودخانه است؛ برای نمونه، یک مجرای گیسوئی نشان‌دهندهٔ نرخ‌های بالای انتقال رسوب و ذخیرهٔ محلی در کانال رودخانه است (Sear et al, 2003: 60). پلان‌فرم کانال براساس طول کل کانال در واحد طول دره (سینوزیته) و میزان یا درجه تقسیم کانال معمولاً به چهار نوع مستقیم[4]، مئاندری[5]، گیسوئی[6] و شریانی[7] طبقه‌بندی می‌شود.

[1] - Kornis
[2] - extrapolation
[3] - Add In
[4] - Straight
[5] - Meandering
[6] - Braided
[7] - Anastomosed

به‌طور طبیعی، کانال‌های مستقیم بازه‌های نسبتاً کوتاهی از یک شبکه رودخانه را در برمی‌گیرند، درصورتی‌که سایر انواع کانال‌ها ممکن است تا چندین کیلومتر امتداد داشته باشند (Sear et al, 2003: 61). کانال‌های مئاندری از طریق مجموعه‌ای از خم‌ها[1] و مقاطع سینوسی مشخص می‌شوند. اگرچه پلان‌فرم ممکن است مئاندری باشد، اما این بدین معنی نیست که رودخانه به‌طور فعال درحال فرسایش خم‌های خارجی و مهاجرت در دشت سیلابی است. از این نظر، کانال-های مئاندری بسته به میزان فرسایش کناره و حرکت جانبی می‌توانند به دو نوع مئاندری فعال و مئاندری غیرفعال تقسیم‌بندی شوند (Sear et al, 2003: 62). همچنان‌که اشاره شد، بازه مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس براساس تغییرات مورفولوژیکی مجرا به ۲۱ ترانسکت تقسیم‌بندی شد (شکل ٤). رودخانه از منظر ژئومورفولوژی منطقه نیز به دو بازهٔ کوهستانی با دشت سیلابی توسعه‌یافته (از ترانسکت۱ تا ترانسکت ۱۵) به طول تقریبی ۵۹ کیلومتر و بازهٔ دشت (از ترانسکت۱٦ تا انتها) به طول تقریبی ۳۲/۵ کیلومتر تقسیم‌بندی می‌شود. در حالت کلی، بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس عمدتاً از الگوی مئاندری تبعیت می‌کند، با این حال، در بعضی از ترانسکت‌ها گرایش به الگوی مستقیم نیز دیده می‌شود، اما الگوی مستقیم دوام چندانی نمی‌یابد و پس از طی مسافتی نسبتاً کوتاه، دوباره خم‌هایی در رودخانه ایجاد می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، الگوهای مئاندری مجرای رودخانه از نوع مئاندری فعال هستند و شکل‌گیری مئاندرهای جدید، مهاجرت مئاندرها در نتیجه فرسایش کناره و ایجاد میان‌بُرها به کرّات و با آهنگ نسبتاً بالایی صورت می‌گیرد. رودخانهٔ ارس در بازهٔ کوهستانی از طرف کشور آذربایجان چهار شعبهٔ مهم دریافت می‌کند؛ اما از طرف ایران انشعاب مهمی که توانسته تا حدی بر روی خط‌السیر مجرا تأثیرگذار باشد، رودخانهٔ دره‌رود (قره‌سو) است که در محل ترانسکت شمارهٔ ٤ به رودخانهٔ ارس می‌پیوندد. اگر یک انشعاب کوچک باشد، تأثیرات آن بر روی مجرای اصلی اندک خواهد بود و احتمالاً منجر به افزایش جزئی در پهنا و عمق کانال می‌شود؛ اما، اگر انشعاب پرشیب یا بزرگ باشد، تأثیرات مختلفی از افزایش قابل‌توجه پهنا و عمق گرفته تا تغییر شکل یعنی تغییر کامل خصیصه مجرا درپی دارد (Schumm, 2005: 104). در منطقهٔ مورد مطالعه با توجه به توان زیاد مجرای رود ارس، تأثیر تلاقی‌ها به‌صورت انحراف خط‌السیر مجرا به‌واسطهٔ شکل‌گیری مخروط‌افکنه‌ها ظاهر شده است. هرچند برخی از تغییر مسیرهای مجرا را می‌توان به تأثیر تلاقی‌ها نسبت داد.

[1] - Bends



شکل ٤- محدودهٔ ترانسکت‌ها، شیب، ارتفاع و آهنگ جابه‌جایی مجرا در بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس (ایجاد میان‌بُرهای فراوان و تغییرمسیر مجرا باعث شده است که مقدار جابه‌جایی مجرا در طی دورهٔ زمانی مورد مطالعه زیاد باشد)

برای بررسی کمّی پلان‌فرم مجرا از دو شاخص ضریب خمیدگی و زاویهٔ مرکزی استفاده شد و پلان‌فرم مجرای رودخانه براساس طبقه‌بندی این ضرایب تحلیل شد (جداول ۱ و ۲).

