



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و هفتم، بهار ۱۴۰۰

صص ۹۷-۸۱

doi: <https://dx.doi.org/10.22067/geoh.2021.68445.1012>

مقاله پژوهشی

## مورفولوژی و فرآیندهای مؤثر در تغییرات مسیر جریان رودخانه سفیدرود برای پیش‌بینی افق ۲۰۳۰

حمیدرضا معصومی<sup>۱</sup> - گروه زمین‌شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران.

علیرضا حبیبی - پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

علیرضا قدرتی - مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۱۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۲۸

### چکیده

سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه سواحل جنوب دریای خزر نقش مهمی در زندگی، فعالیت‌ها و سرمایه‌های انسانی منطقه دارد. عوامل مورفولوژیک رودخانه و محیط‌های پیرامون آن و پیش‌بینی شرایط آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و آمایش دشت‌های ساحلی مؤثر و ضروری واقع شود. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ سال‌های، ۲۰۰۲، ۲۰۱۸، همراه با داده‌های تغییرات تراز دریای خزر و دبی سفیدرود، بررسی‌های میدانی و نرم‌افزارهای ArcGIS، Envi 5.3، Idrisi TerrSet و 10.4.1 به‌عنوان ابزار تحقیق بهره گرفته شد. ابتدا مقادیر احتمال تبدیل کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ بر مبنای مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل تلفیقی، دارای دقت و صحت بالایی جهت پیش‌بینی الگوی آینده است. سپس با توجه به دقت و صحت خروجی مدل، نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ تهیه شد. با برآزش دو نقشه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ تغییرات محتمل در محیط رودخانه به دست آمد و در چهار محدوده مورد تحلیل قرار گرفت. درنهایت با استفاده از داده‌های تغییرات تراز دریای خزر و دبی سالانه رودخانه سفیدرود، روند تغییرات و پیش‌بینی مدل، موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین احتمال تغییرات در منطقه مطالعه مربوط به واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت است. همچنین تا سال ۲۰۳۰، روند افزایش عرض کانال رودخانه رخ خواهد داد.

این امر نشان دهنده افزایش میانگین دبی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سطح بالاتر از ۲۷- متر تا سال ۲۰۳۰ است.

**کلیدواژه‌ها:** کانال رودخانه، زنجیره مارکف، مدل سلول‌های خودکار، مطالعات سنجش‌ازدور، سفیدرود.

#### ۱- مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان شریان حیاتی، از دیرباز تعیین‌کننده گستره و استقرار تمدن‌ها به‌ویژه در دشت‌های ساحلی بوده‌اند. سفیدرود بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه سواحل جنوبی دریای خزر، به دلیل وجود کاربران متعددی از جمله کشاورزی، صنعت، گردشگری، پرورش آبزیان و... یکی از مهم‌ترین منابع آب در استان گیلان محسوب می‌شود. بارش‌های شدید و جاری شدن آب از بالادست، لایروبی نشدن رودخانه‌ها، تغییر در کانال رود و کم شدن فضای آبگذری نسبت به حجم آب ورودی به هنگام بارندگی، از عوامل وقوع سیلاب در رودخانه‌های مناطق ساحلی هستند. در این میان اهمیت مطالعات مورفولوژیکی رودخانه‌ها و بررسی عکس‌العمل رودخانه در برابر فرایندهای تغییر دهنده برقراری موازنه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو باید رودخانه را به‌مثابه یک موجود زنده دانست و برای کاهش اثرات تغییر آن، عملکرد هوشیارانه‌ای مبتنی بر قواعد علمی در برنامه‌ریزی‌های محیطی بکار برد. لذا دانستن شرایط رودخانه و محیط‌های پیرامون آن و پیش‌بینی شرایط آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و آمایش دشت‌های ساحلی مؤثر و ضروری واقع شود. در این میان استخراج اطلاعات به‌صورت طبقه‌بندی شده از پرکاربردترین روش‌های موجود است (میرزایی‌زاده و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). بدین ترتیب با استفاده از تغییرات روی داده در گذر زمان می‌توان آینده را پیش‌بینی کرد. داده‌های ماهواره‌ای یکی از سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های در اختیار محققان، برای تهیه نقشه است (پال و مدر<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵). یکی از روش‌های شبیه‌سازی تغییرات در گذر زمان، مدل ترکیبی زنجیره مارکف و سلول‌های خودکار<sup>۳</sup> است. با استفاده از این مدل، نسبت تبدیل کاربری‌ها و امکان پیش‌بینی آن‌ها در آینده فراهم می‌شود (مولر و میدلتون<sup>۴</sup>، ۱۹۹۴). در سال‌های اخیر رهیافت‌های مفهومی مختلفی از سلول خودکار و تحلیل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین ارائه شده است (سوبدی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳). موندال و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۰)، در تحقیقی تأثیر فیلترهای سازگار با مدل سلول خودکار مارکف را بر نتایج پیش‌بینی تغییر سرزمین بررسی نموده و نتیجه گرفته‌اند که ضریب همبستگی (r) برای فیلترهای ۵x۵ بیشترین تأثیر را در توزیع

