

## مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1402.9.1.11.6](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1402.9.1.11.6)

درصد همانندی: ۹٪

## مدل‌سازی و تحلیل دوبعدی هیدرولیک رودخانه کارده با استفاده از HEC-RAS

مهديه اسلامي تبار<sup>۱</sup>، محمود فغفور مغربي<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

mahdieh.eslamitabar@mail.um.ac.ir

maghrebi@um.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

## چکیده

به دلیل قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و با توجه به خسارت‌های سیلاب‌های اخیر، مطالعات مدیریت سیلاب بسیار حائز اهمیت است. با شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها از طریق مدل‌های هیدرولیکی و ریاضی می‌توان حجم، سرعت و عمق سیلاب را در شرایط و مقاطع مختلف رودخانه پیش‌بینی کرده و تأثیرات آن را بر بستر و مناطق سیل‌گیر اطراف رودخانه بررسی کرد. بنابراین در این پژوهش سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال در رودخانه کارده با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS2D شبیه‌سازی شد. با توجه به تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده، مشخص شد که مدل هیدرولیکی HEC-RAS به عواملی چون ضریب زبری مانینگ، ابعاد شبکه محاسباتی و روش حل معادلات حاکم بر جریان حساسیت نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش بیانگر عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از روش حل معادلات موج دینامیک نسبت به روش حل موج پخشیده است. به‌طوری‌که با ارزیابی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در پایین‌دست بازه مطالعاتی، شاخص‌های آماری مانند درصد خطا، ضریب تعیین و ضریب نش‌سات‌کلیف در روش موج دینامیک به ترتیب برابر با ۵، ۰/۹۵، ۰/۹۳ است اما در روش موج پخشیده برابر با ۳۴، ۰/۹۶، ۰/۶۴ به دست آمدند. برای مدیریت بستر رودخانه، ناحیه‌بندی خطر سیل انجام شد و مسیر اصلی رودخانه به دلیل داشتن عمق، شیب بیشتر و پوشش گیاهی کمتر دارای بیش‌ترین سطح خطر شناسایی شد. درنهایت، برای جلوگیری از ورود سیلاب به زمین‌های زراعی، باغ‌ها و روستاهای اطراف رودخانه با توجه به میزان سیل‌گرفتگی آن‌ها، استفاده از سیستم ترکیبی (دیواره و بندهای سیل‌بند) در چند بازه از رودخانه برای مهار سیلاب و در نتیجه کاهش خسارت‌های ناشی از آن پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی سیلاب، رودخانه کارده، مدل HEC-RAS2D، ناحیه‌بندی خطر سیل

## ۱. مقدمه

انسان‌ها پیش از آغاز تمدن بشری از رودخانه‌ها به عنوان منبعی برای تأمین نیازهایشان استفاده می‌کردند. از همان ابتدا تاکنون دخل و تصرف غیرمجاز انسان‌ها در بستر و حریم رودخانه‌ها باعث تأثیرپذیری سیلاب‌ها و طغیان آن‌ها از بستر طبیعی رودخانه‌ها شده است که به ایجاد خسارت‌های جبران‌ناپذیری منجر شده‌اند [۱].

مدیریت و مهار سیلاب شامل یکسری اقدامات و روش‌هایی است که با هدف کاهش خسارت‌ها و آسیب‌های ناشی از سیلاب در نظر گرفته می‌شود. روش‌های مهار سیلاب را می‌توان به دو دسته اقدامات سازه‌ای و غیر سازه‌ای تقسیم‌بندی کرد. اقدامات غیرسازه‌ای یا مدیریتی عبارت است از مدیریت سیلاب بدون نیاز به ایجاد سازه برای مقابله با سیلاب و کاهش خسارت‌های ناشی از آن. از جمله اقدامات غیرسازه‌ای می‌توان به پیش‌بینی و هشدار سیل، اطلاع‌رسانی، آموزش مردم و فرهنگ‌سازی، تخلیه مناطق درخطر، امدادرسانی بعد از وقوع سیل و بیمه سیل، بهسازی شرایط حوضه آبریز، مدیریت کاربری اراضی و استفاده مناسب از اراضی اشاره کرد. از جمله اقدامات سازه‌ای نیز می‌توان به احداث سدهای تأخیری، احداث سدهای آشغال‌گیر در بالادست مناطق شهری، ایجاد استخرهای رسوب‌گیر و لایروبی، احداث گوره‌ها و سیل بندها، احیای مسیل و پاک‌سازی رودخانه، اصلاح مسیل یا آبراهه، کانال‌ها و مقطع رودخانه اشاره نمود [۲].

در حوزه مدیریت سیلاب توسعه روش‌ها و ابزارها که به ما کمک می‌کنند تا سیلاب‌ها را به صورت دقیق‌تر و شفاف‌تر پیش‌بینی و مدیریت کنیم، اهمیت فراوانی دارد. یکی از این روش‌ها، استفاده از فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> (GIS) و نرم‌افزار HEC-RAS است که با استفاده از آن می‌توان پهنه‌بندی سیلاب را به صورت دقیق‌تر و کارآمدتری انجام داد. علاوه بر این، به منظور بهبود دقت مدل‌های سیلاب و عدم نیاز به استفاده از نرم‌افزار GIS، مدل‌های دوبعدی نیز توسعه یافته و استفاده شده‌اند. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان سیلاب در محیط‌های سه‌بعدی هستند و به ما

کمک می‌کنند تا دقیق‌تر ناحیه‌هایی را که تحت تأثیر سیلاب قرار می‌گیرند، شناسایی کنیم.

هوریت و بیتس پهنه سیل با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی HEC-RAS-1D، LISFLOOD-FP و TELEMAC-2D را در بازه‌ای به طول ۶۰ کیلومتر از رودخانه سورن واقع در کشور انگلستان شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل HEC-RAS، بهترین مدل برای مدل‌سازی رودخانه نسبت به دو مدل دیگر است [۳]. دسالگن و مولو پهنه سیلاب در رودخانه فتام<sup>۳</sup> واقع در کشور اتیوپی را با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و HEC-RAS بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ارتفاع سیل در تمامی نواحی رودخانه (بالادست، میانه بازه و پایین دست) در محدوده زیاد یا خیلی زیاد و از نظر خطرپذیری در نواحی پایین دست رودخانه در محدوده کم و خیلی کم بوده است [۴].

بابایی و کوپایی با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS، HEC-RAS به تعیین حریم بستر و تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب رودخانه زاینده‌رود در محدوده سد تنظیمی زاینده‌رود تا سد انحرافی نکوآباد پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از توانایی مدل برای تعیین پهنه سیلاب است [۱]. شریفی‌نیک و مغربی پژوهشی با هدف معرفی کاربرد و توانایی‌های مدل هیدرولیکی HEC-RAS2D انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش نقشه‌های سیلاب گرفتگی با دوره بازگشت‌های مختلف را در بخشی از رودخانه کارده ارائه کردند که در تعیین حدبستر و پهنه سیل پرخطر رودخانه کارده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

باباخانی روش‌های برآورد دبی سیلاب با دوره‌های بازگشت متفاوت برای مسیری به طول ۴۲ کیلومتر از رودخانه کشف‌رود را بررسی کرد. در این پژوهش روش‌های مبتنی بر نرم‌افزارهای Smada، EasyFit و رابطه‌های تجربی فولر، دیکن، کریگر، منحنی پوش کریگر و روش استدلالی برای برآورد دبی سیلاب با دوره بازگشت‌های متفاوت بررسی شده است. در نهایت نتایج نشان داد که بهترین روش برای برآورد دبی سیلاب در این محدوده روش دیکن است [۵].