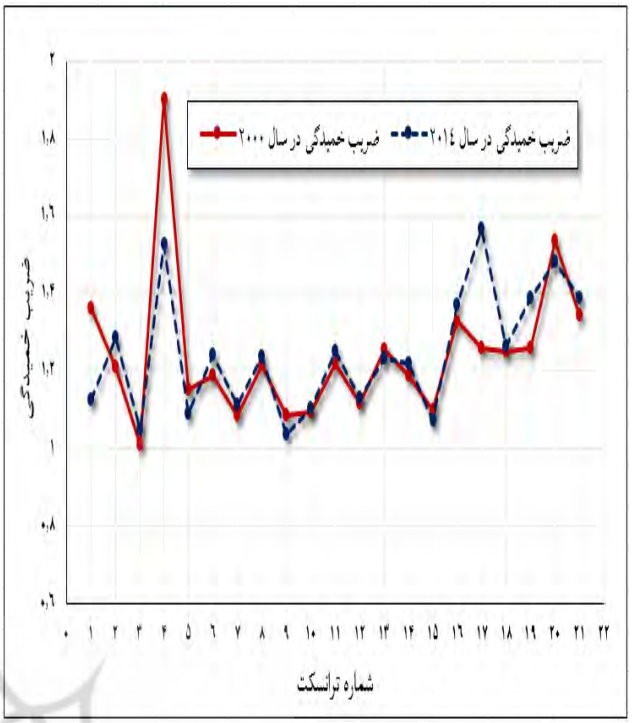
جدول ۱- تقسیم‌بندی الگوی رودخانه بر اساس ضریب خمیدگی (تلوری، ۱۳۷۷)

ضریب خمیدگی	> ۲	۱/۲۵-۲	۱/۰۵-۱/۲۵	۱-۱/۰۵
الگوی رودخانه	مئاندری شدید	مئاندری	سینوسی	مستقیم

جدول۲- میزان توسعهٔ قوس‌های مئاندر براساس اندازهٔ زاویهٔ مرکزی (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۱۲، مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۹٤-۲۷۵، یمانی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱٤۳-۱۲۵).

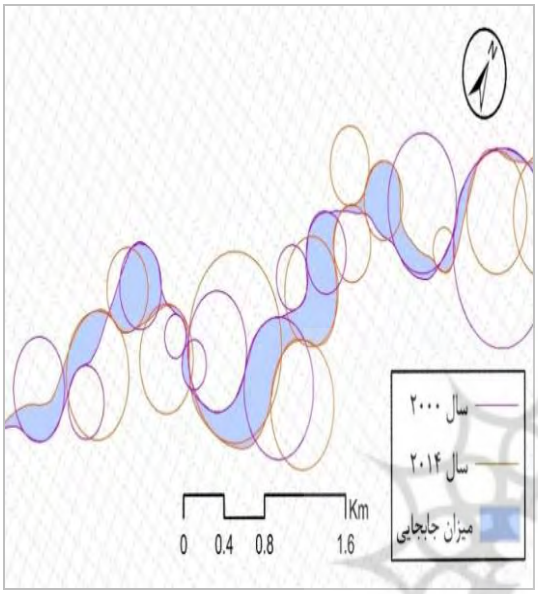
شکل رودخانه	زاویه مرکزی (درجه)
رودخانهٔ شبه‌پیچان رود	٤۱>
رودخانهٔ پیچان رود توسعه‌نیافته	٤۱-۸۵
رودخانهٔ پیچان رود توسعه‌یافته	۸۵-۱۵۸
رودخانهٔ بیش از حد توسعه‌یافته	۱۵۸-۲۹٦
رودخانهٔ نعل‌اسبی	بیش از ۲۹٦

مقادیر ضریب خمیدگی در جدول (۳) و نمودار میانگین ضریب خمیدگی مجرا در محدودهٔ هر ترانسکت در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به این موارد، بیشترین مقدار ضریب خمیدگی برای سال ۲۰۰۰ با مقدار ۱/۹ مربوط به ترانسکت ٤ است؛ اما تا سال ۲۰۱٤ به‌دلیل رخداد تغییر مسیر، مقدار آن کاهش یافته و به ۱/۵ رسیده است و بعد از ترانسکت ۱۸ با مقدار ۱/٦ در مرتبهٔ دوم قرار گرفته است. در ۱۲ ترانسکت، میزان ضریب خمیدگی در سال ۲۰۱٤ نسبت به سال ۲۰۰۰ افزایش نشان می‌دهد که بیشترین میزان افزایش مربوط به ترانسکت ۱۷ است. کاهش در میزان ضریب خمیدگی را می‌توان به ایجاد میان‌بُر یا تغییر مسیر مجرای رودخانه نسبت داد. از ترانسکت ۱ تا ۱۵، یعنی بازهٔ کوهستانی الگوی رودخانه به‌تناوب از مئاندری به سینوسی و برعکس تبدیل شده است؛ اما از ترانسکت ۱٦ تا ۲۱ یا بازهٔ دشت الگوی رودخانه در هر دو دورهٔ مئاندری است.



شکل ۵- میانگین ضریب خمیدگی بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس در محدودهٔ هر ترانسکت

