مجله علمی- پژوهشی
دوره ۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰

تعیین سطح خطر سیل رودخانه‌ها در نواحی تحت تأثیر با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

پوریا جوان[1*]، مهدی میرزائی[2]، ابراهیم جباری[3]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز
۲- هیأت علمی دانشکده علوم زمین، دانشگاه ایالتی اورگان و استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز
۳- دانشیار دانشکده عمران، گروه آب، دانشگاه علم و صنعت ایران

*** تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران**
pjavan83@gmail.com

چکیده- تغییرات ناشی از بهره‌وری از رودخانه‌ها که معمولاً منجر به تجاوز به بستر طبیعی و حریم قانونی رودخانه‌ها می‌شود، موجب تغییر ریخت رودخانه شده و علاوه بر تأثیر بر حیات رودخانه‌ها جنبه‌های دیگری مانند مسائل اقتصادی، زیست محیطی، حقوقی و اجتماعی را نیز در منطقه تغییر می‌دهد. از اینرو تعیین محدودهٔ خطر رودخانه‌ها، به‌طور مستقیم بر خسارت‌ها و مدیریت سیل اثر خواهد گذاشت.

در مقالهٔ حاضر رویکردهای مطرح در مدیریت یکپارچهٔ سیل (IFM)[1] بررسی می‌شود. مدیریت یکپارچهٔ سیل در کنار دانش هیدرولیک جریان و روشهای ساخت، رویکردهای دیگری مانند شرایط اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و حقوقی را نیز در نظر می‌گیرد. تحقیق حاضر سعی در طراحی رویکردی جدید برای تعیین حریم خطر سیل و پهنه‌بندی خطر سیل در مهندسی رودخانه دارد. در این راستا، با استفاده از ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[2]، بر اساس معیارهای مطرح در IFM و در کنار مدل هیدرولیکی جریان، سعی شد پهنه‌بندی خطر سیلاب در محدوده سیلگیر انجام شود. در روند طی شده، از روش تحلیل سلسله مراتبی[3] که یکی از روش‌های مطرح در تصمیم‌گیری چند معیاره است به‌منظور تعریف خطر سیل مرتبط با کاربری مورد نظر و تولید نقشهٔ نهایی پهنه شامل معیارهای هیدرولیکی و IFM استفاده شده است. رودخانه فردو از رودخانه‌های بخش کهک، استان قم به‌عنوان مطالعهٔ موردی بررسی شده است. روش جدید پیشنهادی به علت آنکه معیارهای بیشتری را برای تعیین سطح خطر سیل در مناطق تحت تأثیر سیل دارد، نتایج قابل قبول‌تری را برای پهنه‌بندی سیل به‌دست می‌دهد. به‌علاوه روش پیشنهادی در این پژوهش، برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل، بیمه سیل و سیستم‌های هشدار سیلاب به‌ویژه در نواحی شهری، قابلیت اطمینان بالایی دارد.

کلیدواژگان: سطح خطر محدوده سیلگیر، مدیریت به‌هم پیوسته سیل، خطر سیل، تحلیل سلسله مراتبی.

1. Integrated Flood Management
2. Multiple Criteria Decision Making
3. Analytic Hierarchy Process

۱- مقدمه

سوابق تاریخی در ایران، وقوع ۹۴ سیل مهم را در طول هزار سال قبل از ۱۳۳۰ نشان می‌دهد. تعداد ۱۸۹۰ سیل در فاصلهٔ سال‌های ۱۳۳۱ تا ۱۳۷۰ گزارش شده، و فقط در سه ماه از سال ۱۳۷۱ تعداد ۳۰ سیل بزرگ در ۱۷ استان کشور در حدود ۲۳۶ میلیارد ریال خسارت به وجود آورده و مجموع خسارت‌های سیل در همین سال در حدود ۵۰۰ میلیارد ریال بوده است. تخریب بیش از دو سوم مراتع و نیمی از جنگل‌های ایران در طول نیم قرن گذشته و تولید سالیانه ۲ تا ۲/۵ میلیارد تن خاک بر اثر فرسایش، واقعیتی تلخ و هشداردهنده برای این سرزمین است که نتیجهٔ آن، افزایش رواناب‌های سطحی اضافی و غیرطبیعی به‌اندازهٔ ۱۵ تا ۲۰ میلیارد مترمکعب در سال بوده است (مهدوی، ۱۳۸۱). در طی دورهٔ چهل سالهٔ منتهی به سال ۱۳۷۰، رشد سالیانه حوادث سیل در حدود ۴٪ و رشد سالیانه خسارت مالی ناشی از آن در حدود ۶٪ بوده و این روند با گسترش کاربری‌های متنوع در پهنه‌های سیل‌گیر در حال افزایش است. بررسی و مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که علت افزایش خطر و خسارت سیل، سیل‌خیزی یا بزرگی طغیان‌ها نبوده، بلکه تشدید استفاده از زمین‌های کنار رودخانه‌ها، مراتع و جنگل‌ها است (رهبربصیر، ۱۳۸۵).

معمولاً به‌منظور بهره‌برداری از مزایای متعدد رودخانه‌ها، همواره ساخت و سازها و فعالیت‌هایی در کنار رودخانه (سیلابدشت[1]) انجام می‌شود که در بسیاری از موارد، موجب تجاوز به بستر طبیعی و حریم قانونی رودخانه‌ها در آن نواحی می‌شود. پهنه‌بندی خطر و مشخص کردن درجه اهمیت کاربری‌های متعدد کنار رودخانه‌ها، علاوه بر کمک به بقای رودخانه، موجب ایمن‌سازی فعالیت‌های انسانی در کنارهٔ رودخانه‌ها و کاهش خطر برای نقاط تحت تأثیر سیل می‌شود. وجود چارچوبی مشخص در این زمینه، دید صحیحی از شرایط رودخانه و اهمیت آن نقطه از رودخانه را از دیدهای مختلف امکان‌پذیر کرده و به‌همین ترتیب نقاط مورد نیاز برای ساماندهی رودخانه را مشخص خواهد کرد (Federal E.M.A., 1993).