1 Mirzaeizadeh et al

2 Pal and Mather

3 Cellular Automation- CA

4 Muller and Middleton

5 Subedi et al

6 Mondal et al

جغرافیایی / مکانی داشته است. مدل و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) به بررسی الگوی فرسایش و رسوب گذاری در کانال رودخانه دشت های ساحلی پرداخته و نقش بهره گیری از کانال های آنبرانچ برای پایدارسازی کانال رودخانه پرداخته اند. عبدالهی باغسیاهی و همکاران (۱۳۹۷) به پهنه بندی سیلاب آبراهه های منطقه مکران ساحلی با استفاده از مدل HEC-RAS و GIS پرداخته و نتیجه گرفته اند که هیچ گونه خطری از جهت پهنه های سیلابی متوجه تأسیسات ساحلی منطقه نخواهد بود. جینز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) عوامل مؤثر بر فرسایش کانال هشت رودخانه در انگلیس و ولز را با استفاده از روش های اصلاح شده GIS تجزیه و تحلیل نموده اند. کندلف و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) در کتاب خود، طبقه بندی ژئومورفیکی را برای رودخانه ها و آبراهه ها ارائه داده اند. هلالات ناصریان و همکاران (۱۳۹۲)، مدل جامع سیلاب منطقه دشتیاری شهرستان چابهار را توسط مدل Mike Flood برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله تبیین نموده اند. معصومی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی مورفولوژی و پیچانرودی رودخانه زهره پرداخته و نتیجه گرفته اند که این رودخانه در رده رودخانه های با پیچانرودی بیش از حد توسعه یافته قرار دارد. جداری عیوضی و همکاران (۱۳۸۴)، تکامل مورفولوژیک دلتای سفیدرود در کواترن را با استفاده از شواهد زمین شناسی و تصاویر ماهواره ای مطالعه نموده است. براوارد و پتی<sup>۴</sup> (۲۰۰۹)، به بررسی مورفولوژی رودخانه ها و کانال ها پرداخته و آن ها را طبقه بندی کرده اند. در میان عوامل مؤثر بر مورفولوژی رودخانه های مناطق ساحلی، تراز آب دریا در مصب و تغییرات آن یکی از عوامل مهم است (مدل و همکاران، ۲۰۲۰). از آنجاکه تغییرات تراز آب های آزاد به کندی صورت می گیرد و در مقیاس زمانی انسان تا حدودی نامحسوس است، اغلب پژوهش های موجود بر اساس مدل های ریاضی انجام شده است. لیکن تغییرات تراز دریای خزر به عنوان بزرگ ترین دریاچه زمین، به واسطه شرایط خاص هیدرولوژیکی، زمین شناسی و اکولوژیکی دارای تأثیرات چشمگیر و قابل درک در مقیاس زمانی کوتاه مدت است. لذا این موضوع مورد توجه محققین بسیاری بوده است. خوشروان و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۰) با استفاده از اندازه گیری های میدانی و مطالعات GIS به بررسی تأثیر نوسانات تراز دریای خزر بر تالاب بوجاق در دلتای سفیدرود پرداخته اند. چن و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) به بررسی نقش تغییر در رژیم آبی رودخانه های منتهی به دریای خزر در تغییرات تراز آب پرداخته است. عطایی و همکاران (۱۳۹۵) تأثیر تغییرات تراز دریای خزر را بر انتقال رسوب ساحلی و خطوط ساحلی را مورد بررسی قرار داده اند. عبدالهی کاکرودی (۱۳۹۲) تأثیر نوسانات دریای خزر بر مناطق ساحلی جنوب شرق آن، در محدوده خلیج گرگان و تالاب گمیشان را بررسی کرده است. اقتصادی و زاهدی (۱۳۹۰) عوامل مؤثر بر نوسانات تراز آب دریای خزر در سواحل جنوبی را با استفاده از داده های هواشناسی مورد تحلیل قرار داده اند. با

1 Medel et al

2 Janes et al

3 Kondolf et al

4 Bravard and Petit

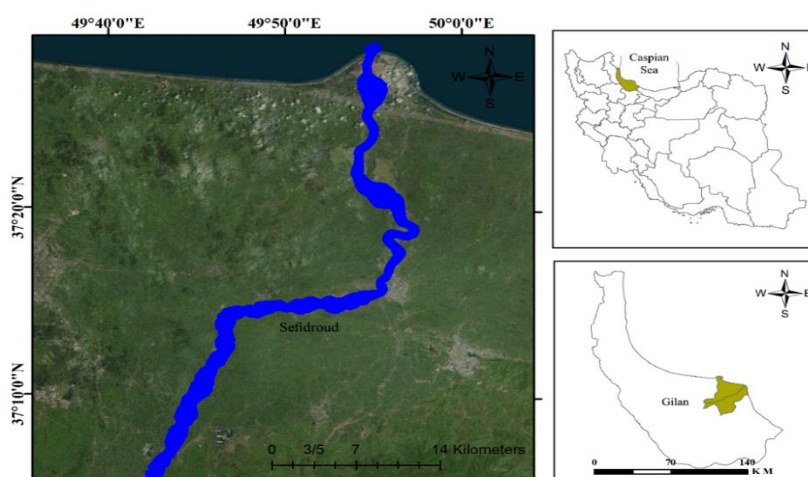
5 Khoshnavan et al

6 Chen et al

توجه به اهمیت موضوع نوسانات تراز دریای خزر و عملکرد متقابل فرایندهای مؤثر در آن، شناخت این فرایندها اولین گام در تحلیل اثرات توأم آن‌ها بر محیط پیرامون است. پرواضح است که هرگونه تغییر در فرایندهای محیطی می‌تواند عکس‌العمل طبیعت را در قالب عملکرد رودخانه بر منطقه ساحلی نشان دهد. این عکس‌العمل خود دارای تأثیرات گوناگونی بر زندگی، فعالیت‌ها و سرمایه‌های انسانی دارد. در مقابل اثرات انسان بر تغییر محیط نیز قابل توجه است. بر این اساس با توجه به اهمیت موضوع و منطقه از دیدگاه اقتصادی، زیست‌محیطی و... شناخت تغییرات رودخانه در طی زمان و فرآیندهای مؤثر از اصلی‌ترین عوامل در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای آینده است. این شناخت با استفاده از تکنیک‌های مدل‌های آماری قابلیت پیش‌بینی در بازه‌های زمانی آینده را نیز دارند. لذا سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه سواحل جنوب دریای خزر در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، میدانی و آماری، مدل تلفیقی زنجیره مارکف و سلول‌های اتومات، و نتایج تحقیقات گذشته تغییرات مورفولوژی سفید و عوامل محیطی مؤثر بر آن بررسی شده و روند تغییرات و عوامل تأثیرگذار، برای افق سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

محدوده این تحقیق در جلگه ساحلی سفیدرود در استان گیلان قرار دارد. این منطقه از غرب و شرق بازه تحت تأثیر از رودخانه سفیدرود و از جنوب و شمال از محدوده سد سنگر تا مصب رود را شامل می‌شود (شکل ۱). این منطقه بر دره زمین ساختی سفیدرود، محل تفکیک رشته‌کوه‌های البرز غربی و تالش جنوبی قرار دارد و قاعده آن با دو پیش‌آمدگی کاملاً مشخص در کياشهر و دهنه سرکهنه سفیدرود منطبق برخط ساحلی کنونی است. مورفولوژی سفیدرود در محدوده دلتا به‌صورت بریده بریده و پیچانرود است (جداری عیوضی و همکاران، ۱۳۸۴).