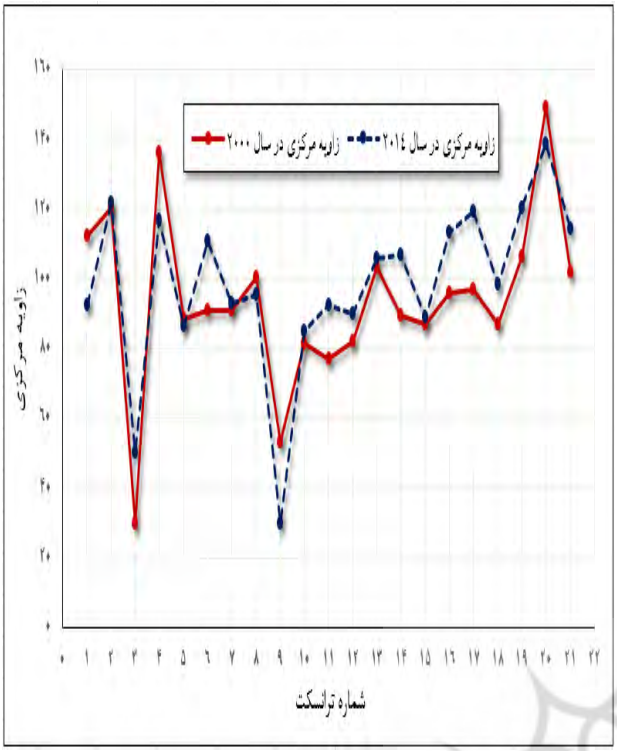
بررسی تغییرات زاویهٔ مرکزی در طی دو دورهٔ زمانی مورد مطالعه، به نحو آشکارتری روند تغییرات عرضی مجرای رودخانه را نشان می‌دهد (شکل ۷ و جدول ۳). در این رابطه دایره‌هایی به خم‌های مجرا برازش (شکل ٦) و زاویه مرکزی (کورنیس) محاسبه شد. در سال ۲۰۰۰، تعداد کل قوس‌های مجرای رودخانه بالغ بر ۹۵ قوس بود که تا سال ۲۰۱٤ به‌علت ایجاد میانبُر به ۸۹ قوس کاهش یافت. در سال ۲۰۰۰، به استثنای پنج ترانسکت، بقیهٔ ترانسکت‌ها از نوع مئاندری توسعه‌یافته هستند که تا سال ۲۰۱٤ سه مورد از این ترانسکت‌ها نیز به نوع مئاندری توسعه‌یافته تبدیل شده‌اند. همچنان‌که به‌روشنی در شکل (۷) قابل مشاهده است؛ میانگین زاویه مرکزی بیشتر ترانسکت‌ها، روند افزایشی را نسبت به سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهندهٔ فعال‌بودن مئاندرهای مجرای رودخانه و مهاجرت مئاندرها در دشت سیلابی به دلیل فرسایش کنارهٔ مقعر است. کاهش زاویه مرکزی در برخی ترانسکت‌ها را می‌توان به ایجاد میانبُرها نسبت داد که خود ناشی از مهاجرت مئاندرهاست.



شکل ٦- برازش دوایر به خم‌های مجرا (ترانسکت ۱٦)

بنابراین، مجرای مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس را برای هر دو دورهٔ زمانی باید از نوع مئاندری توسعه‌یافته در نظر گرفت که با آهنگ نسبتاً بالایی در حال تحول است؛ به‌طوری‌که کاهش یا افزایش ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی را می‌توان به تحولات عادی رودخانه‌های مئاندری (فرسایش کنارهٔ مقعر، ایجاد میانبُر و تغییر مسیر مجرا) نسبت داد. همچنان‌که آثار بسیار زیادی از میانبُرها و کانال‌های متروک بر روی تصاویر ماهواره‌ای قابل مشاهده است که نشان‌دهندهٔ تحولات گذشتهٔ رودخانه است (شکل‌های ۲ و ۳). از طرف دیگر، رشته‌کوه‌های دو طرف مجرا تأثیراتی را بر روی مجرا گذاشته‌اند. این تأثیرات در وهلهٔ نخست، به‌صورت انحراف مسیر مجرا قابل مشاهده است. در

بازهٔ کوهستانی، با توجه به دخالت عوامل محلی مانند میزان شیب، تأثیر تلاقی‌ها و مقاوم یا فرسایش‌پذیر بودن مواد کناره، بازه‌های متمایل به مستقیم مانند ترانسکت‌های شمارهٔ ۳ و ۹ با مقدار سینوزیته نزدیک به ۱ برای هر دورهٔ زمانی دیده می‌شود و در واقع کمترین میزان تغییرات مجرا نیز در این ترانسکت‌ها رخ داده است. در همین قسمت، بازه‌های مئاندری نیز بسیار مشخص است، مثل ترانسکت شمارهٔ ٤ که از نوع مئاندری توسعه‌یافته است؛ اما در بازهٔ دشت یعنی از ابتدای ترانسکت ١٦ تا انتهای رودخانهٔ ارس در خاک ایران، مجرا کاملاً از الگوی مئاندری توسعه‌یافته تبعیت می‌کند. در این محدوده شیب آبراهه به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد و بین ۲ تا ۳ درصد می‌شود.



شکل ۷- میانگین زاویهٔ مرکزی قوس‌های بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس در محدودهٔ هر ترانسکت

جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های کمّی مجرای رودخانه

ترانسکت	جهت نسبت به مجرا	مساحت در سال[1] ۲۰۰۰ (هکتار)	مساحت در سال ۲۰۱٤ (هکتار)	میزان تغییرات (هکتار)	آهنگ مهاجرت مجرا (m/y)	ضریب خمیدگی در سال ۲۰۰۰	ضریب خمیدگی در سال ۲۰۱٤	زاویه مرکزی در سال ۲۰۰۰	زاویه مرکزی در سال ۲۰۱٤
T1	R	٦٦٥/٦٥	٥٧٧/٦٥	-٨٧/٩٩	٩/٢٦٥	١/٣٦	١/١٣	١١٢/٢	٩٢/٥
	L	٨٢٣/٥٥	٩١١/٥٤	٨٧/٩٩					
T2	R	٤٢٦/٧٠	٤١١/٦٣	-١٥/٠٧	٦/٤٤٩	١/٢١	١/٢٩	١٢٠/٥	١٢١/٩
	L	٦٣٦/٩١	٦٥١/٩٩	١٥/٠٧					
T3	R	٢٠٣/٠٢	١٩٦/٥٣	-٦/٤٩	٣/٢٢٨	١/٠١	١/٠٥	٣٠	٥٠
	L	٥٢٥/٢٣	٥٣١/٧٢	٦/٤٩					

[1]- مساحت‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS با توجه به تقاطع خطوط ترانسکت و خطوط مجرا و عملیات تبدیل Polyline **به** Polygon به‌دست آمده‌است.