مبانی تهیه کردن نقشه‌های حد بستر رودخانه‌ها تا اندازه‌ای با مبانی تهیه کردن نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ناشی از سیلاب تفاوت دارد. مطابق قانون توزیع عادلانهٔ آب، تعیین پهنای بستر و حریم رودخانه‌ها بر اساس آمار هیدرولوژیکی و مستقل از اثر ساختمان‌ها یا هر نوع دخل و تصرف بشر در رودخانه انجام می‌پذیرد. به توصیه نشریه شماره ۳۰۷ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (راهنمای پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم جریان) بستر رودخانه‌ها بر اساس طغیان سیل با دوره بازگشت ۲۵ ساله و حریم آن بر اساس تشخیص کارشناسی بین ۱ تا ۲۰ متر تعیین می‌شود. هرچند در راهنمای مزبور بین نقشه‌های تعیین حدبستر و حریم تهیه شده با معیارهای فنی و تخصصی و نقشه‌های تعیین حد بستر و حریم تهیه شده با رویکرد حقوقی، تفاوت قائل شده است؛ با وجود این چگونگی و روش اعمال رویکردهای مختلف، یکی از مباحث مطرح در مدیریت یکپارچه سیلاب معرفی نشده است.

در این زمینه Pramojanee و همکاران (۲۰۰۰) در مقاله‌ای با عنوان "پهنه‌بندی خطر سیل در جنوب تایلند با به‌کار گیری GIS" عوامل هیدرولوژیکی مطرح در زمینهٔ خطر ناشی از سیل را مطرح کرد. TANAVUD و همکاران (۲۰۰۴) خطر سیل را در شهرهای گسترده در اطراف رودخانه‌ها مطرح کردند. YALÇIN و Zuhal (۲۰۰۵) نیز با مدل‌سازی چند حوضه در ترکیه سعی در آسیب‌سنجی این حوضه‌ها با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره داشتند. همچنین Plate (۲۰۰۲) و Wheatera و Evans (۲۰۰۹)

1. Floodplain

تدقیق خطر سیل را با مدیریت داده‌های استخراج شده از تحلیل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و تلفیق این داده‌ها با یکدیگر در کنار مدیریت اراضی اطراف رودخانه‌ها مطرح کردند.

در مقاله حاضر سعی بر آن است که علاوه بر استفاده از عوامل مؤثر بر رفتار هیدرولیکی جریان -که در هر نقطهٔ تحت تأثیر سیل نشان دهنده عمق، سرعت یا انرژی جریان است- از رویکردهای مطرح دیگر در پهنه‌بندی خطر سیل در محدوده تحت تأثیر سیل رودخانه استفاده شود. در این راستا از رویکردهای اقتصادی، اجتماعی زیست محیطی و حقوقی که در مدیریت یکپارچه سیل مطرح می‌شود، به‌عنوان معیارهای مؤثر در تعیین خطر ناشی از سیل استفاده شد. در این میان، روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره ابزار مناسبی برای تلفیق نتایج تحلیل‌های هیدرولیکی و رویکردهای فوق و همچنین کمّی‌سازی برخی معیارهای کیفی است.

۲- روش تحقیق

تحقیق حاضر پس از تعریف و تشخیص عوامل مؤثر بر سیل، به تحلیل حوضه و تشخیص عوامل دخیل در رفتار هیدرولیکی جریان رودخانه پرداخته و داده‌های مورد نیاز را برای تشکیل مدل ریاضی رفتار هیدرولیکی جریان رودخانه فراهم می‌سازد. همچنین پس از واسنجی مدل هیدرولیکی، رویکردهای مطرح در IFM[1] را بررسی کرده و از داده‌های استخراج شده از آن، مدل تصمیم‌گیری مورد نظر تهیه می‌شود. پس از تحلیل خطر برای نواحی تحت تأثیر سیل از نظر هیدرولیکی-فنی، مدلی حاصل از معیارهای مطرح در مدیریت یکپارچه تهیه شده و در پایان، مدل جدیدی از تلفیق دو مدل قبلی ساخته می‌شود.

۲-۱- عوامل مؤثر بر سیل و محدودهٔ سیل‌گیر

سیل معمولاً ناشی از رواناب سطحی و نتیجهٔ ویژگیهای بارش و حوضه آبریز مربوط است و در این میان تأثیر پوشش گیاهی و خاک در کاهش سیل در حوضه‌های کوچک، کمتر از حوضه‌های با مساحت زیاد است (خسروشاهی، ۱۳۸۶). شیب حوضه نقش مهمی در شکل‌گیری سیلاب به‌ویژه از نوع ناگهانی[2] دارد. از میان مهمترین عوامل مؤثر بر افزایش حداکثر دبی سیل در دوره بازگشت مشخص، نوع کاربری، پوشش گیاهی، توسعهٔ سطوح غیرقابل نفوذ یا توسعهٔ شهری- روستایی را می‌توان نام برد. از سوی دیگر تولید رواناب ناشی از بارشی است که بر روی خاک با نفوذپذیری کم یا اشباع رخ می‌دهد (خسروشاهی، ۱۳۸۶).

۲-۲- مدیریت یکپارچهٔ سیل (IFM)

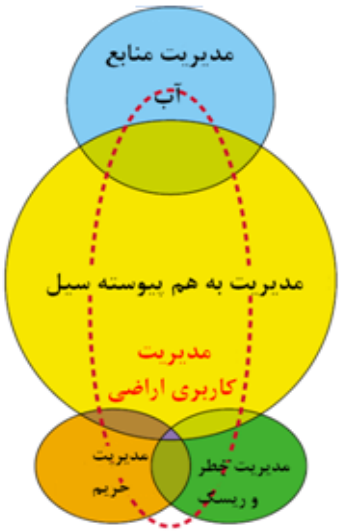
مدیریت یکپارچه سیل با نگرشی کلی و با پیروی از مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM[3]) از سوی سازمان جهانی آب (GWP[4]) و سازمان جهانی هواشناسی (WMO[5]) مطرح شده و از سال ۲۰۰۶ به‌طور جدی پیگیری می‌شود. پروژه‌های متعددی با عنوان مدیریت یکپارچهٔ سیل در حوضه‌های مختلف در سراسر جهان انجام شده است. هرچند دیدگاه مدیریت یکپارچهٔ سیل، طراحی سیاست‌هایی برای حداکثر استفاده از پهنهٔ سیل‌گیر رودخانه همراه با حداقل کردن خسارت‌های جانی و جانبی سیل است، با وجود این دست‌یابی به اهداف خود را با مطرح کردن رویکردهایی مانند رویکرد اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی و حقوقی با دیدگاهی یکپارچه

