

تحلیل هیدرولیک و انتقال رسوب رودخانه کن با استفاده از مدل HEC-RAS

نازنین حق پرست^{۱*}، خدیجه صبری رزم^۲، مسعود تجربی^۳

۱ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، Haghparast.nazain@gmail.com

۲ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، Sevda.sabrirazm@gmail.com

۳ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، Tajrish@sharif.edu

چکیده

نزدیکی رودخانه کن به شهر تهران و مورد توجه قرار گرفتن آن به عنوان منطقه تفرجگاهی در سال‌های اخیر، منجر به افزایش ساخت و ساز پیرامون رودخانه شده است. از این رو انجام مطالعات هیدرولیک و انتقال رسوب رودخانه به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی و انتقال رسوب آن و شناسایی پاسخ رودخانه به منظور ساماندهی آن امری ضروری می‌باشد. مدل‌های ریاضی می‌توانند ابزارهای مفیدی جهت شبیه‌سازی جریان آب و رسوب در رودخانه‌ها باشند. مدل HEC-RAS یکی از پرکاربردترین این مدل‌ها می‌باشد که برای محاسبات هیدرولیکی جریان یک بعدی و انتقال رسوب رودخانه‌ها و کانال‌ها طراحی شده است. هدف از این مقاله تلفیق الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط ArcGIS با مدل هیدرولیکی HEC-RAS به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی؛ رژیم غالب جریان، پدیده‌های هیدرولیکی و پارامترهای هیدرولیکی جریان رودخانه کن در دبی‌های با دوره بازگشت ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله و همچنین نحوه انتقال رسوب؛ رسوب گذاری و فرسایش در طول رودخانه می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را جهت مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان و انتقال رسوب در منطقه مطالعاتی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه کن، شبیه سازی هیدرولیکی، شبیه سازی انتقال رسوب، HEC-RAS، HEC-GeoRAS

۱- مقدمه

تجاوزات صورت گرفته توسط انسان در محدوده حریم و بستر رودخانه های کشور به اشکال مختلف رخ داده که شدت و ضعف آن در رودخانه های مختلف، متفاوت است. رودخانه های درون شهری به عنوان پرتوجه ترین اماکن تفرجگاهی اطراف شهر به شمار می آیند. رودخانه کن نیز به علت قرارگیری در محدوده شهر تهران، در سال های اخیر مورد توجه توسعه های عمرانی قرار گرفته است که در صورت عدم شناخت صحیح از رفتار هیدرولیکی رودخانه، بعضاً منجر به وارد آمدن خسارات جبران ناپذیری می گردد. بنابراین لازم است با مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان و حریم بستر رودخانه، محدوده امن برای فعالیت های انسان در اطراف آن تعریف گردد [۱].

با استفاده از اطلاعات ورودی جریان، هندسه رودخانه، پارامترهای زبری بستر در مقاطع عرضی بالادست؛ سطح آب و سرعت جریان به عنوان نتایج اصلی آنالیز هیدرولیکی پایدار قابل حصول است [۲]. به منظور کنترل پارامترهای اساسی و بررسی نقش هر متغیر در تعیین سطح نهایی آب، توسعه مدل هیدرولیکی HEC-RAS کمک کننده می باشد [۳]. مدل هیدرولیکی مورد استفاده در این مقاله مدل HEC-RAS می باشد، که از مدل های معتبر برای محاسبات هیدرولیک آبراهه

های طبیعی است. این مدل با شبیه سازی یک بعدی رودخانه، امکان محاسبات جریان های پایدار و ناپایدار را مهیا می سازد [۴، ۵، ۶].

به منظور فراهم آوردن اطلاعات هندسی مورد نیاز مدل HEC-RAS، از طریق الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط ArcMap از مجموعه نرم افزارهای ArcGIS استفاده گردید و از طریق تحلیل جریان رودخانه، تراز سطح آب و تراز سطح بحرانی آب در طول مسیر رودخانه، رژیم غالب جریان، پدیده های هیدرولیکی و همچنین پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند تراز خط انرژی، سرعت، عمق هیدرولیکی، تنش برشی، شیب خط انرژی و ... در هر مقطع عرضی حاصل آمد. بار و همکاران در سال ۲۰۰۲ در تحقیقی تحت عنوان کاربرد ابزارهای ArcGIS در مدلسازی هیدرولیکی، یکی از مهمترین مزایای استفاده از مدل HEC-RAS و الحاقیه HEC-GeoRAS را دقت و صرفه جویی در هزینه های مربوط به مهندسی رودخانه و اعمال بهترین روش مدیریتی در منطقه عنوان نمودند [۷]. آذوق و همکاران در سال ۲۰۱۸ مدل آنالیز رودخانه را به منظور ارائه نقشه های سیلابی و نواحی خطر رودخانه مارتیل در برنامه HEC-RAS تهیه کردند. در این مطالعه از تلفیق ابزارهای HEC-GeoRAS و HEC-RAS در سیستم ArcGIS استفاده گردیده است. از این رو بوسیله مدلسازی انجام گرفته سطح آب، اعماق و سرعت جریان برای مشخصات جریان متفاوت و نواحی مقطعی مختلف در طول رودخانه بدست آمده است [۸]. تحقیق مشابهی توسط سلیمانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ در خصوص تاثیر نقاط بار رودخانه بر هیدرولیک سیلاب با استفاده از تلفیق ابزارهای HEC-GeoRAS و HEC-RAS که در سیستم ArcGIS انجام دادند [۹].

در مطالعه ای که در کره جنوبی توسط Jung و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام گرفت، از مدل HEC-RAS برای تحلیل هیدرولیکی جریان و رسوب استفاده و در نهایت HEC-RAS به عنوان مدلی توانا در شبیه سازی جریان و رسوب رودخانه ها شناسایی شد [۱۰]. دیسارز در سال ۲۰۱۸ نتایج مدلسازی جریان و انتقال رسوب رودخانه توسط ابزار HEC-RAS را بوسیله روش های محاسباتی تعریف شده به زبان برنامه نویسی Python کنترل نمود و به این نتیجه رسید که نتایج از همگرایی خوبی برخوردار است [۱۱].

