

بررسی کمی تغییرات کانال رودخانه‌های الموت رود و شاهرود (شمال قزوین) در بازه زمانی (۱۳۹۴ - ۱۳۶۰)

عفت پاسبان^۱، سعید خدابخش^{۲*}، محمدرضا غریب رضا^۳، شیما کبیری^۴، ناصر بحیرایی^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های آبی، شرکت آب منطقه‌ای قزوین، قزوین، ایران

۵- کارشناس ارشد مهندسی علوم آب، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*پست الکترونیک: skhodabakhsh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۲۵

چکیده

رودخانه‌ها مهم‌ترین منابع آب در نواحی خشک (از جمله ایران) هستند. رودخانه‌های الموت و شاهرود جزو رودخانه‌های دائمی هستند که بخش مهمی از منابع آب شمال ایران را تأمین می‌کنند. اهداف این پژوهش شامل طبقه‌بندی کمی الگوی کانال و نیم‌رخ پهنای رودخانه‌های الموت و شاهرود، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روی تکامل این رودخانه‌ها و تحلیل دوره‌های رسوب‌گذاری و فرسایش بستر این رودخانه‌ها می‌باشد. تکامل کانال این رودخانه‌ها در یک دوره ۳۴ ساله با تأکید بر روی الگو، هندسه و تغییرات ارتفاعی بستر در اثر فرآیندهای رسوب‌گذاری و فرسایش بررسی شده است. بررسی زمانی تصاویر ماهواره‌ای (۱۹۸۱-۲۰۱۵) با استفاده از نرم افزار GIS همراه با نقشه‌برداری‌های توپوگرافی و زمین‌ریخت‌شناسی جهت ارزیابی روند تکاملی و تعیین شاخص‌های کلیدی مؤثر بر تغییرات کانال انجام شده است. برای بررسی نیم‌رخ پهنای تاریخی (۱۹۸۴-۲۰۱۴) کانال در چهار ایستگاه، نقشه‌برداری زمین‌شناسی انجام شده است و همراه با عکس‌های تکراری و تحلیل بسامد سیلاب، در ارزیابی تغییرات ارتفاعی بستر و فرآیندهای مؤثر استفاده شده است. فرآیند ترک کانال رایج‌ترین دلیل تغییر کانال است. نرخ تغییر پهنای کانال ۵/۲ متر در سال در بالادست، ۲۰ متر در سال در میان‌رود و ۳/۹+ و ۴/۲ متر در سال در بخش باختری است. نرخ رسوب‌گذاری و حفر بستر ۱/۱۲ و ۰/۷۶ متر در سال در ایستگاه B و ۵/۵۵ و ۵/۶۳ متر در سال در ایستگاه C است. نتایج نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی، عوامل آب‌شناختی و فعالیت‌های انسان مهم‌ترین دلایل تغییرات بستر کانال هستند.

واژه‌های کلیدی: الموت؛ شاهرود؛ رسوب‌گذاری؛ فرسایش؛ GIS.

مقدمه

اخیر از اهمیت بالایی برخوردار شده‌اند (به عنوان مثال: Gharibraza, et al., 2014). یکی از ویژگی‌های این سیستم پویایی آن است که آثار آن به شکل تغییرات هندسی کانال قابل مشاهده است. این تغییرات در نتیجه

بررسی سیستم‌های رودخانه‌ای، دانشی بین رشته‌ای است و در ارتباط با علومی مانند آب‌شناسی، هیدرولیک، ریخت‌شناسی و رسوب‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد. مطالعات ریخت‌شناختی و رسوب‌شناسی رودخانه‌ها در دهه

آشفستگی‌های ناگهانی و یا تدریجی در سیستم رودخانه ایجاد می‌گردند. آشفستگی‌های ناگهانی معمولاً با وقایع بزرگ و کوتاه مدت (مثل سیلاب‌های با دوره‌های برگشت متفاوت) و آشفستگی‌های تدریجی با تغییر شرایط محیطی در سیستم رودخانه (مانند تکتونیک، تغییر اقلیم و یا عملیات عمرانی) مشخص می‌شود. آشفستگی‌های تدریجی و تغییرات کانال همراه آن در سه دوره زمانی طولانی مدت (ده هزار تا هزارسال)، میان مدت (تاریخی، هزار تا ده سال) و کوتاه مدت (ده سال تا کم‌تر از یک سال) قابل بررسی است (Heitmuller, 2014). عوامل گوناگونی موجب تغییرات زمین‌ریخت‌شناسی و آب‌شناسی رودخانه‌ها می‌گردند که این عوامل را می‌توان به دو گروه اصلی شامل عوامل با منشأ طبیعی (بیرونی و درونی) و عوامل انسانی (نظیر کشاورزی، صنعت یا سازه‌هایی مانند ساخت سنگ‌چین، گابیون، سد، کانال آبرسانی و استخراج گراول) تقسیم نمود (Rhoads, et al., 2016; Scorpio, et al., 2015). از جمله عوامل طبیعی با منشأ درونی می‌توان دبی جریان، حجم و اندازه رسوبات، مقاومت دیواره کانال (تابعی از اندازه دانه‌های دیواره و پوشش گیاهی) و وقوع سیلاب را نام برد و از عوامل بیرونی می‌توان به تکتونیک، شرایط آب و هوایی و تغییرات سطح آب دریا اشاره نمود (Bawa, et al., 2014; Brunier, et al., 2014; Gao et al., 2016; Magilligan, et al., 2016). بسیاری از خسارت‌های ایجاد شده در اطراف رودخانه‌ها، در نتیجه تغییرات کانال رودخانه و شدیداً تحت تأثیر عملیات انسانی است و اغلب در نتیجه رعایت نکردن حریم رودخانه روی می‌دهد. این تغییرات در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (معمولاً چند دهه) رخ می‌دهند. تغییرات شکل هندسی کانال رودخانه در دو نمای (نیمرخ) افقی و عرضی قابل بررسی است. تغییرات در نمای افقی در سیستم‌های رودخانه‌ای بر مبنای عکس‌های هوایی و یا تصاویر ماهواره‌ای (با استفاده از ابزارهای

سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی) در بازه‌های زمانی مشخص ردیابی می‌شوند و شامل پهن‌شدگی و باریک‌شدگی کانال^۱، تبدیل کانال چند مجرا به کانال تک مجرا^۲، تغییر کانال تک مجرا به کانال چند مجرا^۳، مهاجرت مئاندر^۴، رشد پیچش^۵، قطع‌شدگی تدریجی^۶، قطع‌شدگی ناگهانی گلویی^۷، ترک کانال^۸، تغییرات ساده و بی‌نظمی در کناره‌ها^۹ و یا ترکیبی از دو یا چند نوع تغییر می‌باشند. تغییرات نیمرخ پهنای کانال رودخانه از طریق نقشه‌برداری در بازه‌های زمانی مورد نظر ارزیابی می‌شوند و مهم‌ترین آن‌ها رسوب‌گذاری^{۱۰} و گودشدگی^{۱۱} بستر هستند (Ollero, 2010; Little et al., 2013). تغییر شکل کانال تا آن جا پیش می‌رود که مقطع رودخانه، به یک مقطع پایدار (تعادل فرسایش و رسوب‌گذاری) تبدیل شود (Latapie, et al., 2014). رودخانه‌های مورد مطالعه از نظر ساختاری در منطقه‌ای واقع شده‌اند که پوسته متحمل ضخیم‌شدگی شده است. یکی از ویژگی‌های این گونه مناطق وجود گسل‌هایی با ساز و کار متفاوت است. در چنین موقعیتی بسیاری از ویژگی‌های رودخانه (امتداد، شیب حوضه و دبی رودخانه) تحت تأثیر ساختارهای تکتونیکی قرار می‌گیرند. مثال‌هایی از رودخانه‌های آسیا در چنین موقعیتی عبارتند از:

Jia Dhansiri river (India) in Sarmah (2012); Haora and Katakhal rivers (India) in Bandyopadhyay et al. (2013); Baghmati river (India) in Jain & Sinha (2005); Brahmaputra river (India) in Lahiri & Sinha (2012); Yamuna river (India) in Bawa et al., (2014); Yellow river (China) in Wang et al., (2007) and Shu et al., (2012).

1- Channel widening and narrowing

2- Channel simplification

3- Braiding

4- Meander migration

5- Sinuosity growth

6- Chute cut-off

7- Neck cut-off

8- Avulsion

9- Simple irregularities in the bank

10- Aggradation

11- Degradation

مقاله حاضر و پژوهش‌های پیشین انجام شده توسط نویسندگان (خدابخش و همکاران، ۱۳۹۶ و Pasban *et al.*, 2017)، مهم‌ترین نتایج به دست آمده بر روی رودخانه‌های حوضه الموت - شاهرود را معرفی و تغییرات کمی کانال این رودخانه‌ها را مورد بحث قرار داده است. این حوضه یکی از دو زیرحوضه سد سپیدرود است که بخش مهمی از آب مصرفی شمال ایران را تأمین می‌کند. علاوه بر آن، این رودخانه‌ها از دیدگاه انتقال آب به بخش‌های مرکزی ایران نیز مورد توجه هستند (شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ۱۳۹۶). سیل خیز بودن این رودخانه کوهستانی با طول بیش از صد کیلومتر، اهمیت و ضرورت تداوم بررسی بر روی آن‌ها را روشن می‌کند. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱- بررسی تغییرات هندسی کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود بر اساس بازدیدهای صحرائی، نقشه‌های زمین‌شناسی و نمای (پلان) افقی ترسیم شده از تصاویر ماهواره‌ای (لندست ۳، ۱۹۸۱؛ لندست ۵، ۱۹۹۱؛ لندست ۷، ۲۰۰۲؛ لندست ۵، ۲۰۰۹ و لندست ۸، ۲۰۱۵) در ماه‌های تقریباً یکسان.

۲- تخمین نرخ رسوب‌گذاری و گودشدگی بستر کانال بر اساس بررسی نیم‌رخ پهنای کانال (بر اساس نقشه‌برداری) در سال‌های اشاره شده در چهار ایستگاه منتخب (خوبان، باغکلاپه، لات و رجایی دشت).

مهم‌ترین ویژگی‌های مورد استفاده برای مشخص نمودن تغییرات هندسی کانال شامل امتداد، پهنای شاخص انشعاب و شکل هندسی پیچش بوده است.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه‌های آبریز ایران به شش حوضه اصلی و چندین حوضه فرعی تقسیم شده‌اند (شکل ۱ الف). حوضه آبریز رودخانه‌های الموت - شاهرود (کد ۱۷ تماب)، با مساحت ۴۸۵۳/۶ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های سپیدرود است که در حوضه آبریز دریای خزر و در طول جغرافیایی

۳۰' ۴۹° تا ۱۰' ۵۱° خاوری و عرض جغرافیایی ۷' ۳۶° تا ۳۰' ۳۶° شمالی قرار دارد. این رودخانه از پیوستن دو شاخه اصلی الموت و طالقان (در خاور حوضه) به وجود می‌آید که عمدتاً در راستای خاور-باختر و در برخی بازه‌ها جنوب خاور-شمال باختر جریان دارند (شکل ۱ الف). رودخانه‌های شاهرود، الموت و طالقان به ترتیب با طول‌های ۱۲۵، ۴۹ و ۸۰ کیلومتر مهم‌ترین رودخانه‌های این حوضه هستند. رودخانه شاهرود رودخانه‌ای کوهستانی است که از کوه‌های البرز مرکزی سرچشمه گرفته و در شمال باختری قزوین وارد محدوده البرز باختری شده و پس از سد منجیل و پیوستن شاخه قزل اوزن، رودخانه سپیدرود را تشکیل می‌دهد. شیب میانگین رودخانه‌های الموت و شاهرود به ترتیب ۲۰/۴۸ و ۶/۳۹ متر در هزار و پهنای کانال آن از ۴/۴۵ تا ۵۶۲/۲۳ متر از بالادست تا خروجی حوضه آبریز در تغییر است. بیشینه ارتفاع این حوضه آبریز کوهستانی ۴۳۴۱ و کمینه آن ۳۱۸ متر است. از نظر موقعیت زمین‌شناسی، حوضه آبریز الموت - شاهرود در البرز مرکزی قرار دارد. امتداد کانال این رودخانه‌ها تقریباً در تمام مسیر هم‌راستا با گسل‌ها یا چین-خوردگی‌های منطقه است. امتداد گسل‌های منطقه در دو راستای غالب شمال باختری - جنوب خاوری و باختری - خاوری است. سازوکار گسل‌ها گوناگون است و شامل گسل‌های رورانده و نرمال و مجموعه‌ای از گسل‌های امتداد لغز و گسل‌های فرعی دیگر است (Annells *et al.*, 1977؛ رادفر، ۱۳۸۰) (شکل ۱ ب). علاوه بر این، گسل‌ها در شکل هندسی پیچش رودخانه، به ویژه بخش پایین دست، تأثیرگذار بوده‌اند. واحدهای عمده زمین‌شناسی حوضه آبریز مورد نظر در بخش خاوری و بالادست بیشتر سنگ‌های تخریبی میوسن، در بخش میانی ترکیبی از واحدهای آتشفشانی ائوسن و برخی سازندهای مزوزوییک و در پایین دست حوضه، واحدهای آتشفشانی ائوسن می‌باشد (Annells *et al.*, 1977).

