

بررسی نقش بارگذاری رسوبات معلق بر تغییرات مورفولوژی رودخانه هیرمند، مطالعه موردی: رودخانه سیستان

معین جهان تیغ^{۱*}، سید محمد تاجبخش فخرآبادی^۲، غلامرضا میراب شیبستری^۳ و هادی معماربان خلیلآباد^۴
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، ^۲ استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند و ^۳ دانشیار،
دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴

چکیده

هدف از اجرای این پژوهش، بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه هیرمند با برآورد میزان رسوبات معلق حمل شده ناشی از سیلاب‌های ورودی به این رودخانه در ایران است. بدین منظور، نمونه‌هایی از سیلاب‌های ورودی کشور افغانستان به ایران، برداشت و رسوبات معلق همراه آن‌ها برآورد و روند تغییرات غلظت رسوبات در تغییرات زمانی و مکانی مختلف به صورت میدانی در طول مسیر رودخانه سیستان مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌های مستعد رسوبگذاری در طول مسیر رودخانه به وسیله تصاویر ماهواره‌ای اسپات-۵ سال ۲۰۱۶ با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ تا پنج متر مشخص شده، بر اساس عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای پس از زمین‌مرجع‌سازی بستر سیلابی جریان رودخانه در محیط GIS و اندازه‌گیری در همین محیط نرم‌افزاری، پارامترهای اندازه زاویه نسبت به شمال، شاخص سینوسیته، حالت جریان و عرض رودخانه در بازه زمانی نیم قرن اخیر، تعیین و تغییرات عرض بستر سیلابی با استفاده از آزمون t مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط رسوب معلق رودخانه سیستان ۳۲ گرم در لیتر بوده، حدود ۷/۳ میلیون تن رسوب به همراه سیلاب‌ها در دوره مورد مطالعه (۱۵ ماه) وارد این رودخانه شده است. همچنین، یافته‌ها نشان داد که عرض بستر رودخانه در این بازه زمانی تغییرات چشم‌گیری داشته است، به طوری که مقدار t به دست آمده (در سطح یک درصد) اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد و عرض رودخانه در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۴۴ تقریباً به یک سوم کاهش یافته است. همچنین، ۷۳ درصد از بستر رودخانه مورد مطالعه به دلیل رسوبگذاری و ایجاد ناپایداری، قابلیت انتقال جریان آب را ندارد. به طوری که متوسط عرض بستر سیلابی از ۱۶۰/۷۹ به ۴۱/۳۲ متر، متوسط تغییرات زاویه نسبت به شمال رودخانه، از ۲۸۷/۹۴ به ۲۹۵/۲۶ درجه، متوسط شاخص سینوسیته از ۱/۳۹ به ۱/۱۸ و الگوی جریان از حالت پیچان‌رود به حالت سینوسی در سال ۱۳۹۵ تغییر یافته است. در مجموع نتایج کلی این پژوهش بیانگر آن است که پارامترهای هیدرولوژیکی (دبی و رسوب)، بیولوژیکی، تغییرات شیب بستر و احداث سد، از مهمترین عوامل تغییر غلظت رسوب معلق، و به دنبال آن تغییر در مورفولوژی و تبدیل رودخانه از حالت مئاندری سینوسی نامنظم (سال ۱۳۴۴) به حالت مئاندری محدود (سال ۱۳۹۵) است.

واژه‌های کلیدی: استان سیستان و بلوچستان، افغانستان، پیچان‌رود، رسوبگذاری، عرض رودخانه

مقدمه

فرسایش از جمله فرایندهای طبیعی است که همواره باعث تخریب و هدر رفت خاک می‌شود. وجود سازندهای فرسایش‌پذیر و عامل انتقال دهنده، همواره شرایط را برای فرسایش مهیا می‌کند. فرسایش در طبیعت به دو صورت بادی و آبی صورت می‌گیرد. فرسایش آبی از جمله چالش‌های مهم در مناطق خشک به‌شمار می‌رود و سامانه‌های رودخانه‌ای که منابع آب سطحی است، همواره رسوبات متأثر از فرسایش خاک، در مناطق بالادست را با خود حمل کرده، به نقاط پایین‌دست منتقل می‌کند (Safavi, 2004). در این راستا، رودخانه به‌عنوان یک سامانه و مقیاس هیدرولوژیکی که جریان در آن تحت تأثیر شیب رودخانه و عمق می‌باشد، در واکنش به تغییرات رژیم هیدرولوژیکی و بار رسوب، مورفولوژی بستر خود را دائماً تغییر می‌دهد (Hoyer و Gyr, 2006). به‌طوری‌که پدیده فرسایش و تشکیل اشکال سطح بستر، تغییرات جانبی-عمودی و پیچیدگی سامانه‌های آبرفتی از جمله پیامدهای آن است (Joeckel و Henebry, 2008؛ Mao و Surian, 2010). مواد و ذرات فرسایش یافته در عرصه‌های آبخیز به سه صورت بار معلق^۱، جهش^۲ و بار بستر^۳ به‌وسیله رودخانه‌ها جابه‌جا می‌شوند. بار معلق بخش عمده رسوب حمل شده، به‌وسیله رودخانه‌ها می‌باشد (Maidment, 1992)، به‌طوری‌که بار معلق به‌طور متوسط بیش از ۸۵ درصد بار کل حوزه آبخیز را تشکیل می‌دهد (Rendon-Herro, 1974). با افزایش میزان بارندگی، رسوب معلق حمل شده به‌وسیله رودخانه‌ها افزایش می‌یابد (Hadley و همکاران، 1985). به‌عبارت دیگر، جریان‌های با دبی‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی مختلف اثرات متفاوتی را بر رودخانه بر جای می‌گذارد. به‌طوری‌که در دوره‌های زمانی درازمدت این تغییرات در میزان جریان رودخانه‌ها اثرات چشم‌گیری را در سیکل هیدرولوژی رودخانه به‌دنبال دارد (Esmaeili و Mahdavi, 2002؛ Shafai-Bajestan, 2002). تحقیقات زیادی در رابطه با حمل رسوب و اثر آن بر

مورفولوژی رودخانه‌ها انجام گرفته است. به‌عنوان مثال، Thorne (2002) در تحقیقی به بررسی مورفولوژی پشته‌های رسوبی ته‌نشست شده در رودخانه ریوپارانا پاراگوئه پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد، با بررسی پارامترهایی از جمله میزان دبی جریان، آورد رسوب، شیب بستر و مشخصات هندسی رودخانه، این پشته‌های رسوبی عمدتاً در نواحی کم شیب و به‌دنبال رسوب‌گذاری بار رسوبی در پی کاهش دبی جریان و در قوس‌های رودخانه به‌وقوع پیوسته، که نتیجه کلی این فرایند، تغییر در مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه بوده است. Min و همکاران (2012) تغییرات غلظت رسوب معلق در منطقه ساحلی سامنگیوم کره را به کمک تصاویر ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج، حاکی از تغییر غلظت رسوب به‌دنبال احداث سازه‌های آبی نسبت به زمان قبل از احداث سازه و همچنین، تغییر در مورفولوژی رودخانه بوده است. در تحقیقی، Joann (2016) تغییرات ژئومورفولوژی رودخانه اتچافالوا در جنوب لایویانا را با بررسی حجم رسوبات معلق در جریان‌های سیلابی و استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا مورد مطالعه قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد که مسیر رودخانه تحت تأثیر نوسان در شرایط جریان، رسوبگذاری و فعالیت‌های انسانی تغییر کرده است.

Morid (2004) با مطالعه تغییرات مورفولوژی رودخانه کارون بر اساس چهار سری تصاویر لندست و IRS دریافت که فرایند رسوب و فرسایش در محدوده مورد مطالعه با تغییر در تراکم و اندازه مماندرها و قوس‌ها، باعث تغییر در مورفولوژی محدوده مورد مطالعه شده است. Kazemzadeh (2012) بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت رسوب معلق در مصب جزر و مدی بهمنشیر با استفاده از تکنیک سنجش از دور را مورد مطالعه قرار داد. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که بیشترین تغییرات غلظت رسوب معلق در امتداد ساحل مصب بهمنشیر و در پی رسوب بار بستر به‌وجود آمده که باعث تشکیل پشته‌های رسوبی و ناهمواری در این محدوده شده است. در تحقیقی دیگر، Ganavati و همکاران (2016) ارزیابی آثار انتقال آب بین حوضه‌ای بر مورفولوژی بستر رودخانه

¹ Suspension load

² Saltation

³ Bed load

از نوع شورپسند می‌باشد. بستر رودخانه هیرمند در داخل ایران مربوط به دوره‌های نئوزن-کواترنری و دارای آبرفت‌های ریز، رسوبات رودخانه‌ای، تپه‌های ماسه‌ای، مخروط‌افکنه جوان، پهنه‌های گراولی و یادگانه می‌باشد (Jahantigh, ۲۰۱۳). رودخانه هیرمند که از کشور افغانستان سرچشمه گرفته، طول‌ترین رود بین سند و فرات و از جمله رودخانه‌های فصلی و حیاتی ایران است (Barimani و Asghari-Lafmejani, ۲۰۱۰). سیلاب ناشی از بارش در کشور افغانستان پس از مشروب ساختن زمین‌های کشاورزی افغانستان، وارد منطقه سیستان و در مدت زمان محدودی که آب در رودخانه جریان دارد، تأمین کننده آب مورد نیاز بیش از ۱۲۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی، نیاز صنعتی و همچنین، آب شرب و غیر شرب بیش از یک میلیون و دویست هزار نفر از ساکنان منطقه می‌باشد (Vaezipour, ۲۰۱۱). رودخانه هیرمند در ایران دارای شیب کم و رسوبگذاری نیز در این رودخانه فرایندی غالب بوده، به طوری که با اندک تغییراتی دچار ناپایداری بستر و کاهش آورد رودخانه می‌شود. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱، نشان داده شده است.