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

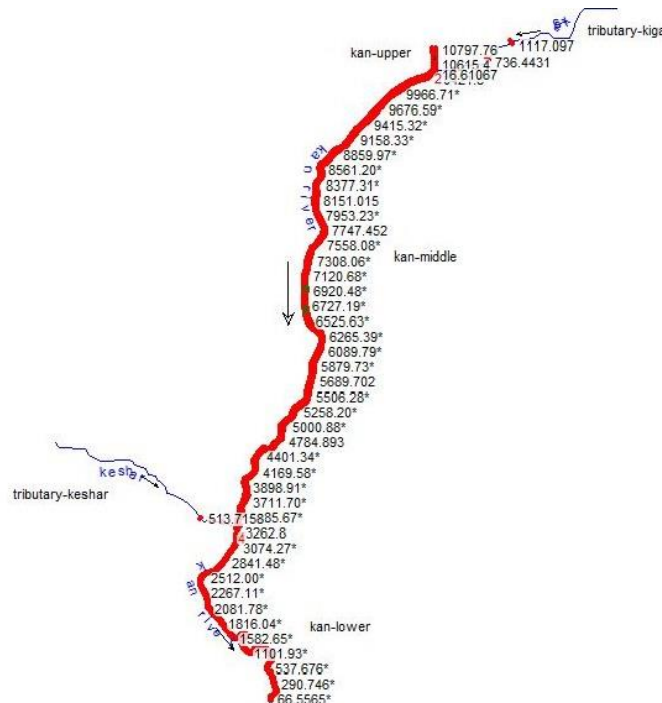
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از رودخانه کن، از رودخانه های عبوری از درون شهر تهران میباشد. این رودخانه به طول ۳۳ کیلومتر از رشته کوه توچال سرچشمه گرفته، از تهران گذشته و در جنوب تهران خشک میشود. این رودخانه با بده متوسط ۲۷۰۰ لیتر بر ثانیه، پرآب ترین رود تهران و سالانه به میزان پنج میلیون متر مکعب از آب این رودخانه برای دریاچه چیتگر منطقه ۲۲ اختصاص مییابد. حوضه آبریز رودخانه کن از حوضه های شمالی شهر تهران میباشد و از شمال و غرب به حوضه کرج و از شرق و جنوب به دشت تهران میرسد. ارتفاع متوسط این حوضه ۲۳۷۷ متر از سطح دریای آزاد است [۱۲].

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش رودخانه کن از ابتدای ایستگاه هیدرومتری رندان تا ایستگاه سولقان به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر و شیب متوسط ۴/۱٪ از شمال به جنوب میباشد. آزمایش های مکانیک خاک مصالح تشکیل دهنده رودخانه را درشت دانه و هموژن نشان میدهد [۱۳]. شکل ۱ رودخانه اصلی و زیرشاخه های آن و موقعیت ایستگاه های هیدرومتری منطقه مطالعاتی را نشان میدهد.

رودخانه مشخص شده باشد. در مدل HEC-RAS می توان از مدت زمان جریان و یا افزایش محاسبات به عنوان گام زمانی محاسباتی استفاده کرد. جریان در طول گام مدت زمان جریان ثابت است ولی تغییرات بستر در هر گام زمانی افزایش محاسبات محاسبه میشود. برای محاسبه پتانسیل حمل رسوب هفت معادله انتقال در مدل HEC-RAS به نام های ایکرز-وات، میر-پیتر و مولر ، تابع انگلند- هانسن ، توفالتی ، لارسن-کوپلند ، یانگ و ویلکاکوچود دارد. همچنین چهار روش مختلف توفالتی، ون راین، روبی و روش گزارش "۱۲" برای محاسبه سرعت سقوط ذرات وجود دارد [۱۴].

۳-۲- هندسه رودخانه

اطلاعات هندسی از مهمترین اجزای مدلسازی هیدرولیکی و انتقال رسوب رودخانه در برنامه HEC-RAS میباشد. به این منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی شکل رودخانه اصلی از ایستگاه رندان تا سولقان و زیرشاخه های آن شامل کیگا و کشار، مقاطع عرضی عمود بر امتداد رودخانه و مشخصات هیدرولیکی پلهای موجود در رودخانه به مدل شناسایی گردید. به این منظور از الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی ArcGIS که با محیط نرم افزار HEC-RAS انطباق کامل دارد استفاده شده است. به کمک الحاقیه HEC-GeoRAS با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه، در ابتدا مسیر اصلی رودخانه و زیرشاخه های آن و سپس خطوط سواحل و جریان آب ترسیم گردید و در نهایت به تعداد ۴۵۰ مقطع عرضی عمود بر امتداد رودخانه در فواصل حداکثری ۵۰ متری از مقاطع مجاور و در نزدیکی محل پلهای موجود در مسیر رودخانه ترسیم شد. سپس با استفاده از یک فرآیند تبدیلی، مشخصات هندسی مربوط به رودخانه، به مدل HEC-RAS معرفی و جزئیات مربوط به پلها (شامل تعریف عرشه و پایه ها) در مدل تعریف گردید. مطابق شکل ۲، رودخانه در بازه مطالعاتی به سه بخش middle upper و lower تقسیم شد. بخش upper از بالادست رودخانه تا محل تقاطع با شاخه فرعی کیگا، بخش middle از محل تقاطع با شاخه فرعی کیگا تا محل تقاطع با شاخه فرعی کشار و بخش lower از محل تقاطع با شاخه فرعی کشار تا پایین دست رودخانه تعریف شده است. شکل ۲ پلان رودخانه مدلسازی شده در HEC-RAS را نشان میدهد.