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مطالعه

در این پژوهش ابتدا مبانی نظری و اطلاعات پایه مورد نیاز، بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی گزارش‌ها و تحقیقات انجام شده مشابه در ایران و خارج از کشور گردآوری شده است. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ مربوط به سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ با دقت مکانی ۳۰ متر و فصل تصویربرداری مشابه، مبنای مطالعات سنجش‌ازدور می‌باشند (جدول ۱). پردازش اولیه تصاویر در نرم‌افزار Envi 5.3 انجام شد. در این مرحله تصحیحات رادیومتری و اتمسفری به روش Quick بر تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردید.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش

باند‌های مورد استفاده	تاریخ تصویربرداری	مشخصات تصویر
1-2-3-4-5-7	1987.06.19	LANDSAT- LT05_166-034
1-2-3-4-5-7	2002.08.07	LANDSAT-LE07_166-034
MTL-Multispectral	2018.03.20	LANDSAT_LC08_156-042

پس از انجام تصحیحات، طبقه‌بندی تصاویر با روش طبقه‌بندی نظارت شده<sup>۱</sup> در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 صورت گرفت و نقشه کاربری اراضی و مورفولوژی کانال رودخانه تهیه شده است. در این نقشه واحدهای کانال رودخانه، سازه‌های ساخت انسان و سکونتگاه‌ها، اراضی ساحلی، اراضی جنگلی، دریا و دشت تفکیک شده‌اند. این نقشه‌ها در هر سه دوره تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده است.

به منظور پیش‌بینی و مدل‌سازی، نقشه‌های سه دوره، به محیط نرم‌افزار Idrisi TerrSet وارد شد. ابتدا بر اساس نقشه‌های سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۲ با استفاده از روش تلفیقی زنجیره‌های مارکوف و مدل سلول‌های خودکار به پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ پرداخته شد. زنجیره مارکوف مجموعه‌ای از وضعیت‌های احتمالی را بیان می‌کند که از یک وضعیت آغاز شده و به صورت پیوسته به وضعیت دیگر تغییر می‌کند (ژانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵). مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار عاملی است که تغییر وضعیت هر سلول را بر اساس قانون تعیین وضعیت جدید، مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت سلول‌های مجاور، نشان می‌دهد. در این مدل از فیلتر CA برای توسعه یک فاکتور وزندهی - مجاورت مکانی، برای تغییر وضعیت سلول بر اساس وضعیت همسایه‌اش استفاده می‌شود (سانگ و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱)؛ بنابراین برای افزایش دقت پیش‌بینی مدل، از این روش تلفیقی استفاده شده است. لذا بر اساس داده‌های خروجی مدل مارکوف، نقشه نهایی پیش‌بینی کاربری اراضی با استفاده از مدل CA مارکوف سال ۲۰۱۸ استخراج گردید و ضریب کاپای مربوطه محاسبه شد. ضریب کاپای یک معیار صحت سنجی طبقه‌بندی بوده و بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در آن po درستی مشاهده شده و pc توافق مورد انتظار است.

1 Maximum Likelihood Classification

2 Zhang et al

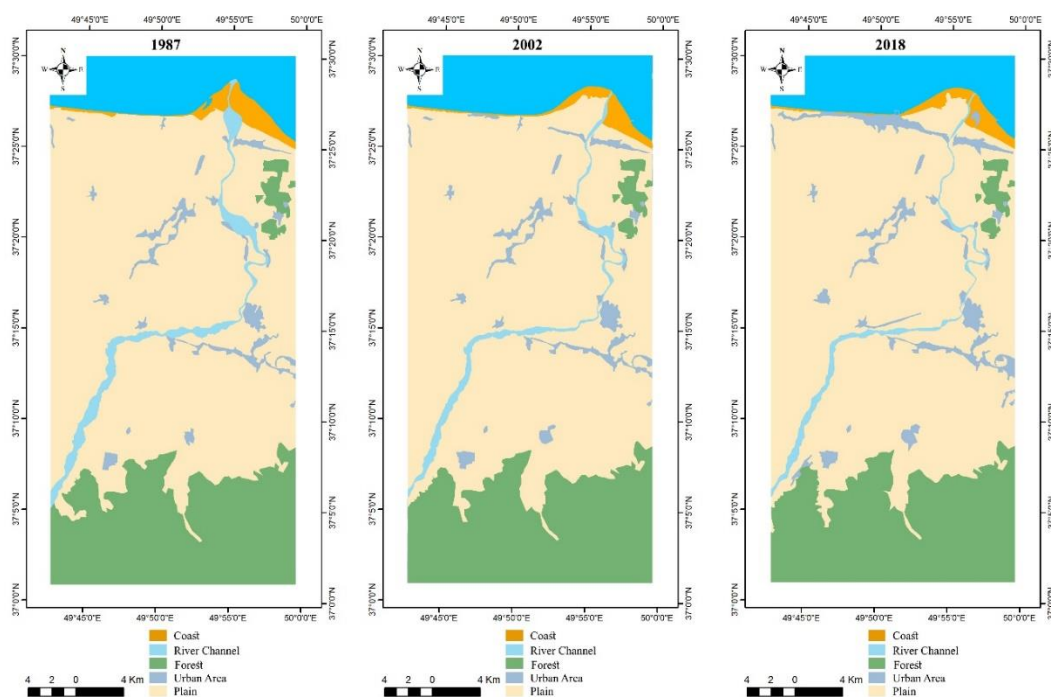
3 Sang et al

$$KIA = \frac{p_o - p_c}{1 - p_c} \quad (1)$$

خروجی مدل با نقشه حاصل از تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۸ برازش داده شد و بازه‌های مغایر بین آن‌ها به دست آمد. همچنین به منظور تعیین دقت طبقه‌بندی و مدل‌سازی، ۱۲۰ نقطه کنترل زمینی تصادفی به صورت پیش فرض در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 تعیین شد و با واقعیت مکانی در منطقه مورد مطالعه مورد صحت سنجی قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به دقت و صحت خروجی مدل، با استفاده از نقشه‌های سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸، نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ تهیه شده است. این نقشه با برازش خروجی مدل برای سال ۲۰۳۰ و نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ به دست آمده است. در این برازش علاوه بر واحد کانال رودخانه، سه واحد تأسیسات ساخت انسان، دشت و اراضی ساحلی نیز در عملیات برازش توسط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 قرار داده شدند. بر اساس نتایج به دست آمده از این برازش، مسیر جریان سفیدرود در منطقه مورد مطالعه به چهار بخش تقسیم شد و در هر بخش تغییرات پیش‌بینی شده، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین نقش عوامل محیطی مؤثر در تغییر مورفولوژی، از تغییرات عرض رودخانه، آمار دبی متوسط سالانه و تغییرات تراز آب دریای خزر، بهره گرفته شد. به منظور تعیین تغییرات عرض کانال، تعداد ۲۳ مقطع عرضی با فاصله متوسط ۱۵۰۰ متر در مسیر رودخانه نظر گرفته شد. در هر مقطع عرض کانال در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 به دست آمد و بر اساس خروجی مدل در سال ۲۰۳۰ نیز عرض کانال در این مقاطع محاسبه شد. به منظور تعیین دبی متوسط سالانه سفیدرود، از آمار دبی ماهانه جریان ایستگاه هیدرومتری آستانه اشرفیه در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۸). همچنین مقادیر تغییرات تراز آب دریای خزر در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ بر اساس داده‌های ایستگاه ساحلی پایش تراز آب انزلی به دست آمده (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۹۸) و با استناد به پژوهش‌های چن و همکاران (۲۰۱۷) و خوشروان و همکاران (۲۰۲۰) مورد تدقیق قرار گرفته است. در نهایت، تأثیر این عوامل و نحوه عملکرد آن‌ها در تغییرات مورفولوژی رودخانه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ و روند آتی آن تا ۲۰۳۰ مورد تحلیل قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