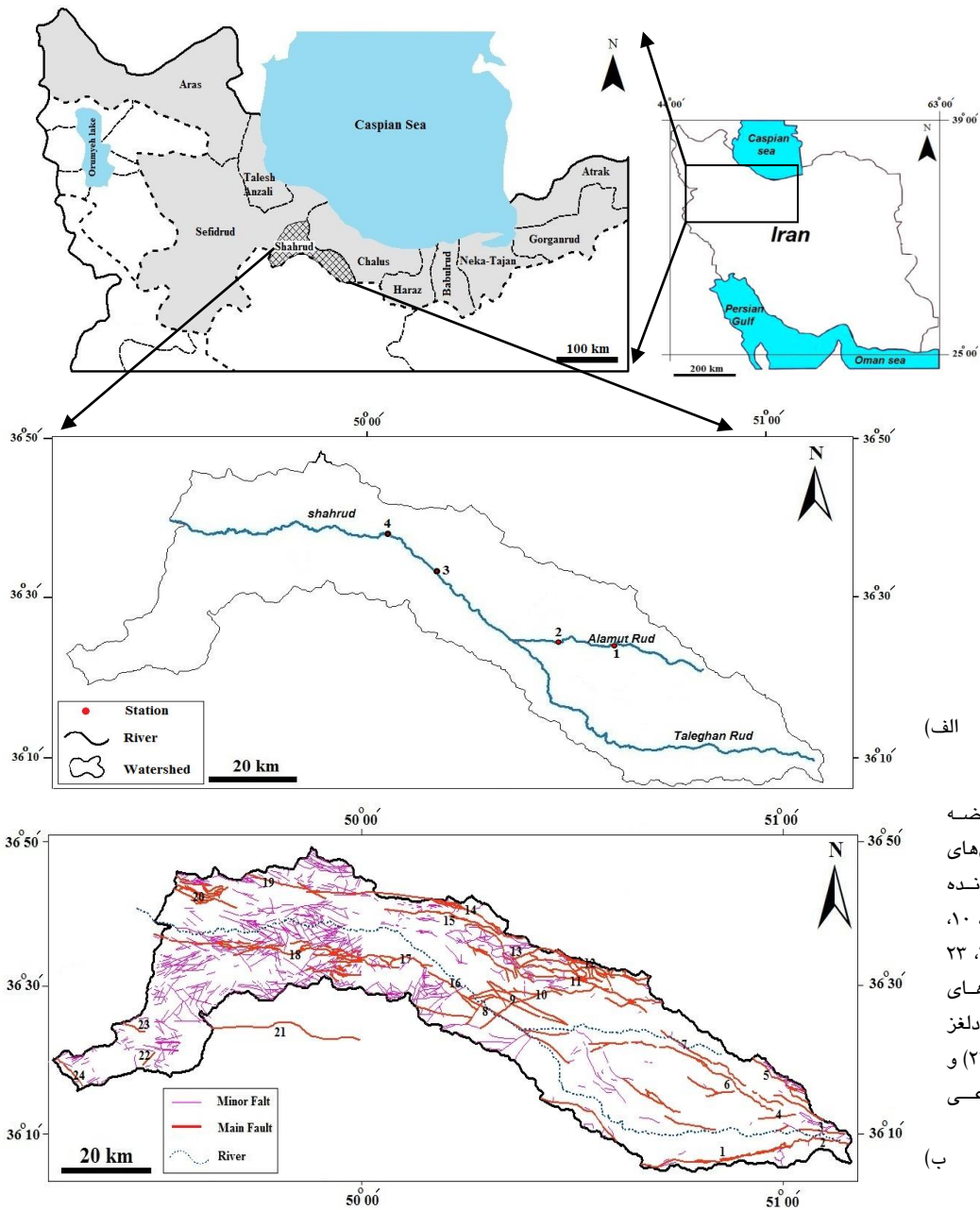
۱- بررسی تغییرات هندسی کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود بر اساس بازدیدهای صحرائی، نقشه‌های زمین‌شناسی و نمای (پلان) افقی ترسیم شده از تصاویر ماهواره‌ای (لندست ۳، ۱۹۸۱؛ لندست ۵، ۱۹۹۱؛ لندست ۷، ۲۰۰۲؛ لندست ۵، ۲۰۰۹ و لندست ۸، ۲۰۱۵) در ماه‌های تقریباً یکسان.

۲- تخمین نرخ رسوب‌گذاری و گودشدگی بستر کانال بر اساس بررسی نیم‌رخ پهنای کانال (بر اساس نقشه‌برداری) در سال‌های اشاره شده در چهار ایستگاه منتخب (خوبان، باغکلاپه، لات و رجایی دشت).

مهم‌ترین ویژگی‌های مورد استفاده برای مشخص نمودن تغییرات هندسی کانال شامل امتداد، پهنای شاخص انشعاب و شکل هندسی پیچش بوده است.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه‌های آبریز ایران به شش حوضه اصلی و چندین حوضه فرعی تقسیم شده‌اند (شکل ۱ الف). حوضه آبریز رودخانه‌های الموت - شاهرود (کد ۱۷ تماب)، با مساحت ۴۸۵۳/۶ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های سپیدرود است که در حوضه آبریز دریای خزر و در طول جغرافیایی



(الف)

(ب)

شکل ۱: الف) نقشه موقعیت حوضه آبریز الموت - شاهرود؛ ب) گسل‌های منطقه شامل گسل‌های رورانده (شماره‌های ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۳ و ۲۴)، گسل‌های نرمال (شماره‌های ۱، ۴ و ۱۱)، گسل‌های امتدادلغز (شماره‌های ۱۴، ۱۹ و ۲۲) و مجموعه‌ای از گسل‌های فرعی مرتبط.

روش مطالعه

- ۱- تهیه تصاویر ماهواره‌ای رقومی (سال‌های ۱۹۸۱، ۱۹۹۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵) در ماه‌های نسبتاً مشابه.
- ۲- ترسیم و رقومی کردن خط ساحل چپ و راست کانال رودخانه و خط مرکزی آن در نرم افزار GIS (نسخه ۱۰).
- ۳- شناسایی مکان‌هایی که خط مرکزی کانال در آن دستخوش تغییر شده است.
- ۴- بررسی عوامل مؤثر در این تغییرات.

کانال رودخانه‌ها طی فرآیندهای رسوب گذاری و حفریستر، فرسایش کناره‌ها، تشکیل سدهای داخل کانال، چند مجرا و مئاندری شدن کانال، دچار تغییر می‌شود. برخی از این تغییرات در نمای افقی و برخی دیگر در نیمرخ پهنای کانال رودخانه قابل ارزیابی هستند. در این پژوهش بررسی کمی نمای افقی رودخانه‌های الموت و شاهرود به ترتیب در مراحل زیر انجام گرفته است:

مرز بستر در بین دو لبه مشخص شده است (Sarmah, 2012). در این پژوهش، تغییرات نیمرخ پهنای رودخانه‌های مورد مطالعه در چهار ایستگاه خوبان، باغکلاویه، رجایی دشت و لات بررسی شده است. این نیمرخ‌ها از روی نقشه‌های پهنای تهیه شده در سال‌های 1985-2014 (برای باغکلاویه و رجایی دشت) و 2006 (برای خوبان و لات) از ایستگاه‌های مطالعاتی تهیه شده‌اند. هر یک از نیمرخ‌های پهنای ترسیم شده، ابتدا در محیط اکسل و با استفاده از نرم افزار GIS (نسخه ۱۰) رقومی شده و سپس مساحت محدوده زیر خط سطح آب محاسبه شده است.

عناصر ریخت‌شناختی رودخانه

در این بخش مهم‌ترین ویژگی‌های رسوب‌شناسی و ریخت‌شناسی چهار عنصر ریختاری رودخانه‌های مورد مطالعه شامل کانال، سد (پشته)، دشت سیلابی و پادگانه آبرفتی شرح داده می‌شوند.

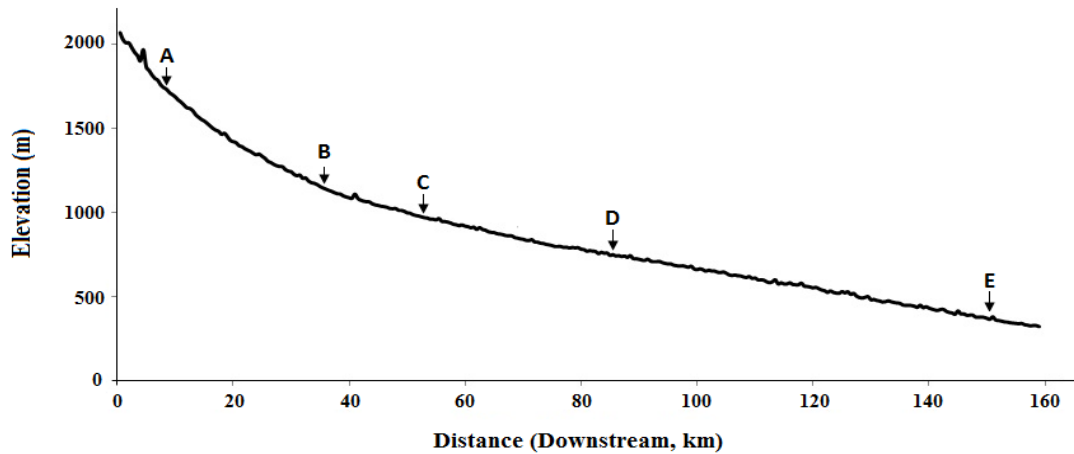
کانال: شبکه زه‌کشی حوضه شاهرود شامل یک دره مرکزی و دره‌های فرعی حاشیه آن است. براساس طبقه‌بندی Twidal (2004)، الگوی شبکه آبراهه‌ها در بیشتر مناطق حوضه از نوع شاخه‌ای یا دندریتی است. دره مرکزی به صورت V شکل، در بخشی از مسیر متقارن و در بخشی دیگر نامتقارن است (شکل ۳). به استثنای دو منطقه شامل بخش میانی (فاصله ۳۳ کیلومتری ایستگاه C تا D) و بخش انتهایی شاهرود (نوع D در طبقه‌بندی Rosgen, 2007، ایستگاه E در شکل ۱ ب)، رودخانه مورد مطالعه در بیشتر طول مسیر تک کانال است (نوع B و C در طبقه‌بندی Rosgen, 2007). کانال‌های مئاندری اساساً بین ایستگاه‌های C و D با خاکریز مشخص در حاشیه مقعر مشاهده می‌شوند (شکل ۳).

۵- تقسیم‌بندی مسیر رودخانه به گروه‌های اصلی بر اساس فرآیند غالب تغییر.

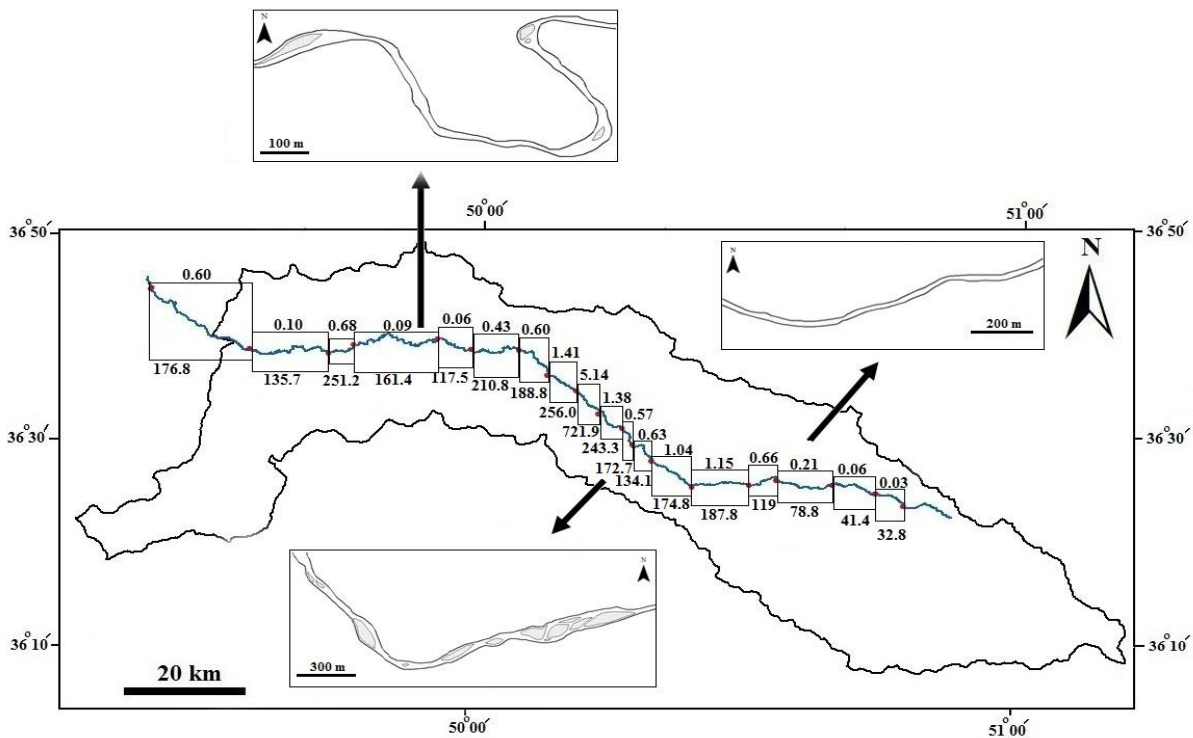
۶- انتخاب چهار منطقه الگو برای کمی کردن این تغییرات.
۷- ترسیم نقشه زمین‌ریخت‌شناسی زیرمحیط‌ها در مکان‌های منتخبی از این چهار منطقه.

