

تهیه نقشه خطر سیل مبتنی بر انرژی جریان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی

مطالعه موردی: رودخانه نکا

محمد کریمی فیروزجایی - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران.
 عطاءاله عبداللهی کاکرودی* - استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
 محمدرضا جلوخانی نیارکی - استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۱۳

چکیده

مناطق مجاور رودخانه‌ها که به دلیل شرایط خاص، فضاهایی مناسب برای انجام فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌شوند، همواره در معرض خطرات ناشی از وقوع سیلاب‌ها قرار دارند. از این رو در این مناطق تعیین میزان پیشروی، ارتفاع و خصوصیات سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف که تحت عنوان پهنه‌بندی سیلاب صورت می‌گیرد، حائز اهمیت فراوان خواهد بود. رودخانه نکارود با توجه به شرایط خاص حوضه آبریز و تغییر ناگهانی شیب از مناطق مرتفع به جلگه ساحلی در چند دهه اخیر شاهد سیل‌های متعدد و ویرانگری بوده، که اثرات جبران‌ناپذیر اقتصادی در این منطقه بجا گذاشته است. هدف از این تحقیق تهیه نقشه خطر سیل برای قسمتی از رودخانه نکارود می‌باشد. برای این منظور با تلفیق سیستم تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی (HEC-RAS) با سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه عمق و سرعت سیل این رودخانه برای دوره‌های بازگشت ۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۲۵-۱۰-۵ ساله مدل‌سازی شده است. به منظور دستیابی به تابع مناسب برای پهنه‌بندی خطر جریان از ویژگی انرژی جریان برحسب تغییرات عمق و سرعت استفاده شده است. بر اساس آن نقشه خطر سیل به دست آمده و مناطق با درجات مختلف خطر از نظر انرژی جریان طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل شده است. نتایج بیانگر آسیب‌پذیر بودن منطقه در برابر سیل با دوره بازگشت بالاتر از ۲۵ سال می‌باشد. با افزایش زمان دوره بازگشت‌های سیل، سطح منطقه تحت تأثیر سیل افزایش می‌یابد. با استفاده از تابع خطر به دست آمده مناطق تحت تأثیر سیل به پنج گروه خطر نسبی کم، متوسط، زیاد، نسبتاً زیاد و فوق‌العاده طبقه‌بندی شده است. در تمام دوره بازگشت‌ها بیشترین مساحت تحت پوشش از لحاظ میزان خطر از نوع خطر نسبی بسیار زیاد می‌باشد. نتایج پژوهش ضرورت برنامه‌ریزی و مدیریت راهکارهای حفاظتی جهت کاهش خسارات ناشی از سیل را نمایان می‌سازد. این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که سیستم اطلاعات جغرافیایی یک محیط مناسب برای تجزیه و تحلیل و تهیه نقشه خطر سیل فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: سیل، نقشه خطر، سیستم اطلاعات جغرافیایی، نکارود.

مقدمه

سیل آب فراوانی است که با سرعت جاری شده و پهنه‌ای از زمین را که در شرایط عادی زیر آب نیست در بر می‌گیرد و یکی از بزرگ‌ترین بلایای طبیعی می‌باشد (گتاهون و گبری^۱، ۲۰۱۵: ۲). در میان سوانح طبیعی سیلاب بیشترین خسارت را به بخش‌های کشاورزی، شیلات، مسکن و زیرساخت‌ها وارد کرده و به شدت بر روی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی تأثیر می‌گذارد (یانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲). این امر در کشور ما نیز صادق است. در اغلب سال‌های گذشته حدود ۷۰ درصد اعتبارات سالانه طرح کاهش اثرات بلایی طبیعی و ستاد حوادث غیرمترقبه صرف جبران خسارات ناشی از سیل شده است و این خسارات مرتباً در حال افزایش می‌باشد. رشد ۲۵۰ درصدی خسارات ناشی از سیل در پنج دهه گذشته مؤید این ادعاست. از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده خسارات ناشی از سیلاب تغییر کاربری اراضی، توسعه ساخت‌وسازها و دخل و تصرف غیرمجاز در بستر و حریم رودخانه می‌باشد. بنابراین تعیین بستر و حریم رودخانه و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب از لحاظ برنامه‌ریزی جهت مدیریت، پیش‌بینی و کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیل در این مناطق از اهمیت خاصی برخوردار است. پهنه‌بندی خطر سیل بخشی از اقدامات غیرسازه‌ای برای جلوگیری و کاهش اثرات مخرب سیل می‌باشد (دمیر و کیسی^۳، ۲۰۱۶: ۲). روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه خطر سیل وجود دارد که در این پژوهش از مدل هیدرولیکی، معادله حاکم بر انرژی جریان و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تهیه نقشه خطر سیل استفاده شده است. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS^۴) در تهیه نقشه خطر سیل دارای مزیت‌های بارزی می‌باشد (۱) در صورت نیاز به اعمال تغییرات و به‌روزروری نقشه‌ها بر اساس آمار و اطلاعات جدید، این امر به‌سادگی صورت می‌گیرد (۲) قابلیت نمایش عمق، سرعت و انرژی جریان در هر نقطه از سیلاب‌دشت را دارد (۳) تغییرات عوارض جغرافیایی موجود و تأثیر احتمالی آن را بر گستره و پهنه سیلاب را در نظر می‌گیرد (۴) امکان اتصال با مدل‌های هیدرولیکی و ایجاد سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل را فراهم می‌کند (۵) آرشیب و نگهداری نقشه‌ها مطمئن‌تر و ساده‌تر بوده و بازیابی و انتشار آن‌ها به سهولت میسر می‌باشد. رودخانه نکارود از میان شهر نکا عبور می‌کند. با توجه به شرایط خاص حوضه آبریز نکا سیل‌های متعددی در حوزه شهری این منطقه رخ داده است. بخش اعظمی از حوضه آبریز دارای شیب نسبتاً زیاد می‌باشد. بیش از ۹۱ درصد از سطح حوضه آبریز، تا محل خروجی از کوهستان (شهر نکا)، از شیب بالای ۱۵ درصد برخوردار است. همچنین ۷۵۹ کیلومتر مربع از وسعت ۱۹۱۲ کیلومتر مربعی حوضه، دارای شیب بالای ۵۰ درصد می‌باشد که تقریباً ۴۰ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شود. از دیگر خصوصیات حوضه آبریز که در ایجاد سیل نقش اساسی دارد، اختلاف ارتفاع حوضه می‌باشد در حوضه آبریز نکا اختلاف ارتفاع زیاد و به ۳۷۳۳ متر می‌رسد (سازمان آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۶۸: ۳۰). همچنین از جمله عوامل سیل‌خیز بودن منطقه می‌توان مواردی همچون جنس زمین حوضه، ضریب شکل حوضه و پیچان رود بودن رودخانه نکارود را بیان نمود.

۱-۱- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعه قابل‌توجهی جهت مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی و GIS صورت گرفته است (گیچامو^۵ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ختاک^۶ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دمیر و کیسی، ۲۰۱۶). هیل^۷ (۲۰۰۱)، قابلیت‌های

^۱ Getahun and Gebre^۲ Yang^۳ Demir and Kisi^۴ Geographic Information System^۵ Gichamo^۶ Khattak^۷ Hill

