



## The Impacts of Sediment Transport on the Width of Ajichai River Flood Zoning

Meysam Azhideh<sup>a</sup>, Mohammad Taghi Aalami<sup>b</sup>, Habibeh Abbasi<sup>c\*</sup>, Leila Malekani<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MA Student, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>b</sup> Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>c</sup> Assistant Professor, Department of civil Engineering, Marand Faculty of Technical and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 10 January 2022

Revised: 7 March 2022

Accepted: 6 April 2022

### Abstract

Flood zoning maps are among the basic and important sources of information for studying development projects in the world. In the conventional method of determining flood zoning maps, calculations are performed on the basis of a steady flow, assuming a fixed bed (without considering sediment transport). This study aimed to investigate the impact of river erosion and sediment transport on river flood zoning. So, the flood zoning calculations of Ajichai River were done using HEC-RAS model and the conventional method of steady flow with a fixed bed. In the next step, flood zoning calculations were performed using quasi-steady flow with moving bed and compared with the results of the previous step to determine the impacts of sediment transport on flood zoning. Comparison between the results obtained from steady flow (fixed bed) and quasi-steady flow with moving bed showed that in sedimentation sections, the width of the water surface increases in the flow mode with moving bed. The maximum rate of this increase in width is 19%. In other words, in the mentioned river, the width of flood zoning is less in the conventional method. This issue confirms the necessity of studying the river conditions in terms of erosion and sedimentation so that the amount of flood zone could be determined more accurately while the river is sedimentary. The increase of flood zone in sedimentation sections is due to the accumulation of sediments and consequently the increase of flow level and width of flood zonation. Therefore, it is suggested that in sedimentary rivers, a quasi-steady flow model (mobile bed) be used to prepare flood zoning maps for providing more safety.

**Keywords:** Flood Zoning, Sediment Transport, Fixed Bed, Moveable Bed, HEC-RAS Model

\* Corresponding author: Habibeh Abbasi E-mail: h.abbasi@tabrizu.ac.ir Tel: + 989144057725

**How to cite this Article:** Azhideh, M., Aalami, M. T., Abbasi, H., & Malekani, L. (2023). The impacts of sediment transport on the width of Ajichai River flood zoning. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 63-85.

DOI: 10.22067/geoh.2022.74540.1152





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

## Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 1 - Number 45, Spring 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74540.1152>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارهٔ چهل و پنجم، بهار ۱۴۰۲، صص ۸۵-۶۳

مقاله پژوهشی

### تأثیر انتقال رسوب در عرض پهنه‌بندی سیلاب رودخانه آجی‌چای

میثم آژیده - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز، تبریز

محمدتقی اعلمی - استاد گروه آب دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

حبیبه عباسی<sup>۱</sup> - استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز

لیلا ملکانی - استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱/۱۷

#### چکیده

نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، یکی از اطلاعات پایه و مهم در مطالعات طرح‌های عمرانی در جهان محسوب می‌شوند. در روش مرسوم تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، محاسبات بر اساس جریان دائمی با فرض بستر ثابت (بدون در نظر گرفتن انتقال رسوب) انجام می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر فرسایش و انتقال رسوب رودخانه بر روی پهنه‌بندی سیلاب رودخانه‌ها است. در این راستا محاسبات پهنه‌بندی سیلاب رودخانه آجی‌چای در مدل HEC-RAS در حالت مرسوم (جریان دائمی با بستر ثابت) محاسبه گردید. در گام بعدی، محاسبات پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از جریان شبه غیردائمی با بستر متحرک انجام شد و با نتایج حاصل از مرحله قبل مقایسه گردید تا میزان تأثیر انتقال رسوب در پهنه‌بندی سیلاب مشخص گردد. مقایسه بین نتایج به دست آمده در دو حالت جریان دائمی (بستر ثابت) و جریان شبه‌دائمی با بستر متحرک نشان داد که در مقاطع رسوب‌گذار، عرض سطح آب در حالت جریان با بستر متحرک افزایش می‌یابد. بیشترین میزان این افزایش

Email: [h.abbasi@tabrizu.ac.ir](mailto:h.abbasi@tabrizu.ac.ir)

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۰۵۷۷۲۵

نحوه ارجاع به این مقاله:

آژیده، میثم؛ اعلمی، محمدتقی؛ عباسی، حبیبه؛ ملکانی، لیلا. (۱۴۰۲). تأثیر انتقال رسوب در عرض پهنه‌بندی سیلاب رودخانه آجی‌چای.

جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۲(۱). صص ۸۵-۶۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74540.1152>

عرض، ۱۹ درصد است؛ به عبارت دیگر در رودخانه مذکور، عرض پهنه‌بندی سیلاب در روش مرسوم کمتر محاسبه می‌شود. این موضوع ضرورت بررسی شرایط رودخانه از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری را تأیید می‌نماید تا زمانی که رودخانه حالت رسوب‌گذاری دارد میزان پهنه سیلاب با دقت بیشتری تعیین شود. افزایش پهنه سیلاب در مقاطع رسوب‌گذار، به دلیل انباشت رسوبات در مقطع و به دنبال آن افزایش سطح جریان و عرض پهنه‌بندی سیل است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در رودخانه‌های رسوب‌گذار از مدل شبه غیردائمی (بستر متحرک) جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب جهت تأمین ایمنی بیشتر استفاده شود. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت ریخت‌شناسی رودخانه در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب رودخانه‌ها به منظور مدیریت سیل است.

**کلیدواژه‌ها:** پهنه‌بندی سیلاب، انتقال رسوب، بستر ثابت، بستر متحرک، مدل HEC-RAS

#### ۱- مقدمه

به‌منظور برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری بهینه و کنترل پدیده سیل که از مسائل مهم دنیا و کشور ما نیز هست، مطالعات و تحقیقات زیادی مورد نیاز است. دشت‌های سیلابی به دلیل وجود منابع مختلف از اهمیت زیادی برخوردارند و همواره مورد توجه جوامع بشری قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر رشد شهرهایی که در حاشیه رودخانه‌ها قرار دارد رو به فزونی گذاشته است. رشد روزافزون جمعیت و عدم توجه به ظرفیت‌های محیط و استفاده نامناسب از منابع، باعث گسترش خسارات به جوامع مذکور شده و همین مسئله لزوم اعمال مدیریت در سیلاب دشت‌ها را آشکار می‌سازد. اولین گام در طرح‌های مدیریتی سیلاب و دشت‌های سیلابی تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل است. از موارد کاربرد این نقشه‌ها می‌توان به تعیین بستر و حریم رودخانه‌ها، مطالعه و توجیه اقتصادی طرح‌های عمرانی، پیش‌بینی و هشدار سیل، عملیات امداد و نجات و بیمه سیل اشاره نمود (برخوردار و چاوشیان، ۱۳۷۹).

در خصوص پهنه‌بندی و شناسایی نواحی سیلاب‌گیر با فرض بستر ثابت مطالعاتی در سطح جهان و ایران صورت گرفته است. **قمی اوپلی و همکاران (۱۳۸۹)**، اقدام به پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل HEC-RAS در رودخانه کارون حد فاصل بند قیر تا اهواز کردند. برای این منظور آن‌ها در مسیر مورد نظر با استفاده از روش هیدروگراف واحد و شاخص سیلاب، هیدروگراف سیل خروجی در بالا دست حوضه و زیر حوضه‌های موجود را به دست آوردند و در طول ۴۳ کیلومتر از رودخانه ۴۴ مقطع ترسیم نمودند و حداکثر رقوم تراز آب را در مقاطع معین برای دوره بازگشت‌های معین به دست آوردند و محدوده و میزان اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی را که در صورت وقوع سیل به مخاطره خواهند افتاد، محاسبه کردند. **غفاری و امینی (۱۳۸۹)**، به پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از امکانات مدل HEC-RAS و