۸- محاسبه برخی شاخص‌های کمی مانند میزان مهاجرت، نرخ تغییر پهنای کانال و شاخص‌هایی همچون پیچش و انشعاب.

ارزیابی شاخص انشعاب بر اساس تشخیص سه معیار توزیع و طول سدهای میانی، طول خط‌القعر کانال رودخانه و طول کل همه سدهای میانی نسبت به طول خط‌القعر کانال (شکل ۲) به دست می‌آید (Rust, 1978). شاخص پیچش برای هر قطعه از کانال رودخانه از تقسیم طول خط مرکزی کانال به طول دره به دست آمده است. پهنای کانال برای هر قطعه، از تقسیم مساحت سطح کانال به طول آن محاسبه شده است (Scorpio et al., 2015). نرخ سالانه تغییر پهنای کانال از تقسیم میزان تغییر پهنای کانال در هر دوره زمانی به تعداد سال‌ها در یک دوره داده شده به دست آمده است (Liro, 2015; Toone, et al., 2014; et al., 2013). تغییر در نیمرخ پهنای کانال رودخانه (به صورت رسوب‌گذاری، حفر بستر و فرسایش کناره‌ها) حاصل عملکرد فعالیت‌هایی مانند تغییرات میزان بار رسوبی، سیلاب، فرسایش کناره‌ها و فعالیت انسان است (Sarmah, 2012). نیمرخ پهنای در بخشی از کانال رودخانه انتخاب می‌شوند که سدهای بزرگ و پوشیده از گیاهان وجود ندارند، پهنای کانال در آن قسمت تقریباً یکنواخت است و تحت تأثیر سازه‌های مهندسی نظیر سد، پل و ... نیست و شیب بستر در بخش قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند. مرز کناره‌های رودخانه در نیمرخ پهنای مربوط به مرحله پرآبی است. حاشیه رودخانه به عنوان خطی روی هر طرف کانال معرفی شده است که توسط جریان آب در طی آخرین مرحله پرآبی و به وسیله

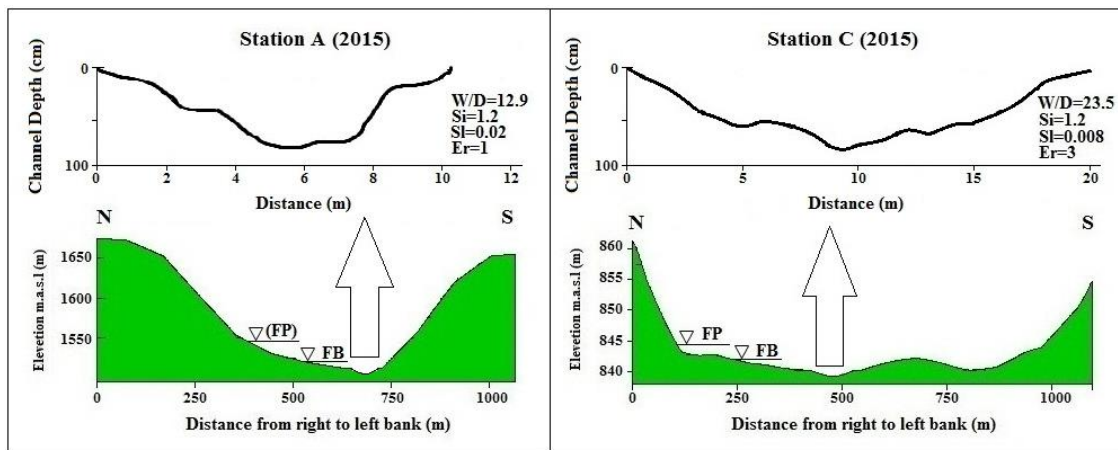


(الف)



(ب)

شکل ۲: الف) نیمرخ طولی بستر رودخانه از سرمنشأ تا دریاچه سد منجیل با ذکر محل ایستگاه‌های هیدرومتری؛ ب) نمای افقی کانال فعال در سه بازه منتخب؛ اعداد نوشته شده در بالای کادر معرف شاخص انشعاب (Rust, 1978) و در زیر کادر معرف میانگین طول سدها هستند.



شکل ۳: الف) برش پهنای کانال رودخانه الموت در ایستگاه خوبان ب) برش پهنای کانال رودخانه شاهرود در رازمیان

بیش‌ترین میزان جابه‌جایی در بخش خاوری (بالادست) و میانی است. در بازه میانی طول مسیری که در آن جابه‌جایی کانال رخ داده تا نزدیک ۳ کیلومتر و میزان آن تا ۵۷۵ متر می‌رسد (Location B, No.6). جابه‌جایی مسیر کانال اغلب متناوب و به هر دو سوی چپ و راست مسیر به نسبت تقریباً مساوی بوده است. جابه‌جایی جانبی کانال در بخش باختری کم‌تر (۱۶۱ متر) از بازه‌های دیگر و به صورت قطع گلوبی پیچش می‌باشد. رودخانه در بخش خاوری و میانی (خوبان تا بهرام‌آباد) در مسیری تقریباً مستقیم جریان دارد. از نظر شکل هندسی پیچش، کانال در این بازه دارای زوایای باز و شاخص پیچش بین ۱/۱ تا ۱/۲ است در حالی که زاویه پیچش کانال در بخش باختری (Location C) تند و دامنه آن بسیار کوتاه‌تر از بخش خاوری و میانی رودخانه است (شکل ۶). علت تفاوت در الگوی پیچش وجود دو سیستم گسل با زاویه حدود ۱۲۰ درجه در مسیر رودخانه در بخش باختری است.

افزایش بیش از سه برابری میزان تغییر مسیر کانال رودخانه در بازه میانی (رجایی دشت - بهرام‌آباد) (شکل ۶) هم‌زمان با کاهش شیب رودخانه مشهود است. این تغییر هم‌زمان با تغییر الگوی رودخانه‌ای تک مجرا به چند مجرا (بریده بریده) بوده است. افت سرعت جریان آب در نتیجه کاهش شیب، باعث ته‌نشست رسوبات بیشتر به صورت پشته‌ها و افزایش نسبت انشعاب شده است. جهت بررسی علت تغییر امتداد کانال در طول مسیر رودخانه‌های مورد مطالعه، چهار منطقه الگو انتخاب شد (حروف A - D در شکل ۶ الف و ب). در هر یک از این مناطق، مکان‌های جابه‌جایی امتداد کانال نشان داده شده است. علت جابه‌جایی کانال در مکان ۱ (از Location B)، ترک کانال و ایجاد مسیر جدید^{۱۵} در اثر ورود شاخه فرعی و تشکیل سد دهانه‌ای در محل ورود

سد: کانال‌های آبرفتی دارای انواع مختلف سدها هستند که تکامل آن‌ها تعیین کننده الگوی کانال است. رودخانه الموت بیش‌تر به صورت تک مجرا، و رودخانه شاهرود در بخشی از مسیر تک مجرا و در بازه میانی دیگر چند مجرا^{۱۲} (Miall, 2006) با سدهای میانی و حاشیه‌ای است. در برخی مناطق سدهای متناوب (Miall, 2006)، سدهای نقطه‌ای و خاکریز^{۱۳} نیز دیده می‌شوند (شکل ۴).

دشت سیلابی و پادگانه آبرفتی: پهنای دشت سیلابی در بازه میانی بیش از سایر مناطق رودخانه است و در بخشی مناطق توزیع نامتقارن در دو ساحل دارد (یعنی ایستگاه C: ۱۰۳۸ و ۸۸ متر؛ ایستگاه D: ۲۳۶ و ۱۲ متر به ترتیب در حاشیه راست و چپ). پادگانه‌های آبرفتی به صورت عوارض مشخصی در طول حواشی کانال قابل مشاهده هستند، در حال حاضر، در ارتفاع ۰/۵ تا ۳ متر (به ترتیب در بالا دست و پایین دست) بالای سطح حاشیه کانال فعلی رودخانه قرار دارد (شکل ۴).

نتایج

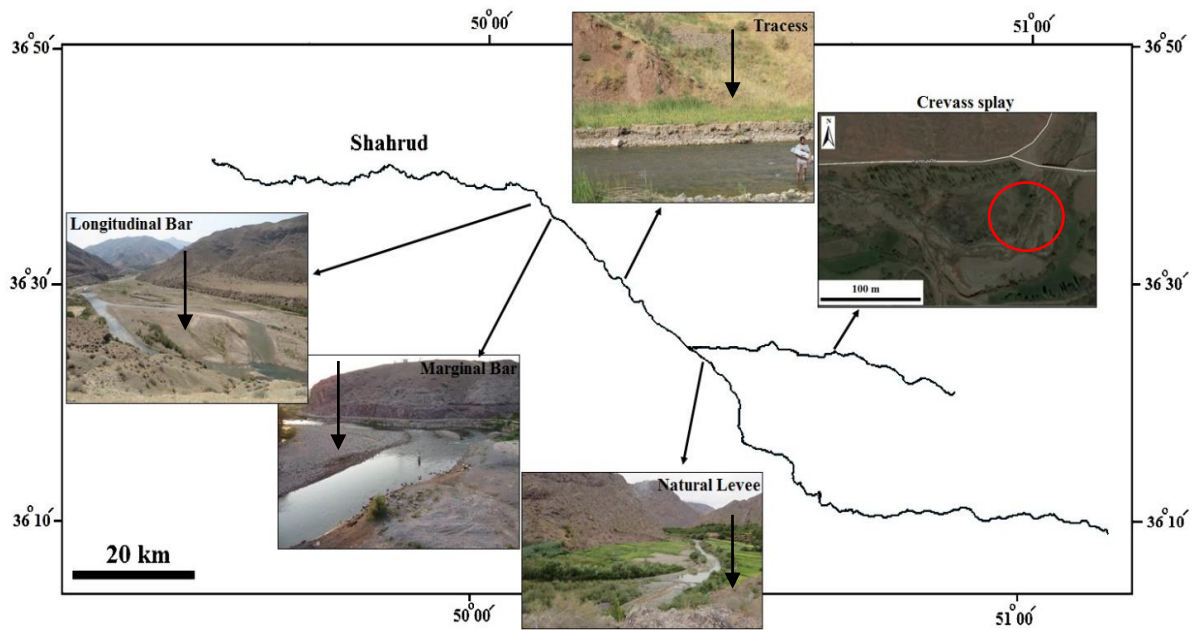
برای ارزیابی تغییرات ریخت‌شناسی کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود، لایه‌های خط مرکزی کانال، پهنای کانال فعال^{۱۴}، دشت سیلابی و کاربری اراضی با استفاده از نرم‌افزار GIS (نسخه ۱۰) در تصاویر ماهواره‌ای رقومی شده دوره زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۵ ترسیم شدند. مهم‌ترین تغییرات از سال ۱۹۸۱-۲۰۱۵ در ۱۳۰ مکان از بالادست تا خروجی حوضه آبریز ثبت شده و شامل موارد زیر است: ترک کانال (۳۱ مکان)، قطع شدگی مئاندر (۲۳ مکان)، رشد پیچش (۲۸ مکان)، شاخه‌ای شدن (۲۲ مکان) و مهاجرت جانبی (۲۶ مکان) (شکل ۵) (جدول ۱). بر اساس جابه‌جایی خط مرکزی کانال موارد زیر مشاهده شده است:

12- Braided channels

13 - Levee

14 Flood prone area

15- Avulsion

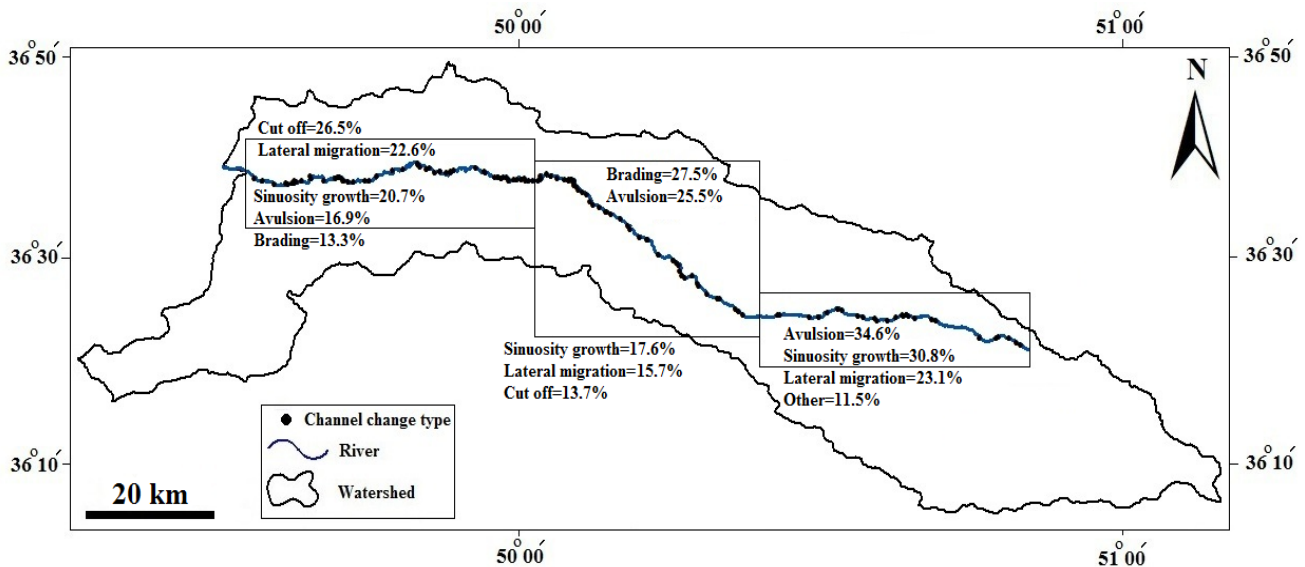


شکل ۴: انواع عناصر ریختاری بزرگ مقیاس در رودخانه‌های الموت و شاهرود

جدول ۱: مقادیر کمی تغییرات کانال در نمای افقی ۱۳۱ مکان در رودخانه‌های الموت و شاهرود (شکل ۲): *۱ و *۲

*۱: با توجه به دقت تصاویر استفاده شده مقادیر تغییرات کمتر از ۲۵ کیلومتر ثبت نشده است. *۲: در هر بازه تغییر یافته بیشینه جابه‌جایی مورد نظر بوده است.

