

## The trend of geometric changes in Qarachai River in the years 1968 to 2021

Amir Moradinejad<sup>1\*</sup>, Seyed Ahmad Hosseini<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education & Extension Organization (AREEO), Arak, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of River and Coastal Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Institute, Agricultural Research Education & Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

### Abstract

#### Introduction

Due to river dynamic nature, the morphological characteristics of rivers are always changing and these changes can have negative effects on structures built along rivers, agricultural lands, etc. Rivers have been one of the most important factors in the geomorphological processes of the land and the erosion cycle, and so far, extensive studies have been conducted on the morphological changes of rivers and the factors affecting them. The instability of the river channel and its sediments not only destroys the marginal lands and facilities adjacent to the river bank, but also the sediments caused by erosion in some cases include a significant amount of the total sediments that the river flows.

#### Materials and Methods

The morphology of a part of Qarachai river in Markazi province of Khondab city from the top of Shaveh village to the bottom of Farab village, with a length of 12 km has been studied. First, the location of the Qarachai River watershed and the study area have been determined using digital topographic maps and ArcGIS10.2 software. Then satellite images and aerial photographs of the study area, which are the most important tools for studying changes in river paths, have been collected in two time periods. In the following, the aerial photos scanned in Photoshop software are photomosaic and are referenced in ArcGIS10.2 software using fixed points such as villages, bridges, etc., using aerial photographs of the year. 1968 Satellite images of Landsat sensor of 2021 have been digitized in two time periods in ArcGIS10.2 software environment.

#### Results and Discussion

Changes in wavelength and valley length in the two time periods studied in the study section of the river show that in the study area, the morphology of the river has not undergone major changes and the curvature of the study area has not changed much. The study of changes in wavelength and valley length and arc length in the two periods studied shows that the average wavelength in 1968 is about 413.25 and in 2021 is about 387.63. The wavelength in 1968 was longer than in 2021. The changes compared to the 53-year period are about 6.2% and very small. As the wavelength decreases, the distance between the windings also decreases. The changes in the length of the valley relative to the meanders. The average length of the valley in 1968 is about 224.46 and in 2021 is about 12.21. Changes in the two timelines are about 5.5% and are very small.

#### Conclusion

The general pattern of the river from 1968 to 2021 has not changed significantly and is always twisting. The number of windings during 53 years is the same as 23 windings. The fact that the number of meanders is constant indicates that there is no change in the morphological pattern of the river. The results of extraction and statistical comparison of geometric parameters of this part of the river such as wavelength, sine coefficient, width to depth ratio, etc. show that the sine coefficient of the river from 1.5 to 1.3 The wavelength and radius of the tangent circles on the twists and turns have also increased. The average curvature coefficient in the 40s is about 1.11 and in 2021 is about 1.08. According to the division table of rivers, this period studied by Khondab river has a sinusoidal state and has not changed much in two time periods.

**Keywords:** River, Khondab, morphology, river bend, geometric parameters.

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: amir\_24619@yahoo.com

**Citation:** Moradinejad, A., & Hosseini, S.A. (2022). The trend of geometric changes in Qarachai River in the years 1968 to 2021. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 77-90.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10941.1092

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.6.7

Received: 06 June 2022, Received in revised form: 27 June 2022, Accepted: 27 June 2022, Published online: 27 June 2022

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 77-90

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## روند تغییرات هندسی رودخانه قره‌چای در سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰

امیر مرادی نژاد<sup>۱\*</sup>، سید احمد حسینی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه حفاظت خاک و آب‌خیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

### چکیده

رودخانه‌ها سیستم‌های پویایی هستند که مرزهای جانبی و مشخصات ریخت‌شناسی آن‌ها در طول زمان و به‌طور پیوسته در حال تغییر است. خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به‌واسطه ویژگی پویای آن، همواره دچار تغییر هستند. این‌گونه تغییرات می‌تواند بر سازه‌های بناشده در حاشیه رودخانه‌ها، زمین‌های کشاورزی و غیره آثار منفی بگذارد. در این پژوهش، ریخت‌شناسی قسمتی از رودخانه قره‌چای در استان مرکزی شهرستان خنداب از بالای روستای شاول تا پایین روستای فاراب، به طول ۱۲ کیلومتر بررسی شده است. عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۷ و تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده از سنجنده لندست سال ۱۴۰۰ در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 رقومی شده است. در مرحله بعد در محیط نرم‌افزاری Auto Cad متغیرهای هندسی رودخانه مانند طول موج، طول دره، ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و شعاع دایره مماس بر قوس‌ها، برای بررسی تغییرات با روش برازش دایره‌های مماس بر قوس رودخانه اندازه‌گیری شده است. با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل‌های آماری بر روی متغیرهای هندسی صورت گرفته است. نتایج مطالعه این متغیرها و مقایسه آن‌ها در دو بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد در این محدوده تعداد ۲۳ پیچان‌رود از سال ۱۳۴۷ تا سال ۱۴۰۰ وجود داشته است. تعداد پیچان‌رودها از سال ۱۳۴۷ تا سال ۱۴۰۰ تغییر نکرده است. الگوی کلی رودخانه از سال ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰ تغییر عمده‌ای نداشته است و الگوی رودخانه همواره از نوع سینوسی است. فقط در بعضی مسیرها پیچ رودخانه به سمت راست یا چپ کشیده شده یا عرض رودخانه تغییر کرده است. محاسبه مقادیر متغیرهای هندسی بازه مورد مطالعه در دو دوره و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نشان داد که تغییرات عمده‌ای در پروفیل طولی و مقدار پارامترها دیده نمی‌شود، شکل و پلان رودخانه تغییرات زیادی نداشته است. تغییرات، حالت بهنجار دارد که گویای روند منظم و مشخص در عوامل تأثیرگذار بر فعالیت‌های ریخت‌شناسی رودخانه است.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای هندسی، پیچان‌رود، خنداب، رودخانه، مرفولوژی

**نوع مقاله:** پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amir\_24619@yahoo.com

**استناد:** مرادی نژاد، ا. و حسینی، س.ا. (۱۴۰۱). روند تغییرات هندسی رودخانه قره‌چای در سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۹۰-۷۷، (۴)۲.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10941.1092

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.6.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

*مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۴، صفحه ۷۷ تا ۹۰

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف، پیوسته از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در حال تغییر هستند. این تغییرات تحت تأثیر فرسایش‌پذیری مسیر رود و به تبع آن تغییر یافتن الگوهای رودخانه ایجاد می‌شود (Kessler et al., 2013). ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه و رسوبات ناشی از آن نه تنها موجب تخریب اراضی حاشیه و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه می‌شود بلکه رسوبات حاصل از فرسایش در برخی از مواقع میزان قابل توجهی از مجموع کل رسوبات را شامل می‌شود که جریان رود آن را حمل می‌کند (Minghui et al., 2010). رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیندهای ژئومورفولوژیک زمین و چرخه فرسایش بوده‌اند و تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها صورت گرفته است. (Maqsoodi et al., 2010) روند تغییرات الگوی ریخت‌شناسی رودخانه خرم‌آباد را با استفاده از ArcGIS، Auto Cad، RS و مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در این محدوده تعداد ۱۷ مماندر از سال ۱۳۳۴ تا سال ۱۳۷۷ حذف شده و تعداد مماندرها از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۸۴ از ۵۱ به ۵۳ افزایش یافته است. مقادیر پارامترهای هندسی به‌دست آمده در سه دوره نیز تغییرات شکل و پلان رودخانه را نشان داد. اصلی‌ترین دلیل این تغییرات، تغییر کاربری اراضی اطراف رودخانه و به‌طور کلی دخل و تصرف انسان در بستر رودخانه است. (Uddin et al., 2011) تغییرات ریخت‌شناسی و فرسایش کناری در رودخانه جامونا را با استفاده از تکنیک‌های GIS و تصاویر ماهواره‌ای ETM+ در پنج سال مختلف بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که میزان فرسایش کناری و لجن تشکیل شده بسیار بالا است. (Ramos et al., 2012) با تجزیه و تحلیل زمانی-مکانی ریخت‌شناسی رودخانه آبرفتی کویلت با تأکید بر اثر سیستم‌های ارتباطی، نتیجه گرفتند که تغییرات شدید رودخانه‌ای در اثر رخدادهایی مانند طوفان‌های حاره‌ای و فعالیت‌های انسانی بوده است.

