

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)

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam ^{1*}, Mansour Keirizadeh ², Masoud Rahimi ³

¹ Ph.D., Professor of Geomorphology, Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Ph.D., Graduated from Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Ph.D. Student, Dept. of Geomorphology, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Rivers through production, movement and storage of sediments are one of the most important factors that are modifying the earth's surface. Historically, some rivers selected as the boundary 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 Iran's border, are investigated in two time periods, 2000 and 2014. This river has a great 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.

Key words: Morphology, Channel, Lateral Migration, Meander, Avulsion, Aras River.

* Rezmogh@Tabrizu.ac.ir

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

محمدحسین رضائی مقدم^{*}: استاد ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
منصور خیری‌زاده آروق: دانش‌آموخته دکترای ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
مسعود رحیمی: دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۱۰/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۹، صص ۳۲-۱۵

چکیده

رودخانه‌ها به دلیل برداشت، انتقال و نهشته‌گذاری رسوبات، یکی از مهم‌ترین عوامل تغییردهنده 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 مسائلی مختلفی را موجب می‌شود. رودخانه ارس در زمره چنین رودخانه‌هایی به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، قسمتی از رودخانه ارس از نظر جابه‌جایی جانبی مجرا در دو دوره زمانی ۱۳۷۹ ه.ش (۲۰۰۰ م) و ۱۳۹۳ ه.ش (۲۰۱۴ م) بررسی شد. در این راستا، با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر سنجنده‌های ETM+ و OLI ماهواره‌های لندست ۷ و ۸) مجرای رودخانه برای دو دوره زمانی مورد مطالعه حاصل شد. سپس با توجه به مورفولوژی و روند تغییرات مجرا، کل رودخانه به ۲۱ ترانسکت تقسیم شد. پلان‌فرم رودخانه در هر ترانسکت با استفاده از دو شاخص ضریب خمیدگی و زاویه 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، رودخانه ارس در بازه مورد مطالعه از نوع متاندیری توسعه‌یافته است. مقادیر ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در سال ۲۰۱۴ نسبت به سال ۲۰۰۰، روند افزایشی را نشان می‌دهد که گویای فعال‌بودن متاندرهای رودخانه است. متوسط آهنگ مهاجرت مجرا، رقم چشمگیری در حدود ۸ متر را نشان می‌دهد و از این نظر رودخانه بسیار پویایی محسوب می‌شود. جابه‌جایی مجرا در رودخانه مورد مطالعه به دلیل فرسایش و پیشروی کناره مقعر متاندرها، ایجاد میان‌بُرها و مخصوصاً تغییر مسیر بوده است. در قسمت‌هایی از رودخانه که زاویه مرکزی دارای مقادیر بالایی است، مقدار آهنگ مهاجرت مجرا ارقام چشمگیری را نشان می‌دهد. برعکس، در قسمت‌هایی که رودخانه گرایش به یک‌الگوی مستقیم دارد، آهنگ جابه‌جایی کمتر بوده است. در طی دوره ۱۴ ساله، در حدود ۲۵۳ هکتار از اراضی ایران در نتیجه تغییرات مجرا از دسترس خارج شده و برعکس در حدود ۲۷۵ هکتار به اراضی در دسترس افزوده شده است و از این‌رو، نزدیک به ۲۳ هکتار به اراضی طرف ایران اضافه شده است.

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

۱- مقدمه

دبی در نتیجه فعالیت‌های انسانی به وجود می‌آیند (Garde, 2006: 315).

مطالعه تغییرات تاریخی کانال، بخش مهمی از شناخت سیستم‌های رودخانه‌ای است. فقط به واسطه 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 از قبیل 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 پلان فرم (شکل مسطحاتی)، شکل مقاطع عرضی و نیمرخ طولی کانال رودخانه را تعریف می‌کند. همچنین، شامل اطلاعاتی درباره دشت سیلابی از قبیل عرض، شیب و عوارضی همچون تراس‌هاست. در مقیاس بزرگتر، اطلاعات مورفولوژیکی به تعاریف شبکه رودخانه و حوضه زهکشی تعمیم داده می‌شود. بسیاری از داده‌های مورفولوژیکی از روی نقشه‌های توپوگرافی موجود، عکس‌های هوایی و به صورت روزافزونی داده‌های سنجش از دور استخراج می‌شوند (Sear et al., 2003: 22). در این پژوهش، جابه‌جایی جانبی بخشی از مجرای رودخانه ارس از ۱۵ کیلومتری غرب شهر اصلاندوز تا خروج رودخانه از محدوده سیاسی ایران بررسی شده است. این رودخانه علاوه بر اهمیت

سیستم رودخانه‌ای به صورت پیش‌رونده^۱ در طی زمان زمین‌شناسی، در نتیجه فرایندهای عادی فرسایش و رسوب‌گذاری تغییر می‌کند و نسبت به تغییرات اقلیم، سطح اساس، تکتونیک و تأثیرات انسانی پاسخ می‌دهد. از این رو، در طی 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^۲ 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 به وقوع می‌پیوندد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۱: ۱). خودتنظیمی^۳ و تغییرپذیری^۴ مجرای رودخانه‌ها ممکن است خطرهایی برای انسان‌ها به صورت سیلاب‌ها، فرسایش کناره یا آبستگي بستر ایجاد کنند (Wohl, 2004: 29). لوین^۵ (۱۹۷۷) تغییرات مجرا را به دو نوع تغییرات درون‌زاد^۶ و تغییرات برون‌زاد^۷ تقسیم‌بندی می‌کند. تغییرات درون‌زاد به صورت ذاتی در رژیم رودخانه وجود دارند که می‌توان به تغییر مسیر^۸، مهاجرت مجرا^۹ و میان‌برها^{۱۰} اشاره کرد. تغییرات برون‌زاد، مواردی هستند که در پاسخ به تغییرات سیستم از جمله نوسانات اقلیمی و تغییر بار رسوب یا