سیستم تحلیل جغرافیایی رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی (HEC-GeoRAS^۱) را در پهنه‌بندی عمق سیل و مزایای اتصال نرم‌افزارهای Arc GIS و مدل هیدرولیکی سیستم تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیکی (HEC-RAS^۲) را بیان نمود. تری بیر^۳ (۲۰۰۲)، با کاربرد ابزارهای GIS در مدل‌سازی هیدرولیکی، عنوان نمود که یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از HEC-GeoRAS افزایش دقت و صرفه‌جویی در هزینه‌های مهندسی رودخانه، به‌ویژه در حوضه‌های بزرگ و در نهایت اعمال بهترین روش مدیریتی در منطقه می‌باشد. یانگ و همکاران (۲۰۰۶) از GIS و HEC-GeoRAS برای شبیه‌سازی مورفولوژی رودخانه و استخراج اطلاعات هندسی کانال استفاده و با تلفیق آن با مدل جریان هیدرولیکی پایدار در HEC-RAS نقشه میزان سیل‌گرفتنی را تهیه نمودند. در شهر لندن با استفاده از این روش و به کمک مشخصات هندسی رودخانه و دبی اوج سیل برای دوره‌های بازگشت مختلف، نقشه پهنه‌بندی سیل رودخانه شهر لندن تهیه گردید (ایوم^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). سیلاب رودخانه شهر Fairfax در کشور ایالات متحده آمریکا با استفاده از روش مدل هیدرولیکی HEC-RAS و به کمک GIS پهنه‌بندی شد (گودل و وارن^۵، ۲۰۰۶). غلامی و همکاران (۱۳۸۵)، با به‌کارگیری مدل هیدرولیکی HEC-RAS و قابلیت‌های GIS اقدام به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه هراز نمودند نتایج مطالعه حاکی از آن بود که استفاده از قابلیت‌های GIS موجب افزایش سرعت عمل و دقت مطالعات می‌گردد. غریب و همکاران (۱۳۸۶) به پهنه‌بندی خطر و ارزیابی خسارات سیل در رودخانه قره‌چای در حومه شهر رامیان با استفاده از مدل HEC-RAS پرداخته و پس از محاسبه رقوم سطح آب پهنه خطر در هر بخش را تعیین و نهایتاً مقادیر خسارات احتمالی در هر پهنه را برآورد نمودند. حسین‌زاده (۱۳۸۳) با استفاده از HEC-GeoRAS به پهنه‌بندی سیل رودخانه لاین‌سو پرداخته و نتیجه گرفته که تلفیق GIS و مدل HEC-RAS می‌تواند در مدیریت مناطق سیل‌گیر بسیار کارا و توانا باشد. غفاری و امینی (۱۳۸۹) به پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از امکانات مدل HEC-RAS و نرم‌افزار Arc GIS و الحاقیه HEC-GeoRAS در بازه‌ای به طول ۴/۵ کیلومتر از رودخانه قزل اوزون پرداخته‌اند. آن‌ها نقشه‌های پهنه‌بندی برای دوره بازگشت‌های ۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۲۵-۱۰-۵ ساله تهیه کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که ۸۶/۱۴٪ کل سطح سیل‌گیر ۲۰۰ ساله را سیل‌های زیر ۲۵ سال تشکیل می‌دهند.

پژوهش‌های گذشته در این مورد نشان می‌دهد که تلفیق مدل هیدرولیکی با GIS می‌تواند یک روش بسیار مناسب برای ارزیابی، کنترل و پیش‌بینی خطرات و خسارات ناشی از سیل باشد. در مطالعات گذشته برای بررسی خطر سیل در مناطق مختلف تنها به پهنه‌بندی عمق سیلاب توجه شده است. در پژوهش حاضر برای بررسی و تهیه نقشه خطر سیل علاوه بر پهنه عمق از پهنه سرعت سیل نیز در موقعیت‌های مختلف رودخانه و سیلاب دشت استفاده شده است همچنین از دیگر تفاوت‌های پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر در این زمینه می‌توان به بهره‌گیری از ویژگی انرژی جریان با توجه به تلفیق پارامترهای عمق و سرعت سیل برای تهیه نقشه خطر محدوده مورد مطالعه اشاره کرد. با توجه به اهمیت منطقه مورد مطالعه از لحاظ سیل‌خیزی، هدف از پژوهش حاضر تهیه نقشه خطر سیل رودخانه نکارود برای سیل با دوره‌های بازگشت مختلف بر اساس انرژی جریان با استفاده از مدل هیدرولیکی و GIS جهت مدیریت و برنامه‌ریزی راهکارهای حفاظتی برای کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیل می‌باشد.

۲- منطقه مورد مطالعه

^۱ Hydrologic Engineering Center's-Geographic river analysis system

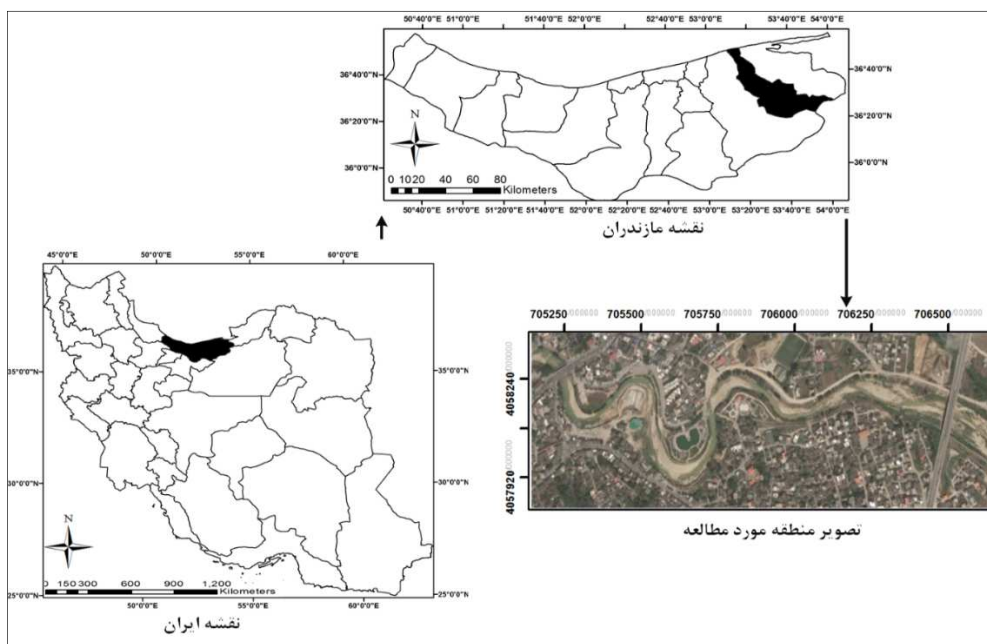
^۲ Hydrologic Engineering Center's-River Analysis System

^۳ Barr

^۴ Eum

^۵ Goodell and Warren

شهر نکا در عرض جغرافیایی ۳۹ و ۳۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۹ و ۵۳ درجه شرقی نصف‌النهار گرینویچ و ارتفاع ۵ متری از سطح آب‌های آزاد قرار داد. حوضه آبریز رودخانه نکا از شمال به اراضی کوهپایه‌ای و دشتی، از جنوب به بخشی از سلسله جبال البرز و ارتفاع تفکیک‌کننده حوضه آبریز رودخانه‌های نکارود-زرارود، از غرب به شهرستان ساری و اراضی تحت آبخور تجن و از شرق نیز به ارتفاعات شاهوار و گاوخسبان محدود است. سطح حوضه آبریز این رودخانه از منتهی الیه ارتفاعات تا محل آبلو (ایستگاه ورودی به دشت) در حدود ۲۵۹۰ کیلومترمربع است (عسگری، ۱۳۵۰: ۷۸). کمترین عرض حوضه آبریز ۷ کیلومتر در شرق و بیشترین آن به طول ۶۰ کیلومتر است. شیب متوسط حوضه آبریز ۲۵/۵ درصد و ارتفاع میانه ۱۶۰۷ متر است. طول و عرض مستطیل معادل حوضه آبریز رودخانه نکا به ترتیب ۱۴۵/۸ و ۱۳/۱۱ کیلومتر محاسبه شده است (سازمان آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۶۸: ۳۲). این رودخانه طی ۱۳۰ کیلومتر در داخل کوهستان در ۷ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر نکا، از کوهستان خارج شده و وارد جلگه نکا می‌گردد. در فاصله کوهستان تا شهر نکا شعبه پرباب زرندين نیز به داخل آن می‌ریزد. پس از طی مسیر پر پیچ و خم ۳۹ کیلومتری (فاصله مستقیم تا دریا ۲۲ کیلومتر) به داخل دریا خزر می‌ریزد. طول کلی رودخانه نکا ۱۷۶ کیلومتر است (افشین، ۱۹۹۴). محدوده مورد مطالعه در این تحقیق در بازه‌ای به طول تقریبی ۲۵۰۰ متر روی رودخانه نکارود می‌باشد. در شکل (۱) محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

۳- مواد و روش

۳-۱- داده‌ها

جهت مدل‌سازی منطقه، شبیه‌سازی سطوح آب‌گرفتگی و تهیه نقشه خطر سیل از امکانات سیستم اطلاعات جغرافیایی Arc GIS، HEC-GeoRAS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS استفاده می‌گردد.

داده‌های اولیه مورد استفاده در این پژوهش نقشه توپوگرافی و کاربری اراضی ۱/۲۰۰۰ محدوده مورد مطالعه تهیه شده توسط شهرداری نکا، داده‌های مربوط به شرایط مرزی جریان و آمار دبی حداکثر روزانه سی سال اخیر ایستگاه هیدرومتری آبلو واقع در بالادست محدوده می‌باشند که از سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه شده است. ضرایب زبری مانینگ مربوط به کانال اصلی رودخانه و سیلاب دشت با توجه به نقشه کاربری اراضی، همراه با بازدیدهای میدانی و به کمک جدول پیشنهادی چاو تهیه گردید.