نرم‌افزار ArcView و الحاقیه HEC-GeoRAS در بازه‌ای به طول ۴/۵ کیلومتر از رودخانه قزل‌اوزن پرداختند. کوک و مرود<sup>۱</sup> (۲۰۰۹)، تأثیر اطلاعات توپوگرافی را روی نقشه‌های سیلاب با مدل HEC-RAS و نرم‌افزار FESWMS مورد مطالعه قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که مدل HEC-RAS نسبت به مدل FESWMS بهتر می‌تواند پهنه‌بندی سیلاب را پیش‌بینی نماید. در مطالعه‌ای که در حوضه آبریز رودخانه Sembrong واقع در Batu Pahat انجام شد با استفاده از مدل HEC-RAS میزان افزایش سطح آب به ازای ۷ دبی با فرض جریان یک‌بعدی و بستر ثابت شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که آب با حداکثر دبی ۲۴ مترمکعب بر ثانیه به دشت سیلابی سرریز می‌شود؛ همچنین از ۳۳ ایستگاه از ۶۵ ایستگاه قادر به تطبیق حداکثر دبی نبوده و در نتیجه منجر به سیل می‌شود. شبیه‌سازی مدل هیدرولیک رودخانه به‌وضوح نشان داد که نتایج قابل‌اعتمادتر هستند و منطقه آسیب‌دیده را می‌توان به‌راحتی شناسایی کرد (محمد راضی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). حسن زاده و همکاران (۱۴۰۰)، نقش مدل‌های هیدرولوژیکی در GIS و اطلاعات میدانی به‌عنوان اطلاعات مردمی در پهنه‌بندی سیلاب و آب‌گرفتگی ناشی از وقوع سیل در شهر بردسیر، در استان کرمان، بررسی کردند. نقشه محدودۀ آب‌گرفتگی در شهر با استفاده از مدل HEC-RAS و اطلاعات میدانی تهیه شد. مقایسه نقشه محدودۀ آب‌گرفتگی تولیدشده توسط مدل و اطلاعات میدانی با اطلاعات واقعی، به ترتیب صحت کلی ۵۹/۱۶ درصد و ۸۰/۰۷ درصد است که صحت بیشتر اطلاعات میدانی در تعیین محدودۀ آب‌گرفتگی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد؛ اما با ترکیب خروجی مدل با اطلاعات میدانی، صحت نقشه ترکیبی در مقایسه با داده‌های واقعی به ۸۰/۲۷ درصد افزایش یافت که این مطلب نشان‌دهندۀ تأثیر اطلاعات میدانی در مدیریت خطر سیل است. پورنبی و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از مدل HEC-RAS پهنه سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله رودخانه چشمه‌کیله شهرستان تنکابن را به دست آوردند. دارای پهنه‌های وسیع حاشیه رودخانه است. بیشترین سطح سیلابی مربوط به اراضی زراعی به وسعت ۲۴/۶ هکتار است و بعد از آن اراضی مسکونی با وسعت ۹۴/۳ هکتار، جنگلی ۹۲/۲ هکتار و باغی ۸ هکتار است. سلمان<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، مطالعه‌ای بر روی نارای‌درین حیات‌آباد پیشاور انجام دادند تا نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب را با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS و HEC-RAS تهیه کنند. در این منطقه در سال ۲۰۱۰ سیل فاجعه‌بار رخ داده بود و باعث آب‌گرفتگی شده بود و خسارات زیادی به اموال عمومی، دام، ارتباطات و زیرساخت‌ها وارد کرده بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در قسمت بالادست منطقه نارای‌درین، بیشتر منطقه‌ای که در نزدیکی منطقه سیل قرار گرفته است

1 Cook and Mervade

2 Mohammad Razi

3 Salman

برای یک دوره بازگشت ۱۰۰ ساله ایمن بوده است؛ درحالی که پایین دست منطقه حتی برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ ساله آسیب پذیر است. در تمام مطالعات اشاره شده از بستر ثابت برای پهنه بندی سیلاب استفاده شده است. در خصوص شناسایی مناطق رسوب گذار و فرسایش پذیر رودخانه ها مطالعات زیادی انجام شده است؛ اما در هیچ یک از این مطالعات به بررسی اثر فرسایش پذیری و رسوب گذاری رودخانه در پهنه سیلاب رودخانه پرداخته نشده است. از جمله این مطالعات، تیموری و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده از مدل HEC-RAS به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه شاهرود پرداختند. دبی با دوره بازگشت های مختلف برای شبیه سازی هیدرولیکی رودخانه مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مدل برای دبی ۲۵ ساله اجرا گردید. بعد از واسنجی مدل برای شرایط هیدرولیکی رودخانه و مدل سازی شرایط جریان شبه غیرماندگار اطلاعات شرایط مرزی و عمق نرمال به مدل معرفی شد و با استفاده از رابطه های انتقال رسوب، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه شاهرود محاسبه شد. مقایسه بین نتایج به دست آمده و داده های اندازه گیری شده نشان داد که معادله ایگز-وایت با داشتن متوسط خطای ۱۶ درصد در بازه مورد بررسی نسبت به سایر توابع برآورد بهتری دارد. جوشی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، مدل HEC-RAS را برای توسعه یک تحلیل هیدرولیکی مدل انتقال رسوب رودخانه Maumee استفاده کردند. کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل با اعمال توابع مختلف انتقال رسوب و ضریب زبری مانینگ انجام گردید. خروجی مدل، الگوی تغییر بستر و همچنین قسمت هایی از رودخانه را نشان می دهد که با فرسایش یا رسوب صورت گرفته در رودخانه مطابقت دارند. آن ها به این نتیجه رسیدند که خروجی مدل همراه با دانش محلی می تواند به کاهش مشکل ناشی از رسوب کمک کند. گیمیری<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از مدل HEC-RAS، نیاز به لایروبی در بخشی از رودخانه اوهایو را که حفاری شده است، تجزیه و تحلیل نمودند. یک روند قابل توجه در رسوب گذاری در منطقه حفاری شده این است که تقریباً نیمی از رسوب پیش بینی شده درازمدت در شش ماه اول رخ می دهد. نتایج مطالعات نشان می دهد که راندمان به دام انداختن بار رسوب حمل شده از روند مشابهی پیروی می کند که از کمتر از ۱۰٪ شروع می شود و در عرض نیم سال به ۱٪ کاهش می یابد. نتایج این تجزیه و تحلیل برای سایر عملیات لایروبی نیز مفید است. بیشتر رودخانه های نپال بار رسوب بالایی دارند؛ اما تا به امروز هیچ تلاشی برای شبیه سازی انتقال رسوب و الگوی رسوب آن در پروژه های ساخت مخزن سد در نپال صورت نگرفته است؛ رگمی<sup>۳</sup> (۲۰۲۱)، از مدل عددی HEC-RAS برای شبیه سازی استفاده نمود. نتایج مدل، رسوب گذاری شدید را در منطقه ۶۰ تا

1 Joshi

2 Ghimire

3 Regmi

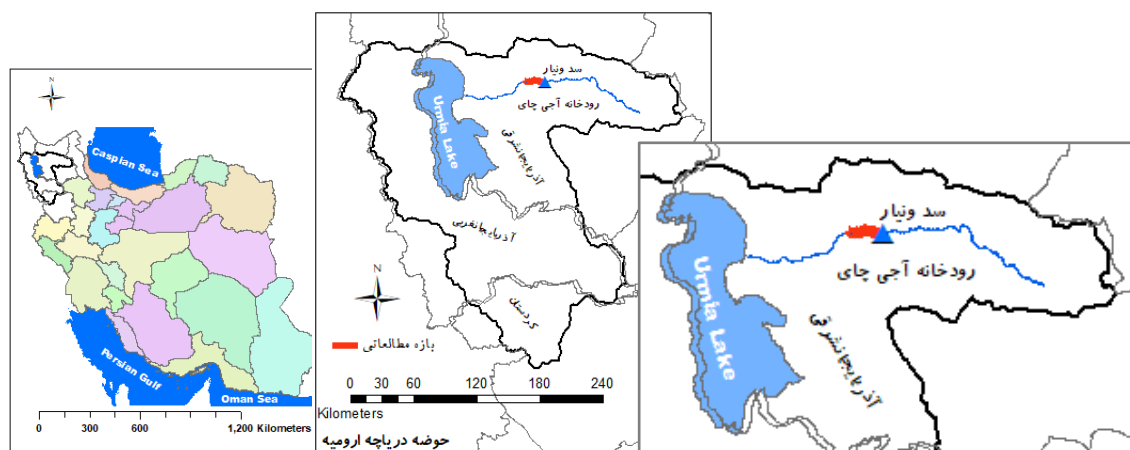
۱۱۵ کیلومتری بالادست سد با بالاترین عمق رسوب در حدود ۴۲ متر تا ۱۲۴ متر برای سیلاب‌های ۱۰ تا ۱۰۰ ساله نشان داد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در مورد تأثیر انتقال رسوب بر پهنه‌بندی سیلاب رودخانه‌ها مطالعه‌ای صورت نگرفته است و مطالعات انجام شده بدون در نظر گرفتن تأثیر انتقال رسوب (بستر ثابت) بوده است، در حالی که رودخانه‌ها سیستم‌های دینامیک هستند و ریخت‌شناسی آن‌ها بر اثر انتقال رسوب و عوامل دیگر تغییر می‌کند، لازم است تا در محاسبات پهنه‌بندی سیلاب عامل مهم انتقال رسوب (بستر متحرک) در نظر گرفته شود. در این تحقیق پهنه‌بندی سیلاب بازه مطالعاتی با استفاده از ترکیب نرم‌افزارهای HEC-RAS و HEC-GeoRAS در دو حالت جریان دائمی (با بستر ثابت) و جریان در حالت انتقال رسوب (با بستر متحرک) محاسبه شده و با هم مقایسه خواهد شد تا تأثیر در نظر گرفتن انتقال رسوب در پهنه‌بندی سیلاب بیشتر بررسی شود. بر این اساس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رودخانه آجی‌چای از پایین‌دست سد و نیارب به طول ۹ کیلومتر و با استفاده از الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط ArcMap اطلاعات لازم استخراج شده و در مدل HEC-RAS استفاده خواهد شد. جریان در دو حالت دائمی و انتقال رسوب شبیه‌سازی خواهد شد تا تأثیر انتقال رسوب بر پهنه‌بندی سیلاب مشخص شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه آجی‌چای مهم‌ترین حوضه آبریز بخش شرقی دریاچه ارومیه بوده و بین عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی واقع شده است. این رودخانه از دامنه‌های جنوبی سبلان با حداکثر ارتفاع ۳۸۸۲ متر از سطح دریا سرچشمه گرفته و با پیوستن شاخه‌هایی از ارتفاعات بزقوش در جنوب سراب و سهند به آن، در جنوب تبریز پس از عبور از پل خورخور در محل تلاقی با جاده جزیره اسلامی وارد دریاچه ارومیه می‌شود. محدوده مورد مطالعه از پایین‌دست سد و نیارب به طول ۹ کیلومتر از رودخانه آجی‌چای را شامل می‌شود. رودخانه در این محدوده مسیری کوهستانی با بستری از گراول و قلوه‌سنگ پراکنده است. شکل (۱) موقعیت رودخانه آجی‌چای در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت رودخانه آجی چای در محدوده مطالعاتی