روش پژوهش: انجام این پژوهش، بر پایه بررسی بازه زمانی و مکانی رسوب معلق و مقایسه تاریخی بستر رودخانه هیرمند به صورت میدانی، آزمایشگاهی و استفاده از نرم‌افزار GIS صورت گرفته است.

بدین منظور، به صورت میدانی محل‌هایی که دارای ابعاد و سطح مقطع مشخص (طول، عرض و ارتفاع) در مسیر رودخانه و دسترسی به آن‌ها نیز آسان بود، مشخص و رسوب معلق مورد نیاز به هنگام جاری شدن سیل از کشور افغانستان در رودخانه هیرمند از آبان سال ۱۳۹۴ تا اسفند ۱۳۹۵ به وسیله سیلاب‌هایی که وارد ایران (سیستان رود) شده است، نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری به روش انتگراسیون عمقی با ظروف پلاستیکی و در اعماق مختلف از سیلاب صورت پذیرفته است (Edwards و Glysson, ۱۹۹۹؛ Mahdavi, ۲۰۰۲). در برداشت نمونه‌های رسوب با توجه به این‌که دامنه بیشینه جریان در این رودخانه در طول چند روز صورت می‌پذیرد، لذا، با اندازه‌گیری‌های میدانی ارتفاع آب و سطح داغ‌آب

در حوضه مبدأ، با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در حوضه رودخانه زاب را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که حمل رسوبات در پی انتقال آب بین حوضه‌ای و تشکیل پشته‌های رسوبی در مسیر جریان و رسوبگذاری در کناره‌ها، باعث کاهش عمق و بستر رودخانه مورد مطالعه در درازمدت خواهد شد.

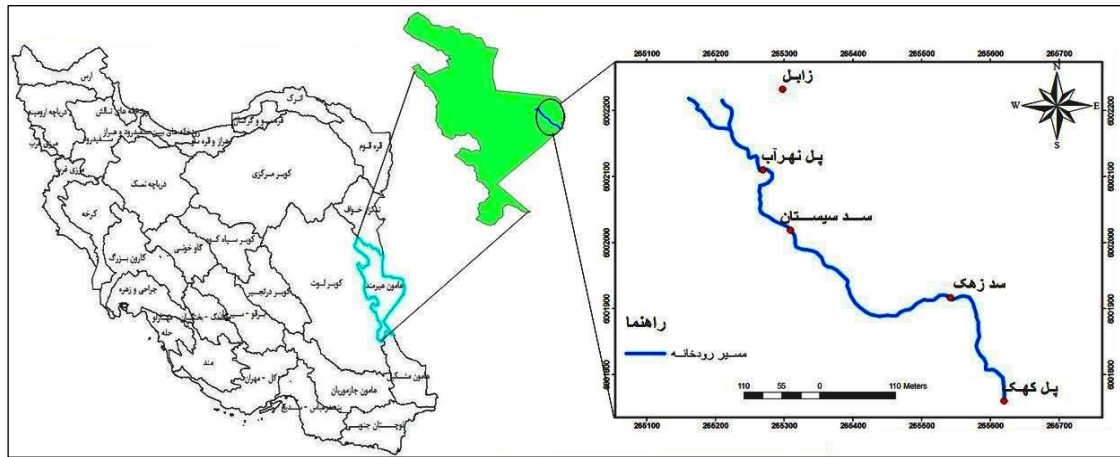
بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، تحقیقات متعددی در زمینه رسوب و اثرات آن بر ژئومورفولوژی رودخانه صورت گرفته که نشان از اهمیت این موضوع دارد. لذا، هدف از این بررسی با توجه به نقش حیاتی رودخانه هیرمند در بقاء ساکنان منطقه سیستان و کم بودن شیب بستر این رودخانه در ایران و بالا بودن غلظت بار رسوبی و ناپایداری بستر رودخانه که به تبع آن باعث تغییر در آورد رودخانه می‌شود، تعیین روند تغییرات غلظت رسوب معلق و تحلیل عوامل موثر بر آن و اثرات آن بر ژئومورفولوژی رودخانه هیرمند می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: محدوده مورد مطالعه در جنوب شرقی ایران و در شمال استان سیستان و بلوچستان بین $33^{\circ} 8' 29''$ تا $29^{\circ} 2' 32''$ عرض شمالی $64^{\circ} 16' 44''$ تا $61^{\circ} 49' 44''$ طول شرقی در دامنه ارتفاعی ۲۲۰۰-۴۸۰ متری از سطح دریا واقع شده است. وسعت حوزه‌های آبخیز بالادست محدوده مورد مطالعه که در خاک افغانستان قرار دارد، حدود ۱۱۲ هزار کیلومتر مربع است. متوسط بارندگی محدوده مورد مطالعه بین ۶۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین آن در فصل زمستان ریزش می‌نماید. میانگین درجه حرارت، متوسط بیشینه و بیشینه مطلق سالیانه به ترتیب ۱۸، ۲۵ و ۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. این محدوده دارای تبخیر و تعرق بالا و رطوبت کمی است، به طوری که متوسط رطوبت سالانه آن ۲۸ درصد می‌باشد و تبخیر و تعرق آن حدود پنج متر است که سه متر آن در ماه‌های بحرانی سال انجام می‌پذیرد و با توجه به شرایط اکولوژیکی، محدوده مورد بررسی جزء مناطق خشک و بحرانی کشور محسوب می‌شود. پوشش گیاهی منطقه فقیر و

آب قرائت و با استفاده از روش جسم شناور معادله (۱) سرعت سطحی آب، معادله (۲) سرعت متوسط و معادله (۳) دبی آب، برای هر یک از دفعات نمونه برداری محاسبه شد (Alizadeh, ۲۰۰۸).

رودخانه به ازای هر دو سانتی متر تغییر در ارتفاع سیلاب (کاهش یا افزایش)، نمونه برداری مجدد از اعماق مختلف جریان رودخانه انجام شد. در اندازه گیری های میدانی با استفاده از اشل مدرج، ارتفاع



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در حوزه های آبخیز کشور

اندازه گیری های میدانی در نقطه ۱ با دبی ثبت شده به وسیله ایستگاه هیدرومتری در همین نقطه، مورد مقایسه قرار گرفت. بر این اساس، به منظور هم خوانی دبی اندازه گیری شده و دبی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری، معادله (۲) (ضریب وابسته به عمق) واسنجی شد. در ادامه، پس از واسنجی معادله (۲) و با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته در هر مرحله از نمونه برداری (ارتفاع آب، سطح مقطع محل برداشت، سرعت سطحی بر اساس جسم شناور) سرعت متوسط و دبی برای سایر نقاط که فاقد ایستگاه هیدرومتری هستند نیز برآورد شد.

در بررسی های آزمایشگاهی، به منظور برآورد غلظت رسوب معلق، نمونه های رسوب جمع آوری شده پس از انتقال به آزمایشگاه با عبور از کاغذ صافی شماره ۴۲ در داخل آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد و سپس وزن رسوبات با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ محاسبه شد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۶؛ Aghabeigi و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۲، محل برداشت، مراحل نمونه برداری و آزمایشگاهی را نشان می دهد.

$$V_s = L/T \quad (1)$$

که در آن، L فاصله بین دو نقطه، T فاصله زمانی که جسم بین دو نقطه از مسیر را طی می کند و V_s سرعت سطحی آب (ثانیه) می باشد.

$$V_m = K V_s \quad (2)$$

که در آن، K ضریب وابسته به عمق رودخانه (۰/۶ تا ۰/۹)، V_s سرعت سطحی آب و V_m سرعت متوسط (متر بر ثانیه) می باشد.

$$Q = AV \quad (3)$$

که در آن، A سطح مقطع رودخانه، V سرعت متوسط و Q دبی (مترمکعب بر ثانیه) می باشد.