1. Integrated Flood Management

2. Flash Floods
3. Integrated Water Resources Management
4. Global Water Partnership
5. Water Meteorology Organization

مطرح می‌کند (WMO/GWP, 2004). IFM به تعامل دائمی میان حوضه، رودخانه و حاشیه و حریم آبراهه اصلی توجه دارد. مسائلی که در این تعامل در زمین‌های بایر آشکار می‌شود، آلودگی و رسوب و فرسایش کناره‌های بستر رودخانه است. حال آنکه با تغییر کاربری، ابعاد تأثیرپذیری حریم و بستر از سیل، متناسب با رویکردهای مطرح در IFM افزایش می‌یابد (WMO/GWP, 2004). در این زمینه در کشور، تجربه‌هایی مانند پروژه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب سیستان (Delft, 2006) و حوضه رودخانه سفیدرود (JICA, 2008) اجرا شده است. به‌طور کلی تجربه‌های مدیریت یکپارچه سیل مانند اتیوپی (WMO/GWP, 2008)، کامبوج[1] (ICHARM, 2006)، رودخانه کافویی زامبیا (WMO/GWP, 2004) و دریاچهٔ ویکتوریا در کنیا (WMO/GWP, 2007) تلفیق مناسبی میان راهبردهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و چالش‌های میان این دو را تشکیل می‌دهند. این روند به مدل اجرایی شکل ۱ منجر می‌شود.

استفاده از IFM در کنار ابزارهای مناسب مدل‌سازی مانند تصمیم‌گیری چند معیاره و استفاده از عواملی مانند کاربری اراضی حاشیهٔ رودخانه، امکان تحلیل مناسب از اراضی اطراف رودخانه را فراهم می‌سازد. اگرچه هدف اصلی این پژوهش بررسی و پیاده سازی محدوده و سطح‌بندی خطر ناشی از سیل رودخانه‌ها است، اما با درنظر گرفتن چند بخشی بودن موضوع مورد مطالعه در IFM، علاوه بر مدل محاسباتی هیدرولیکی، در بخش فنی –که در محاسبات معمول پهنه‌بندی عمق سیل به کار گرفته می‌شود– نوعی مدل تصمیم‌گیری نیز بر اساس رویکردهای مطرح و نکات مورد تأکید در IFM تهیه شد.



شکل ۱ مدل اجرایی IFM (WMO/GWP, 2004)

در این مدل تصمیم‌گیری رویکردهای اجتماعی، اقتصادی، زیستی محیطی و حقوقی مدیریت یکپارچه سیل به‌عنوان چارچوب مطالعات و در کنار یکدیگر در نظر گرفته شده است. بر همین اساس چهار رویکرد ذکر شده در IFM به عنوان معیارهای مطرح در تحلیل انتخاب شد و برای تکمیل شدن ماتریس تصمیم، برای هر یک از معیارها، زیرمعیارهایی بر اساس اهداف مطرح در هر رویکرد، تدوین شده که در در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۳- تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM[2])

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل روشهایی (مانند جمع وزن‌ها یا تحلیل همگرایی میان هدف‌ها یا گزینه‌های پیش‌روی تصمیم) است که اجازه می‌دهد طیفی از معیارهای وابسته به یک مبحث را امتیازدهی و وزن‌دهی کرده و سپس به‌وسیله کارشناسان و گروه‌های مرتبط اولویت‌بندی شوند (Gary, 2006).

1. Cambodia

2. Multiple Criteria Decision Making

جدول ۱ معیارهای اصلی و فرعی مطرح در مطالعات IFM

معیارها				
	اجتماعی-فرهنگی (WMO/GWP, 2006)	**اقتصادی** (WMO/GWP, 2007)	**محیط زیستی** (WMO/GWP, 2006)	**حقوقی- سیاسی** (WMO/GWP, 2006)
زیرمعیارها	تلفات جانی	تبعات اجتماعی- اقتصادی سیل	اکولوژی انسانی و حیوانی منطقه	بهسازی و شرایط اعمال قانون
	آسیب های اجتماعی- فرهنگی	خسارات غیر مستقیم	تبعات سیل بر بهداشت منطقه	کیفیت وضع و اجرای قوانین موجود
	سطح آسیب پذیری اجتماعی منطقه	خسارات مستقیم	تغییرات ریختی و تبعات فرسایش	سطح اهمیت حقوقی- سیاسی منطقه مورد مطالعه

MCDM مبحثی است که به فرآیند تصمیم‌گیری در حضور معیارهای متفاوت و گاهی متناقض برای تأمین یک یا چند هدف در فرآیند تصمیم‌گیری می‌پردازد. در دسته‌بندی کلی، مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره به دو دسته تقسیم می‌شوند (اصغرپور ۱۳۸۷):

۱- MADM[1]: تصمیم‌گیری چندشاخصه (با یک گزینه از میان مجموعه گزینه‌هایی که به‌وسیله معیارها سنجیده می‌شوند، سروکار دارند.)

۲- MODM[2]: تصمیم‌گیری چند هدفه (از میان چند هدف، مناسب‌ترین هدف را با توابع تعریف شده تعیین می‌کند.)

در تحقیق حاضر معیارهای برگزیده شده همراه با گزینه‌های انتخاب در این زمینه به‌منظور تصمیم‌گیری در تعیین حریم سیل و خطر رودخانه به‌کار رفته است. تصمیم‌گیری‌های چند معیاره و روش‌های مطرح در آن رویکرد مناسبی برای دستیابی به بهترین جواب یا اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف است. در این تحقیق متناسب با دستیابی به هدف مورد نظر برای اولویت‌بندی و تحلیل خطر برای محدوده‌های سیل‌گیر، به‌روشی نیاز است که علاوه بر برآورده‌سازی وجوه مختلف مطرح در طرح، توانایی منظور کردن چند معیار اصلی و فرعی مستقل، با واحدهای متفاوت سنجش داشته باشد و در ضمن در راستای معیارها و زیر معیارهای مطرح شده، بتواند گزینه‌هایی را به‌طور مستقل برای هر معیار سنجش در نظر بگیرد. تحلیل سلسله مراتبی به‌عنوان روش برگزیده در این مقاله، از میان روش‌های مطرح موجود در MCDM تا حدود زیادی موارد مطرح شده است، به‌ویژه روی هم قرار دادن نتایج مختلف را پوشش می‌دهد. در مدل مورد نظر در این تحقیق، هدف تعیین مکان حریم خطر رودخانه و سطح خطر رویارویی با سیل متناسب با کاربری‌های گوناگون در محدوده سیل‌گیر است. به بیانی دیگر تعریف معیارهای اصلی و فرعی وابسته به هدف و همچنین اولویت‌بندی گزینه‌های مطرح (که در اینجا کاربری اراضی در حاشیه رودخانه‌ها تعریف شده)، دستیابی حدود و حریم رودخانه متناسب با اهمیت منطقه و خطری است که از سوی سیل به منطقهٔ سیل‌گیر اعمال می‌شود. روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP[3])، توسط توماس ساتی[4] در فاصلهٔ سال‌های ۱۹۸۰ و۱۹۹۴ ارائه و از آن در زمینه‌های مختلف علوم استفاده شده است. این روش می‌تواند عوامل کیفی و کمّی را به طور نظام‌مند به مدل تصمیم‌گیری وارد کند. به‌طور کلی برای حل هر مسأله‌ای به روش تحلیل سلسله مراتبی، سه گام اصلی زیر باید طی شود:

- تعریف ساختار سلسله مراتبی
- محاسبهٔ وزن‌های معیارهای در نظر گرفته شده
- محاسبهٔ نرخ سازگاری نتایج حاصل (Saaty, 1980).

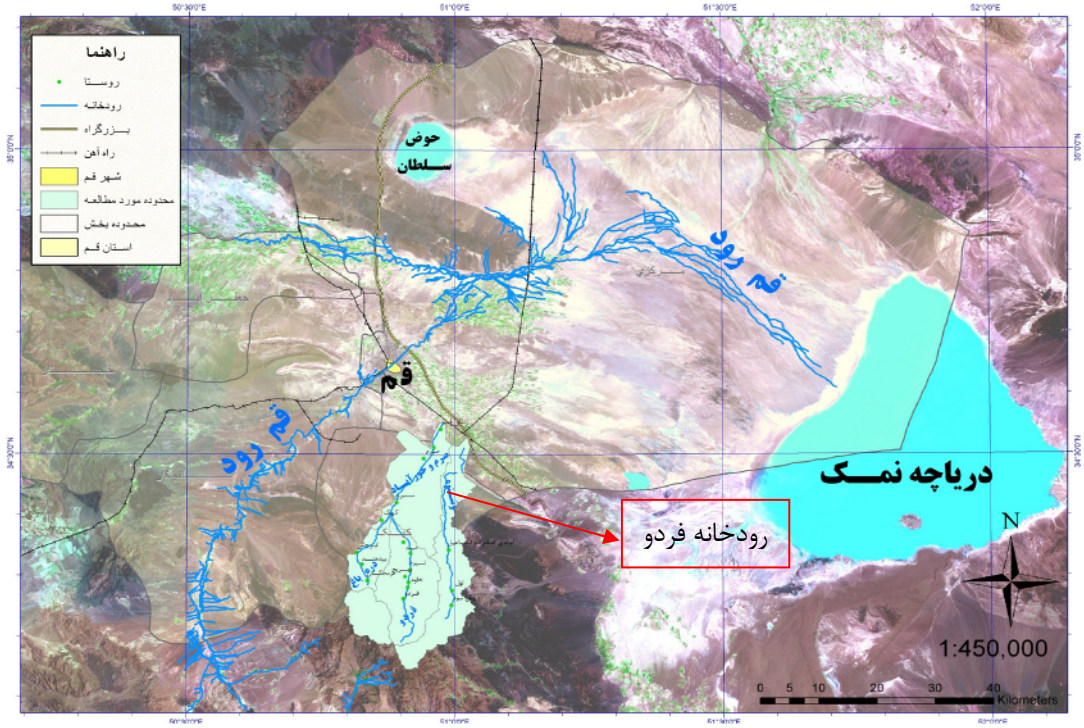
1. Multi Attribute Decision Making
2. Multi Objective Decision Making
3. Analytic Hierarchy Process
4. Thomas Saaty

موارد زیر مزایای استفاده از مدل تصمیم‌گیری AHP در مقاله حاضر است.

- مناسب‌ترین مدل ریاضی تحلیل و اولویت‌بندی داده‌های کیفی
- قابلیت تحلیل معیارهای کیفی به‌صورت کمّی
- انعطاف‌پذیری مدل در برابر هر گونه تغییر در داده‌ها
- قابل کنترل بودن و سهولت در تشخیص ورودی‌های اشتباه
- توانایی تحلیل معیارهای اصلی و فرعی و گزینه‌های متعدد بدون ایجاد خطا در خروجی‌های مدل
- یکپارچه‌سازی و ارتباط دادن مدل با مدل‌های ریاضی دیگر به‌صورت کمّی

۲-۴- مشخصات کلی مطالعهٔ موردی

به‌منظور اجرای روش پیشنهادی، مطالعات مهندسی رودخانه و سپس بازدیدهای صحرایی در بازه‌ای به طول تقریبی ۲۹ کیلومتر از رودخانه فردو صورت گرفت. رودخانه فردو یکی از رودخانه‌های اصلی در بخش نوفل لوشاتو (کهک) استان قم است و به‌صورت فصلی از ارتفاعات کوه سلطان سعدشاه از ارتفاعات ۳۲۰۰ متری شکل می‌گیرد. شکل ۲ موقعیت حوضهٔ رودخانه فردو را نسبت به رودخانه قم رود نمایش می‌دهد. جدول ۲ نتایج حاصل از مطالعات مهندسی رودخانه فردو را ارائه می‌کند. پنج روستای فردو، خاوه، تیره، میم و دستگرد در حاشیه رودخانه فردو قرار داشته و این رودخانه از مرکز روستاهای فردو، تیره و دستگرد عبور می‌کند. به‌منظور تهیه مدل تصمیم‌گیری علاوه بر مطالعات محیط‌شناسی و ریخت شناسی منطقه -که رویکرد زیست محیطی IFM را در بر می‌گیرد، مطالعات رویکردهای اجتماعی، اقتصادی و حقوقی IFM نیز برای روستاها و مسیر آبراهه اصلی رودخانه فردو انجام و تمامی کاربری‌های حاشیهٔ رودخانه تفکیک شد.