مدل دوبعدی HEC-RAS را می‌توان به‌عنوان بهترین و ساده‌ترین مدل برای شبیه‌سازی سیلاب معرفی کرد. زیرا در تحلیل مدل‌های دوبعدی HEC-RAS، پارامترهای مختلفی همچون دقت، کارایی، سرعت اجرا و توانایی پیش‌بینی دقیق سیلاب در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه استفاده از این مدل به دلیل سرعت اجرای بالا، دقت کافی و قابلیت مدل‌سازی رودخانه‌ها در شرایط پیچیده با توجه به حساسیت شبیه‌سازی سیلاب جهت امور مدیریتی و کنترل آن توصیه می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، جریان سیلاب در یک بازه ۷/۵ کیلومتری از رودخانه کارده با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده و اثرات آن بر مسیر رودخانه و مناطق سیلابی اطراف بررسی شده است. با در نظر گرفتن موقعیت روستایی منطقه مورد مطالعه و وجود باغات و زمین‌های کشاورزی در اطراف آن، ضروری است که جریان سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی شده و در نهایت تمهیداتی برای جلوگیری از تجاوز سیلاب به داخل این مناطق و خسارت‌های ناشی از آن اندیشیده شود.

### ۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه کارده با مساحتی حدود ۶۸۰/۵ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و شمال شهرستان مشهد بین طول جغرافیایی ۷۳/۷۱۷۶۷۰ تا ۳۷۶/۷۴۴۴۹۶ و عرض جغرافیایی ۳۱/۴۰۵۵۳۲ تا ۹۰۶/۴۰۹۵۵۳ قرار گرفته است. این حوضه در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های هزار مسجد و زون کپه داغ قرار دارد و بخشی از حوضه آبخیز کشف‌رود مشهد نیز محسوب می‌شود. بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع ۲۹۷۷ متر در ارتفاعات هزار مسجد کوه قوری‌قت و پست‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۹۶۰ متر از سطح تراز دریا در محل سد کارده قرار دارد. رودخانه کارده مهم‌ترین رودخانه‌ی این حوضه است که از به هم پیوستن دو شاخه آل و کوشک‌آباد به وجود آمده است (شکل ۲ الف). محدوده مورد مطالعه بخشی از رودخانه کارده حدفاصل ایستگاه هیدرومتری جنگ تا ۷/۵ کیلومتر در جهت پایین دست این ایستگاه است (شکل ۲ ب). مختصات UTM محدوده مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۶۵۲/۷۳۰۹۴۵ تا ۶۵۲/۷۳۶۰۸۴ و عرض جغرافیایی آن بین ۶۳۹/۴۰۷۳۷۶۴ تا ۴۸۶/۴۰۷۰۴۷۹ می‌باشد (شکل ۱).

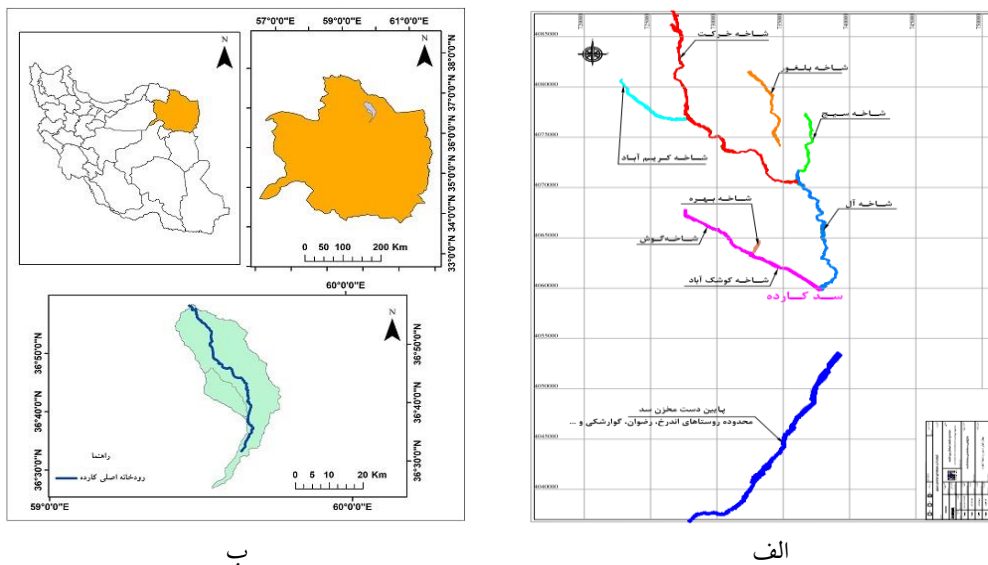
خواججوی تأثیر ساخت‌وسازهای غیرمجاز در حریم و بستر رودخانه فاروب رومان را که از اصلی‌ترین حوضه‌های آبریز شهر نیشابور است، با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و HEC-RAS در دو حالت وجود سازه و عدم وجود سازه بررسی کرد. ایشان حریم و بستر رودخانه را با استفاده از عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۷ و ۱۳۹۸ تعیین کردند و حریم‌های به‌دست‌آمده را با هم مقایسه کرده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده طی سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۳۹۸، چهل درصد از حریم و بستر رودخانه با ساخت‌وسازهای غیرمجاز اشغال و بستر رودخانه نیز جابه‌جا شده است [۶]. نمازی‌راد به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق پرخطر سیلاب سال ۱۳۹۸ استان گلستان با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره سنتینل و مدل HEC-RAS پرداخت [۷]. کالرا و همکاران به شبیه‌سازی پهنه سیل در رودخانه پکوس واقع در نیومکزیکو پرداختند. تمرکز اصلی این پژوهش بر مدل‌سازی یک‌بعدی پایدار و مدل‌سازی دوبعدی ناپایدار برای شبیه‌سازی سیل در این رودخانه با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS است [۸].

قیمیر و همکاران به ارزیابی عملکرد مدل‌های یک‌بعدی، دوبعدی و ترکیبی از یک‌بعدی و دوبعدی در حوضه آبریز رودخانه گرند در شمال شرقی ایالت اوهایو آمریکا، برای پیش‌بینی زمان حرکت سیل و محدوده سیلابی برای سامانه هشداردهی سیلاب پرداختند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی دقیق برای سامانه هشداردهی سیلاب توصیه می‌شود [۹]. عباسپور پهنه و عمق سیلاب برای بازه‌ای به طول چهار کیلومتر از رودخانه زشک را به دو روش یک‌بعدی و دوبعدی با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-RAS و CES محاسبه کرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، روش‌های دوبعدی و استفاده از معادلات دوبعدی جریان در کانال‌های باز از دقت بالاتری نسبت به روش‌های یک‌بعدی یا شبه دوبعدی برخوردارند [۱۰].

اونگداس و همکاران خطر سیلاب رودخانه یسلی قزاقستان با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS2D را بررسی کردند [۱۱]. با توجه به بررسی‌ها و مطالعه پژوهش‌های انجام‌شده فوق،



شکل ۱. موقعیت بازه مطالعاتی نسبت به حوضه کارده و شهر مشهد در گوگل ارث



شکل ۲. الف. شاخه‌های اصلی و فرعی حوضه کارده (برگرفته از مطالعات فیزیوگرافی و هیدرولوژی سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی). ب. موقعیت حوضه کارده نسبت به استان خراسان رضوی

مربوط به نفوذپذیری تقسیم کرد. مقادیر خصوصیات هندسی برای هر حوضه نسبتاً ثابت و نمایانگر وضع ظاهری حوضه هستند.