با توجه به اندازه گیری های میدانی به عمل آمده در هر مرحله نمونه برداری (ارتفاع آب، سطح مقطع محل برداشت، سرعت سطحی بر اساس جسم شناور، سرعت متوسط و دبی) به منظور بالا بردن صحت برآوردهای صورت گرفته و با وجود یک ایستگاه هیدرومتری (نقطه ۱) در محدوده مورد مطالعه، آمار ثبت شده در این ایستگاه از سازمان آب منطقه ای سیستان جمع آوری و بر اساس آمار دبی ثبت شده به وسیله این ایستگاه هیدرومتری، برآورد دبی صورت گرفته بر اساس



شکل ۲- محل برداشت نمونه‌ها (الف- اولین نقطه برداشت در اولین نقطه ورود سیلاب از کشور افغانستان به ایران و دارای ایستگاه هیدرومتری، ب- دومین نقطه برداشت و ۱۲ کیلومتر فاصله نسبت به نقطه اول و فاقد ایستگاه هیدرومتری، پ- سومین نقطه برداشت و ۳۰ کیلومتر فاصله نسبت به نقطه اول و فاقد ایستگاه هیدرومتری و ج- نمایی از برداشت نمونه‌ها و اندازه‌گیری رسوبات معلق با عبور از کاغذ صافی، خشک و وزن نمودن آن‌ها (محل برداشت پل کهک)

الگوی جریان و عرض رودخانه در دو بازه زمانی ۱۳۴۴ و ۱۳۹۵ در محیط GIS در این مناطق مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تغییرات مسیر رودخانه، زاویه تغییرات بخش‌های مختلف رودخانه به صورت زاویه‌ای نسبت به شمال اندازه‌گیری شد. برای تعیین شاخص سینوسیته از رابطه (۴) استفاده شد (Jafarbeigloo و همکاران، ۲۰۱۱).

$$S=C/V \quad (4)$$

که در آن، S ضریب سینوسی شدن، C طول رودخانه در بخش مورد بررسی و V طول دره رودخانه

در ادامه، برای بررسی میزان تغییرات در مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه، ابتدا عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۴ مسیر رودخانه در محیط نرم‌افزار ArcGIS زمین مرجع، و با استفاده از تصاویر ماهواره اسپات-۵ سال ۲۰۱۶ با قدرت تفکیک مکانی ۵-۲/۵ متر، مناطقی که مورفولوژی آن‌ها تغییر کرده، مشخص (شکل ۳) و بستر سیلابی جریان رودخانه با بررسی سطح انباشت رسوبات در مسیر رودخانه بر روی تصاویر هوایی ۱۳۴۴ و تصاویر ماهواره‌ای ۲۰۱۶ پلی‌گون‌بندی و تغییرات مسیر، ضریب سینوسیته،

شده که از این مقدار حدود سه میلیون تن رسوب معلق (۴۱ درصد) همراه سیلاب به نقطه سه رسیده و حدود ۴/۳ میلیون تن رسوب (۵۹ درصد) از رسوبات معلق حمل شده به وسیله سیلاب در طول مسیر رودخانه به جا مانده است. رابطه بین رسوب معلق و دبی سیلاب برای هر یک از بازه‌ها با استفاده از داده‌های رسوب معلق و دبی سیلاب محاسبه شده در هر نمونه برداری، در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس رابطه بازه یک و دو، مقدار ضریب همبستگی (R^2) به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۶۴ می‌باشد که نشان از همبستگی بالای بین دبی سیلاب و گل آلودگی آن است. پس از زمین مرجع سازی عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۴ و تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی مناطقی که مورفولوژی رودخانه در آن‌ها تغییر یافته، روند تغییرات مسیر، ضریب سینوسیته، الگوی جریان و عرض رودخانه در بستر جریان سیلابی رودخانه در دو بازه زمانی مذکور مورد مقایسه قرار گرفت. زاویه بخش‌های مختلف رودخانه برای هر یک از محدوده‌های مورد بررسی در شکل ۵ و مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده (ضریب سینوسیته، الگوی جریان و اندازه زاویه نسبت به شمال) در جدول ۴ نشان داده شده است.

در بررسی روند تغییرات مسیر رودخانه و شاخص سینوسیته در محدوده‌های مورد مطالعه، این‌گونه مشخص شد که زاویه نقاط مختلف رودخانه در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۴۴ افزایش یافته، مسیر رودخانه دارای تغییراتی است. همچنین، با بررسی شاخص سینوسیته رودخانه در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۴۴، مشخص شد که این پارامتر کاهش یافته، رودخانه از حالت پیچان‌رود (سال ۱۳۴۴) به حالت سینوسی (سال ۱۳۹۵) تغییر کرده است که میزان تغییر این پارامترها برای هر یک از محدوده‌های مورد بررسی در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

به خط مستقیم می‌باشد. به منظور تعیین الگوی رودخانه از جدول ۱، استفاده شد.

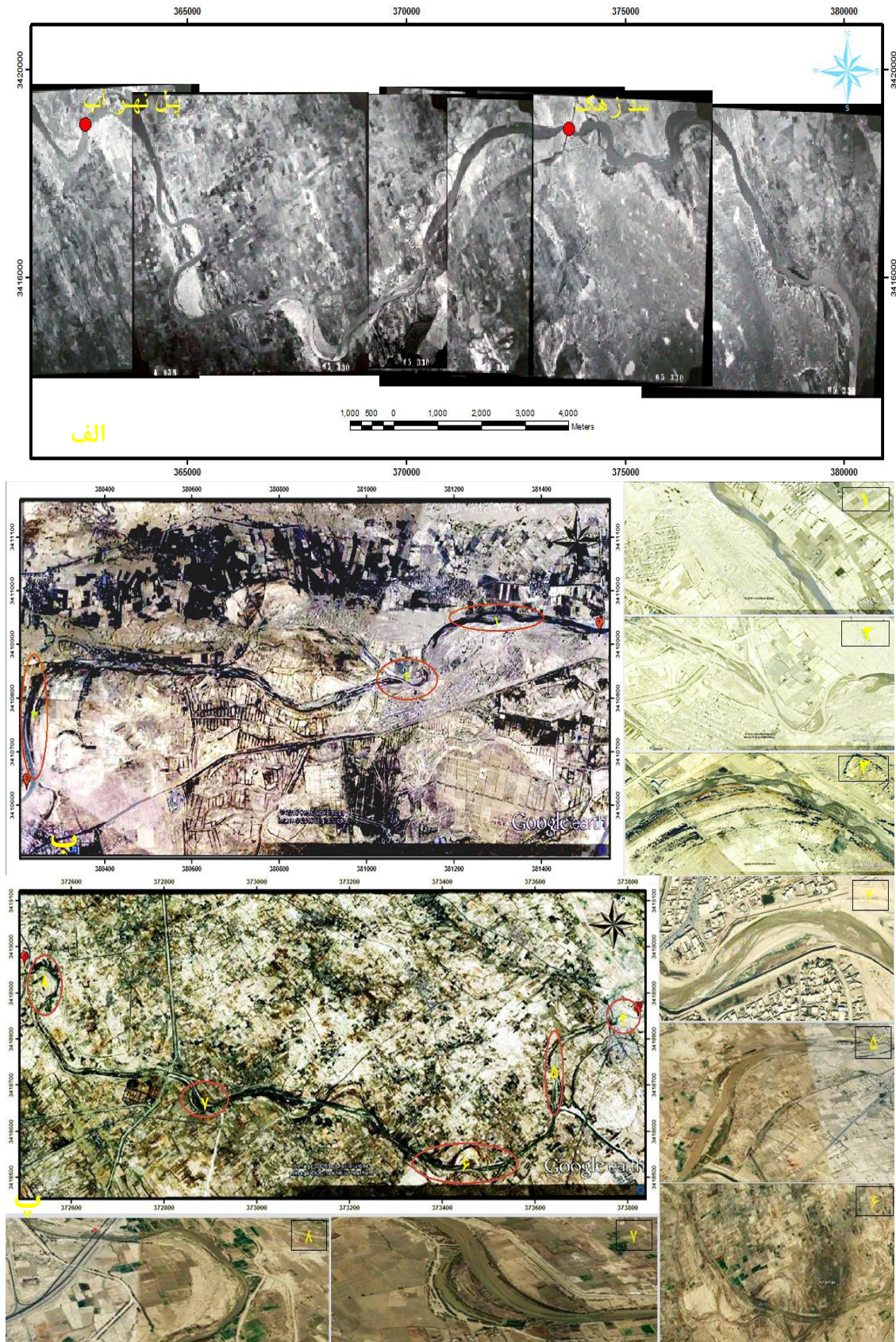
برای بررسی روند تغییرات عرض رودخانه تعداد ۲۴ مقطع برای دو زمان اندازه‌گیری (۱۳۴۴ و ۱۳۹۵) بر اساس مورفولوژی رودخانه (با بازدیدهای میدانی) انتخاب و برداشته‌ها صورت گرفت. در تحلیل روند این تغییرات از لحاظ آماری از نرم‌افزار SPSS بر اساس آزمون t استیودنت استفاده شد (Rangavar و همکاران، ۲۰۰۹).