شکل ۲ موقعیت حوضهٔ رودخانه فردو نسبت به رودخانه قم رود

آنچه از بررسی مباحث حقوقی و طرح‌های هادی روستایی مسیر رودخانه فردو حاصل می‌شود این است که حریم و بستر رودخانه و محدودهٔ سیل‌گیر در طرح‌های مذکور در نظر گرفته نشده است. همچنین وجود باغ‌ها، زمین‌های کشاورزی و روستاهای صدمه دیده از سیل نشان‌دهنده سابقهٔ طولانی تجاوز به حریم رودخانه است. بررسی‌های اجتماعی و اقتصادی در روستاهای محدوده مورد مطالعه نشان‌دهندهٔ گردشگری گسترده در منطقه بوده و علاوه بر جوان بودن جمعیت، تقریباً تمامی روستاها نرخ منفی رشد (ناشی از مهاجرت به شهر) دارند. از نظر امکانات و تأسیسات بنیادی، به‌جز روستای فردو، دیگر روستاها وضعیت مناسبی نداشته و امکانات و تجهیزات بهداشتی، خدماتی و رفاهی ندارند. بیشتر فعالیت اقتصادی مردم باغداری و دامپروری غیر صنعتی است که تأثیرپذیری مستقیمی از منابع آب و سیل دارند. سوابق سیل در رودخانه فردو خسارت‌های مالی سنگین و یک مورد تلفات جانی را نشان می‌دهد. در شکل۳ شرایط بستر رودخانه فردو نشان داده شده است (جوان، ۱۳۸۸).

جدول ۲ مشخصات فنی رودخانه فردو (جوان، ۱۳۸۸)

مشخصات مورد نیاز تحلیل هیدرولیکی	مشخصات فنی رودخانه فردو
دبی سیل با دوره بازگشت ۲۵ و ۱۰۰ ساله	۸۳/۵ و ۱۲۱/۹ متر مکعب بر ثانیه
مشخصات شیب طولی رودخانه	۰/۱۱ در سرشاخه، در انتها حدود ۰/۰۳، متوسط شیب برابر ۰/۰۴
شیب متوسط حوضه	۱۵ درصد
مدل شبکه جریان (بر اساس طبقه بندی شوم)	منطقهٔ یک (تولید رسوب)
مشخصات فرسایشی و رسوب رودخانه	تولید رسوب بالا- فرسایش در طول این رودخانه بیشتر در بستر رود اتفاق افتاده و کمتر کناره‌ها دچار فرسایش می‌شود
ضریب پیچش (L/ ML)[1]	دارای پیچش (سینوسیتی) کم و یک شاخه ثابت، رودخانه مستقیم
مشخصات بستر رودخانه	بستر آبرفتی بوده و مصالح بستر آن بیشتر قلوه سنگی و شنی است
مشخصات پوشش گیاهی	دارای پوشش متراکم گیاهان با اتفاع بیش از ۱/۵ متر در بالا دست و دارای پوشش گیاهی صحرایی در پایین‌دست

شکل ۳ شرایط بستر رودخانه فردو از بالا دست به پایین‌دست جریان (چپ به راست) (جوان، ۱۳۸۸)

۱- مقدار پیچش از تقسیم طول رودخانه (L) بر طول دره‌ای که رودخانه در آن جریان دارد (M_L) به‌دست می‌آید. اگر این نسبت از ۱/۵ کمتر باشد، رود با پیچش کم نامیده می‌شود (Erich, 2002).

۲-۴-۱- روند تحلیل مدل هیدرولیکی

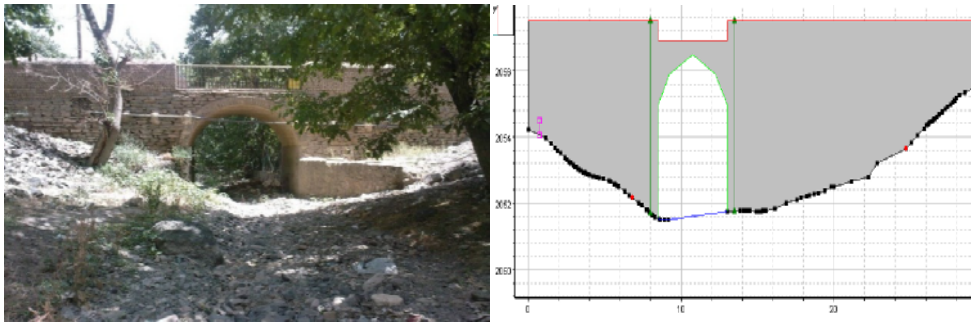
به‌منظور پهنه‌بندی رودخانه با معیارهای هیدرولیکی لازم است مراحلی متناسب با دقت مورد نیاز در پهنه‌بندی انجام شود. در این راستا پس از مدل‌سازی رودخانه در نرم‌افزار HEC-RAS، نمونهٔ اولیه‌ای از مدل ریاضی تهیه شده و از روی نتایج به‌دست آمده، جریان در طول مسیر آبراهه اصلی مطالعه می‌شود. پس از نهایی کردن ضرایب زبری آبراهه و کناره‌های رودخانه بر اساس محاسبات و اطلاعات موجود، مدل بار دیگر اجرا شده و سرعت، عمق و رژیم جریان در طول مسیر آبراهه اصلی بررسی می‌شود. در همین راستا لازم است، تغییرات ناگهانی عمق و سرعت در پلان و پروفیل طولی جریان بررسی شود و در صورت وجود هرگونه تناقض با طبیعت رودخانه، مدل اصلاح شود. برای دستیابی به مدل واقعی رودخانه لازم است مقاطع عرضی در نظر گرفته شده در مسیر رودخانه متناسب با بازدیدهای میدانی و شرایط عوارض در محل مقطع جریان اصلاح شود. ساخت مقاطع عرضی جدید در فواصل معین به‌منظور پهنه‌بندی سرعت و عمق در مسیر جریان توسط مدل هیدرولیکی، پهنه‌بندی سیلاب به‌وسیله مدل هیدرولیکی و نرم‌افزار GIS و واسنجی نتایج حاصل از مدل اولیه برای سیل با دورهٔ بازگشت ۲۵ و ۱۰۰ ساله انجام شد.

در مجموع در ۲۹ کیلومتر از طول رودخانه فردو بیش از ۳۵۰ مقطع عرضی به مدل هیدرولیکی وارد شد. همچنین تمامی عوارض موازی و متقاطع با جریان مطابق شرایط واقعی رودخانه مدل‌سازی شد. شکل ۴ نمونه‌ای از مقاطع سازه‌های متقاطع با جریان رودخانه فردو را نمایش می‌دهد.