## ۲-۲. خصوصیات فیزیوگرافی منطقه

خصوصیات فیزیکی حوضه‌های آبریز (جدول ۱) که در واقع عوامل مؤثر در ایجاد رواناب و سیلاب هستند را می‌توان به دو گروه خصوصیات ژئومتری یا هندسی و خصوصیات

جدول ۱. خصوصیات فیزیوگرافی، ارتفاعی حوضه مورد مطالعه (برگرفته از مطالعات فیزیوگرافی و هیدرولوژی سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی)

خصوصیات حوضه							
شیب متوسط حوضه (درصد)	شیب رودخانه اصلی (درصد)	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	محیط حوضه (کیلومتر)	مستطیل معادل		ضریب گراویلیوس (فشردگی)	ضریب شکل (> ۱ حوضه کشیده)
				عرض (کیلومتر)	طول (کیلومتر)		
۷	۲	۶۸۰/۵	۱۸۷/۹	۷/۸	۸۶/۸	۲	۰/۱

### ۲-۳. روش پژوهش

۲-۳-۱. مدل‌های رایانه‌ای توسعه‌یافته برای مدلسازی هیدرولیکی

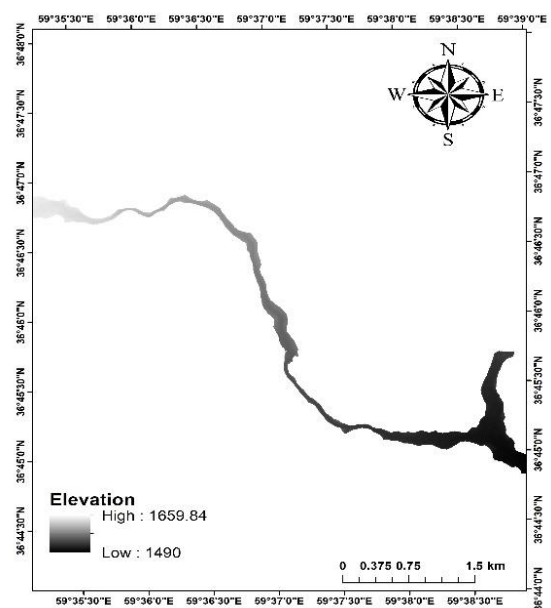
در این پژوهش برای مدلسازی جریان رودخانه از مدل عددی دوبعدی HEC-RAS استفاده شده است. نسخه جدید مدل عددی HEC-RAS قابلیت مدلسازی دوبعدی جریان با در نظر گرفتن تغییرات درون‌سلولی ارتفاع در هر یک از سلول‌های محاسباتی را فراهم کرده است.

جدول ۲. مقادیر نهایی سیلاب برآورد شده حوضه‌های مطالعاتی در دوره بازگشت‌های مختلف (مترمکعب بر ثانیه) (برگرفته از مطالعات فیزیوگرافی و هیدرولوژی سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی)

دوره بازگشت (سال)							حوضه
۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	
۲۸۲	۲۰۳/۴	۱۴۹/۷	۱۰۶/۴	۶۲/۵	۳۷/۸	۱۴/۴	کارده - کریم‌آباد
۲۱۸/۶	۱۵۷/۶	۱۱۶/۱	۸۲/۵	۴۸/۴	۲۹/۳	۱۱/۱	سیج - بلغور
۴۹۰	۳۵۳/۳	۲۶۰/۲	۱۸۴/۹	۱۰۸/۶	۶۵/۷	۲۵	کارده - کریم‌آباد - سیج - بلغور

### ۲-۳-۳. مدل هندسی سطح زمین

در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با دقت دو متر دریافت‌شده از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی و نرم‌افزار Civil3D، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) برای منطقه مورد مطالعه ساخته شد و به‌عنوان اولین گام مدلسازی در پنجره RAS-Mapper فراخوانی شد (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه DEM بازه مورد مطالعه

### ۲-۳-۲. برآورد دبی اوج سیلاب

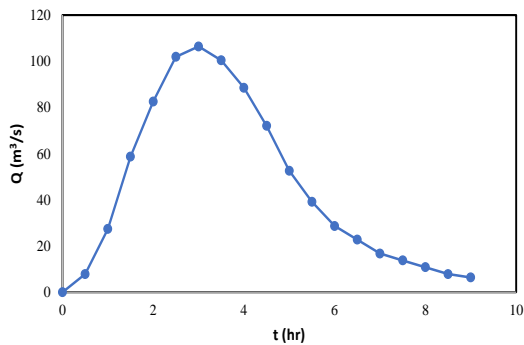
برای تعیین مقادیر دبی جریان به ازای دوره بازگشت‌های مختلف از نتایج گزارش هیدرولوژی سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی استفاده شده است. در جدول ۲ مقادیر دبی اوج هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف ارائه شده است.

### ۲-۳-۴. ضریب زبری مانینگ و کاربری اراضی

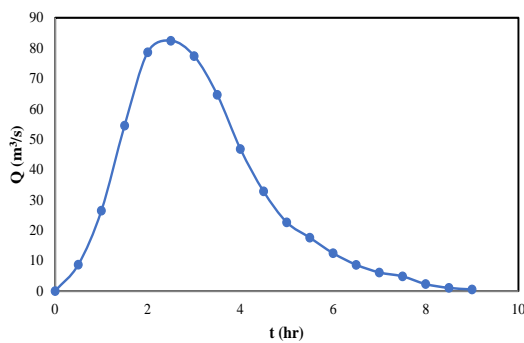
در مدل دوبعدی برخلاف مدل یک‌بعدی HEC-RAS نمی‌توان رودخانه را به‌عنوان یک خط با چندین مقطع عرضی در نظر گرفت، بلکه باید رودخانه و سیلاب‌دشت چپ و راست آن را به‌صورت مشی متشکل از یک سری سلول‌های چندضلعی در نظر گرفت (شکل ۴ الف). وجوه هر کدام از این سلول‌های محاسباتی در مدل دوبعدی به‌عنوان مقطع عرضی مانند مدل یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت برای تخصیص ضریب زبری مانینگ به هر وجه از این سلول‌های محاسباتی نیاز به نقشه کاربری اراضی است. در همین راستا نقشه کاربری اراضی برای منطقه مورد مطالعه در محیط Arc-Map نرم‌افزار GIS با توجه به تصاویر گوگل ارث و نقشه سازمان مراتع جنگلداری (شکل ۴ ب) به‌صورت شیب فایل ساخته شده و در پنجره RAS-Mapper فراخوانی شده است. در این پژوهش محدوده تغییرات ضرایب زبری مانینگ با توجه به جنس، شکل و مورفولوژی بازه مطالعاتی مطابق با جدول سه بر اساس جدول چاو تعیین شده است.

## ۲-۳-۵. شرایط مرزی هیدرولیکی

در این پژوهش شرط مرزی عمق نرمال به عنوان شرط مرزی خروجی در پایین دست و شرط مرزی هیدروگراف سیلاب به عنوان شرط مرزی ورودی بالادست برای سطح جریان دوبعدی استفاده می شود. در حالت عمق نرمال برای سطح مورد نظر باید یک شیب اصطکاکی در نظر گرفته شود، شیب اصطکاکی بر اساس شیب بستر زمین مجاور خط شرایط مرزی تعیین می شود. به عبارتی در این شرط مرزی شیب سطح زمین با شیب سطح آب یکسان در نظر گرفته می شود و جریانی یکنواخت در بازه انتهایی رودخانه برقرار می شود [۱۲]. هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه کارده- کریم آباد (شکل ۵ الف) و همچنین هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه سیج - بلغور با دوره بازگشت ۲۵ سال (شکل ۵ ب)، بر اساس مطالعات هیدرولوژی سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی به عنوان شرایط مرزی ورودی در بالادست رودخانه در نظر گرفته شدند.