Avulsion		Sinuosity growth		Cutoff		Lateral migration	
Period (yr)	Length modified (m)	Period (yr)	Length modified (m)	Period (yr)	Length modified (m)	Period (yr)	Surface modified (m)
1981-2015	102.0	1991-2015	114.3	1981-2015	128.9	1991-2015	109.2
1981-2015	105.6	1981-2015	149.1	1991-2015	114.9	1981-2015	103.5
1981-2009	193.6	1981-2015	52.90	1991-2015	186.3	2002-2009	159.
1981-2015	80.50	1981-2009	71.40	2002-2015	72.50	1981-2015	54.60
1981-2015	334.5	1981-2015	81.00	1991-2015	181.9	1981-2015	129.6
1981-2015	154.0	1981-2015	60.20	2009-2015	127.5	2009-2015	92.10
1981-2015	76.00	1981-2009	95.50	2002-2015	86.50	2002-2009	181.8
1981-2015	101.4	1981-2015	82.60	1981-2015	89.20	2002-2015	120.7
1981-2015	296.2	1981-2015	53.80	1991-2015	86.90	1981-2015	63.30
1991-2015	288.5	1981-2009	37.50	1991-2015	242.6	1981-2009	111.6
1991-2015	249.3	1981-2015	73.50	1981-2015	88.50	1991-2002	94.70
1981-2015	145.2	1991-2015	64.70	1981-2015	55.50	1991-2015	131.4
1981-2015	374.6	1981-2015	86.60	2002-2015	68.00	2002-2015	147.7
1981-2015	404.7	1981-2002	66.50	1991-2015	25.20	1981-1991	66.50
1991-2015	429.9	1991-2002	145.5	2002-2015	146.0	2002-2009	106.9
1991-2015	575.6	1981-2015	182.5	1981-2015	107.7	1981-2015	46.90
1981-2015	409.9	1981-2015	107.8	2009-2015	46.20	1981-1991	74.90
1981-2015	100.2	1981-2009	101.0	2009-2015	52.00	1981-2002	75.00
1981-2015	120.5	1981-2015	86.50	2002-2009	42.00	1981-2015	61.00
1981-2015	195.9	1981-2015	47.00	1991-2015	161.2	1981-1991	81.70
1981-2015	80.70	1991-2015	38.00	2002-2015	54.00	1981-2009	90.80
1981-2015	73.70	1981-2015	74.7.0	1991-2015	62.00	1981-2002	55.70
1991-2015	120.7	1981-2009	73.50	2009-2015	145.2	1981-2015	43.40
1981-2015	85.10	1991-2002	82.60	-	-	2009-2015	37.60
1981-2015	52.50	1981-2015	85.80	-	-	2002-2009	57.30
1981-2015	62.70	1981-2015	59.50	-	-	2009-2015	57.20
1981-2015	100.3	1981-2009	54.80	-	-	-	-
1991-2015	230.2	1981-2009	44.20	-	-	-	-
1991-2015	55.70	-	-	-	-	-	-
1991-2015	77.00	-	-	-	-	-	-
1991-2015	234.5	-	-	-	-	-	-



شکل ۵: انواع تغییرات نمای افقی کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود (فرآیند غالب و درصد آن در کارهای سه‌گانه نوشته شده است).

جابه‌جایی در دیگر مکان‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. یکی از تغییرات ایجاد شده در سیستم‌های رودخانه‌ای، تغییر پهنای کانال در اثر تغییرات دبی و یا میزان بار رسوبی است. در این پژوهش، تغییرات پهنای کانال در چهار مکان منتخب به روش Liro (2015) و Scorpio *et al.* (2015) محاسبه شده است. شاخص‌های کمی که مبنای مقایسه قرار گرفته‌اند شامل میانگین پهنای کانال، تغییرات مساحت پهنه تغییر یافته و نرخ تغییر پهنای (m/yr) است. به منظور دستیابی به این هدف تصاویر ماهواره‌ای سال‌های 1981-2015 مورد استفاده قرار گرفته است. برای تحلیل دقیق‌تر، تغییرات دبی رودخانه در ایستگاه‌های مجاور آن با استفاده از داده‌های آب‌سنجی درازمدت بازسازی شده‌اند. نتایج به دست آمده در این بخش عبارتند از:

۱- در باغدشت (Location A, No. 3) رودخانه‌الگوی تک مجرا و مستقیم دارد. روند عمومی تغییرات پهنای کانال کاهش‌ی است. با وجود این در برخی نقاط این محدوده تغییرات پهنای نامنظم است. بیش‌ترین تغییرات پهنای در دوره 2009-2005 رخ داده است (m/yr -۵/۲).

آن به کانال اصلی است. جابه‌جایی کانال در مکان ۶ و ۵ (Location B)، به دلیل ورود کانال‌های فعال مخروط افکنه رازمیان می‌باشد (شکل ۷ الف). علاوه بر این جابه‌جایی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در پهنای کانال و میزان پیچش رودخانه رخ داده است.

پهنای متوسط کانال رودخانه شاهرود فعال در این منطقه از ۶۳۴/۸ در سال 1981 به ۱۱۸/۹ متر در سال 2015 کاهش و شاخص پیچش از ۱/۰۸ (1981) تا ۱/۱۶ (2015) تغییر کرده است. علت جابه‌جایی کانال در سه بخش a تا c مکان ۸ (Location C) به ترتیب، قطع شدگی^{۱۶}، زیرشویی^{۱۷} و قطع شدگی است (شکل ۷ ب). پهنای میانگین کانال فعال در این منطقه در سال 2002 کم‌ترین مقدار، ۷۳/۹ متر و در سال 2015 برابر با ۱۱۵/۸ متر و شاخص انشعاب از ۱/۵۳ در سال 2009 تا ۱/۹ در سال 2015 است. میزان شاخص پیچش در بخش‌های a و b مکان ۹ (Location D) از ۱/۰۳ در سال 1991 تا ۱/۳۳ در 2015 تغییر یافته است (شکل ۷ پ) در این بخش پهنای متوسط کانال فعال تقریباً با گذشت زمان کاهش یافته است. دلایل

16- Cutoff

17- Undercutting

جدول ۲: عوامل تغییر کانال در مکان‌های منتخب از Location A-E در شکل ۶

بیشینه جابه‌جایی کانال (متر)	واحد‌های سنگ‌شناسی	دلایل	شماره مکان جابجایی		
۷۶	گل‌سنگ و سیلت‌سنگ قرمز رنگ (نتوژن) با میان لایه ماسه‌سنگ	ترک کانال و ایجاد مسیر جدید (Avulsion) در اثر ورود شاخه فرعی، تشکیل سد دهانه‌ای در محل ورود آن به کانال اصلی، مهاجرت سد داخل کانال	1	الف	
۱۲۹		قطع شدگی	2a		
۶۷		ورود دو شاخه فرعی آندچ‌رود و آفتاب‌در از شمال و جنوب باعث مهاجرت کانال و پیش‌پیش به سمت جنوب شده است.	2b		
۴۷		رسوب‌گذاری	2c		
۶۶		رسوب‌گذاری پشته‌ها، تشکیل پشته منفرد و تغییر مسیر کانال به سمت شمال، عوامل انسانی	2d		
۳۰۴		تغییر شاخص انشعاب و تغییر پهنا به علت تغییرات دبی جریان و میزان بار	3a		
۱۱۳		رسوبی	3b		
۳۹۹	مارن قرمز با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و گچ (میوسن) توف (ائوسن)	رسوب‌گذاری، مهاجرت پشته‌ها، ورود منابع جانبی از شاخه فرعی	4	ب	
۲۹۶		رسوب‌گذاری کانال‌های فعال مخروط افکنه رازمیان و انحراف رودخانه شاهرود به سوی جنوب؛ کانال قدیمی شاهرود در زیر رسوبات انتهایی مخروط افکنه مدفون شده است.	5		
۳۹۶		رسوب‌گذاری کانال‌های فعال مخروط افکنه رازمیان و انحراف رودخانه شاهرود به سوی جنوب؛ کانال قدیمی شاهرود در زیر رسوبات انتهایی مخروط افکنه مدفون شده است.	6		
۸۹	توف سنگ‌ها یا آذرآواری (ائوسن)	ورود منابع جانبی از شاخه فرعی، قطع شدگی گلوبی پیش‌پیش در اثر سیلاب	8a	پ	
۱۰۸		زیرشویی دیواره کانال	8b		
۸۸		قطع شدگی گلوبی پیش‌پیش در اثر سیلاب	8c		
۱۰۱		رشد میزان پیش‌پیش	رشد میزان پیش‌پیش	9a	ت
۸۶			رشد میزان پیش‌پیش	9b	
۱۳۴			قطع شدگی گلوبی پیش‌پیش در اثر سیلاب	10	ث
۱۲۳			رشد میزان پیش‌پیش و قطع شدگی گلوبی پیش‌پیش در اثر سیلاب	11	

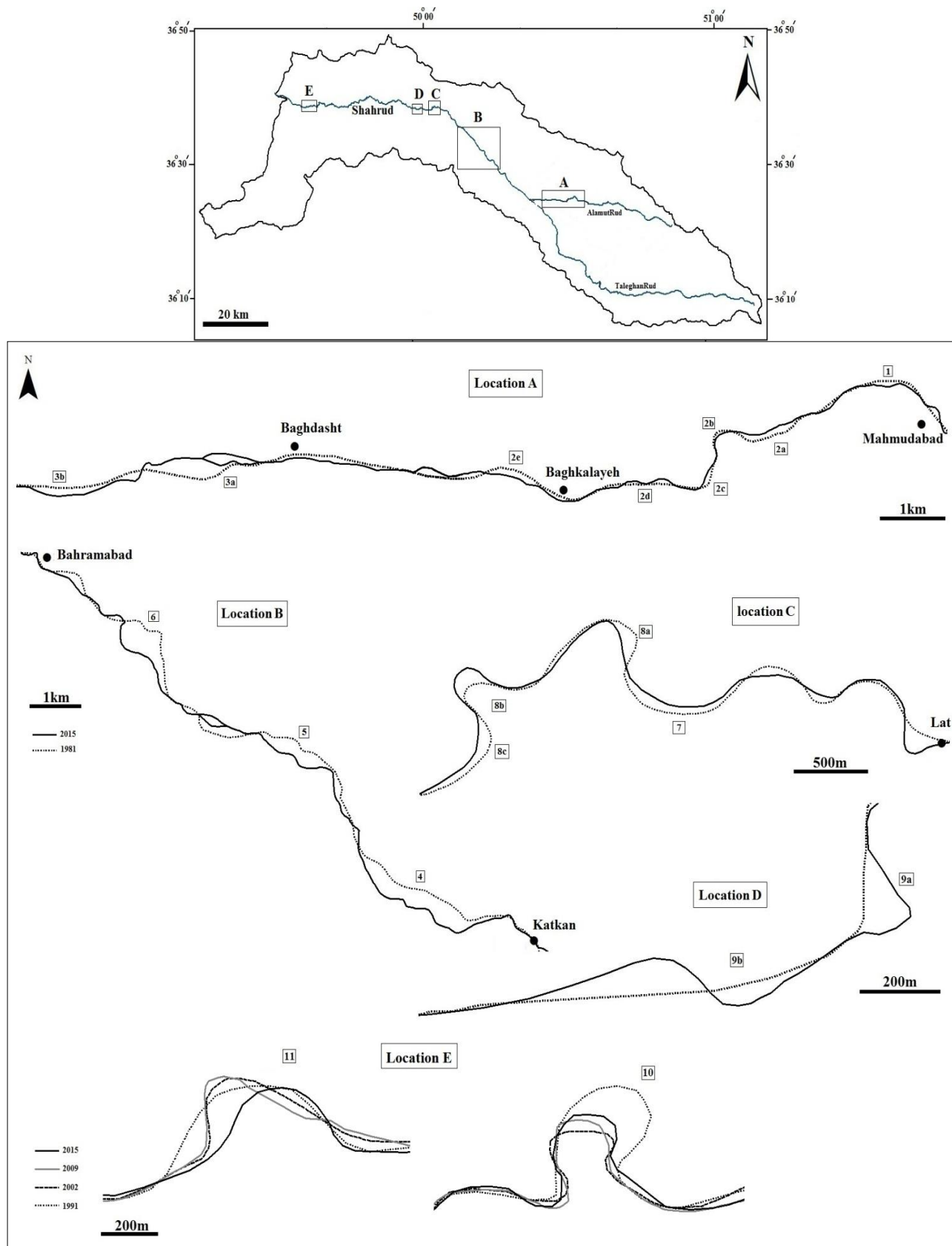
و حتی در سال‌های یکسان روند آن در بازه‌های مختلف متفاوت است. تغییرات پهنا در بازه‌های مستقیم با میزان دبی رابطه‌ای مستقیم دارد (مثال 3a و 3b) و در بازه‌هایی با الگوی مئاندری با تغییرات دبی همخوانی ندارد، زیرا عوامل دیگری مانند قطع گلوبی یا رشد مئاندر نیز موجب تغییرات پهنای کانال می‌شوند (جدول ۳ و شکل‌های ۸ و ۹).