با توجه به بازه‌بندی پیشنهادی، پارامترهای هیدرولیکی ستاد حوادث غیر مترقبه ایالات متحده امریکا تلفیق دو شاخص مهم جریان یعنی سرعت و عمق به‌صورت انرژی به‌عنوان میزان خطر سیل در هر نقطه محاسبه شده است (Federal E.M.A., 1993). جدول ۳ معیارهای در نظر گرفته شده برای تحلیل خطر ناشی از عامل هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

۲-۵- تعیین حریم و سطح خطر سیل رودخانه‌ها با استفاده از مدل IFM

برای اولویت‌بندی و تحلیل خطر برای محدوده‌های سیل‌گیر، به روشی نیاز است که توانایی در نظر گرفتن چند معیار اصلی و فرعی مستقل با واحدهای سنجش متفاوت را داشته و در راستای معیارهای اصلی و فرعی مطرح شده بتواند گزینه‌هایی را به‌صورت مستقل برای هر معیار سنجش در نظر بگیرد.



شکل ۴ نمایی از پل متقاطع با مسیر رودخانه فردو و وارد کردن آن به مدل هیدرولیکی

جدول ۳ بازه‌بندی پیشنهادی پارامترهای هیدرولیکی در محدودهٔ حریم رودخانه (جوان، ۱۳۸۸)

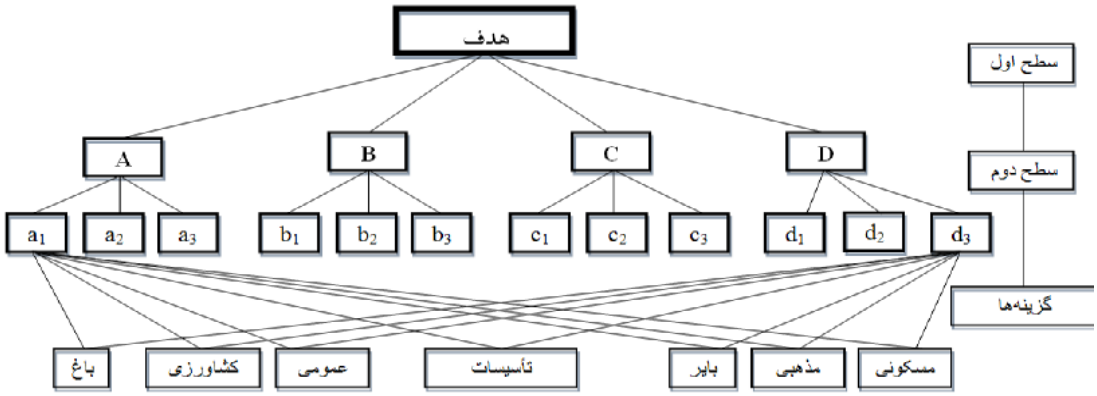
بازهٔ تغییر عمق (متر)	بازهٔ تغییر سرعت (متر بر ثانیه)	بازهٔ تغییر انرژی	بازهٔ خطر	ضریب اهمیت (از مجموع ۱)
۰/۰۸–۰/۴۰	۰/۰–۲/۵۰	۰/۰–۰/۴۰	خطر نسبی کم	۰/۱
۰/۳۸–۰/۷۰	۰/۰–۲/۵۰	۰/۴۰–۰/۷۰	خطر نسبی متوسط	۰/۱۷۵
۰/۸۸–۱/۲۰	۰/۰–۲/۵۰	۰/۷۰–۱/۲۰	خطر نسبی زیاد	۰/۳
>۱/۲۰	۰/۰–۲/۵۰	>۱/۲۰	خطر نسبی بسیار زیاد	۰/۴۲۵

به بیان دیگر در ماتریس تصمیم گزینه‌ها، رتبه‌بندی خطر برای کاربری‌های مختلف با درنظر داشتن معیارهای اصلی و فرعی در IFM انجام می‌شود. بنابراین دستیابی به حدود و حریم خطر سیل رودخانه متناسب با اهمیت منطقه و خطری که از سوی سیل متوجه منطقه سیل‌گیر خواهد شد انجام می‌شود.

با توجه به مفهوم تصمیم‌گیری چند معیاره و همچنین مدل تحلیل سلسله مراتبی، سه سطح معیار اصلی، معیار فرعی و گزینه‌ها که در شکل۵ ارائه شده، در مدلAHP تعریف شد. در این نمودار A، B، C و D به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ معیارهای اقتصادی، زیست محیطی، حقوقی و اجتماعی در سطح اول است. سطح دوم در شکل ۵ شامل معیارهای فرعی و سطح سوم گزینه‌های مطرح است که در تحقیق حاضر کاربری اراضی حاشیه رودخانه در نظر گرفته شده است. گزینه‌های در نظر گرفته شده برای تعیین اهمیت اراضی بر اساس کاربری آن در برابر سیلاب به چهار گروه تقسیم شده است. گروه اول زمین‌های کشاورزی، باغی و زمین‌های بایر، گروه دوم مسکونی و تجاری، گروه سوم عمومی و مذهبی و گروه چهارم تأسیسات شامل راه‌ها، سازه‌های بنیادی، تأسیسات آبرسانی، نهرها و تأسیسات آبیاری است.

مقایسهٔ زوجی میان سطوح و تعیین وزن گزینه‌ها به روش سلسله مراتبی، در نهایت به دو سری وزن‌دهی منتج شد (جدول ۵). در سری اول پس از مسائل اجتماعی، تأکید بر دو رویکرد حقوقی و اقتصادی است. هرچند اهمیت در نظر گرفته شده برای معیارها در این بخش تفاوت زیادی ندارد، با وجود این معیار زیست محیطی کمترین اهمیت را دارد. مقایسهٔ زوجی شماره دو پس از رویکرد اجتماعی، به‌ترتیب معیار زیست‌محیطی و اقتصادی را اولویت داده و مسائل مطرح در معیار حقوقی را در آخر قرار می‌دهد. در مقایسهٔ زوجی شماره دو نیز تفاوت زیادی بین دو معیار اقتصادی و حقوقی دیده نشد.