## ۲-۲- معرفی مدل HEC-RAS

برنامه کامپیوتری HEC-2 در سال ۱۹۶۴ جهت محاسبه پروفیل‌های سطح آب در مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا نوشته شد. این مدل قادر به حل همزمان معادله انرژی و مومنت جهت تعیین محل جهش هیدرولیکی نبود. در سال ۱۹۷۷ مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا مدل تکمیل یافته به نام (River Analysis System) ارائه نمود. این مدل محاسبات پروفیل سطح آب را برای جریان متغیر تدریجی در حالت دائمی و غیردائمی در رودخانه‌ها و یا آبراهه‌های مصنوعی انجام می‌دهد و قادر است پروفیل سطح آب را در حالت جریان زیربحرانی و یا فوق‌بحرانی محاسبه نماید. مدل HEC-RAS در آخرین نگارش خود علاوه بر قابلیت‌های قبلی توانایی تحلیل فرآیند رسوب، فرسایش و کیفیت را نیز داراست. جهت استخراج داده‌های مورد نیاز مدل HEC-RAS از نقشه‌های توپوگرافی رودخانه، الحاقیه-HEC GeoRAS در محیط ArcGIS طراحی شده است. در این مقاله از شبیه‌سازی جریان دائمی و انتقال رسوب جریان در مدل HEC-RAS4 استفاده شده است که در ادامه معادلات اساسی مربوطه و ورودی‌های مدل در هر یک توضیح داده شده است.

### ۲-۲-۱- جریان دائمی (بستر ثابت)

اگر در یک مقطع، عوامل هیدرولیکی جریان مانند بده، سرعت و عمق جریان ثابت باشد، جریان دائم و در غیر این صورت جریان غیردائم است. معمولاً جریان در رودخانه، به علت تغییرات زمانی بده جریان، غیردائم است ولی بعضاً جریان غیردائمی سیلاب با محاسبات جریان دائم تقریب زده می‌شود.

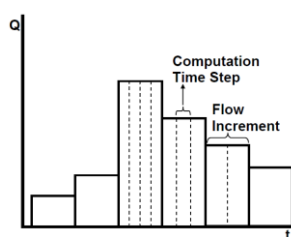
### ۲-۲-۲- انتقال رسوب (بستر متحرک)

با وجود تحقیقات زیادی که در زمینه انتقال رسوبات انجام شده است، هنوز پیش‌بینی دبی رسوبات رودخانه با درجه اطمینان بالا و رضایت‌بخش برای اهداف مهندسی امکان‌پذیر نیست. همچنین هنوز پیش‌بینی صریح و روشن وقایعی مانند افزایش یا کاهش تراز بستر در اثر احداث یک سد امکان‌پذیر نیست. از آنجایی که بستر کانال تابع متغیری از زمان و مکان است، بنابراین مطالعه جریان در یک آبراهه موضوع به نسبت دشواری بوده و حرکت رسوبات که عامل وجودی بستر کانال است، نماینده پیچیده‌ای است. برای اطلاعات بیشتر در مورد معادلات انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در نرم‌افزار HEC-RAS به راهنمای مدل مراجعه شود.

### ۲-۲-۳- جریان شبه غیرماندگار

در نرم‌افزار HEC-RAS سری پیوسته جریان به قطعه‌های جریان ماندگار بر اساس متغیرهای دبی و زمان تقسیم می‌شود (شکل ۲). برای هر یک از قطعه‌های جریان ماندگار، پروفیل سطح آب محاسبه می‌گردد و با استفاده از آن سرعت، شیب انرژی، عمق و سایر پارامترها در هر یک از مقاطع عرضی به دست می‌آید. نرخ انتقال رسوب در هر یک از مقاطع محاسبه می‌گردد. این نرخ نشان‌دهنده میزان رسوب انتقالی از هر مقطع در طول زمان است. سپس میزان رسوب‌گذاری و یا فرسایش در هر یک از مقاطع محاسبه خواهد شد و با استفاده از آن، تغییرات حاصل در مقاطع هندسی برای بازه زمانی مربوطه به دست خواهد آمد. در مرحله بعد، همین روند محاسباتی برای بازه زمانی بعدی تکرار خواهد شد. این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان و رسوب در شبکه رودخانه‌ها را نیز دارد. برای محاسبه نرخ انتقال رسوب، روابط مختلفی در مدل پیش‌بینی شده است تا کاربر رابطه مناسب برای رودخانه مورد مطالعه را از میان آن‌ها انتخاب کند. این مدل بر اساس معادلات جریان و انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک‌بعدی و فرض جریان شبه غیرماندگار توسعه یافته است (برونر<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۰۵).



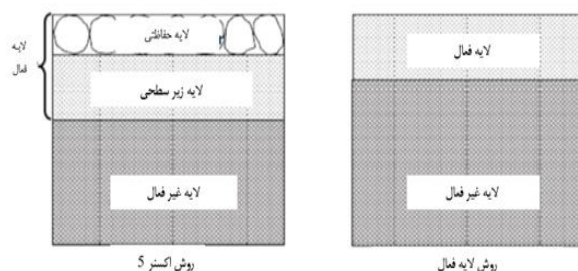


شکل ۲- تقسیم‌بندی شبه ماندگار جریان

### ۲-۲-۴- لایه‌بندی بستر

مدل HEC-RAS محاسبات انتقال رسوب را بر اساس دانه‌بندی مواد بستر انجام می‌دهد. بنابراین ذرات با اندازه‌های مختلف دارای شدت انتقال متفاوت خواهند بود. بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و توزیع رسوبات ورودی و ترکیب مواد بستری، برخی ذرات ممکن است فرسایش یابند، در صورتی که برخی دیگر ممکن است رسوب نموده و یا غیرقابل حرکت شوند. بنابراین تحولات مختلفی ممکن است اتفاق بیفتد. به‌عنوان مثال تمام ذرات ریزتر ممکن است فرسایش یافته و لایه با ذرات درشت‌تر را که جریان قدرت حمل آن‌ها را ندارد، ترک نماید. تحت این شرایط هیدرولیکی، فرسایش بیشتری رخ نداده و در اصطلاح سپر حفاظتی در بستر تشکیل می‌شود. این سپر حفاظتی از آبستگي مصالح زیری بستر جلوگیری می‌کند و رسوب قابل حمل فقط به مقدار رسوب ورودی به قطعه مورد نظر محدود می‌شود. به‌هرحال تحت شرایط هیدرولیکی بعدی نظیر افزایش سرعت جریان ممکن است که قدرت فرسایشی جریان افزایش یافته و سپر حفاظتی در معرض فرسایش قرار گیرد.

نرم‌افزار HEC-RAS از دو روش لایه فعال و اکسنر ۵ استفاده می‌کند که در شکل (۳) نشان داده شده است. در روش لایه فعال، ترکیب بستر رودخانه به‌وسیله تقسیم بستر به دو لایه فرضی انجام می‌پذیرد. لایه بالایی که شامل موادی از بستر است که آماده انتقال می‌باشند لایه فعال نامیده می‌شود. زیر لایه فعال لایه غیرفعال است. زیر این دو لایه بستر دست‌نخورده با ترکیب مواد بستر اولیه است. در روش اکسنر ۵ از مفهوم سپر حفاظتی استفاده نموده و لایه فعال به دو بخش، لایه حفاظتی و لایه زیرسطحی تقسیم می‌شود (شکل ۳). فرسایش و رسوب در لایه حفاظتی انجام می‌شود. در محاسبه ظرفیت انتقال رسوب از ترکیب دو لایه استفاده می‌کند (دومیتریسوا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲).