نتایج و بحث

بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی و محاسبات عددی، سرعت متوسط و دبی سیلاب برای هر یک از نقاط نمونه برداری در جدول ۲ و وزن نمونه‌های رسوب معلق در جدول ۳ ارائه شده است. با محاسبه وزن رسوبات، متوسط غلظت برآورد شده ۳۲ گرم در لیتر می‌باشد. به طوری که غلظت بار رودخانه سیستان بین ۱۰ تا ۵۰ گرم در لیتر گزارش شده است (Tehran-Sahab, ۱۹۹۱). در ادامه، در طول مسیر رودخانه دو بازه در نظر گرفته شده و تغییرات غلظت رسوب معلق در آن محاسبه شد. با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، میزان رسوب معلق در نقطه دو (پل زهک) نسبت به نقطه یک (پل کهک) و در نقطه سه (پل نهرآب) نسبت به نقطه دو کاهش یافته است. به طوری که حدود ۳۴ درصد رسوبات معلق ورودی به رودخانه سیستان در بازه زمانی مورد مطالعه در حد فاصل نقطه یک و دو، ۴۱ درصد در حد فاصل نقطه دو و سه رسوب کرده که تغییرات مکانی غلظت رسوبات معلق در بازه یک نسبت به فاصله بین دو نقطه نمونه برداری، بیشتر از بازه دو بوده است. در طی بازه زمانی مورد مطالعه (آبان ۱۳۹۴ تا اسفند ۱۳۹۵) به مدت ۱۵ ماه حدود ۷/۳ میلیون تن رسوب معلق وارد خاک ایران

جدول ۱- تقسیم‌بندی رودخانه‌ها بر اساس ضریب سینوسیته (Sharafi و Yamani, ۲۰۱۲)

| ضریب سینوسی | >۲ | ۱/۲۵-۲ | ۱/۰۶-۱/۲۵ | ۱-۱/۰۵ |
|-------------|-----------------|------------|-----------|--------|
| نوع رودخانه | پیچان‌رودی شدید | پیچان‌رودی | سینوسی | مستقیم |



شکل ۳- الف) محدوده مورد مطالعه بر اساس تصاویر هوایی ۱۳۴۴، ب) محدوده‌های مورد بررسی بازه یک (حد فاصل نقطه یک تا دو) و پ) محدوده‌های مورد بررسی بازه دو (حد فاصل نقطه دو تا سه)

محدوده‌های مورد بررسی (در سطح یک درصد) اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد.

بر این اساس با توجه به شکل ۷ و پارامترهای بررسی شده فوق، می‌توان این‌گونه بیان کرد که تغییر در مورفولوژی رودخانه سیستان در بازه نیم قرن اخیر محسوس می‌باشد.

بر اساس پیمایش‌های میدانی صورت گرفته در محدوده‌های مورد بررسی در بازه یک و دو مئاندرهای بزرگی در مسیر رودخانه شکل گرفته که کاهش شیب بستر رودخانه، باعث افزایش رسوبگذاری در این مناطق شده است که رویش پوشش گیاهی خودرو (گز، نی، سالسولا و خارشتر) بر روی این مئاندرها، باعث تثبیت و گسترش آن‌ها می‌شود. در بررسی‌های صورت گرفته، رویش این پوشش گیاهی به‌خصوص درختچه‌های خودرو (مانند گز) در مسیر اصلی رودخانه، باعث ایجاد تله رسوب‌گیر و تغییر در دینامیک رودخانه و شرایط جریان شده است (Velasco و همکاران، ۲۰۰۳)، به‌طوری که با کاهش سرعت سیلاب و نشست تدریجی رسوب معلق، برجستگی‌هایی به ارتفاع ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در مسیر اصلی رودخانه شکل گرفته که این ناهمواری‌ها در دوره‌های بعد به تدریج گسترش می‌یابد و بستر رودخانه را ناپایدار می‌کند. وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در فصل تابستان و حرکت ماسه‌های روان، باعث ایجاد تپه‌های ماسه‌ای در مسیر رودخانه می‌شود که Hafezi Moghadas و همکاران (۲۰۱۲) به نقش بادهای ۱۲۰ روزه در ایجاد تپه‌های ماسه‌ای و پر کردن نهرها و کانال‌های آبرسانی و افزایش تراز بستر، اذعان کرده ولی با توجه به ناپایدار بودن و حرکت تپه‌ها، تحت تأثیر وزش باد در دوره‌های بعدی، اثر آن در این محدوده مطالعاتی چندان محسوس نیست.

با کاهش عرض بستر سیلابی، جریان رودخانه در مواقع طغیان سیلاب، سبب منحرف شدن مسیر رودخانه به سمت دیواره‌های جانبی و آبشویی دیواره‌ها، به دلیل ساختمان حساس خاک به فرسایش، در مسیر رودخانه شده است که بنا به نظر Barforoshan (۲۰۰۹) فرسایش‌پذیری و پدیده واگرایی خاک، مهمترین عامل آبشویی بستر رودخانه سیستان به‌شمار می‌رود.

شیب کم، بستر آبرفتی و غلظت بالای رسوبات معلق رودخانه سیستان طی جریانات سیلابی باعث شده تا رودخانه با تغییر در شیب عمومی، طول خود را از طریق کم و زیاد کردن سینوسیته یا خمیدگی به طریقی تنظیم کند تا شیبی به‌دست آورد که با آن بتواند جریان و رسوبات موجود را حمل کند. در مقابل، مناطقی که علاوه بر کاهش شیب با کاهش دبی، پتانسیل انتقال جریان سیلابی نیز در آن‌ها کاهش یافته، رسوبات حمل شده به‌وسیله جریان به تدریج رسوب کرده، باعث تغییر در حالت جریان رودخانه شده است. به‌طوری که در مطالعات صورت گرفته همچون Khan و Schumm (۱۹۷۲)، گذشته از تأیید رابطه شیب و الگوی هندسی رودخانه‌ها، شواهدی دال بر تأثیر بده رسوبات بر الگوی رودخانه به‌دست آمده است. همچنین، در مطالعات صورت گرفته همانند Hassanpour (۱۹۹۹) در تشخیص نقاط بحرانی رسوبگذاری در رودخانه سیستان، کاهش شیب بستر رودخانه و تغییر در دبی جریان، مهمترین عوامل رسوبگذاری این رودخانه بوده است.

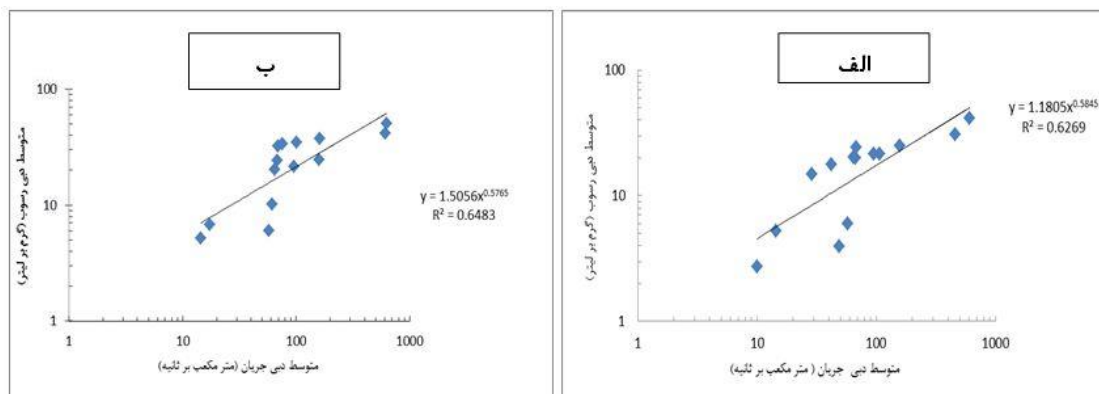
با بررسی اثر سدهای فلزی هیدرولیک در دو بازه زمانی، نتایج نشان داد که علاوه بر موارد ذکر شده وجود (احداث سد زهک سال ۱۳۳۵) و ساخت (احداث سد سیستان بعد از سال ۱۳۴۴) این سدها از دیگر عوامل موثر در تغیر الگوی جریان در این رودخانه می‌باشد. به‌طوری که با بررسی الگوی جریان در محل احداث این سدها، جریان رودخانه‌ای از حالت پیچان‌رود (سال ۱۳۴۴) به حالت سینوسی (سال ۱۳۹۵) تحت تأثیر کاهش دبی بیشینه جریان سیلاب و به‌دنبال آن رسوب بار بستر تغییر کرده است (جدول ۴، محدوده‌های ۴ و ۷).

بررسی تغییرات عرض بستر سیلابی (بدون در نظر گرفتن محدوده‌های تلماسه‌های روان و مهاجم به رودخانه) در مقاطع برداشت شده (۲۴ مقطع، جداول ۵ و ۶) نشان‌دهنده آن است که عرض بستر در سال ۱۳۹۵ در محدوده‌های یک، دو، سه، چهار، پنج، شش، هفت و هشت به‌ترتیب ۷۳، ۷۴، ۷۸، ۷۱، ۷۵، ۶۲، ۷۱ و ۸۰ و به‌طور متوسط در کل محدوده مورد مطالعه ۷۳ درصد نسبت به سال ۱۳۴۴ کاهش یافته است. با توجه به جدول ۷، میانگین آماری عرض بستر