شکل ۲ پلان رودخانه کن در مدل HEC-RAS

۳-۲- مدلسازی جریان و رسوب

پس از وارد نمودن اطلاعات هندسی به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه، محاسبه نیمرخ سطح آب، تعیین رژیم غالب جریان و پدیده های هیدرولیکی رودخانه بر اساس مدل سازی جریان به صورت ماندگار انجام گرفت. بنابراین دبی های مربوط به سیلاب با دوره بازگشت ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله در نقاط تغییر دبی به مدل اعمال گردید و با توجه به عدم اطلاع از وضعیت جریان رودخانه و عدم وجود اطلاعات کافی، شرط مرزی عمق نرمال به عنوان شرط مرزی مناسب در نظر گرفته شد. در نهایت مدل در حالت جریان ماندگار و به صورت رژیم مختلط (فوق بحرانی و تحت بحرانی) به شبیه سازی جریان پرداخت. با وارد کردن اطلاعات رسوب رودخانه در مکان های تغییر دبی رسوبی، تعریف شرایط مرزی و سایر پارامترهای موثر مانند اطلاعات جریان شبه ماندگار و ... و تعریف تابع انتقال، انتقال رسوب رودخانه مدلسازی شد.

۲-۴- اطلاعات ورودی مدل

شبیه سازی جریان رودخانه

برای شبیه سازی جریان رودخانه کن توسط HEC-RAS، اطلاعات زیر به عنوان ورودی های مدل جهت شناساندن رودخانه به نرم افزار استفاده شده است:

نقشه توپوگرافی: نقشه توپوگرافی منطقه مطالعاتی از موسسه تحقیقات منابع آب ایران اخذ گشته و تلفیقی از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰ در امتداد رودخانه که با نقشه برداری حاصل شده و نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در نواحی اطراف که از سازمان نقشه برداری کشور تهیه شده است می باشد [۱۵].

ضریب زبری: از عوامل مهم در بیان مشخصات هندسی منطقه، تعیین ضریب زبری بستر است. روش های تجربی بهترین روش برای تعیین مقدار آن بستگی به شرایط منطقه و جریان دارد. در این پژوهش به علت شباهت بستر در سرتاسر بازه مورد مطالعه، بر اساس جداول ارائه شده توسط Chow، ضریب زبری برای کانال اصلی ۰/۳۵ و برای سواحل رودخانه ۰/۴۵ در نظر گرفته شد [۱۶].

مشخصات پل ها: در بازه lower از رودخانه دو پل به نام های سولقان ۱ و ۲ با مشخصات جدول ۱ وجود دارد [۱۵].

جدول ۱ مشخصات هندسی پل های موجود در منطقه مطالعاتی

نام پل	موقعیت جغرافیایی (UTM)		طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	ضخامت عرشه (m)
	X (m)	Y (m)				
سولقان ۱	۵۲۴۰۰۹	۳۹۶۵۰۲۴	۸	۴	۸	۰/۴
سولقان ۲	۵۲۴۰۵۲	۳۹۶۴۸۱۴	۷	۴	۴	۰/۴

دبی سیلابی: به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه، محاسبه نیمرخ سطح آب، تعیین رژیم غالب جریان و پدیده های هیدرولیکی رودخانه بر اساس مدل سازی جریان به صورت ماندگار انجام گرفت. به این منظور طبق جدول ۲ از سه دبی سیلابی با دوره بازگشت های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله در نقاط تغییر دبی در ایستگاه های هیدرومتری منطقه استفاده گردید و در نقاط تغییر دبی به مدل اعمال شد [۱۵].

جدول ۲ سیلاب ایستگاه های هیدرومتری بر حسب مترمکعب بر ثانیه

ایستگاه های هیدرومتری	دوره بازگشت (سال)		
	۱۰	۲۵	۵۰
رندان	۳۳	۴۴	۵۳
کیگا	۱۴	۱۹	۲۲
کشار	۱۸	۲۵	۳۰

شرایط مرزی: در تحلیل جریان، رژیم آن مختلط فرض شد. لذا همانطور که اشاره شد شرایط مرزی در بالادست و پایین دست بازه مطالعاتی به صورت عمق نرمال وارد و برای بدست آوردن شیب اصطکاکی شرط مرزی عق نرمال، از روش سعی و خطا استفاده شد. در ابتدا شیب کف کانال به عنوان شیب اصطکاکی شرط مرزی عمق نرمال لحاظ گردید. اما پس از اجرای برنامه، شیب خط انرژی ارائه شده در جدول نتایج مدل به عنوان شرط مرزی در تلاش بعدی در نظر گرفته شد. در نهایت شیب اصطکاکی شرط مرزی عق نرمال مطابق جدول ۳ به مدل وارد شد.

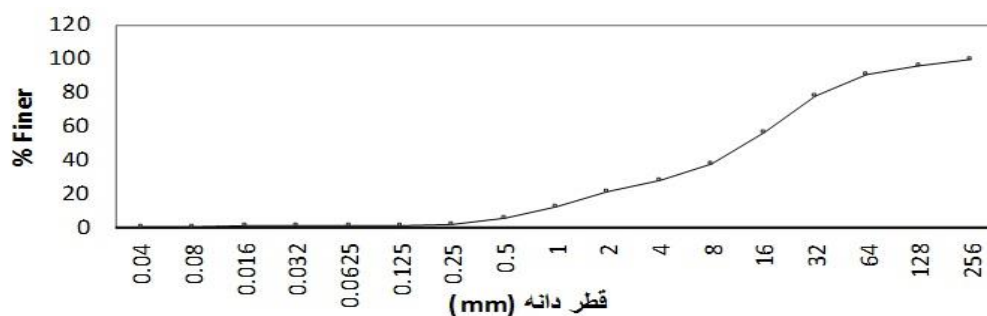
جدول ۳ شیب اصطکاکی بکار رفته در شرط مرزی عمق نرمال

شیب اصطکاکی	محل اعمال شرط مرزی
۰/۰۴۱۸	رندان
۰/۱۵۳۹	کیگا
۰/۰۴۷۳	کشار
۰/۰۳۴۶	سولقان

شبیه‌سازی انتقال رسوب رودخانه

برای شبیه‌سازی انتقال رسوب رودخانه کن توسط HEC-RAS، علاوه بر نقشه توپوگرافی و مشخصات پل‌ها که پیشتر ذکر شده است اطلاعات زیر به عنوان ورودی‌های مدل استفاده شده است:

دانه بندی مصالح بستر رودخانه: با نمونه‌گیری از بستر رودخانه و انجام آزمایش‌های الک و هیدرومتری، دانه بندی بستر رودخانه در سرتاسر بازه مطالعاتی مطابق با شکل ۳ به مدل اضافه گردید.