تغییرات نیمرخ پهنای رودخانه

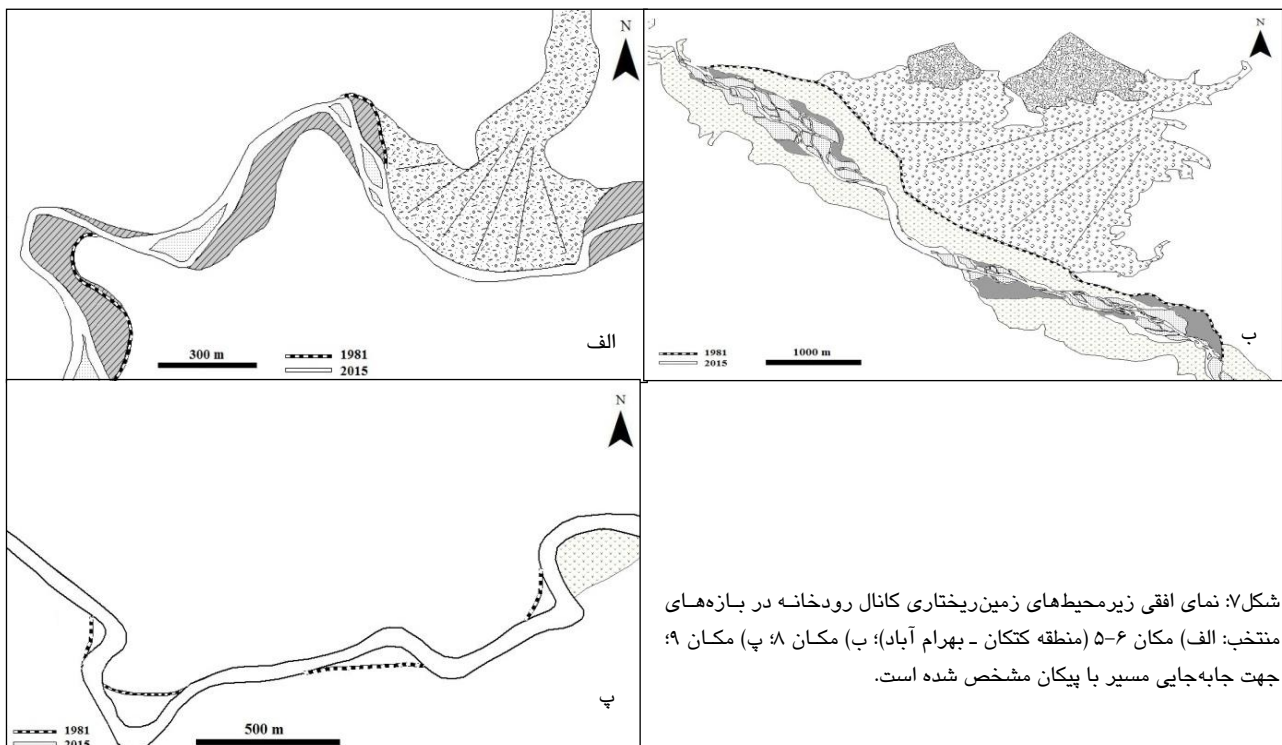
تغییرات نیمرخ پهنای رودخانه‌های مورد مطالعه در دو ایستگاه خوبان ("۴۷/۵۶' ۳۸° ۵۰"، "۵۱/۲۳' ۲۳° ۳۶") و باغکلاویه ("۴۰/۵۰' ۲۹° ۵۰"، "۳۵/۲۵' ۲۳° ۳۶") در رودخانه الموت؛ به ترتیب در دوره زمانی 2014-2005 و 2014-

۲- روند تدریجی کاهش پهنای کانال در محدوده کتکان - بهرام‌آباد (Location B, No. 5-6) در سال‌های مورد بررسی مشهود است (پهنای میانگین از ۴۶۰ (1981) به ۱۴۰ متر (2015) کاهش یافته است). رودخانه در این بازه الگوی شاخه شاخه دارد و بیشترین نرخ کاهش پهنای طی سال‌های 2009-2015 رخ داده است (۲۰m/yr-).

۳- در باختر لات، محدوده‌ای که رودخانه الگو مئاندری محاط دارد. یک روند سینوسی شکل در تغییرات پهنا مشاهده می‌شود (No.8, No.9 در شکل ۶)، بیشترین نرخ تغییر پهنا در این دو مکان به ترتیب در سال‌های 2009-2015 و 2002-2009 رخ داده است (به ترتیب ۳/۹+ و ۴/۲- متر در سال). این بررسی‌ها نشان می‌دهد که واکنش رودخانه به عوامل تغییردهنده پهنای کانال آن پیچیده است



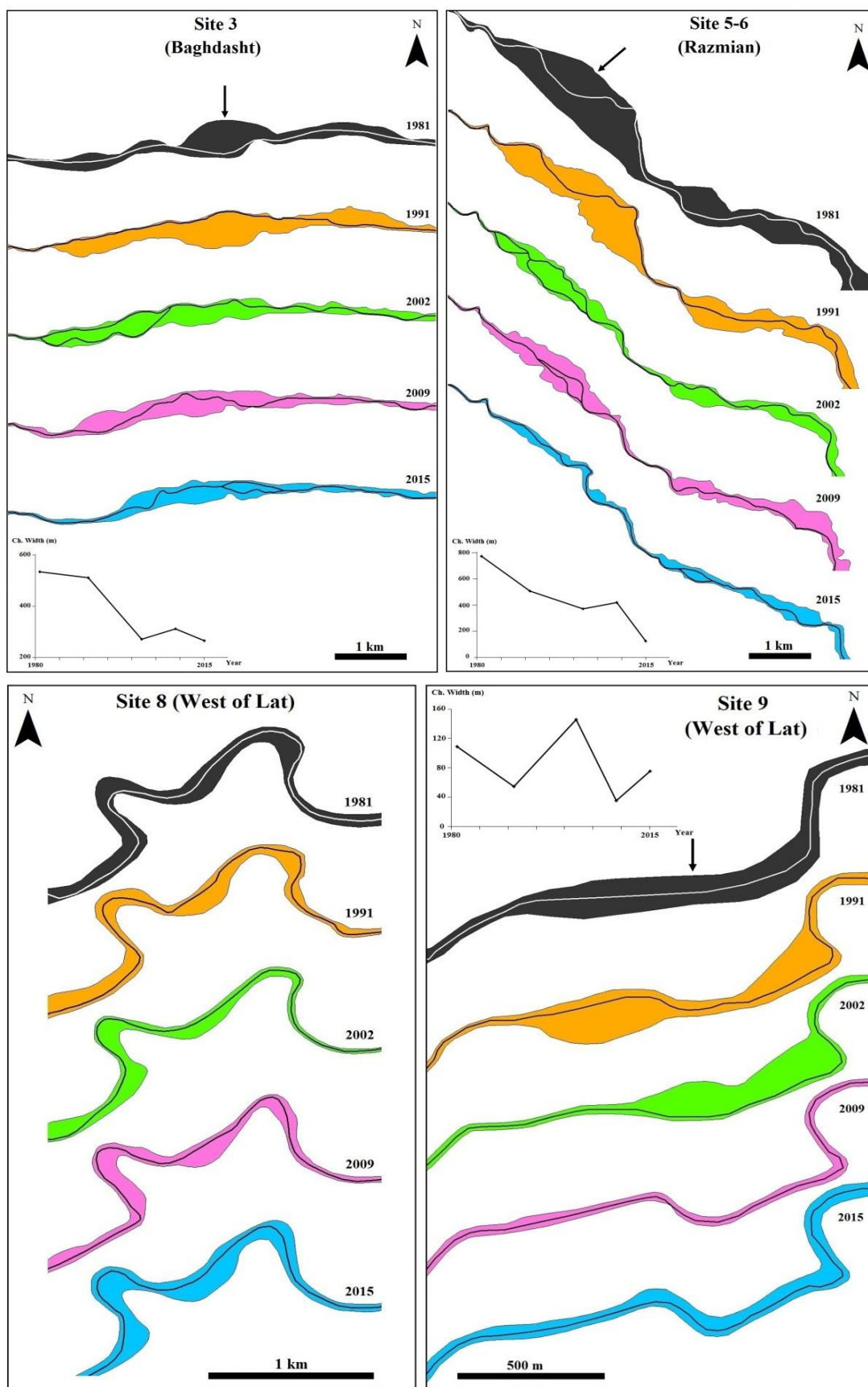
شکل ۶: الف و ب) مناطق منتخب برای محاسبه تغییرات امتداد خط مرکزی کانال منطقه A: محمودآباد - باغدشت منطقه B: کتکان - بهرام آباد (رازمیان) منطقه C: ۲/۵ کیلومتری در باختر لات منطقه D: کیشوم واقع در ۷ کیلومتری باختر لات منطقه E: ۵ کیلومتری خاور زرین خانی.



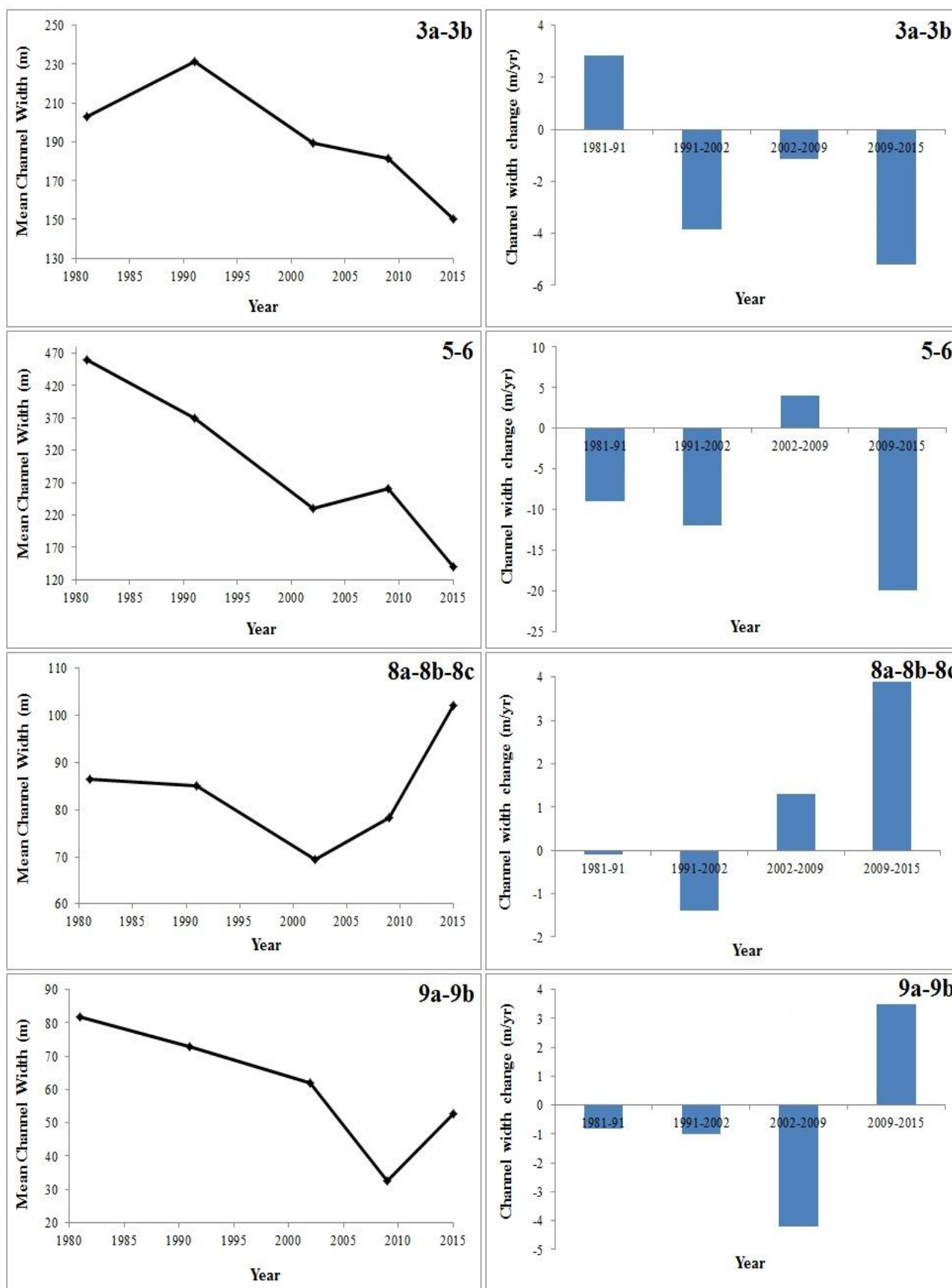
شکل ۷: نمای افقی زیرمحوهای زمین‌ریختاری کانال رودخانه در بازه‌های منتخب: الف) مکان ۶-۵ (منطقه کتکان - بهرام آباد); ب) مکان ۸; پ) مکان ۹; جهت جابه‌جایی مسیر با پیکان مشخص شده است.