1 - progressively

2 - wholesale

3 - self-adjustment

4 - variability

5 - Lewin

6 - autogenic

7 - allogeneic

8 - avulsion

9 - channel migration

10 - cut-offs

استفاده از هندسه فراکتال به تحلیل تغییرات الگوی هندسی بخشی از رودخانه 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. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی نقش عوامل ژئومورفیک و زمین‌شناختی بر شکل هندسی رودخانه قزل‌اوزن و علل خمیدگی بستر در بازه دشتی و کوهستانی پرداختند. نتیجه این پژوهش نشان داد، طول زیاد رودخانه و عبور از تشکیلات مارنی و فرسایش‌پذیر، باعث شده است که هندسه رودخانه در بازه دشتی به شدت با تأثیر از لیتولوژی بستر شکل بگیرد و فرسایش کناری و توان رودخانه نقش عمده در ماندیری شدن رودخانه داشته باشد. در بازه کوهستانی مسائل زمین‌ساختی اهمیت دارد. یمانی و فخری (۱۳۹۱) در پژوهشی، تغییرات مجرای رودخانه جگین در سطح جلگه ساحلی مکران را بررسی کردند. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرودینامیکی مسیر این رودخانه از جمله شیب کم دلتا، ریزدانه بودن رسوبات، طغیانی بودن رودخانه و عوامل تکتونیکی، از عوامل اصلی ناپایداری مجرای رودخانه جگین هستند. رضایی مقدم و پیروزی‌نژاد (۱۳۹۳) به بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره در رودخانه گاماسیاب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سطوح فرسایش‌یافته در رودخانه گاماسیاب بیشتر از سطوح رسوب‌گذاری شده است و این به دلیل جابه‌جایی و تغییر مسیر رودخانه بوده است؛ به طوری که رودخانه در بعضی از قسمت‌ها بیش از ۴۰۰ متر جابه‌جایی داشته است.

۱-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه ارس به طول ۹۱/۵ کیلومتر در محدوده بین ۱۵ کیلومتری غرب شهر

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 در نتیجه پژوهش در زمینه تغییرات جانبی رودخانه ضرورت می‌یابد.

در خصوص پیشینه پژوهش، منابعی غنی در دسترس است. دانشمندان شاغل در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، مورفولوژی کوتاه‌مدت کانال‌های رودخانه را مطالعه کردند که از جمله می‌توان به لانگبین^۱، لئوپلد^۲ و ولمن^۳ اشاره کرد. شوم^۴، موسلی^۵ و ویور^۶ سیستم‌های رودخانه‌ای را مطالعه کردند و آزمایشاتی را در محیط‌های آزمایشگاهی برای مطالعه مورفولوژی رودخانه انجام دادند. آلن^۷ کارهای گسترده‌ای در خصوص ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اشکال بستر و ساختمان‌های رسوبی با در نظر گرفتن دلتاها، مئاندرها و دشت‌های سیلابی انجام داده است. پژوهشگران بسیاری از جمله گرگوری^۸، لوین، بیکر^۹ و استارکل^{۱۰} اثرات اقلیم و هیدرولوژی دیرینه را بر روی کانال‌های رودخانه بررسی کردند (Garde, 2006: 9). ارشد و همکاران (۱۳۸۶)، روند تغییرات مورفولوژیکی بخشی از رودخانه کارون را براساس تصاویر ماهواره‌ای مطالعه کردند. یمانی و همکاران (۱۳۸۹)، عوامل ژئومورفولوژیک مؤثر بر تغییرات بستر بخش میانی رودخانه اترک و دامنه این تغییرات را تحلیل کردند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) با

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

تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ (مربوط به تابستان ۲۰۰۰م) و تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ (مربوط به تابستان سال ۲۰۱۴م) مهم‌ترین مواد این پژوهش هستند. مجرای بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس برای دو دوره زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ 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^۲، تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۳ و استفاده از شاخص‌های مختلفی مانند تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده^۴ (NDVI)، شاخص آب^۵ (WI)، شاخص تفاضل آب نرمال شده^۶ (NDWI) و شاخص اصلاحی تفاضل آب نرمال شده^۷ (MNDWI) اشاره کرد (Xu, 2007: 1381-1391, Pires-Luiz & Maillard, 2010: 463-468, Xu, 2006: 3025-3033 (شکل ۲):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{WI} = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{B_4 + B_5 + B_7} \quad \text{رابطه (۲)}$$

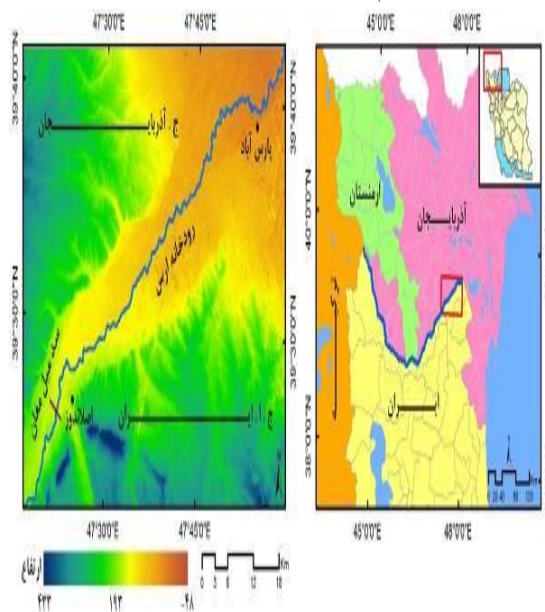
$$\text{NDWI} = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط بالا NIR باند مادون قرمز نزدیک؛ MIR یک باند مادون قرمز میانی؛ Red باند قرمز؛ Green باند سبز و B_i شماره باند در تصاویر ETM+ است.

قبل از اعمال نسبت‌های بانندی برای استخراج

اصلاندوز تا خروج رودخانه از محدوده سیاسی ایران است (شکل ۱). این منطقه با مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 22' 00''$ تا $40^{\circ} 42' 00''$ عرض شمالی و $30^{\circ} 15' 00''$ تا $47^{\circ} 59' 30''$ طول شرقی در امتداد نوار مرزی ایران و آذربایجان واقع شده است. رودخانه ارس یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران است. این رودخانه از ارتفاعات بین‌گول‌داغ ترکیه سرچشمه گرفته است و پس از پیمودن مسافتی در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر به رود کورا و در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه بیش از ۴۰۰ کیلومتر از مرز مشترک ایران با جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان را ترسیم می‌کند.