Pan (2013) تغییرات حوضه رودخانه بانکورا را با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده‌های MSS و ETM+) در دوره‌های زمانی مختلف مطالعه کرده و شاخص‌های ریخت‌شناسی رودخانه را استخراج نمود. نتایج وی نشان داد که شاخص‌های ریخت‌شناسی رودخانه در فواصل زمانی مورد بررسی در حال تغییر بوده و این تغییرات در نواحی مختلف متفاوت است. (Hossieni, 2014) در بررسی روند تغییرات الگوی ریخت‌شناسی رودخانه زنجان رود به روش مقایسه زمانی و مکانی با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به این نتیجه رسید که آبراهه زنجان رود در محدوده مورد مطالعه دارای روند

پایداری است و میزان پایداری در بازه دوم بیش‌تر از بازه اول و سوم است و بازه سوم هنوز نسبتاً ناپایدار است. (Yamani et al., 2014) به بررسی روند تغییرات ریخت‌شناسی الگوی آبراهه بابل رود از طریق نيمرخ‌های متساوی (ترانسکت) پرداختند و نتیجه گرفتند که الگوی رودخانه در سه دوره زمانی در محدوده مورد مطالعه نسبتاً ناپایدار بوده و روند پس‌روی داشته است. بیش‌ترین تغییرات در بازه دوم رخ داده است و دلیل عمده آن جابجایی خط‌القدر تحت تأثیر عوامل طبیعی است. (Sing, 2014) تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه گنگ در واراناسی هند را در یک بازه زمانی ده ساله با استفاده از GIS و داده‌های تاریخی بررسی کرده و نتیجه گرفت که تغییرات سینوسی دو کمربند مانداری مورد مطالعه متغیر بوده‌اند. (Sharafi et al., 2014) تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه اترک در بازه زمانی بیست ساله را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در این مقطع زمانی الگوی رودخانه اترک تغییر زیادی نداشته است. با توجه به این که بیش‌تر مسیر الگوی پیچان‌رودی دارد، مشخصات هندسی پیچان‌رودها در مقطع زمانی فوق تغییر زیادی نکرده است. (Bawa et al., 2014) به بررسی عوامل کنترل‌کننده تنوع مورفولوژیکی و نقش قدرت جریان بر روی رودخانه یامونا در غرب هندوستان پرداختند و نتیجه گرفتند که ارتباط نزدیکی بین قدرت جریان و ریخت‌شناسی کانال وجود دارد. (Rozo et al., 2014) نیز با استفاده از روش سنجش از دور و با کمک تصاویر لندست قسمت‌های پایین‌دست رود آمازون را بررسی کردند و دریافتند که در دوره‌هایی که فعالیت فرسایش و رسوب بیش‌تر بوده تغییرات جانبی رودخانه نیز افزایش یافته است. (Abate et al., 2015) نشان دادند که گسترش شهرنشینی به افزایش سطوح غیر قابل نفوذ و در نتیجه گسترش رواناب منجر شده که به نوبه خود می‌تواند قدرتی برای تغییر ویژگی‌های کانال رودخانه باشد. وجود پروژه‌های آبی و یا معادن شن و ماسه ممکن است منجر به افزایش یا کاهش ظرفیت حمل و انتقال رودخانه شده و در نتیجه فرسایش و رسوب‌گذاری را سبب شود که خود می‌تواند مورفولوژی رودخانه و دشت‌های آبرفت را تغییر دهد.

Madadi et al. (2015) تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر تغییرات بستر رودخانه زرينه رود را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند بخشی از رودخانه که در منطقه دشتی واقع شده است به شدت تحت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی است. بخشی از رودخانه که در امتداد گسل بوده الگوی مستقیم و سایر بخش‌ها الگوی پیچان‌رودی تا پیچان‌رودی شدید دارند. (Javaheri Tehrani et al., 2016) به بررسی مورفولوژی پیچان‌رودهای رودخانه زاینده-رود با استفاده از تکنیک‌های GIS و RS پرداخته و نتیجه

RBF و مدل حافظه طولانی کوتاه‌مدت LSTM استفاده شده است. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل‌های ANN، RBF و LSTM به‌ویژه در نقاط اوج جریان نسبت به IHACRES در مدل‌سازی جریان برای منطقه مورد مطالعه است. در کل، نتایج نشان داد که مدل‌های AI، ابزار مفید برای مدل‌سازی نوسانات جریان هستند و توصیه می‌شود در مطالعات آتی، این ابزار بیش‌تر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که از این بازه رودخانه در مقطع زمانی ۱۰ ساله، بدون مطالعه و مکان‌یابی، شن و ماسه برداشت شده است. نیاز است که به بررسی تغییرات مسیر رودخانه محل برداشت شن و ماسه در طول زمان و الگوی فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری مسیر هم‌چنین شناخت عوامل ژئومورفولوژیک مؤثر بر تغییرات بستر بازه مورد مطالعه رودخانه پرداخته شود. لذا هدف از این تحقیق بررسی دامنه این تغییرات در مدت ۵۳ سال می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

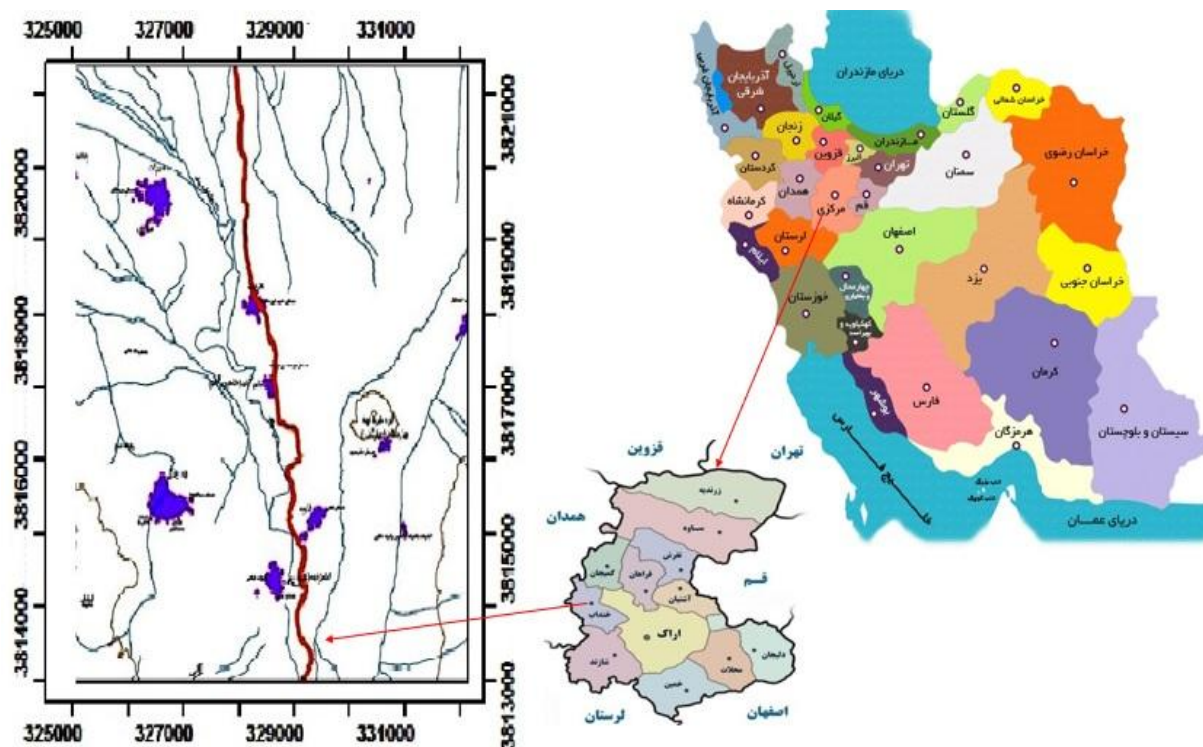
### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، بازه‌ای به طول ۱۲ کیلومتر از رودخانه قره‌چای (در محدوده شهرستان خنداب) از بالای روستای شاهه نقطه‌ای به مختصات  $X=329812$ ،  $Y=3813064$  تا پایین روستای فاراب نقطه‌ای به مختصات  $X=327000$ ،  $Y=3821018$  مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). با روش توالی زمانی-استنتاج در بازه زمانی ۵۳ سال با استفاده از تصاویر سنجنده ماهواره‌های لندست ۸ به ترتیب سال‌های ۱۹۶۷ و ۲۰۲۱ بررسی شده است.