با پردازش و طبقه‌بندی تصاویر در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.4.1 نقشه کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ تهیه شد (شکل ۲). در این نقشه‌ها واحدهای کانال رودخانه (شامل کانال و بستر رود)، سازه‌های ساخت انسان (شامل سکونتگاه‌ها، سازه‌ها و ابنیه مختلف)، جنگل، دریا، اراضی ساحلی و دشت (پهنه‌های زراعی و غیر زراعی) تفکیک شده‌اند. مساحت واحدهای طبقه‌بندی شده در هر سه دوره محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۲).



شکل ۲ - نقشه طبقه‌بندی و کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸

پیش‌بینی و مدل‌سازی، در محیط نرم‌افزار Idrisi TerrSet انجام شد. ابتدا با استفاده از نقشه‌های سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۲ ماتریس مقادیر احتمال تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ بر مبنای زنجیره‌های مارکوف به دست آمد (شکل ۳). در این ماتریس مقادیر احتمال تغییرات واحدهای رودخانه (Cl.1)، اراضی ساحلی (Cl.3)، تأسیسات ساخت انسان (Cl.6) و دشت (Cl.5) به یکدیگر مشخص شده است. براین اساس بیشترین احتمال وقوع تغییرات بین واحدهای رودخانه و دشت به میزان ۵۲/۲۹ درصد حاصل شده است (شکل ۳).

با توجه به امکان توصیف مکانی در قالب نقشه، از مدل CA مارکف استفاده شد و نقشه بیش بین سلول اتومات سال ۲۰۱۸ و ضریب کاپای مربوطه استخراج گردید. بر این اساس تشابه مشهودی بین خروجی مدل و نقشه طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۸ مشاهده شد (شکل ۴). همچنین ضریب کاپای حاصل شده برای واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت به ترتیب ۹۹/۳٪، ۸۵/۹٪، ۷۸/۵٪ و ۸۰/۷٪ به دست آمده است. ضریب کاپای کلی نیز ۸۵ درصد به دست آمده است (جدول ۴).

جدول ۲- مساحت واحدهای تفکیک شده در نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه (هکتار)

۱۹۸۷	۲۰۰۲	۲۰۱۸	تصویر ماهواره‌ای واحد طبقه بندی
۳۷۸۵/۹۳	۲۵۱۹/۲۳	۲۰۶۷/۴۳	کانال رودخانه
۳۳۹۶/۳۵	۳۸۸۸/۳۷	۵۶۶۰/۹۹	تأسیسات ساخت انسان
۲۷۷۹/۷۱	۲۷۳۸۲/۴۸	۲۷۲۲۵/۴۲	جنگل
۲۱۸۹/۷۶	۱۶۸۵/۵	۱۷۸۱/۵۸	اراضی ساحلی
۸۱۹۹۲/۶۴	۸۳۷۵۴/۶۳	۸۲۶۸۷/۰۳	دشت

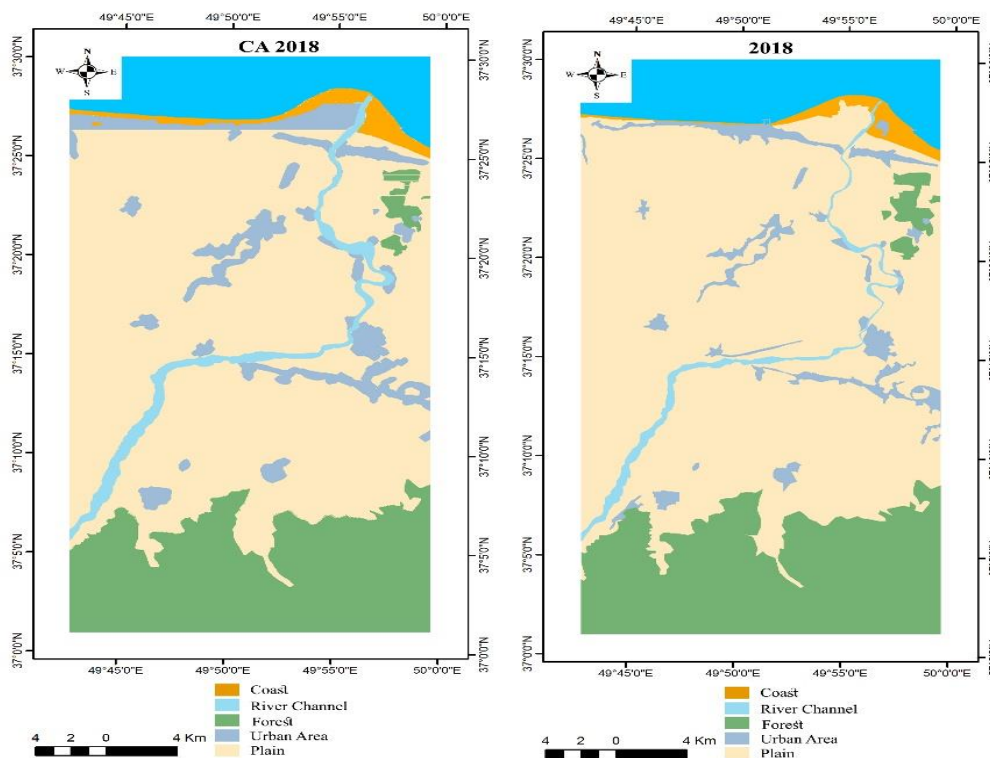
Given : Probability of changing to :

	Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4	Cl. 5	Cl. 6
Class 1 →:	<u>0.4583</u>	0.0128	<u>0.0060</u>	0.0000	<u>0.5229</u>	<u>0.0000</u>
Class 2 :	0.0081	0.8326	0.1570	0.0001	0.0000	0.0022
Class 3 →:	<u>0.0540</u>	0.0848	<u>0.4944</u>	0.0000	<u>0.3617</u>	<u>0.0051</u>
Class 4 :	0.0000	0.0000	0.0000	0.8260	0.1730	0.0010
Class 5 →:	<u>0.0276</u>	0.0000	<u>0.0083</u>	0.0515	<u>0.8383</u>	<u>0.0743</u>
Class 6 →:	<u>0.0830</u>	0.0000	<u>0.0000</u>	0.0001	<u>0.0699</u>	<u>0.8471</u>