جریان و یا افزایش میزان بار رسوبی به رسوب گذاری بستر می‌انجامد. در شکل ۹ ارتباط دبی آب و ارتفاع میانگین سطح بستر نشان می‌دهد که با افزایش دبی و شدت جریان آب فرآیند حفر بستر و با کاهش آن فرآیند رسوب گذاری و افزایش بستر کانال رخ می‌دهد. در ایستگاه باغکلایه در سال‌های ۱۹۹۱-۱۹۸۸، ۲۰۰۲-۲۰۰۱، ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و ۲۰۱۴-۲۰۱۲ با کاهش میزان دبی جریان، فرآیند رسوب گذاری و در سال‌های ۱۹۹۳-۱۹۹۲ و ۲۰۰۷-۲۰۰۲ با افزایش میزان دبی جریان فرآیند حفر شدگی رخ داده است. بیشترین میزان حفر بستر بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۲ بوده است و سپس به دنبال آن در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۷ بیشترین میزان رسوب گذاری بستر صورت گرفته است. برای ایستگاه رجایی دشت روند تقریباً مشابهی تکرار شده است. در ایستگاه لات از ۲۰۱۱-۲۰۰۷ تغییرات دبی جریان و ارتفاع بستر کانال هم‌خوانی داشته است و از ۲۰۱۴-۲۰۱۱ رسوب گذاری بستر کانال با کاهش دبی جریان مشهود است (شکل‌های ۹ تا ۱۱).

۱۹۸۴ و دو ایستگاه رجایی دشت ($38^{\circ} 46' 16''$ ، $50^{\circ} 34' 36''$ و لات ($36^{\circ} 27' 34''$ ، $50^{\circ} 34' 59''$) در رودخانه شاهرود به ترتیب در دوره زمانی ۱۹۸۴-۲۰۱۴ و ۲۰۰۵-۲۰۱۴ اندازه‌گیری شده است. نقشه‌برداری نیمرخ پهنا در سال‌های اشاره شده توسط شرکت آب منطقه‌ای قزوین انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها از ساحل راست به طرف ساحل چپ کانال بوده است (شکل ۹ و ۱۰) (جدول ۴). هدف اصلی از بررسی نیمرخ‌های پهنا تشخیص رسوب گذاری و حفر بستر کانال است. از عوامل مؤثر در این دو فرآیند می‌توان به میزان دبی جریان، دبی بار رسوبی، شیب بستر کانال و فعالیت‌های انسانی اشاره نمود. این عوامل با کنترل ریخت‌شناسی کانال رودخانه در تعادل دینامیکی با یکدیگر هستند و هر گاه یکی از آن‌ها افزایش یا کاهش یابد کانال رودخانه تغییر می‌یابد تا در شرایط جدید به پایداری برسد. با افزایش دبی جریان و یا کاهش میزان بار رسوبی، ظرفیت حمل رسوب توسط آب بیشتر و این امر به حفر بستر منجر می‌شود در حالی که کاهش دبی



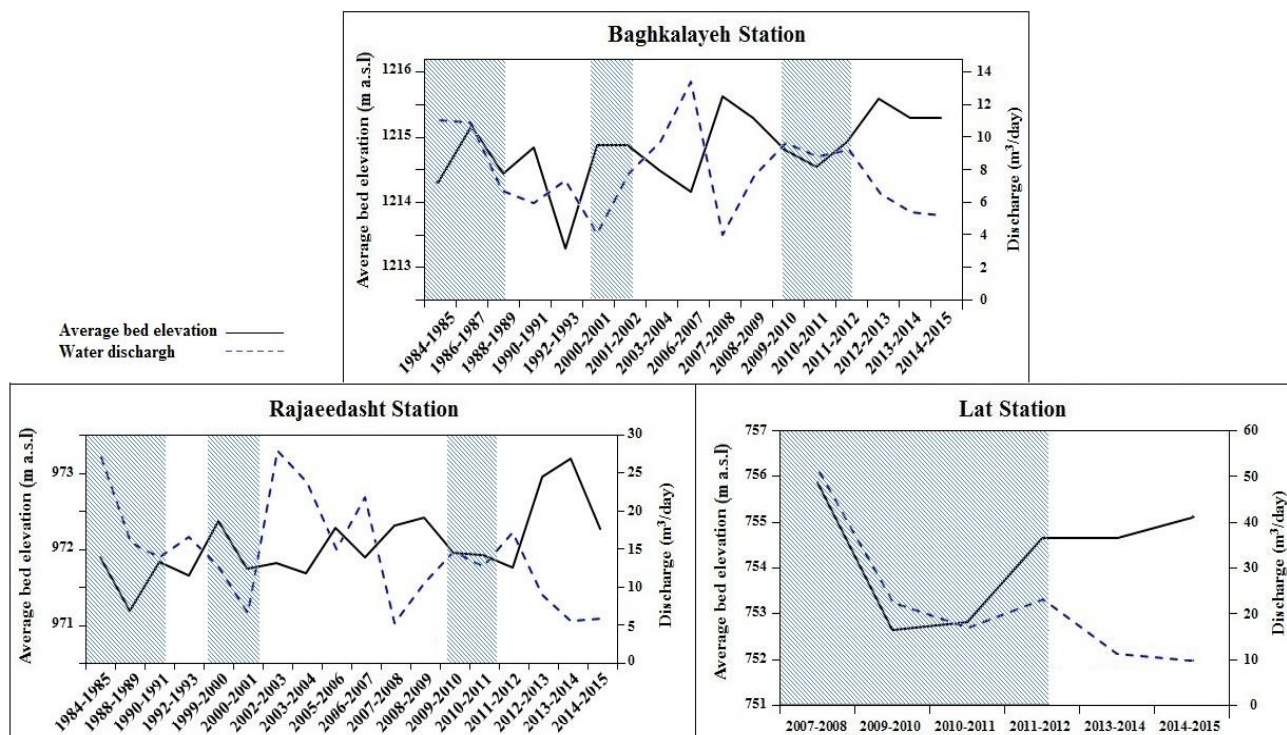
شکل ۸: تغییرات پهنای کانال و خط مرکزی کانال در مکان ۳، مکان ۵-۶، مکان ۸ و مکان ۹؛ جهت جریان از خاور به باختر (راست به چپ) است.



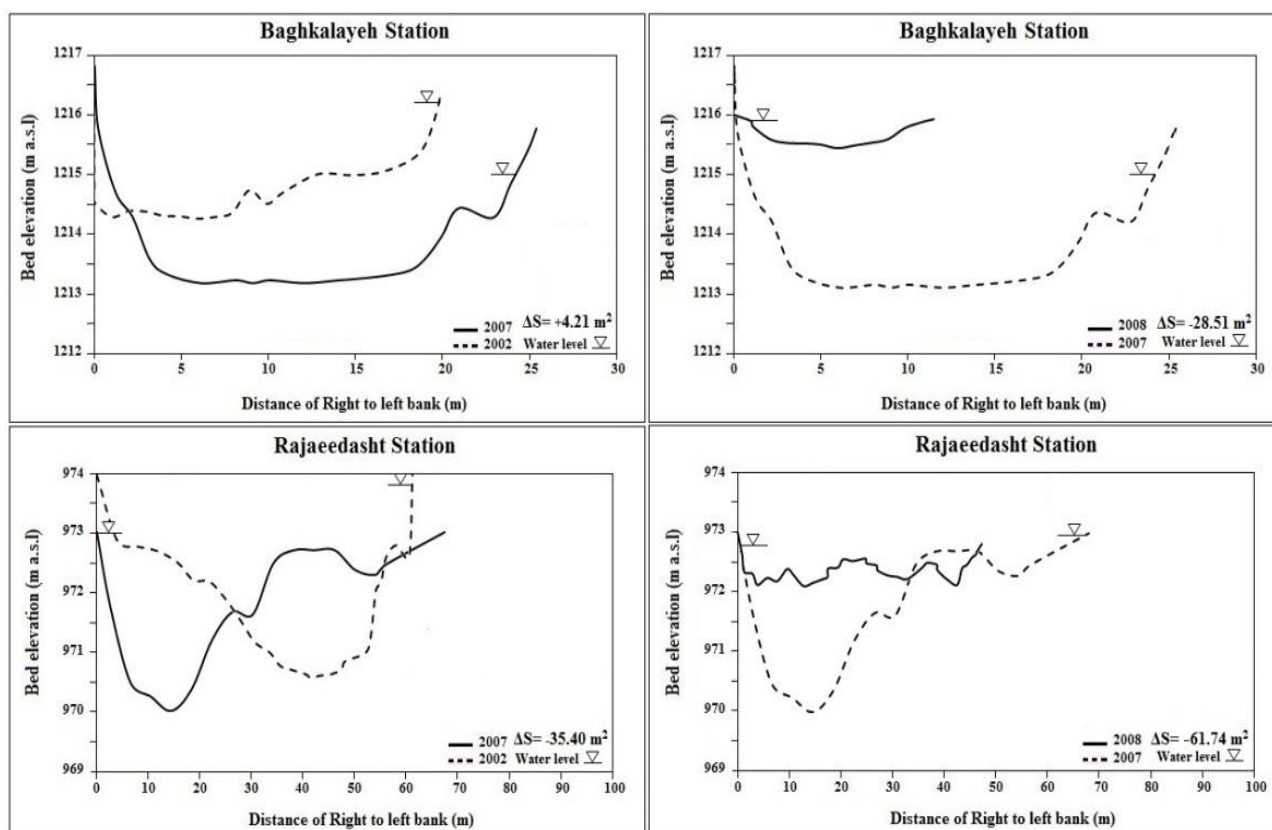
شکل ۹: تغییرات پهنای کانال نرخ تغییر پهنای در مکان‌های ۳، ۶-۵، ۸ و ۹ در رودخانه‌های الموت و شاهرود

جدول ۳: پهنای کانال و نرخ تغییرات آن در مکان‌های منتخب (شکل ۸)

سال مورد مطالعه	مساحت کانال در مکان مورد مطالعه (m ²)	طول کانال در مکان مورد مطالعه (m)	پهنای متوسط کانال در مکان مورد مطالعه (m)	نرخ تغییر پهنای کانال در مکان مورد مطالعه (m/yr)
مکان ۳	۱۹۸۱	۴۸۳۰	۲۰۳/۲	
	۱۹۹۱	۴۸۳۰	۲۳۱/۶	(۱۹۹۱-۱۹۸۱)+۲/۸
	۲۰۰۲	۴۸۳۰	۱۸۹/۳	(۱۹۹۱-۲۰۰۲)-۳/۸
	۲۰۰۹	۴۸۳۰	۱۸۱/۳	(۲۰۰۲-۲۰۰۹)-۱/۱
	۲۰۱۵	۴۸۳۰	۱۵۰/۱	(۲۰۰۹-۲۰۱۵)-۵/۲
مکان ۵-۶	۱۹۸۱	۵۷۰۰	۴۶۰	
	۱۹۹۱	۵۷۰۰	۳۷۰	(۱۹۸۱-۱۹۹۱)-۹/۰
	۲۰۰۲	۵۷۰۰	۲۳۰	(۱۹۹۱-۲۰۰۲)-۱۲
	۲۰۰۹	۵۷۰۰	۲۶۰	(۲۰۰۲-۲۰۰۹)+۴/۰
	۲۰۱۵	۵۷۰۰	۱۴۰	(۲۰۰۹-۲۰۱۵)-۲۰
مکان ۸	۱۹۸۱	۲۳۵۰	۸۶/۳۸	
	۱۹۹۱	۲۳۵۰	۸۵/۱۱	(۱۹۸۱-۱۹۹۱)-۰/۱
	۲۰۰۲	۲۳۵۰	۶۹/۳۶	(۱۹۹۱-۲۰۰۲)-۱/۴
	۲۰۰۹	۲۳۵۰	۷۸/۲۹	(۲۰۰۲-۲۰۰۹)+۱/۳
	۲۰۱۵	۲۳۵۰	۱۰۲/۱	(۲۰۰۹-۲۰۱۵)+۳/۹
مکان ۹	۱۹۸۱	۱۵۸۹	۸۱/۶۶	
	۱۹۹۱	۱۵۸۹	۱۲/۷۶	(۱۹۸۱-۱۹۹۱)-۰/۸
	۲۰۰۲	۱۵۸۹	۶۱/۹۴	(۱۹۹۱-۲۰۰۲)-۱/۰
	۲۰۰۹	۱۵۸۹	۳۲/۵۹	(۲۰۰۲-۲۰۰۹)-۴/۲
	۲۰۱۵	۱۵۸۹	۵۲/۶۴	(۲۰۰۹-۲۰۱۵)+۳/۵



شکل ۱۰: نمودار نشان دهنده تغییرات دبی آب و ارتفاع میانگین بستر کانال در ایستگاه‌های مورد مطالعه در رودخانه‌های الموت و شاهرود؛ ستون‌های خاکستری رنگ نشان دهنده هم‌خوانی ارتباط تغییرات دبی آب و ارتفاع میانگین بستر کانال است.