تکنیک اصلی کار، مقایسه زمانی و مکانی، تغییرات بستر این رودخانه است. ابزارهای اصلی تحقیق را عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۷، تصاویر ماهواره‌ای و لندست ۸ سال ۱۴۰۰ و نیز نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، کنترل این تغییرات از طریق کار میدانی تفصیلی و ثبت موقعیت‌ها و دامنه تغییرات با دستگاه GPS و تطبیق آن‌ها با نقشه‌ها و تصاویر زمین مرجع شده در نرم‌افزار ArcGIS10.2 و سایر تحلیل‌های کمی با استفاده از روابط ریاضی است. نخست موقعیت حوضه رودخانه قره‌چای و بازه مورد پژوهش با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ رقومی و نرم‌افزار ArcGIS مشخص شده است. بعد از انجام این مراحل، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی محدوده مورد پژوهش، که مهم‌ترین ابزار بررسی تغییرات مسیر رودخانه‌ها هستند، در دو مقطع زمانی جمع‌آوری شده است. در ادامه، عکس‌های هوایی دهه ۴۰ اسکن شده و با توجه به ترجیحات اطراف عکس و فاصله کانونی دوربین در نرم‌افزار PCIgeomatica ارتقوتو و

گرفته‌اند که پیچان‌رودها دارای رژیم فرسایشی بوده سیلاب به‌وسیله سد زاینده رود کنترل شده است. Sharifi Pichun and Pernon (2017) به ارزیابی و تحلیل تغییرات هندسی نیم‌رخ طولی و عرضی رودخانه قره‌سو در سال‌های ۱۳۳۴ تا ۱۳۹۳ پرداختند. نتایج حاکی از تمایل رودخانه به افزایش رسوب‌گذاری و کاهش فرسایش در بیش‌تر بخش‌ها بوده که این امر نشان‌دهنده استقرار شرایط تعادل پایدار بر رودخانه است. Almodaresi et al. (2018) به بررسی نقش عوامل مؤثر بر پیچان‌رود شدن و تغییرات رودخانه دالکی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتایج نشان داد که شیب و جنس سازندها مهم‌ترین عوامل در تغییرات و پیچان‌رود شدن رودخانه دالکی می‌باشد. در این رودخانه در بازه زمانی ۳۸ ساله تعداد پیچان‌رودها بیش‌تر شده و جایجایی مسیر رودخانه نسبت به قبل افزایش یافته است. (Azadi Vash and Mumipour (2019) به بررسی تغییرات ژئومورفیک بستر رودخانه مارون در محدوده شهرستان بهبهان با تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که مسیر رودخانه در بازه زمانی مورد مطالعه تغییر کرده، رودخانه افزایش طول داشته و به تعداد پیچان‌رودها افزوده شده است.

در مطالعه‌ای (Moradinejad and Hosseini (2021) به بررسی تأثیر برداشت شن و ماسه از بازه رودخانه قره‌چای پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند با ادامه برداشت شن و ماسه از رودخانه بدون مطالعه و پایش، پلان رودخانه دچار تغییر می‌شود. Rezaei et al. (2022) تحلیل جریان ماهانه رودخانه سفیدرود با استفاده از تئوری آشوب را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با بررسی سری‌های زمانی حاصل از سیستم‌های دینامیکی هم‌چون جریان رودخانه به کمک نظریه آشوب می‌توان به پیش‌بینی رفتار سیستم رودخانه پرداخت. Moradi (2022) در مطالعه‌ای به مقایسه توزیع اندازه ذرات رسوبات معادن شن و ماسه کوهی و رودخانه‌ای شهرستان ارومیه پرداختند. به‌منظور توصیف رسوبات از چهار مدل ریاضی توزیع اندازه رسوبات شامل مدل ویبول، فردلانده، ون گنوختن و جکی استفاده شد. برای ارزیابی دقت مدل‌های دانه-بندی ذرات رسوب، از شش ضریب کارایی استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده تفاوت میزان ذرات تشکیل‌دهنده رسوبات رودخانه‌ای و کوهی است و اختلاف بسیار کمی بین رسوبات رودخانه‌ای و کوهی از نظر مقدار ذرات تشکیل‌دهنده وجود دارد. Momeneh (2022) در مطالعه‌ای به مقایسه عملکرد مدل‌های هوش-مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب پرداخت. برای این منظور از مدل‌های هوش-مصنوعی AI شامل، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی ANN از نوع پرسپترون چندلایه MLP، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی



شکل ۱- موقعیت و نقشه منطقه مورد مطالعه در کشور، استان و منطقه  
Figure 1- Location and map of the study area in the country, province, and region

## ۲-۲- متغیرهای هندسی رودخانه خنداب و نحوه محاسبه آن‌ها با نرم‌افزار اتوکد

در مطالعه و بررسی رودخانه‌های پیچان‌رودی، برای کمی کردن میزان توسعه پیچان‌رودی رودخانه‌های آبرفتی و تعیین الگوی رفتاری و تغییرات آن در طول زمان، باید مشخصات هندسی رودخانه‌ها هم‌چون زاویه مرکزی، شعاع پیچان‌رود، طول موج، طول دره و ضریب خمیدگی، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شود تا بتوان تغییرات ایجادشده در مسیر رودخانه را در گذشته نسبت به حال مشخص کرد. در زیر متغیرهای هندسی مورد استفاده در تحقیق به‌طور خلاصه شرح داده شده است:

الف) زاویه مرکزی و شعاع پیچان‌رود:  
زاویه مرکزی به عنوان معیاری جهت تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان‌رودی رودخانه استفاده می‌شود. پس از ترسیم دایره‌های مماس بر مسیر رودخانه در نرم‌افزار اتوکد، از مرکز هر یک از دایره‌های مماس بر قوس‌ها دو شعاع به نقاط عطف دایره-ها با دره رودخانه ترسیم می‌شود. به زاویه ایجادشده از محل اتصال دو شعاع، زاویه مرکزی و به شعاع مماس بر دایره قوس‌ها، شعاع دایره گفته می‌شود (Maqsoodi et al., 2010).

سپس موزائیک آن‌ها تهیه شده است. تصحیحات هندسی و بارزسازی تصاویر جهت مشخص شدن بستر رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استفاده شده است.

در نرم‌افزار ArcGIS10.2 با استفاده از نقاط ثابت مانند روستاها، پل‌ها و ... زمین مرجع شده است (شکل ۲). پس از ورود تصاویر و عکس‌های هوایی به محیط نرم‌افزاری ArcGIS مرز سواحل چپ و راست رودخانه در دو مقطع زمانی مورد پژوهش بر روی این تصاویر رقومی شده و پس از رقومی کردن مسیر رودخانه، با فرمت اتوکد از آن‌ها خروجی گرفته شده است. در ادامه با نرم‌افزار اتوکد مشخصات هندسی قوس‌ها مانند شعاع قوس، طول موج، زاویه مرکزی، طول دره و ضریب خمیدگی در هر یک از مقاطع زمانی استخراج شده است. سپس با نرم‌افزار آماری SPSS و پارامترهای به‌دست آمده، تجزیه و تحلیل‌های آماری بر روی این پارامترها صورت گرفته است. پس از انجام این کارها و با استفاده از پارامترهای به دست آمده، تغییرات ریخت-شناسی رودخانه در بازه‌های زمانی موردنظر تجزیه و تحلیل شده است (Maqsoodi et al., 2010).



شکل ۲- الگوی رودخانه در سال‌های ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰

Figure 2 - River pattern in 1968 and 2021

ضریب خمیدگی بزرگ‌تر از  $1/4$  تا  $1/5$  نشان‌دهندهٔ پیچشی بودن رودخانه و کم‌تر از آن نشان‌دهندهٔ مستقیم بودن رودخانه و بازهٔ موردنظر است (Dowlati, 2008). برای محاسبهٔ میزان ضریب خمیدگی هر یک از قوس‌ها، از فرمول (۱) استفاده شده است (Maqsoodi et al., 2010).

$$S = \frac{2l}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن  $S$  ضریب خمیدگی،  $L$  طول مسیر و  $\lambda$  طول موج است. جهت تعیین الگوی رودخانه و عوامل مؤثر بر آن از شاخص‌های ضریب خمیدگی، زاویهٔ مرکزی، شعاع پیچان‌رودی، طول موج و طول دره و تحلیل نیمرخ طولی استفاده شد. در مرحلهٔ بعد با روی هم‌گذاری پلان رودخانه در زمان مختلف تغییرات آن مورد بررسی قرار گرفت. مسیر رودخانه در دو سال یاد شده در نرم‌افزار ArcGIS10.2 رقومی شده و سپس متغیرهای هندسی رودخانه با روش برازش دایره‌های مماس بر قوس رودخانه اندازه‌گیری شد. پس از آن اندازه‌گیری متغیرهای هندسی و تحلیل‌های آماری آن‌ها انجام شد.