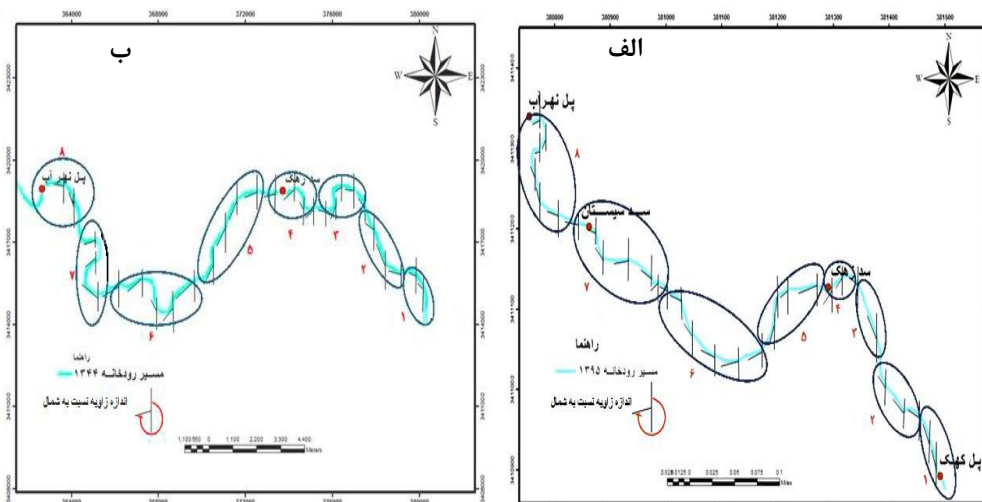
روبروی مناطق رسوبگذاری، شده است که علاوه بر کاهش عمق بستر رودخانه، اراضی همجوار رودخانه را نیز تهدید می‌کند. از این رو، یافته‌های این تحقیق با نتایج تحقیقات صورت گرفته همچون Wang و همکاران (۲۰۱۲) و Joann (۲۰۱۶) در رابطه با تأثیر شرایط هیدرولوژیکی (دبی و رسوب) بر میزان رسوب معلق و اثر آن بر مورفولوژی رودخانه، Min و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر تأثیر احداث سازه‌های آبی در تغییر مورفولوژی رودخانه، Kazemzadeh (۲۰۱۲) مطالعه تغییرات غلظت رسوب معلق تحت تأثیر تغییرات شیب و پوشش گیاهی و اثرات آن بر مورفولوژی رودخانه و Hafezi Moghadas و همکاران (۲۰۱۲) بررسی اثر شیب کم بستر رودخانه، فرسایش کناری و تخریب اراضی همجوار بر مورفولوژی رودخانه سیستمان مطابقت دارد.

در طی بررسی‌های صورت گرفته، افزایش شیب هیدرولیکی و به تبع آن افزایش سرعت جریان آب در ابتدای بعضی مناطق، باعث ایجاد فرسایش کناری در مسیر رودخانه شده که در پژوهش‌های صورت گرفته همچون Hafezi Moghadas و همکاران (۲۰۱۲) و Jahantigh (۲۰۱۳) این فرسایش، از جمله فرسایش‌های غالب در رودخانه سیستمان است که همواره باعث تغییر مسیر رودخانه و تهدید اراضی اطراف بستر رودخانه می‌شود.

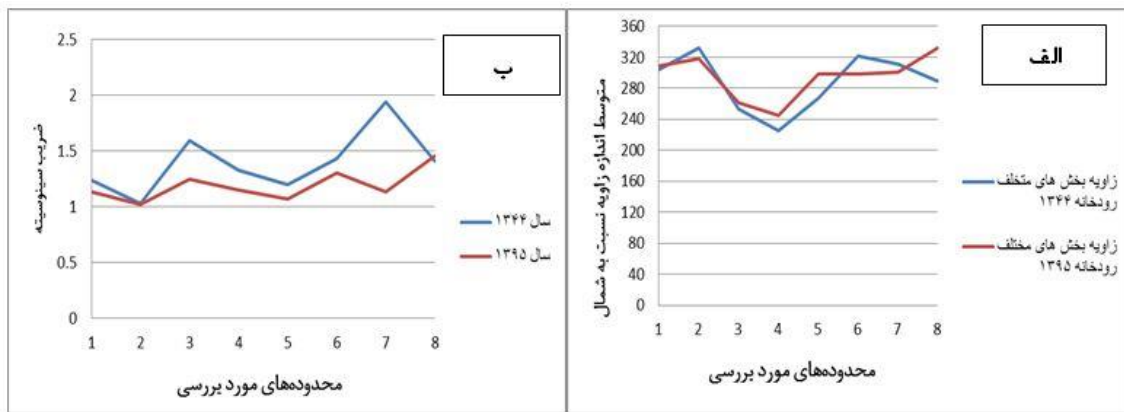
با بررسی تغییرات عمق رودخانه در ۴۲ نقطه از مسیر رودخانه، ارتفاع رسوبات انباشت شده در محدوده‌های مورد اندازه‌گیری، بین ۳۰ تا ۲۵۰ سانتی‌متر می‌باشد که بیشترین مقدار آن مربوط به پیچان‌رودها و قوس‌های رودخانه است که متوسط حجم انباشت آن‌ها ۲۲ هزار متر مکعب می‌باشد که باعث تغییر مسیر رودخانه و تخریب در قوس‌های



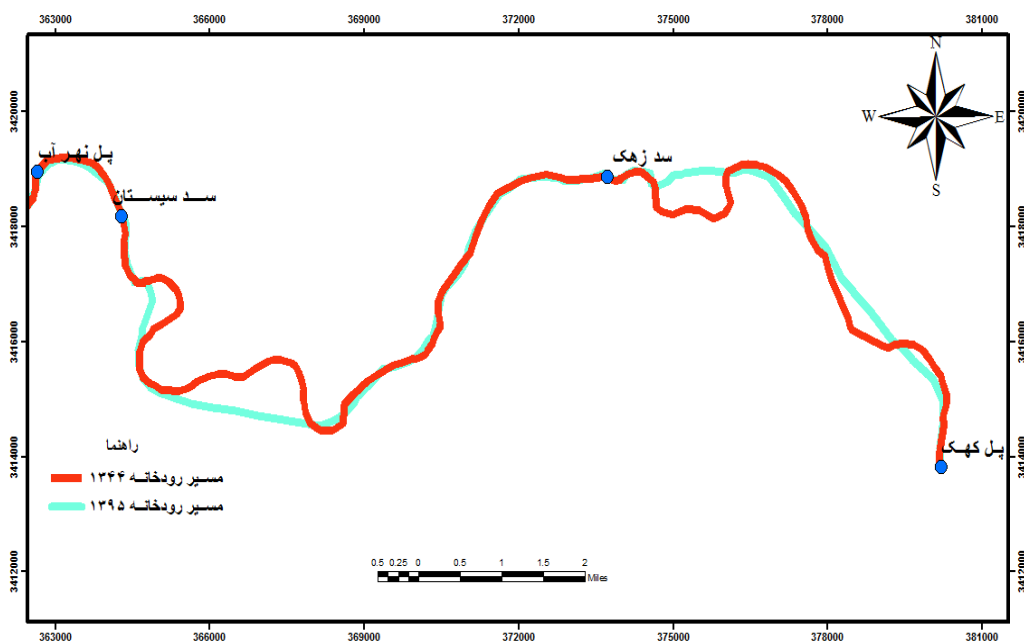
شکل ۴- الف) رابطه بین رسوب معلق و دبی سیلاب در بازه یک و ب) رابطه بین رسوب معلق و دبی سیلاب در بازه دو



شکل ۵- الف) زاویه بخش‌های مختلف رودخانه در سال ۱۳۴۴ و ب) زاویه بخش‌های مختلف رودخانه در سال ۱۳۹۵



شکل ۶- الف) مقایسه زاویه بخش‌های مختلف رودخانه در سال‌های ۱۳۴۴ و ۱۳۹۵ و ب) مقایسه ضریب پیدایش رودخانه در سال‌های ۱۳۴۴ و ۱۳۹۵



شکل ۷- مقایسه تغییرات مسیر رودخانه هیرمند (بازه سیستان) در سال‌های ۱۳۴۴ و ۱۳۹۵

نتیجه‌گیری

رودخانه مورد مطالعه ۳۲ گرم در لیتر می‌باشد و بین غلظت رسوب معلق و دبی سیلاب (ضریب همبستگی ۰/۶۴) رابطه مستقیمی برقرار است که بر این اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نشان از غلظت بالای بار رسوبی در این رودخانه می‌باشد. با تعیین روند تغییرات مسیر، شاخص سینوسیته، حالت جریان و تغییرات عرض بستر سیلابی رودخانه در محدوده‌های مورد مطالعه، تغییر در مورفولوژی رودخانه در طی نیم قرن اخیر محسوس و بیشترین تغییر در پارامترهای ذکر شده در بازه یک با توجه به طول کم (۱۲ کیلومتر) آن نسبت به بازه دو (۱۸ کیلومتر) صورت پذیرفته است.