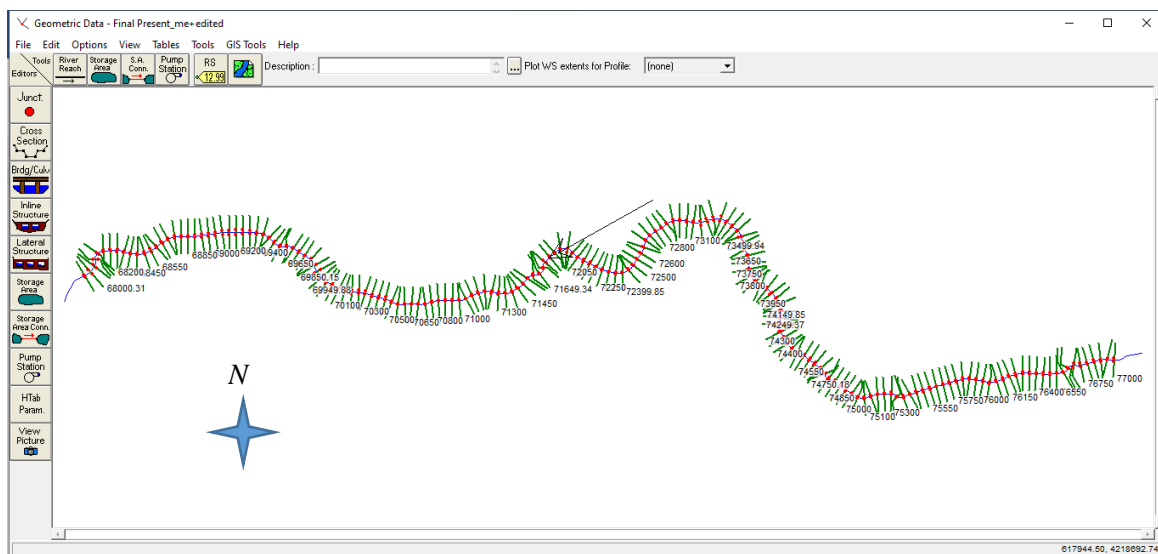


شکل ۳- لایه‌بندی بستر: روش لایه فعال و روش اکستر ۵

### ۳-۲- داده‌های مورد نیاز مدل

برای بررسی پهنه‌بندی سیلاب رودخانه آجی‌چای لازم است تا محاسبات هیدرولیکی برای رودخانه آجی‌چای صورت پذیرد. در این تحقیق از مدل HEC-RAS با شرایط جریان دائمی و شرایط جریان با لحاظ فرسایش و رسوب استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از آنها با هم مقایسه خواهد شد. برای تهیه مدل هیدرولیکی به اطلاعات زیر نیاز است:

- مقاطع عرضی رودخانه: اطلاعات هندسی و مقاطع عرضی رودخانه آجی‌چای در محیط GIS و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS از روی شبکه نامنظم مثلثی تهیه شده، استخراج شده است. در ساخت شبکه نامنظم مثلثی از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰ در بستر رودخانه و ۱:۲۰۰۰ در سیلابدشت رودخانه استفاده شده است. تعداد مقاطع عرضی استخراج شده ۱۸۲ عدد است (شکل ۴).



شکل ۴- مقاطع عرضی رودخانه در منطقه مورد مطالعه

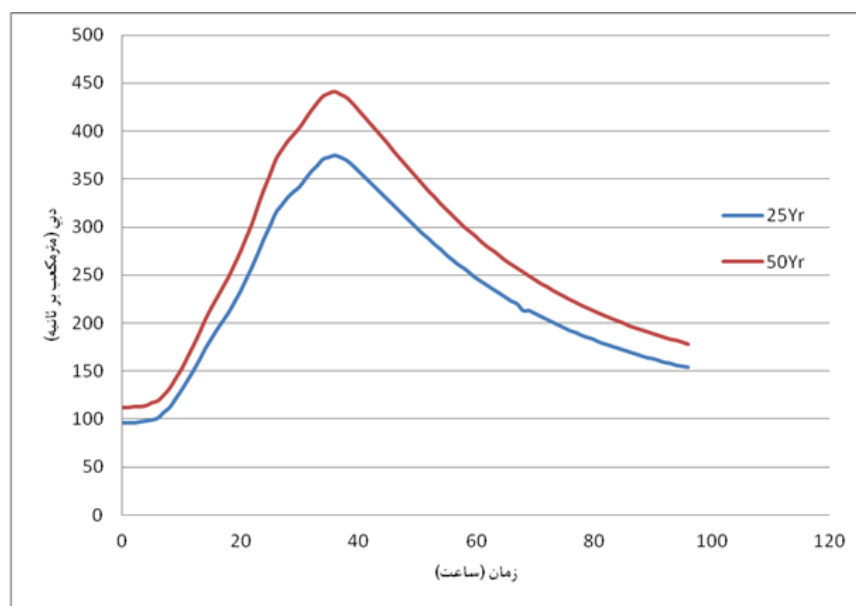
- ضریب زبری کانال اصلی و سیلابدشت: ضریب زبری به عنوان مشخصه زبری هیدرولیکی جریان انتخاب می گردد. با توجه به مشخص بودن دانه بندی مصالح بستر در چندین نقطه از رودخانه و محدوده اندازه دانه ها، از معادله استریکلر برای تعیین این پارامتر استفاده شده است (چاو<sup>۱</sup> ۱۹۵۹). در نهایت با در نظر گرفتن نوع کاربری اراضی حاشیه رودخانه و تراکم پوشش گیاهی منطقه، به مقادیر ضریب زبری افزوده گردید. ضریب زبری در کانال اصلی ۰/۰۳۵ و در سیلابدشت ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.
- شرایط مرزی و مقادیر دبی سیلاب با دوره بازگشت های ۲۵ و ۵۰ ساله: حل عددی معادلات دیفرانسیل جریان یک بعدی (معادلات سنت ونانت) مستلزم داشتن شرایط مرزی در مرز فیزیکی بالادست و پایین دست رودخانه است. در تحلیل جریان دائمی شرط مرزی عمق نرمال در بالادست ( $S=0.01$ ) و پایین دست ( $S=0.001$ ) انتخاب شده است، برای این کار فرض گردید که شیب گرادیان هیدرولیکی با شیب پروفیل طولی رودخانه یکسان بوده که در نتیجه برای معرفی این پارامتر از شیب پروفیل طولی رودخانه استفاده شد. رژیم جریان مختلط است.

جدول ۱- مقادیر دبی جریان رودخانه آبی چای

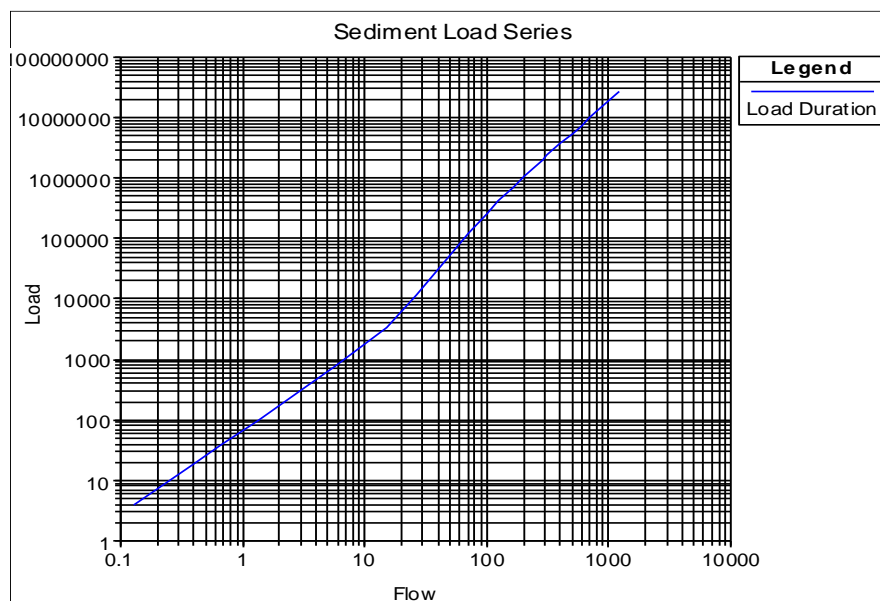
دوره بازگشت (سال)	۲۵	۵۰
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	۳۷۵	۴۴۱

هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ ساله برای به‌عنوان شرط مرزی بالادست و عمق نرمال به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست در حالت جریان شبه غیردائمی استفاده شده است. هیدروگراف جریان ورودی، با توجه به داده‌های ایستگاه هیدرومتری و نیار استخراج شده است که در شکل (۵) آورده شده است.