شکل ۳ - ماتریس خروجی مدل مارکوف برای تغییرات سال ۲۰۱۸

به منظور تعیین دقت طبقه‌بندی و مدل‌سازی، ۱۲۰ نقطه کنترل زمینی تصادفی، با واقعیت مکانی در منطقه مورد مطالعه مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. بر اساس صحت‌سنجی میدانی، خروجی مدل در ۱۰۰ نقطه صحیح و در ۲۰ نقطه نادرست بوده است. نتیجه صحت‌سنجی نشان می‌دهد که در ۷۶٪ نقاط کنترل زمینی، خروجی حاصل از مدل با واقعیت مطابقت داشته و مطابقت مطلوبی با ضریب کاپای مدل دارد. جزئیات عدم تطابق مشاهدات میدانی در جدول ۳ و ضرایب صحت‌سنجی مدل در جدول ۴ آمده است. بر اساس نتایج مشخص گردید اصلی‌ترین عدم تطابق بین دو واحد دشت و تأسیسات ساخت انسان به تعداد مجموع ۱۱ نقطه است.





شکل ۴ - نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سال ۲۰۱۸ (راست) در مقابل خروجی مدل CA مارکف (چپ)

جدول ۳- جزئیات عدم تطابق مشاهدات در نقاط کنترل زمینی با خروجی مدل

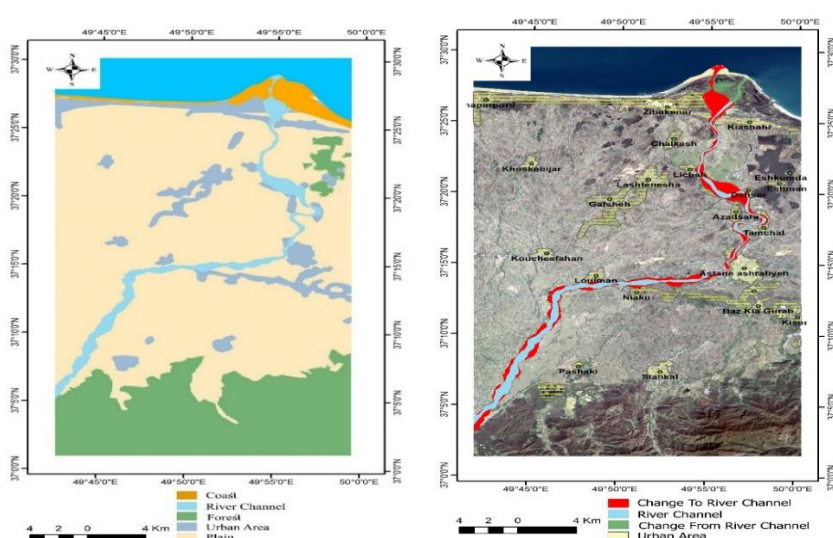
تعداد نقاط	کاربری مدل‌سازی	کاربری مشاهداتی
۳	دشت	جنگل
۵	رودخانه	دشت
۴	تأسیسات ساخت انسان	دشت
۱	ساحل	دریا
۷	دشت	تأسیسات ساخت انسان

جدول ۴- ضرایب صحت سنجی طبقه‌بندی در سه بازه زمانی مورد مطالعه

واحد طبقه‌بندی	ضریب کاپا در سه دوره (%)			دقت تولید کننده (%)	خطای گماشته (%)	دقت کاربر (%)	خطای حذف شده (%)
	۱۹۸۷	۲۰۰۲	۲۰۱۸				
رودخانه	۹۸/۵	۹۵/۲	۹۹/۳	۹۸/۵	۱/۵	۹۵/۸۳	۴/۱۷
دریا	۸۶/۲	۸۱/۵	۸۳/۸	۹۱/۵	۸/۵	۹۹/۱۷	۰/۸۳
ساحل	۸۹/۴	۷۹/۱	۸۵/۹	۸۸/۵	۱۱/۵	۹۸/۳۳	۱/۶۶

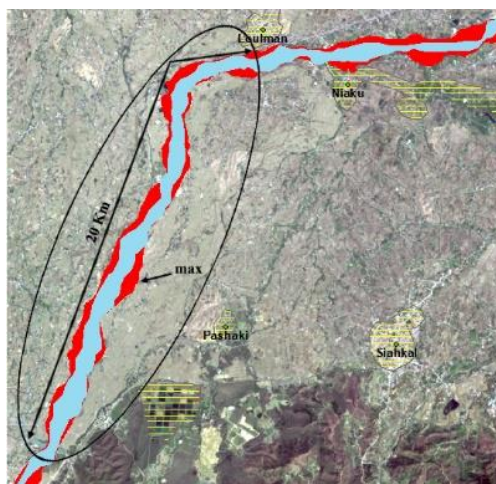
واحد طبقه‌بندی	ضریب کاپا در سه دوره (%)			دقت تولید کننده (%)	خطای گماشته (%)	دقت کاربر (%)	خطای حذف شده (%)
	۱۹۸۷	۲۰۰۲	۲۰۱۸				
جنگل	۹۲/۲	۹۳/۹	۹۵/۶	۹۸	۲	۹۷/۵	۲/۵
دشت	۸۰/۲	۷۸/۸	۸۰/۷	۸۴/۵	۱۵/۵	۹۱/۶۶	۸/۳۳
تأسیسات ساخت انسان	۷۹/۸	۷۵/۴	۷۸/۵	۷۶/۵	۲۳/۵	۹۶/۶۶	۳/۳۳
ضریب صحت کلی	۸۴/۴	۸۲/۹	۸۵/۹				

با توجه به دقت و صحت خروجی مدل CA مارکف، نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ با استفاده از نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ تهیه شده است (شکل ۵). سپس چهار واحد رودخانه، اراضی ساحلی، سازه‌های ساخت انسان و دشت در دو نقشه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ برآزش داده شد و تغییرات محتمل در محیط رودخانه طی بازه زمانی ۱۲ ساله به دست آمد (شکل ۵). با استفاده از این نقشه، مناطق دارای پتانسیل تغییرات شدید در چهار بخش از مسیر رودخانه شناسایی شد (شکل‌های ۶ تا ۹). در این محدوده‌ها روند تغییرات به گونه‌ای خواهد بود که واحدهای پیرامون آن دستخوش فرآیندهای فرسایشی، تغییر پیچانرودی و سیل‌گیری خواهند بود. محدوده ۱ حداثی سد سنگر تا روستای لومان: در این محدوده به طول ۲۰ کیلومتر مسیر جریان در جهت شمال شرق می‌باشد. در این بخش اراضی حاشیه رودخانه در معرض جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل زمین‌های کشاورزی هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره حدود ۴۸۰ متر در ۸ کیلومتری جنوب سد قرار دارد (شکل ۶).