در این پژوهش، با نمونه‌برداری سیلاب‌های جاری شده از کشور افغانستان در رودخانه سیستان، رسوبات معلق همراه این سیلاب‌ها برآورد شد و روند تغییرات غلظت رسوبات در بازه زمانی و مکانی مختلف به صورت میدانی در طول مسیر رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌های مستعد رسوبگذاری در طول مسیر رودخانه به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای با کیفیت بالا مشخص و تغییرات مسیر رودخانه، ضریب سینوسیته، حالت جریات رودخانه و تغییرات عرض بستر سیلابی رودخانه در بازه زمانی نیم قرن تعیین شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که متوسط غلظت رسوب معلق

جدول ۲- سرعت و دبی محاسبه شده برای هر نقطه در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری

| محل نمونه‌برداری | سرعت متوسط در مراحل مختلف نمونه‌برداری | دبی (متر مکعب بر ثانیه) |
|------------------|--|-------------------------|
| نقطه ۱ | مرحله (۱) | ۱/۳۱ |
| | مرحله (۲) | ۱/۱۴ |
| | مرحله (۳) | ۰/۶۱ |
| | مرحله (۴) | ۰/۱۸ |
| | مرحله (۵) | ۰/۳۶ |
| | مرحله (۶) | ۰/۹۱ |
| | مرحله (۷) | ۳/۸۱ |
| نقطه ۲ | مرحله (۱) | ۱/۱۹ |
| | مرحله (۲) | ۱/۰۹ |
| | مرحله (۳) | ۰/۵۳ |
| | مرحله (۴) | ۰/۱۶ |
| | مرحله (۵) | ۰/۳۴ |
| | مرحله (۶) | ۰/۷۲ |
| | مرحله (۷) | ۳/۶۸ |
| نقطه ۳ | مرحله (۱) | ۰/۸ |
| | مرحله (۲) | ۰/۵۸ |
| | مرحله (۳) | ۰/۳۸ |
| | مرحله (۴) | ۰/۱۰ |
| | مرحله (۵) | ۰/۲۲ |
| | مرحله (۶) | ۰/۴۹ |
| | مرحله (۷) | ۲/۷۸ |

جدول ۳- وزن رسوبات معلق محاسبه شده (گرم در لیتر)

| | نقطه ۱ | | | نقطه ۲ | | | نقطه ۳ | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | ۰/۴ متر | ۰/۷ متر | ۱/۱ متر | ۰/۴ متر | ۰/۷ متر | ۱/۱ متر | ۰/۴ متر | ۰/۷ متر | ۱/۱ متر |
| ۱ | ۳۶/۲۱ | ۳۸/۷۴ | ۳۷/۳۵ | ۱۴/۲۷ | ۲۸/۳۸ | ۳۱/۶۵ | ۲۱/۲۱ | ۲۷/۴۷ | ۱۶/۰۸ |
| ۲ | ۳۳/۶۲ | ۳۶/۱۱ | ۳۴/۷۱ | ۳۰/۲۵ | ۲۴/۳۲ | ۱۰/۲۴ | ۱۹/۲۱ | ۲۰/۶۹ | ۱۸/۰۸ |
| ۳ | ۲۸/۲۸ | ۳۵/۱۹ | ۳۳/۳۲ | ۱۹/۵۶ | ۲۵/۷۸ | ۱۵/۴۲ | ۱۴/۵۴ | ۱۹/۴۸ | ۱۰/۷۴ |
| ۴ | ۱۰/۲۱ | - | - | ۷/۸ | - | - | ۳/۴ | - | - |
| ۵ | ۱۲/۹۶ | ۸/۸۰ | ۱/۶۳ | ۵/۶۵ | ۵/۷۶ | ۶/۶۶ | ۳/۲ | ۴/۵۳ | ۴/۱۵ |
| ۶ | ۳۰/۹ | ۳۶/۰۷ | ۳۴/۰۷ | ۱۴/۵۴ | ۲۷/۴ | ۳۰/۳۲ | ۱۱/۴ | ۲۱/۷۷ | ۱۹/۸۶ |
| ۷ | ۴۹/۶۰ | ۵۷/۳۳ | ۴۵/۴۲ | ۳۷/۶۰ | ۴۶/۱۲ | ۴۰/۲۵ | ۳۲/۵۸ | ۳۳/۰۴ | ۲۶/۲۶ |

جدول ۴- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای‌های مورد مطالعه در رودخانه هیرمند (بازه سیستان)

| محدوده مورد مطالعه | متوسط زاویه نسبت به شمال در سال ۱۳۴۴ (درجه) | متوسط زاویه نسبت به شمال در سال ۱۳۹۵ (درجه) | ضریب سینوسیته رودخانه در سال ۱۳۴۴ | ضریب سینوسیته رودخانه در سال ۱۳۹۵ | الگوی رودخانه در سال ۱۳۴۴ | الگوی رودخانه در سال ۱۳۹۵ |
|--------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ۱ | ۳۰۴/۱۱ | ۳۰۸/۳۳ | ۱/۲۴۱ | ۱/۱۳ | سینوسی | سینوسی |
| ۲ | ۳۳۲/۴۸ | ۳۱۸/۶۶ | ۱/۰۳ | ۱/۰۲ | مستقیم | مستقیم |
| ۳ | ۲۵۳/۳ | ۲۶۱/۰۶ | ۱/۵۹۳ | ۱/۲۵ | پیچان رود | سینوسی |
| ۴ | ۲۵۵ | ۲۴۴/۷۱ | ۱/۳۳ | ۱/۱۵ | پیچان رود | سینوسی |
| ۵ | ۲۶۶/۶۶ | ۲۹۷/۹۴ | ۱/۲۰ | ۱/۰۷ | سینوسی | سینوسی |
| ۶ | ۳۲۱/۳۳ | ۲۹۸ | ۱/۴۳ | ۱/۳ | پیچان رود | پیچان رود |
| ۷ | ۳۱۱/۵ | ۳۰۱ | ۱/۹۴ | ۱/۱۳ | پیچان رود | سینوسی |
| ۸ | ۲۸۹/۲ | ۳۳۲/۳۸ | ۱/۴۱ | ۱/۴۶ | پیچان رود | پیچان رود |

جدول ۵- عرض بستر سیلابی نقاط مختلف رودخانه در سال ۱۳۴۴^۱

| | بازه ۲ | | | | بازه ۱ | | | |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|
| | عرض رودخانه نقطه ۸ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۷ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۶ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۵ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۴ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۳ (متر) | عرض رودخانه نقطه ۲ (متر) | |
| ۱ | ۲۰۶/۵۳ | ۱۹۳/۸۷ | ۷۱ | ۱۳۱/۸۷ | ۱۹۶/۵۲ | ۲۷۹/۸۱ | ۲۵۰/۲۱ | ۱۹۷/۱۷ |
| ۲ | ۲۱۸/۸۹ | ۲۳۰/۴۷ | ۱۰۰/۷۷ | ۱۶۲/۹۶ | ۱۹۱/۷۲ | ۲۰۱/۳۱ | ۲۶۸/۱۶ | ۲۰۰/۲۵ |
| ۳ | ۲۱۳/۸۶ | ۱۱۷/۲۱ | ۱۲۰/۹۷ | ۱۹۶/۹۳ | ۳۱۶/۰۹ | ۲۸۱/۹۹ | ۳۱۷/۳۶ | ۱۷۹/۱۲ |
| ۴ | ۲۶۸/۹۶ | ۱۴۵/۷۷ | ۹۲/۰۷ | ۲۰۱/۳۱ | ۲۹۷/۷۹ | ۲۵۲/۰۸ | ۳۰۷/۴۹ | ۱۱۶/۷۸ |
| ۵ | ۲۸۴/۰۱ | ۱۰۴/۳۰ | ۵۷/۷۱ | ۲۳۹/۶۵ | ۲۳۹/۳۲ | ۱۷۷/۱۱ | ۲۸۷/۶۷ | ۱۷۰/۸۱ |
| ۶ | ۲۹۰/۱۳ | ۷۲/۵۳ | ۶۴/۳۴ | ۲۴۵/۰۸ | ۲۵۰/۹۴ | ۲۴۵/۳۹ | ۲۵۹/۰۱ | ۱۵۴/۱۲ |
| ۷ | ۲۷۱/۷۶ | ۵۹/۲۸ | ۷۴/۵۶ | ۲۴۹/۲۴ | ۱۳۷/۲۵ | ۱۹۱/۷۲ | ۲۳۵/۶۴ | ۱۶۹/۳۰ |
| ۸ | ۲۸۳/۱۸ | ۸۹/۱۵ | ۶۹/۷۸ | ۲۳۴/۸۳ | ۱۲۹/۴۱ | ۱۴۱/۱۹ | ۲۳۴/۵۱ | ۱۸۱/۷۳ |
| ۹ | ۲۶۱/۵۴ | ۹۲/۰۷ | ۶۲/۲۷ | ۱۹۶/۵۷ | ۲۳۰/۷۱ | ۱۵۰/۴۳ | ۱۷۷/۴۳۶ | ۱۸۶/۲۱ |
| ۱۰ | ۲۵۹/۴۰ | ۹۰/۴۳ | ۶۷/۱۰ | ۲۰۱/۳۷ | ۲۵۰/۸۰ | ۱۸۰/۶۸ | ۸۱/۹۰ | ۱۷۰ |
| ۱۱ | ۱۴۲/۷۶ | ۸۸/۱۲ | ۷۵/۷۸ | ۱۸۲/۲۴ | ۲۴۰/۸۵ | ۲۷۰/۶۵ | ۱۵۴/۱۳ | ۱۳۷/۴۰ |
| ۱۲ | ۶۹/۶۸ | ۹۶/۹۳ | ۱۱۷/۸۹ | ۲۱۵/۹۶ | ۲۵۷/۴۵ | ۲۳۱/۳۹ | ۱۱۵/۰۳ | ۱۸۶/۲۴ |
| ۱۳ | ۱۵۰/۸۱ | ۹۱/۱۹ | ۱۱۵/۹۳ | ۱۹۷/۰۴ | ۱۶۸/۰۴ | ۲۳۸/۲۱ | ۱۰۵/۱۲ | ۱۷۷/۱۹ |
| ۱۴ | ۱۷۷/۶۶ | ۱۱۹/۸۲ | ۱۱۸/۳۸ | ۲۰۹/۳۵ | ۲۶۸/۴۱ | ۲۸۷/۴۸ | ۸۴/۳۴ | ۱۴۱/۸۳ |
| ۱۵ | ۱۱۴/۵۶ | ۱۲۹/۱۱ | ۱۶۳/۹۵ | ۲۰۰/۱ | ۳۱۱/۴۲ | ۲۶۸/۴۱ | ۹۱/۱۶ | ۱۴۶/۲۷ |
| ۱۶ | ۱۶۴ | ۱۴۸/۸۲ | ۱۲۷/۶۲ | ۱۴۸/۱ | ۲۲۵/۲۷ | ۲۵۰/۵۶ | ۷۰/۵۶ | ۱۶۸/۴۳ |
| ۱۷ | ۱۷۰/۴۲ | ۷۹/۷۷ | ۱۰۱/۶۷ | ۷۳/۱۱ | ۱۲۴/۶۲ | ۱۳۹/۶۱ | ۹۳/۵۶ | ۱۳۷/۴۰ |
| ۱۸ | ۱۲۵/۲۴ | ۱۱۶/۶۲ | ۹۶ | ۱۸۱/۱۹ | ۶۳/۰۴ | ۱۵۷/۵۴ | ۲۱۰/۶۰ | ۱۸۶/۱۶ |
| ۱۹ | ۲۴۰/۹۷ | ۱۳۵/۵۷ | ۸۶/۲۳ | ۱۷۰/۲۰ | ۷۳/۳۲ | ۹۸/۳۰ | ۸۷/۷۳ | ۱۶۵/۷۳ |
| ۲۰ | ۱۴۵ | ۱۲۹/۵۰ | ۷۵/۰۳ | ۱۰۵/۱۲ | ۶۸/۴۳ | ۱۷۵/۲۳ | ۱۱۲/۹۴ | ۲۳۹/۳۵ |
| ۲۱ | ۱۵۹/۲۷ | ۱۱۱/۷۹ | ۵۴/۳۴ | ۱۴۰/۳۴ | ۵۶/۵۴ | ۱۵۰/۴۱ | ۷۴/۳۳ | ۱۵۱/۱۳ |
| ۲۲ | ۱۱۷/۵۵ | ۱۱۹/۲۸ | ۸۳/۷۶ | ۲۰۳/۸۹ | ۵۰/۳۴ | ۱۸۳/۷۷ | ۱۴۹/۰۵ | ۱۲۸/۵۴ |
| ۲۳ | ۱۲۳/۹۱ | ۱۲۲/۲۰ | ۶۶/۴۵ | ۱۷۸/۴۵ | ۴۵/۶۷ | ۱۹۹/۵۷ | ۱۳۴/۷۰ | ۱۴۶/۲۷ |
| ۲۴ | ۷۱/۷۲ | ۱۰۵/۵۵ | ۵۲/۴۳ | ۱۳۹/۰۱ | ۴۰/۱۲ | ۱۶۰/۲۲ | ۹۹/۹۰ | ۱۲۹/۸۱ |
| متوسط | ۱۸۸/۸۲ | ۱۱۶/۲۲ | ۸۸/۱۶ | ۱۸۳/۴۹ | ۱۷۶/۴۱ | ۲۰۴/۷۱ | ۱۶۶/۷۶ | ۱۶۵/۱۳ |