- اطلاعات رسوب شامل دانه‌بندی مواد بستری، منحنی سنجه رسوب و دمای آب: دانه‌بندی مواد بستری در ۷ نقطه از رودخانه در اعماق ۰/۷ تا ۱ متر استخراج شده است. در مورد منحنی سنجه رسوب از داده‌های مربوط به ایستگاه هیدرومتری و نیار استفاده شده است که نمودار آن در شکل (۶) ارائه شده است. دمای آب ۱۰ درجه سانتی‌گراد در طول مدت سیلاب در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- هیدروگراف سیلاب ورودی با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ ساله



شکل ۶- نمودار منحنی سنجه رسوب (دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) و دبی رسوب (تن در روز))

## ۲-۴- آنالیز حساسیت و واسنجی

در مدل‌سازی عددی سیستم رودخانه، به‌منظور انجام صحیح محاسبات، تعداد زیادی از پارامترها می‌بایست به شکل مناسبی تعریف شوند. مقادیر این پارامترها اغلب فاقد صحت و درستی قابل قبولی هستند و بنابراین تعریف مقادیر می‌بایست بر اساس اطلاعات تجربی سیستم باشد. با توجه به اینکه پدیده‌های واقعی از قانونمندی کلی برخوردار نبوده و شرایط بهره‌برداری نیز متنوع است، این پارامترها می‌توانند در یک محدوده قابل قبول در نظر گرفته شوند. عدم قطعیت در تخمین این مقادیر در کاربردهای مهندسی در قالب دامنه نوسانات قابل قبول و ضرایب ایمنی به‌منظور حداقل نمودن ریسک شکست در طراحی ملحوظ می‌شوند. به این فرایند آنالیز حساسیت گفته می‌شود (حسن زاده، ۱۳۹۱).

یک تعریف عمومی دیگر حساسیت، نرخ تغییرات پارامترهای خروجی نسبت به تغییر پارامترهای ورودی است. پارامترهای مورد استفاده در آنالیز حساسیت مدل‌های روندیابی رسوب در قالب دو دسته اصلی شامل پارامترهای فیزیکی و غیرفیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. این پارامترها و اهمیت نسبی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند (حسن زاده، ۱۳۹۱).

جدول ۲- آنالیز پارامترهای روندیابی رسوب

اهمیت نسبی داده‌ها			تشریح داده‌ها	
کم	متوسط	زیاد		
		***	دبی جریان	پارامترهای فیزیکی
		***	دبی رسوب	
	***		دانه‌بندی رسوبات	
***			دمای آب	
		***	شکل هندسی مقطع	
		***	معادله انتقال رسوب	پارامترهای غیرفیزیکی
		***	گام زمانی	

به‌منظور تحلیل حساسیت مدل HEC-RAS به پارامترهای ورودی، یکسری اجرا با تغییر پارامترهای مختلف ورودی به مدل انجام پذیرفت. نتایج محاسبات با توجه به میزان تغییرات در پارامترهای انتخاب شده برای آنالیز حساسیت، تحلیل گردید. در این مطالعه نیازی به واسنجی دبی جریان و رسوب نیست. دانه‌بندی رسوبات با توجه به داده‌های داخل بازه تعیین شده است. بنابراین تنها اثرات پارامترهای ضریب زبری، معادله انتقال رسوب و گام زمانی مطالعه شده است. با توجه به اینکه معادلات انتقال رسوب، ممکن است رفتارهای متفاوتی نسبت به تغییر ضریب زبری مانینگ نشان دهند، آنالیز حساسیت آن با شرایط خاصی انجام گرفت. در این راستا، با توجه به مشخص بودن دانه‌بندی مصالح بستر در چندین نقطه از رودخانه و محدوده اندازه دانه‌ها، از معادله استریکلر برای تعیین این پارامتر استفاده شده است. درنهایت با در نظر گرفتن نوع کاربری اراضی حاشیه رودخانه و تراکم پوشش گیاهی منطقه، به مقادیر ضریب زبری افزوده گردید. از طرفی با توجه به مشخص بودن دانه‌بندی مصالح بستر و شیب عمومی جریان، معادله انتقال رسوب یانگ نسبت به معادلات دیگر برای شرایط جریان رودخانه آبی‌چای مناسب است. درنهایت برای آنالیز حساسیت ضریب زبری مراحل زیر انجام پذیرفت:

- افزایش عدد ضریب زبری مانینگ و بررسی تأثیر این متغیر در فرسایش و رسوب‌گذاری مقاطع مختلف و درنهایت تأثیر آن بر عمق و عرض جریان
- کاهش عدد ضریب زبری مانینگ و بررسی تأثیر این متغیر در فرسایش و رسوب‌گذاری مقاطع مختلف و درنهایت تأثیر آن بر عمق و عرض جریان
- محاسبه درصد کاهش یا افزایش عمق جریان در هریک از حالات

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب زبری در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- آنالیز حساسیت مدل نسبت به ضریب زبری

-۲۰	-۱۰	+۱۰	+۲۰	درصد تغییر ضریب زبری نسبت به ضریب زبری مبنا
-۳/۵۵	-۱/۶۶	+۱/۲۰	+۳/۰۳	درصد تغییر عمق جریان نسبت به عمق مبنا
-۲/۰۷	-۱/۱۷۶	+۱/۵۴	+۲/۹۹	درصد تغییر عرض سطح آب نسبت به عرض مبنا

بررسی نتایج مدل در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که درصد تغییر در عمق و عرض جریان کمتر از درصد تغییر در مقدار ضریب زبری است و مدل حساسیت زیادی نسبت به تغییر ضریب زبری مانینگ ندارد. از طرفی، مقادیر پهنه‌بندی سیلاب در دو حالت جریان دائمی با بستر ثابت و جریان شبه غیردائمی با بستر متحرک با مقادیر ضرایب زبری یکسان مقایسه خواهند شد.

روند آنالیز حساسیت مربوط به اثر گام زمانی بر اساس مقادیر ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ ساعت انجام پذیرفت. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که انتخاب مناسب آنالیزهای حساسیت، در درستی و همگرایی نتایج محاسبات با اهمیت است. در نهایت با گام زمانی ۰/۱ ساعت نتایج مدل به‌دقت قابل قبولی می‌رسد و کاهش گام زمانی بیشتر از آن تغییری در نتایج ایجاد نمی‌نماید ولی باعث افزایش زمان اجرای مدل می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

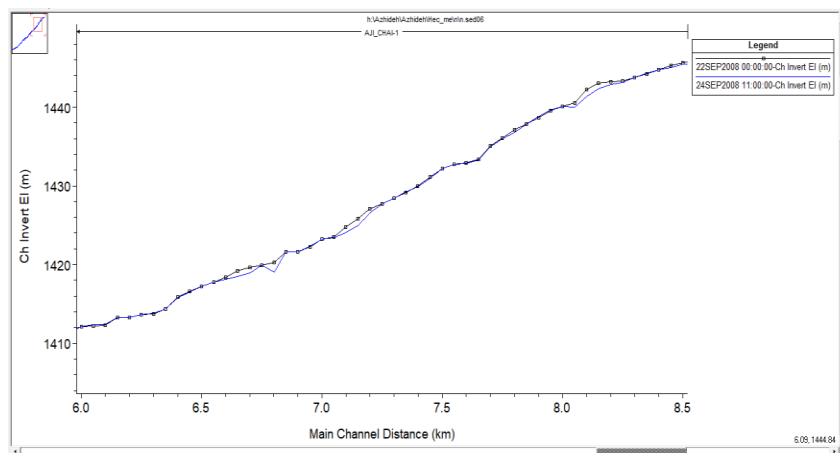
#### ۳-۱- بررسی روند فرسایش و رسوب در رودخانه آجی‌چای

همان‌طور که قبلاً ذکر شد هندسه مقطع جزء اولین و اصلی‌ترین اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی هیدرولیک و رسوب رودخانه است. در واقع با ورود جریان به داخل رودخانه بر مبنای شکل سطح مقطع رودخانه، پارامترهای هیدرولیکی آن نظیر سرعت، عمق و سطح آب‌گرفتگی مشخص می‌شود. پس از استخراج مقاطع عرضی از نقشه‌های توپوگرافی منطقه و وارد نمودن اطاعات مورد نیاز، مدل در دو حالت جریان دائمی با بستر ثابت و جریان شبه‌غیردائمی با بستر متحرک اجرا گردید.

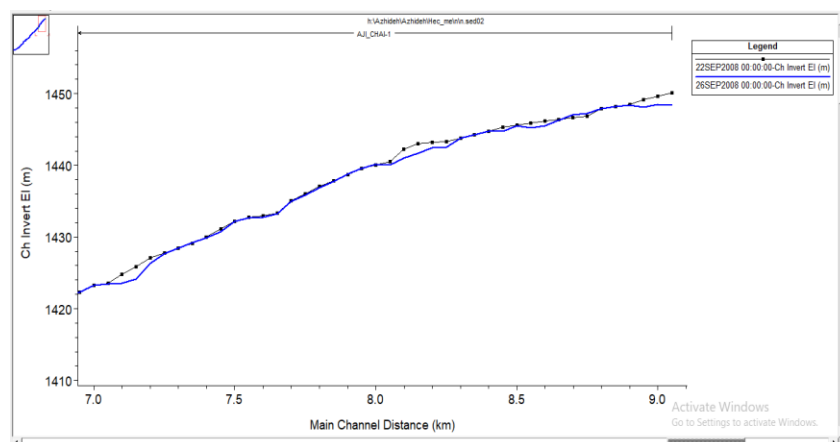
### ۳-۱-۱- بررسی تغییرات پروفیل طولی رودخانه در جریان شبه‌غیردائمی با بستر متحرک

در قسمت‌های بالایی، رودخانه حالت فرسایشی داشته و در پایین دست حالت رسوب‌گذار از خود نشان می‌دهد. این روند با توجه به شیب بالای رودخانه قابل درک است. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب پروفیل طولی رودخانه را در سه زمان مختلف از سیلاب ۲۵ ساله و ۵۰ ساله نشان می‌دهد.