T4	R	۵۷۲/۸۳	۵۰۳/۴۷	-۶۹/۳۵	۱۱/۰۷۸	۱/۹	۱/۵۳	۱۳۶/۳	۱۱۷
	L	۴۵۸/۵۹	۵۲۷/۹۵	۶۹/۳۵					
T5	R	۲۶۷/۰۸	۲۶۳/۷۹	-۳/۲۹	۵/۱۷۵	۱/۱۵	۱/۰۹	۸۸/۴	۸۶/۳
	L	۵۹۳/۴۵	۵۹۶/۷۴	۳/۲۹					
T6	R	۴۶۶/۸۸	۴۴۵/۸۵	-۲۱/۰۳	۸/۰۵۵	۱/۱۹	۱/۲۴	۹۱	۱۱۰/۷
	L	۵۷۳	۵۹۴/۰۴	۲۱/۰۳					
T7	R	۴۱۰/۹۴	۴۰۹/۶۸	-۱/۲۶	۱/۹۲۳	۱/۰۸	۱/۱۱	۹۱	۹۳
	L	۴۹۳/۵۸	۴۹۴/۴۸	۱/۲۶					
T8	R	۵۸۰/۴۴	۵۹۰/۴۳	۱۰	۵/۰۹۱	۱/۲۱	۱/۲۴	۱۰۰/۶	۹۵/۶
	L	۴۸۴/۰۳	۴۷۴/۰۳	-۱۰					
T9	R	۵۹۹/۸۸	۶۰۶/۵۶	۶/۶۸	۱/۹۰۳	۱/۰۹	۱/۰۴	۵۳	۳۰
	L	۴۲۵/۳۷	۴۸۰/۷۰	-۶/۶۸					
T10	R	۵۵۵/۰۴	۵۷۱/۴۶	۱۶/۴۳	۷/۱۸۳	۱/۰۹	۱/۱۰	۸۱/۷	۸۵
	L	۲۵۰/۰۱	۲۳۳/۵۸	-۱۶/۴۳					

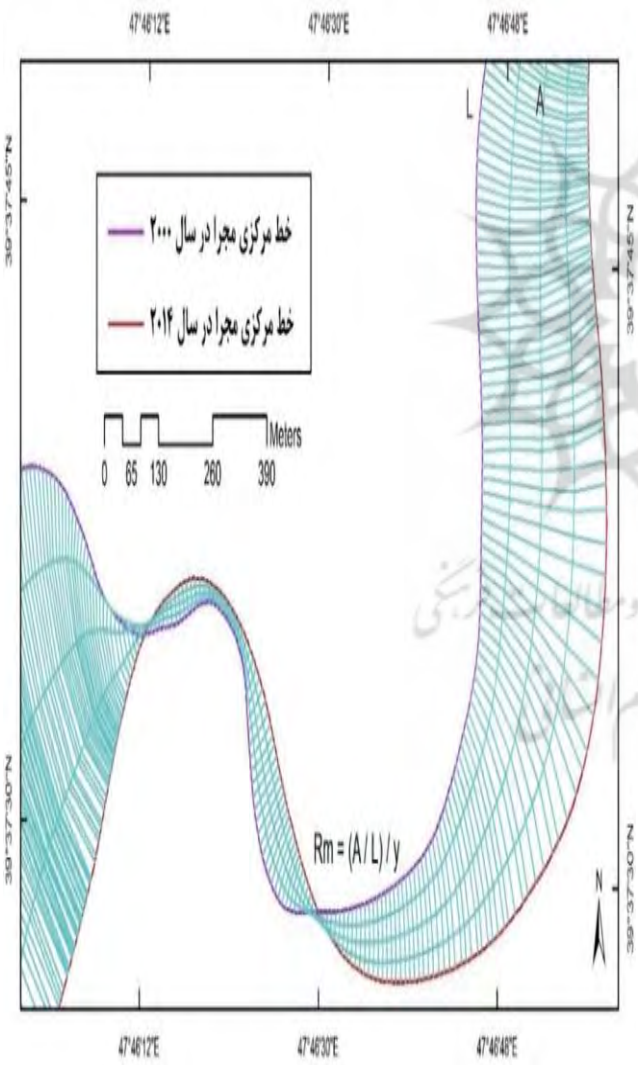
ادامهٔ جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های کمّی مجرای رودخانه