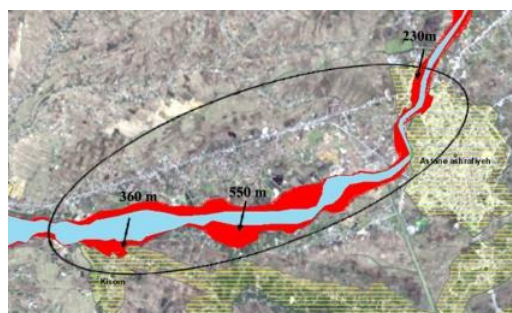
شکل ۵ - چپ: نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سال ۲۰۳۰ خروجی مدل CA مارکف.

راست: نقشه پیش‌بینی تغییرات محتمل در محیط رودخانه تا سال ۲۰۳۰



شکل ۶ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره شمال سد سنگر

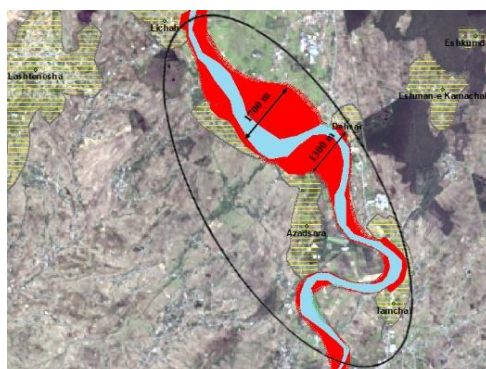
محدوده ۲ حدفاصل روستای کیسم و شهر آستانه اشرفیه: در این محدوده به طول حدود ۱۰ کیلومتر مسیر جریان در جهت شرق می‌باشد. اراضی حاشیه رودخانه این محدوده نیز در معرض جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل مناطق شهری و روستایی حاشیه رودخانه هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره در منطقه کیسم، حدود ۳۶۰ متر و در شهر آستانه اشرفیه حدود ۲۳۰ متر است. همچنین بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره این محدوده در ۴ کیلومتری غرب آستانه اشرفیه در حدود ۵۵۰ متر است (شکل ۷). در این منطقه باغات و مناطق روستایی در حاشیه رودخانه گسترده هستند.



شکل ۷ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره آستانه اشرفیه

محدوده ۳ حدفاصل آزادسرا تا دهر: در این محدوده به طول حدود ۱۳ کیلومتر مسیر جریان در جهت شمال غرب می‌باشد. در این بخش اراضی حاشیه رودخانه در معرض تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل مناطق مسکونی حاشیه رودخانه هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره در منطقه دهر، حدود ۱۷۰۰ متر است. همچنین بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره این محدوده در بستر سیلابی حدفاصل دهر و آزادسرا حدود

۱۳۰۰ متر بوده و به سمت شمال تا حدود ۳۵۰۰ متر امتداد دارد (شکل ۸). در این منطقه مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه در معرض مخاطره تغییر پیچانرودها قرار دارند.



شکل ۸ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره آزادسرا - دهسر

محدوده ۴ حدفاصل کیشهر، تالاب بوجاق و ساحل دریای خزر: در این محدوده به طول حدود ۷ کیلومتر مسیر جریان در جهت شمال می‌باشد. این بخش اراضی شمال کیشهر، تالاب بوجاق و زیباکنار در دلتای سفیدرود را شامل می‌شود. در این محدوده پیش‌بینی مدل حاکی از تغییر مسیر جریان سفیدرود به سمت غرب می‌باشد، بطوری که کانال از مسیر فعلی منحرف شده و با هدایت به غرب در ابتدای تالاب بوجاق جریان خواهد یافت. این تغییر مسیر سبب جابجایی حدود ۲/۵ کیلومتر مصب خواهد شد. در اثر این فرایند اراضی شمالی کیشهر و شرق زیباکنار در مخاطره بستر سیلابی سفیدرود بوده و بیشینه عرض این پهنه در تالاب بوجاق به ۲۱۰۰ متر می‌رسد (شکل ۹).