شکل ۱- موقعیت منطقه 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^۱ و تصاویر ماهواره‌ای شامل

^۲ - Tasseled Cap

^۳ - Principal Components

^۴ - Normalized difference water index (NDVI)

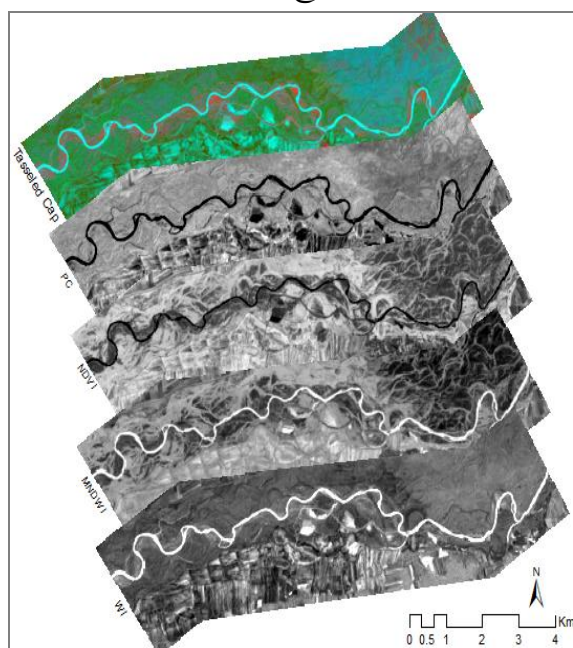
^۵ - Water index

^۶ - Normalized difference water index (NDWI)

^۷ - Modified Normalized difference water index (MNDWI)

^۱ - ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

اهداف پژوهش هستند. جابه‌جایی جانبی مجرای رودخانه ارس در بازه مورد مطالعه، یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات منطقه محسوب می‌شود، به طوری که در بازه‌های مختلف این رودخانه، صحت از ده‌ها و حتی صدها متر جابه‌جایی مجرا فقط در طی چند سال است. در واقع، 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 دوره 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 مائدرها به وضوح قابل تشخیص است.

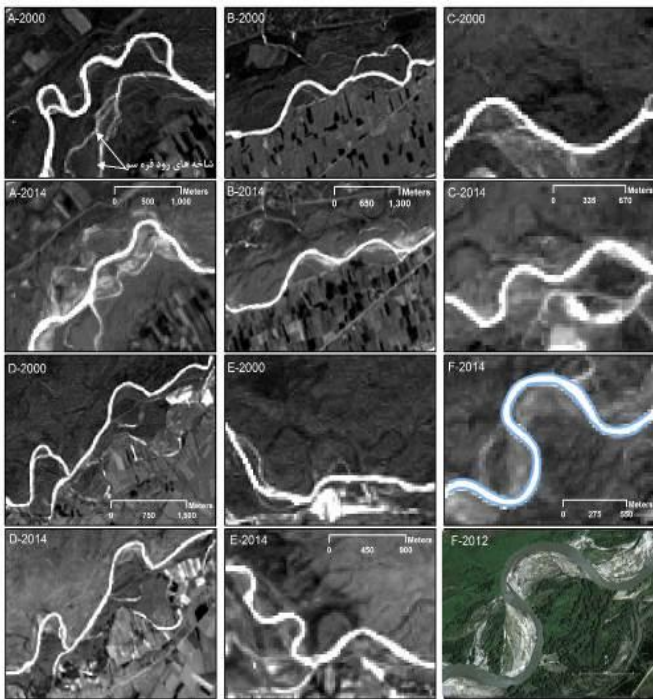


شکل ۲- بارزسازی مجرای رودخانه با استفاده از شاخص‌های مختلف در محدوده ترانسکت‌های ۱۷ تا ۲۰

روش‌های مختلفی برای بررسی تغییرات و جابه‌جایی‌های صورت گرفته در مجرای رودخانه

شاخص‌های فوق، باندهای موردنیاز با استفاده از باند پانکروماتیک تصاویر لندست با قدرت تفکیک ۱۵ متر (باندها) 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 در نتیجه، مبنای استخراج مجرا قرار گرفت. به دو دلیل عمده، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای بررسی جابه‌جایی عرضی مجرای بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس مناسب هستند: نخست اینکه، عرض مجرای رودخانه ارس در بازه مورد مطالعه در بیشتر قسمت‌ها بیش از ۸۵ متر است. به طوری که، مقایسه خطوط کناره استخراج شده از شاخص WI مربوط به سال ۲۰۱۴ با تصویر گوگل‌ارث منطقه (در قسمت‌هایی که تغییرات اندکی بین فاصله زمانی دو ساله اتفاق افتاده) نشان‌دهنده انطباق نسبتاً خوب خطوط کناره مجرا با تصویر گوگل‌ارث است. به خصوص، در قسمت‌های عریض تر مجرا، دقت‌های نسبتاً بالایی دیده می‌شود؛ دوم اینکه، میزان جابه‌جایی عرضی مجرای بازه مورد مطالعه بسیار چشمگیر است که خود را به صورت ایجاد میان‌برها و تغییر مسیر نشان داده است. به طوری که، کانال‌های متروک و نعل‌اسبی در حاشیه مجرا بسیار معمول است که در شرایط مناسب، دریاچه‌های نعل‌اسبی نیز تشکیل شده است (برای مثال در شکل ۳ در تصاویر C و D دریاچه‌های نعل‌اسبی به دلیل وجود آب، به صورت سفیدرنگ دیده می‌شوند). بنابراین، به دلیل عریض بودن و پویایی زیاد مجرا، استفاده از این تصاویر پاسخگوی

^۱ - Image Sharpening



شکل ۳- جابه‌جایی‌های چشمگیر در قسمت‌های مختلف مجرای رودخانه ارس در نتیجه مهاجرت مائدرها، ایجاد میان‌بُرها و تغییر مسیر مجرا در دو دوره زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴م؛ در دو تصویر F، مجرای رودخانه حاصل از شاخص WI و تصویر Google Earth با فاصله زمانی دوساله مقایسه شده است (اختلافات زیاد عرض مجرا در تصاویر به دلیل نمایش تصاویر با مقیاس‌های مختلف است).

برای تحلیل شکل مسطحاتی^۴ 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 رابطه زیر برای هر قوس تعیین می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۹۴-۲۷۵ و رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۲-۸۵):

وجود دارد که می‌توان به تحلیل پلیگون^۱، روش شعاع انحنا^۲ و روش ترانسکت^۳ 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 از این رو می‌توان جابه‌جایی‌های مجرا نسبت به این خطوط را به صورت کمی محاسبه کرد. هنگامی که 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 بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس براساس مورفولوژی و روند تغییرات مجرا به ۲۱ ترانسکت تقسیم‌بندی (شکل ۴) و شاخص‌های کمی برای هر ترانسکت محاسبه شد.

^۴ - platforms

^۱ - Polygon Analysis

^۲ - Radius of Curvature

^۳ - Transect Method

165). به این دلیل، در مطالعه کنونی، شیوه‌های مبتنی بر GIS برای ارزیابی تاریخی و پیش‌بینی مهاجرت خم استفاده قرار می‌شود. برای محاسبه آهنگ جابه‌جایی کانال از رابطه زیر استفاده می‌شود (Giardino & Lee, 2011: 8., Shields et al, 2000:) (54-66., Magdaleno and Yuste, 2011: 197-207

$$R_m = (A / L) / y \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن: R_m آهنگ مهاجرت؛ A مساحت موجود بین دو خط مرکزی کانال؛ L طول خط مرکزی کانال در زمان t ؛ و y تعداد سال است. در این زمینه، برای افزایش دقت کار در رابطه با محاسبه 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 مشخص‌کننده نوع فرایندهای حاکم بر مجرای رودخانه است؛ برای نمونه، یک مجرای گیسوئی نشان‌دهنده نرخ‌های بالای انتقال رسوب و ذخیره 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^۴، متاندری^۵، گیسوئی^۶ و شریانی^۷ طبقه‌بندی می‌شود.