الف

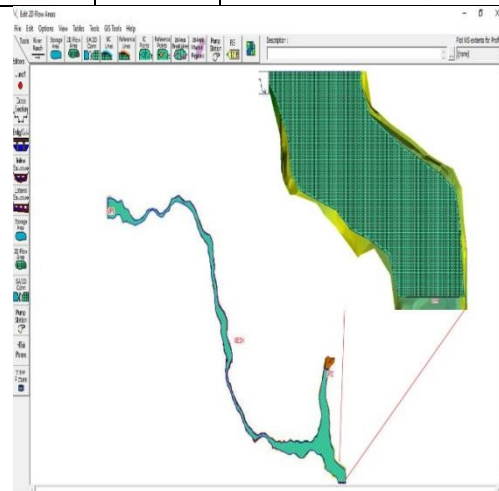


ب

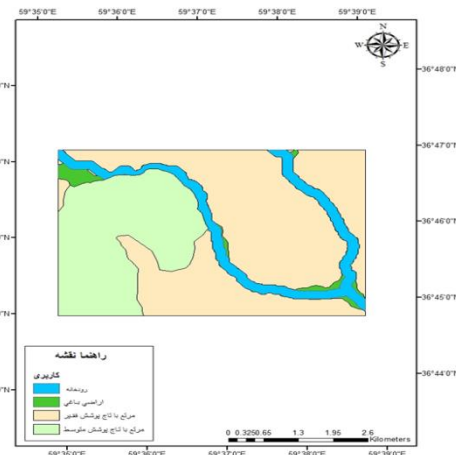
شکل ۵. الف. هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه کارده- کریم آباد با دوره بازگشت ۲۵ سال و ب. هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه سیج- بلغور با دوره بازگشت ۲۵ سال

## جدول ۳. قسمتی از جدول استاندارد چاو برای تعیین ضریب زبری مانینگ

مقدار حداکثر	مقدار حداقل	نوع پوشش
۰/۰۵	۰/۰۳	مراتع متراکم
۰/۰۵	۰/۰۲	زمین کشاورزی
۰/۰۷	۰/۰۳۵	مراتع پراکنده و علف هرز
۰/۱۶	۰/۰۴۵	مراتع متوسط تا متراکم درختچه
۰/۰۸	۰/۰۳	زمین با کنده های درخت
۰/۰۷	۰/۰۲۵	شبکه آبراهه
۱	۰/۰۷	سنگلاخ
۰/۰۴	۰/۰۲	زمین زراعی بدون گیاه
۰/۱۲	۰/۰۸	جنگل کم تراکم
۰/۰۵	۰/۰۳	زمین کشاورزی و باغ
۰/۲	۰/۰۴	تلفیق مراتع متوسط تا متراکم درختچه و جنگل
۰/۲	۰/۱۱	جنگل متراکم



الف



ب

شکل ۴. الف. شبکه مش بازه مورد مطالعه در محیط RAS- Mapper و ب.

نقشه کاربری اراضی بازه مورد مطالعه

### ۲-۳-۶. تحلیل حساسیت مدل هیدرولیکی

در پژوهش حاضر، تأثیر ابعاد مش محاسباتی و اجرای مدل در حالت موج دینامیک و موج پخشیده در نتایج پهنه سیلاب با استفاده از شاخص‌های ارزیابی همبستگی، درصد خطا و ضریب نش ارزیابی شده است. برای دریافت پاسخ‌های دقیق شبیه‌سازی جریان دوبعدی، انتخاب اندازه سلول ( $\Delta x$ ) و مرحله زمانی محاسباتی ( $\Delta T$ ) بسیار مهم است، زیرا طبق رابطه کورانت چنانچه ابعاد شبکه محاسباتی و گام زمانی به درستی انتخاب نشود، مدل ناپایدار شده و اجرا نمی‌شود. بنابراین با استفاده از روش آزمون و خطا گام زمانی ۲۰ ثانیه به عنوان گام زمانی مناسب برای ایجاد یک مدل پایدار، انتخاب شده است و در انتهای این بخش تأثیر ابعاد سلولی شبکه محاسباتی بر میزان برآورد پهنه سیلاب بررسی شده است. تحلیل حساسیت ابعاد سلول‌های محاسباتی ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر برای ساخت شبکه محاسباتی دوبعدی انجام شد.

### ۲-۳-۷. صحت‌سنجی<sup>۵</sup> مدل هیدرولیکی

با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده، اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی صورت می‌گیرد. برای صحت‌سنجی نتایج دبی شبیه‌سازی شده با دبی مشاهده‌ای از سه شاخص ارزیابی مانند ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و درصد خطا استفاده شده است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) با استفاده از روش تجزیه و برازش قابل بررسی است (رابطه ۱).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (1)$$

ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) رایج‌ترین شاخص آماری برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی است (رابطه ۲). مقدار NSE از  $-\infty$  تا ۱+ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است. بر اساس پژوهش‌های پیشین از جمله پژوهش گاسمن و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۷ اگر مقدار NSE از ۰/۵ بیشتر باشد مدل خوب شبیه‌سازی شده است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (2)$$

مقدار شاخص درصد خطا (رابطه ۳) از صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن صفر است. هرچقدر این شاخص کمتر باشد، مدل شبیه‌سازی شده بهتر است. رابطه زیر مقدار درصد خطا را نشان می‌دهد.

$$\text{درصد خطا} = \frac{\sum (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum Q_{obs,i}} * 100 \quad (3)$$

در روابط بالا  $Q_{sim}$  مقادیر دبی شبیه‌سازی شده،  $Q_{obs}$  مقادیر دبی مشاهده‌ای،  $\bar{Q}_{sim,i}$  میانگین دبی شبیه‌سازی شده و  $\bar{Q}_{obs,i}$  میانگین دبی مشاهده‌ای را نشان می‌دهند.

### ۲-۳-۸. ناحیه‌بندی خطر سیل و تهیه نقشه خطر سیل

در ادامه پس از تهیه پهنه سیل، نیاز به ناحیه‌بندی خطر سیل در آن پهنه احساس می‌شود. ناحیه‌بندی خطر سیل معمولاً به منظور شناسایی، طبقه‌بندی نواحی مختلف پهنه سیل با توجه به میزان خطر سیل، آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و جامعه در هر منطقه صورت می‌گیرد.

در ایران برای یکسان‌سازی نقشه‌های ناحیه‌بندی خطر سیل از دو روش طبقه‌بندی ناحیه‌های خطر بر اساس احتمال وقوع سیل و روش مورد استفاده در کشور استرالیا استفاده می‌شود، اما روش کشور استرالیا به دلیل اینکه جزئیات بیشتری از وضعیت تهدید سیل در منطقه مورد مطالعه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، توصیه شده است [۱۴].

بنا بر توضیحات یاد شده، در این پژوهش پس از استخراج نقشه تغییرات پارامترهای عمق و سرعت در طول بازه مطالعاتی، ابتدا دستورالعمل ناحیه‌بندی خطر سیل بر اساس روش کشور استرالیا در پنجره RASter Calculator، به زبان ویژوال بیسیک<sup>۶</sup> نوشته شده است. در نهایت با ترکیب نقشه‌های عمق و سرعت، نقشه ناحیه‌بندی خطر سیل برای بازه مطالعاتی به کمک قابلیت جدید HEC-RAS با عنوان Calculated Layer تهیه شد.