T11	R	۷۱۹/۶۰	۷۱۷/۵۷	-۲/۰۳	۸/۳۱۴	۱/۲۲	۱/۲۵	۷۷/۲	۹۲/۶
	L	۴۵۰/۱۷	۴۵۲/۲۰	۲/۰۳					
T12	R	۶۳۱/۲۰	۶۲۶/۰۵	-۵/۲۴	۶/۸۹۸	۱/۱۲	۱/۱۳	۸۲	۹۰
	L	۴۷۷/۴۸	۸۴۲/۷۲	۵/۲۴					
T13	R	۴۷۷/۵۱	۵۷۴/۸۸	۹۷/۳۷	۲۴/۷۱۷	۱/۲۵	۱/۲۳	۱۰۳/۳	۱۰۵/۸
	L	۵۰۵/۲۹	۴۰۷/۹۱	-۹۷/۳۷					
T14	R	۲۴۹/۵۷	۲۶۷/۹۲	۱۷/۶۵	۵/۷۲۵	۱/۱۹	۱/۲۲	۸۹/۵	۱۰۶/۸
	L	۵۲۵/۰۷	۵۰۷/۴۲	-۱۷/۶۵					
T15	R	۲۲۶/۷۱	۲۱۹/۹۸	-۶/۷۳	۲/۴۲۰	۱/۱۰	۱/۰۷	۸۷	۸۹
	L	۸۲۱/۲۸	۸۲۸/۰۱	۶/۷۳					
T16	R	۸۲۸/۷۶	۷۹۹/۱۴	-۲۹/۶۲	۹/۶۱۵	۱/۳۳	۱/۳۷	۹۶	۱۱۳/۲
	L	۷۹۰/۴۶	۸۲۰/۰۹	۲۹/۶۲					
T17	R	۶۴۵/۴۵	۶۴۰/۵۳	-۴/۹۲	۱۲/۰۹۰	۱/۲۶	۱/۵۷	۹۶/۹	۱۱۹/۶
	L	۳۵۵/۱۸	۳۴۰/۱۱	۴/۹۲					
T18	R	۷۷۸/۷۱	۸۲۱/۹۸	۴۳/۲۸	۱۳/۷۳۳	۱/۲۵	۱/۲۶	۸۷/۲	۹۸/۷
	L	۴۰۲/۰۱	۳۵۸/۷۳	-۴۳/۲۸					
T19	R	۳۳۸/۷۹	۳۹۸/۸۲	۶۰/۰۲	۱۳/۵۲۶	۱/۲۶	۱/۳۹	۱۰۶/۵	۱۲۰/۶

	L	٤۰۰/۹۰	۳٤۰/۸۷	-٦۰/۰۲					
T20	R	۳۰۲/۰٤	۳۰٤/٥۰	۲/٤۷	٤/۹٥۹	۱/٥٤	۱/٤۸	۱٤۹	۱۳۹
	L	٥۲٦/٤۱	٥۲۳/۹٤	-۲/٤۷					
T21	R	٥٤٤/۹۲	٥٦٦/۹۲	۲۲	۳/٦۷۹	۱/۳٥	۱/۳۹	۱۰۲	۱۱٤/۳
	L	۸۳۷/٤۲	۸۱٥/٤۲	-۲۲					

۲-۲- بررسی کمّی تغییرات جانبی مجرا

میانگین آهنگ مهاجرت مجرای بازهٔ مورد مطالعه از رودخانهٔ ارس در حدود ۸ متر است که رقم چشمگیری است و از این نظر به احتمال زیاد پویاترین رودخانهٔ شمال‌غرب کشور و یکی از پویاترین رودخانه‌های ایران است. در هر یک از ترانسکت‌ها، میانگین آهنگ مهاجرت به‌صورت جداگانه محاسبه شد (جدول ۳). در شکل (۸) روش محاسبهٔ آهنگ مهاجرت مجرا در بخشی از ترانسکت ۱٦ نشان داده شده است. بیشترین مقدار میانگین جابه‌جایی جانبی مجرا با مقدار بسیار قابل توجه ۲٤/۷ متر، مربوط به ترانسکت شمارهٔ ۱۳ است که نتیجهٔ آن افزوده‌شدن بیش از ۹۷ هکتار زمین به طرف ایران و به همین نسبت از دست رفتن زمین از طرف ج.آذربایجان است. در این ترانسکت، رودخانه از یک‌طرف از نوع مئاندری توسعه‌یافته است و در طی دورهٔ مورد مطالعه، چندین میانبُر ایجاد شده است و از طرف دیگر، در این ترانسکت در طی دورهٔ مورد مطالعه تغییرمسیر مجرا (به‌طول حدود ۲ کیلومتر) اتفاق افتاده است. با مقایسهٔ مقادیر میانگین زاویهٔ مرکزی و آهنگ مهاجرت مجرا، در ترانسکت‌هایی که پلان‌فرم رودخانه از نوع مئاندری توسعه‌یافته است (مانند ترانسکت شمارهٔ ٤، ۱۳، ۱٦)، به‌دلیل ایجاد میانبُر و تغییرمسیر، مجرا از آهنگ جابه‌جایی بالاتری برخوردار بوده است؛ اما در ترانسکت‌های محدودی که در آن مسیر رودخانه گرایش به یک الگوی مستقیم دارد (مانند ترانسکت‌های ۳ و ۹) یعنی دارای مقادیر ضریب خمیدگی و زاویهٔ مرکزی کمتری هستند، میزان جابه‌جایی نیز کمتر بوده است.