شکل ۱۱: نیمرخ پهنای بستر کانال در سال‌هایی با فرآیند حفر و برافزایی بستر در دو ایستگاه باغکالیه و رجایی دشت

جدول ۴: ارتفاع متوسط و نرخ رسوب‌گذاری و حفر بستر کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود در ایستگاه‌های مورد مطالعه

parameter	Year/period	Cross section sites			
		Khooban	Baghkalayeh	Rajaedasht	Lat
Average bed elevation (m)	1985	-	1214.32	971.92	-
	1992	-	1213.77	977.47	-
	2002	-	1214.89	971.84	-
	2006	1543.63	-	-	755.46
	2007	-	1214.13	971.81	-
	2010	1543.88	1214.80	971.98	754.67
	2014	1544.20	1215.32	973.15	754.66
Magnitude of bed aggradation or degradation (m)	1985-1992	-	-0.55	5.55	-
	1992-2002	-	1.12	-5.63	-
	2002-2006/2007	-	-0.76	-0.03	-
	2006/2007-2010	0.25	0.67	0.17	-2.78
	2010-2014	0.32	0.52	1.17	+1.98
parameter	Year/period	Khooban	Baghkalayeh	Rajaedasht	Lat
Average water level (m)	1985	-	1215.70	972.80	-
	1992	-	1215.90	972.76	-
	2002	-	1216.20	974.00	-
	2006	1544.25	-	-	756.30
	2007	-	1215.00	973.00	-
	2010	1544.96	1215.95	972.96	753.61
	2014	1544.46	1215.54	973.50	755.10
Periodic difference in average water level (m)	1985-1992	-	0.20	-0.04	-
	1992-2002	-	0.30	1.24	-
	2002-2006/2007	-	-1.20	-1.00	-
	2006/2007-2010	0.71	0.95	-0.04	-2.64
	2010-2014	-0.50	-0.41	0.55	1.49+

بحث

بیشتر مطالعات اخیر بر روی رودخانه‌های کشورهای پیشرفته به دلیل فعالیت‌های کشتی‌رانی و وجود حجم زیادی از داده‌ها (نرخ دبی جریان، دوره‌های سیلابی و حجم رسوب) انجام شده است. با وجود این در کشورهای در حال توسعه‌ای نظیر ایران، به دلیل اقلیم خشک، رودخانه‌های دائمی نظیر سپیدرود، شاهرود، کارون و زاینده‌رود کمتر وجود دارند. بررسی‌های علمی بر روی بیشتر این رودخانه‌ها به سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد که عمدتاً مربوط به سازه‌های عمرانی است و اهداف رسوب شناختی کمتر دنبال شده است. طی دهه اخیر، مجموعه داده‌های سیستماتیک موجود در نهادهای دولتی مرتبط با منابع آب، مطالعات علمی بر روی رودخانه‌ها را آسان کرده است (شکل ۱۰). شناسایی تغییرات کانال رودخانه در طرح‌های توسعه منطقه‌ای بسیار مهم است. کانال رودخانه در اثر عواملی نظیر رسوب‌گذاری و فرسایش، فرسایش دیواره، تشکیل سدهای میانی، ایجاد انشعاب و پیچش تغییر می‌کند. در رودخانه‌های مورد مطالعه، فرآیند ترک کانال (۳۴٪، ۲۵٪ و ۱۷٪ به ترتیب در بالادست، میان‌رود و پایین‌دست) مهم‌ترین عامل تغییر کانال رودخانه است. این فرآیند شامل ترک سریع کانال رودخانه و تشکیل کانال جدید است. ترک کانال ممکن است در نتیجه کاهش شیب بستر باشد و رودخانه به ناچار مسیر جدید (با شیب بیشتر) را انتخاب کند (Gupta et al., 2014; Phillips, 2011). در شرایط دیگر، ترک کانال زمانی رخ می‌دهد که ارتفاع بستر کانال رودخانه در اثر رسوب‌گذاری بیشتر از دشت سیلابی شود (Sinha et al., 2014; Mohrig et al., 2000). فرآیند ترک کانال اساساً در طی سیلاب‌های بزرگی رخ می‌دهد که قدرت کافی برای تغییر سطح زمین در مدت زمان کوتاهی را دارد. این فرآیند همچنین در اثر شکسته شدن حاشیه رودخانه و ایجاد یک مسیر جدید روی دشت سیلابی صورت می‌گیرد (Nanson & Knighton, 1996).

در حوضه مورد مطالعه، فرآیند ترک کانال در ۳۱ مکان از کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود رخ داده است (جدول ۱). نتایج ما نشان می‌دهد که بیش تر آن‌ها در اثر فرسایش کانال، رسوب‌گذاری و سیلاب تحریک شده است. برای مثال، در موقعیت B، مکان شماره ۶ (شکل ۶ و a)، رشد زبانه مخروط افکنه فعال منطقه باعث ترک کانال اصلی قبل از سال 1980 و تغییر مسیر آن به اندازه ۵۶۰ متر به سمت جنوب شده است. یک مثال از ترک کانال کوچک‌تر به‌عنوان قطع گلویی مئاندر معرفی شده است، جایی که کمان مئاندر به علت شیب زیاد یا فرسایش حاشیه در طی سیلاب قطع می‌شود (Van Dijk et al.; Nanson & Knighton, 1996). این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که نسبت بین شیب کانال و شیب پتانسیل بعد از یک ترک کانال کمتر از ۱/۵ باشد (Rudy & Smith, 1998). در حوضه مورد مطالعه، قطع گلویی مئاندر عمدتاً در بخش باختری رخ داده است (ایستگاه D در شکل ۱ و موقعیت C در شکل ۶)، جایی که کانال رودخانه بریده می‌شود و دارای الگوی سینوسی نامنظم است: شاخص انشعاب ۰/۳، دامنه مئاندر ۱۰۵ متر و شیب ۱/۴ متر بر کیلومتر. دو تغییر مهم در یک سیستم رودخانه انشعاب و پیچش است؛ پیچش^{۱۸} عبارت است از نسبت طول رودخانه بر طول دره (Garde, 2006). افزایش پیچش کانال رودخانه معمولاً با افزایش شیب دره، شیب کانال (Schumm, 1972) و تشکیل شکل‌های بستر رخ می‌دهد. فرآیندهای دیگر نظیر قطع گلویی به کاهش پیچش کل کانال منجر می‌شود (Smith et al., 2006). در رودخانه‌های مورد مطالعه، رشد پیچش به ترتیب در بالا دست، میان رود و پایین دست عبارت است از ۳۱٪، ۱۸٪ و ۲۱٪. در بالا دست و بخش باختری به علت شیب زیاد و وجود واحدهای صخره‌ساز ماسه‌سنگی و کنگلومرایی،

مئاندرها از نوع محصور هستند. در این بخش‌ها، عوامل مؤثر بر روی رشد پیچش، عواملی نظیر مقدار شیب، ورود شاخه فرعی و ورود رسوبات از دامنه‌ها به کانال هستند. انشعاب کانال در یک سیستم رودخانه، حاصل انباشت رسوب، رشد پشته‌های رسوبی و در نتیجه تقسیم (انشعاب) جریان به چند مجرا رخ می‌دهد. شاخص انشعاب در یک کانال رودخانه، براساس عوامل: (۱) طول و توزیع سدهای میانی (۲) طول خط مرکزی کانال رودخانه (۳) نسبت مجموع طول سدهای میانی به طول خط مرکزی کانال، تعیین می‌شود (Rust, 1978). در رودخانه‌های مورد مطالعه، افزایش شاخص انشعاب در بخش پایانی الموت و بخش میانی شاهرود مشاهده می‌شود (شکل ۲B) و دلایل آن (۱) کاهش شیب (۲) افزایش پهنای کانال (۳) کاهش پیچش و دبی جریان معرفی شده است. مطالعه بر روی عوامل کنترل کننده تغییرات ارتفاع بستر کانال مخصوصاً در رودخانه‌های کوهستانی (نظیر رودخانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش) به علت تغییر ویژگی‌های آب‌شناختی و رسوب شناختی رودخانه در طی مسیر و زمان کوتاه پیچیده است. بنابراین حجم زیادی از داده‌ها برای تشخیص دقیق فرآیندهای رودخانه لازم است. عواملی نظیر نرخ دبی جریان، میزان بار رسوبی، شیب بستر کانال و فعالیت‌های انسان این فرآیندها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Isla et al., 2015؛ James et al., 2015). این عوامل از طریق کنترل ریخت‌شناسی کانال رودخانه با یکدیگر در تعادل دینامیکی هستند (شکل ۱۰ و ۱۱) (جدول ۴). تفسیر ما در مورد فرآیندهای مؤثر بر روی تغییرات بستر کانال در منطقه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش برای اولین بار بر روی عوامل کنترل کننده تغییرات کانال رودخانه یکی از رودخانه‌های دائمی شمال ایران انجام شده است. هدف، بررسی دینامیک رودخانه طی

یک دوره ۳۵ ساله می‌باشد. تحلیل‌های چند مرحله‌ای تصاویر ماهواره‌ای و نیمرخ‌های پهنا به ارزیابی دقیق‌تر تغییرات الگو، پهنا و ارتفاع بستر کانال منجر شده است. این پژوهش داده‌های با ارزشی برای طرح‌های توسعه منطقه‌ای نظیر سازه‌های عمرانی و سد، لوله‌های آب رسانی، کنترل سیلاب و کشاورزی فراهم می‌کند. بیشتر فعالیت‌های انسانی در منطقه که تأثیر غیرمستقیم بر تکامل کانال داشته‌اند شامل توسعه روستاها، تغییر کاربری اراضی از چمنزار (یعنی دشت سیلابی) یا جنگل (در بالا دست حوضه) به زمین‌های کشاورزی، معدن‌کاری ماسه و گراول، جاده‌سازی و بخش‌بندی پوشش زمین است. بیشتر این تغییرات، نرخ فرسایش را (به طور مستقیم) و بار رسوبی را (به طور غیرمستقیم) افزایش می‌دهند. این فرآیند به کاهش کیفیت آب و پرشدن سریع مخازن سد (منجیل) در منطقه نیز می‌انجامد. برخی نتایج مهم به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- مهم‌ترین تغییرات نمای افقی کانال رودخانه شامل فرآیند ترک کانال، قطع گلوبی، رشد پیچش، افزایش شاخص انشعاب (یعنی مهاجرت سد، رسوب‌گذاری و ایجاد انشعاب) و مهاجرت جانبی است.

۲- دلایل این تغییرات شامل مهاجرت سدهای داخل کانال، تغییر بار رسوبی و دبی جریان، سیلاب، رشد مخروط افکنه‌ها و تشکیل سد دهانه‌ای، تغییر شاخص انشعاب و پیچش و زمین‌شناسی حوضه آبریز است.

۳) فرآیندهای رسوب‌گذاری و حفر بستر و تغییر پهنای کانال در ایستگاه‌های مورد مطالعه در واحد مکان و زمان پیچیده و تحت تأثیر تغییرات دبی جریان و میزان بار رسوبی هستند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از همکاری شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌ها کمال تشکر را می‌نمایند.