جدول ۵ اهمیت استخراج شده در هر یک از مقایسه‌های زوجی و اهمیت وارد شده در لایهٔ نقشهٔ کاربری‌ها را نشان می‌دهد. (پیوست الف، نقشهٔ پهنهٔ خطر بستر و حریم سیل رودخانه فردو را در کنار کاربری‌های هفت‌گانه نشان می‌دهد). نتایج استخراج شده از درجهٔ اهمیت هر کاربری، به لایه‌های کاربری اراضی تحت تأثیر سیل وارد می‌شود. همچنین لایه‌های کاربری، تحت تأثیر سیل به‌صورت موازی با مدل هیدرولیکی قطع داده شده و درجهٔ اهمیت منطقهٔ تحت تأثیر سیل از نظر هیدرولیکی مطابق جدول ۳ به مناطق تحت تأثیر سیل وارد می‌شود. در نهایت وزن هر نقطه از مسیر سیل، از تلفیق لایه‌های حاصل از مدل تصمیم‌گیری و هیدرولیکی حاصل می‌شود (شکل ۶). محدودهٔ پیشنهادی عمل میزان خطر مواجهه با نقاط تحت تأثیر سیل در جدول ۴ قابل مشاهده است. بازه‌بندی انجام شده متناسب با اهمیت کاربری‌ها، منطقهٔ مورد مطالعه و مطالعات تخصصی انجام شده و برای رودخانه‌های با مشخصات فنی و مدیریتی مختلف (مانند رودخانه‌های عبور کننده از شهرهای بزرگ) متفاوت است.



شکل ۵ سطوح مطرح در مدل AHP در تحقیق حاضر

جدول ۴ محدوده پیشنهادی عمل درجهٔ خطر رویارویی با نقاط تحت تأثیر سیل

میزان خطر نسبی رویارویی با نقطه تحت تأثیر سیل	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
محدودهٔ عمل بازهٔ خطر	۰ – ۰/۱۷۵	۰/۱۷۵ –۰/۴	۰/۴ – ۰/۶	۰/۶ < –

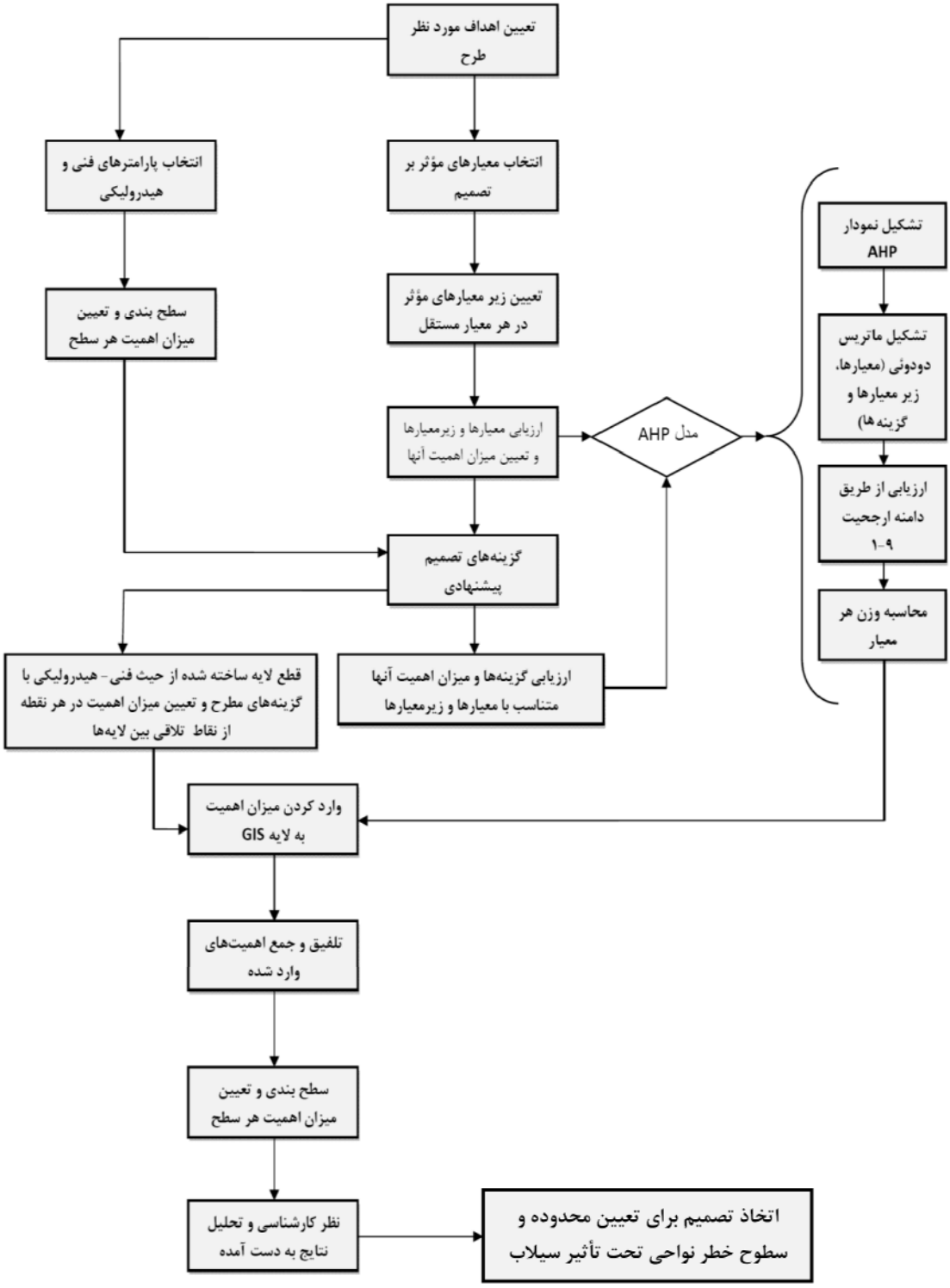
جدول ۵ درجهٔ اهمیت استخراج شده در هر یک از مقایسه‌های زوجی برای کاربری‌ها (درصد)

نوع کاربری	زراعی	باغی	اماکن عمومی	زمین بایر	تأسیسات	اماکن مذهبی	اماکن مسکونی
نتیجهٔ حاصل از مقایسهٔ زوجی شماره یک (از۱۰۰)	۷/۶	۱۰	۲۹/۹	۳/۹	۱۰/۷	۹/۷	۲۸/۲
نتیجهٔ حاصل از مقایسهٔ زوجی شماره دو (از۱۰۰)	۸/۱	۹/۵	۲۹/۹	۳/۵	۹/۵	۱۰/۸	۲۸/۷
درجهٔ اهمیت در مدل پس از حل اختلاف (از۱۰۰)	۷/۸	۹/۷	۳۰	۳	۱۰/۱	۱۱	۲۸/۴