### ۲-۳-۹. کنترل و مهار سیلاب

هدف اصلی این فرایند، کاهش یا حذف خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از وقوع سیلاب تا

احداث دیواره‌های کنترل سیل در مناطق شماره گذاری شده از ۱ تا ۴ گرفته شده است. در نهایت تأثیر احداث این دیواره‌ها بر مهار سیلاب و کاهش پهنه سیلاب ارائه شد. شکل ۶ (ب)، نحوه تعریف سیل‌بندها را در راستای طولی رودخانه با استفاده از ابزار Break Line برای هدایت سیلاب در یک مسیر و مجرای مشخص، محدود و عدم گسترش سیلاب در زمین‌های اطراف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، تعریف دیواره سیل‌بند در بازه ۱ و ۴ پاسخگو نبوده به همین علت راهکار دوم یعنی احداث بند سیل‌گیر در این قسمت‌ها اجرا و تأثیر آن‌ها بر کاهش پهنه سیلاب نشان داده شد.



ب

شکل ۶. الف. مناطق حساس به سیل‌گیری بر اساس بازه ۱ تا ۴ و ب. تعریف Break Lines برای تعریف دیواره سیل‌بند.

سیلاب انتخاب شدند (شکل ۷). این بندها در جهت عرض رودخانه و در ارتفاع مختلف بر اساس عمق رودخانه بین ۳ تا ۴ متر در محیط HEC-RAS ایجاد شده‌اند؛ سپس تأثیر آن‌ها بر میزان شدت سیلاب پایین دست در بخش نتایج دیده می‌شود.

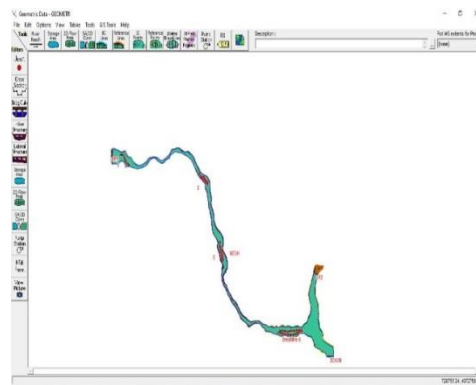


ب

حد امکان است. باید توجه داشت که مهار کامل سیلاب‌ها غیرممکن است، بنابراین تنها با مدیریت صحیح آن‌ها می‌توان خسارت‌ها را به حداقل رساند. در این مقاله پس از مشخص شدن پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال یا همان حد بستر رودخانه که در واقع یک روش غیر سازه‌ای کنترل سیلاب محسوب می‌شود، راهکارهایی برای کنترل و مهار سیلاب به روش سازه‌ای ارائه شده است. بنابراین دو راهکار احداث دیواره‌ها و بندهای کنترل سیل ارائه شده که در ادامه تأثیر هر یک از آن‌ها بر پهنه سیلاب و پارامترهای هیدرولیکی بررسی شده است.

#### • دیواره کنترل سیل

با توجه به پهنه سیل تهیه شده، برای کنترل سیل در این مناطق که در شکل ۶ (الف) نمایش داده شده است، تصمیم به



الف

#### • بندهای کنترل سیل

با توجه به نقشه پهنه سیل و مناطقی که دیواره کنترل سیل پاسخگو نبوده (بازه ۱ و ۴)، نیاز به راهکار طراحی سازه است. بنابراین بر اساس گسترش پهنه سیل، چند نقطه در بازه‌های نشان داده شده ۱ و ۴، برای ایجاد بندهای کنترل



الف

شکل ۷. الف. موقعیت قرارگیری بند کنترل سیلاب بازه ۱، ب. موقعیت قرارگیری بندهای کنترل سیلاب بازه ۴

زبری مانینگ، دقت نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و ابعاد شبکه محاسباتی در جهت برآورد هیدروگراف سیلاب مؤثر هستند.

جدول ۴. تأثیر ابعاد سلولی شبکه محاسباتی بر نتایج مدل‌سازی دوبعدی

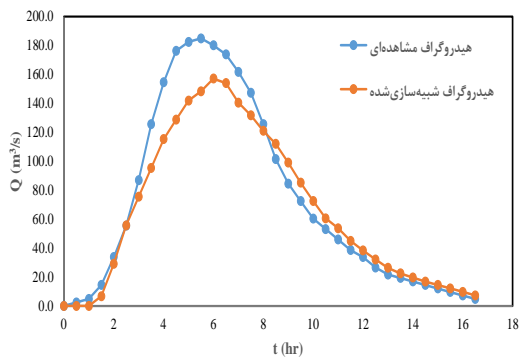
ابعاد شبکه (متر)	گام زمانی	R2	NSE	درصد خطا
1	۲۰ ثانیه	۰/۹۵	۰/۹۳	۵
5	۲۰ ثانیه	۰/۹۵	۰/۹۲	۸
10	۲۰ ثانیه	۰/۹۶	۰/۸۳	۲۰
15	۲۰ ثانیه	۰/۹۵	۰/۸۲	۲۲
20	۲۰ ثانیه	۰/۹۵	۰/۸۲	۱۹

### ۳. نتایج و بحث

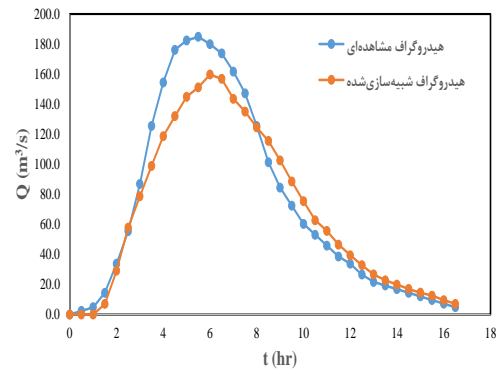
#### ۳-۱. تحلیل حساسیت مدل نسبت به ابعاد سلولی

##### شبکه محاسباتی دوبعدی

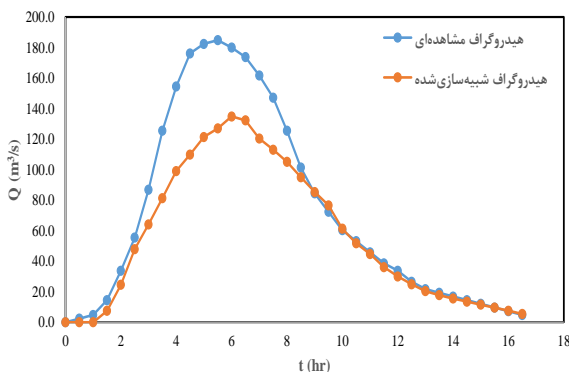
در این مقاله مدل با ابعاد سلولی ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر اجرا و در نهایت شاخص‌های آماری مانند ضریب همبستگی، درصد خطا و ضریب نش-ساتکلیف بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان درصد خطا با افزایش ابعاد شبکه بیشتر می‌شود، همچنین با افزایش ابعاد شبکه، هیدروگراف شبیه‌سازی شده از هیدروگراف مشاهداتی فاصله می‌گیرد (شکل ۸). به عبارت دیگر در مدل‌سازی دوبعدی علاوه بر مقدار ضریب