³ - Add In

⁴ - Straight

⁵ - Meandering

⁶ - Braided

⁷ - Anastomosed

$$P = \frac{L}{\lambda/2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

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

زاویه مرکزی کورنیس^۱، معیاری برای تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه متاندری یک رودخانه است. این ضریب به دو روش محاسبه می‌شود؛ در روش اول با در اختیار داشتن طول قوس و شعاع خمیدگی با استفاده از رابطه زیر، زاویه مرکزی قوس اندازه‌گیری می‌شود:

$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه A زاویه 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). در نهایت، متوسط آهنگ مهاجرت مجرا در طی ۱۴ سال گذشته محاسبه شد. سه روش برای پیش‌بینی مهاجرت متاندر وجود دارد: شیوه‌های همپوشانی دستی، شیوه‌هایی که با کامپیوتر پشتیبانی می‌شوند و شیوه‌های اندازه‌گیری و برون‌یابی^۲ مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی. در این میان، شیوه‌های مبتنی بر GIS به‌واسطه 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-)

¹ - Kornis

² - extrapolation

نتیجه فرسایش کناره و ایجاد میان‌برها به کرات و با آهنگ نسبتاً بالایی صورت می‌گیرد. رودخانه ارس در بازه کوهستانی از طرف کشور آذربایجان چهار شعبه مهم دریافت می‌کند؛ اما از طرف ایران انشعاب مهمی که توانسته تا حدی بر روی خطالسیر مجرا تأثیرگذار باشد، رودخانه دره‌رود (قره‌سو) است که در محل ترانسکت شماره ۴ به رودخانه 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 قابل توجه پهنا و عمق گرفته تا تغییر شکل یعنی تغییر کامل خصیصه مجرا در پی دارد (Schumm, 2005: 104). در منطقه مورد مطالعه با توجه به توان زیاد مجرای رود ارس، تأثیر تلاقی‌ها به صورت انحراف خطالسیر مجرا به واسطه شکل‌گیری مخروط‌افکنه‌ها ظاهر شده است. هرچند برخی از تغییر مسیرهای مجرا را می‌توان به تأثیر تلاقی‌ها نسبت داد.

به‌طور طبیعی، کانال‌های مستقیم بازه‌های نسبتاً کوتاهی از یک شبکه رودخانه را در برمی‌گیرند، در صورتی که سایر انواع کانال‌ها ممکن است تا چندین کیلومتر امتداد داشته باشند (Sear et al, 2003: 61). کانال‌های مئاندری از طریق مجموعه‌ای از خم‌ها^۱ و مقاطع سینوسی مشخص می‌شوند. اگرچه پلان‌فرم ممکن است مئاندری باشد، اما این بدین معنی نیست که رودخانه به‌طور فعال در حال فرسایش خم‌های خارجی و مهاجرت در دشت سیلابی است. از این نظر، کانال‌های 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 رودخانه ارس براساس تغییرات مورفولوژیکی مجرا به ۲۱ ترانسکت تقسیم‌بندی شد (شکل ۴). رودخانه از منظر ژئومورفولوژی منطقه نیز به دو بازه کوهستانی با دشت سیلابی توسعه‌یافته (از ترانسکت ۱ تا ترانسکت ۱۵) به طول تقریبی ۵۹ کیلومتر و بازه دشت (از ترانسکت ۱۶ تا انتها) به طول تقریبی ۳۲/۵ کیلومتر تقسیم‌بندی می‌شود. در حالت کلی، بازه مورد مطالعه از رودخانه 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

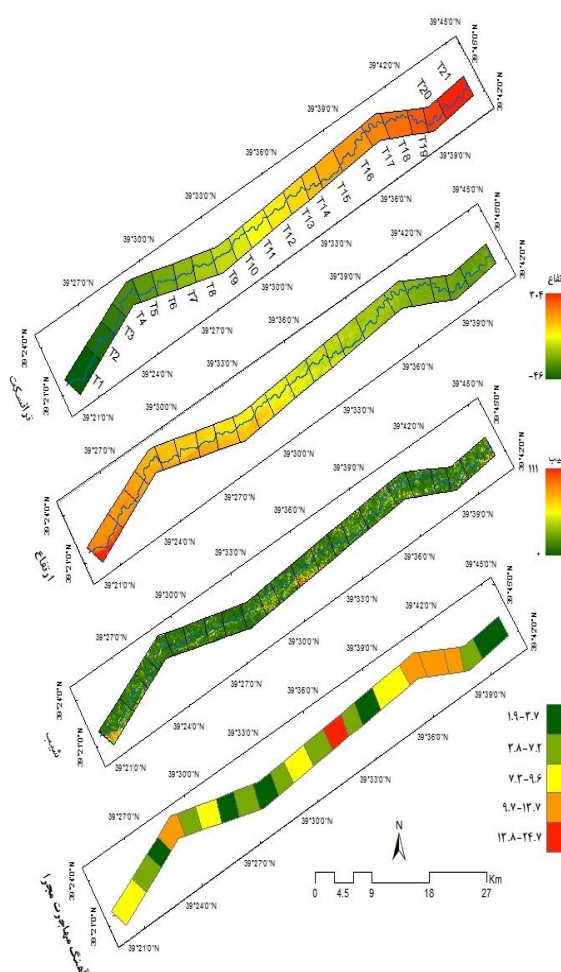
¹ - Bends

الگوی رودخانه	مئاندري شديد	مئاندري	سينوسى	مستقيم
---------------	--------------	---------	--------	--------

جدول ۲- میزان توسعه قوس‌های مئاندر براساس اندازه زاویه مرکزی (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۱۲، مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۹۴-۲۷۵، یمانی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۴۳-۱۲۵).