(ب) طول موج و طول دره:

طول موج و طول درهٔ رودخانه، دو متغیر اصلی در طبقه‌بندی رودخانه و تعیین ضریب خمیدگی آن است. معمولاً بین این دو پارامتر همبستگی بالایی وجود دارد. برای به‌دست آوردن طول موج روی نقشهٔ محور مسیر رودخانه، ابتدا نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه با دقت زیاد مشخص می‌شود، سپس هر دو نقاط عطف مربوط به یک قوس به یک‌دیگر متصل می‌شود و طول پاره خط به‌دست آمده (وتر مقابل به قوس محور رودخانه) با نرم‌افزار اتوکد با دقت زیاد اندازه‌گیری می‌شود. این طول معادل نصف طول موج ( $\lambda/2$ ) هر قوس رودخانه است. در ادامه مقدار طول موج برای هر قوس و مقدار میانگین حسابی آن برای بازهٔ مورد پژوهش محاسبه می‌شود. برای به‌دست آوردن طول دره نیز نقطهٔ عطف یک قوس تا نقطهٔ عطف قوس بعدی در روی مسیر محور رودخانه مشخص و با استفاده از نرم‌افزار برای هر قوس اندازه‌گیری می‌شود (Maqsoodi et al., 2010).

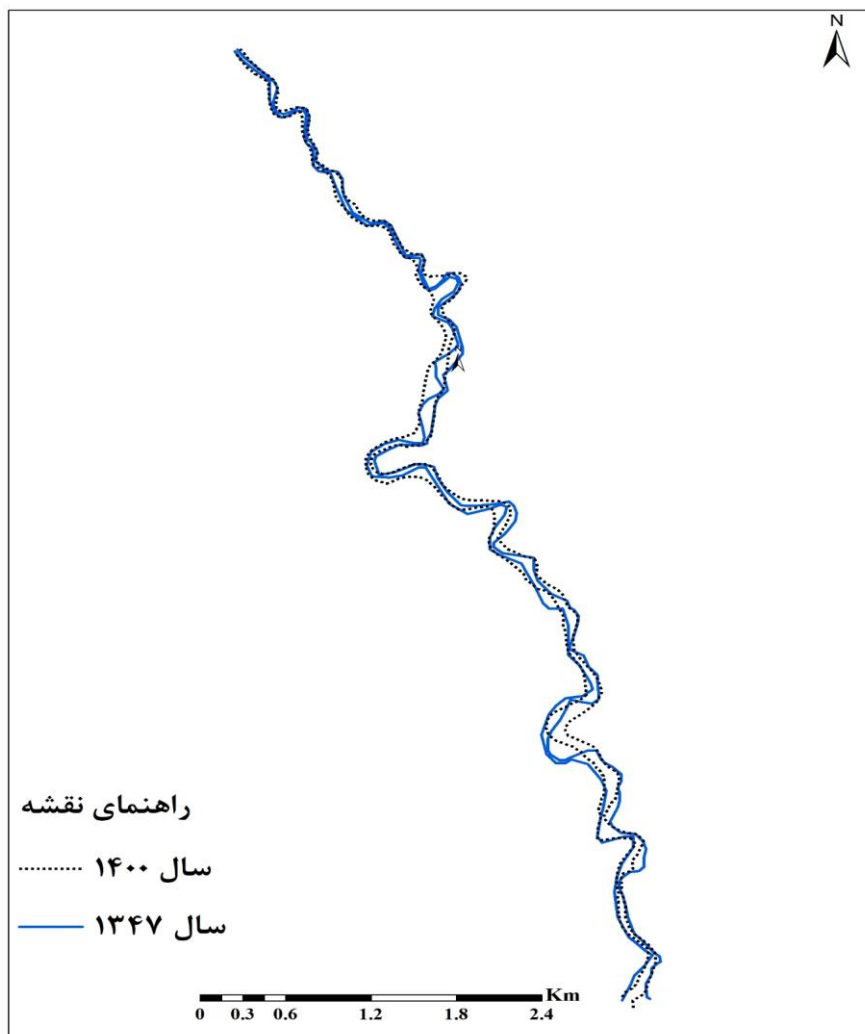
(ج) ضریب خمیدگی:

شاخص ضریب خمیدگی یکی از معیارهای کمی است که در تقسیم‌بندی شکل رودخانه استفاده می‌شود. این عامل نشان‌دهندهٔ نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول چم است و میزان تکامل چم را نشان می‌دهد. طبق تعریف،

## ۳- نتایج و بحث

تعداد پیچان‌رودها، زاویه مرکزی، شعاع پیچان‌رودی، ضریب خمیدگی، طول موج و طول دره و مقایسه آن‌ها با یک‌دیگر مشخص شد که الگوی رودخانه در سال ۱۳۴۷ در بازه مورد مطالعه از نوع توسعه نیافته و در سال ۱۴۰۰ در کل بازه الگوی رودخانه پیچان‌رودی توسعه نیافته است. الگوی کلی رودخانه از سال ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰ تغییر عمده‌ای نداشته و الگوی رودخانه همواره از نوع پیچان‌رودی است. تعداد پیچان‌رودهای محدوده مورد مطالعه در طی ۵۳ سال از همان ۲۳ پیچان‌رود بوده و تعداد پیچان‌رودها افزایش نیافته است. ثابت بودن تعداد پیچان‌رودها حاکی از عدم تغییر در الگوی ریخت‌شناسی رودخانه است. با توجه به شکل ۳ تعداد قوس‌ها و مسیر تغییر چندانی ندارد ولی عرض رودخانه در طول ۵۳ سال اخیر کم و یا زیاد شده است. در بعضی نقاط قوس‌ها تندتر و بعضی نقاط قوس‌ها به راست و چپ کشیده شده‌اند.

نتایج نشان داد که الگوی رودخانه سینوسی می‌باشد و مسیر رودخانه در بازه زمانی مورد مطالعه تغییر نکرده، رودخانه افزایش طول نداشته و به تعداد پیچان‌رودها افزوده نشده است. تغییرات در برخی بازه‌ها بیش‌تر بوده است. بازه‌هایی که بیش‌تر تغییر مسیر را داشته‌اند در سازندهای فرسایش‌پذیر، در محدوده دشت سیلابی قرار داشته و رده خاک آن‌ها اینسپتی سول است. لذا دلیل تغییرپذیری بیش‌تر آن‌ها را می‌توان به نوع خاک منطقه مرتبط دانست. همچنین قدرت جریان آب نیز در بازه‌های تغییرپذیر موجب فرسایش کناری رودخانه می‌شود. میزان فرسایش را می‌توان به سست بودن و فرسایش‌پذیری سازندها ربط داد. شکل ۳ مقایسه و انطباق پلان و مسیر رودخانه پس از رقومی کردن مسیر رودخانه از روی تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی در دو بازه زمانی ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبه متغیرهای هندسی رودخانه نظیر



شکل ۳- مقایسه و انطباق پلان و مسیر رودخانه در دو بازه زمانی ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰

Figure 3- Comparison and adaptation of the plan and route of the river in two time periods of 1968 and 2021

## ۳-۱- پارامترهای هندسی

خط مرکزی رودخانه و ثابت بودن حالت سینوسی رودخانه در اثر وجود سازندهای غیرفرسایش‌پذیر است. با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ متوسط ضریب خمیدگی در دهه ۴۰ حدود ۱/۱۱ و در سال ۱۴۰۰ حدود ۱/۰۸ می‌باشد. با توجه به جدول تقسیم‌بندی رودخانه‌ها این بازه مورد مطالعه رودخانه خنداب حالت سینوسی دارد و در دو مقطع زمانی تغییر خاصی نداشته است. تغییرات ضریب خمیدگی حدود ۲/۷ درصد می‌باشد (شکل ۴).

جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه پارامترهای هندسی محاسبه شده در دو مقطع زمانی ۱۳۴۶ و ۱۴۰۰ را برای بازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند. نتایج حاصل از استخراج و مقایسه آماری متغیرهای هندسی این بخش از رودخانه نظیر طول موج، ضریب سینوسی، نسبت عرض به عمق، شعاع قوس، زاویه مرکزی و طول دره در دوره زمانی ۵۳ ساله را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب سینوسی رودخانه از ۱/۵ به ۱/۳ کاهش یافته و طول موج و شعاع دایره‌های مماس بر پیچان‌رودها نیز افزایش یافته است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات هیدرولوژیک، دانه‌بندی مواد بستر و دیواره‌ها، تغییرات کاربری اراضی و الگوی کشت بخصوص گسترش کشت در سیلاب‌دشت رودخانه، مهم‌ترین عوامل تغییردهنده پلان مساحتی و ریخت‌شناسی بازه مطالعاتی در طی سال‌های اخیر است.

## ۳-۲- تعداد پیچان‌رودها و طول رودخانه

تعداد پیچان‌رودهای رودخانه خنداب در محدوده مورد مطالعه از سال ۱۳۴۷ تا سال ۱۴۰۰ تغییر چندانی نداشته است. بنابراین در بازه زمانی ۵۳ ساله، طول خط مرکزی رودخانه تغییر چندانی نداشته است. تغییر نکردن طول رودخانه نشان‌دهنده ثابت بودن

۳-۳- شاخص پیچان‌رودی (سینوسی یا ضریب پیچشی)  
توجه به شکل الگوی رودخانه در بسیاری از مسائل طراحی و مهندسی رودخانه، از جمله تعیین محل پل‌ها، محل انجام عملیات به‌سازی مسیر، ایجاد تأسیسات نظیر ایستگاه پمپاژ و ... مهم بوده، برای درک بهتر مسائل هیدرولیکی رودخانه‌های آبرفتی داشتن دانش کافی در مورد الگوی رودخانه ضروری است. ضریب پیچشی (ضریب سینوسی) نسبت طول دره به طول موج هر پیچان‌رود بوده، یکی از معیارهای کمی است که در تقسیم‌بندی شکل رودخانه استفاده می‌شود و نشان‌دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول خم رودخانه است و میزان تکامل پیچ‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر میانگین حسابی، بیشینه، کمینه و انحراف معیار بازه رودخانه در دو دوره ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰

Table 1- Arithmetic mean values, maximum, minimum and standard deviation of river interval in two periods of 1968 and 2021

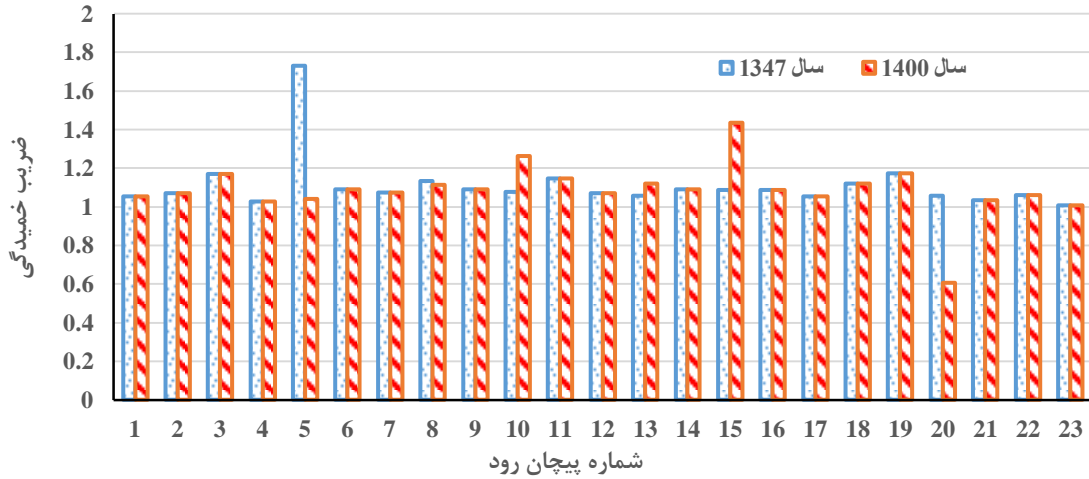
پارامتر	زاویه مرکزی	طول قوس	شعاع قوس	طول موج	ضریب خمیدگی	طول دره	دوره
متوسط	77	230.13	171	413.25	1.11	224.46	1347
بیشینه	111	954	693	1781.80	1.73	967.12	
کمینه	35	37	25	73.37	1.00	37.24	
انحراف معیار	19.72	181.05	130.58	331.03	0.141	179.72	1400
متوسط	81.26	361.78	160.26	687.63	1.08	212.12	
بیشینه	160	3888	693	1781.80	1.43	967.12	
کمینه	35	37	25	73.37	0.606	37.24	
واریانس	28.04	788.32	133.63	334.93	0.138	180.70	

جدول ۲- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ضریب خمیدگی (Yamani et al., 2011)

Table 2- Division of rivers based on curvature coefficient (Yamani et al., 2011)

ضریب خمیدگی	1-1.05	1.06-1.25	1.25-2	2<
نوع رودخانه	مستقیم	سینوسی	پیچان‌رودی	پیچان‌رودی شدید

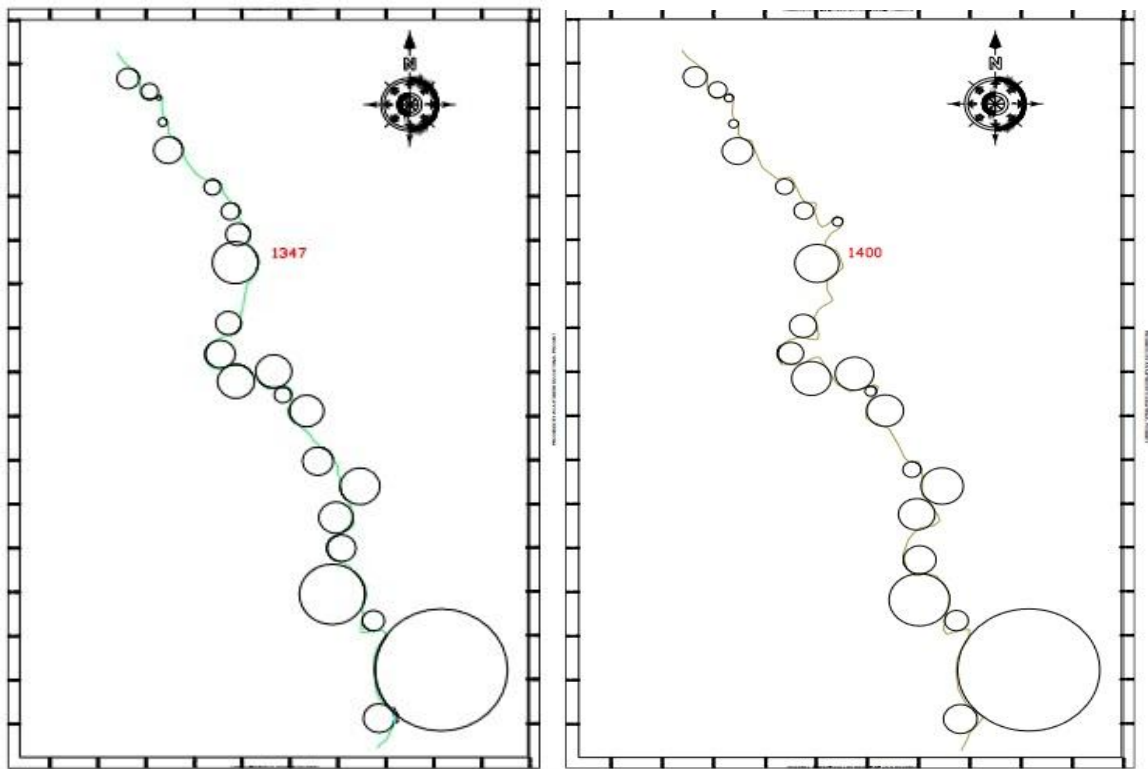




شکل ۴- تغییرات ضریب خمیدگی پیچان رود در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰  
 Figure 4- Changes in the bending coefficient of Pichanrood in two time periods of 1968 and 2021

رودخانه در گذشته و حال مشخص و نسبت به هم مقایسه شده‌اند (شکل ۵). با توجه به شکل در دو دوره زمانی، الگوی رودخانه همان حالت سینوسی می‌باشد و تغییرات زیادی دیده نمی‌شود، فقط در بعضی مسیرها پیچ رودخانه به سمت راست یا چپ کشیده شده یا عرض رودخانه تغییر کرده است. این تغییر الگو در عکس-ها و تصاویر آشکارا دیده می‌شود.