شکل ۳ دانه بندی مصالح بستر رودخانه

اطلاعات رسوب: برآورد رسوب ماهانه با استفاده از اطلاعات مشاهداتی رسوب روزانه ایستگاه‌های آبسنجی اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان تهران در طول سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱، به دلیل کمبود اطلاعات مشاهده‌ای روش مناسبی نمی‌باشد. به این منظور به کمک نرم افزار Loadset و با استفاده از اطلاعات دبی و رسوب روزانه موجود و روش‌های آماری در دسترس، مقادیر رسوب روزانه در طول دوره مطالعاتی حاصل آمد. اما به دلیل شیب زیاد حوضه آبریز کن و ضعف نرم افزار Loadset در تخمین بار رسوب در حوضه‌های با شیب زیاد، نتایج حاصل در برخی موارد درست نبود. لذا با قضاوت مهندسی و مقایسه بار رسوب متناظر با همان زمان در سایر زیرحوضه‌ها، موارد ناصحیح شناسایی و حذف گردید. در نهایت، رسوب روزانه و در نتیجه ماهانه به کمک نتایج حاصل از این نرم افزار بدست آمد. از این رو شرایط مرزی خارجی در ابتدای بازه (ایستگاه آبسنجی رندان) و مکان‌های تغییر دبی رسوبی (محل‌های اتصال شاخه‌های فرعی کیگا و کشار) بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های آبسنجی به صورت سری دبی رسوبی در سال‌های مطالعاتی به صورت ماهانه به مدل اعمال گردید.

حداکثر عمق فرسایش: با توجه به شناخت از منطقه و مطالعه سوابق فرسایش رودخانه کن در سال‌های اخیر و کارهای قبلی انجام گرفته در این زمینه، حداکثر عمق فرسایش در مدل معادل ۵ متر در نظر گرفته شد.

اطلاعات جریان شبه غیر ماندگار: مدلسازی رسوب در برنامه HEC-RAS بر مبنای جریان شبه غیرماندگار میباشد. که در این نوع جریان، مقادیر جریان در هر بازه زمانی به صورت جریان ماندگار فرض میشود. اطلاعات مورد نیاز جهت مدلسازی جریان شبه غیرماندگار شامل شرایط مرزی داخلی و خارجی و دما می باشد. در این پژوهش شرط مرزی خارجی در ابتدای بازه و نقاط تغییر دبی، سری جریان (که از سازمان آب منطقه ای تهیه شده است) به صورت ماهانه در سال های مطالعاتی و در انتهای بازه، عمق نرمال فرض گردید. همچنین متوسط دمای ماهانه منطقه نیز در سال های مطالعاتی به مدل اعمال گردید.

مدل انتقال رسوب: مهمترین مسئله در مدلسازی رسوب در برنامه HEC-RAS، تعیین تابع انتقال رسوب مناسب است. از این رو با توجه به ویژگی های رودخانه کن در بازه مطالعاتی، اعم از دانه بندی بستر (عموماً ماسه ای)، رژیم غالب جریان (فوق بحرانی)، شیب سطح آب و ... و همچنین نتایج مدلسازی جریان، پارامترهای بی بعدی نظیر عدد فرود، توان جریان، سرعت برشی بی بعد، عمق نسبی و تراکم رسوب برای رودخانه کن حاصل آمد. به کمک دستورالعمل احیای مدیریت آب در امریکا و ویژگی های جریان و پارامترهای بی بعد یاد شده، می توان رودخانه زرد در چین را شبیه ترین رودخانه از نظر وضعیت هیدرولیکی و رسوب به رودخانه کن دانست. بر اساس این دستورالعمل به علت ساده سازی های انجام شده در در نظر گیری دانه بندی یکنواخت بستر در تمام بازه مطالعاتی و همچنین یکنواخت نبودن پارامترهای جریان در کل بازه مطالعاتی، روش یانگ به عنوان تابع انتقال رسوب در مدل استفاده گردید [۱۷].

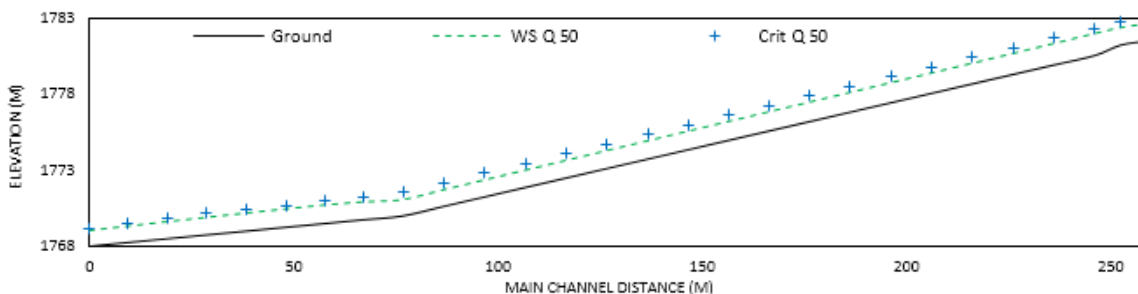
معادله سقوط ذرات: در این پژوهش محاسبه سرعت سقوط ذرات به روش فن راین انجام گرفت. در مطالعات مشابه با فرض تابع یانگ به عنوان تابع انتقال رسوب، از روش فن راین برای محاسبه سرعت سقوط استفاده گردیده است.

ضخامت لایه فعال: محاسبه ضخامت لایه فعال و همچنین تغییرات عمقی لایه های بستر رودخانه، به روش Exer 5 که این مقدار را برابر بستر d_{90} در نظر می گیرد، انجام میشود. که این فرض برای بسترهای ماسه ای همانند بستر رودخانه کن مناسب است.

۳- نتیجه گیری

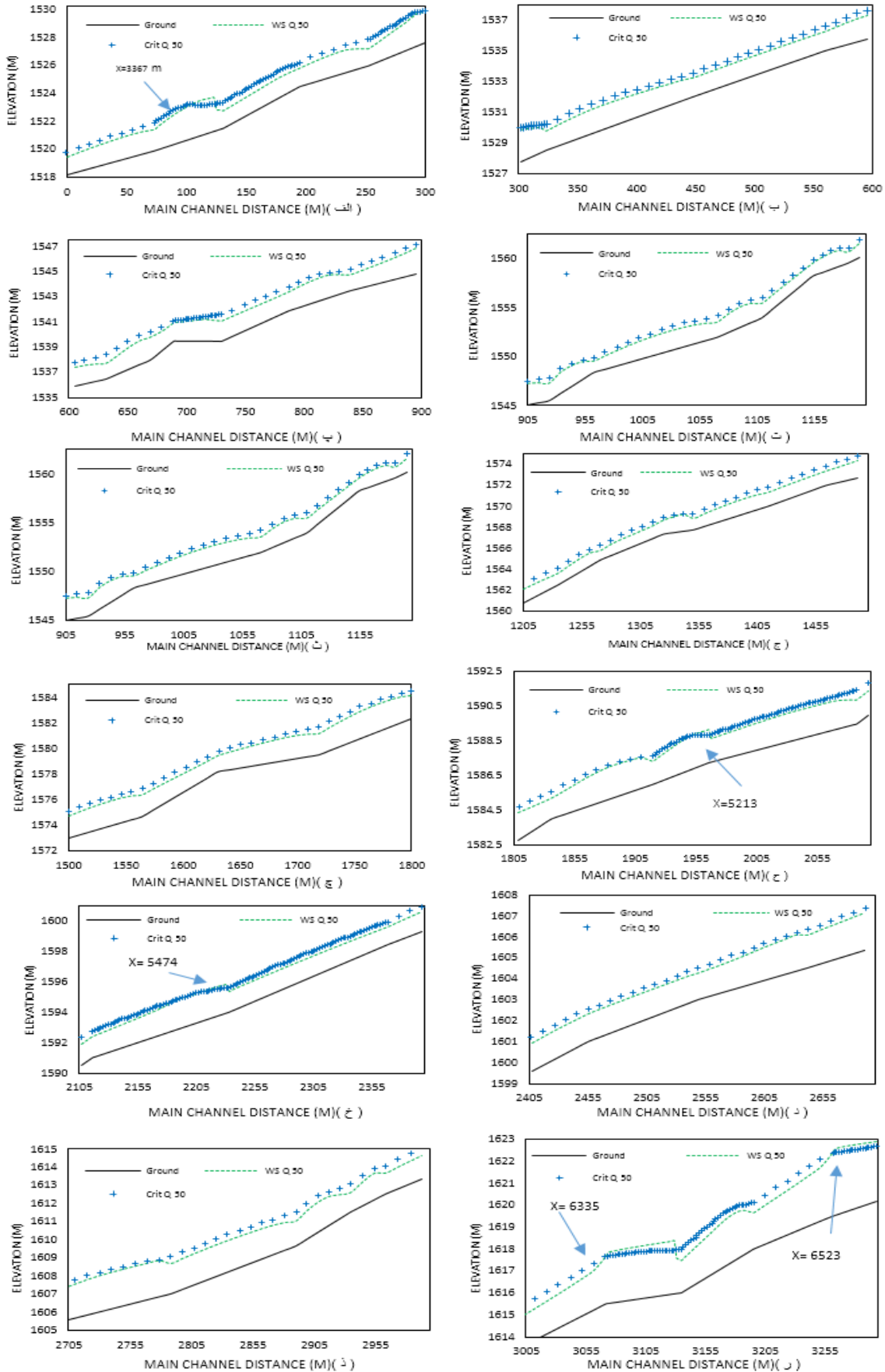
- رفتار هیدرولیکی رودخانه کن در دبی های با دوره بازگشت های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله شبیه سازی و ارتفاع آب در رودخانه در هریک از دبی ها تعیین و با ترسیم پروفیل طولی رودخانه در هریک از بازه ها به بررسی تراز سطح آب و تراز سطح بحرانی مربوط به هر دبی پرداخته شد و در انتها رفتار هیدرولیکی رودخانه در طول مسیر آن تحلیل گردید. در شکل های ۴، ۵ و ۶ تراز سطح آب و تراز بحرانی مربوط به دبی با دوره بازگشت ۵۰ ساله نمایش داده شده است.

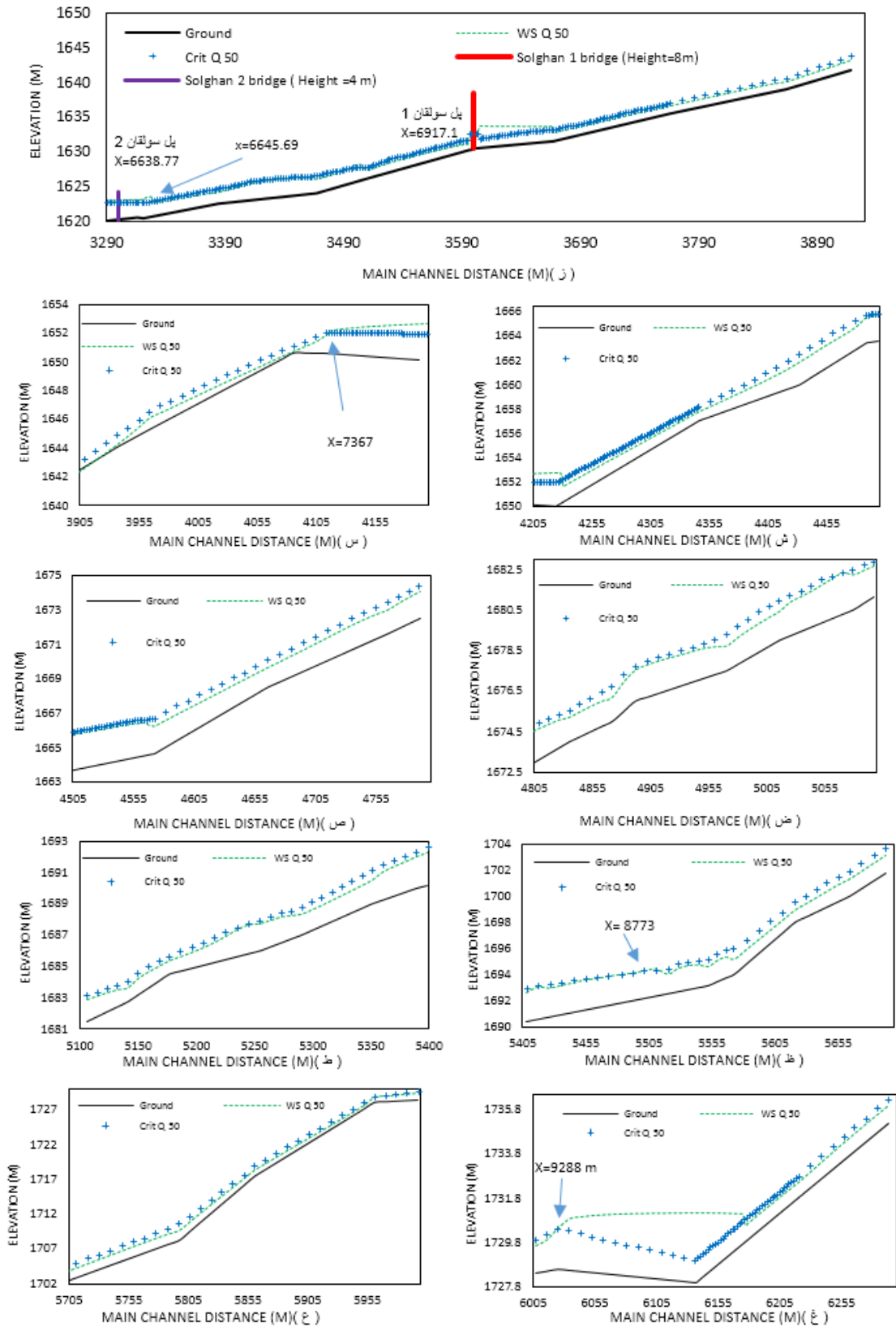
upper پروفیل طولی این بخش از رودخانه در شکل ۴ نشان داده شد.

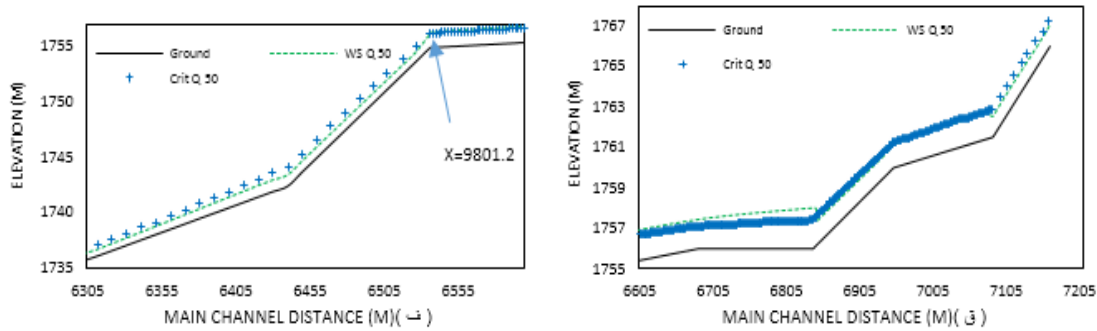


شکل ۴ پروفیل طولی رودخانه کن در بازه upper

middle با توجه به طولانی بودن رودخانه در این بازه و عدم وضوح رفتار هیدرولیکی کل این بخش در یک شکل، برای نمایش هرچه بهتر آن، رودخانه به چند قسمت تقسیم و نتایج آن از ابتدای این بازه در شکل ۵ نشان داده شد.

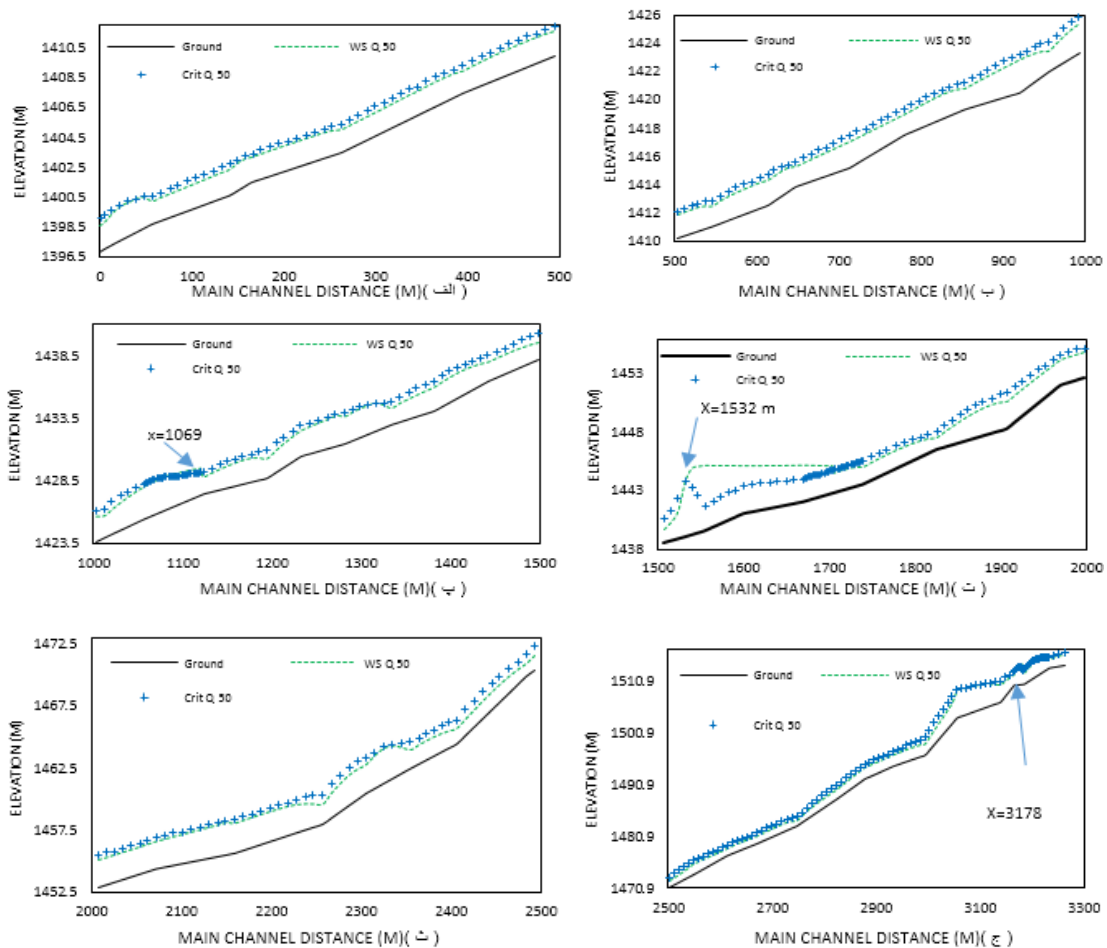






شکل ۵ الف) تا ق) پروفیل طولی رودخانه کن در بازه middle

lower پروفیل طولی این بخش از رودخانه نیز همانند بازه middle در چند بخش از ابتدای بازه در شکل ۶ نمایش داده شد.

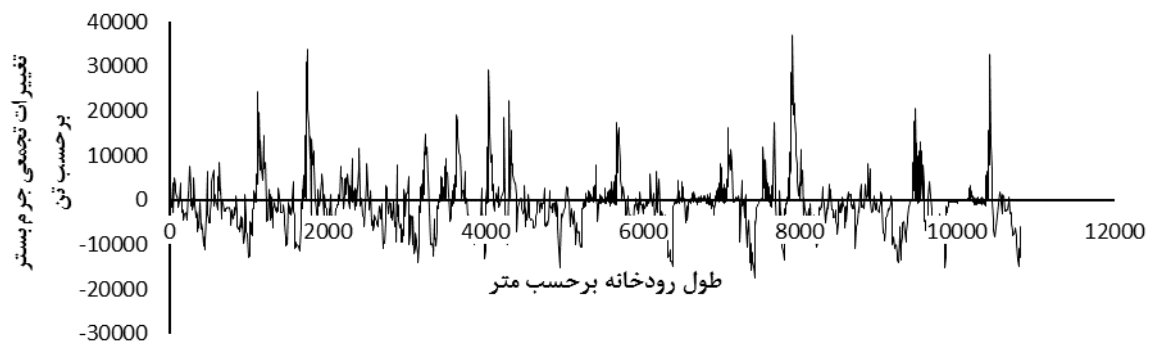


شکل ۶ الف) تا ج) پروفیل طولی رودخانه کن در بازه lower

- با توجه به شکل ۴، با مقایسه تراز سطح آب و تراز سطح بحرانی و همچنین مقدار عدد فرود بزرگتر از ۱ در بخش upper، می‌توان دریافت که جریان در کل این بازه فوق‌بحرانی بوده و پدیده هیدرولیکی خاصی در این ناحیه رخ نمی‌دهد. متوسط سرعت جریان در این بخش در حدود ۴/۲ متر بر ثانیه است.
- رودخانه در بازه middle دارای رژیم جریان مختلط بوده و شاهد پدیده‌های هیدرولیکی در این بخش هستیم. با قیاس تراز سطح آب و تراز سطح بحرانی و همچنین تغییرات مقدار عدد فرود، نقاط پرش هیدرولیکی (نقاطی که رژیم جریان

قبل از آن فوق بحرانی بوده، سپس بحرانی شده و بعد از آن تحت بحرانی است) شناسایی گردید و فاصله این نقاط از پایین- دست بازه مطالعاتی (ایستگاه هیدرومتری سولقان) در شکل ۵ (الف، ح، خ، ر، ز، س، ظ، غ، ف) نشان داده شد. وقوع پدیده پرش هیدرولیکی منجر به ایجاد فرسایش در منطقه شکل گیری پرش می شود.

- مطابق شکل ۵ (ز) در محل قرارگیری پل سولقان ۱ در بازه middle با بررسی مقدار عدد فرود در هر قسمت، رژیم جریان در بالادست پل تحت بحرانی با سرعت ۱/۴۸ متر بر ثانیه، در مکان قرارگیری پل بحرانی با سرعت ۴/۰۵ متر بر ثانیه و در پایین دست آن فوق بحرانی با سرعت ۴/۳۶ متر بر ثانیه می باشد. اساسا بالا رفتن سطح آب در بالادست پل به علت افت بار انرژی به هنگام عبور جریان از میان دهانه پل رخ می دهد. بنابراین سرعت جریان قبل از پل کم و بعد از آن زیاد می باشد که علت این امر تنگ شدگی مقطع رودخانه در مکان قرارگیری پل است. لذا در بالادست پل انتظار رسوب گذاری و در پایین دست آن انتظار شسته شدن بستر و فرسایش را خواهیم داشت.
- مطابق شکل ۵ (ز) جریان در پایین دست پل سولقان ۱ با رژیم فوق بحرانی و سرعت متوسط ۵/۲۵ متر بر ثانیه ادامه یافته و در نزدیکی پل سولقان ۲ در قسمت بالادست پل، پرش هیدرولیکی رخ می دهد و رژیم جریان تحت بحرانی و سرعت آن ۲/۸۸ متر بر ثانیه می شود که در ناحیه شکل گیری پرش قبل از پل سولقان ۲ انتظار ایجاد فرسایش بستر رودخانه می رود. همچنین در محل قرارگیری پل و پایین دست آن جریان با رژیم تحت بحرانی و سرعت تقریبی ۳/۵ متر بر ثانیه ادامه می یابد. سطح آب در بالادست پل بیشتر بوده و در پایین دست آن کاهش می یابد اما همچنان جریان با عدد فرود کمتر از ۱ و با رژیم تحت بحرانی می باشد. بنابراین به علت کم بودن سرعت جریان در اطراف پل، انتظار رسوب گذاری بستر در این ناحیه از جریان وجود دارد. رسوب گذاری در ناحیه بالادست بیشتر رخ می دهد.
- رودخانه در بازه lower نیز همانند بازه middle دارای رژیم جریان مختلط می باشد. با این تفاوت که تغییر رژیم جریان در این ناحیه کمتر بوده و رژیم غالب جریان فوق بحرانی با مقدار عدد فرود کمی بزرگتر از ۱ است که بیانگر کاهش شیب عمومی رودخانه در این بازه نسبت به بازه های قبل می باشد. از این رو پدیده های هیدرولیکی کمتری نیز در آن رخ می دهد. در این بخش نیز با قیاس تراز سطح آب و تراز سطح بحرانی و همچنین تغییرات عدد فرود، نقاط پرش هیدرولیکی شناسایی و فاصله این نقاط از پایین دست بازه مطالعاتی (ایستگاه هیدرومتری سولقان) در شکل ۶ (پ، ت، ج) نشان داده شد. همانطور که اشاره گردید وقوع پدیده پرش هیدرولیکی منجر به ایجاد فرسایش در منطقه شکل گیری آن می شود.
- بر اساس نتایج حاصل از تحلیل انتقال رسوب رودخانه مقدار مجموع تغییرات ایجاد شده در بستر رودخانه در دوره زمانی مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷ مقدار تغییرات تجمعی جرم بستر در طول رودخانه

- در نتیجه مدلسازی انتقال رسوب، متوسط سالانه کف کنی رودخانه کن در هر بازه در طول سال های مطالعه مطابق جدول ۴ حاصل آمده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود، عمده کف کنی رودخانه در بخش lower

ایجاد می شود. علت این امر را می توان پیوستن شاخه فرعی نسبتاً پرآب کشار به رودخانه و در نتیجه کاهش غلظت رسوب و افزایش توان کف کنی رودخانه در این بخش نسبت داد. نتایج مدل سازی حاکی از آن است که متوسط سالانه کف کنی رودخانه کن ۷۷۰۷۰ تن می باشد. به منظور تحلیل نتایج مدلسازی رسوب و بررسی صحت نتایج آن، از مفهوم حد آستانه حرکت ذرات استفاده گردید [۱۸] با استفاده از نمودار شیلدز [۱۹] و در نظرگیری محل تلاقی مقادیر پارامتر شیلدز بحرانی و عدد رینولدز بحرانی که بالای منحنی شیلدز قرار دارند، ذرات بستر در حرکت می باشند و انتظار کف کنی در طول رودخانه وجود دارد که با نتایج شبیه سازی انجام گرفته مطابقت دارد.

جدول ۴ متوسط سالانه کف کنی رودخانه کن در هر بازه در طول سال های مطالعه

مقدار سالانه فرسایش بستر (تن)	بازه رودخانه
۱۷۲۴۷	Upper
۱۱۹۵۴	Tributary-kiga
۱۰۸۶۵	Middle
۸۴۹۲	Tributary-keshar
۲۸۵۱۱	Lower
۷۷۰۷۰	مجموع

۴- مراجع

- [1] Plate, E.J. 202. Flod risk and flod management. Journal of Hydrology, 297: 2- 1.
- [2] Ellen E.Wohl. Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient. Journal of Hydraulic Engineering vol.124 no.2, 1998.
- [3] Faroog Ahmad H, Alam A, Bhat M, Ahmad Sh. One Dimensional Steady Flow Analysis Using HEC-RAS – A case of River Jhelum, Jammu and Kashmir. European Scientific Journal vol.12, No.32, 2016
- [4] Prafulkumar, V.T., L.P. Prem and D.P. Prakash. 201. Calibration of HEC-RAS model on prediction of flood for Lower Tapi River, India. Journal of Water Resource and Protection, 3: 805-81.
- [5] USACE. Users manual, geospatial hydrologic modeling extension, HEC- GeoRAS, Version 4, U.S. Army Crop of Engineers Hydrologic Engineering Center, California, USA, www.hec.usace.army.mil. 246 p. 2008.
- [6] U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 208. HEC-RAS River Analysis System Users Manual, Version 4.0. California, USA. www.hec.usace.army.mil. 747 p.
- [7] Bar, T. Application of tools for hydraulics upper Gotvand hydroelectric power project feasibility study. Reservoir operation flood.14 p. 2002.
- [8] Azouagh A, El Bardai R, Hilal I, Stitou el Messari J. Integration of GIS and HEC-RAS in Floods Modeling of Martial River (Northern Morocco). European Scientific Journal, Vol.14, No.12, 2018.
- [9] Solaimani, K., Gholami, ., Kavian, . et al. The influence of river point bars on flood hydraulic using geometric model. Model. Earth Syst. Environ. 2021.
- [10] Wang, Zhengbing. and Wang, Zhaoyin. and J. de Vriend,H. Impact of water diversion on the morphological development of the Lower Yellow River. International Journal of Sediment Research 23 (2008) 13-27
- [11] Dysarz T. Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations. Water 10(10):1382, 2018

[۱۲] کاوه، آ. فرمز چشمه، ب. حسینی، س.ع. بررسی تغییرات زمانی و روند دبیهای حداقل در آبخیزهای منتخب دامنه جنوبی البرز. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۲، ۱۳۹۹

[۱۳] بزرگی، ع. پورجعفر، م. بمانیان، م. روند برنامه ریزی در جهت احیای رود دره های شهر تهران، مورد مطالعه رود دره کن. اولین همایش منطقه ای توسعه منابع آب، ۱۳۸۳.

[۱۴] بهرنگی، ف. بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد لتیان، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸

[۱۵] افتخاری، م. گزارشات طرح جامع سیلاب، گزارش تخصصی هیدرولیک، موسسه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۰.

[16] Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Applied hydrology, Mc Graw-Hill, 1988

[17] Erosion and Sedimentation Manual. Bureau of Reclamation, Interior, U.S.D.O.T. 2012.

[18] Xu, G. Discrete Laplace–Beltrami operators and their convergence J. Computer-Aided Geometric Design, 21(8), 767-784, 2004.

[19] Govender, M. and C. Everson. Modeling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model"J. Hydrological Processes, 19(3), 683-692, 2005.