شکل۸- روش محاسبهٔ آهنگ مهاجرت مجرا (قسمتی از ترانسکت ۱٦)

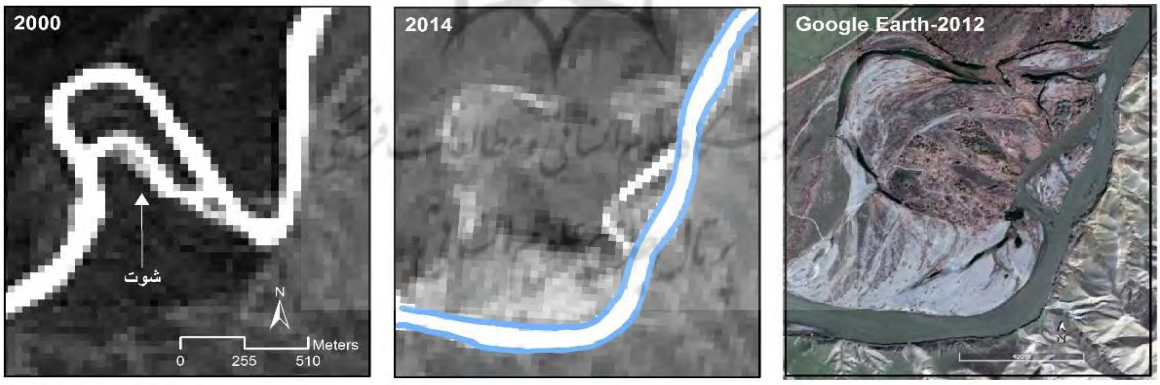
در منطقهٔ مورد مطالعه، تغییرات مجرا با توجه به روند گذشته به سه دلیل عمده اتفاق افتاده است: ۱- مهاجرت مجرا در دشت سیلابی به‌واسطهٔ فرسایش کناره مقعّر حلقه‌های[1] مئاندرها که با توجه به شرایط محلی از شدت و ضعف برخوردار بوده است، ۲- ایجاد میان‌بُرها به‌واسطهٔ پیشروی و نزدیک‌شدن پایه مئاندرها، که آثار آن به‌صورت کانال‌های متروک قابل مشاهده است (برای نمونه، شکل‌های ۹ و ۱۰)، و ۳- تغییر مسیر[2] بخشی از مجرای رودخانه که به‌عنوان نمونه باید به ترانسکت ۱۳ اشاره کرد که یک تغییر مسیر به طول حدود ۲ کیلومتر در آن دیده می‌شود. در واقع، مقادیر زیاد و غیرمعمول آهنگ مهاجرت در برخی از ترانسکت‌ها مربوط به این تغییر مسیرهاست تا فرسایش کناره. ازاین‌رو، در بازهٔ مورد مطالعهٔ رودخانهٔ ارس، تغییر مسیر مجرا، مخاطره‌ای جدی محسوب شود و از طرفی، مسائل مختلفی را در رابطه با خط مرزی ایجاد می‌کند. تغییر مسیر، تغییر ناگهانی مسیر یک رودخانه است. در طی این فرایند، یک مجرا متروک و مجرایی جدید ایجاد می‌شود. شوم (۲۰۰۵) علل بنیادین تغییر مسیرها (یعنی آن‌دسته از فرایندها یا رخدادهایی که رودخانه را به یک آستانهٔ تغییر مسیر هدایت می‌کنند) را در چهار گروه سازماندهی می‌کند (جدول٤). در این رابطه، برای رودخانهٔ ارس داده‌های ضروری به‌دلیل مرزی‌بودن بسیار محدود است؛ اما تغییرمسیرهای صورت‌گرفته در مجرای رودخانه را می‌توان تا حد زیادی به افزایش سینوزیته (گروه ۱) و رخداد سیلاب‌ها مخصوصاً در فصل بهار و تأثیر تلاقی‌ها (گروه ۳) نسبت داد.

جدول٤- علل تغییر مسیر مجرا (Schumm, 2005: 31)

[1] - Loops
[2] - Avulsion

		توانایی کانال برای حمل رسوب و آب
فرایندها و رخدادهایی که ناپایداری ایجاد می‌کنند و به تغییر مسیر منجر می‌شوند.		
گروه ۱- تغییر مسیر ناشی از افزایش در نسبت S_a/S_e، به‌دلیل افزایش در S_e	الف- افزایش سینوزیته (کاهش شیب)	کاهش
	ب- رشد دلتا (افزایش طول کانال)	کاهش
	ج- پایین‌رفتن سطح اساس (که منجر به کاهش شیب شود)	کاهش
	د- بالاآمدگی تکتونیکی (که منجر به کاهش شیب شود)	کاهش
گروه ۲- تغییر مسیر ناشی از افزایش در نسبت S_a/S_e، به‌دلیل افزایش در S_a	الف- رشد خاکریز طبیعی یا پشته آبرفتی	بدون تغییر
	ب- رشد مخروط‌افکنه و دلتا (تحدب)	بدون تغییر
	ج- تکتونیسم (که منجر به کجی یا انحراف جانبی شود)	بدون تغییر
گروه ۳- تغییر مسیر بدون هیچ تغییری در نسبت S_a/S_e	الف- تغییر هیدرولوژیک در دبی اوج سیلاب	کاهش
	ب- افزایش بار رسوب	کاهش
	ج- دست‌اندازی پوشش گیاهی	کاهش
	د- موانع چوبی	کاهش
	و- موانع یخی	کاهش
گروه ٤- سایر تغییر مسیرها	الف- لگدمال کردن حیوانات	بدون تغییر
	ب- اسارت (انحراف به آبریز مجاور)	بدون تغییر

S_a شیب پتانسیل تغییر مسیر و S_e شیب کنونی کانال است.



شکل ۹- ایجاد میان‌بُر باعث جابه‌جایی جانبی مجرا با مقدار جابه‌جایی بیش از ۱ کیلومتر در قسمتی از ترانسکت ۱ شده است.