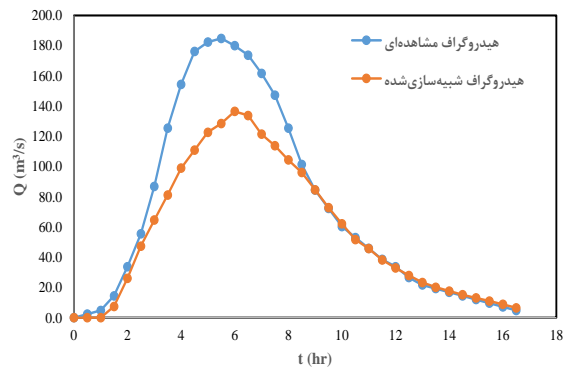
ب



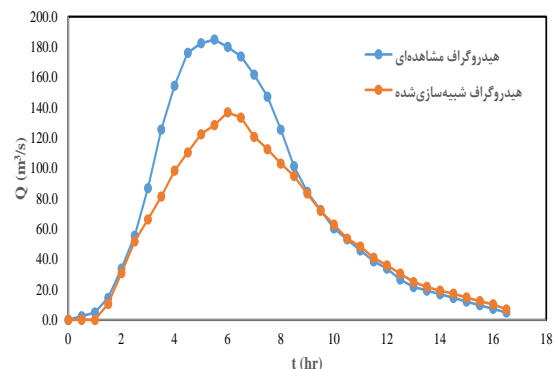
الف



ت



پ



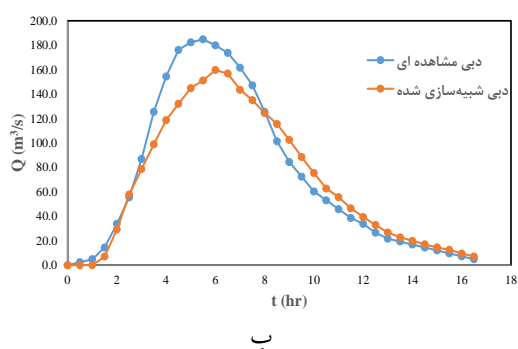
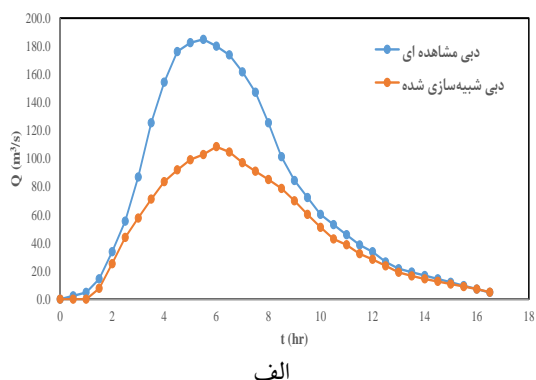
ث

شکل ۸. الف. مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

تحت تأثیر ابعاد سلولی ۱ متر، ب. ابعاد سلولی ۵ متر، پ. ابعاد سلولی ۱۰

متر، ت. ابعاد سلولی ۱۵ متر، ث. ابعاد سلولی ۲۰ متر

استفاده از معادلات موج پخشیده ضعیف و در حالت استفاده از معادلات موج دینامیک مناسب است (جدول ۶ و شکل ۱۰).



شکل ۱۰. الف. استخراج هیدروگراف سیلاب تحت تأثیر معادلات موج پخشیده، ب. استخراج هیدروگراف سیلاب تحت تأثیر معادلات موج دینامیک

جدول ۶. نتایج شبیه سازی با استفاده از معادلات موج پخشیده و دینامیک بر اساس شاخص های آماری

نوع معادلات	ابعاد شبکه (متر)	گام زمانی	R2	NSE	درصد خطا
موج پخشیده	۱	۲۰ ثانیه	۰/۹۶	۰/۶۴	۳۴
موج دینامیک	۱	۲۰ ثانیه	۰/۹۵	۰/۹۳	۵

بررسی نتایج حاصل از تحلیل حساسیت های انجام شده توسط تغییر ابعاد سلولی شبکه محاسباتی و نوع معادلات حاکم بر جریان نشان می دهد که با کاهش ابعاد سلولی و استفاده از معادلات موج دینامیک پاسخ دقیق تری نسبت به مساحت پهنه سیلاب، عمق سیلاب، سرعت و هیدروگراف خروجی سیلاب به دست می آید اما در این حالت سرعت اجرای مدل چندین برابر طولانی تر از اجرای مدل با روش حل معادلات موج پخشیده است. در حالت کلی می توان چنین نتیجه

مساحت پهنه سیلاب با استفاده از ابعاد سلولی ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر به دست آمده است (جدول ۵). با توجه به نتایج به دست آمده، کاهش پهنه سیل گیر شبیه سازی شده در مدل با ابعاد سلولی بزرگ تر (بزرگ تر از ۵۰ متر) نسبت به پهنه حاصل از مدل با ابعاد سلولی کوچک تر است. علت اصلی این امر را می توان ناشی از ایجاد سلول های نامنظم و غیر هندسی در کناره های شبکه محاسباتی و ناکارآمدی مدل در تخمین و شبیه سازی پهنه سیل گیر دانست. در نهایت با توجه به نتایج گفته شده ابعاد سلولی ۵ متر به دلیل سرعت بیشتر اجرای مدل و همچنین نتایج نزدیک به ابعاد سلولی ۱ متر به عنوان بعد سلول های شبکه محاسباتی مدل برای شبیه سازی محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

جدول ۵. تأثیر ابعاد مش محاسباتی در برآورد مساحت پهنه سیلاب

ابعاد سلولی (متر)	پهنه سیلاب شبیه سازی شده (مترمربع)
۱	۴۰۸۲۶۷/۴۶۰
۵	۴۱۴۸۳۸/۲۸۹
۱۰	۳۷۶۲۰۱/۶۳۹
۱۵	۴۱۲۳۶۰/۰۹۶
۲۰	۴۱۹۸۰۳/۰۱۳
۵۰	۳۷۲۷۷۷/۴۸۷
۱۰۰	۳۴۰۷۷۷/۲۷۲

### ۲-۳. تحلیل خروجی مدل با روش حل معادلات موج پخشیده و دینامیک

از آنجاکه معادله موج پخشیده در جهت استخراج هیدروگراف سیلاب منطقه ساده تر بوده و مدت زمان اجرای مدل با استفاده از آن کمتر است با توجه به شکل ۱۰ (الف) مدل نتوانسته میزان دبی حداقل و حداکثر را به خوبی برآورد نماید. از طرفی معادله موج دینامیک در جهت استخراج هیدروگراف سیلاب منطقه نسبت به معادله موج پخشیده، پیچیده تر و مدت زمان اجرای مدل در این حالت بیشتر است اما با توجه به شکل ۱۰ (ب) مدل به خوبی توانسته میزان دبی حداقل و تا حدودی دبی حداکثر را برآورد نماید. بر اساس شاخص های ارزیابی، برآورد هیدروگراف سیلاب در حالت

جدول ۷. مقادیر سرعت، عمق و مساحت پیش‌بینی شده سیل در دوره بازگشت ۲۵ سال

مقادیر		پارامترهای هیدرولیکی
۰/۰۰۱۳	مقدار حداقل	سرعت (متر بر ثانیه)
۲/۷۶۷۲	میانگین	
۷/۳۸۶۲	مقدار حداکثر	
۰/۰۰۰۹۷۶۶	مقدار حداقل	عمق (متر)
۰/۸۳۸۱	میانگین	
۳/۷۸۲۳	مقدار حداکثر	
۴۱۴۸۳۸/۲۸۹		مساحت پهنه سیلاب (مترمربع)

### ۳-۴. نقشه‌های تغییرات عمق و سرعت سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

با توجه به این نقشه حداکثر عمق سیلاب در طول کانال رودخانه به دلیل شکل مقطع آن، رخ داده است و محدوده سیل‌گیر اطراف کانال دارای کمترین مقادیر عمق هستند به طوری که در مناطق انتهایی پهنه سیل‌گیر پارامتر هیدرولیکی عمق کمترین مقدار را داراست (شکل ۱۲ الف). مقدار سرعت جریان سیلاب نیز در هر نقطه از محدوده پخش سیلاب از طریق نقشه‌های تغییرات سرعت جریان نشان داده می‌شود. از مهم‌ترین کاربردهای این نوع نقشه‌ها می‌توان به فراهم نمودن اطلاعات لازم جهت طراحی سازه‌های کنترل سیلاب و نقشه‌های خطر سیل اشاره نمود. معیار سرعت برای حفاظت از جان مردم، ساختمان‌ها و وسایل نقلیه متفاوت است در نتیجه می‌توان نقشه تغییرات سرعت را متناسب با آن تهیه کرد [۱۴]. با توجه به این نقشه مقادیر حداکثر سرعت سیلاب در کانال رودخانه و مقادیر حداقل در مناطق اطراف کانال رخ داده است. این تفاوت در مقادیر سرعت سیلاب در مناطق سیل‌گیر و کانال رودخانه می‌تواند ناشی از شیب کانال و تفاوت در مقادیر ضرایب زبری آن‌ها باشد. وجود پوشش گیاهی در محدوده سیل‌گیر اطراف کانال رودخانه با ایجاد مواعی در مسیر سیلاب، باعث کاهش سرعت سیل می‌شود (شکل ۱۲ ب).