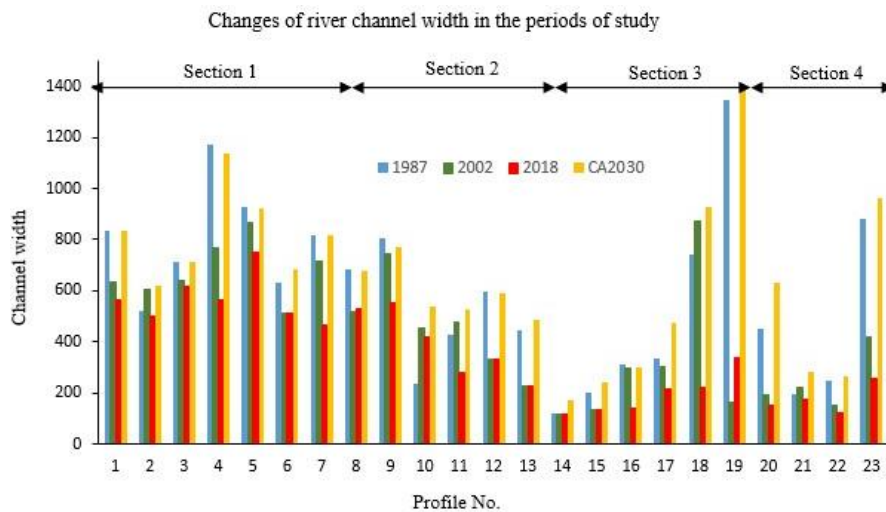


شکل ۹ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره کیشهر - تالاب

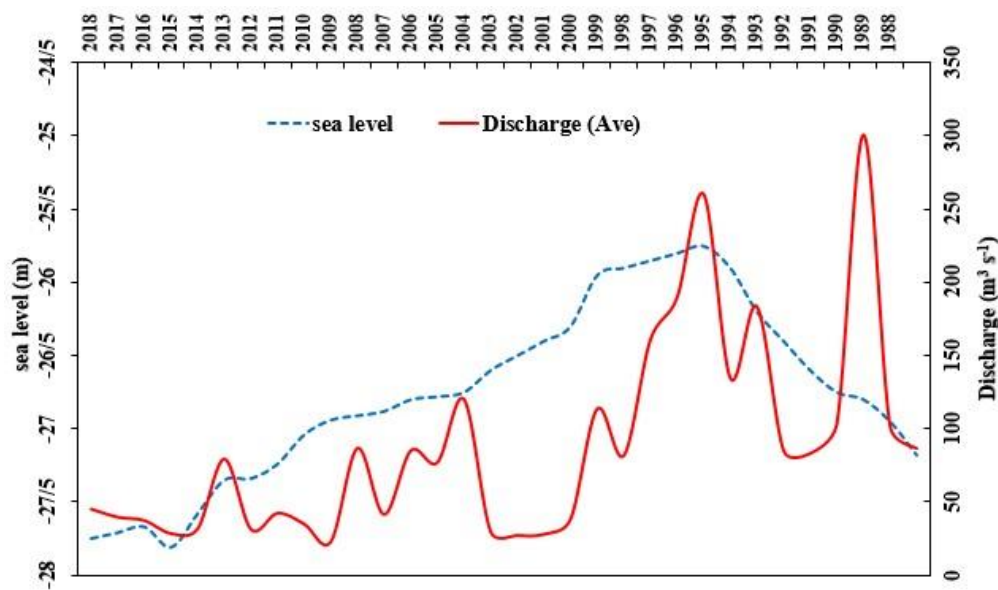
بوجاق

به منظور بررسی عوامل مؤثر و فرایندهای ناشی از تغییر مورفولوژی رودخانه، در ۲۳ مقطع عرضی، روند تغییر عرض کانال در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ در چهار محدوده مفروض (شکل‌های ۶ تا ۹) مورد بررسی قرار گرفت. سپس عرض مقاطع مفروض در خروجی مدل برای سال ۲۰۳۰ نیز محاسبه شد (شکل ۱۰). این بررسی نشان داد متوسط عرض مقطع در سال ۱۹۸۷ برابر ۵۹۳ متر بوده و در سال ۲۰۰۲ به ۴۵۱ متر و در سال ۲۰۱۸ به ۳۵۶ متر رسیده است. این نتایج نشان می‌دهند در هر چهار محدوده عرض کانال روند کاهش داشته است. در این میان عرض کانال رودخانه در مقطع عرضی ۱۴ واقع در شهر آستانه اشرفیه تقریباً ثابت مانده است. این در حالی است که بر اساس خروجی مدل متوسط عرض کانال در سال ۲۰۳۰ به ۶۵۵ متر و تقریباً ۱۰ درصد بیشتر از ۱۹۸۷ خواهد رسید.

تغییر در مورفولوژی کانال و الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه‌های ساحلی به عوامل متعددی از جمله بارش، هیدرولوژی غالب و الگوی جزر و مدی در خروجی رودخانه وابسته است (مدل و همکاران، ۲۰۲۰). جینز و همکاران، (۲۰۱۷). با توجه به کنترلی بودن رژیم جریان سفیدرود در منطقه مورد مطالعه، تغییر در هیدرولوژی تابع میزان خروجی سد سفیدرود و سد سنگر می‌باشد. با توجه به تغییرات دبی متوسط سالانه (شکل ۱۱)، روند کاهش در نمودار مشاهده می‌شود. این روند با الگوی آب و هوایی کاهش بارش در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ مطابقت دارد. لذا به علت کاهش دبی، عکس‌العمل کاهش عرض کانال رخ داده است. از سوی دیگر تغییر تراز آب دریای خزر عامل اصلی تغییر شیب هیدرولیکی رودخانه می‌باشد. در این میان باید توجه داشت که یکی از عوامل تغییر تراز دریای خزر نیز تغییر در میزان آبرگیری از طریق رودخانه‌های ورودی به آن می‌باشد (چن و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس شکل ۱۱ روند تغییرات تراز دریای خزر تا سال ۱۹۹۵ افزایشی و پس از آن کاهش یافته است. لذا از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ با توجه به پایین رفتن تراز دریای خزر، شیب هیدرولیکی سفیدرود افزایش یافته است. این افزایش شیب موجب تمایل جریان به حفر بستر و کاهش عرض کانال شده است. بر اساس قانون مدل وزن دهی CA مارکف، افزایش عرض کانال رودخانه نشان از تغییر در سلول‌های مجاور دارد. لذا با توجه به نتایج حاصل از برازش نقشه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ تغییر در مورفولوژی رودخانه و مدل پیچانرودی آن حاصل شده است. این تغییر موجب افزایش پهنه تأثیرپذیر از کانال رودخانه خواهد شد (شکل‌های ۶ تا ۹). بطوری که افزایش متوسط عرض کانال رودخانه نیز این تغییرات را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). در نتیجه چنین استنباط می‌شود که در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰، مطابق با الگوی به دست آمده از این تحقیق، تغییرات آب و هوایی و تراز دریای خزر سبب تغییر در جهت افزایش اراضی تحت تأثیر از کانال و مورفولوژی رودخانه خواهند شد. لذا با توجه به نتایج، افزایش میانگین دبی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سطح بالاتر از ۲۷- متر تا سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۱۰ - الگوی تغییرات عرض کانال سفیدرود در سه دوره مورد بررسی و پیش‌بینی مدل



شکل ۱۱ - الگوی تغییرات متوسط دبی سالانه در مقابل تغییر تراز آب دریای خزر

۴- نتیجه گیری

سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه سواحل جنوبی دریای خزر محسوب می‌شود. تغییرات دائم در دلتا و مصب این رودخانه نشان از وقوع فرآیندهای کنترل کننده فعال در مورفولوژی این رودخانه است. با توجه به تغییرات دائمی در تراز آب دریای خزر، فرآیندهای آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی، شناسایی تغییرات رودخانه

و پیش‌بینی آن بسیاری ضروری است. تحقیق حاضر در راستای این اهداف صورت گرفت و مباحث ذیل از آن نتیجه گیری شد.

- مدل تلفیقی CA مارکف، قابلیت مناسبی از نظر دقت و صحت در پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سفیدرود دارد.

- بیشترین احتمال تغییرات در منطقه مطالعه در واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت وجود دارد.

- روند این تغییرات به گونه‌ای خواهد بود که واحدهای پیرامون رودخانه دستخوش فرآیندهای فرسایشی، تغییر پیچانرودی و سیل‌گیری خواهند شد. این تغییرات حد فاصل سد سنگر تا روستای لومان به صورت جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی، روستای کیسم و شهر آستانه اشرفیه و آزادسرا تا لیچاه به صورت سیل‌گیری تأسیسات انسانی و در محدوده کیشهر، تالاب بوجاق و دلتای سفیدرود به صورت تغییر موقعیت مصب و جابجایی به غرب کانال رودخانه می‌باشد.