۳-۲- پهنه‌بندی عمق و سرعت سیل

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی عمق و سرعت سیل مطابق شکل (۲) روی داده‌های اولیه سه مرحله پیش‌پردازش، مدل هیدرولیکی و پس پردازش اعمال می‌گردد. از قابلیت‌های GIS در سه مرحله پیش‌پردازش، پس پردازش و مرحله نهایی تهیه نقشه نهایی خطر سیل استفاده می‌شود.



شکل ۲: مراحل اصلی تهیه نقشه پهنه عمق و سرعت سیل

۳-۲-۱- پیش‌پردازش

جهت شبیه‌سازی رودخانه و سیلاب دشت، تهیه مدل رقومی ارتفاعی با مقیاس مناسب ضروری می‌باشد. مدل رقومی ارتفاعی محدوده از نقشه توپوگرافی ۱/۲۰۰۰ استخراج و در مرحله پیش‌پردازش مشخصات مورفولوژی و هندسی مربوط به رودخانه و سیلاب دشت از جمله خط مرکزی جریان در کانال رودخانه، خطوط مسیر جریان، خطوط سواحل و مقاطع عرضی در فواصل مناسب از روی مدل رقومی ارتفاعی در محیط Arc GIS توسط HEC-GeoRAS به دست می‌آید (مرواده^۱، ۲۰۰۹؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۱).

۳-۲-۲- مدل هیدرولیکی

شبیه‌سازی جریان و محاسبه پروفیل جریان متناسب با رژیم آن در بین مقاطع، به کمک تلفیق داده‌های حاصل از محاسبات با استفاده از مدل ریاضی امکان‌پذیر است. با توجه به این که برای بررسی خطرات سیل و ارائه پهنه‌بندی خطر متناسب با آن، داشتن اطلاعات مرتبط با تغییرات تراز سطح و سرعت آب در مقاطع مختلف ضروری است بدین منظور از مدل هیدرولیکی HEC-RAS سامانه انجمن مهندسين ارتش آمریکا استفاده می‌شود. این مدل قادر به انجام محاسبات یک‌بعدی در حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار می‌باشد. اساس این مدل بر پایه معادله انرژی می‌باشد که توسط رابطه ۱ و روابط بین اجزا معادله انرژی با شکل (۳) نشان داده شده است. در این مدل پروفیل سطح آب به روش گام‌به‌گام استاندارد شبیه‌سازی می‌گردد (برونر^۲، ۱۹۹۵).

$$Y_2 + Z_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_{e,1-2} \quad \text{رابطه ۱}$$

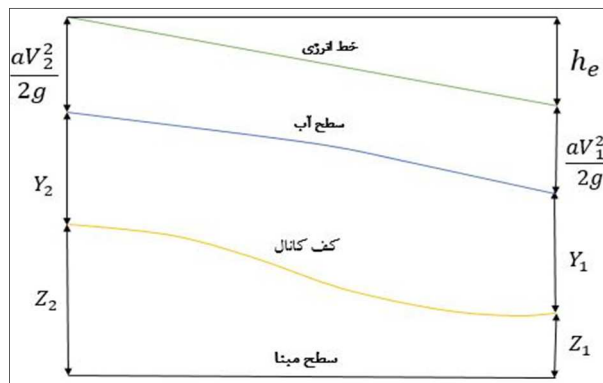
در رابطه ۱، Y_1 و Y_2 عمق آب در مقاطع ۱ و ۲، Z_1 و Z_2 تراز کف کانال اصلی از سطح مبنا، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲، a_1 و a_2 ضریب تصحیح انرژی جنبشی مقاطع ۱ و ۲، g شتاب ثقل و $h_{e,1-2}$ کل انرژی اتلافی بین دو مقطع ۱ و ۲ می‌باشد. ضریب تصحیح انرژی جنبشی مقطع i از رابطه ۲ به دست می‌آید (برونر، ۱۹۹۵).

$$a_i = \frac{\sum \left(\frac{Q_i^3}{A_i^3} \right)}{\left(\frac{\sum Q_i}{\sum A_i} \right)^3} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در رابطه (۲)، a_i ضریب تصحیح انرژی جنبشی، A_i مساحت و Q_i دبی عبوری از مقطع i می‌باشند.

^۱ Merwade

^۲ Brunner



شکل ۳: روابط بین اجزای معادله انرژی

کل انرژی اتلافی ناشی از مجموع دو نوع افت انرژی می‌باشد. که به صورت رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$h_e = h_f + h_0 \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، h_f افت انرژی ناشی از اصطکاک در نتیجه زبری سطوح کانال و h_0 افت موضعی انرژی در نتیجه تنگ‌شدگی و یا بازشدگی مقاطع کانال می‌باشد.

افت انرژی ناشی از اصطکاک از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$h_f = L \times S_f \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴، L میانگین وزنی طول کانال و S_f میانگین شیب خط انرژی بین دو مقطع می‌باشد.

میانگین وزنی طول کانال با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad \text{رابطه ۵}$$

L_{lob} ، L_{ch} ، L_{rob} به ترتیب نشان‌دهنده طول جریان بین مقاطع به ترتیب در ساحل راست، کانال اصلی و ساحل چپ و Q_{lob} ، Q_{ch} ، Q_{rob} میانگین دبی جریان بین مقاطع به ترتیب در ساحل راست، کانال اصلی و ساحل چپ می‌باشد.

اگر S_{f1} و S_{f2} شیب خط انرژی در مقاطع ۱ و ۲ در نظر گرفته شود برای محاسبه میانگین شیب خط انرژی در دو مقطع مجاور ۱ و ۲ یکی از چهار روش زیر انتخاب می‌شود (برونر، ۱۹۹۵).

۱- میانگین حسابی شیب که به صورت رابطه ۶ می‌شود.

$$S_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad \text{رابطه ۶}$$

۲- میانگین هندسی شیب که به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$S_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad \text{رابطه ۷}$$

۳- میانگین ضریب انتقالی که به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$S_f = \left(\frac{Q_2 + Q_1}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{رابطه ۸}$$

که در رابطه ۸، Q_1 و Q_2 دبی عبوری از مقاطع ۱ و ۲ و K_1 و K_2 ضریب انتقال مقاطع ۱ و ۲ می‌باشد و مقدار آن در سیستم متریک از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$K = \frac{AR^2}{n} \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه ۹، R شعاع هیدرولیکی، A مساحت مقطع و n ضریب زبری مانینگ می‌باشد.

۴- میانگین هارمونیک شیب که با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$S_f = \frac{2S_{f_2}S_{f_1}}{S_{f_2}+S_{f_1}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

مدل هیدرولیکی HEC-RAS قادر است بر اساس رژیم جریان و نوع پروفیل سطح آب روش مناسب محاسبه میانگین شیب خط انرژی را انتخاب نماید (برونر، ۱۹۹۵).

۲- افت موضعی انرژی که در نتیجه تنگ‌شدگی و یا بازشدگی مقاطع به وجود می‌آید. این نوع افت با حاصل ضرب ضریب تنگ‌شدگی (C_c^1) یا ضریب بازشدگی (C_e^2) در تفاضل ارتفاع معادل سرعت بین دو مقطع به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌گردد.

$$h_0 = C_c \text{ or } C_e \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در اثر تغییر در دو مقطع متوالی رودخانه، اغتشاش در جریان ایجاد می‌شود. این اغتشاش باعث استهلاک انرژی جریان می‌گردد که مقدار آن در قسمت خروجی تبدیل بیشتر از ورودی خواهد بود. در تبدیل‌هایی که تغییرات عرضی مقطع آن‌ها تدریجی باشد میزان افت کمتر می‌گردد. مقادیر ضرایب بازشدگی و تنگ‌شدگی بر اساس نوع تغییرات مقطع در جدول ۱ ارائه شده است (برونر، ۱۹۹۵).

جدول ۱: مقادیر ضرایب تنگ‌شدگی و بازشدگی در نتیجه تغییرات مقطع

| تغییرات مقطع | ضریب بازشدگی (C_e) | ضریب تنگ‌شدگی (C_c) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|
| بدون تغییر | ۰ | ۰ |
| تغییرات طبیعی | ۰,۳ | ۰,۱ |
| تغییرات زیاد | ۰,۵ | ۰,۳ |
| تغییرات ناگهانی | ۰,۸ | ۰,۶ |

به منظور پهنه‌بندی رودخانه با معیارهای هیدرولیکی لازم است مراحل متناسب با دقت مورد نیاز در پهنه‌بندی طی شود. در این راستا پس از مدل‌سازی رودخانه، اجرای اولیه از مدل ریاضی تهیه شده انجام گرفته و از نتایج به دست آمده جریان در طول مسیر آبراهه اصلی بررسی می‌شود.

به منظور تعیین تراز سطح آب در مقاطع رودخانه در دو طرف رابطه انرژی، مجموع عمق آب (Y) و تراز کف اصلی (Z) برابر با سطح تراز آب (Ws) در نظر گرفته می‌شود. تراز نامعلوم سطح آب در یک مقطع با معلوم بودن تراز سطح آب در مقطع دیگر از طریق حل معادلات به روش سعی و خطا تعیین می‌شود (برونر، ۱۹۹۵).

مراحل محاسباتی به شرح زیر است:

۱. مقداری برای تراز سطح آب در بالادست (Ws_2) فرض می‌شود (در صورت محاسبه برای جریان فوق بحرانی این مقدار برای پایین دست فرض می‌شود).
۲. بر اساس مقادیر فرض شده برای تراز سطح آب، مقادیر ارتفاع متناظر سرعت و ضریب انتقال به دست می‌آید.
۳. از روی مقادیر به دست آمده در گام ۲، S_f و سپس h_e محاسبه می‌گردد.
۴. از روی مقادیر به دست آمده در گام‌های ۲ و ۳ معادله انرژی برای Ws_2 حل می‌شود.
۵. مقدار محاسبه شده Ws_2 با مقدار فرض شده در گام ۱ مقایسه می‌شود. چنانچه اختلاف از $۰/۰۰۳$ متر و یا مقداری که کاربر تعیین می‌کند کمتر نباشد، گام‌های ۱ تا ۵ تکرار می‌شوند. در غیر این صورت پروفیل ساخته شده مورد قبول می‌باشد. تعداد گام‌های آزمون و خطا به صورت پیش فرض ۳۰ می‌باشد.

همچنین از مهم‌ترین فاکتورهای محاسبات هیدرولیکی جریان که نقش مهمی در رژیم جریان نیز دارد، سرعت جریان در هر مقطع از آبراهه‌های اصلی رودخانه است. برای تهیه توزیع افقی سرعت در مدل‌های یک‌بعدی رودخانه به‌طور عادی محاسبات در سه بازه سیلاب دشت چپ، کانال اصلی و سیلاب دشت راست انجام گرفته و پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت متوسط و حرکت آب در این سه بازه محاسبه می‌گردد.

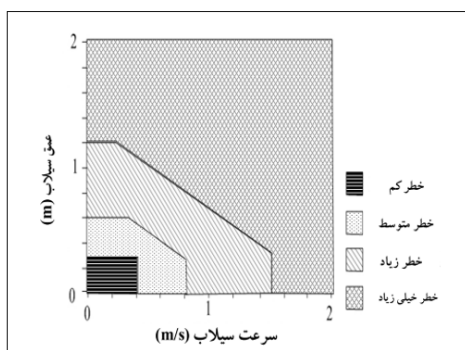
در مرحله اجرای مدل هیدرولیکی فایل اطلاعاتی تولید شده توسط GIS در مرحله پیش‌پردازش به صورت یک فایل متنی به مدل هیدرولیکی HEC-RAS منتقل می‌گردد. سپس مشخصات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی جریان رودخانه از قبیل سازه‌های متقاطع مسیر، ضرایب افت انرژی، شرایط مرزی محدوده مورد مطالعه، نوع رژیم جریان، دبی رودخانه با دوره‌های بازگشت مختلف و ضرایب مانینگ برای مدل هیدرولیکی HEC-RAS تعریف می‌گردد. در این مدل ارتفاع، سطح، عمق و سرعت آب در هر مقطع از منطقه مورد مطالعه برای سیل با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه می‌گردد.

۳-۲-۳- پس پردازش

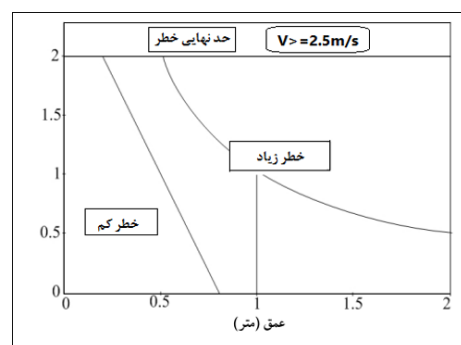
با ورود، خروجی حاصل از مدل هیدرولیکی به GIS، با استفاده از رقوم عمق و سرعت سطح آب در هر یک از مقاطع عرضی و ماکروهای پس پردازنده HEC-GeoRAS در محیط Arc GIS یک فایل تبدیلی مدل رقوم ارتفاع که بتواند سطح آب‌گرفتگی را نشان دهد، تهیه می‌گردد. سپس با استفاده از قابلیت تحلیل مکانی Arc GIS در تلفیق سطح آب‌گرفتگی با مدل ارتفاعی زمین، نقشه پهنه عمق و سرعت سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف ایجاد می‌شود.

۳-۳- نقشه خطر سیل

دو پارامتر عمق و سرعت سیل تعیین‌کننده میزان خطری است که سیل ایجاد می‌کند. معادله حاکم بر انرژی جریان از آن جهت که دارای هر دو معیار سرعت و عمق جریان است، برای تحلیل در این زمینه مناسب به نظر می‌رسد. در پهنه‌بندی انرژی جریان فارغ از نوع و مشخصات رودخانه، دو سازمان مسئول پهنه‌بندی سیل در اروپا و ایالات متحده آمریکا، شکل ۴ و ۵ را پیشنهاد داده‌اند. این شکل‌ها تابع خطر سیل را با دو پارامتر عمق و سرعت نشان می‌دهند. از آنجایی که ملاک پهنه‌بندی خطر، تغییرات انرژی جریان در مناطق تحت تأثیر سیل است، دو مؤلفه اصلی جریان، توأمان در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵: نمودار خطر پیشنهادی ستاد حوادث غیر مترقبه متحده آمریکا برحسب عمق و سرعت سیلاب (فدرال، ۱۹۹۳)



شکل ۴: تابع خطر پیشنهادی پهنه‌بندی سیل در اروپا بر حسب عمق و سرعت سیلاب (برادو، ۲۰۰۷: ۱۵)

با ثابت در نظر گرفتن عمق جریان و تغییرات سرعت بین صفر تا ۲/۵ متر بر ثانیه در هر عمق، نمودار تغییرات انرژی جریان قابل ترسیم است (شکل ۶). به منظور دستیابی به نمودار مناسب برای پهنه‌بندی جریان، علاوه بر منحنی‌های وابسته به انرژی، از نمودارهای پیشنهادی FEMA^۳ و تابع خطر پیشنهادی پهنه‌بندی سیل در اروپا استفاده شد. تابع خطر برحسب تغییرات عمق و سرعت در معادله انرژی در شکل ۷ قابل مشاهده است (جوان و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۰۶). در تحقیق حاضر

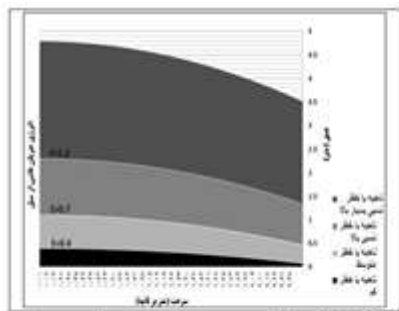
^۳ Federal Emergency Management Agency

از این شکل به عنوان معیار سنجش خطر عمق و سرعت جریان استفاده شده است. جدول ۲ جزئیات بازه بندی پارامترهای هیدرولیکی در محدوده حریم رودخانه را نشان می دهد.

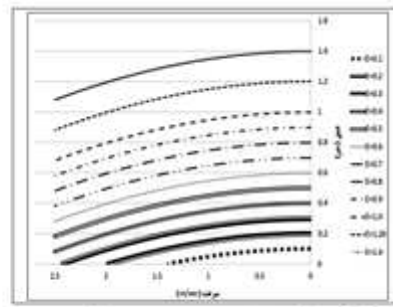
جدول ۲: جدول پیشنهادی مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در محدوده حریم رودخانه برای طبقه بندی خطر سیل

| بازه تغییرات عمق (متر) | بازه تغییرات سرعت (متر بر ثانیه) | بازه تغییرات انرژی | بازه خطر |
|------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|
| ۰/۰۸-۰/۴۰ | ۰/۰-۲/۵۰ | ۰/۰-۰/۴۰ | خطر نسبی کم |
| ۰/۳۸-۰/۷۰ | ۰/۰-۲/۵۰ | ۰/۴۰-۰/۷۰ | خطر نسبی متوسط |
| ۰/۶۵-۱/۲۰ | ۰/۰-۲/۵۰ | ۰/۷۰-۱/۲۰ | خطر نسبی زیاد |
| ۱/۱۵-۴ | ۰/۰-۲/۵۰ | ۱/۲۰-۴ | خطر نسبی بسیار زیاد |
| >۴ | ۰/۰-۲/۵۰ | >۴ | خطر نسبی فوق العاده زیاد |

با بهره گیری از قابلیت تجزیه و تحلیل مکانی GIS، نقشه خطر سیل با همپوشانی دو نقشه عمق و سرعت سیل با توجه به مقادیر جدول ۲ به دست می آید و استفاده از قابلیت تجزیه و تحلیل های آماری Arc GIS مساحت مربوط به طبقات مختلف خطر در سیل با دوره بازگشت های مختلف حاصل و با یکدیگر مقایسه می شود.

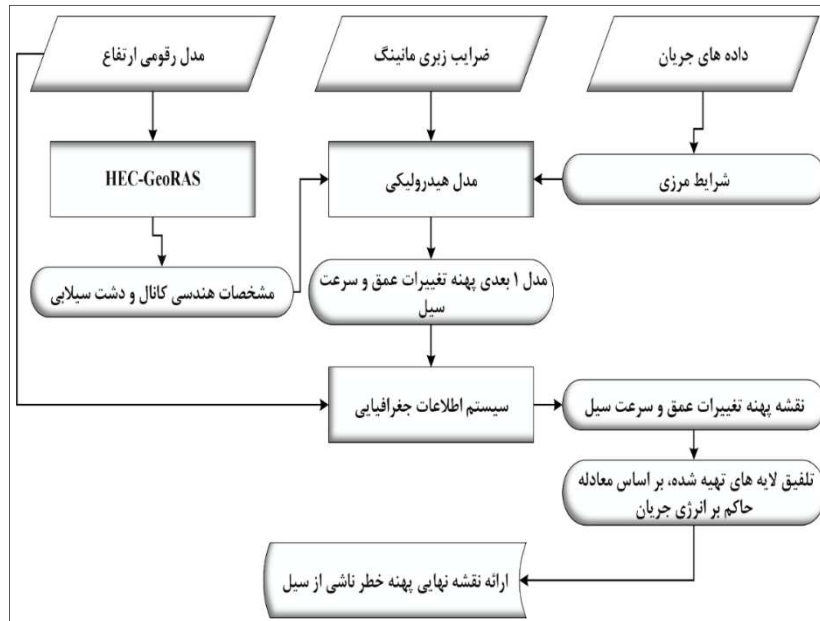


شکل ۷: تابع خطر بر حسب تغییرات عمق و سرعت



شکل ۸: تغییرات انرژی بر حسب دو پارامتر عمق و سرعت

با توجه به توضیحات ارائه شده و بررسی های انجام شده بر روی مطالعه موردی، شکل ۸ مراحل پیشنهادی برای تهیه نقشه خطر سیل را نشان می دهد. با توجه به مراحل ارائه شده، می توان نقشه خطر سیل را مطابق آنچه در بخش نتایج ارائه شده است به دست آورد.



شکل ۸: مراحل پیشنهادی برای تهیه نقشه پهنه بندی خطر سیل

۴- بحث و نتایج

۴-۱- کنترل تصحیح و بازسازی داده‌ها

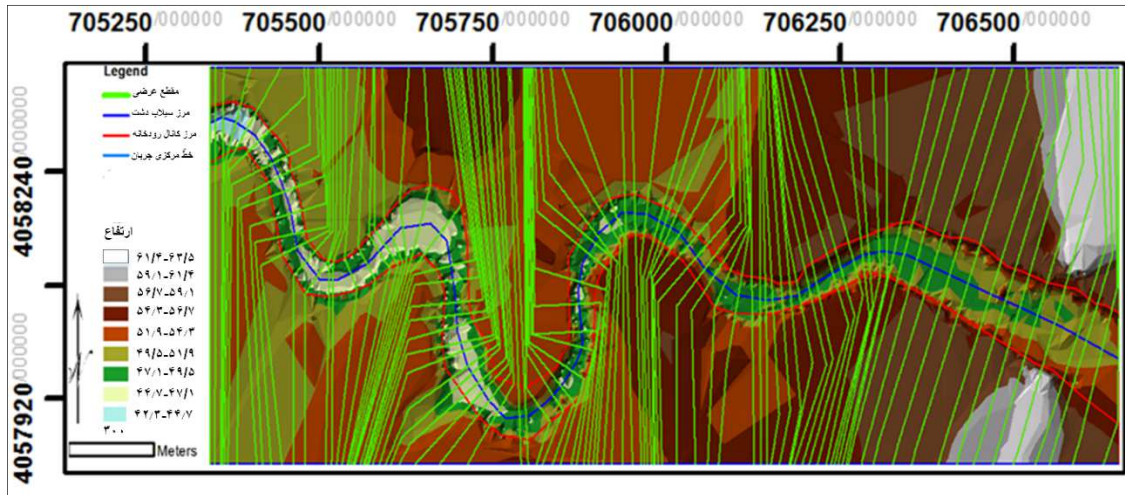
ایستگاه آبلو به‌عنوان بهترین و نزدیک‌ترین ایستگاه به محدوده مورد مطالعه انتخاب و داده‌های مربوط به آن با بهترین توزیع آماری (لوگ پیرسون تیپ ۳) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته تا دبی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه گردد. نتایج حاصل از محاسبه دبی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف به‌صورت جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه آبلو در دوره بازگشت‌های مختلف

| ردیف | احتمال وقوع | دوره بازگشت | مقدار محاسبه شده | انحراف استاندارد |
|------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| ۱ | ۰/۲ | ۵ | ۱۷۲/۱۴ | ۴۰/۴۵ |
| ۲ | ۰/۱ | ۱۰ | ۲۵۰/۵۷ | ۷۵/۹۵ |
| ۳ | ۰/۰۴ | ۲۵ | ۳۸۵/۴۹ | ۱۶۹/۴ |
| ۴ | ۰/۰۲ | ۵۰ | ۵۱۸/۰۲ | ۲۹۴/۹۶ |
| ۵ | ۰/۰۱ | ۱۰۰ | ۶۸۳/۷۹ | ۴۹۲/۲ |
| ۶ | ۰/۰۰۵ | ۲۰۰ | ۸۹۰/۵۳ | ۷۹۴/۱۸ |

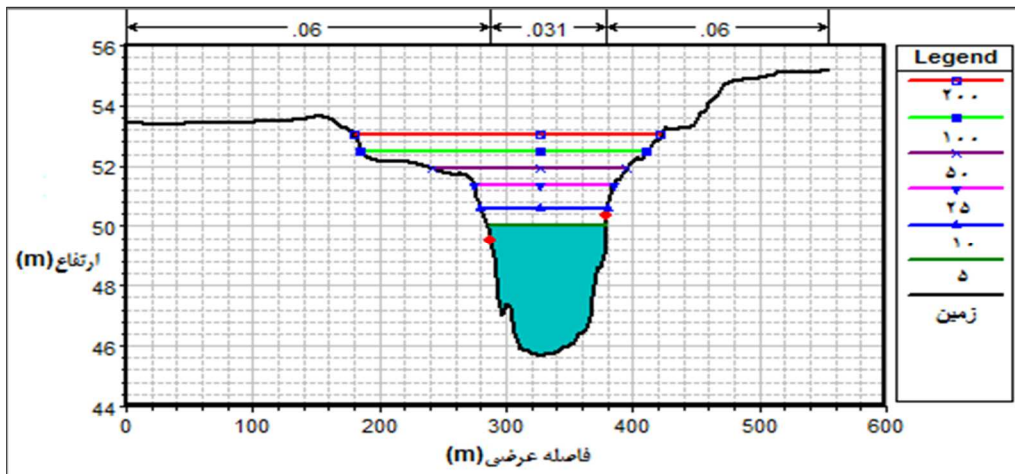
۴-۲- نقشه خطر سیل

برای استخراج مشخصات هندسی رودخانه و سیلاب دشت و شبیه‌سازی مورفولوژی بازه‌های مطالعاتی، در محیط Arc GIS با استفاده از الحاقیه HEC-GeoRAS، ۹۶ عدد مقطع عرضی در طول ۲۵۰۰ متری مسیر رودخانه ترسیم شده است. شکل شماره ۹ خط مرکزی جریان، کانال رودخانه و مقاطع عرضی در طول مسیر رودخانه رسم شده در HEC-GeoRAS را نشان می‌دهد.



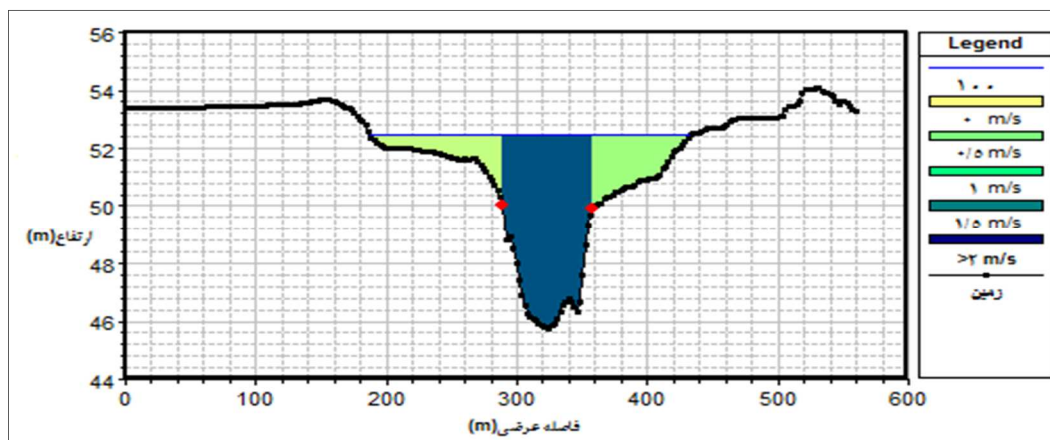
شکل ۹: استخراج مشخصات هندسی رودخانه و سیلاب دشت در الحاقیه HEC-GeoRAS

پس از انجام پیش پردازش‌هایی که در HEC-GeoRAS صورت پذیرفت اطلاعات سه بعدی مقاطع که نشان دهنده شکل، ارتفاع، موقعیت و به طور کلی ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی کانال می‌باشد، استخراج و وارد مدل هیدرولیکی HEC-RAS شده است. با تلفیق خروجی الحاقیه HEC-GeoRAS، داده‌های ضریب زبری مانینگ، شرایط مرزی جریان و دبی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف در مدل هیدرولیکی HEC-RAS سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی شده و مدل یک بعدی پهنه عمق و سرعت سیلاب به صورت مدل رقومی سطح آب با توجه به رابطه‌های ۱ تا ۱۲ محاسبه گردیده است. نمونه‌ای از مقاطع عرضی استخراج شده در طول مسیر رودخانه و ارتفاع آب در دوره بازگشت‌های مختلف برای این مقطع در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



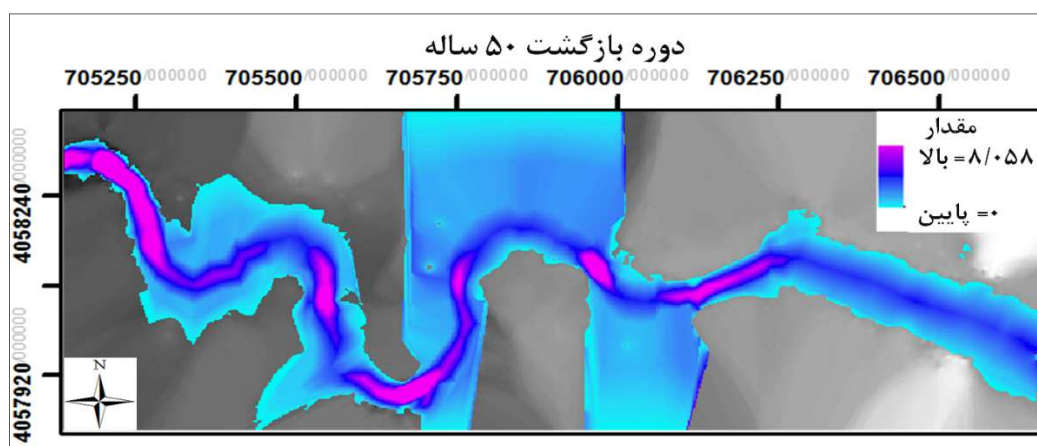
شکل ۱۰: پروفیل سطح آب در دوره بازگشت‌های مختلف (متر)

همچنین شکل ۱۱ توزیع افقی سرعت در یک مقطع از رودخانه نکارود نشان می‌دهد.



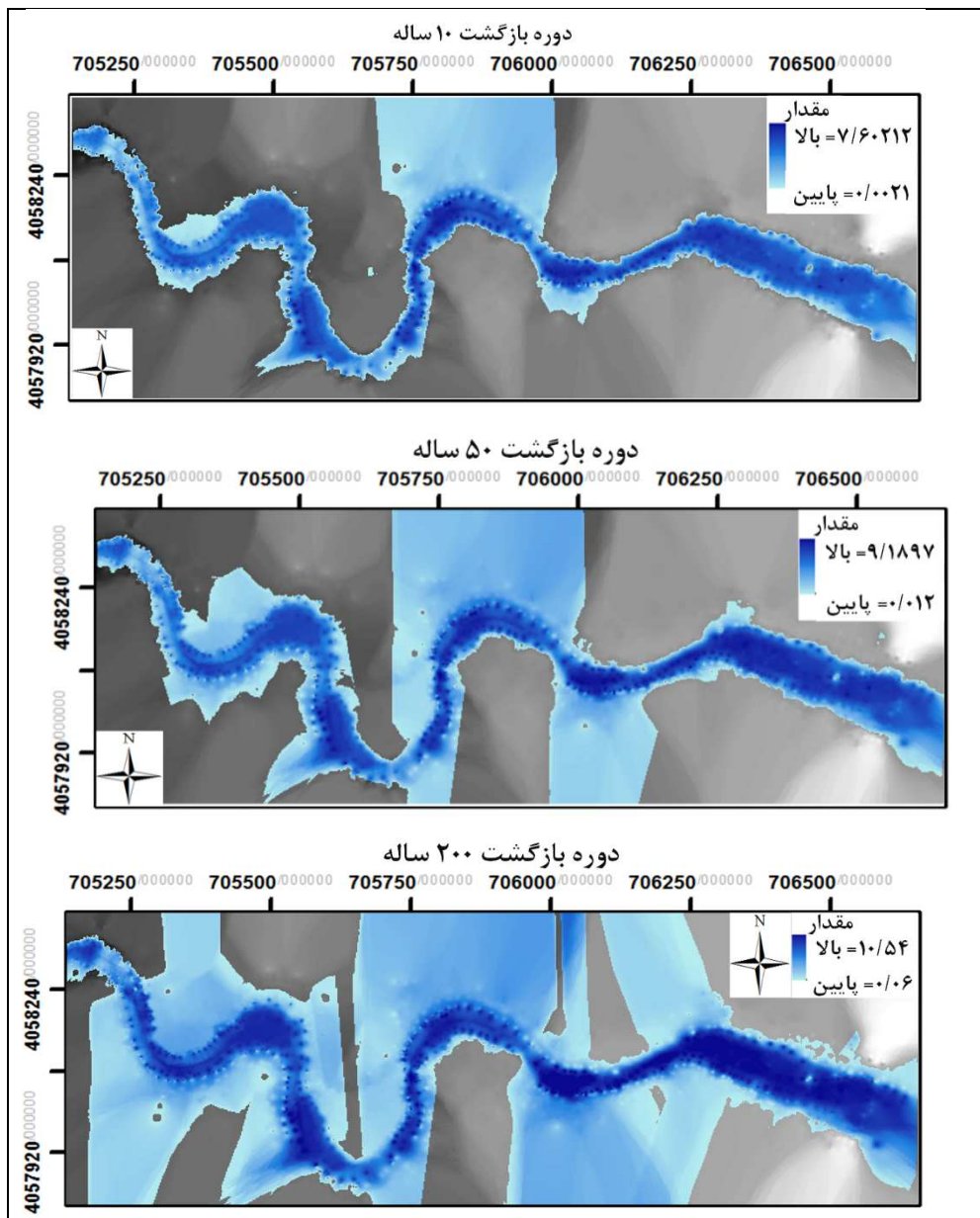
شکل ۱۱: توزیع افقی سرعت در یک مقطع رودخانه نکارود (متر بر ثانیه)

با تلفیق مدل ۱ بعدی سیل با مدل ارتفاعی زمین، نقشه پهنه‌بندی عمق و سرعت سیلاب در محیط Arc GIS به دست آمده است. شکل ۱۲ و ۱۳ نقشه پهنه سرعت و عمق سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



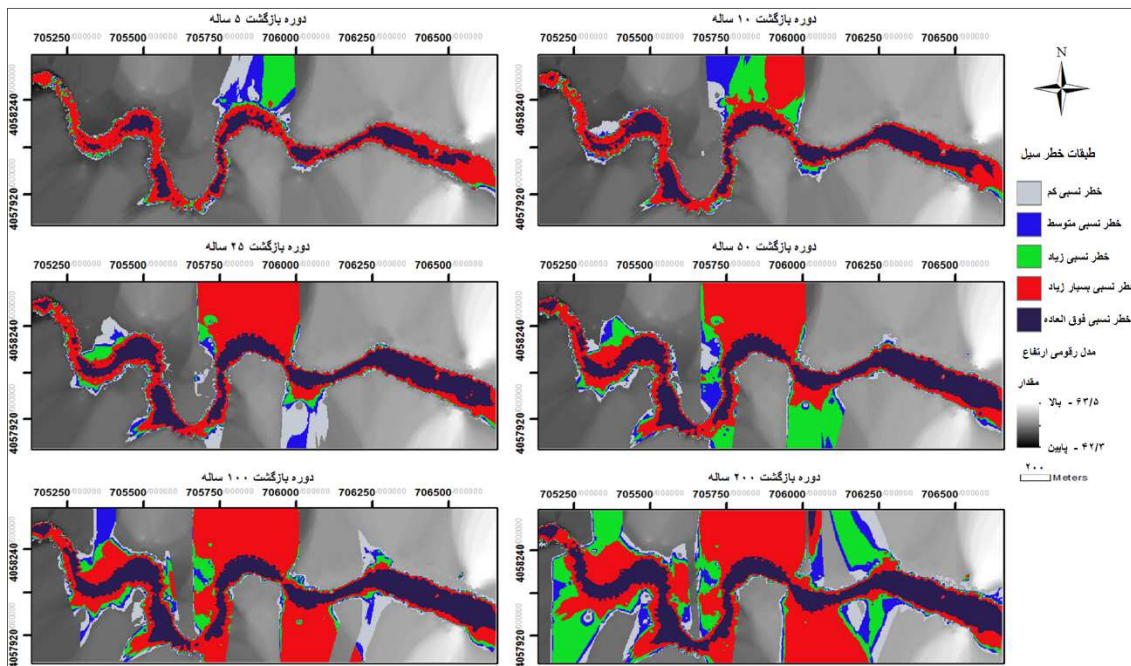
شکل ۱۲: پهنه سرعت برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله (متر بر ثانیه)

نقشه مربوط به پهنه سرعت سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف نشان می‌دهد که سرعت سیل در دوره بازگشت‌های مختلف متفاوت بوده و با افزایش زمان دوره بازگشت سرعت سیل افزایش می‌یابد. سرعت سیل در مناطق مختلف بستر رودخانه و سیلاب دشت متفاوت بوده و بسته به درجه انحراف رودخانه، شرایط توپوگرافی بستر رودخانه و سیلاب دشت، نوع پوشش سطح و ضریب زبری مانینگ متغیر خواهد بود.



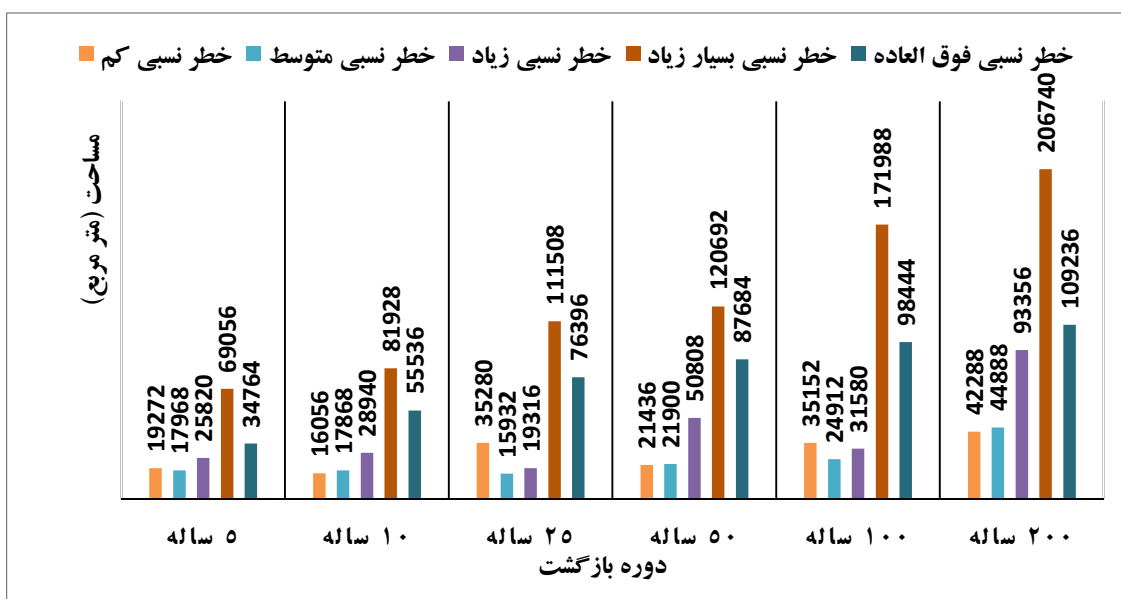
شکل ۱۳: پهنه عمق برای سیل با دوره بازگشت‌های مختلف (متر)

بررسی نقشه‌های مربوط به ارتفاع سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف نشان می‌دهد حداکثر ارتفاع سیل برای دوره بازگشت ۵ ساله به حدود ۷ متر و برای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله به ۱۰/۵ متر خواهد رسید. کانال رودخانه توانایی انتقال جریان شدید آب در هنگام سیل را ندارد و با افزایش زمان دوره بازگشت سیل اهمیت این موضوع بیشتر نمایان می‌گردد. دو پهنه عمق و سرعت برای هر دوره بازگشت به‌طور مجزا، متناسب با معادله حاکم بر انرژی جریان با یکدیگر ادغام و تحلیل شده‌اند. در نهایت محدوده با توجه به شکل ۷ و جدول ۲ از نظر خطر نسبی مواجهه با سیل مورد ارزیابی قرار گرفته و نقشه خطر سیل محدوده به‌دست‌آمده است. شکل ۱۴ نقشه خطر سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: نقشه خطر سیل بر اساس انرژی برای دوره بازگشت‌های مختلف

تحلیل کلی بر روی نقشه‌های خطر ارائه‌شده در تحقیق حاضر به صورت نتایج قابل مشاهده، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان دوره بازگشت‌های سیل سطح منطقه تحت تأثیر سیل افزایش یافته و میزان سطح مناطق تحت تأثیر سیل با خطر نسبی بسیار زیاد و فوق العاده روند صعودی داشته است. در تمام دوره بازگشت‌ها بیشترین مساحت تحت پوشش از لحاظ میزان خطر مربوط به خطر نسبی بسیار زیاد می‌باشد. طبقه خطر نسبی فوق العاده فقط سطح کانال اصلی رودخانه را در بر می‌گیرد و سیلاب دشت در هیچ دوره بازگشتی با همچنین خطری مواجه نیست.



شکل ۱۵: مساحت طبقه‌های مختلف خطر نسبی برای سیل با دوره بازگشت‌های مختلف

۵- نتیجه گیری

پهنه‌بندی خطر سیل در بحث مدیریت سیلاب و مهندسی رودخانه نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند. بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که به ازای دوره بازگشت‌های طولانی‌تر میزان دبی بیشتر شده و پهنه سیلابی نیز وسعت بیشتری یافته است. البته تفاوت در گسترش پهنه سیلاب در دشت سیلابی برای دبی مشخص ناشی از ویژگی توپوگرافی مسیر رودخانه و دشت سیلابی، نوع کاربری اراضی و در پی آن ضریب زبری مانینگ مربوط به آن می‌باشد. در طول محدوده مورد مطالعه، بخش‌های که رودخانه دارای مسیر مستقیم می‌باشد نسبت به بخش‌های که مسیر رودخانه حالت پیچان رود دارد، از خطر آب‌گرفتگی کمتری برخوردار است. تغییر شدید و ناگهانی جهت و پیشش مسیر رودخانه در این محدوده باعث عدم توانایی کانال جهت عبور کامل جریان آب در خود و در نتیجه جاری شدن آب در سیلاب دشت می‌باشد. حدود ۹۰ درصد از مسیر کانال رودخانه در برابر دبی سیل با دوره بازگشت ۱۰ سال ایمن بوده و جریان سیل از آن عبور می‌کند. ولی به تدریج با افزایش دبی، کانال توانایی خود را در عبور جریان آب ناشی از سیل از دست می‌دهد و به مرور سیل سطح بیشتری از دشت اطراف رودخانه را در بر می‌گیرد. کانال رودخانه برای عبور جریان سیل با دبی بالا (سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال) ناکارآمد بوده و نیاز به ایجاد دیواره‌های حفاظتی در طول مسیر رودخانه جهت کاهش خسارات ناشی از سیل می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان تلفیق مدل هیدرولیکی با GIS را روشی کارا، کم‌هزینه و دقیق جهت پهنه‌بندی سیلاب، تهیه نقشه خطر سیل و پیش‌بینی و برآورد خسارات ناشی از سیل با دوره بازگشت‌های مختلف دانست. این مدل به کمک GIS با توجه به در نظر گرفتن میزان دبی سیل، شرایط توپوگرافی و مشخصات هندسی رودخانه و منطقه، کاربری اراضی، عوارض متقاطع در طول مسیر جریان از جمله پل، شرایط مرزی بالادست و پایین دست جریان و با بهره‌گیری از معادلات جریان، انرژی و مانینگ توانایی خود جهت تهیه پهنه سیل و کاهش خسارات ناشی از آن را به اثبات رسانیده است. تهیه نقشه خطر سیل بر مبنای انرژی جریان علاوه بر این که به سبب بررسی تنها یک عامل انرژی موجب ساده‌سازی فرایند پهنه‌بندی خطر می‌گردد، با در نظر گرفتن دو مؤلفه عمق و سرعت و تلفیق هدفمند آن موجبات صرفه‌جویی منابع را فراهم می‌آورد. از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی در تمام مراحل پژوهش از جمله استخراج مشخصات هندسی رودخانه و سیلاب دشت و شبیه‌سازی مورفولوژی بازه‌های مطالعاتی، تولید نقشه عمق و سرعت سیل با توجه به خروجی مدل هیدرولیکی، تجزیه و تحلیل هم‌زمان نقشه‌های عمق و سرعت سیل به منظور تولید نقشه خطر سیل و در نهایت شناسایی مناطق مستعد سیل گیر و خطرناک استفاده می‌شود.

مناطق بالادست محدوده مورد مطالعه از لحاظ شرایط محیطی، ژئومورفولوژی و جغرافیایی خصوصیات خاص و ویژه‌ای داشته به همین دلیل طی سال‌های اخیر پدیده سیل اثرات منفی فراوانی در ابعاد مختلف بر این منطقه گذاشته است. از این رو توسعه سامانه کاربردی WEB GIS برای تهیه نقشه‌های خطر سیل به صورت آنی و در زمان واقعی جهت پیش‌بینی، مدیریت و کاهش خطرات برای مطالعات آینده پیشنهاد داده می‌شود. همچنین تأکید می‌شود که به سبب اهمیت در مطالعات آینده کل حوضه آبریز نکارود از نظر خطرپذیری سیل مورد بررسی قرار گیرد. متأسفانه در این مطالعه به دلیل محدودیت در داده‌های در دسترس این امر میسر نشده و تنها نقشه خطر سیل قسمتی از این حوضه تهیه شده است.

۶- مراجع

- افشین یدالله، ۱۳۷۳، رودخانه‌های ایران. وزارت نیرو.
- جوان پوریا، محمدرضاپور محمود و میرزایی مهدی، ۱۳۹۲، پهنه‌بندی خطر سیل گرفتگی توسط معادله انرژی جریان و سیستم اطلاعات جغرافیایی، آب و فاضلاب، دوره ۲۴، شماره ۳، ص ۱۱۱-۱۰۱.
- حسین‌زاده علی، ۱۳۸۳، پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS (مطالعه موردی):

- لاین-سو کلات نادر)، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ص ۱۰۱-۱
- سازمان آب منطقه ای مازندران، ۱۳۶۸، گزارشی در مورد وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه نکا در دشت جنوب گرگان.
 - شهرام درخشان، وحید غلامی و ادیس تقوی سلیمی، ۱۳۸۹، شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه های گوهررود و سیاه رود با سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل هیدرولیکی *HEC-RAS*، دوره ۱۶، شماره ۱۹، ص ۶۵-۷۹
 - عسکری علی بابا، ۱۳۵۰، بهشهر یا اشرف‌البلاد.
 - غریب معصومه، مساعدی ابوالفضل، نجفی نژاد علی و یخکشی محمدابراهیم، ۱۳۸۶، پهنه بندی خطر و ارزیابی خسارت سیل (مطالعه موردی محدوده رودخانه قره چای در حومه شهر رامیان)، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۰، شماره ۳، ص ۷۸۵-۷۹۷.
 - غفاری گلاله و امینی عطااله، ۱۳۸۹، مدیریت دشت های سیلابی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) (مطالعه موردی رودخانه قزل اوزن)، فضای جغرافیایی، دوره ۱۰، شماره ۳۲، ص ۱۱۷-۱۳۴.
 - غلامی و همکاران، ۱۳۸۴، پهنه بندی خطر سیل با بکارگیری نرم افزار *HEC-RAS* و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: رودخانه هراز)، کنفرانس بین المللی بلایای طبیعی. ص ۸۰-۶۸
 - یمانی مجتبی، تورانی مریم و چزغه سمیرا، ۱۳۹۱، تعیین پهنه های سیل گیر با استفاده از مدل *HEC-RAS* (مطالعه موردی: بالادست سد طالقان از پل گلینک تا پل وشته)، جغرافیا و مخاطرات طبیعی، دوره ۱، شماره ۱، ص ۱-۱۶.
 - Barr, T, 2002, Application of tools for hydraulic power point presentation. Upper Gotvand Hydroelectric Power Project Feasibility Study”, Reservoir Operation Flood, 14p.
 - Barredo, J, and Lavallo, C, 2007, European flood risk mapping. Water Science and Technology, 56(4), 11-17.
 - Brunner, G. W, 1995, HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0”, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER DAVIS CA, pp, 1-143.
 - Demir, V and Kisi, O, 2016, Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mertriver, samsun, turkey, Advances in Meteorology, pp, 1-9.
 - Eum, Hyung-II, and Slobodan P. Simonovic, 2009, City of London: Vulnerability of Infrastructure to Climate Change.
 - Federal Emergency Management Agency, 1993, Flood insurance study guideline and specification for contactors, United State of America.
 - Getahun, Y. S, & Gebre, S. L, 2015, Flood hazard assessment and mapping of flood inundation area of the Awash River Basin in Ethiopia using GIS and HEC-GEORAS/HEC-RAS Model”, Journal of Civil & Environmental Engineering. Vol. 5, No. 4, pp. 1-12.
 - Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., & Solomatine, D, 2012, River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling”, Environmental Modelling & Software, 31, 37-46.
 - Goodell, C., & Warren, C, 2001, Flood Inundation Mapping using HEC-RAS, Obrasy Proyectos, 18-23.
 - Hill, M, 2001, Flood plain delineation using the HEC-GeoRAS extension for Arcview”, Brigham Young University, 514p.
 - Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A, 2016, Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River”, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 41, No. 4, pp. 1375-1390.

- Li, M., Wu, W., Wang, J., Che, Z., & Xie, Y, 2012, Simulating and mapping the risk of surge floods in multiple typhoon scenarios: a case study of Yuhuan County, Zhejiang Province, China , Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 31, No. 3, pp. 645–659.
- Merwade, V, 2009, Tutorial on using Hec-GeoRAS with ArcGIS 9.3 [online]”, West Lafayette: University of Purdue.
- Yang j., R D Townsend and B. Daneshfer, 2006, Floodplain Visualization using TINS”, Center for in river network floodplain delineation", Can. J. Civ. Eng. No: 33, pp: 19-28.