گرفت که علاوه بر مقدار ضریب زبری مانینگ و اندازه ابعاد سلولی شبکه محاسباتی، نوع معادله حل جریان به‌ویژه در مواقع برآورد هیدروگراف سیلاب مؤثر بوده است. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این بخش و مقایسه هیدروگراف خروجی مشاهده‌ای با هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده، حل معادلات به روش موج دینامیک مبنای محاسبات قرار گرفت.

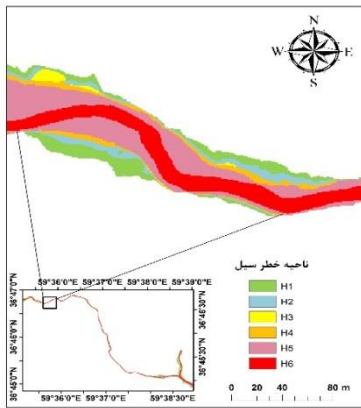
همان‌طور که در تمامی هیدروگراف‌های فوق مشهود است، مقادیر دبی به‌خصوص دبی‌های حداکثر در هیدروگراف‌های مشاهده‌ای بیشتر از هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار است. علت این امر را می‌توان در نادیده گرفتن دبی‌های اضافه‌شده به رودخانه در طی مسیر به هنگام بارندگی‌ها توسط نرم‌افزار و در نتیجه پایین افتادن هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده نسبت به هیدروگراف مشاهده‌ای دانست.

### ۳-۳. نقشه پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

پهنه به‌دست‌آمده همان حد بستر رودخانه کارده است که با استفاده از آن می‌توان تمهیداتی در جهت کنترل و مهار سیلاب و در نتیجه کاهش خسارت‌های سیل به روش غیرسازه‌ای در نظر گرفت (شکل ۱۱). جدول ۷ مقادیر پارامترهای هیدرولیکی استخراج‌شده با استفاده از مدل‌سازی بازه مطالعاتی را به ازای دبی با دوره بازگشت ۲۵ سال نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، تغییرات عمق و سرعت در طی مسیر رودخانه ناشی از تغییرات سطح مقطع رودخانه است.



شکل ۱۱. نقشه پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال



شکل ۱۳. نقشه ناحیه بندی خطر سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

### ۳-۶. تأثیر دیوارهای کنترل سیل

همان‌طور که در قبل اشاره شد، برای کاهش پهنه سیل در بازه‌های ۱ تا ۴ محدوده مورد مطالعه از دیوارهای کنترل سیلاب استفاده شد. احداث این دیوارها موجب کاهش سطح مقطع عبوری سیلاب و در نتیجه افزایش عمق و سرعت سیلاب در بازه‌های مشخص شده می‌شود. در این بخش ابتدا پهنه سیل قبل از احداث دیوارها، بعد از احداث آن‌ها، تأثیر این دیوارها بر کاهش پهنه سیل و تغییرات سرعت قبل و بعد احداث آن‌ها آورده شده است (شکل ۱۴ تا ۱۷). به‌طور مثال، همان‌طور که در شکل ۱۴ الف) مشاهده می‌شود، سیلاب به داخل باغ‌های اطراف رودخانه تجاوز کرده است که احداث دیواره سیل‌گیر (شکل ۱۴ ب) در سیلاب‌دشت راست رودخانه، باعث کاهش این پهنه و در نتیجه حفاظت از این اراضی شده است.

الف

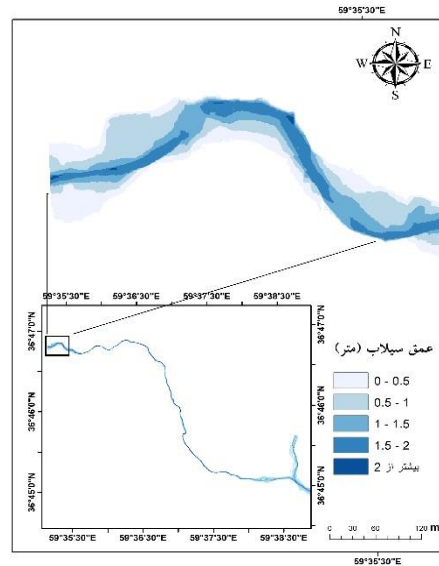


ب

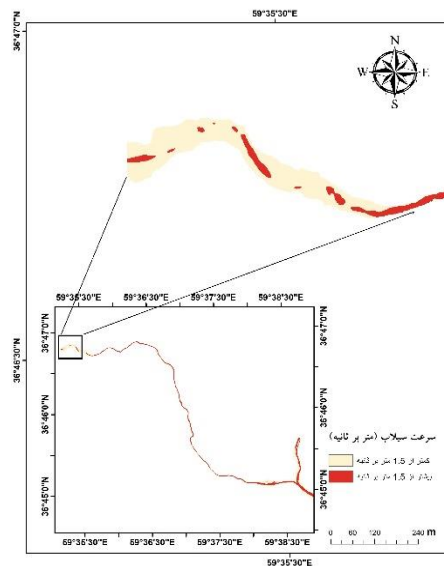


شکل ۱۴: الف) پهنه سیل قبل از احداث دیواره سیل‌بند در بازه ۱، ب)

پهنه سیل بعد از احداث دیواره سیل‌بند در بازه ۱



الف



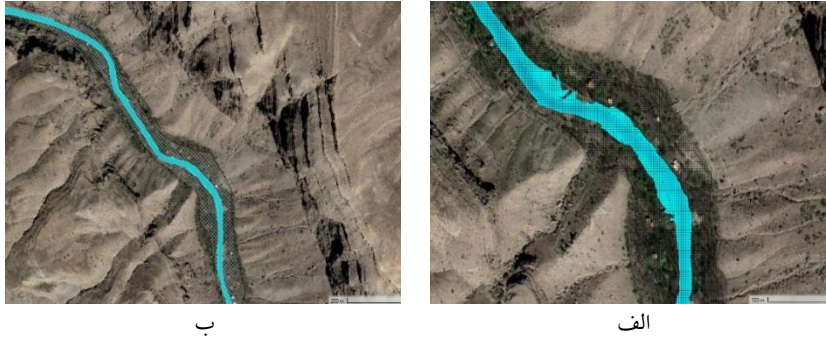
ب

شکل ۱۲. الف) نقشه عمق سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال و ب) نقشه

سرعت سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال

### ۳-۵. نقشه ناحیه بندی خطر سیل

نقشه خطر سیل در پهنه سیلاب محاسبه شد و با توجه به این نقشه کانال رودخانه به دلیل داشتن بیشترین مقادیر عمق و سرعت، دارای بیشترین خطر و نواحی انتهایی پهنه سیل دارای کمترین میزان خطر هستند (شکل ۱۳).