برای تحلیل‌های کمی نیز متغیرهای هندسی، نظیر طول پیچان رود، طول موج، ضریب سینوسی، زاویه مرکزی، شعاع و شعاع نسبی پیچان رودها در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰ با ترسیم دایره‌های مماس بر پیچان رودهای بازه مورد اشاره اندازه‌گیری شده و مقایسه آماری بین آن‌ها صورت گرفته است. همچنین با استفاده از مسیرهای ترسیمی، تغییرات مکانی مسیر

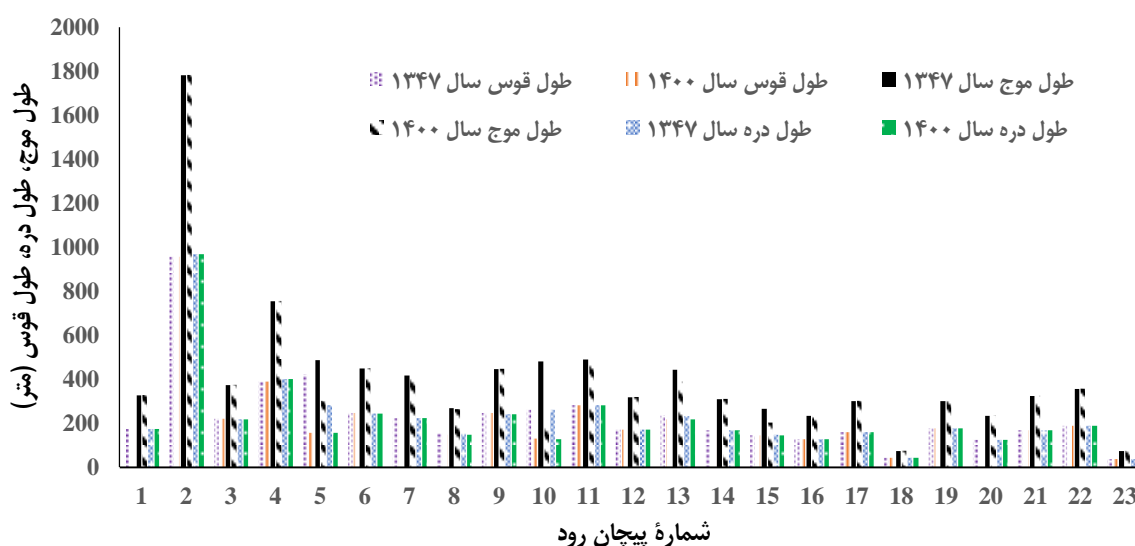


شکل ۵- دوائر برازش داده شده بر قوس‌های رودخانه در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰  
 Figure 5- Circles fitted on the turns of the river in two periods of 1968 and 2021

## ۳-۴- طول موج و طول دره

طول دره و طول موج رودخانه دو پارامتر اصلی در طبقه‌بندی رودخانه و تعیین ضریب پیچشی رودخانه‌ها بوده، معمولاً همبستگی بالایی بین آن‌ها وجود دارد. تغییرات طول موج و طول دره در دو مقطع زمانی در بازه مورد مطالعه رودخانه نشان می‌دهد که در محدوده مورد مطالعه، ریخت‌شناسی رودخانه دست‌خوش تغییرات عمده نشده است و پیچان‌رودهای محدوده مورد مطالعه تغییر چندانی نکرده‌اند (شکل ۶). بررسی تغییرات طول موج و طول دره و طول قوس در دو دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین طول موج در سال ۱۳۴۷ حدود ۴۱۳/۲۵ و در سال ۱۴۰۰ حدود ۳۸۷/۶۳ می‌باشد. طول موج در سال ۱۳۴۷ نسبت به سال ۱۴۰۰ بیش‌تر بوده است. تغییرات در مقایسه با دوره

زمانی ۵۳ ساله حدود ۶/۲ درصد و بسیار کم است. شکل ۶ نیز تغییرات طول موج پیچان‌رودهای بازه رودخانه خنداب در دو بازه زمانی (۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل طول موج در تمام پیچ‌ها تقریباً هم‌اندازه هستند و فقط در پیچان‌رود شماره ۵ و ۱۰ در سال ۱۴۰۰ نسبت به ۱۳۴۷ کاهش داشته است. با کاهش میزان طول موج، فاصله بین پیچان‌رودها نیز کم شده است. همچنین این شکل تغییرات طول دره نسبت به پیچان‌رودها را نشان می‌دهد. میانگین طول دره در سال ۱۳۴۷ حدود ۲۲۴/۴۶ و در سال ۱۴۰۰ حدود ۲۱۲/۱۲ است. تغییرات در دو بازه زمانی حدود ۵/۵ درصد و بسیار اندک نیز بوده است.



شکل ۶- تغییرات طول قوس، طول موج و طول دره پیچان‌رودهای رودخانه خنداب در بازه مورد مطالعه در بازه زمانی (۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰)  
Figure 6- Changes in arc length, wavelength and length of Khondab river meanders in the study period in period (1968-2021)

## ۳-۵- زاویه مرکزی-شعاع دایره

زاویه مرکزی به‌عنوان معیاری برای تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان‌رودی یک رودخانه استفاده می‌شود. اگر از مرکز دوایر مماس بر قوس‌ها دو شعاع به نقاط عطف دوایر با دره رودخانه ترسیم شود، به زاویه ایجاد شده زاویه مرکزی و شعاع دایره مماس بر قوس‌ها شعاع دایره گفته می‌شود. کورنیش ۱۹۸۰ برای بیان کیفی توسعه و پیشرفت پیچان‌رودی شدن رودخانه‌های آبرفتی و تمایز آن‌ها از یک‌دیگر از معیار زاویه مرکزی استفاده کرد و جدول ۳ را برای تقسیم‌بندی توسعه پیچان‌رودی رودخانه‌ها پیشنهاد نمود. برای به‌دست آوردن زاویه مرکزی و شعاع دایره، پس از برازش دوایر مماس بر قوس رودخانه، زاویه مرکزی هر قوس در نرم‌افزار اتوکد محاسبه شد (شکل ۷). سپس میانگین حسابی برای دو بازه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۴۷ و ۱۴۰۰ محاسبه و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شد. متوسط زاویه مرکزی در

سال ۱۳۴۷ حدود ۷۷ درجه و در سال ۱۴۰۰ حدود ۸۱/۲۶ درجه بوده است. با توجه به جدول ۳ هرچند که با توجه به پیشنهاد کورنیش این بازه رودخانه از نظر توسعه پیچان‌رودی در رده توسعه نیافته قرار داشته، ولی میانگین زاویه مرکزی آن‌ها در بخش مورد مطالعه در سال ۱۳۴۷ کمی کم‌تر از سال ۱۴۰۰ است. به عبارتی دیگر، میزان توسعه‌یافتگی این پیچان‌رودها در سال ۱۳۴۷ کم‌تر از سال ۱۴۰۰ بوده است. شکل ۷ مقایسه زاویه مرکزی در دو دوره زمانی را هم نشان می‌دهد. مقایسه زاویه مرکزی پیچان‌رودهای بخش مورد مطالعه نشان می‌دهد که در سال ۱۴۰۰، زاویه مرکزی نسبت به ۱۳۴۷ حدود ۵/۵ درصد افزایش یافته است. همچنین هم‌زمان با افزایش زاویه مرکزی پیچان‌رودهای رودخانه در سال ۱۴۰۰، میانگین شعاع دوایر مماس بر پیچان‌رودها کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش حالت سینوسی بخشی از رودخانه در طول ۵۳ سال است.