شکل رودخانه	زاویه مرکزی (درجه)
رودخانه شبه‌پیچان رود	۴۱ >
رودخانه پیچان رود توسعه‌نیافته	۸۵-۴۱
رودخانه پیچان رود توسعه‌یافته	۱۵۸-۸۵
رودخانه بیش از حد توسعه‌یافته	۲۹۶-۱۵۸
رودخانه نعل‌اسبی	بیش از ۲۹۶

مقادیر ضریب خمیدگی در جدول (۳) و نمودار میانگین ضریب خمیدگی مجرا در محدوده 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 ۴ است؛ اما تا سال ۲۰۱۴ به دلیل رخداد تغییر مسیر، مقدار آن کاهش یافته و به ۱/۵ رسیده است و بعد از ترانسکت ۱۸ با مقدار ۱/۶ در مرتبه دوم قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۴ ترانسکت، میزان ضریب خمیدگی در سال ۲۰۱۴ 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 میان‌بر یا تغییر مسیر مجرای رودخانه نسبت داد. از ترانسکت ۱ تا ۱۵، یعنی بازه کوهستانی الگوی رودخانه به‌تناب از مئاندري به سینوسی و برعکس تبدیل شده است؛ اما از ترانسکت ۱۶ تا ۲۱ یا بازه دشت الگوی رودخانه در هر دو دوره مئاندري است.



شکل ۴- محدوده ترانسکت‌ها، شیب، ارتفاع و آهنگ جابه‌جایی مجرا در بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس (ایجاد میان‌برهای فراوان و تغییر مسیر مجرا باعث شده است که مقدار جابه‌جایی مجرا در طی دوره زمانی مورد مطالعه زیاد باشد)

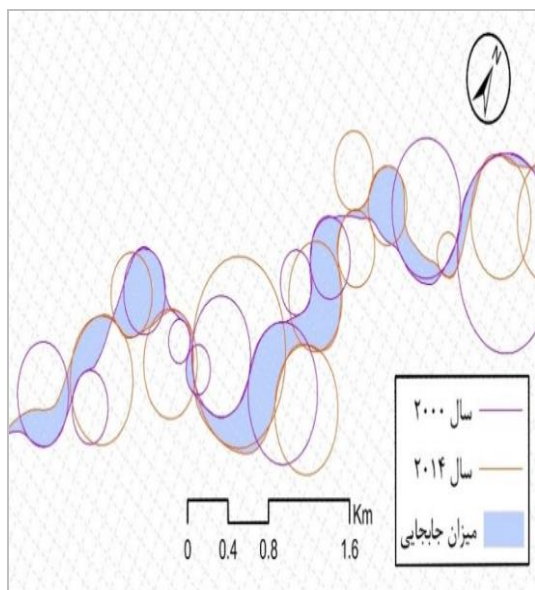
برای بررسی کمی پلان‌فرم مجرا از دو شاخص ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی استفاده شد و پلان‌فرم مجرای رودخانه براساس طبقه‌بندی این ضرایب تحلیل شد (جدول ۱ و ۲).

جدول ۱- تقسیم‌بندی الگوی رودخانه بر اساس

ضریب خمیدگی (تلوری، ۱۳۷۷)

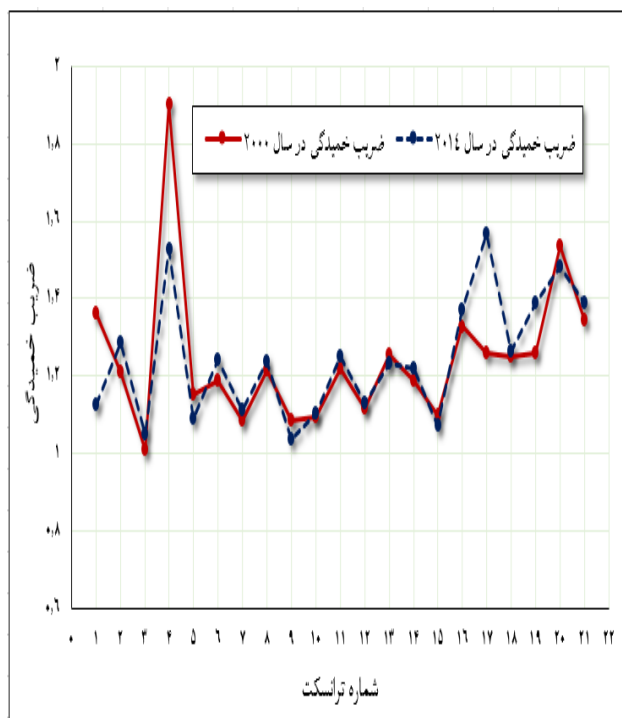
ضریب خمیدگی	> ۲	۱/۲۵-۲	-۱/۲۵	۱-۱/۰۵
			۱/۰۵	

مجرای رودخانه و مهاجرت مئاندرها در دشت سیلابی به دلیل فرسایش کناره مقعر است. کاهش زاویه مرکزی در برخی ترانسکت‌ها را می‌توان به ایجاد میان‌بُرها نسبت داد که خود ناشی از مهاجرت مئاندرهاست.

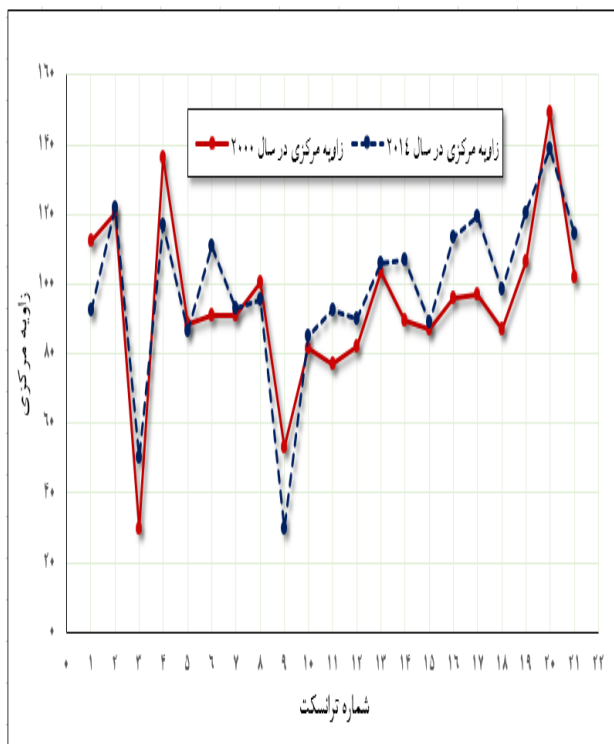


شکل ۶- برازش دواير به خم‌های مجرا (ترانسکت ۱۶)