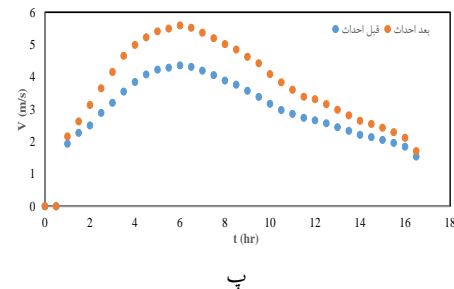
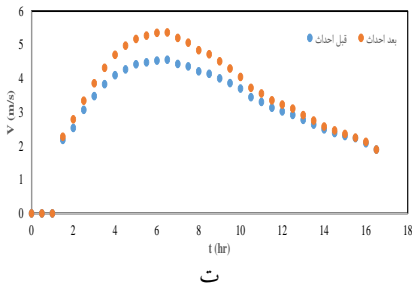
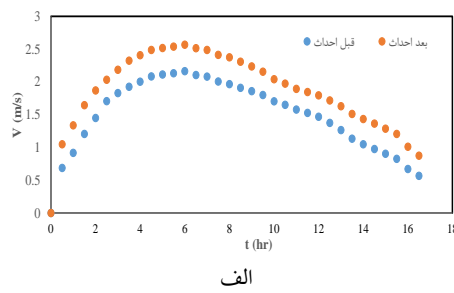
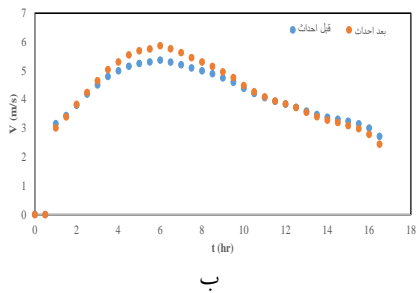
شکل ۱۵. الف. پهنه سیل قبل از احداث دیواره سیل بند در بازه ۲، ب. پهنه سیل بعد از احداث دیواره سیل بند در بازه ۲



شکل ۱۶. الف. پهنه سیل قبل از احداث دیواره سیل بند در بازه ۳، ب. پهنه سیل بعد از احداث دیواره سیل بند در بازه ۳



شکل ۱۷: الف. پهنه سیل قبل از احداث دیواره سیل بند در بازه ۴، ب. پهنه سیل بعد از احداث دیواره سیل بند در بازه ۴



شکل ۱۸. الف. تغییرات سرعت قبل و بعد از احداث دیواره‌ها در بازه ۱، ب. بازه ۲، پ. بازه ۳، ت. بازه ۴

## ۴. نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیرات سیلاب روی بستر و مناطق سیل گیر اطراف رودخانه از طریق شبیه سازی رفتار هیدرولیکی آن با استفاده از نرم افزار HEC-RAS به صورت دوبعدی صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده باید اشاره کرد که مدل هیدرولیکی HEC-RAS علاوه بر حساسیت بر مقدار ضریب زبری مانینگ نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی و روش حل معادلات حاکم بر جریان (موج دینامیک و موج پخشیده) حساس است. همچنین با افزایش ابعاد شبکه محاسباتی درصد خطای هیدروگراف خروجی شبیه سازی شده نیز افزایش می یابد. علت این امر را می توان ساختار نامنظم سلول های محاسباتی در گوشه های شبکه و عدم توانایی مدل در شبیه سازی پهنه دانست. از طرفی اختلاف ناچیز در مساحت پهنه سیلاب شبیه سازی شده با استفاده از ابعاد سلولی کوچک، نشان دهنده اهمیت دقت DEM مورد استفاده در مدل سازی نسبت به ابعاد سلولی شبکه محاسباتی است.

درصد خطای محاسبه شده در شبیه سازی هیدروگراف خروجی با استفاده از روش حل معادلات موج دینامیک و موج پخشیده به ترتیب ۵ و ۳۴ درصد بوده است. این نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر مدل در روش حل معادلات موج دینامیک است. با توجه به مدل هیدرولیکی رودخانه محدوده تغییرات سرعت سیلاب در رودخانه بین ۰/۰۱۳ تا ۷/۳۸۶۲ متر بر ثانیه و عمق سیلاب بین ۰/۰۰۹۷۶۶ تا ۳/۷۸۲۳ متر متغیر هستند. بر اساس نتایج هیدرولیکی رودخانه، احداث دیواره های سیل بند موجب کاهش سطح مقطع عبوری و در نتیجه افزایش ارتفاع، عمق و سرعت می شود. احداث بندهای سیل گیر موجب هدایت سیلاب در یک مسیر مشخص، کاهش سرعت سیلاب و در نتیجه کاهش خسارت های ناشی از سیلاب می شود.

## سپاسگزاری

این مقاله از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه فردوسی مشهد استخراج شده است.

نویسندگان مقاله از دانشگاه فردوسی مشهد برای ایجاد شرایط انجام تحقیق کمال تشکر و قدردانی را به عمل می آورند.

## مراجع

- [1] Abedi Koupai J, Babaiee B. Determination of the Boundaries of Zayandehrud River Bed Using Arc GIS, HEC-RAS and Hec-GeoRAS Extension. JWSS-Isfahan University of Technology. 2019 Dec 10; 23(4):361-76.
- [۲] راهنمای کاربرد مدل های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه. نشریه ۵۴۸ وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا؛ ۱۳۹۱.
- [3] Horritt MS, Bates PD. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of hydrology. 2002 Nov 1; 268(1-4):87-99.
- [4] Desalegn H, Mulu A. Flood vulnerability assessment using GIS at Fetam watershed, upper Abbay basin, Ethiopia. Heliyon. 2021 Jan 1;7(1).
- [۵] باباخانی سمیرا. ارزیابی روش های برآورد دبی ۲۵ ساله در تعیین حریم و بستر رودخانه در مناطق خشک و نیمه خشک (مطالعه موردی: رودخانه کشف رود). دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی؛ ۱۳۹۵.
- [۶] خواجه جویی فهیمه. بررسی تأثیر ساخت و سازهای غیرمجاز در حریم و بستر رودخانه بر روی جریان (مطالعه موردی: رودخانه فاروب رومان). دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی؛ ۱۳۹۹.
- [۷] نمازی راد اکرم. شناسایی و پهنه بندی مناطق پرخطر سیلاب سال ۱۳۹۸ گلستان با بهره گیری از تصاویر ستینل و مدل HEC-RAS. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی؛ ۱۴۰۰.
- [8] Kalra A, Joshi N, Baral S, Nhuchhen Pradhan S, Mambepa M, Paudel S, Xia C, Gupta R. Coupled 1D and 2D HEC-RAS floodplain modeling of Pecos River in New Mexico.

In:World Environmental and Water Resources

Congress; 2021. p. 165-178.

[9] Ghimire E, Sharma S, Lamichhane N. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system. ISH Journal of Hydraulic Engineering. 2022 Jan 2; 28(1):110-26.

[۱۰] عباس‌پور انسیه. پهنه‌بندی خطر سیل گرفتگی با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و مقایسه نتایج آن با نرم‌افزار CES (مطالعه موردی: رودخانه زشک). دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی؛ ۱۳۹۹.

[11] Ongdas N, Akiyanova F, Karakulov Y, Muratbayeva A, Zinabdin N. Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) river in Kazakhstan. Water. 2020 Sep 24; 12(10):2672.

[۱۲] عزیزیان اصغر، صمدی امیر. شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب در محیط مدل عددی HEC-RAS 5.0. تهران: نشر پارسا؛ ۱۴۰۱.

[13] Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE. 2007; 50(4):1211-50.

[۱۴] راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب. ضابطه شماره ۸۲۱ سازمان برنامه‌و بودجه کشور، دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا؛ ۱۳۹۹.

## پی‌نوشت‌ها

1. Levee and Flood Walls
2. Geographic Information System
3. Fetam River
4. Digital Elavation Model
5. Validation
6. Visual Basic