سوای از مسائل حقوقی مربوط به معاهدات مرزی بین دو کشور ایران و آذربایجان، جابه‌جایی جانبی مجرا مخصوصاً تغییرمسیرها ممکن است برای هر دو کشور مسائل مختلفی مانند ازدست‌رفتن اراضی را موجب شود. جابه‌جایی عرضی مجرا باعث تغییر مساحت ترانسکت‌ها در دو طرف رودخانه شده است. در جدول (۳)، مقادیر تغییرات در مساحت

ترانسکت‌های طرف راست و چپ مجرا با ارقام مثبت و منفی ذکر شده است. برای نمونه؛ مقادیر ترانسکت ۱ (T1) نشان می‌دهد، از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱٤ میلادی مجرای رودخانه در این محدوده، بیشترین جابه‌جایی را به سمت راست یا طرف ایران انجام داده است که درنتیجهٔ آن ۸۸ هکتار از اراضی طرف ایران از دسترس خارج شده و به‌همین نسبت به اراضی طرف آذربایجان افزوده شده است. بیشترین میزان تغییر مساحت مربوط به ترانسکت ۱۳ با مقدار نزدیک به ۹۷ هکتار به نفع اراضی طرف ایران بوده است. در کل، در طی دورهٔ ۱٤ساله، در حدود ۲۵۳ هکتار از اراضی طرف ایران، درنتیجهٔ تغییرات مجرا از دسترس خارج (به‌خصوص در ترانسکت ۱ با مقدار ۸۸ هکتار و ترانسکت ٤ با مقدار ٦۹ هکتار) و در حدود ۲۷۵ هکتار به اراضی موجود افزوده شد (به‌خصوص در ترانسکت ۱۳ با مقدار ۹۷ هکتار و ترانسکت ۱۹ با مقدار ٦۰ هکتار).

شکل ۱۰- کانال متروک در حاشیهٔ رودخانهٔ ارس

شکل ۱۱- جریان گل‌آلود رودخانهٔ ارس و سازندهای فرسایش‌پذیر کناره

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روابط و شاخص‌هایی، پلان‌فرم و تغییرات عرضی بازه‌ای از مجرای رودخانهٔ ارس به طول ۹۵/۵ کیلومتر بررسی شد. رودخانه با توجه به روند تغییرات مورفولوژیکی مجرا به ۲۱ ترانسکت و با توجه به ژئومورفولوژی منطقه به دو بازهٔ کوهستانی (از ترانسکت ۱ تا ۱۵) و دشت (از ترانسکت ۱٦ تا خروج رودخانه از محدودهٔ سیاسی ایران) تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد، پلان‌فرم رودخانهٔ ارس در بازهٔ دشت به‌طور کامل از الگوی مئاندری پیروی می‌کند؛ اما در بازهٔ کوهستانی، درعین حال که روند کلی رودخانه الگوی مئاندری دارد، با این حال، در برخی ترانسکت‌ها از الگوی تقریباً مستقیم تبعیت می‌کند. الگوی مستقیم فقط در مسافت محدودی از کانال تداوم می‌یابد و به‌سرعت به الگوی سینوسی یا مئاندری تبدیل می‌شود. مقایسهٔ مقادیر میانگین ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی مجرای رودخانه در محدودهٔ هر ترانسکت برای دو دورهٔ زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱٤ میلادی، نمایانگر روند افزایشی برای بیشتر ترانسکت‌هاست که فعال‌بودن مئاندرهای رودخانه را نشان می‌دهد. تغییرات مجرا عمدتاً به‌دلیل فرسایش کناره و درنتیجه مهاجرت مجرا، ایجاد

میان‌بُرها و تغییر مسیر بوده است. در مواردی نیز ترکیب این موارد همراه با دخالت مواردی مانند تأثیر تلاقی‌ها، باعث شده است که میزان جابه‌جایی مجرا بسیار چشمگیر و غیرعادی شود که می‌توان به ترانسکت‌های ٤، ١٣، ١٨ و ١٩ اشاره کرد. برعکس، در موارد محدودی که الگوی رودخانه از نوع مستقیم است یا حلقه‌های مئاندر در مراحل ابتدایی شکل‌گیری هستند، تغییرات در مقایسه با سایر ترانسکت‌ها کند بوده است؛ مانند ترانسکت‌های ٧ و ١٥. در طی ١٤ سال گذشته، میانگین آهنگ جابه‌جایی مجرای رودخانه در حدود ٨ متر در سال بوده و از این نظر بسیار دینامیک است. همچنان‌که وینتربوتوم[1] (٢٠٠٠) و لوین[2] و همکاران (١٩٨٨)، تعادل دینامیک در یک مجرای رودخانه را توصیف کردند، به‌طوری‌که به موجب آن، یک مجرا نسبت به رژیم دبی خود تنظیم می‌شود[3] و اگرچه فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری تداوم می‌یابند، اما فرم کلی حفظ می‌شود و یک الگوی پایدار دینامیکی ایجاد می‌کند. برای رودخانهٔ مورد مطالعه نیز با اینکه مجرا به‌طور مدام از طریق مهاجرت جانبی، ایجاد میان‌بُرها و تغییر مسیر دستخوش تغییراتی می‌شود (و در آینده نیز بی‌شک این تغییرات تداوم خواهد یافت)، اما در سال ٢٠١٤ نسبت به سال ٢٠٠٠ تغییرات چندانی در پلان‌فرم مجرا رخ نداده است و کاهش یا افزایش تعداد قوس‌ها، ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، نتیجهٔ عملکرد طبیعی رودخانه‌های مئاندری است؛ درنتیجه، رودخانه نزدیک به حالت تعادل دینامیک است.