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



شکل ۵- میانگین ضریب خمیدگی بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس در محدوده هر ترانسکت بررسی تغییرات زاویه مرکزی در طی دو دوره 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 ۶) و زاویه مرکزی (کورنیس) محاسبه شد. در سال ۲۰۰۰، تعداد کل قوس‌های مجرای رودخانه بالغ بر ۹۵ قوس بود که تا سال ۲۰۱۴ به علت ایجاد میان‌بُرها به ۸۹ قوس کاهش یافت. در سال ۲۰۰۰، به استثنای پنج ترانسکت، بقیه ترانسکت‌ها از نوع مئاندري توسعه‌یافته هستند که تا سال ۲۰۱۴ سه مورد از این ترانسکت‌ها نیز به نوع مئاندري توسعه‌یافته تبدیل شده‌اند. همچنان‌که به روشنی در شکل (۷) قابل مشاهده است؛ میانگین زاویه مرکزی بیشتر ترانسکت‌ها، روند افزایشی را نسبت به سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده فعال بودن مئاندرهای



بازۀ 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 شماره ۳ و ۹ با مقدار سینوزیته نزدیک به ۱ برای هر دوره 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 شماره ۴ که از نوع مئاندری توسعه یافته است؛ اما در بازه دشت یعنی از ابتدای ترانسکت ۱۶ تا انتهای رودخانه ارس در خاک ایران، مجرا کاملاً از الگوی مئاندری توسعه یافته تبعیت می‌کند. در این محدوده شیب آبراهه به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد و بین ۲ تا ۳ درصد می‌شود.

شکل ۷- میانگین زاویه مرکزی قوس‌های بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس در محدوده هر ترانسکت
جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های کمی مجرای رودخانه

ترانسکت	جهت نسبت به مجرا	مساحت در سال ^۱ ۲۰۰۰ (هکتار)	مساحت در سال ۲۰۱۴ (هکتار)	میزان تغییرات (هکتار)	آهننگ مهاجرت مجرا (m/y)	ضریب خمیدگی در سال ۲۰۰۰	ضریب خمیدگی در سال ۲۰۱۴	زاویه مرکزی در سال ۲۰۰۰	زاویه مرکزی در سال ۲۰۱۴
T1	R	۶۶۵/۶۵	۵۷۷/۶۵	-۸۷/۹۹	۹/۲۶۵	۱/۳۶	۱/۱۳	۱۱۲/۲	۹۲/۵
	L	۸۲۳/۵۵	۹۱۱/۵۴	۸۷/۹۹					
T2	R	۴۲۶/۷۰	۴۱۱/۶۳	-۱۵/۰۷	۶/۴۴۹	۱/۲۱	۱/۲۹	۱۲۰/۵	۱۲۱/۹
	L	۶۳۶/۹۱	۶۵۱/۹۹	۱۵/۰۷					
T3	R	۲۰۳/۰۲	۱۹۶/۵۳	-۶/۴۹	۳/۲۲۸	۱/۰۱	۱/۰۵	۳۰	۵۰
	L	۵۲۵/۲۳	۵۳۱/۷۲	۶/۴۹					

^۱ - مساحت‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS با توجه به تقاطع خطوط ترانسکت و خطوط مجرا و عملیات تبدیل Polyline به Polygon به دست آمده است.

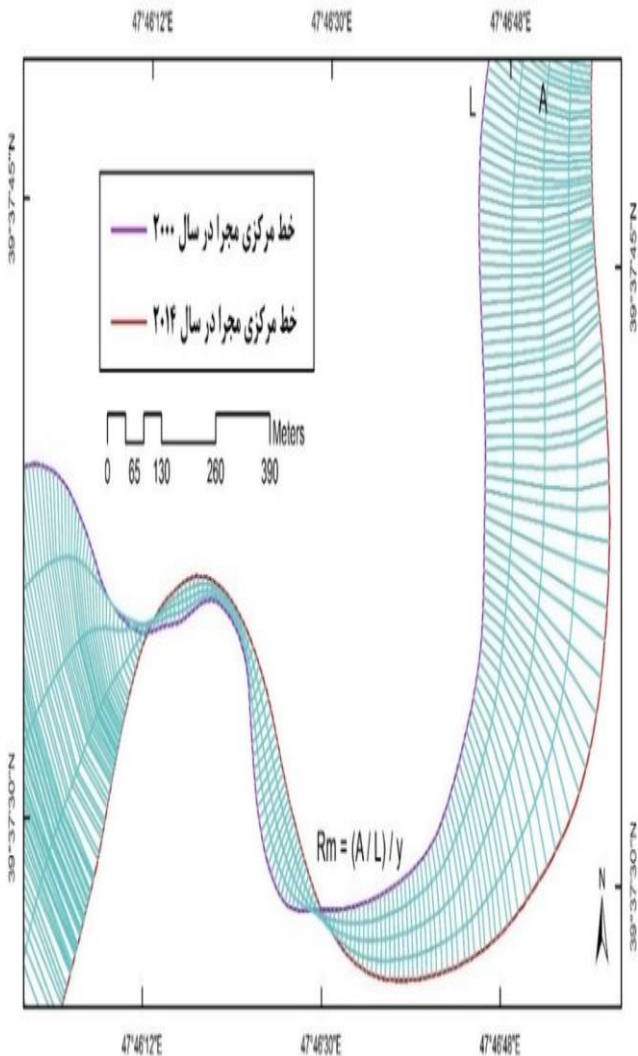
۱۱۷	۱۳۶/۳	۱/۵۳	۱/۹	۱۱/۰۷۸	-۶۹/۳۵	۵۰۳/۴۷	۵۷۲/۸۳	R	T4
					۶۹/۳۵	۵۲۷/۹۵	۴۵۸/۵۹	L	
۸۶/۳	۸۸/۴	۱/۰۹	۱/۱۵	۵/۱۷۵	-۳/۲۹	۲۶۳/۷۹	۲۶۷/۰۸	R	T5
					۳/۲۹	۵۹۶/۷۴	۵۹۳/۴۵	L	
۱۱۰/۷	۹۱	۱/۲۴	۱/۱۹	۸/۰۵۵	-۲۱/۰۳	۴۴۵/۸۵	۴۶۶/۸۸	R	T6
					۲۱/۰۳	۵۹۴/۰۴	۵۷۳	L	
۹۳	۹۱	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۹۲۳	-۱/۲۶	۴۰۹/۶۸	۴۱۰/۹۴	R	T7
					۱/۲۶	۴۹۴/۴۸	۴۹۳/۵۸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

ادامهٔ جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های کمی مجرای رودخانه

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

					-۶۰/۰۲	۳۴۰/۸۷	۴۰۰/۹۰	L	
	۱۳۹	۱۴۹	۱/۴۸	۱/۵۴	۴/۹۵۹	۲/۴۷	۳۰۴/۵۰	۳۰۲/۰۴	R
						-۲/۴۷	۵۲۳/۹۴	۵۲۶/۴۱	L
	۱۱۴/۳	۱۰۲	۱/۳۹	۱/۳۵	۳/۶۷۹	۲۲	۵۶۶/۹۲	۵۴۴/۹۲	R
						-۲۲	۸۱۵/۴۲	۸۳۷/۴۲	L

که در آن مسیر رودخانه گرایش به یک الگوی مستقیم دارد (مانند ترانسکت‌های ۳ و ۹) یعنی دارای مقادیر ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی کمتری هستند، میزان جابه‌جایی نیز کمتر بوده است.