جدول ۶- عرض بسترسیلابی نقاط مختلف رودخانه در سال ۱۳۹۵

| بازه ۲ | | بازه ۱ | | بازه ۱ | | بازه ۲ | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | عرض رودخانه | |
| نقطه ۸ | نقطه ۷ | نقطه ۶ | نقطه ۵ | نقطه ۴ | نقطه ۳ | نقطه ۲ | نقطه ۱ | |
| (متر) | (متر) | (متر) | (متر) | (متر) | (متر) | (متر) | (متر) | |
| ۲۵/۳ | ۲۸/۴۱ | ۴۴/۹ | ۶۱ | ۶۴/۸۹ | ۸۶/۲۶ | ۵۳/۵۰ | ۴۸/۴۴ | ۱ |
| ۴۰/۷۷ | ۳۱/۹۸ | ۳۴/۳۵ | ۴۴/۱۷ | ۷۶ | ۷۵/۵۸ | ۵۷/۷۴ | ۳۷/۱۲ | ۲ |
| ۲۵/۳۴ | ۳۸/۷۷ | ۲۲/۹۹ | ۴۸/۶۹ | ۶۹/۲۳ | ۵۸/۷۷ | ۴۶/۳۲ | ۳۸/۸۹ | ۳ |
| ۲۳/۶۴ | ۲۴/۶۳ | ۲۲/۰۳ | ۵۵/۷۲ | ۵۵/۷۹ | ۳۳/۳۹ | ۴۲/۴۶ | ۴۷/۶۴ | ۴ |
| ۲۹/۴ | ۱۴/۶۶ | ۳۳/۲۷ | ۴۵/۵۶ | ۵۱/۸۹ | ۳۰/۷۸ | ۴۵/۹۹ | ۶۵/۰۸ | ۵ |
| ۴۶/۸ | ۲۵/۳۷ | ۴۷/۹۳ | ۳۷/۲۴ | ۶۶/۵۰ | ۳۱/۴۲ | ۳۵/۴۲ | ۷۴/۱۵ | ۶ |
| ۵۲/۶۶ | ۲۹/۳۳ | ۴۷/۴۸ | ۲۵/۸۹ | ۶۴/۲۸ | ۲۰/۱۱ | ۲۱/۰۴ | ۳۲/۸۸ | ۷ |
| ۴۹/۷۵ | ۲۷/۶۰ | ۲۱/۸۴ | ۲۹/۲۹ | ۶۰/۷۷ | ۲۹/۵۴ | ۳۰/۵۸ | ۲۲/۵۳ | ۸ |
| ۳۲/۴۸ | ۳۵/۵۴ | ۴۸/۶۲ | ۵۶/۰۳ | ۵۲/۵۰ | ۳۹/۵۶ | ۵۳/۴۹ | ۲۷/۲۲ | ۹ |
| ۴۱/۵۹ | ۳۹/۱۶ | ۳۵/۴۱ | ۲۵/۵۲ | ۴۴/۷۹ | ۲۵/۶۶ | ۵۶/۰۳ | ۳۷/۶۵ | ۱۰ |
| ۴۷/۴۲ | ۳۷/۱۷ | ۲۰/۵۰ | ۴۵/۸۱ | ۳۸/۸۶ | ۳۱/۱۳ | ۵۳/۵۳ | ۳۶/۳۷ | ۱۱ |
| ۴۰/۴۴ | ۳۴/۹۲ | ۱۸/۴۱ | ۵۶/۶۳ | ۲۷/۶۰ | ۲۶/۴۳ | ۵۰/۱ | ۳۴/۰۶ | ۱۲ |
| ۳۷/۶۲ | ۴۰/۴۱ | ۳۰/۳۴ | ۷۷/۷۲ | ۲۹/۴۵ | ۴۲/۲۴ | ۵۲/۰۳ | ۲۱/۸۳ | ۱۳ |
| ۴۲/۸۹ | ۵۸/۶۷ | ۳۵/۴۳ | ۳۰/۳۰ | ۳۳/۶۳ | ۴۰/۹۱ | ۴۷/۳۴ | ۴۲/۳۴ | ۱۴ |
| ۳۸/۶۶ | ۴۹/۸۲ | ۳۹/۷۸ | ۳۳/۲۵ | ۴۵/۴۵ | ۴۲/۸ | ۳۹/۳۱ | ۴۰/۵۱ | ۱۵ |
| ۳۲/۱۹ | ۳۷/۴۳ | ۳۰/۱۲ | ۴۴/۲۷ | ۵۲/۶۶ | ۴۷/۳۶ | ۴۰/۴۱ | ۴۴/۷۴ | ۱۶ |
| ۲۹/۳۳ | ۳۵/۸۱ | ۲۹/۴۳ | ۴۶/۳۹ | ۶۰/۶۹ | ۴۸/۳۹ | ۴۰/۸۹ | ۳۳/۰۴ | ۱۷ |
| ۲۵/۵۹ | ۲۹/۲۱ | ۲۶/۵۶ | ۴۹/۹۰ | ۵۹/۲۱ | ۵۴/۸۶ | ۳۵/۳۰ | ۵۲/۵۳ | ۱۸ |
| ۳۷/۶۷ | ۴۰/۷۸ | ۳۲/۴۹ | ۴۴/۳۴ | ۳۴/۴۹ | ۴۷/۴۶ | ۳۷/۱۲ | ۳۰/۲۴ | ۱۹ |
| ۴۰/۳۵ | ۳۳/۱۶ | ۳۰/۱۹ | ۴۰/۰۴ | ۴۲/۵۵ | ۷۲/۸۷ | ۳۳/۴۵ | ۵۰/۴۱ | ۲۰ |
| ۳۳/۴۳ | ۳۰/۱۱ | ۲۷/۷۸ | ۳۹/۳۴ | ۵۶/۳۹ | ۵۱/۹۱ | ۴۹/۵۰ | ۷۲/۹۱ | ۲۱ |
| ۲۸/۸۸ | ۲۹/۱۲ | ۳۳/۴۵ | ۴۱/۴ | ۵۹/۴۴ | ۴۶/۱۱ | ۳۳/۳۷ | ۶۸/۴۱ | ۲۲ |
| ۳۸/۶ | ۲۵/۱۷ | ۳۹/۱۲ | ۳۷/۷۳ | ۳۹/۱۲ | ۴۰/۳۹ | ۳۴/۴۰ | ۵۶/۷۳ | ۲۳ |
| ۳۵/۴۱ | ۲۲/۱۸ | ۲۸/۵۴ | ۴۵/۹۷ | ۴۰/۱۹ | ۵۴/۸۷ | ۳۵/۴۱ | ۵۰/۳۲ | ۲۴ |
| ۳۶/۹۲ | ۳۳/۳ | ۳۳/۰۳ | ۴۴/۲۴ | ۵۱/۰۹ | ۴۴/۹۴ | ۴۲/۶۹ | ۴۴/۴۱ | متوسط |