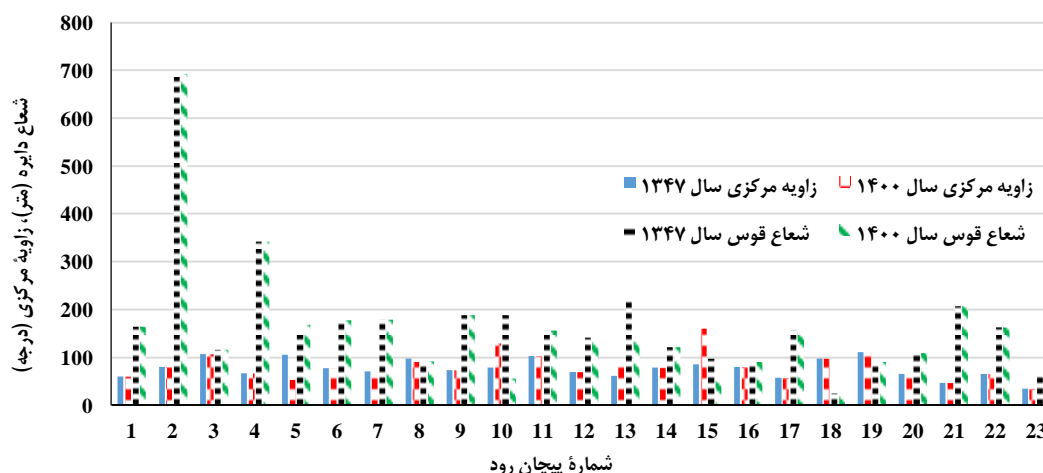
تغییرات در این بازه‌ها در کوتاه‌مدت کم است، اما باید توجه داشت که در درازمدت نواحی کوهستانی نیز در معرض تغییرات مسیر رودخانه هستند. میزان توسعهٔ پیچان‌رودها را می‌توان به سست بودن و فرسایش‌پذیری سازندهای مربوط دانست. جنس خاک در این بازه اینسپتی سول است و باید توجه داشت که جنس خاک تا حد زیادی متأثر از جنس سازندهای زمین‌شناسی منطقه است. همچنین در شکل ۷ تغییرات شعاع پیچان‌رودهای رودخانهٔ خنداب در بازهٔ مورد مطالعه، در دو بازهٔ زمانی ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل شعاع دایرهٔ پیچان‌رود تغییرات زیادی ندارد.

میانگین زاویهٔ مرکزی در سال ۱۴۰۰ بیش‌تر از سال ۱۳۴۷ بوده، یعنی رودخانه در این سال پیچان‌رودهای بالغ‌تری داشته است. میانگین تغییرات طول‌موج و طول دره در سال ۱۴۰۰ نسبت به سال ۱۳۴۷ کم‌تر بوده که می‌توان نتیجه گرفت که قدرت مانور رودخانه در این سال کم‌تر است. در مورد رودخانهٔ خنداب این نکته قابل ذکر است که توانایی حفر و قدرت جریان رودخانه در مناطق دشتی نیز هم‌چنان بالا است. دلیل وقوع فرسایش کناری در بازهٔ مورد مطالعه، وجود رسوبات سست و فرسایش‌پذیر کواترنری است. در مناطق کوهستانی پیچان‌رودها از روند کلی چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های منطقه پیروی می‌کنند و

جدول ۳- کاربرد زاویهٔ مرکزی در تقسیم‌بندی توسعهٔ پیچان‌رودی (Telvari, 2004)

Table 3- Application of central angle in the distribution of winding development (Telvari, 2004)

زاویه مرکزی بر حسب درجه	شکل رودخانه
0	مستقیم
1-41	شبه پیچان‌رود
41-85	پیچان‌رود توسعه نیافته
85-158	پیچان‌رود توسعه یافته
158-296	پیچان‌رود زیاد توسعه یافته
296<	پیچان‌رودی توسعه گامی



شکل ۷- تغییرات زاویهٔ مرکزی و شعاع قوس پیچان‌رودهای رودخانهٔ خنداب در بازهٔ مورد مطالعه از (۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰)  
Figure 7- Changes in the central angle and radius of curvature of the bends of the river Khondab in the study period from (1968 to 2021)

سوم است. Sharafi et al. (2014) تغییرات ریخت‌شناسی رودخانهٔ اترک در بازهٔ زمانی ۲۰ ساله را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در این مقطع زمانی الگوی رودخانهٔ اترک تغییر زیادی نداشته است. با توجه به این که بیش‌تر مسیر الگوی پیچان‌رودی دارد، مشخصات هندسی پیچان‌رودها در مقطع زمانی فوق تغییر زیادی نکرده است. می‌توان گفت که نتایج این تحقیق با تحقیق Hosseini (2014) و Sharafi et al. (2014) شباهت دارد.

نتایج این تحقیق با چند مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج Pan (2013) نشان داد که شاخص‌های ریخت‌شناسی رودخانه بانکورا در فواصل زمانی مورد بررسی در حال تغییر بوده و این تغییرات در نواحی مختلف متفاوت است. نتایج مطالعهٔ Hossieni (2014) در رودخانهٔ زنجان‌رود به روش مقایسهٔ زمانی و مکانی با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که آبراههٔ زنجان‌رود در محدودهٔ مورد مطالعه روند پایداری دارد و میزان پایداری در بازهٔ دوم بیش‌تر از بازهٔ اول و

## ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه نشان می‌دهد که در سال ۱۴۰۰، زاویه مرکزی نسبت به ۱۳۴۷ حدود ۵/۵ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین هم‌زمان با افزایش زاویه مرکزی پیمان‌رودهای رودخانه در سال ۱۴۰۰، میانگین شعاع دواپر مماس بر پیمان‌رودها کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش حالت سینوسی بخشی از رودخانه در طول ۵۳ سال است. متغیرهای دبی و رسوب از عوامل مهم در شکل‌گیری الگوی رودخانه می‌باشند. اما تغییراتی که انسان‌ها در حوضه و مسیر رودخانه ایجاد می‌کنند هم نقش اساسی دارد که تفکیک آن‌ها از هم مشکل می‌باشد و نیاز به مدل‌سازی کمی و کیفی دارد. با توجه به این‌که در رفتار رودخانه و پیمان‌رود شدن آن عوامل مختلفی دخیل هستند، در این پژوهش عوامل مختلف تفکیک نشده و تأثیر برآیند تمام عوامل ارائه شده است که این می‌تواند از محدودیت‌های پژوهش باشد. در پایان پیشنهاد برگزاری کلاس‌های ترویجی برای بهره‌برداران و کشاورزان حاشیه رودخانه جهت ایجاد خاکریز و نحوه کمک به تثبیت کنار رودخانه از روش‌های بیولوژیکی و مکانیکی (سازه‌ای) داده می‌شود. قبل از هرگونه برداشت مصالح، محدوده مجاز برداشت با انجام فرایند تحلیل رسوب رودخانه مشخص شود.

الگوی کلی رودخانه از سال ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۰ تغییر عمده‌ای نداشته است و الگوی رودخانه همواره از نوع پیمان‌رودی است. تعداد پیمان‌رودهای محدوده مورد مطالعه طی ۵۳ سال افزایش نیافته و تعداد آن‌ها همان ۲۳ پیمان‌رود بوده است. ثابت بودن تعداد پیمان‌رودها حاکی از عدم تغییر در الگوی ریخت‌شناسی رودخانه است. نتایج حاصل از استخراج و مقایسه آماری متغیرهای هندسی این بخش از رودخانه نظیر طول موج، ضریب سینوسی و نسبت عرض به عمق در دوره زمانی ۵۳ ساله نشان می‌دهد که ضریب سینوسی رودخانه از ۱/۵ به ۱/۳ کاهش یافته و طول موج و شعاع دایره‌های مماس بر پیمان‌رودها نیز افزایش یافته است. متوسط ضریب خمیدگی در دهه ۴۰ حدود ۱/۱۱ و در سال ۱۴۰۰ حدود ۱/۰۸ می‌باشد. با توجه به جدول تقسیم‌بندی رودخانه‌ها این بازه مورد مطالعه رودخانه خنداب حالت سینوسی دارد و در دو دوره زمانی تغییر خاصی نداشته است. تغییرات ضریب خمیدگی حدود ۲/۷ درصد می‌باشد. الگوی رودخانه همان حالت سینوسی می‌باشد و تغییرات زیادی دیده نمی‌شود، فقط در بعضی مسیرها پیچ رودخانه به سمت راست یا چپ کشیده شده یا عرض رودخانه تغییر کرده است. مقایسه زاویه مرکزی پیمان‌رودهای بخش مورد