- با توجه به نتایج بررسی مقطع عرضی کانال رودخانه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸، روند کاهش عرض کانال رخ داده است. این روند ناشی از کاهش دبی سفیدرود و پایین روندگی تراز آب دریای خزر، در نتیجه تغییر شیب هیدرولیکی رودخانه بوده است.

- بر اساس نتایج مدل تلفیقی CA مارکف تا سال ۲۰۳۰، روند افزایش عرض کانال رخ خواهد داد. بطوری که تغییرات مورفولوژیک ۱۲ ساله آینده رودخانه در جهت عکس تغییرات صورت گرفته در بازه زمانی ۳۱ ساله گذشته می‌باشد. این امر نشان دهنده افزایش میانگین دبی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سطح بالاتر از ۲۷- متر تا سال ۲۰۳۰ است.

### سپاسگزاری

این پژوهش برگرفته از نتایج طرح تحقیقاتی پیش‌بینی روند تغییرات مورفولوژی رودخانه‌های مناطق ساحلی شمال کشور با کد ۹۷۰۵۳۵-۲۳-۲۹-۲۹-۰ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است؛ از این‌رو از همکاران گروه مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در اجرای تحقیق قدردانی می‌گردد.

### کتابنامه

اقتصادی، شه میر، زاهدی، رفیعه؛ ۱۳۹۰. مطالعه عوامل تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب خزر جنوبی. مجله علوم و فنون دریایی. شماره ۱۰(۳)، صص ۴-۱۳.

- جداری عبوضی، جمشید؛ یمانی، مجتبی؛ خوش رفتار، رضا؛ ۱۳۸۴. تکامل ژئومورفولوژی دلتای رود سپیدرود در کواترنر. پژوهش‌های جغرافیایی. دوره ۳۷. شماره ۵۳. صص ۹۹-۱۲۰.
- سازمان نقشه برداری کشور؛ ۱۳۹۸. آمار پایش تراز آب دریای خزر، ایستگاه انزلی.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران؛ ۱۳۹۸. دفتر مطالعات پایه منابع آب. آمار دبی رودخانه سفیدرود، ایستگاه هیدرومتری آستانه.
- عبداللهی باغسیاهی، علی؛ حشمتیان، رضا؛ سوزی، مهدی؛ ۱۳۹۷. پهنه بندی سیلاب اصلی ساحل مکران با تلفیق مدل HEC-RAS&GIS (رودخانه باهوکلات). یازدهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. اهواز. ایران.
- عبداللهی کاکرودی، عطا؛ ۱۳۹۲. نوسانات دریای خزر و تأثیر آن بر سواحل جنوب شرقی دریای خزر. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲(۳)، صص ۳۳-۴۴.
- عطایی، سهیل؛ عجمی، مهدی؛ لشته نشایی، میراحمد؛ یعصوبی، سیدحسین؛ ۱۳۹۵. تأثیر نوسانات تراز آب دریا بر تغییرات خطوط ساحلی دریای خزر. نشریه مهندسی دریا. شماره ۱۲(۴)، صص ۱۰۳-۱۱۳.
- معصومی، حمیدرضا؛ غریب رضا، محمدرضا؛ معتمد، احمد؛ ۱۳۹۰. بررسی مورفولوژی و الگوی پیچانرودی رودخانه زهره در جلگه ساحلی هندیجان. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. دوره ۳. شماره ۲. صص ۱۰۲-۱۱۲.
- هلالات نصریان، حسین؛ صادقی، محمد عامل؛ واعظی پور، حسینعلی؛ سیف، سامان؛ ۱۳۹۲. مدلسازی جامع سیلاب منطقه دشتیاری شهرستان چابهار توسط مدل MIKE FLOOD و ارائه طرح علاج بخشی سیل در منطقه. دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران. ایران.

- Bravard, JP. Petit, F., 2009. Geomorphology of streams and rivers. In Tochner K, Likens GE, editors. Encyclopedia of inland waters. Elsevier, 387-95. DOI: 10.1016/B978-012370626-3.00043-0.
- Chen, J. L., Pekker, T., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Kostianoy A. G., Cretaux, J. F., Safarov, E. S., 2017. Long-term Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, 6993-7001. DOL: 10.1002/2017GL073958.
- Janes, V. J. J., Nicholas, A. P., Collins, A. L., Quine, T. A., 2017. Analysis of fundamental physical factors influencing channel bank erosion: results for contrasting catchments in England and Wales. Environmental Earth Science, 76-307. DOI: 10.1007/s12665-017-6593-x.
- Khoshravan, H., Naqinezhad, A., Alinejad-Tabrizi, T., Yanina, T., 2020. Effects of the Caspian Sea water level change on Boujagh National Park, southwest the Caspian Sea. Caspian Journal of Environmental Science, 19(2), 99-110.
- Kondolf, G. M., Piégay, H., David, R. M., Schmitt, L., David, R. M., 2016. Geomorphic classification of rivers and streams, Chapter 7. Tools in fluvial geomorphology. 169-202. DOI: 10.1002/9781118648551.ch7.
- Medel, I. D., Stubblefield, A. P., Sheam C., 2020. Sedimentation and erosion patterns within anabranching channels in a lowland river restoration project. International Journal of River Basin Management, DOI: 10.1080/15715124.2020.1809435.



- Mirzaeizadeh, V., Niknuzhad, M., Ouladi, J., 2015. Evaluating non-parametric supervised classification algorithms in land cover map using LandSat-8 Images. *Journal of RS and GIS for natural resources*, Vol. 6, No. 3, 29-44.
- Mondal, S., Sharma, N., Kappas, M., Garg, P. K., 2020. Cellular automata (CA) contiguity filters impacts on CA Markov modelling of land use land cover change predictions results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII, B3, 1585–1591.
- Muller, M. R., Middleton, J., 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, and Canada. *Landscape Ecology*, 9, 151-157.
- Pal, M., Mather, P. M., 2005. Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (5), 1007-1011.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., Yun, W., 2011. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 10, 883-848. DOI: 2002022/j.mcm.10200220028.
- Subedi, P., Subedi, K., Thapa, B., 2013. Application of a Hybrid Cellular Automation Markov (CA-Markov) Model in Land-Use Change Prediction: A Case Study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 16, 126-132.
- Zhang, F., Tiyip, T., Feng, ZD. Kung, H-T., Johnson, V. C., Ding, JL., Tashpolat, N., Sawut, M. Gui, DW., 2015. Spatio-temporal patterns of land use/cover changes over the past 20 years in the middle reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Land Degradation and Development*, 26,284- 29.