شکل ۸- روش محاسبه آهنگ مهاجرت مجرا (قسمتی از ترانسکت ۱۶)

۲-۲- بررسی کمی تغییرات جانبی مجرا

میانگین آهنگ مهاجرت مجرای بازه مورد مطالعه از رودخانه ارس در حدود ۸ متر است که رقم چشمگیری است و از این نظر به احتمال زیاد پویاترین رودخانه شمال غرب کشور و یکی از پویاترین رودخانه‌های ایران است. در هر یک از ترانسکت‌ها، میانگین آهنگ مهاجرت به صورت جداگانه محاسبه شد (جدول ۳). در شکل (۸) روش محاسبه آهنگ مهاجرت مجرا در بخشی از ترانسکت ۱۶ نشان داده شده است. بیشترین مقدار میانگین جابه‌جایی جانبی مجرا با مقدار بسیار قابل توجه ۲۴/۷ متر، مربوط به ترانسکت شماره ۱۳ است که نتیجه آن افزوده شدن 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 یک طرف از نوع مئاندری توسعه یافته است و در طی دوره مورد مطالعه، چندین میان‌بُز ایجاد شده است و از طرف دیگر، در این ترانسکت در طی دوره مورد مطالعه تغییر مسیر مجرا (به طول حدود ۲ کیلومتر) اتفاق افتاده است. با مقایسه مقادیر میانگین زاویه مرکزی و آهنگ مهاجرت مجرا، در ترانسکت‌هایی که پلان‌فرم رودخانه از نوع مئاندری توسعه یافته است (مانند ترانسکت شماره ۴، ۱۳، ۱۶)، به دلیل ایجاد میان‌بُز و تغییر مسیر، مجرا از آهنگ جابه‌جایی بالاتری برخوردار بوده است؛ اما در ترانسکت‌های محدودی

جدول ۴- علل تغییر مسیر مجرا (Schumm, 2005:

(31

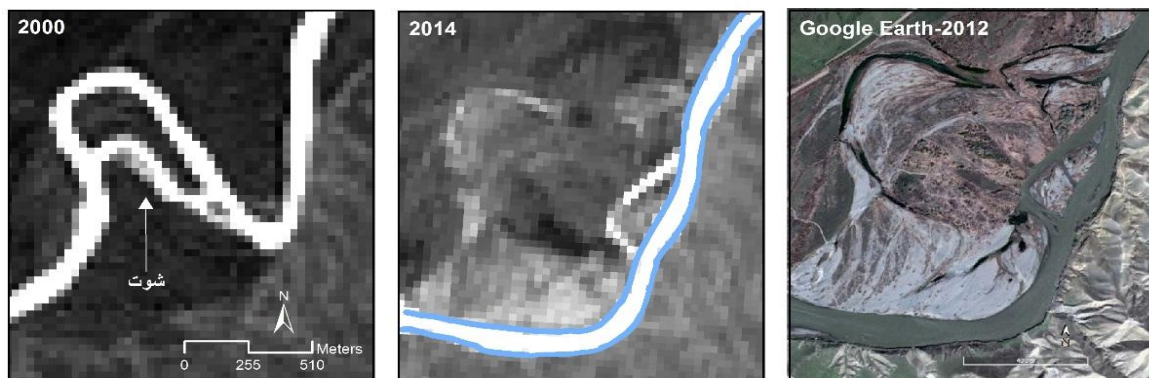
در منطقه مورد مطالعه، تغییرات مجرا با توجه به روند گذشته به سه دلیل عمده اتفاق افتاده است: ۱- مهاجرت مجرا در دشت سیلابی به واسطه فرسایش کناره مقعر حلقه‌های^۱ مائدرها که با توجه به شرایط محلی از شدت و ضعف برخوردار بوده است، ۲- ایجاد میان‌بُرها به واسطه پیشروی و نزدیک شدن پایه مائدرها، که آثار آن به صورت کانال‌های متروک قابل مشاهده است (برای نمونه، شکل‌های ۹ و ۱۰)، و ۳- تغییر مسیر^۲ بخشی از مجرای رودخانه که به عنوان 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. از این رو، در بازه مورد مطالعه رودخانه 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 مجرای جدید ایجاد می‌شود. شوم (۲۰۰۵) علل بنیادین تغییر مسیرها (یعنی آن دسته از فرایندها یا رخدادهایی که رودخانه را به یک آستانه تغییر مسیر هدایت می‌کنند) را در چهار گروه سازماندهی می‌کند (جدول ۴). در این رابطه، برای رودخانه ارس داده‌های ضروری به دلیل مرزی بودن بسیار محدود است؛ اما تغییر مسیرهای صورت گرفته 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.

¹ - Loops

² - Avulsion

توانایی کانال برای حمل رسوب و آب	فرایندها و رخدادهایی که ناپایداری ایجاد می‌کنند و به تغییر مسیر منجر می‌شوند.	
کاهش کاهش کاهش کاهش	الف- افزایش سینوزیته (کاهش شیب) ب- رشد دلتا (افزایش طول کانال) ج- پایین رفتن سطح اساس (که منجر به کاهش شیب شود) د- بالا آمدگی تکتونیکی (که منجر به کاهش شیب شود)	گروه ۱- تغییر مسیر ناشی از افزایش در نسبت S_a/S_e ، به دلیل افزایش در S_e
بدون تغییر بدون تغییر بدون تغییر	الف- رشد خاکریز طبیعی یا پشته آبرفتی ب- رشد مخروط افکنه و دلتا (تحدب) ج- تکتونیسیم (که منجر به کجی یا انحراف جانبی شود)	گروه ۲- تغییر مسیر ناشی از افزایش در نسبت S_a/S_e ، به دلیل افزایش در S_a
کاهش کاهش کاهش کاهش کاهش	الف- تغییر هیدرولوژیک در دبی اوج سیلاب ب- افزایش بار رسوب ج- دست‌اندازی پوشش گیاهی د- موانع چوبی و- موانع یخی	گروه ۳- تغییر مسیر بدون هیچ تغییری در نسبت S_a/S_e
بدون تغییر بدون تغییر	الف- لگدمال کردن حیوانات ب- اسارت (انحراف به آبریز مجاور)	گروه ۴- سایر تغییر مسیرها

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



مجرا مخصوصاً تغییر مسیرها ممکن است برای هر دو کشور مسائل مختلفی مانند ازدست رفتن اراضی را موجب شود. جابه‌جایی عرضی مجرا باعث تغییر مساحت ترانسکت‌ها در دو طرف رودخانه شده است. در جدول (۳)، مقادیر تغییرات در مساحت

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

به ۹۷ هکتار به نفع اراضی طرف ایران بوده است. در کل، در طی دوره ۱۴ ساله، در حدود ۲۵۳ هکتار از اراضی طرف ایران، در نتیجه تغییرات مجرا از دسترس خارج (به خصوص در ترانسکت ۱ با مقدار ۸۸ هکتار و ترانسکت ۴ با مقدار ۶۹ هکتار) و در حدود ۲۷۵ هکتار به اراضی موجود افزوده شد (به خصوص در ترانسکت ۱۳ با مقدار ۹۷ هکتار و ترانسکت ۱۹ با مقدار ۶۰ هکتار).