## منابع

- رضایی، ح.، قره‌باغی، پ.، خانی تملیه، ذ.، و میرعباسی نجف‌آبادی، ر. (۱۴۰۰). تحلیل جریان ماهانه رودخانه سفیدرود با استفاده از تئوری آشوب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۲۷-۴۱. شرفی، س.، شامی، ا.، و یمانی، م. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه اترک در یک بازه زمانی ۲۰ ساله. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۴(۱۴)، ۱۲۹-۱۵۰.
- شریفی پیچون، م.، و پرنون، ف. (۱۳۹۶). ارزیابی و تحلیل تغییرات هندسی نیم‌رخ طولی و عرضی رودخانه قره‌سو از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۹۳. *جغرافیا و توسعه*، ۱۵(۴۶)، ۴۳-۶۰.
- مددی، ع.، بهشتی، جاوید، ا.، و فتحی، م.ح. (۱۳۹۴). آشکارسازی تغییرات بستر رودخانه و بررسی مورفولوژی رودخانه‌ای با توجه به تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی (مطالعه موردی: زرینه‌رود). *هیدروژئومورفولوژی*، ۱(۲)، ۲۵-۴۰.
- مرادی‌چونقرالو، پ.، نظرنژاد، ح.، و اسدزاده، ف. (۱۴۰۱). مقایسه توزیع اندازه ذرات رسوبات معادن شن و ماسه کوهی و رودخانه‌ای شهرستان ارومیه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۳)، ۵۲-۶۵.
- مرادی‌نژاد، ا.، و حسینی، س.ا. (۱۴۰۲). بررسی ظرفیت برداشت شن ماسه و تأثیر آن بر تغییرات مورفولوژی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه شرا). *دانش آب و خاک*، doi: 10.22034/ws.2021.47500.2430

- آزادی‌وش، ز.، و مومی‌پور، م. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات ژئومورفیک بستر رودخانه مارون در محدوده شهرستان بهبهان با تصاویر ماهواره‌ای. *فضای جغرافیایی*، ۱۹(۶۶)، ۲۰۷-۲۲۲.
- المدرسی، س.ع.، خبازی، م.، اولیایی، ع.، و شهبازی، م. (۱۳۹۷). بررسی نقش عوامل مؤثر بر پیمان‌رود شدن و تغییرات رودخانه دالکی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۹(۱)، ۱۶۵-۱۷۵.
- تلوری، ع. (۱۳۸۳). اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۵۴ صفحه.
- جواهری طهرانی، م.، موسوی، س.ف.، و حسینی، خ. (۱۳۹۵). مطالعه ریخت‌شناسی پیمان‌رودها با جریان کنترل شده با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS (مطالعه موردی: رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد زاینده‌رود). *علوم آب و خاک*، ۲۰(۷۷)، ۲۵-۴۴.
- حسینی، س.ج. (۱۳۹۴). بررسی عوامل مؤثر در تکامل پیمان‌رودی زنجان‌رود و پهنه‌بندی پایداری پادگانه‌های آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- دولتی، ج. (۱۳۸۷). بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی بخش میانی رودخانه اترک با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

یمانی، م.، دولتی، ج.، و زارعی، ع. (۱۳۸۹). تاثیرگذاری عوامل هیدروژئومورفیک در تغییرات زمانی و مکانی بخش میانی رودخانه اترک. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۵(۹۹)، ۱-۲۴.

## References

- Abate, M., Nyssen, J., Steenhuis, T.S., Moges, M., Tilahun, S.A., Enku, T., & Adgo, E. (2015). Morphological changes of Gumara River channel over 50 years, upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 525, 152-166.
- Almodaresi, S., Khabazi, M., Olyae, A., & Shahbazi, M. (2018). Analyzing the role of the effective factors on meandering and changes of dalaki river using remote sensing and GIS. *Geography and Environmental Planning*, 29(1), 165-175 (in Persian).
- Azadivash, Z., & Mumipour, M. (2019). Study of geomorphic changes of Maroon river bed in Behbahan district using satellite images. *Geographic Space*, 19(66), 207-222 (in Persian).
- Bawa, N., Jain, V., Shekhar, Sh., Kumar, N., & Jyani, V. (2014). Controls on morphological variability and role of stream power distribution pattern, Yamuna River, Western India. *Geomorphology*, 223, 60-72.
- Dowlati, C. (2008). Investigating geomorphological changes in the middle part of Atrak River using GIS. M.Sc. Thesis, University of Tehran (in Persian).
- Hosseini, S.J. (2014). Investigating the effective factors in the development of Pichan River in Zanjan River and the stability zoning of its barracks. M.Sc. Thesis, University of Tehran (in Persian).
- Javaheri Tehrani, M., Mousavi, F., & Hosseini, Kh. (2016). Morphologic study of meandering rivers under controlled flow using RS and GIS techniques, case study: Zayandehrud River at the downstream of Zayandehrud Dam. *Journal of Water and Soil Science*, 20(77), 25-44 (in Persian).
- Kessler, A.C., Gupta, S.C., & Brown, M.K. (2013). Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement. *Geomorphology*, 201, 312-322.
- Madadi, A.S., Beheshti Javid, A., & Fathi, M. (2015). Detection of river bed changes and river morphology study according to geological structures, Case study: Zarinehroud river. *Hydrogeomorphology*, 1(2), 25-40 (in Persian).
- مقصودی، م.، شرفی، س.، و مقامی، ی. (۱۳۸۹). روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از GIS، RS و Auto Cad. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۴(۳)، ۲۷۵-۲۹۴.
- مومنه، ص. (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۳)، ۱-۱۶.
- Maqsoudi, M., Sharafi, S., & Maghami, Y. (2010). Changes in morphological patterns of Khorramabad river using Auto CAD, GIS, RS. *Journal of Humanities-Planning of Space*, 14(3), 275-294. (in Persian).
- Minghui, Y., Hongyan, W., Yanjie, L., & Chunyan, H. (2010). Study on the stability of non-cohesive river bank. *International Journal of Sediment Research*, 25(4), 391-398.
- Momeneh, S. (2022). Performance comparison of artificial intelligence models with IHACRES model in streamflow modeling of the Gamasiab River catchment. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(3), 1-16 (in Persian).
- Moradi Chonghoralu, P., Nazarnejad, H., & Asadzadeh, F. (2022). Comparison of particle size distribution of sediments in mountain and river sand and gravel mining in Urmia City. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(3), 52-65 (in Persian).
- Moradinejad, A., & Hoseini, S. (2023). Investigation of sand harvesting capacity and its effect on river morphology changes (Case study of Sharah River). *Water and Soil Science*, doi: 10.22034/ws.2021.47500.2430 (in Persian).
- Pan, S. (2013). Application of remote sensing and GIS in studying changing river course in Bankura district, west Bengal. *International Journal of Geometrics and Geosciences*, 4 (1), 149-163.
- Ramos, J., & Gracia, J. (2012). Spatial-temporal fluvial morphology analysis in the Quelite river: Its impact on communication systems. *Journal of Hydrology*, 412, 269-278.
- Rezaie, H., Garebaghi, P., Khani Temelyeh, Z., & Mirabbasi-Najafabadi, R. (2022). Monthly flow analysis of Sefidrood River using Chaos theory. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(1), 27-41 (in Persian).
- Rozo, M.G., Nogueira, A.C.R., & Carlomagno, S.C. (2014). Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986-2006. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1471-1488.
- Sharafi, S., Shami, A., & Yamani, M. (2014). Investigation of morphological changes of

- Atrak river in the period of 20 years. *Journal of Geographic Space Planning*, 4(14), 129-150 (in Persian).
- Sharifi Paichoon, M., & Parnoon, F. (2017). The study and analysis of geometrical variations of longitudinal and cross profiles of Qaresou River during 1954-2014. *Geography and Development*, 15(46), 43-60 (in Persian).
- Singh, M. (2014). Morphology changes of Ganga river over time at Varanasi. *Journal of River Engineering*, 2(2), 1-7.
- Telvari, A. (2004). *Preliminary principles of river management and engineering*. Soil Conservation and Watershed Research Institute, 154 pages (in Persian).
- Uddin, H., Shrestha, B., & Alam, M.S. (2011). Assessment of morphological changes and vulnerability of river bank erosion alongside the river Jamuna using remote sensing. *Journal of Earth Science and Engineering*, 1, 29-34.
- Yamani, M., Dowlati, J., & Zarei, A. (2011). Hydro geomorphic factors influence periodic changes in Atrak River middle section. *Geographical Research*, 25(99), 1-24 (in Persian).