منابع

- خداابخش، س.، غریب‌رضا، م.ر.، بانژاد، ح.، پاسبان، ع.، ۱۳۹۶. بررسی رسوب شناسی و ژئومورفولوژی کانال رودخانه‌های الموت و شاهرود (شمال استان قزوین). طرح پژوهشی مشترک بین شرکت آب منطقه‌ای قزوین و دانشگاه بوعلی سینا (کد پروژه: GZR-۹۲۰۹۹)، در مراحل پایانی.
- شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ۱۳۹۶ (سایت اینترنتی www.qzrw.ir).
- Annels, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamedi, M.A.R., & Rahimzadeh, F., 1977. The Geology Map of SHAKRAN, 1:100000, No. 6162, *Geological Survey of IRAN*.
- Bandyopadhyay, S., Saha, S., Ghosh, K., & Kumar De, S., 2013. Channel planform change and detachment of tributary: a study on the Haora and Katakhal rivers, Tripura, India. *Geomorphology*, 193: 25-35.
- Bawa, N., Jaina, V., Shekhar, S., Kumar, N., & Jyani, V., 2014. Controls on morphological variability & role of stream power distribution pattern, Yamuna River, western India. *Geomorphology*, 227: 60-72.
- Brunier, G., Anthony, E.J., Goichot, M., Provansal, M., & Dussouillez, P., 2014. Recent morphological changes in the Mekong & Bassac river channels, Mekong delta. The marked impact of river-bed mining & implications for delta destabilization. *Geomorphology*, 224: 177-191.
- Gao, H., Li, Z., Pan, B., Liu, F., & Liu, X., 2016. Fluvial responses to late Quaternary climate change in the Shiyang River drainage system, western China. *Geomorphology*, 258: 82-94.
- Garde, R.J., 2006. River morphology. *New Age International*, 502 p.
- Gharibraza, M.R., Habibi, A., Imamjomeh, S.R., & Aqeel Ashraf, M., 2014. Coastal processes & sedimentary facies in the Zohreh River Delta (Northern Persian Gulf). *Catena*, 122: 150-158.
- Gupta, N., Kleinhans, M.G., Addink, E.A., Atkinson, P.M., & Carling, P.A., 2014. One-dimensional modeling of a recent Ganga avulsion: Assessing the potential effect of tectonic subsidence on a large river. *Geomorphology*, 213: 24-37.
- Heitmuller, F.T., 2014. Channel adjustments to historical disturbances along the lower Brazos & Sabine Rivers, south-central USA. *Geomorphology*, 204: 382-398.
- Isla, F., Espinosa, M., Rubio, B., Escandell, A., Gerpe, M., Miglioranza, K., Rey, D., & Vilas, F., 2015. Avulsion at a drift-dominated mesotidal estuary: The Chubut River outlet. Patagonia, Argentina. *Journal of Hydrology*, 529: 632-639.
- Jain, V., & Sinha, R., 2005. Response of active tectonics on the alluvial Baghmata River, Himalayan foreland basin, eastern India. *Geomorphology*, 70 (3-4): 339-356.
- James, L.A., 2015. Designing forward with an eye to the past: Morphogenesis of the lower Yuba River. *Geomorphology*, 251: 31-49.
- Lahiri, S.K., & Sinha, R., 2012. Tectonic controls on the morphodynamics of the Brahmaputra River system in the upper Assam valley, India. *Geomorphology*, 169-170: 74-85.
- Latapie, A., Camenena, B., Rodrigues, S., Paquier, A., Bouchard, J.P., & Moatar, F., 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. *Catena*, 121: 1-12.
- Liro, M., 2015. Gravel-bed channel changes upstream of a reservoir: The case of the Dunajec River upstream of the Czorsztyn Reservoir, southern Poland. *Geomorphology*, 228: 694-702.
- Little, P.J., Richardson, J.S., & Alila, Y., 2013. Channel & landscape dynamics in the alluvial forest mosaic of the Carmanah River valley, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 202: 86-100.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Kynard, B.E., & Hackman, A.M., 2016. Immediate changes in stream channel geomorphology, aquatic habitat, and fish assemblages following dam removal in a small upland catchment. *Geomorphology*, 252: 158-170.
- Mohring, D., Heller, P.L., Paola, C., & Lypns, W.J., 2000. Interpreting avulsion process from ancient alluvial sequences; Guadalupe-Matarranya system (northern Spain) and Wasatch Formation (western Colorado). *Geological Society of America Bulletin*, 112: 1787-1803.
- Nanson, G.C., & Knighton, A.D., 1996. Anabranching rivers: Their cause, character, and classification. *Earth Surface Processes & Landforms*, 21: 217-39.
- Ollero, A., 2010. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247-260.

- Pasban, E., Khodabakhsh, S., Gharibreza, M.R., Kabiri, Sh., & Bahiraei, N., 2017. A quantitative study on channel-bed changes of the Alamut and Shahrud rivers (N Qazvin, Iran) in 1981-2015 period times. *Catena* (Under Revision).
- Phillips, J.D., 2011. Universal and local controls of avulsions in southeast Texas Rivers. *Geomorphology*, 130: 17-28.
- Radfar, J., 1999. Qazvin Geology Map, 1:100000, *Geological Survey of Iran*.
- Rhoads, B.L., Lewis, Q.W., & Andresen, W., 2016. Historical Change in channel network extent and channel plan-form in an intensively managed landscape: Natural versus human-induced effects. *Geomorphology*, 252: 17-31.
- Rollet, A.J., Piegay, H., Dufuor, S., Bornette, G., & Persat, H., 2013. Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications*, 30: 939-953.
- Rosgen, D.L., 2007. Rosgen Stream Classification Technique-Supplemental Materials, Part 654. *National Engineering Handbook*, 210-VI-NEH.
- Rudy, S., & Smith, N.D., 1998. Necessary conditions for a meandering-river avulsion. *Geology*, 26: 435-438.
- Rust, B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems, Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, 5: 187-198, In: Friend, P.F., & Sinha, R., (eds.), 1993, Braiding and meandering parameters. *Geological Society*, 75: 105- 111.
- Sarmah, R., 2012. Bed aggradation in the lower reach of the JiaDhansiri River, India. *Geomorphology*, 141-142: 1-10.
- Schumm, S.A., 1972. Geologic implications of river pattern variability. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 56: 652-1972.
- Scorpio, V., Aucelli, P.P.C., Giano, S.I., Pisano, L., Robustelli, G., Roskopf, C.M., & Schiattarella, M., 2015. River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years an implications for channel recovery. *Geomorphology*, 251: 77-90.
- Shu, A.P., Lia, F.H., & Yang, K., 2012. Bank-collapse disasters in the wide valley desert reach of the upper Yellow River. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 2451-2457.
- Sinha, R., Sripriyanka, K., Jain, V., & Mukul, M., 2014. Avulsion threshold and planform dynamics of the Kosi River in north Bihar (India) and Nepal. *A GIS framework, Geomorphology*, 216: 157-170.
- Smith, G.H.S., Best, J.L., Bristow, C.S., & Petts, G.E., 2006. Braided Rivers, Process, Deposits. *Ecology and Management, Blackwell*, 388 p.
- Toone, J., Rice, S.P., & Piegay, H., 2014. Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock-alluvial river, upper Drome River, southeast France, Contingent responses to external and internal controls. *Geomorphology*, 205: 5-16.
- Twidal, C.R., 2004. River pattern and their meaning. *Earth Science Review*, 67: 159-218.
- Van Dijk, W.M., Schuurman, F., Van de Lageweg, W.I., & Kleinhans, M.G., 2014. Bifurcation instability and chute cutoff development in meandering gravel-bed Rivers. *Geomorphology*, 213: 277-291.
- Wang, H.J., Yang, Z.S., Saito, Y., Liu, J.P., Sun, X.X., & Wang, Y., 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities. *Global Planet Change*, 57: 331-354.

A quantitative study on channel-bed changes of the Alamut and Shahrud rivers (N Qazvin) in 1981-2015 period times

Pasban, E. ¹, Khodabakhsh, S. ^{2*}, Gharibreza, M. ³, Kabiri, Sh. ⁴, Bahiraei, N. ⁵

1-Ph.D. student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate professor, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

4- M.Sc. Water Structures Engineering, Qazvin Regional Water Authority, Qazvin, Iran

5- Department of Water Sciences Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

*E-mail: skhodabakhsh@yahoo.com

Introduction

Changes in the geometric shape of the river channel can be studied in horizontal and transverse views; Plan view changes in river systems based on aerial photographs or satellite imagery (using remote sensing and geographic information systems) are tracked at specific time intervals and include: channel widening and narrowing, channel simplification, braiding, meander migration, sinuosity growth, chute cut-off, neck cut-off, avulsion, simple irregularities in the bank, as well as the combination of two or more of these processes (David *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017). River channel profile changes can be mapped through the time intervals, and the most important are degradation and aggradation (Ollero, 2010; Little *et al.*, 2013). The main objectives of this study are: 1- Investigation of geometric variations of Alamut and Shahrud rivers on the basis of field visits, geological maps and plan view mapped from satellite images (1981, Landsat 3; 1991, Landsat 5; 2002, Landsat 7; 2009, Landsat 5 and 2015, Landsat 8) in almost certain months; 2- Estimating the rate of aggradation and degradation of the channel bed based on the survey of the profile of the channel (based on mapping) in the years mentioned at the four selected stations (Khooban Baghkalayeh, Late and Rajaei Dasht stations). The most important features used to determine the geometric variations of the channel were the extension, width, branching index and sinuosity. Alamut-Shahrud catchment (49° 30' to 51° 10' E and 36° 07' to 36° 30' N; 4853.67 km² area) is one of the two Sepidrudsub-catchments and is situated in the South Caspian Sea catchment. The main outcrops of this catchment is in the eastern (upstream) zone and are composed of the Miocene terrigenous rocks, Eocene volcanoclastic rocks and some Mesozoic carbonate rocks in mid zone and Eocene volcanic units in downstream zone (Annels *et al.*, 1977).

Result and Discussion

The most significant changes from 1981 to 2015 in 130 locations have been recorded from upstream to the outlet of the basin and include the following: Channel migration (57 locations), meander cutoff (23 locations), sinuosity growth (28 locations) and branching (22 locations).

Based on the migration of the channel, the following are observed: The maximum displacement is in the eastern (upstream) and central regions; in the central-range (Razmian), the length of channel shift occurred about 3 km and reaches up to 575 meters. The lateral displacement of the channel in the western part is less (161 m) than other intervals and is neck cut off. The river in the eastern and central part (Khooban to Bahram Abad) is on a nearly straight path. In terms of the sinuosity, the channel has open angles and the sinuosity index is between 1.1 to 1.2 while the sinuosity angle of the channel in the western part is steep and its range is much shorter than the eastern and central parts of the river. The reason for the difference in the sinuosity pattern is the existence of two fault systems with an angle of about 120 degrees along the river course in the western part. Increasing more than three times the amount of channel shift in the central region (Rajaei Dasht-Bahram Abad, Figure 8) is also evident with the decrease of the slope of the river.

This change was simultaneously happened by changing the single-channel river pattern to braided channel; the drop in water velocity as a result of slope reduction, caused the sediments to be deposited more like bars and the branching ratio has increased.

Channel profile change

Profile changes of rivers were measured in 4 hydraulic stations; Khooban ($56^{\circ} 38' 47.56''$; $36^{\circ} 23' 51.23''$) and Baghkalayeh ($56^{\circ} 29' 40.50''$; $36^{\circ} 23' 35.25''$) on the Alamut River, respectively in the period from 2005 to 2014 and 1984 to 2014; and Rajae dasht ($50^{\circ} 16' 46.38''$; $36^{\circ} 27' 34.98''$) and Lats ($50^{\circ} 03' 59.96''$; $36^{\circ} 36' 36.88''$) in the Shahroud River; between the years 1984 to 2014 and 2005 to 2014. Mapping cross-sectional profile was carried out during the years mentioned by Qazvin Regional Water Company. The measurements were done from the right to the left of banks in the channel.

The main goal of the study is to examine cross section, diagnosis of aggradation and degradation channel. Effective factors in these two processes can be indicated by the discharge, sediment load, bed slope and human activity. These factors are in dynamic equilibrium with controlling the morphology of the river channel, and whenever one of them increases or decreases, the river channel changes to become stable under the new conditions.

By increasing flow rate or decreasing sediment load, the capacity of river transport sediment is more than that, and this led to degradation, while decreasing flow rates or increasing sediment load led to aggradation (David *et al.*, 2016). At Baghkalayeh Station between 1988-1991, 2000-2001, 2007-2008 and 2012-2014, discharge decreasing led to aggradation process, between the years 1992-1993 and 2002-2007, with increasing flow rate; the bed degradation process has occurred. The highest rate of bed degradation between 2002 and 2007 was followed by the highest increase in bed aggradation in 2007-2008. In the Rajae dasht station, the trend is almost identical. In the Lat station, from 2007 to 2011, changes in the flow rate and bed height of the channel were similar, and from 2011 to 2014, the bed aggradation was evident with decreasing flow rate.

Some important results are summarized as follows:

- 1- The most important changes in the plan view of the river channel are the channel abandon process, neck cutoff, sinuosity growth, increased branching index (ie bar migration, sedimentation and branching) and lateral migration.
- 2- The reasons for these changes are: migration of channel bars, changes in sediment load and flow discharge, flood, growth of the fans/mouth bar formation, changes in branching and sinuosity index, geology of the watershed.
- 3- The bed aggradation, degradation and channel width variation processes in the studied stations in a complex site and time unit under the influence of changes in flow rate and sediment load.

Keywords: Alamut; Shahrud; Aggradation; Degradation; GIS.

References

- Annels, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamed, M.A.R., & Rahimzadeh, F., 1977. The Geology Map of SHAKRAN, 1:100000, No. 6162, *Geological Survey of IRAN*.
- David, M., Labenne, A., Carozza, J.M., & Valette, P., 2016. Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAMix). *Geomorphology*, 258: 21-39.
- Li, Z., Yub, G.A., Brierley, G.J., Wang, Z., & Jia, Y., 2017. Migration and cutoff of meanders in the hyperarid environment of the middle Tarim River, Northwestern China. *Geomorphology*, 276: 116-124.
- Little, P.J., Richardson, J.S., & Alila, Y., 2013. Channel and landscape dynamics in the alluvial forest mosaic of the Carmanah River valley, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 202: 86-100.
- Ollero, A., 2010. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247-260.