شکل ۱۱- جریان گل‌آلود رودخانه ارس و سازندهای فرسایش‌پذیر کناره

حال که روند کلی رودخانه الگوی مماندیری دارد، با این حال، در برخی ترانسکت‌ها از الگوی تقریباً مستقیم تبعیت می‌کند. الگوی مستقیم فقط در مسافت محدودی از کانال تداوم می‌یابد و به سرعت به الگوی سینوسی یا مماندیری تبدیل می‌شود. مقایسه مقادیر میانگین ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی مجرای رودخانه در محدوده هر ترانسکت برای دو دوره زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ میلادی، نمایانگر روند افزایشی برای بیشتر ترانسکت‌هاست که فعال‌بودن مماندیرهای رودخانه را نشان می‌دهد. تغییرات مجرا عمدتاً به دلیل فرسایش کناره و در نتیجه مهاجرت مجرا، ایجاد

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 ۲۰۱۴ میلادی مجرای رودخانه در این محدوده، بیشترین جابه‌جایی را به سمت راست یا طرف ایران انجام داده است که در نتیجه آن ۸۸ هکتار از اراضی طرف ایران از دسترس خارج شده و به همین نسبت به اراضی طرف آذربایجان افزوده شده است. بیشترین میزان تغییر مساحت مربوط به ترانسکت ۱۳ با مقدار نزدیک



شکل ۱۰- کانال متروک در حاشیه رودخانه ارس

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روابط و شاخص‌هایی، پلان‌فرم و تغییرات عرضی بازه‌ای از مجرای رودخانه 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 بازه کوهستانی (از ترانسکت ۱ تا ۱۵) و دشت (از ترانسکت ۱۶ تا خروج رودخانه از محدوده سیاسی ایران) تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد، پلان‌فرم رودخانه ارس در بازه دشت به‌طور کامل از الگوی مماندیری پیروی می‌کند؛ اما در بازه کوهستانی، درعین

میان‌برها 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 ۴، ۱۳، ۱۸ و ۱۹ 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 ۷ و ۱۵. در طی ۱۴ سال گذشته، میانگین آهنگ جابه‌جایی مجرای رودخانه در حدود ۸ متر در سال بوده و از این نظر بسیار دینامیک است. همچنان‌که ویتربوتوم^۱ (۲۰۰۰) و لوین^۲ و همکاران (۱۹۸۸)، تعادل دینامیک در یک مجرای رودخانه را توصیف کردند، به‌طوری‌که به موجب آن، یک مجرا نسبت به رژیم دبی خود تنظیم می‌شود^۳ و اگرچه فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری تداوم می‌یابند، اما فرم کلی حفظ می‌شود و یک الگوی پایدار دینامیکی ایجاد می‌کند. برای رودخانه مورد مطالعه نیز با اینکه مجرا به‌طور مدام از طریق مهاجرت جانبی، ایجاد میان‌برها و تغییر مسیر دستخوش تغییراتی می‌شود (و در آینده نیز بی‌شک این تغییرات تداوم خواهد یافت)، اما در سال ۲۰۱۴ نسبت به سال ۲۰۰۰ تغییرات چندانی در پلان فرم مجرا رخ نداده است و کاهش یا افزایش تعداد قوس‌ها، ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، نتیجه عملکرد طبیعی رودخانه‌های مئاندری است؛ در نتیجه، رودخانه نزدیک به حالت تعادل دینامیک

است.

منابع

- ارشد، صالح؛ مرید، سعید؛ میرابوالقاسمی، هادی، (۱۳۸۶). بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش از دور: مطالعه موردی رودخانه کارون از گتوند تا فارسیات (۸۲-۱۳۶۹)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد چهاردهم، شماره ششم، صص ۱۹۵-۱۸۰.
- اسماعیلی، رضا؛ حسین‌زاده، محمد مهدی؛ متولی، صدرالدین، (۱۳۹۰). تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، انتشارات مؤسسه انتشاراتی لاهوت، چاپ اول.
- تلوری، عبدالرسول، (۱۳۷۳). رودخانه‌ها و مشخصات هندسی آنها. انتشارات تحقیقات جهاد کشاورزی.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، اصغر، (۱۳۹۱). بررسی الگوی پیچان‌رودی رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از شاخص‌های ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی، جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، سال دهم، شماره ۳۴، صص ۱۰۲-۸۵.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، اصغر، (۱۳۹۱). بررسی تغییرات الگوی هندسی رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از تحلیل هندسه فراکتال، نشریه علمی - پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، سال ۱۶، شماره ۴۰، صص ۱۳۹-۱۱۹.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد، (۱۳۹۱). بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین‌شناسی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲، صص ۱-۱۴.

¹ - Winterbottom

² - Lewin

³ - adjusted

- 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.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ پیروزی‌نژاد، نوشین، (۱۳۹۳). بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹. *نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۸، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ مقامی، یاسر، (۱۳۸۹). روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از GIS، RS و Auto Cad، مدرس علوم انسانی - برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره چهاردهم، شماره ۳، صص ۲۹۴-۲۷۵.
- یمانی، مجتبی؛ دولتی، جواد؛ زارعی، علیرضا، (۱۳۸۹). تأثیرگذاری عوامل هیدروژئومورفیک در تغییرات زمانی و مکانی بخش میانی رودخانه اترک، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۹۹، صص ۲۴-۱.
- یمانی، مجتبی؛ فخری، سیروس، (۱۳۹۱). بررسی عوامل مؤثر در تغییرات الگوی رودخانه جگین در جلگه ساحلی مکران، جغرافیا (فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، دوره جدید، سال دهم، شماره ۳۴، صص ۱۵۹-۱۴۱.
- 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

- 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.