مقایسه تغییرات پروفیل طولی رودخانه در سیلاب‌های ۲۵ و ۵۰ ساله نشان می‌دهد که میزان تغییرات پروفیل طولی با افزایش دوره بازگشت سیلاب افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر ظرفیت انتقال رودخانه با دبی افزایش می‌یابد و تغییرات بستر رودخانه در اثر فرسایش و رسوب، افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات پروفیل طولی رودخانه در سیلاب ۲۵ ساله در دو زمان مختلف



شکل ۸- تغییرات پروفیل طولی رودخانه در سیلاب ۵۰ ساله در دو زمان مختلف

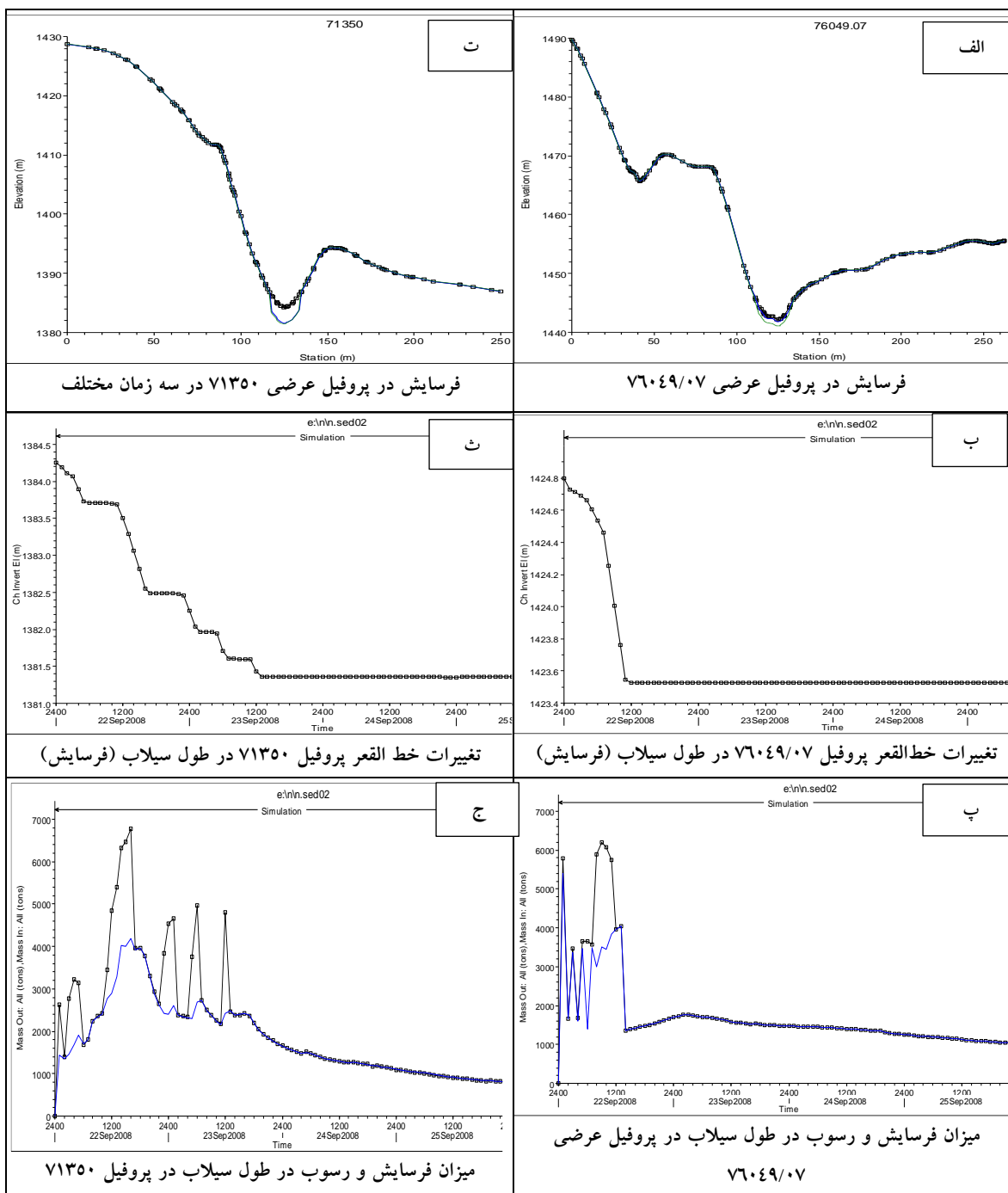


### ۳-۱-۲- بررسی تغییرات مقاطع عرضی رودخانه در جریان شبه غیردائمی با بستر متحرک

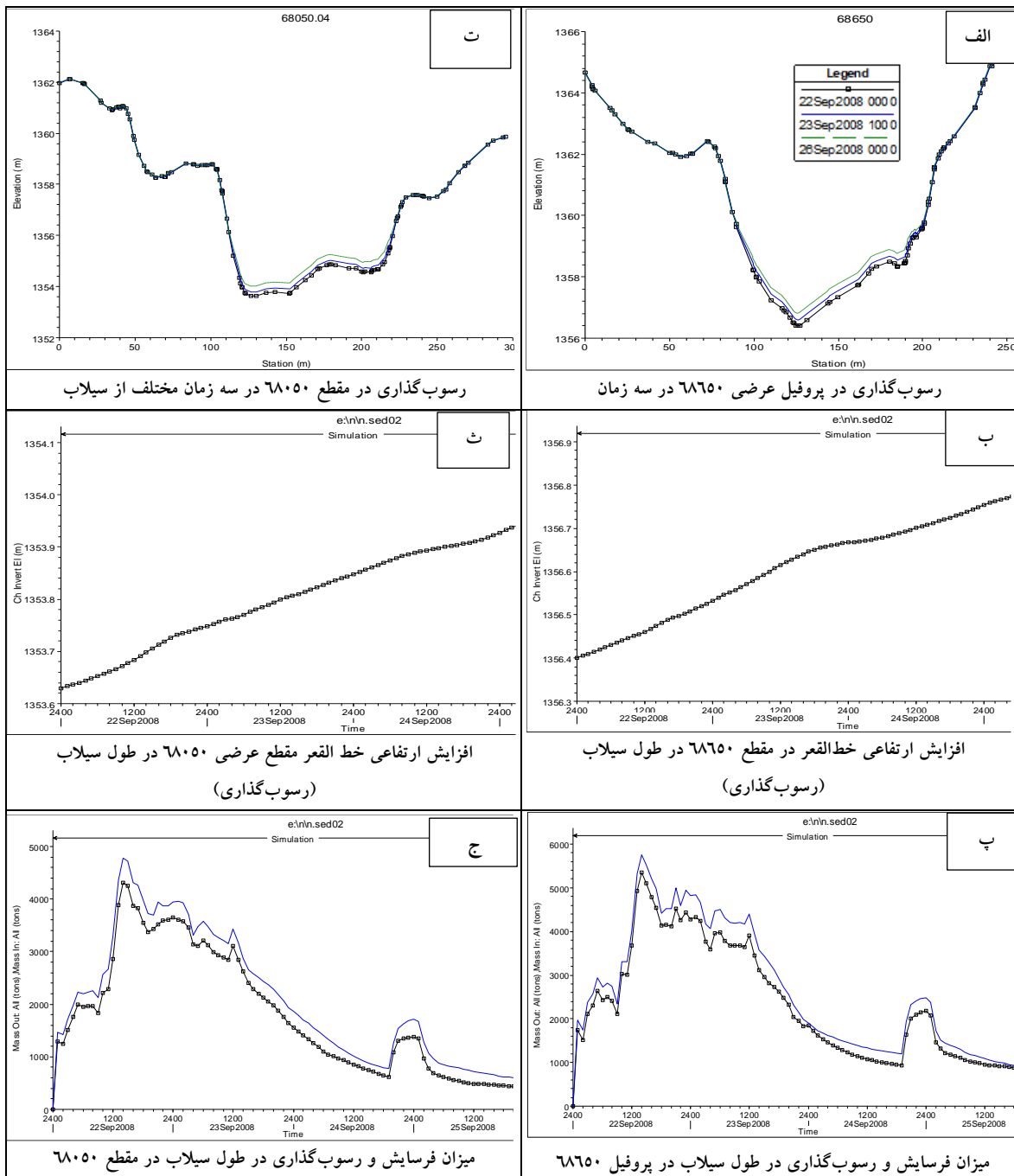
برای دید بهتر از نحوه رسوب‌گذاری و فرسایش بازه مطالعاتی، برخی از مقاطع عرضی در اشکال ذیل آورده شده است. در این شکل‌ها، مقایسه‌ای بین پروفیل عرضی مقطع قبل و بعد از سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله انجام شده است. بررسی مقاطع عرضی مؤید فرسایش در بالادست رودخانه و رسوب‌گذاری در پایین‌دست رودخانه است. این مورد در ادامه بررسی شده است.