[1] - Winterbottom
[2] - Lewin
[3] - adjusted

منابع

ارشد، صالح؛ مرید، سعید؛ میرابوالقاسمی، هادی، (١٣٨٦). بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور: مطالعهٔ موردی رودخانهٔ کارون از گتوند تا فارسیات (٨٢-١٣٦٩)، مجلهٔ علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد چهاردهم، شمارهٔ ششم، صص ١٩٥-١٨٠.

اسماعیلی، رضا؛ حسین‌زاده، محمدمهدی؛ متولی، صدرالدین، (١٣٩٠). تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، انتشارات مؤسسهٔ انتشاراتی لاهوت، چاپ اول.

تلوری، عبدالرسول، (١٣٧٣). رودخانه‌ها و مشخصات هندسی آنها. انتشارات تحقیقات جهاد کشاورزی.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، اصغر، (١٣٩١). بررسی الگوی پیچان‌رودی رودخانهٔ قزل‌اوزن با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، جغرافیا (فصلنامهٔ علمی- پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، سال دهم، شمارهٔ ٣٤، صص ١٠٢-٨٥.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، اصغر، (١٣٩١). بررسی تغییرات الگوی هندسی رودخانهٔ قزل‌اوزن با استفاده از تحلیل هندسه فراکتال، نشریهٔ علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، سال ١٦، شمارهٔ ٤٠، صص ١٣٩-١١٩.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد، (١٣٩١). بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانهٔ قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین‌شناسی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شمارهٔ ٢، صص ١٤-١.

رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ پیروزی‌نـژاد، نوشـین، (۱۳۹۳). بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانهٔ گاماسـیاب از سـال ۱۳۳٤ تـا ۱۳۸۹. نشـریهٔ علمـی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۸، شـمارهٔ ٤۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.

مقصودی، مهران؛ شرفی، سـیامک؛ مقـامی، یاسـر، (۱۳۸۹). روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانهٔ خرم‌آبـاد بـا اسـتفاده از RS، GISوو Auto Cad، مـدرس علـوم انسـانی- برنامـه‌ریـزی و آمـایش فضـا، دورهٔ چهاردهم، شمارهٔ ۳، صص ۲۹٤-۲۷۵.

یمانی، مجتبی؛ دولتـی، جـواد؛ زارعـی، علیرضـا، (۱۳۸۹). تـأثیرگـذاری عوامـل هیـدروژئومورفیک در تغییـرات زمانی و مکانی بخش میانی رودخانهٔ اتـرک، فصـلنامهٔ تحقیقات جغرافیایی، شمارهٔ ۹۹، صص ۲٤-۱.

یمانی، مجتبی؛ فخری، سـیروس، (۱۳۹۱). بررسـی عوامـل مؤثر در تغییرات الگـوی رودخانـهٔ جگـین در جلگـه ساحلی مکران، جغرافیـا (فصـلنامهٔ علمـی- پژوهشـی انجمـن جغرافیـای ایـران)، دورهٔ جدیـد، سـال دهـم، شمارهٔ ۳٤، صص ۱۵۹-۱٤۱.

Aswathy, M. V., Vijith, H., & Satheesh, R. (2007). Factors influencing the sinuosity of Pannagon River, Kottayam, Kerala, India: An assessment using remote sensing and GIS. Environmental Monitoring and Assessment, 138:173˚180.

Fryirs, Kirstie A & Brierley, Gary J. (2013). Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape. Wiley-Blackwell. 345p.

Garde, R.J. (2006). River morphology. New Age International (P) Ltd., Publishers. 479p.

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.

Heo, J., Duc, T.A., Cho, H.S., Choi, S.U. (2009). Characterization and prediction of meandering channel migration in the GIS environment: A case study of the Sabine River in the USA. Environmental Monitoring and Assessment. Volume 152, Issue 1-4, pp 155-165.

Huggett, Richard. (2011). Fundamentals of geomorphology. Third edition. Routledge. New York.

Kondolf, G. Mathias & Piegay, Herve. (2003). Tools in fluvial geomorphology. John Wiley & Sons Ltd. 688 P.

Lauer, J. Wesley. (2006). NCED Stream Restoration Toolbox, Channel plan form Statistics. National center for earth-surface dynamics.

Lewin, J., Macklin, M.G., Newson, M.D. (1988). Regime theory and environmental change irreconcilable concepts? In: White, W.R. Ed., International Conference on River Regime, Wiley: 431-45, New York.

Magdaleno, Fernando and Yuste, Jose A. Fernandez. (2011). Meander dynamics in a changing river corridor. Geomorphology, Vol. 130, pp. 197-207.

Pires-Luiz, Carlos. H and Maillard, Philippe. (2010). Inferring fluctuations of the aquifer by monitoring the area of small lakes in a Brazilian savanna region using a temporal sequence of 50 Landsat images. ISPRS TC VII Symposium ˚ 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5˚7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B. pp. 463-468.

Rapp, R. G. Cygnia and Abbe, Timothy B. (2003). A framework for delineating channel migration zones. Ecology final draft publication.

Schumm, Stanley A. (2005). River variability and complexity. Cambridge University Press. 220p.

Sear, David A., Newson, Malcolm D., Thorne, Colin R. (2003). Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology, R&D Technical Report FD1914. Defra. London. 233p.

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.

Winterbottom, Sandra. J. (2000). Medium and short-term channel platform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. Geomorphology, Vol. 34, PP. 195˚208.

Wohl, Ellen. E. (2004). Disconnected rivers: linking rivers to landscapes. Yale University.

Xu, Hanqiu. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, Vol. 27, No. 14, PP. 3025˚3033.

Xu, Hanqiu. (2007). Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 73, No. 12, PP. 1381-1391.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی