

Investigation of flood effect on bank erosion of side wall between Tehran Kan river and ferbet hole.

Negin Allahverdy Yamooty¹, Seyed Ali Ayyoubzadeh^{2*}, Seyed Oveise Torabi³

1-Department of Hydraulic Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Ph.D. student

2- Department of Hydraulic Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, professor

3-Mahsab Shargh Consulting Engineering, Tehran, Iran, Ph.D.

Corresponding Author's E-mail: ayyoub@modares.ac.ir

Received: 04 Feb. 2022
Accepted: 07 May. 2022



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Introduction

Rivers have always played a significant role in human life in a way that the development of agriculture, desire for industrialization, and urbanization could not have been possible without rivers. Since the 1950s, the construction of structures, water control and convergence structures, bridges, and structures crossing the rivers has increased. Consequently, the flow regime, sediment, and the trend of rivers' topographic and morphological changes altered greatly. Bank erosion plays an important role in the alluvial river and its bed load concentration, while it is also considered one of the human threats in river engineering. Flooding is another phenomenon that causes changes in sediment transport rates, which naturally increase with erosion and the river's flow velocity erosion power. In addition, sedimentation rates in lower slope areas will increase. For this purpose, bank erosion of the river and hydraulic changes during the flood was investigated using CCHE2D (National Center for Computational Hydroscience and Engineering, two-dimensional) model.

Methodology

In this study, the morphological change of the river's bed and bank was studied. The study area is about 4 km. The changes mentioned are due to floods with 25 years return period, which were studied in unsteady flow. Two-dimensional depth-averaged CCHE-Mesh software was used for meshing and construction of the study area topography, and the CCHE2D model was used to simulate hydrodynamic, sediment transport, and bank erosion. And CCHE has the ability to simulate one, two, and three-dimensional flow in aquatic zones, especially natural rivers in steady and unsteady states. In addition, the simulation of flow Hydrodynamics in alluvial streams and rivers, simulation of sediment transport in non-uniform sediment distribution mode, and investigation of changes and retreats of riverbanks are among the model capabilities. Furthermore, the possibility of the right bank erosion and change in flow direction due to the walls breaking was also studied. In this research, by using the model, the sensitivity of the flow characteristics, namely water depth and flow velocity and sediment transport, and the result of bank erosion in the River, are investigated with respect to the various Manning's roughness coefficient and three turbulent models, i.e., two zero equation eddy viscosity models, depth-averaged parabolic model, depth-averaged mixing length model and k - e standard model that is based on two equation eddy viscosity models.

Results and discussion

The novelty of this study is to investigate the bank erosion and the possibility of failure of the river bank wall in the study area in the flood with a 25 years return period in an unsteady state. The results of erosion and sedimentation at different coefficients of manning and three different eddy viscosity models indicate that the overall erosion and sedimentation process is almost the same for all of these different conditions. Still, there is a significant difference in their values and the amount of them. Finally, by comparing the erosion process that occurred in the study area, the mixing length eddy viscosity model yielded the closest response, followed by simulations. In unsteady hydrograph of water level, there is no significant change in the ratio of change in resistance coefficient. With the change of about 50 percent, this coefficient of water level changes only about 10 percent and since the depth of river in the river for 25 returns is about It is one meter, It means that changes of about 10 cm are negligible. The results indicated the erosion of the right bank of the river after the railway near the hole happened. This erosion may result in the destruction of the bank and lead the rivers to flow into holes (in 25 years return period flood, for unsteady flow, erosion prevailed over sedimentation). Furthermore, the high flow

speed in the chute domain results in the demolition of its structure. In bridge extreme erosion may cause the bridge to collapse. Also, considerable erosion happens after the Chute in stilling basin and river bed. The velocity of about 12 m / s in the stilling basin is beyond the tolerance of the concrete structure and is likely to be eroded and destroyed.

Conclusion

Finally, in a flood with 25 years return period after erosion and fracture of the coastal wall of the River, part of the water flow diverts to the hole, initially causing water to enter the hole and also cause the flow lines to reduce and this means to increase velocity and more erosion in bed and banks of the river. A breakdown point that decreases the water level reduces the flow depth, increases the speed, and ultimately increases the erosion and flooding power of the flood stream. In addition to the river bed and banks, the structure, such as the chute, is also damaged due to the high velocity of the flow when the flood passes over it.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی تأثیر وقوع سیل بر فرسایش کناره‌های دیوار حائل بین رودخانه کن شهر تهران و شن‌چاله فربت

نگین الهوردی یموتی^۱، سید علی ایوب‌زاده^{۲*}، سید اويس ترابی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دکتری تخصصی، مدیرعامل مهندسين مشاور مه‌ساب شرق، تهران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: ayyoub@modares.ac.ir

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

چکیده

رودخانه نقش پررنگی در زندگی بشر ایفا می‌کند. با سرعت یافتن فعالیت‌های متعدد بشر از قبیل ساخت سازه‌ها، تجهیزات کنترل و انتقال آب و سازه‌های متقاطع با رودخانه، رژیم جریان و رسوب و به‌تبع آن روند تغییرات توپوگرافی و مورفولوژی رودخانه‌ها نیز به‌طور قابل توجهی دستخوش تغییر گردید. از این‌رو فرسایش دیواره ساحلی رودخانه‌ها در خصوصیات جریان رودخانه‌های آبرفتی و غلظت رسوبات داخل جریان نقش کلیدی را ایفا می‌کند. بدین منظور در این پژوهش با استفاده از مدل CCHE2D جهت بررسی تغییرات مورفولوژی بستر و سواحل رودخانه کن بر اثر عبور سیلاب ۲۵ ساله به‌صورت غیرماندگار پرداخته شد و همچنین امکان فرسایش ساحل غربی رودخانه و تغییر مسیر جریان آن پس از شکست دیواره ساحلی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بعد از پل راه‌آهن تهران-تبریز و در مجاورت شن‌چاله فربت، دیواره ساحلی غربی رودخانه فرسایش می‌یابد به‌طوری‌که سبب شکست دیواره و انحراف جریان رودخانه به سمت شن‌چاله شده و مسیر جریان رودخانه تغییر پیدا می‌کند. در سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله برای جریان غیرماندگار، روند غالب در طول مسیر رودخانه فرسایش تا حداکثر مقدار حدود ۳/۲ متر است و همچنین به علت سرعت بالای جریان (در نقاطی این سرعت در حدود ۱۲ متر بر ثانیه می‌رسد) در محدوده سازه شرقی تندآب احتمال کنده شدن بتن و تخریب سازه را به همراه دارد. در پل فتح نیز آب شستگی شدید رخ داده که احتمال شکست پل را زیاد می‌کند و همچنین بعد از تندآب و شیب‌شکن موجود در مسیر رودخانه فرسایش چشم‌گیری می‌شود.

کلیدواژه‌گان: انتقال رسوب، رودخانه آبرفتی، سیلاب، مدل CCHE2D

۱- مقدمه

رودخانه از دیرباز نقش پررنگی در زندگی بشر ایفا کرده و رشد و توسعه کشاورزی، تمایل به صنعتی شدن و زندگی شهرنشینی بدون استفاده از رودخانه امکان‌پذیر نبوده است (Hemmelder et al., 2018). از دهه ۱۹۵۰ میلادی که فعالیت‌های متعدد بشر از قبیل ساخت سازه‌ها و تجهیزات کنترل و انتقال آب، که از جمله چشم‌گیرترین آن‌ها می‌توان به سدسازی اشاره کرد، سرعت یافت؛ رژیم جریان و رسوب و به تبع آن روند تغییرات توپوگرافی و مورفولوژی رودخانه‌ها نیز به طور قابل توجهی دستخوش تغییر گردید (Bi et al., 2019).

فرسایش دیواره ساحلی رودخانه‌ها در خصوصیات جریان رودخانه‌های آبرفتی و غلظت رسوبات داخل جریان نقش کلیدی را ایفا می‌کند. تغییرات مکانی و شکل پیچ‌وخم‌های رودخانه^۱، تغییرات عرضی و جانبی آبراهه، تغییرات مورفولوژی رودخانه، و رژیم رسوب، همگی تابع خصوصیات فرسایش سواحل و کناره^۲ رودخانه می‌باشند (Jugie et al., 2018). فرسایش کناره رودخانه یکی از خطرات قابل توجه و تا حدودی غیرقابل پیش‌بینی در مهندسی رودخانه است. عدم شناخت، درک و اتخاذ تصمیمات و اقدامات مناسب در مدیریت این پدیده زمینه‌ساز مجموعه‌ای از مشکلات مهندسی و محیط زیستی می‌گردد (Abidin et al., 2017). که از آن جمله می‌توان به تخریب اراضی، آسیب به سازه‌ها، و بسیاری از آسیب‌های دیگر به بستر و سیلاب‌دشت رودخانه‌ها اشاره نمود (Jugie et al., 2018).

یکی دیگر از پدیده‌هایی که سبب تغییر در مقادیر انتقال رسوب می‌شود سیل است که طبیعتاً با وقوع سیل و افزایش سرعت جریان، قدرت فرسایش رودخانه افزایش می‌یابد و به‌موازات آن میزان رسوب‌گذاری در مناطق با شیب کمتر نیز افزایش خواهد داشت. یکی از انواع تخطی به حریم رودخانه‌ها، استفاده از مصالح بستر و سواحل آن‌ها بوده که از دیرباز مورد توجه جوامع بشری بوده است؛ لکن در دهه‌های اخیر با پیشرفت فناوری و گسترش شهرها و توسعه ارتباطات جاده‌ای و رشد مصارف صنعتی، بهره‌برداری از

مصالح رودخانه‌ای در مناطق مختلف جهان ابعاد وسیعی به خود گرفته است. علی‌رغم محاسن و مزایای عدیده‌ای که استفاده از این معادن تجدیدشونده در تحقق اهداف عمرانی و پروژه‌های زیر بنائی در بردارد، رشد سریع نرخ بهره‌برداری و مازاد بر ظرفیت مجاز، تبعات نامطلوبی نظیر کاهش موضعی تراز بستر به‌صورت چشم‌گیر و بروز ناهنجاری در مشخصه‌های هندسی رودخانه و افزایش خسارات سیل و تهدید سلامت سازه‌های آبی نظیر بندها و پل‌ها و دیواره‌های سیل بند و غیره را در بعضی از رودخانه‌های کشور به‌دنبال داشته است.

از جمله نقاط بحرانی موجود، می‌توان به رودخانه کن شهر تهران در محل تقاطع آن با پل فتح اشاره کرد. برداشت‌های بی‌رویه مصالح در آن منطقه باعث ایجاد شن چاله‌هایی با ابعاد عظیم شده است که در پایین دست پل فتح ضخامت دیوار حدفاصل بین رودخانه و شن چاله‌ها در مناطقی از آن به کمتر از پنج‌متر نیز می‌رسد. طول این شن چاله‌ها در حدود ۲۰۰۰ متر از محدوده بزرگراه فتح تا پل معلم است و عمق آن در بعضی نقاط به حدود ۵۰ تا ۶۰ متر نیز می‌رسد. به‌عبارت‌دیگر، مجاور دیواره ساحل راست رودخانه کن در محدوده فوق‌الذکر، شن چاله‌ای عمیق با عمقی بیش از ده برابر عمق رودخانه ایجاد شده است که در صورت شکست دیواره ساحلی رودخانه و ورود بخشی از جریان به شن چاله‌ها، عمق آب رودخانه تغییر، و در نتیجه تراز سطح آب افت کرده و سرعت جریان در بالادست بیشتر می‌شود. افزایش سرعت جریان مسبب افزایش فرسایش بستر و کناره رودخانه در بالادست می‌گردد و عواقبی نظیر تخریب و فرسایش ابنیه، پایه‌های پل‌ها و بستر و کناره‌های رودخانه را در پی خواهد داشت (Salehi Neyshabouri and Ghodsian, 2005). نمونه‌ای از این فرسایش و تخریب در پی سیلاب آبان ماه سال ۱۳۹۱ در تقاطع رودخانه کن با پل بزرگراه فتح رخ داد که آب‌شستگی پایه‌های پل، شکست پل و تخریب تندآب شرقی بعد از پل فتح را در پی داشت.

تحقیقات بسیاری در زمینه تأثیر سیل و فعالیت‌های انسانی بر رودخانه‌ها در اقصی نقاط دنیا انجام شده است

² Bank erosion¹ meander

با استفاده از مدل CCHE2D و فرض احداث میانبر، اثر حذف پیچان‌رودهای چنیبیه و کریشان ۲ در رودخانه کارون در محدوده شهرستان اهواز مورد مطالعه قرار گرفت (Zayeri and Shafai Bejestan, 2018). شبیه‌سازی در بازه زمانی ۱۲ ماه انجام شد و رسوب‌های ورودی و خروجی برای دو حالت شرایط کنونی کارون و شرایط حذف پیچان‌رود برآورد شد. مقایسه مقادیر وزن ورودی رسوب در شرایط وجود و عدم وجود پیچان‌رود نشان داد که حذف پیچان‌رود سرعت جریان به میزان ۵۰ درصد افزایش و توان رسوب‌گذاری رودخانه را ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، بررسی سه‌بعدی آب‌شستگی پایه‌های پل فتح در تقاطع رودخانه کن و پل بزرگراه فتح (Jabari and Fazeli, 2014) نشان داد که احداث دیوار ناتراوا به کاهش سرعت و عمق فرسایش کمک می‌کند. یافته‌های بررسی تأثیر وجود سیل برگردان غرب در روند تغییرات تراز رودخانه در سیل با بازگشت‌های مختلف حاکی از آن است که وجود سیل برگردان غرب باعث تشدید پدیده فرسایش در بستر رودخانه می‌شود (Abhari Rasht Abadi et al. 2015).

نقش انواع هیدروگراف‌های دبی روزانه در فرآیند فرسایش سواحل و کناره‌های رودخانه در رودخانه‌های پرپیچ و خم آلپی واقع در فلات تبت چین با استفاده از مدل BSTEM بررسی گردید. نتایج این بررسی نشان داد که دبی پایه هیدروگراف، مقدار و زمان وقوع دبی اوج تأثیر به سزایی در فرسایش رودخانه‌ای و شکست دیواره ساحل رودخانه دارد که برای فرسایش رودخانه‌ای فقط در مقدار و برای شکست سواحل هم در مقدار و هم در تناوب این فرسایش تأثیرگذار است.

با توجه به شرایط موجود در محدوده رودخانه کن و از آنجایی که فرسایش دیواره ساحل غربی رودخانه کن مطالعه نشده است، در این پژوهش، فرآیند انتقال رسوب و فرسایش کناره‌ای با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D به صورت دوبعدی مدل و احتمال شکست دیواره ساحل غربی رودخانه تعیین می‌شود. ابتدا سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله

در پژوهش (Lai et al. 2015)، به منظور بررسی پایداری دیواره رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۳ در برابر سناریوهای مختلف سیلاب، از یک زوج مدل شامل مدل دوبعدی شبیه‌سازی حرکت بستر و مدل شبیه‌ساز حرکت مواد معلق استفاده و عقب‌نشینی دیواره ساحلی را تعیین گردید. مدل با استفاده از اطلاعات پس‌روی دیواره ساحلی در منطقه نهر گودوین^۴ واسنجی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش‌های عددی از دقت مناسبی برای پیش‌بینی تغییرات مسیر آبراهه برخوردار است. برای مثال به‌طور متوسط مدل توانسته بود اندازه عرض رودخانه را با دقت ۲/۲ درصدی پس از سیل تعیین نماید. (Jugie et al. 2018). با استفاده تصاویر ثبت‌شده مربوط به بستر رودخانه سن^۵ فرانسه طی دهه‌های اخیر به علت تراکم بافت شهری در پایین‌دست، اعلام نمودند تغییرات ریخت‌شناسی در این رودخانه از ۱۱ سانتی‌متر در سال تا یک سانتی‌متر در سال متغیر است. همچنین تغییر موقعیت کناره رودخانه از صفر تا ۱۱۷ سانتی‌متر در سال متغیر بوده است. بیشترین عامل مؤثر بر فرآیند این تغییرات فرسایش توسط سیلاب است و این فرسایش هرساله به‌طور معنی‌داری با میانگین بده سیل متناسب است و فرسایش موضعی تابع فاکتورهای متعددی از قبیل زاویه کناره، خاک‌ریز پنجه کناره، وجود و یا عدم وجود آبراهه‌های فرعی برای انحراف بخشی از جریان سیلاب است.

مطالعه تغییرات مکانی و زمانی بده، رسوب و مسیر آبراهه رودخانه چنگ‌جینگ^۶ در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ در سه دوره زمانی ۱۹۵۷-۱۹۸۰، ۱۹۸۰-۲۰۰۲ و ۲۰۰۲-۲۰۱۰ نشان داد که احداث سد گرجس سوم^۷ به صورت قابل توجهی رژیم رسوب رودخانه را دستخوش تغییر کرده و سالانه به‌طور متوسط مانع از انتقال $10^8 \times 1/23$ تن رسوب به پایین‌دست می‌گردد (Dai et al., 2018). میانه رودخانه پس احداث سد به مهم‌ترین منبع رسوب تبدیل شده است و به‌طور عمده ۵۰ درصد رسوبات منتقل شده به پایین‌دست از این محل کنده شده است. بیشترین حجم فرسایش در پاشنه آبراهه و دیواره‌ها اتفاق افتاده است.

³ Mississippi River

⁴ Goodwin Creek

⁵ Seine River

محدوده مورد مطالعه این پژوهش از تقاطع رودخانه کن با پل فتح به طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه و ۸۵ ثانیه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۶۷ دقیقه و ۵۷ ثانیه شمالی تا حدود ۴/۸ کیلومتر پایین‌تر از آن تقاطع پل آزادگان است که در شکل ۱ این محدوده در زیر حوضه (W38) با مساحت ۵/۴ کیلومتر مربع قرار داشته و یک زیر حوضه شهری محسوب شده و ارتفاع متوسط حوضه، ۱۱۴۴ متر و شیب اراضی حوضه ۴/۶ درصد است. شکل ۱ زیر تمام حوضه‌های سیل برگردان غرب و زیر حوضه‌ای که محدوده مورد مطالعه در آن واقع شده است را نمایش می‌دهد.

۲-۲- معرفی مدل مورد استفاده

نرم‌افزار CCHE یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی (NCCHE) دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه شده و توسعه یافته است که قابلیت شبیه‌سازی به صورت یک، دو و سه بعدی جریان در پهنه‌های آبی مخصوصاً رودخانه‌های طبیعی در حالت ماندگار و غیرماندگار را دارد.

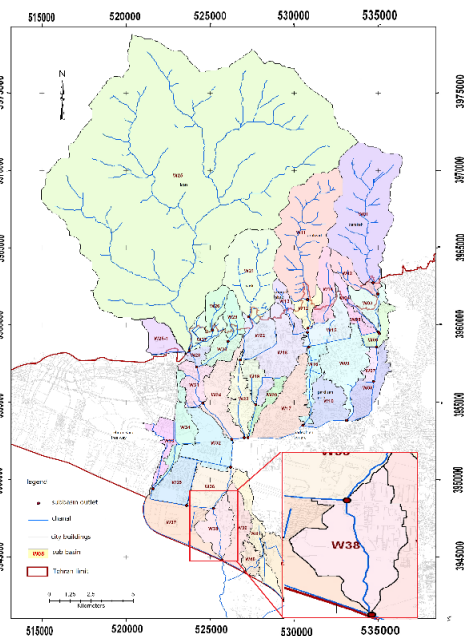


Fig. 1 West Flood Diversion subbasin and Kan river
شکل ۱ زیر حوضه‌های سیل برگردان غرب و رودخانه کن
(Mahab Ghods Consulting Engineering Company., 2011)

به صورت هیدرولیکی شبیه‌سازی و پس از آن مدل انتقال رسوب و فرسایش کناره‌های ساخته و نتایج نهایی ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه کن با حوضه آبریزی بیش از ۲۰۰ کیلومتر مربع پرآب‌ترین رودخانه فصلی تهران بوده که از رشته‌کوه‌های توچال به طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه و ۵۲/۹۷ ثانیه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۹۴ دقیقه و ۵۴/۹۹ ثانیه شمالی سرچشمه می‌گیرد که در نهایت به رودخانه جاجرود با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۹ دقیقه و ۵۲/۸۷ ثانیه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه و ۱۶/۸۶ ثانیه شمالی می‌ریزد. رودخانه کن میانگین آورد سالانه‌ای در حدود ۸۸ میلیون مترمکعب یا حدود ۲۷۰۰ لیتر بر ثانیه دارد که سالانه حدود ۵ میلیون مترمکعب از آب این رودخانه برای دریاچه چیتگر منطقه ۲۲ اختصاص داده می‌شود. سرچشمه‌های رودخانه کن از قله‌های غربی رشته‌کوه توچال شامل بازارک با ارتفاع حدود ۳۷۷۵ متر، لوارک با ارتفاع ۳۵۶۰ متر، سیاه‌سنگ با ارتفاع ۳۵۶۰ متر، پشت‌بند سنگون با ارتفاع ۳۳۹۸ متر، لیچه (در جنوب شرقی سد امیرکبیر یا کرج) با ارتفاع ۲۸۷۸ متر از سطح آب‌های آزاد است (Hashemian et al. (2012) که حوضه آبریز آن از شمال به حوضه آبریز رودخانه شهرستانک، از غرب به حوضه آبریز رودخانه هفت‌چشمه و از شرق به حوضه آبریز رودخانه‌های حصارک، فرحزاد و درکه محدود می‌شود. رودخانه‌های کیگا، رندان و کشار سرشاخه‌های اصلی آن است (Mahab Ghods Consulting Engineering Company., 2011).

سیل برگردان غرب که وظیفه حمل سیلاب‌های حوضه آبریز شرق رودخانه کن که شامل مسیل‌های درکه، تپه‌نیزار، فرحزاد، شاهین و وسک را به عهده دارد، در محدوده ضلع جنوبی پارک ارم به رودخانه کن تخلیه می‌شود و بر بده آن در محدوده پایین‌دست رودخانه می‌افزاید (Mahab Ghods Consulting Engineering Company., 2011).

در مدل ریاضی CCHE2D برای محاسبه میزان فرسایش و رسوب‌گذاری از معادلات انتقال رسوب سه‌بعدی انتقال پخشیدگی میانگین‌گیری شده در عمق به صورت زیر است:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial(uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial(wc_k)}{\partial z} - \frac{\partial(w_{sk}c_k)}{\partial z} = \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial z} \right)$$

در معادله بالا c_k بیانگر غلظت در قطر k ذره رسوب است؛ w سرعت در راستای Z (در جهت عمودی هم‌راستای شتاب جاذبه است.)، w_{sk} سرعت ته‌نشینی ذره رسوب با اندازه k ، ε_s پخشیدگی گردابه‌ای رسوب^۹ که از رابطه $\varepsilon_s = \sigma_s v_t / \sigma_s$ محاسبه می‌شود و v_t لزجت گردابه‌ای سیال، σ_s طول اختلاط پراتل^۹ است که عددی بین ۰/۵ تا ۱ است. در حالت انتقال رسوب غیریکنواخت، مخلوط رسوب از لحاظ اندازه، می‌تواند به چندین کلاس طبقه‌بندی شود که برای هر تقسیم‌بندی (از لحاظ اندازه رسوب)، قابل استفاده است.

♦ فرسایش کناره‌ای

در بخش شبیه‌سازی فرسایش کناره‌های رودخانه از مبانی ارائه‌شده توسط Osman and Thorne. (1988) برای مدل‌سازی بهره گرفته شده است. به صورتی که نرخ فرسایش کناره‌ای (ε) متناسب با اختلاف تنش برشی و تنش بحرانی است:

$$\varepsilon = m \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad (5)$$

که در آن τ تنش برشی در مقطع عرضی، τ_c تنش برشی بحرانی و m نرخ اولیه فرسایش کناره‌ای است و تابع تنش برشی بحرانی است:

$$m = 233 \times 10^{-4} \tau_c e^{-0.13\tau_c} \quad (6)$$

در مدل مورد استفاده رابطه Osman and Thorne. (1988) بر مبنای شکست سطحی و چرخشی بررسی شده است و مدل تحلیل شکست کناره‌ای توسعه یافته است.

همچنین شبیه‌سازی رفتار جریان در پیچان‌رودها و رودخانه‌های آبرفتی، شبیه‌سازی انتقال رسوب در حالت توزیع غیریکنواخت رسوب، بررسی تغییرات و عقب‌نشینی سواحل و کناره‌های رودخانه از جمله قابلیت‌های مدل است. این نرم‌افزار از روش عددی المان محدود استفاده می‌کند

معادلات حاکم بر میدان جریان آب

با توجه به اینکه جریان کانال‌های باز اغلب جزو مسائل آب‌های کم‌عمق است، لذا تأثیر حرکت قائم ذرات آب از اهمیت چندانی برخوردار نبوده و به همین دلیل معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق در اکثر موارد برای شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی رودخانه‌ها از دقت و کارایی کافی برخوردار می‌باشند. (Yafei jia (2013) به تبیین کامل معادلات و مدل عددی استفاده شده در نرم‌افزار CCHE پرداخت که بخشی از معادلات به اختصار بیان ارائه شده است:

♦ معادلات مومنوم

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \quad (1)$$

$$\frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor} v$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \quad (2)$$

$$\frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{cor} u$$

در معادلات فوق‌الذکر، u و v به ترتیب نشان‌دهنده مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y هستند. t زمان، g شتاب جاذبه، η بیانگر تراز ارتفاعی، ρ چگالی آب، h عمق محلی آب، f_{cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، τ_{xx} ، τ_{xy} ، τ_{yy} و τ_{yx} تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق، و τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی فصل مشترک بستر و جریان در راستای x و y هستند.

♦ معادلات پیوستگی:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

♦ انتقال رسوب و تغییرات بستر

⁹ Prandtl-schmidt number

⁸ Eddy diffusivity of sediment

۲-۳- روش انجام کار

مدل CCHE2D به ترتیب از سه زیر برنامه هیدرودینامیک جریان، انتقال رسوب و فرسایش کناره‌ای برای استخراج نتایج فرسایش کناره‌ای استفاده می‌کند. شکل ۲ یک روند کلی از مراحل شبیه‌سازی در مدل CCHE2D را به صورت مختصر بیان کرده است. مشاهده می‌شود که ابتدا تمام داده‌های بخش جریان وارد مدل شده و نتایج هیدرودینامیکی به صورت کامل استخراج می‌شود، در مرحله بعدی با استفاده از نتایج بخش جریان و یک سری داده‌ها و اطلاعات رسوب جریان، انتقال رسوب بررسی شده و در نهایت مدل فرسایش کناره‌ای در ادامه بخش انتقال رسوب شروع به حل معادلات پایداری کناره رودخانه و سواحل آن می‌کند. با هر گام زمانی و استخراج نقاط تر و خشک که نماینده بستر و ساحل رودخانه می‌باشند، مش بندی و نقاط توپوگرافی مجدداً در محدوده به دست آمده و تا انتهای زمان شبیه‌سازی این روند ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت نتایج حاصل از فرسایش و رسوب گذاری بعد از سیلاب در بستر و کناره ارائه شود.

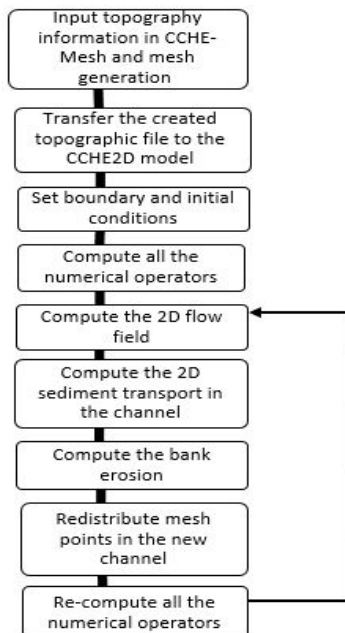


Fig. 2 Flowchart of CCHE2D model simulation

شکل ۲ روند نمای کلی در شبیه‌سازی مدل

در این مدل یک دیواره، یک شیب اولیه دارد. هنگامی که اولین شکست اتفاق افتاد، شیب جدید جایگزین می‌شود و دیواره این شیب را نگه می‌دارد و بعد از شکست‌های بعدی شیب تغییری نخواهد کرد و فقط به صورت موازی عقب‌نشینی خواهد کرد. با توجه به اینکه دیواره‌های یک رودخانه برای یک مدت طولانی مورد مطالعه قرار گرفتند، مشاهده شد که شیب دیواره‌های رودخانه مشابه با شیب شکست توده‌ای دیواره‌ها است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که شیب شکست کناری β به عنوان فرآیند عقب‌نشینی موازی دیواره در نظر گرفته شود. تحت این شرایط، عقب‌نشینی دیواره بعد از شکست از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$BW = \frac{H-H'}{\tan\beta} \quad (7)$$

که در آن H ، ارتفاع کناره رودخانه و H' ، ارتفاع فاصله‌ای از سطح که فرسایش رخ نداده است نشان می‌دهد.

نرخ بحرانی ارتفاع دیواره در حالت قبل و بعد از شکست به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{H}{H'} = \frac{1}{2} \left[\omega_1 + \sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 + 4} \right] \quad (8)$$

$$\omega_1 = \cos\beta \sin\beta - \cos^2\beta \tan\phi \quad (9)$$

$$\omega_2 = 2(1-K) \frac{c}{\gamma_s H} \quad (10)$$

اگر نرخ H و H' بیشتر از مقدار آن در معادله (۸) باشد، شکست دیواره محاسبه می‌شود. معمولاً مصالح شکسته شده در ابتدا کنار دیواره تجمع پیدا کرده و بعد از آن توسط جریان شسته می‌شوند. در رویکرد اخیر مصالح شکسته شده دیواره رودخانه به عنوان ورودی برای بار بستر مدل فرض می‌شوند و در نتیجه غلظت رسوب در نزدیکی ساحل بیشتر می‌شود.

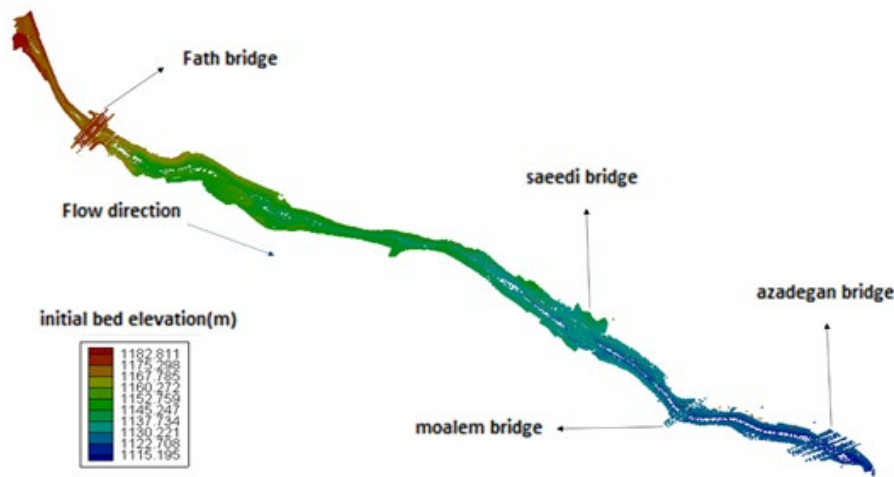


Fig. 3 Topographic data of the study area

شکل ۳ داده‌های توپوگرافی محدوده مطالعاتی

رودخانه، مقدار 0.35 برای بستر رودخانه مناسب‌ترین نتایج را به همراه داشت که خطای به‌دست‌آمده، برای محاسبه میزان خطای مدل از روابط (۱۱) و (۱۲) که شاخص جذر میانگین مربع خطا^{۱۰} و میانگین درصد خطای مطلق^{۱۱} هستند، استفاده شد.

$$R.M.S.E = \sqrt{|1/n \times \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2|} \quad (11)$$

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - E_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (12)$$

در دو معادله مذکور O_i مقدار عمق جریان مشاهده‌شده در طبیعت و E_i مقدار محاسبه‌شده عمق آب در مدل است.

شرایط مرزی شامل مقدار بده در حالت شبیه‌سازی ماندگار و هیدروگراف جریان در حالت غیرماندگار به‌عنوان شرایط ورودی به مدل اعمال شد و شرایط مرزی خروجی شامل تراز سطح آب است. برای شبیه‌سازی بخش رسوبی در ابتدا وضعیت فرسایش‌پذیری هر بخش از رودخانه تعیین شد که بخش‌هایی از جمله شیب‌شکن، تندآب، پایه پل‌ها و در کل سازه‌های بتنی غیرقابل فرسایش و رسوب‌گذاری فرض شد و در سایر مناطق توانایی فرسایش و رسوب‌گذاری اعمال

برای شروع شبیه‌سازی، داده‌های توپوگرافی از فایل DEM منطقه استفاده شد و پس از وارد کردن فایل با پسوند (*.mesh_xyz) در نرم‌افزار CCHE_MESH، شکل ۳، اقدام به مش‌بندی و درونی‌یابی رقوم ارتفاعی شده است.

پس از وارد کردن داده‌های توپوگرافی، مرزهای محدوده مشخص و شبکه محاسباتی ایجاد شد.

با توجه به اینکه چندین سازه و پایه پل در مسیر رودخانه قرار دارد، اطلاعات سازه‌ها به‌صورت جداگانه وارد نرم‌افزار شد. فایل ساخته‌شده در مدل CCHE-mesh با پسوند (.geo) ذخیره‌شده و در نرم‌افزار CCHE2D-GUI فراخوانی شد. پس از وارد کردن اطلاعات اولین بخش از شرایط اولیه که توپوگرافی رودخانه است، اطلاعاتی از جمله تراز اولیه سطح آب و مقاومت جریان (که در این پژوهش ضریب زبری مانینگ اعمال شد) بخش‌های مختلف محدوده وارد شد.

برای تعیین ضریب زبری مانینگ، از گزارش‌های ارائه‌شده از سیل سال ۱۳۹۱ در محدوده رودخانه کن شهر تهران استفاده شد، که در بخش‌های ابتدایی بازه (از پل بزرگراه فتح تا پل راه‌آهن تهران تبریز) در محدوده پل‌ها و سازه‌های بتنی، ضریب زبری مانینگ 0.22 و برای سایر مناطق

¹¹ M.A.P.E

¹⁰ R.M.S.E

بزرگراه فتح، به‌طور کلی میزان حساسیت بیشتر سرعت جریان نسبت به عمق آب، نتیجه‌گیری شد که در شکل ۵ قابل مشاهده است. محدوده تغییرات ضریب زبری مانینگ از ۰/۰۲ تا ۰/۰۵۵ است که ضریب زبری مانینگ کمتر در آبراه‌های طبیعی بزرگ (با عرض بالای مقطع بیش از ۱۰۰ فوت در زمان سیلاب) برای مناطقی است که مقطع منظم بوده و تخته‌سنگ یا پوشش گیاهی بر سر راه جریان نباشد، در مقابل ضرایب بالاتر برای شرایط مقطع نامنظم و زیر مناسب است (Maghsoudi and Kouchakzadeh, 2017).

همچنین با افزایش حدود ۵۰ درصدی این ضریب افزایش ۱۰ درصد عمق و ۷ درصد سرعت جریان برای ضریب زبری مانینگ در جریان غیرماندگار، تغییر دارد. از آنجایی که عمق آب در رودخانه به‌طور میانگین برای سیلاب مذکور حدود یک متر است، حداکثر تغییرات برای ۵۰ درصد افزایش ضریب زبری مانینگ حدود ۱۰ سانتی‌متر می‌شود که چنین محدوده تغییراتی در رودخانه قابل‌اغماض است. و برای شبیه‌سازی، ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۵ در نظر گرفته می‌شود.

برای شروع شبیه‌سازی، داده‌های توپوگرافی از فایل DEM منطقه استفاده شد و پس از وارد کردن فایل با پسوند (*.mesh_xy) در نرم‌افزار CCHE_MESH، شکل ۳، اقدام به مش‌بندی و درونیابی رقوم ارتفاعی شده است.

پس از وارد کردن داده‌های توپوگرافی، مرزهای محدوده مشخص و شبکه محاسباتی ایجاد شد.

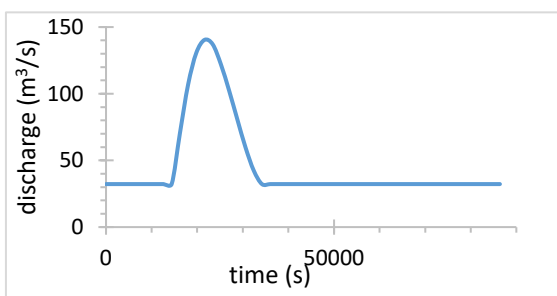


Fig. 4 Outlet hydrograph of study area

شکل ۴ هیدروگراف نقطه خروجی منطقه مطالعاتی

شد. شبیه‌سازی فرسایش کناره‌ای در ادامه نتایج بخش شبیه‌سازی رسوب شروع می‌شود. در این پژوهش با استفاده از مدل عثمان و تورن و با فرض اینکه در مصالح کناره‌ای هیچ‌گونه ترکیبی^{۱۲} از قبل وجود ندارد به شبیه‌سازی پرداخته شد و همچنین حداقل ضریب اطمینان که یک است برای این بخش در نظر گرفته شد. در این مدل وزن مخصوص رسوبات ۲/۶۴۵ قرار داده شد و برای مدل‌سازی انتقال رسوب از فرمول وو و همکاران^{۱۳} استفاده شد. همچنین بار رسوبی بستر در سه کلاس (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۱ متر) به مدل معرفی شد. همچنین در مدل فرسایش کناره‌ای زاویه اصطکاک داخلی مصالح کناره رودخانه ۳۴/۳۱ درجه قرار داده شد.

در بخش آنالیز حساسیت مدل، ابتدا میزان حساسیت مدل نسبت به ضریب زبری مانینگ و مدل آشفتگی بررسی شد و پس از آن سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله برای جریان شبه غیرماندگار شبیه‌سازی شد که از هیدروگراف ۲۵ ساله خروجی از محدوده مطالعاتی استفاده شد و پس از بررسی احتمال شکست دیواره غربی مسیر جدید جریان رودخانه مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۴).

۳- نتایج

۳-۱- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت عمق جریان، سرعت جریان و عمق

آب‌شستگی در مقابل ضریب زبری مانینگ

مقدار دبی وارد شده در این بخش ۱۰۰ مترمکعب به‌صورت ماندگار است که معادل سیل برآورد شده در سال ۱۳۹۱ است. با بررسی‌های انجام‌شده بر روی نتایج عمق آب، سرعت جریان، تغییرات نهایی تراز بستر و کناره رودخانه نسبت به تغییر ضریب زبری بستر و ساحل رودخانه در

نقطه کنترل تعیین‌شده، در محدوده ابتدایی رودخانه در پل

¹³ Wu et al

¹² Crack

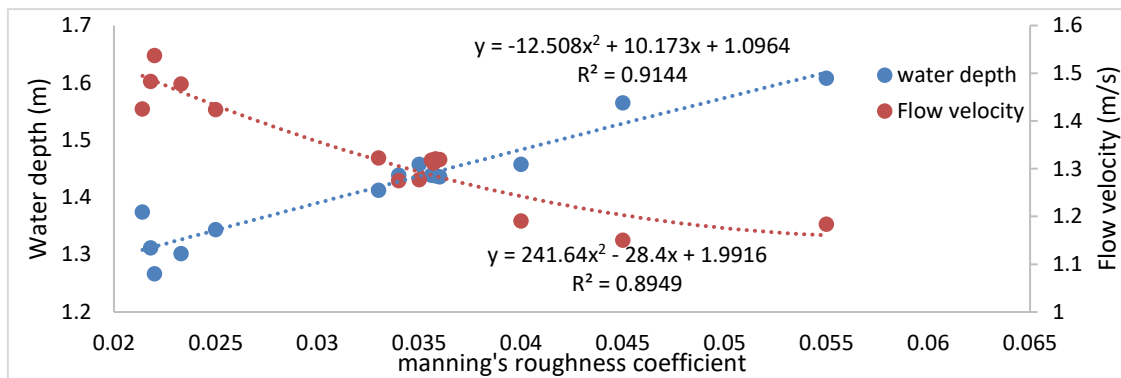


Fig. 5 Depth and velocity of the flow by changing the Manning roughness coefficient

شکل ۵ مقدار عمق و سرعت جریان با تغییر ضریب زبری مانینگ (Allahverdy yamooty and Ayyoubzadeh, 2019)

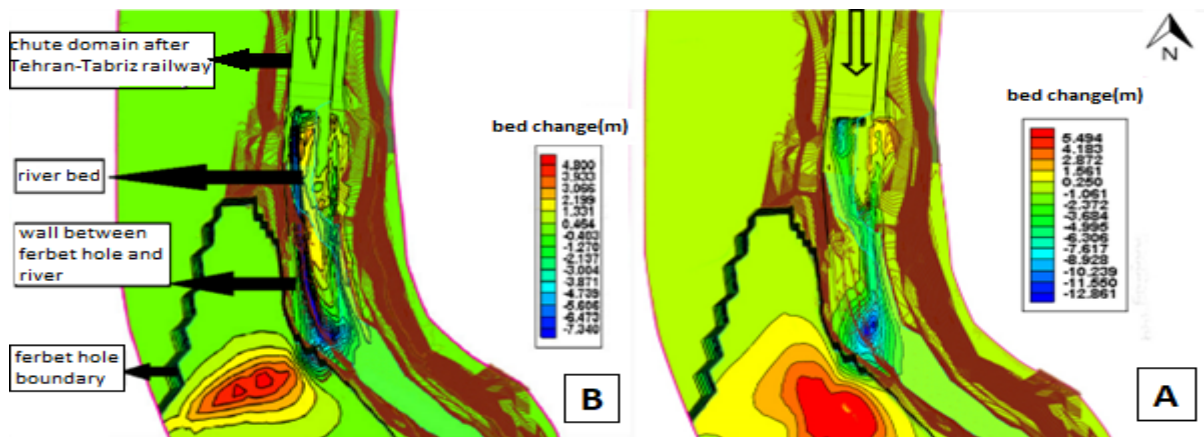


Fig. 6 Bed level changes in floods with the 25 years return period (A): bed with Manning roughness coefficient of 0.035, (B): bed with Manning roughness coefficient n- 37% n

شکل ۶ تغییرات تراز بستر در سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال (شکل A): تغییرات تراز بستر با ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۵، (شکل B): تغییرات تراز بستر با ضریب زبری مانینگ (n- 37%n)

فتح تا پل راه‌آهن تهران تبریز) در محدوده پل‌ها و سازه‌های بتنی، ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۲ و برای سایر مناطق رودخانه، مقدار ۰/۰۳۵ برای بستر رودخانه مناسب‌ترین نتایج را به همراه داشت که خطای به‌دست‌آمده، برای محاسبه میزان خطای مدل از روابط (۱۱) و (۱۲) که شاخص جذر میانگین مربع خطا^{۱۴} و میانگین درصد خطای مطلق^{۱۵} هستند، استفاده شد. در بخش فرسایش کناره‌های ضریب زبری مانینگ در روند فرسایش و نتایج کلی شکست دیواره ساحل غربی (احتمال رخداد شکست دیواره ساحل غربی) تأثیرگذار نبوده و در هر دو مدل شکست دیواره ساحلی بین رودخانه و شن‌چاله فریت رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۶ نمایان است، فرسایش از انتهای

با توجه به اینکه چندین سازه و پایه پل در مسیر رودخانه قرار دارد، اطلاعات سازه‌ها به‌صورت جداگانه وارد نرم‌افزار شد. فایل ساخته‌شده در مدل CCHE-mesh با پسوند (.geo)، ذخیره‌شده و در نرم‌افزار CCHE2D-GUI فراخوانی شد. پس از وارد کردن اطلاعات اولین بخش از شرایط اولیه که توپوگرافی رودخانه است، اطلاعاتی از جمله تراز اولیه سطح آب و مقاومت جریان (که در این پژوهش ضریب زبری مانینگ اعمال شد) بخش‌های مختلف محدوده وارد شد.

برای تعیین ضریب زبری مانینگ، از گزارش‌های ارائه‌شده از سیل سال ۱۳۹۱ در محدوده رودخانه کن شهر تهران استفاده شد، که در بخش‌های ابتدایی بازه (از پل بزرگراه

¹⁵ M.A.P.E

¹⁴ R.M.S.E

محدوده سازه تندآب نمایان است. در صورتی که در بخش E، اختلاف تغییر تراز بستر رودخانه برای بسیاری از نقاط محسوس است که در تصاویر ۸ و ۹ تغییرات تراز در عرض نیز به صورت دوبعدی از ابتدای بازه مطالعاتی تا کمی بعد از پل بزرگراه راه‌آهن تهران تبریز مشخص شده است. در تمامی نمودارهای شکل ۷ بیشترین اختلاف بین پارامترهای دو مدل در نقاطی است که شیب به صورت ناگهانی تغییر کرده است.

به‌طور کلی حد فرسایش و کف کنی بستر رودخانه در مدل آشفتگی طول اختلاط بیشتر از مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای بوده و برعکس آن میزان رسوب‌گذاری در مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای بیشتر است. در شکل ۹ میزان دقیق فرسایش و رسوب‌گذاری در مقطع (A-A) را با استفاده از مدل آشفتگی طول اختلاط، در ابتدای پل فتح نمایان است که تصاویر بیانگر حدود ۳ متر فرسایش در سمت راست مقطع و نزدیک پایه پل است.

در شکل ۱۰ تغییرات دوبعدی تراز بستر رودخانه که محدوده‌ای در ادامه شکل ۸ تا حدود ۳۰۰ متر پایین‌تر است، نشان داده شده است. با مقایسه میزان فرسایش و رسوب‌گذاری بستر و کناره رودخانه، روند فرسایش و رسوب‌گذاری تقریباً یکسانی در ساحل غربی رودخانه مشاهده می‌شود، اما در میزان آن برای هر دو مدل آشفتگی کمی تفاوت وجود دارد؛ در مدل آشفتگی طول اختلاط مقدار فرسایش دیواره ساحل غربی هفت متر بوده که در مقایسه با مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای سهموی حدود یک متر بیشتر است و میزان رسوب‌گذاری نیز در مدل آشفتگی طول اختلاط با حداکثر مقدار ۴/۸ متر حدود ۱/۳ متر بیشتر از نقطه مکانی مشابه آن در مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای سهموی است. به‌طور کلی در هر دو شکل فرسایش از بعد از پل فتح، از سمت راست تندآب، آغاز می‌شود و در انتهای تندآب که هم‌جوار با دیواره چاله فریت است به نهایت میزان خود می‌رسد. این فرسایش ادامه پیدا می‌کند تا دیواره شکسته و جریانی که به سمت چاله منحرف می‌شود سبب انتقال رسوبات شسته شده و تنشینی در آن ناحیه می‌شود

محدوده تندآب و شیب‌شکن شروع شده و تا دیواره حائل بین رودخانه و شن‌چاله ادامه دارد که نهایتاً به شکست دیواره ختم می‌شود.

♦ آنالیز حساسیت خصوصیات جریان و عمق آب‌شستگی در مقابل تغییر مدل آشفتگی جریان

در این زمینه آنالیز حساسیت برای سه مدل آشفتگی طول اختلاط^{۱۶}، لزجت آشفتگی سهموی^{۱۷} و $k - \epsilon$ صورت گرفت و اختلاف نتایج آن در بخش هیدرودینامیک برای مدل آشفتگی طول اختلاط و لزجت آشفتگی سهموی، و فرسایش بستر و فرسایش کناره‌های رودخانه برای هر سه مدل آشفتگی باهم مقایسه شدند.

نتایج مقایسه دو مدل صفر معادله‌ای طول اختلاط و لزجت آشفتگی سهموی در دوره بازگشت ۲۵ ساله بوده و در سه حالت یک‌بعدی، دوبعدی و با تغییرات کلی بررسی شده است. نتایج یک‌بعدی به صورت پروفیل طولی خط‌القدر، نتایج دوبعدی به صورت تصاویری با مشخص بودن موقعیت بستر و کناره‌های رودخانه به ارائه تغییرات در هر نقطه از محدوده پرداخته و در نهایت به مقایسه مقادیری از جمله مجموع کل فرسایش و رسوب‌گذاری برای هر دو مدل پرداخته شد.

در شکل ۷ در بخش A پروفیل طولی بستر رودخانه قبل از شبیه‌سازی در کل بازه مطالعاتی ارائه شده است. دو بخش B و C به ترتیب اختلاف مقادیر خروجی عمق و سرعت جریان در دو مدل آشفتگی صفر معادله‌ای بیان شده است. که این اختلاف برای هر دو پارامتر عمق و سرعت جریان در اکثر طول آبراهه ناچیز و قابل اغماض است، اما برای عمق جریان در محدوده شیب‌شکن‌ها و برای سرعت جریان در محدوده تندآب بیشترین تفاوت در مقادیر خروجی که به ترتیب ۰/۸ متر و ۱۲ متر بر ثانیه است که بسیار قابل توجه است که برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب و قضاوت نوع مدل آشفتگی مناسب برای محدوده مطالعاتی موردنظر از سایر نتایج مدل‌سازی استفاده شد.

در شکل ۷ در بخش D اختلاف بین تنش برشی در خط‌القدر رودخانه نمایان است که بیشترین اختلاف تنش برشی، در

¹⁷ Parabolic eddy viscosity

¹⁶ Mixing length

که در شکل ۱۰ با رنگ‌های قرمز و نارنجی و زرد به نشانه رسوب‌گذاری نمایش داده شده است.

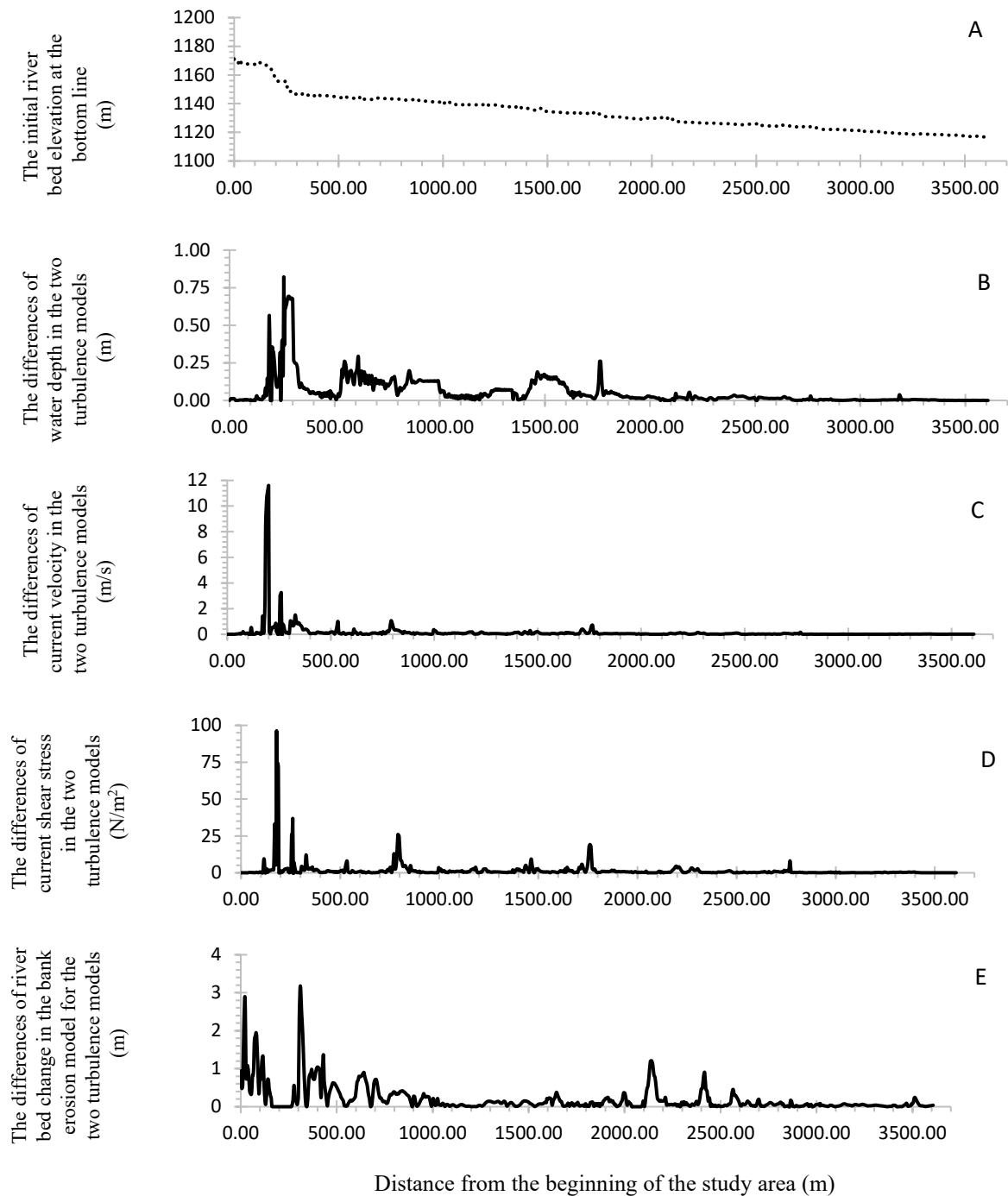


Fig. 7 Comparison of hydraulic parameters results and bed level change in two turbulence models of zero equations of mixing length and parabolic eddy viscosity

شکل ۷ مقایسه نتایج پارامترهای هیدرولیکی و تغییر تراز بستر در دو مدل آشفتگی صفر معادله‌ای طول اختلاط و لزجت گردابه‌ای سهموی

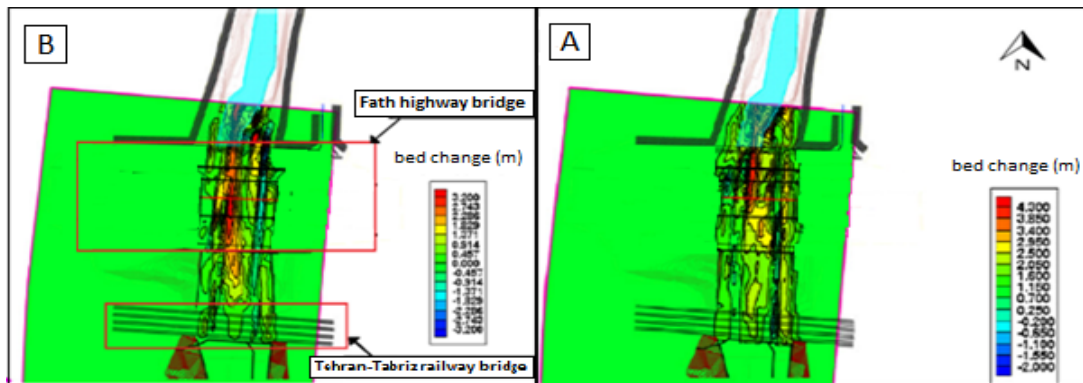


Fig. 8 Changes in bed and bank river elevation in the first part ((A): Parabolic eddy viscosity turbulence model - (B): Mixing length turbulence model)

شکل ۸ تغییرات تراز بستر و کناره رودخانه در بخش اول (شکل (A): مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای سهموی - شکل (B): مدل آشفتگی طول اختلاط)

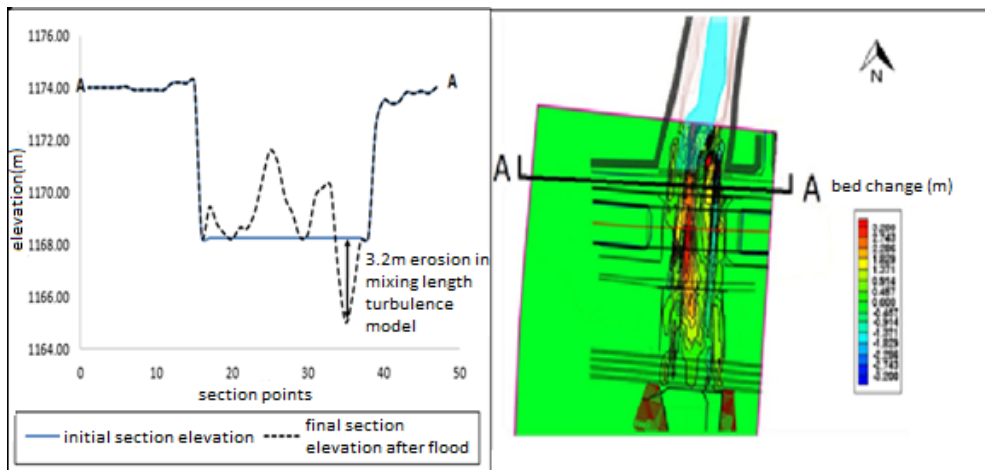


Fig. 9 River cross section for bed changes in the mixing length turbulence model

شکل ۹ مقطع عرضی رودخانه برای تغییرات بستر در مدل آشفتگی طول اختلاط

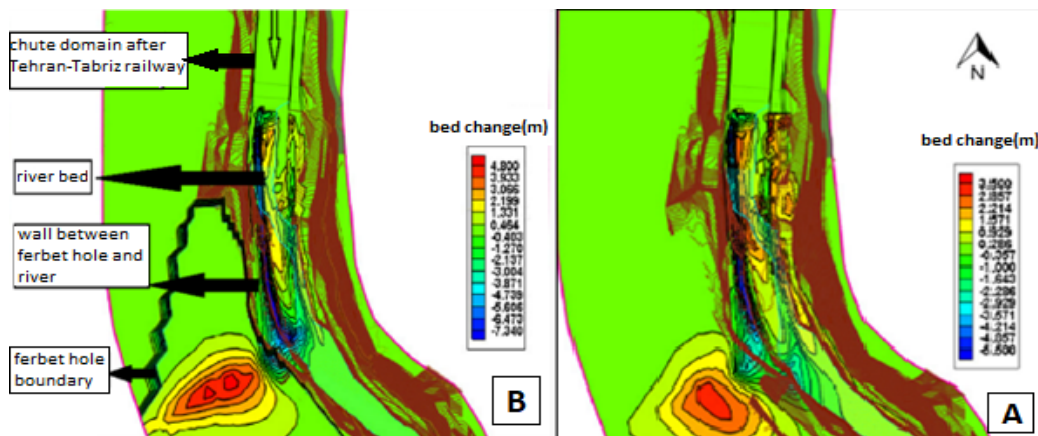


Fig. 10 Bed and bank level changes in the second part of study area ((A): Parabolic eddy viscosity turbulence model - (B): Mixing length turbulence model)

شکل ۱۰ تغییرات تراز بستر و کناره رودخانه در بخش مطالعاتی دوم رودخانه (شکل (A): مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای سهموی - شکل (B): مدل آشفتگی طول اختلاط)

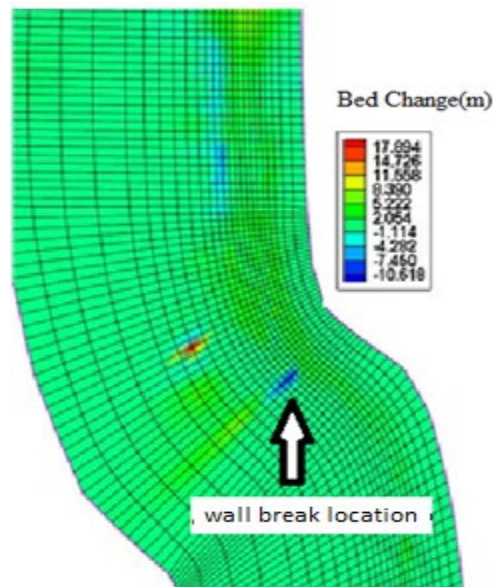


Fig. 11 Bed elevation changes in $k - \epsilon$ turbulence model
شکل ۱۱ تغییرات تراز بستر رودخانه در مدل آشفتگی $k - \epsilon$

جدول ۱ داده‌های مشاهداتی و محاسباتی عمق آب در نقاط کنترلی در محدوده مطالعاتی

Table 1 Observational and computational data of water depth at control points in the study area

Observational water depth at control points (meters) (O _i)	Computational water depth at control points (meters) (E _i)
1.07	1.019
1.07	1.009
1.07	0.839
1.07	0.905
1.76	1.724
1.76	1.568
1.76	1.619
1.76	1.667
1.76	1.508
0.71	0.914
0.71	0.5
0.71	0.566
0.71	0.617
0.71	0.733
0.71	0.822
2.41	2.39
2.41	2.015
2.41	2.199
2.41	2.716
2.41	2.63

از آنجاکه، در محدوده مورد مطالعه در این مدل شکست دیواره رودخانه مشهود است، افزایش قابل توجه غلظت رسوب ورودی و در نتیجه رسوب گذاری در بستر رودخانه امری منطقی به نظر می‌رسد. اما در محدوده شکست دیواره،

نتایج تغییرات تراز بستر رودخانه با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ ، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است که در بخش ابتدایی دیواره بین رودخانه و شن چاله فریت مشابه با سایر مدل‌های صفر معادله‌ای بوده (همانند شکل ۱۰) و در نهایت فرسایش دیواره بین رودخانه و شن چاله فریت نیز در محلی که سایر مدل‌های آشفتگی شکست را نشان می‌دهند، رخ می‌دهد لیکن عمق فرسایش آن بیشتر است. اما در بخش پل بزرگراه فتح فرسایشی در محدوده پایه‌ها رخ نمی‌دهد.

نهایتاً با بررسی‌های صورت گرفته در طول بازه مطالعاتی و در نظر گرفتن زمان و هزینه محاسباتی، از نتایج حاصل از مدل آشفتگی طول اختلاط برای ادامه مراحل مدل سازی استفاده شد.

۲-۳- نتایج واسنجی مدل

با محاسبات انجام شده، از اختلاف داده‌های برداشت شده مشاهداتی از سیلاب فروردین ماه سال ۱۳۹۸ و نتایج مستخرج از مدل با ضریب زبری مانینگ 0.35 برای عمق جریان در چندین نقطه کنترلی در محدوده پل راه آهن تهران- تبریز در کناره‌های پایه پل و دیواره‌ها، خطای به دست آمده برای عمق آب میزان 0.177 در شاخص جذر میانگین مربع خطا و $11/46$ درصد در شاخص میانگین درصد خطای مطلق، برآورد شده است. مقادیر داده‌های مشاهداتی و محاسباتی عمق آب برای نقاط کنترلی که در محدوده سازه پل راه آهن تهران-تبریز استفاده شد در جدول ۱ قابل مشاهده است.

۳-۳- نتایج فرسایش کناره‌ای رودخانه

با توجه به نتایج حاصل شده از مدل فرسایش کناره‌ای که در جدول ۲ به صورت حجمی در کل محدوده مورد مطالعه و محدوده‌ای که شکست ساحل غربی رودخانه (دیوار حائل بین شن چاله فریت و رودخانه کن) اتفاق افتاده، ارائه شده است، حجم کل رسوب گذاری بیشتر از حجم کل فرسایش است و این بدان علت است که مدل پس از شکست و واژگونی بخشی از کناره رودخانه، مصالح فرسایش یافته را به عنوان بار رسوب ورودی به مدل تلقی کرده و در ادامه فرآیند شبیه سازی غلظت رسوب جریان افزایش می‌یابد.

جدول ۲ تغییرات حجمی در کل محدوده برای سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال

Table 2 Total area volumetric river bed and bank changes in total area for flood with a return period of 25 years

Change type	Total change in volume(m3)	Volumetric change in the domain of river west wall break (m3)
Deposition	76708.040	10108.8844
Erosion	-48957.681	-12430.9635
Total change	2775.035	-2322.79

پدیده غالب فرسایش است. نتایج فرسایش کناره‌ای در سایر بخش‌های مطالعاتی در پایان‌نامه (Allahverdy, 2019) به‌طور کامل ارائه شده است.

در شکل ۹ که مدل‌سازی سیل غیرماندگار با دوره بازگشت ۲۵ سال با مدل آشفنگی طول اختلاط است، حدود ۳/۲ متر فرسایش تا ۳/۲ متر رسوب‌گذاری در بخش اول متغیر است. بیشترین میزان تغییرات از ابتدای پل بزرگراه فتح، و نزدیک دیواره شرقی و پایه‌های پل هست و تا کنار پایه پل راه‌آهن تهران تبریز ادامه پیدا کرده است. با توجه به چنین مقدار زیادی از فرسایش پایداری پل در این محدوده تحت‌الشعاع قرار گرفته و خطر شکست پل را به همراه دارد.

همچنین حجم زیاد رسوب‌گذاری در بخش غربی زیر پل فتح باعث کاهش عرض مقطع پل و به تبع آن کاهش عرض جریان می‌شود و نه تنها ظرفیت آبگذری مقطع پل کاهش می‌یابد بلکه سبب انحراف جریان به سمت دیوار شرقی و تشدید فرایند فرسایش خواهد شد.

شکل ۱۲ بخش دوم محدوده مطالعاتی را نمایش می‌دهد که در این بخش تندآب و شیب‌شکن‌ها قرار داشته و بعد از حوضچه آرامش رودخانه انحنای پیدا کرده است. در این محدوده تقریباً بعد از سازه‌های شیب‌شکن، شن‌چاله عمیق فربت با فاصله کمی از رودخانه شروع شده است. در این بخش در قوس خارجی رودخانه فرسایش شدید کناره‌ای مشاهده می‌شود که نهایتاً منجر به شکست ساحل غربی رودخانه می‌شود و در پی آن جهت جریان رودخانه تا حدودی به سمت شن‌چاله منحرف شده و مسبب رسوب‌گذاری مصالح فرسایش یافته دیواره غربی رودخانه در

شن‌چاله است. این فرسایش از کناره سمت راست حوضچه آرامش و دقیقاً بعد از سازه شیب‌شکن شروع شده و تا واسط قوس ادامه داشته و در نهایت پس از شکست دیواره در این محدوده خاتمه می‌یابد. میزان این فرسایش حداکثر تا حدود ۱۳ متر می‌رسد و در نتیجه فرسایش توده‌ای، بر هم خوردن تعادل و واژگونی دیواره ساحلی رودخانه رخ می‌دهد. جنس مصالح تندآب و شیب‌شکن بتنی است. به تبع آن امکان فرسایش در آن ناحیه محدود می‌شود، و در تندآب، سرعت به شدت افزایش یافته و باعث تشدید توان فرسایش‌پذیری رودخانه بعد از سازه‌های مذکور می‌شود. همچنین وجود قوس در آن ناحیه و انحراف جریان رودخانه به سمت قوس خارجی سبب تمرکز بخش اعظمی از جریان و بده در واحد عرض رودخانه در آن ناحیه شده و مزید بر علت فرسایش در ساحل غربی می‌شود.

تغییرات تراز بستر و کناره رودخانه در مقطع (A-A)، که محل دقیق آن در شکل ۱۲ مشخص شده است، در شکل ۱۳ قابل مشاهده است که با ورود جریان به شن‌چاله، از آنجایی که اختلاف ارتفاع بستر رودخانه و کف شن‌چاله زیاد است، در دیواره کناره شن‌چاله، فرسایش ناشی از سقوط جریان آب ملاحظه می‌شود.

♦ وضعیت مسیر جریان رودخانه بعد از شکست دیواره ساحل غربی رودخانه:

بعد از فرسایش ساحل غربی رودخانه بعد از پل بزرگراه فتح در سیل با دوره بازگشت ۲۵ ساله جریان رودخانه به سمت ساحل غربی منحرف شده و بخشی از جریان، از مسیر رودخانه خارج می‌شود که همین امر سبب تحت‌الشعاع قرار گرفتن خطوط جریان رودخانه و افت سطح آب می‌شود و با کاهش سطح آب و به تبع آن عمق جریان رودخانه، در یک بده ثابت سبب افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش قدرت تخریب رودخانه برای بده‌های مشابه می‌شود و از طرفی دیگر با توجه به اینکه اراضی مجاور شن‌چاله کاربری مسکونی و صنعتی دارد، با ورود جریان آب به شن‌چاله، وضعیت پایداری خاک تغییر کرده و تمامی ابنیه مجاور را در خطر قرار می‌دهد.

در شکل ۱۴ توپوگرافی رودخانه و شن‌چاله فربت بعد از

شکست ساحل غربی رودخانه.

در شکل ۱۵ برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله در ابتدای بازه که شامل پل بزرگراه فتح و راه‌آهن تهران تبریز است، به ترتیب ۳/۲ و ۱/۴۲ متر فرسایش مشاهده می‌شود. بعد از سازه تندآب و شیب شکن‌ها سرعت جریان به‌طور چشمگیری تا مقدار ۱۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد و جریان فوق بحرانی تشکیل می‌شود، انرژی جریان در این محدوده زیاد است و همچنین به علت اینکه بستر رودخانه حفاظت نشده و حوضچه آرامش مناسبی برای کاهش سرعت و انرژی چنین جریانی تعبیه نشده است، حجم قابل توجه کف کنی دور از انتظار خواهد بود، که حداکثر فرسایش در خط‌القدر کل بازه مربوط به ناحیه شکست ساحل غربی رودخانه در مجاورت شن‌چاله فریت است و پس از آن، از آنجایی که بخشی از جریان آب وارد شن‌چاله می‌شود، فرسایش کاهش می‌یابد.

در این زمینه Mohebzade Fatahi et al (2013) با استفاده از نرم‌افزار یک‌بعدی HEC-RAS به تحلیل آب‌شستگی محدوده پل راه‌آهن تهران تبریز پرداخت و حداکثر کف کنی ۵/۹۹ متر را برای سیل با دوره بازگشت ۱۱۱ سال گزارش داد، و در این پژوهش حداکثر فرسایش برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بعد از سازه شیب‌شکن ۵/۲۵ متر است. علت این تفاوت علاوه بر بیشتر بودن دوره بازگشت سیلاب در پژوهش فتحی، مدل‌های انتقال رسوب متفاوت و تفاوت در خط‌های احتمالی در حل معادلات عددی در حالت یک و دوبعدی اشاره کرد.

۴- نتیجه‌گیری

رودخانه کن شهر تهران، رودخانه‌ای طغیانی بوده که تاکنون سیلاب‌های عبوری از آن، خسارات زیادی را به رودخانه وارد نموده است.

از این‌رو رودخانه کن شهر تهران با فاصله بسیار کمی در مجاورت شن‌چاله‌های عظیم فریت و خلیج فارس واقع در منطقه ۱۸ تهران، حدفاصل پل راه‌آهن تهران-تبریز تا حدود دو کیلومتر پایین‌تر قرار گرفته است که خود نقطه‌ای بحرانی

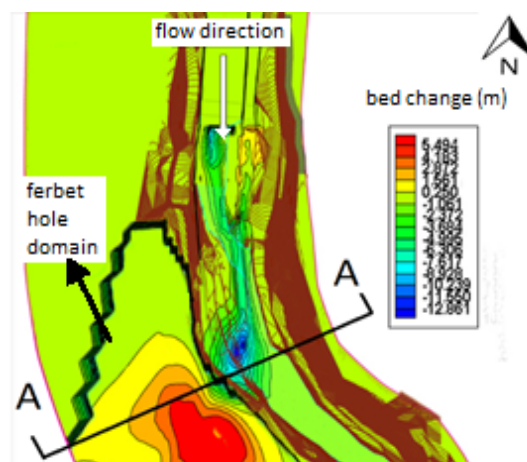


Fig. 12 Bed level change in the second part of the study area in the bank erosion model for floods with a return period of 25 years

شکل ۱۲ تغییر تراز بستر در بخش دوم در مدل فرسایش کناره‌ای برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

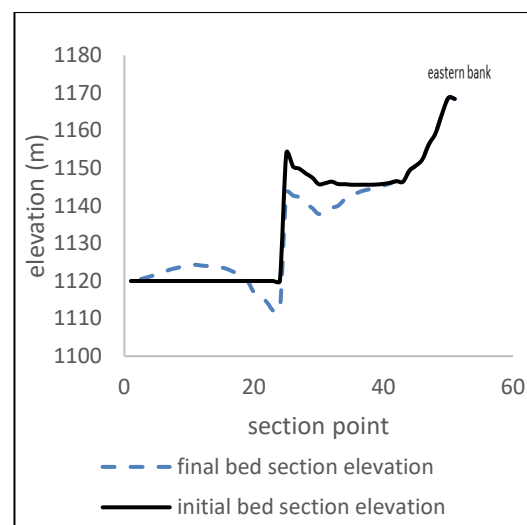


Fig. 13 River bed and bank erosion in section (A-A) for floods with a return period of 25 years

شکل ۱۳ تغییرات تراز بستر و کناره رودخانه در مقطع (A-A) برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

عبور سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال به‌صورت سه‌بعدی مشخص شده است که کف کنی بستر و سواحل و شکست دیوار ساحلی غربی رودخانه در شکل ۱۴-ب) آن کاملاً نمایان است.

♦ وضعیت تراز بستر رودخانه پس از عبور سیلاب و

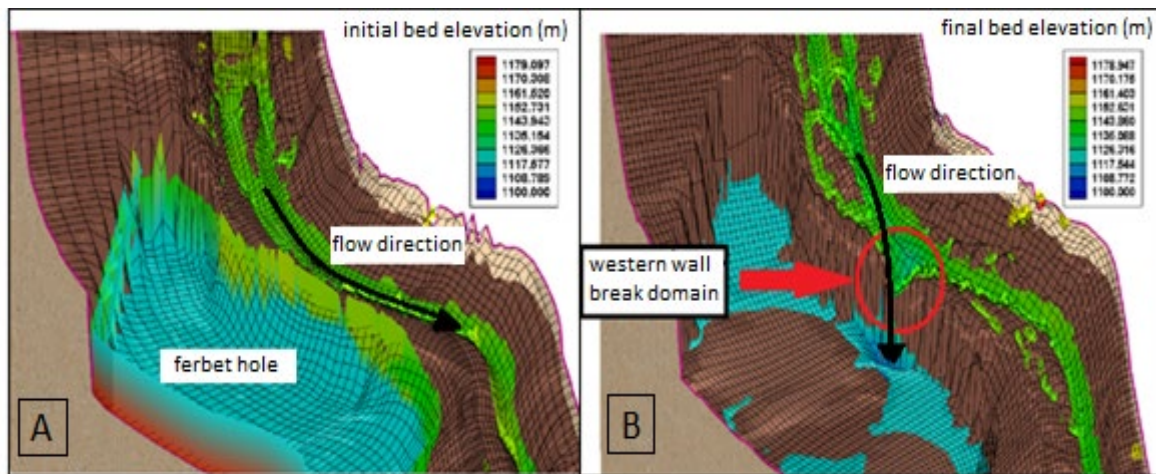


Fig. 14 River bed level ((A): Riverbed level before West Bank failure, (B): Riverbed level after West Bank failure)

شکل ۱۴ تراز بستر رودخانه (شکل (A): تراز بستر رودخانه قبل از شکست ساحل غربی، (B): تراز بستر رودخانه بعد از شکست ساحل غربی)

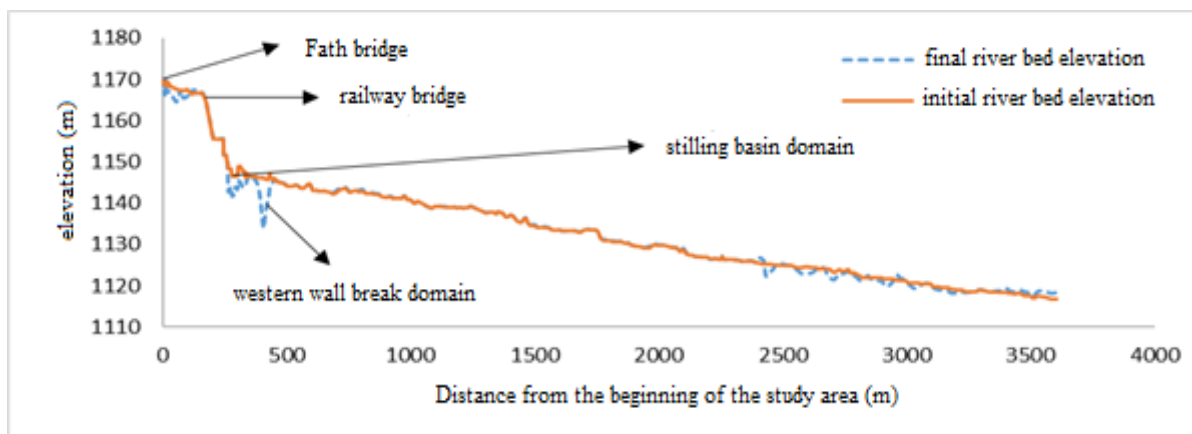


Fig. 15 The final level of the river bed after the flood with a return period of 25 years

شکل ۱۵ تراز نهایی بستر بعد از عبور سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

۱. در حالت غیرماندگار تراز سطح آب تغییرات چشمگیری نسبت به تغییر ضریب مقاومت جریان نداشته و با تغییر حدود ۵۰ درصدی این ضریب تراز سطح آب تنها حدود ۱۰ درصد تغییر می‌کند و از آنجایی که عمق رودخانه در بازه مورد مطالعه چیزی حدود یک متر است، تغییرات حدود ۱۰ سانتی‌متر و ناچیز تلقی می‌شود.

۲. نتایج فرسایش و رسوب‌گذاری در ضرایب زبری مانینگ متفاوت حاکی از یکسان بودن روند کلی فرسایش و

در هنگام عبور سیل تلقی می‌شود و تهدیدی برای سازه‌ها و پل‌های مجاور خود است. زیرا شکست دیواره ساحل غربی رودخانه و ورود آب به شن‌چاله پدیده‌ای بسیار محتمل است که در این پژوهش با استفاده از مدل ریاضی دوبعدی CCHE2D بررسی شد.

در ابتدا حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهایی از جمله ضریب زبری مانینگ و مدل آشفتگی جریان بررسی شد که نتایج آنالیز حساسیت ضریب زبری جریان نسبت به تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی و تغییر تراز بستر رودخانه حاکی از آن بود که:

۴. همچنین با عبور سیلاب، سازه‌های متقاطع با رودخانه از جمله پایه شرقی پل فتح در معرض فرسایش قرار می‌گیرد و باعث کاهش پایداری پل می‌شود که خود تحدیدی برای سلامت پل محسوب می‌شود.

بعد از فرسایش و شکست دیواره ساحلی رودخانه کن در سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال، بخشی از جریان آب به سمت شن‌چاله فریت منحرف می‌شود که در ابتدا باعث ورود آب به شن‌چاله، و تغییر خطوط جریان و کاهش تراز سطح آب در بالا دست نقطه شکست می‌شود که افت تراز سطح آب باعث کاهش عمق جریان، افزایش سرعت و نهایتاً افزایش قدرت فرسایش و کف کنی جریان سیلابی می‌شود و خسارات وارده به رودخانه را دو چندان می‌کند.

رسوب‌گذاری، اما تفاوت فراوان در مقادیر آن است که در شکل ۶ به‌وضوح نمایان است.

۳. تغییرات تراز بستر در حالتی که مدل آشفتگی جریان تغییر نماید نیز بررسی شد که مدل‌های آشفتگی بررسی‌شده در این پژوهش شامل مدل طول اختلاط، لزجت گردابه‌ای سهموی و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ بود که نتایج آن بررسی شد. و نتایج حاکی از آن بود که در هر سه مدل آشفتگی، برای سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال فرسایش کناره‌ای رخ داده و دیوار بین رودخانه و شن چاله تخریب می‌شود.

۵- فهرست علائم

w_{sk}	سرعت ته‌نشینی ذره رسوب با قطر k	BW	عقب‌نشینی دیواره بعد از شکست
z	عمق آب در نقطه مورد نظر (m)	c_k	غلظت در قطر k
β	شیب شکست کناری (درجه)	C_m	مقدار ثابت = $2/34375$
ϵ	نرخ فرسایش کناره‌ای	E_i	مقدار محاسبه‌شده عمق آب در مدل (m)
ϵ_k	نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی	f_{Cor}	ضریب شتاب کوریولیس
ϵ_s	پخشیدگی گردابه‌ای رسوب ($m^{-2}s^{-1}$)	g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
η	تراز ارتفاعی (m)	h	عمق آب (m)
κ	ثابت ون کارمن ^{۱۸}	H	ارتفاع کناره رودخانه (m)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	H'	ارتفاع فاصله‌ای از سطح که فرسایش رخ نداده است (m)
w_{sk}	سرعت ته‌نشینی ذره رسوب با قطر k	k	قطر ذره (m)
z	عمق آب در نقطه مورد نظر (m)	K	انرژی جنبشی جریان آشفته (kgm^2s^{-2})
β	شیب شکست کناری (درجه)	m	نرخ اولیه فرسایش کناره‌ای
ϵ	نرخ فرسایش کناره‌ای	$M.A.P.$	میانگین درصد خطای مطلق
v_t	ضریب لزجت گردابه‌ای ($m^{-2}s^{-1}$)	O_i	مقدار عمق جریان مشاهده‌شده در طبیعت (m)
ρ	چگالی (kgm^{-3})	$R.M.S.l$	شاخص جذر میانگین مربع خطا
σ_s	طول اختلاط پرانتل	t	زمان (s)
τ	تنش برشی ($kgm^{-1}s^{-2}$)	u	سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای محور طول (X) ($m^{-1}s^{-1}$)
τ_c	تنش برشی بحرانی ($kgm^{-1}s^{-2}$)	u^*	سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای محور طول (X) ($m^{-1}s^{-1}$)
τ_{by}, τ_{bx}	تنش‌های برشی فصل مشترک بستر و جریان در راستای X و Y ($kgm^{-1}s^{-2}$)	v	سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای محور عرض (Y) ($m^{-1}s^{-1}$)

¹⁸ Von Karman

Geoinformation. 73: 428-437.

Jia, Y. 2013 Technical manual of CCHE2D. National Center for Computational Hydroscience of Engineering.

Jabari, A., Fazeli, S. 2014. Numerical modeling of upward erosion control of the Fath Bridge area on the Kan River. 2nd National Conference on Flood Management and Engineering with an Approach to Urban Floods with an Approach to Urban Floods. *Tehran, Permanent Secretariat of the National Conference on Flood Management*. (In Persian)

https://www.civilica.com/Paper-IFMC02/IFMC02_016.html

Jugie, M., Gob F., Vermoux, C., Brunstein, D., Tamisier, V., Le Coeur, C. Grancher, D. 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of hydrology*. 563: 418-434.

Lai, Y.G., Thomas, R.E., Ozeren, Y., Simon, A., Greimann, B.P., Wu, K. (2015). Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model. *Geomorphology*. 243: 116-129.

Maghsoudi, N., Kouchakzadeh, S. (2017). Free surface flow hydraulics, volume 1: steady one dimensional flows. University of Tehran press, 8th edition. (In Persian)

Mahab Ghods Consulting Engineering Company. (2011). Comprehensive plan for surface water management in Tehran. Volume 2: Basic Studies, Part 2: Uplands Flood Hydrology and sediment load. (In Persian)

Mohebzadefatahi, A., Mohebzadefatahi, Y. (2013). Application of GIS and RS in hydraulic and hydrological studies of river bridges Case study: Tehran - Tabriz railway axis bridge. International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development, Tabriz, Iran

Osman, A. M., and C. R. Thorne. 1988. Riverbank stability analysis: I. Theory. *J. Hydraulic Eng.* 114(2): 134-150.

Salehi Neyshabouri S. A., Ghodsian, M. 2005. Guidline on sand and Gravel Mining from Rivers. Publication 336 of the Management and Planning Organization of the country. (In Persian)

<https://sama.mporg.ir/sites/publish/zabtehdoc/code336.pdf>

۶- منابع ها References

Abhari Rasht Abadi, M., Torabi, O., Tajrishi, M. 2015. Hydraulic simulation of the effects of structures on the morphology of urban rivers by HEC-RAS software Case study of Kan River. 10th international congress on Civil Engineering. *University of Tabriz*. (In Persian)

https://www.civilica.com/Paper-ICCE10-ICCE10_0503.html

Abidin, R.Z., Sulaiman, M.S., Yusoff, N. 2017. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia. *International Soil and Water Conservation Research*. 5(1): 26-35.

Allahverdy Yamooty, N. (2019). An investigation of the flood event effect on river bed and banks morphology using the 2D mathematical model (case study: Kan River in Tehran), MSc thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiyat Modarres University, 180p. (In Persian)

Allahverdy Yamooty, N., Ayyoubzadeh, S.A. (2019). Investigation of sensitivity of flow parameters alternation by changing roughness coefficient and turbulence model in kan river in Fath bridge region, using CCHE2D mathematical model, 11th International River Engineering Conference, Ahvaz, Iran. (In Persian)

Bi, N., Sun, Z., Wang, H., Wu, X., Fan, Y., Xu, C., Yang, Z. (2019). Response of channel scouring and deposition to the regulation of large reservoirs: A case study of the lower reaches of the Yellow River (Huanghe). *Journal of Hydrology*. 568: 972-984.

Dai, Z., Mei, X., Darby, S.E., Lou, Y., Li, W. (2018). Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system. *Journal of hydrology*. 566. 719-734.

Gao, P., Li, Z., Yang, H. (2021). Variable discharges control composite bank erosion in Zoige meandering rivers. *Journal of Catena*. Volume 204. **105384**.

Hashemian, S.J. And Rezaei, A. And Moradi, M. And Mohammadipour, M. And Creators, M. 2012. Quality monitoring of Kan river water in the old bridge stations of Kan (water intake place) and Tehran refinery overflow. *Tehran Engineering and Technical consulting Organization*. (In Persian)

Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., De Jong, S.M. 2018. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery: A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and*

chamran university of Ahvaz, p584. (In Persian)

Zayeri, M, R., Shafai Bajestan, M. 2018. Investigating the effect of meander removal on the flow and sediment pattern of Karun River using CCHE2D model. *Journal of Water Resources Engineering*. (In Persian)

Saze Pardazi Iran Consulting Engineers, Studies of the second phase of organizing the Kan River in the area of Fath Bridges. *Tehran Engineering and Technical consulting Organization*. (In Persian)

Shafai Bajestan, M. (2013). Basic theory and practice of Hydraulics of sediment transport, Shahid