شکل‌های (۹- الف) و (۹- ج) فرسایش در پروفیل‌های عرضی ۷۶۴۹/۰۷ و ۷۱۳۵۰ را در سه مقطع زمانی از سیلاب نشان می‌دهد. تغییرات خط‌القعر رودخانه در طول زمان سیلاب در شکل‌های (۹- ب) و (۹- ث) آورده شده است. همان‌طور که از اشکال مذکور مشخص است، در این مقاطع، در طول سیلاب فرسایش رخ داده است و کاهش ارتفاع خط‌القعر رودخانه در دو مقطع به ترتیب ۱/۲ و ۲/۵ متر است. اشکال (۹- پ) و (۹- ج) میزان رسوب ورودی به مقطع و میزان رسوب خروجی از هر مقطع را در طول کل زمان سیلاب نشان می‌دهند. بررسی روند تغییرات رسوب ورودی و خروجی و همچنین میزان تغییرات مقاطع عرضی مذکور نشان می‌دهد بستر رودخانه پس از مدتی به حالت آرمور رسیده است و بعد از آن میزان رسوب ورودی و خروجی یکسان شده و شکل مقطع عرضی تغییر نمی‌کند.

شکل‌های (۱۰- الف) و (۱۰- ت) رسوب‌گذاری در پروفیل‌های عرضی ۶۸۶۵۰ و ۶۸۰۵۰ در سه مقطع زمانی از سیلاب را نشان می‌دهند. همان‌طور که از اشکال (۱۰- ب) و (۱۰- ث) مشخص است در این مقاطع در طول سیلاب رسوب‌گذاری رخ داده است و باعث افزایش ارتفاع خط‌القعر رودخانه در این مقاطع در حدود ۴۰ سانتیمتر شده است. اشکال (۱۰- پ) و (۱۰- ج) میزان رسوب ورودی به مقطع و میزان رسوب خروجی از هر مقطع را در طول کل سیلاب نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است میزان رسوب ورودی در این مقاطع بیشتر از رسوب خارج شده از مقطع است.



شکل ۹- فرسایش، تغییرات خط القعر و میزان فرسایش و رسوب در مقاطع ۷۶۰۴۹/۰۷ و ۷۱۳۵۰



شکل ۱۰- رسوب گذاری، تغییرات خط القعر و میزان فرسایش و رسوب در مقاطع ۶۸۰۵۰ و ۶۸۶۵۰

## ۳-۱-۳- بررسی پهنه سیل (عرض سطح آب) در دو حالت جریان دائمی با بستر ثابت و جریان شبه‌دائمی با بستر

## متحرک

جهت بررسی پهنه‌بندی سیلاب نتایج خروجی شبیه‌سازی جریان در حالت دائمی و شبیه‌سازی در حالت جریان شبه‌دائمی با بستر متحرک مقایسه شده است. برای این منظور بیشترین مقدار عرض سطح آب در طول سیلاب‌های ۲۵ و ۵۰ ساله در جریان شبه‌دائمی با بستر متحرک با عرض سطح آب در حالت جریان دائم مقایسه شده است (جدول ۴).

بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان عرض‌های سطح آب در دو حالت مذکور، تفاوت‌های معنی‌داری با هم دارند. در حالتی که فرسایش در مقطع عرضی وجود دارد بیشترین میزان کاهش عرض سطح آب در حالت جریان شبه‌دائمی با بستر متحرک، نسبت به جریان با بستر ثابت، ۸ درصد است. در حالت رسوب‌گذاری، عرض سطح آب در حالت جریان با بستر متحرک بیشتر از جریان با بستر ثابت است. بیشترین میزان افزایش عرض سطح آب در حالت جریان شبه‌دائمی با بستر متحرک، نسبت به جریان با بستر ثابت، ۱۹ درصد است. این موضوع ضرورت بررسی شرایط رودخانه از نظر فرسایش و رسوب‌گذاری را تأیید می‌نماید؛ خصوصاً زمانی که رودخانه حالت رسوب‌گذاری دارد، لازم است میزان پهنه‌بندی سیلاب با دقت بیشتری تعیین شود.

جدول ۴- خروجی مدل شبیه‌سازی جریان برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله در برخی از پروفیل‌های عرضی

شماره ایستگاه	نوع جریان	تراز خط‌القعر (متر)	تراز سطح آب (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)	عرض سطح آب (متر)	عدد فرود	درصد تغییر عرض سطح آب نسبت به جریان بستر ثابت
۷۳۸۵۰	بستر ثابت	۱۴۴۸/۴۵	۱۴۵۲/۶۷	۲/۶۴	۷۰/۱۳	۰/۴۲	-۱/۴
	بستر متحرک	۱۴۴۸/۴۵	۱۴۵۲/۴۶	۳/۰۴	۶۹/۱۳	۰/۴۹	
۷۳۶۹۹/۶۳	بستر ثابت	۱۴۴۷/۸۵	۱۴۵۲/۵	۱/۵۲	۱۲۱/۰۶	۰/۲۲	-۱/۹
	بستر متحرک	۱۴۴۷/۰۹	۱۴۵۲/۲۶	۱/۸۸	۱۱۸/۷۲	۰/۲۸	
۷۳۶۴۸/۹۹	بستر ثابت	۱۴۴۶/۶۴	۱۴۵۲/۴۹	۱/۶۴	۱۰۹/۰۱	۰/۲۳	-۲/۲
	بستر متحرک	۱۴۴۶/۷۷	۱۴۵۲/۲۴	۲/۰۳	۱۰۶/۶۲	۰/۲۹	
۷۶۴۰۰	بستر ثابت	۱۴۴۵/۳۲	۱۴۵۰/۵۸	۴/۴۵	۴۶/۱۲	۰/۶۵	-۸
	بستر متحرک	۱۴۴۴/۸۸	۱۴۵۰/۲	۴/۷۷	۴۲/۴	۰/۶۹	
۷۶۱۵۰	بستر ثابت	۱۴۴۳/۲	۱۴۵۰	۳/۰۵	۴۱/۲۶	۰/۴	-۶
	بستر متحرک	۱۴۴۳/۰۲	۱۴۴۹/۵۹	۳/۲۸	۳۸/۸۹	۰/۴۴	
۷۵۳۰۰	بستر ثابت	۱۴۲۹/۱۶	۱۴۳۳/۹۶	۲/۶۶	۵۲/۹۴	۰/۴	+۰/۱۷

شماره ایستگاه	نوع جریان	تراز خط القعر (متر)	تراز سطح آب (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)	عرض سطح آب (متر)	عدد فرود	درصد تغییر عرض سطح آب نسبت به جریان بستر ثابت
	بستر متحرک	۱۴۲۹/۱۴	۱۴۳۴/۰۱	۲/۷۸	۵۳/۰۳	۰/۴۱	
۷۵۲۵۰	بستر ثابت	۱۴۲۸/۴۱	۱۴۳۳/۶۲	۳/۶۴	۴۵/۸۳	۰/۵۲	+۱
	بستر متحرک	۱۴۲۸/۴۱	۱۴۳۳/۶۷	۳/۷۶	۴۶/۲۵	۰/۵۴	
۷۵۲۰۰	بستر ثابت	۱۴۲۷/۷۴	۱۴۳۲/۴۳	۶/۰۵	۳۳/۵۳	۰/۹۵	+۱/۲
	بستر متحرک	۱۴۲۷/۷۲	۱۴۳۲/۴۹	۶/۱۷	۳۳/۹۳	۰/۹۶	
۷۳۶۰۰	بستر ثابت	۱۴۰۷/۹۴	۱۴۱۲/۲۶	۴/۳۶	۴۶/۹۷	۰/۷	+۳/۳
	بستر متحرک	۱۴۰۸/۰۵	۱۴۱۲/۵۲	۴/۳۷	۴۸/۵۱	۰/۶۹	
۷۳۴۹۹	بستر ثابت	۱۴۰۷/۴۳	۱۴۱۱/۶۵	۳/۲۴	۴۶/۷۶	۰/۵۴	+۰/۳
	بستر متحرک	۱۴۰۷/۵۱	۱۴۱۱/۶۹	۳/۳۷	۴۶/۹۱	۰/۵۶	
۷۳۲۰۰	بستر ثابت	۱۴۰۳/۹۴	۱۴۰۷/۴۱	۵/۵	۴۱/۸۱	۱/۰۹	+۸
	بستر متحرک	۱۴۰۴/۰۳	۱۴۰۷/۸۴	۴/۷۸	۴۵/۱۳	۰/۸۹	
۷۳۱۴۹	بستر ثابت	۱۴۰۳/۰۵	۱۴۰۸/۲۳	۲/۱۳	۵۷/۷۱	۰/۳۱	+۰/۳
	بستر متحرک	۱۴۰۳/۴	۱۴۰۸/۳۱	۲/۳	۵۷/۹	۰/۳۵	
۷۲۱۰۰	بستر ثابت	۱۳۸۹/۴۶	۱۳۹۴/۱۸	۳/۳۱	۵۴/۷۱	۰/۵۱	+۰/۸
	بستر متحرک	۱۳۸۹/۷۷	۱۳۹۴/۲۵	۳/۶۹	۵۵/۱۳	۰/۵۹	
۷۱۴۵۰	بستر ثابت	۱۳۸۵/۱۳	۱۳۸۹/۹۷	۱/۷۳	۱۴۱/۱۴	۰/۲۶	-۱۹
	بستر متحرک	۱۳۸۵/۱۸	۱۳۸۷/۶۲	۳/۷	۱۱۴/۶۲	۰/۶۷	
۷۰۲۰۰	بستر ثابت	۱۳۷۰/۵۷	۱۳۷۳/۶۶	۴/۱۱	۸۸/۸۵	۰/۸	+۱
	بستر متحرک	۱۳۷۰/۶۴	۱۳۷۳/۷۲	۴/۱۸	۸۹/۶۵	۰/۸۱	
۶۸۴۵۰	بستر ثابت	۱۳۵۵/۶۳	۱۳۵۹/۰۵	۴/۱	۹۳/۵۲	۰/۷۳	+۲/۶
	بستر متحرک	۱۳۵۵/۵۵	۱۳۵۹/۰۸	۴/۱۵	۹۵/۹۴	۰/۷۲	