۲- بر اساس تصاویر ماهواره‌ای اسپات-۵ سال ۲۰۱۶

جدول ۷- تجزیه میانگین تغییرات عرض رودخانه سال ۱۳۴۴ و سال ۱۳۹۵

| آزمون t | | انحراف معیار | | متغیر | |
|---------|-------|--------------|---------|------------------|------------------|
| df | t | ۳۹/۱۲۰ | ۱۶۰/۷۹۳ | عرض رودخانه ۱۳۴۴ | عرض رودخانه ۱۳۹۵ |
| sig | ۰/۰۰۰ | ۱۴ | ۸/۵۲۶ | ۶/۳۳۴ | ۴۱/۳۲۷ |

گل آلودگی و تغییرات غلظت رسوبات معلق در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه سیستان نشان داد که غلظت رسوبات حمل شده و فرایند رسوبگذاری در این رودخانه زیاد می‌باشد. تغییر در شرایط جریان، پوشش گیاهی بستر رودخانه، شیب بستر و احداث سد، باعث حالت مئاندری سینوسی نامنظم در رودخانه سیستان (سال ۱۳۴۴) شده که اثرگذاری همین عوامل در طی نیم قرن با توجه به بستر آبرفتی و قدرت مانور رودخانه، باعث کاهش شاخص سینوسیته، تغییرات زاویه نسب به شمال رودخانه، عرض بستر سیلابی و تغییر الگوی جریان رودخانه در سال ۱۳۹۵ و تبدیل آن به حالت مئاندرهای محدود شده است.

آن به حالت مئاندرهای محدود شده است.

مورفولوژی این رودخانه، نتیجه‌گیری می‌شود که رسوبات معلق نقش عمده‌ای در تغییرات مورفولوژی رودخانه هیرمند ایفا کرده است. با این وجود، مطالعه پویا و مداوم رسوبات معلق در این رودخانه به منظور مدیریت در منابع آب و خاک امری ضروری می‌باشد و نتایجی نزدیک‌تر به واقعیت ارائه می‌کند.

بر این اساس، پارامترهای هیدرولوژیکی (دبی و رسوب)، بیولوژیکی، تغییرات شیب بستر و احداث سد از مهمترین عوامل تغییر غلظت رسوب معلق بوده، با تغییر در حالت الگوی جریان، عرض بستر سیلابی رودخانه، افزایش و کاهش عمق بستر، رسوبگذاری و فرسایش کناری باعث تغییر در مورفولوژی رودخانه شده است. از این رو، با توجه به غلظت بالای بار رسوبی رودخانه هیرمند و نیز تغییرات صورت گرفته در

منابع مورد استفاده

1. Aghabeigi, S., A.R. Telvari, S.K. Mirnia, S. Feiznia and M. Vafakhah. 2013. Seasonal variations of suspended sediment concentration in rain and snow melting floods. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5: 144-154 (in Persian).
2. Alizadeh, A. 2008. Principles of applied hydrology. Imam Reza Press, Mashhad, 942 pages.
3. Barimani, F. and S. Asghari Lafmejani. 2010. Determining the severity of environmental instability in Sistan rural settlements using multiple criteria evaluation model. *Journal of Geography and Development*, 19: 127-144 (in Persian).
4. Ebrahimzadeh, A., G.R. Lashkaripour and A. Moridi. 2004. The impact of geological factors and the historical change in displacement settlements in Sistan. *Journal of Geography Development*, 4: 5-20 (in Persian).
5. Edwards, T.K and G.D. Glysson. 1999. Field methods for measurement of fluvial sediment. Uses Open-File Report, Book 3 Chapter 2, USA, 97 pages.
6. Esmaeili, N. and M. Mahdavi. 2002. The Study of effective discharge for suspended sediment transport in streams of the Zayandehrood Dam Basin. *Journal of Natural Resources*, 55: 295-305 (in Persian).
7. Ganavati, E.A., D. Talebpoor and S. Khezri. 2016. Assessment of the impacts of inter-basin water transfer on the bed river morphology in the origin basin, case study: Zab River Basin. *Journal of Hydro Geomorphology*, 6: 33-54.
8. Gyr, A. and K. Hoyer. 2006. Sediment transport. Springer, 281 pages.
9. Hadley, R.F., R. Lal, D.C.A. Onstad, D.E. Wallering and R. Yair. 1985. Recent development in erosion and sediment yield studies. UNESCO, Paris.
10. Hassanpour, F. 1999. Determining the critical points sedimentation and determine optimal interval dredging by mathematical models, case study: Sistan River. MSc Thesis, 146 pages (in Persian).
11. Jafarbeigloo, M., S. Bagheri, S. Negahban and T. Safarrad. 2011. Study of bed changes and geomorphologic characteristics of the Gilan River in the years 1344 to 1381. *Journal of Quantitative Ggeomorphology Studies*, 2: 87-102.
12. Jahantigh, M. 2013. Studying and recognition of characteristics of erosion rivers in Sistan region. Final Report of Research Project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 51 pages (in Persian).
13. Joann, M. 2016. The changing geomorphology of the Atchafalaya River, Louisiana. *Journal of Geomorphology*, 252: 112-127.
14. Joeckel, R.M. and G.M. Henebry. 2008. Channel and island change in the lower Platte River, eastern Nebraska. *Journal of Geomorphology*, 102: 407-418.
15. Mahdavi, M. 2002. Applied hydrology. University of Tehran Publication, 251 pages.
16. Maidment, D.R. 1992. Handbook of hydrology. McGraw-Hill Inc, 321 pages.
17. Mao, L. and N. Surian. 2010. Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river. *Journal of Geomorphology*, 114: 326-337.
18. Min, J.E., J.H. Ryu and S. Lee. 2012. Monitoring of suspended sediment variation using Landsat and MODIS in the Saemangeum coastal area of Korea, SeungHyun Son. *Marine Pollution Bulletin*, 64: 382-390.
19. Morid, S. 2004. Study of morphological changes and their trends in Karoon River applying RS technique.
20. Rangavar, A.S., G.A. Gezanchian, H. Angoshtari and R. Ghafourian. 2009. Study of flood water spreading on soil physical and chemical properties in Jajarm project, North Khorasan Province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 4: 259-265 (in Persian).

21. Rendon-Herro, O. 1974. Estimation of wash load produced on certain small watershed. Journal of Hydraulics Division. HY7(100): 848-853.
22. Sadeghi, S.H.R., S. Aghabeigi Amin, M. Vafakhah, B. Yasrebi and A. Esmaili Sari. 2006. Suitable drying time for suspended sediment samples, Iran. International Sediment Initiative Conference, 71 pages (in Persian).
23. Safavi, H. 2004. A water quality management model for the Zayandehrood River in Iran. International Conference on Managing Rivers in the 21 Century, Issues and Challenges, 296-301 (in Persian).
24. Schumm, S.A. and H.R. Khan. 1972. Experimental study of channel patterns. Bulletin of the Geological Society of America, 83: 1755-1770.
25. Shafai-Bajestan, M. 2002. Hydraulic deposition. Chamran University, 584 pages (in Persian).
26. Shayan, N. and H. Dehestani. 2013. Calculations of geometric parameters and investigations of its geomorphological changes pattern in Kashkan River. Journal of Environmental Erosion Researches, 8: 21-34 (in Persian).
27. Tehran Sahab Consulting Engineers .1991. Sistan flood control sediment studies in the Sistan River comprehensive plan. Special Report on hydrology, Ministry of Power, Sistan and Baluchestan Regional Water Joint Stock (in Persian).
28. Thorne, C.R. 2002. Geomorphic analysis of large alluvial rivers. Journal of Geomorphology, 44: 203-219.
29. Velasco, D., A. Bateman, J.M. Redondo and V. Demedina. 2003. An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings. Flow Turbulence and Combustion, 70(1-4): 69-88.
30. Wang, S., Y. Yan and Y. Li. 2012. Spatial and temporal variations of suspended sediment deposition in the alluvial reach of the upper Yellow River from 1952 to 2007. Catena, 92: 30-37.
31. Yamani, M. and S. Sharafi. 2012. Geomorphology and effective factors on lateral erosion in Hor Rood River, Lorestan Province. Journal of Geography and Environmental Planning, 45: 15-32 (in Persian).