#### ۴- جمع بندی

در تحقیق حاضر محاسبات پهنه بندی سیلاب در رودخانه آجی چای در پایین دست سد و نیار به طول ۹ کیلومتر در مدل ریاضی HEC-RAS در دو حالت جریان دائمی با بستر ثابت و جریان شبه غیردائمی با بستر متحرک انجام گرفت. در شبیه سازی جریان در حالت دائمی تحلیل حساسیت مدل با تغییر ضریب زبری انجام گردید و مشاهده گردید که تغییر ضریب زبری چندان اثری روی مشخصات هیدرولیکی مدل ندارد. در شبیه سازی جریان در حالت شبه غیردائمی (بستر

متحرک) تحلیل حساسیت مدل با تغییر ضریب زبری و تغییر گام زمانی محاسباتی انجام گردید و مشاهده گردید که تغییر ضریب زبری چندان اثری روی مشخصات هیدرولیکی مدل ندارد و در گام زمانی ۰/۰۱ همگرایی مدل بیشتر می‌شود. همچنین معادله رسوب یانگ هم‌خوانی بیشتری با شرایط رودخانه و دانه‌بندی مواد بستری دارد. به دلیل راحتی کار در شبیه‌سازی جریان در حالت دائمی و همچنین نیاز به اطلاعات کم، کار با آن آسان بوده و نتایج حاصل در رودخانه‌هایی که فرسایش و رسوب‌گذاری در آن‌ها شدید نیست و همچنین در مکان‌هایی که نیاز به تعیین دقیق کاربری اراضی حاشیه رودخانه نباشد می‌تواند به کار رود. همچنین در مکان‌هایی که داده‌های آماری و صحرایی در آن‌ها کم باشد می‌توان از شبیه‌سازی جریان دائمی برای به دست آوردن طرح شماتیک پهنه‌بندی سیل‌گیر رودخانه استفاده نمود.

در مناطقی که فرسایش و رسوب‌گذاری زیاد بوده و نیاز به مطالعات نحوه رسوب‌گذاری و فرسایش رودخانه باشد و اطلاعات صحرایی و داده‌های آماری نیز در دسترس باشد تحلیل جریان شبه‌غیردائمی (بستر متحرک) برای محاسبه پهنه‌بندی سیلاب دقیق‌تر و مناسب‌تر خواهد بود. در مقاطعی که حالت رسوب‌گذاری در آن‌ها وجود دارد پهنه‌بندی سیلاب آن بزرگ‌تر از نتایج حاصل از اجرای مدل شبیه‌سازی جریان در حالت دائمی است، بیشترین میزان افزایش عرض سطح آب در حالت جریان با بستر متحرک، نسبت به جریان با بستر ثابت، ۱۹ درصد است. بنابراین بهتر است در رودخانه‌های رسوب‌گذار از مدل شبه‌غیردائمی (بستر متحرک) استفاده نمود. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت ریخت‌شناسی رودخانه در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب رودخانه‌ها به‌منظور مدیریت ایمن سیل است.

از آنجایی که اکثر مدل‌های موجود انتقال رسوب از جمله HEC-RAS یک‌بعدی می‌باشند و قادر به پیش‌بینی تغییرات مقاطع عرضی نیستند پیشنهاد می‌شود نتایج حاصل از عملکرد مدل‌های دو یا سه‌بعدی با مدل یک‌بعدی مقایسه شود تا در مورد مناسب بودن مدل‌های یک‌بعدی در تحلیل فرایند رسوب تصمیم‌گیری شود.

## کتابنامه

- برخوردار، م؛ چاوشیان، س. ع. ۱۳۷۹. پهنه‌بندی سیلاب. مجموعه مقالات کارگاه فنی روش‌های غیر سازه‌ای مدیریت سیلاب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی، ۱۹ صفحه.
- <http://irncid.org/PublicationDet.aspx?ID=90&CatId=7>
- پورنبی درزی، س؛ وفاخواه، م؛ رجبی، م. ر. (۱۴۰۰) پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و Arc GIS. مطالعه موردی: حوزه آبخیز چشمه کیله شهرستان تنکابن. نشریه مخاطرات طبیعی، ۱۰(۲۸)، ۱۵-۲۸.
- <https://doi.org/10.22111/JNEH.2021.28694.1603>
- تیموری یگانه، م؛ آرمان، ع. ۱۳۹۹. برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه شاهرود با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۴): ۱۸-۳۲.
- <https://doi.org/10.22125/TWE.2020.109909>
- حسن‌زاده، ر؛ هنرمند، م؛ حسینجانی‌زاده، م؛ محمدی، ص. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی سیلاب در نواحی شهری با استفاده از مدل هیدرولوژیکی و اطلاعات میدانی (مطالعه موردی: سیل بردسیر، استان کرمان). اکوهیدرولوژی، ۸(۲)، ۳۳۱-۳۴۴.
- <https://doi.org/10.22059/IJE.2021.314075.1423>
- حسن‌زاده، ی. ۱۳۹۱. هیدرولیک رسوب مخازن. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.
- غفاری، گ؛ امینی، ع. ۱۳۸۹. مدیریت دشت‌های سیلابی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی رودخانه قزل‌اوزن. فضای جغرافیایی، ۱۰(۳۲): ۱۱۷-۱۳۴.
- <https://www.sid.ir/journal/issue/9550/fa>
- قمی اوپلی، ف؛ صادقیان، م. ص؛ جاوید، ا. م؛ میرباقری، س. ا. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل HEC-RAS مطالعه موردی: رودخانه کارون حد فاصل بند قیر تا اهواز، نشریه علوم و فنون منابع طبیعی، ۵(۱): ۱۰۵.
- <https://srb.iau.ir/faculty/a-javid/fa/articlesInPublications/87>
- Brunner, G. W., Gibson, S., 2005. Sediment Transport Modeling in HEC-RAS. World Water and Environmental Resources Congress. <https://doi.org/10.1061/40792%28173%29442>.
- Chow, V.T., 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co. New York, 680 p.
- Cook, A., and Mervade, V., 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. Journal of hydrology. Vol (377): pp 131- 142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>.
- Dumitrescu, V., Barbieru, A., Carsmariu, A., 2012. Research on the simulation of the alluvial transport on the numerical model and the estimation of the morphological modifications with application on the DANUBE riverbed for a proposed sector, in the period of 2005-2010. Proc. Int. Conf., water resources and Wetlands, Tulcea-Romania. 14-16 pp. <http://www.limnology.ro/water2012/Proceedings/014.pdf>
- Ghimire, G. R., DeVantier, B. A., Sharma S., 2020. Site-Specific Sediment Deposition Model for Dredging Planning: Case Study of Olmsted Locks and Dam. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 146, Issue 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000598](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000598)

- Joshi, N., Gaurav Raj Lamichhane, G. R., Rahaman, M., Kalra, A., and Ahmad, S., 2019. Application of HEC-RAS to Study the Sediment Transport Characteristics of Maumee River in Ohio. World Environmental and Water Resources Congress. Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis. <https://doi.org/10.1061/9780784482353.024>
- Mohammad Razi, M. A., Marimin, N. A., Ahmad, M. A., Adnan, M. S., & Rahmat, S. N., 2018. HEC-RAS Hydraulic Model for Floodplain Area in Sembrong River. International Journal of Integrated Engineering. 10(2). Retrieved from <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/2645>.
- Regmi, R.K., 2021. Sedimentation Modeling of Karnali Chisapani Multipurpose Project Reservoir, Nepal. J. Inst. Eng. India Ser. A 102, 815–827. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00550-z>.
- Salman, A., Hassan, S.S., Khan, G.D.et al., 2021. HEC-RAS and GIS-based flood plain mapping: A case study of Narai Drain Peshawar. Acta Geophys. 69: 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00615-4>.