۳- تحلیل نتایج

مهمترین نتیجه روش پیشنهادی در این تحقیق، تشخیص سطح خطر ناشی از سیل در نواحی تحت تأثیر سیلاب است. به این ترتیب در صورت تحلیل صحیح رویکردهای مطرح در IFM و وارد کردن سطح اهمیت این رویکردها در کنار دیگر، عوامل مطرح در مهندسی رودخانه، در تعیین هدفمند حدود بستر و حریم خطر سیلاب رودخانه‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. به‌منظور مقایسهٔ تحلیل‌های متداول هیدرولیکی و روش پیشنهادی، در جدول ۶ خلاصهٔ نتایج هر دو روش در بازهٔ مطالعاتی (مساحت سطوح خطر مواجه با سیل) ارائه شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود مساحت تحت پوشش حاصل از روند طی شده در تحقیق حاضر، از مساحت تحت پوشش حاصل از مدل هیدرولیکی بیشتر است که این اختلاف به علت تأثیرپذیری کاربری‌هایی نظیر اماکن عمومی یا مذهبی از سیل است. از سوی دیگر، بر اساس تعریف محدودهٔ خطر نسبی در جدول ۵، مشخص شد که نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی (به تنهایی) در حدود ۸۰ درصد از از اراضی مورد بحث را در خطر نسبی زیاد و بسیار زیاد قرار می‌دهد. در صورتی‌که رویکرد پیشنهادی دراین مقاله، ۸۰ درصد اراضی را در محدودهٔ خطر نسبی متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌کند.



شکل ۶ فرایند پیشنهادی برای تعیین محدوده و سطوح خطر نواحی تحت تأثیر سیل رودخانه‌ها

جدول ۶ مساحت سطوح خطر ناشی از سیل در نواحی سیل‌گیر (بر اساس پهنه‌بندی انجام شده و پهنه‌بندی هیدرولیکی)

خطر نسبی رویارویی با نقطهٔ تحت تأثیر سیل	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد	جمع مساحت‌های مناطق تحت پوشش
مساحت تحت پوشش حاصل از تحقیق حاضر (مترمربع)	۱۵۹۸۴۴	۳۱۷۸۰۱	۵۸۸۲۳۵	۲۰۱۵۵۱	۱۲۶۷۴۳۱
مساحت تحت پوشش حاصل از مدل هیدرولیکی (مترمربع)	۱۲۸۳۵۹	۱۴۰۹۴۱	۲۷۷۴۶۴	۵۰۲۷۰۶	۱۰۴۹۴۷۰

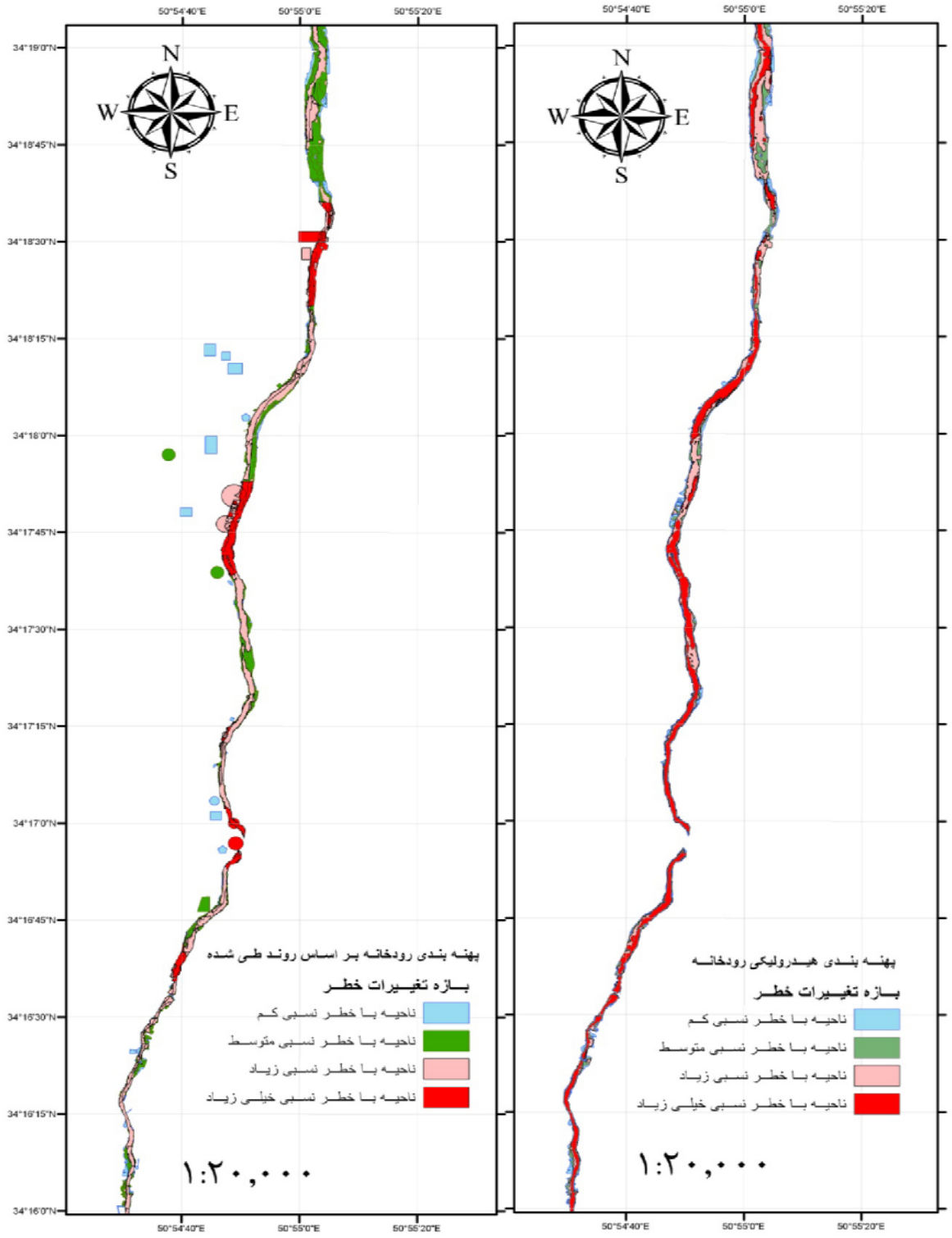
علت این تفاوت، تفکیک صحیح میان نقاط در مسیر رودخانه است. به بیانی، روش پیشنهادی با تفکیک کاربری‌های متفاوت، درجهٔ ارزش هر یک از آنها را مشخص کرده و تحلیل سیل، فقط با پارامترهای هیدرولیکی صورت نمی‌گیرد. شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی حریم و بستر خطر رودخانه فردو را با و بدون استفاده از روش پیشنهادی نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

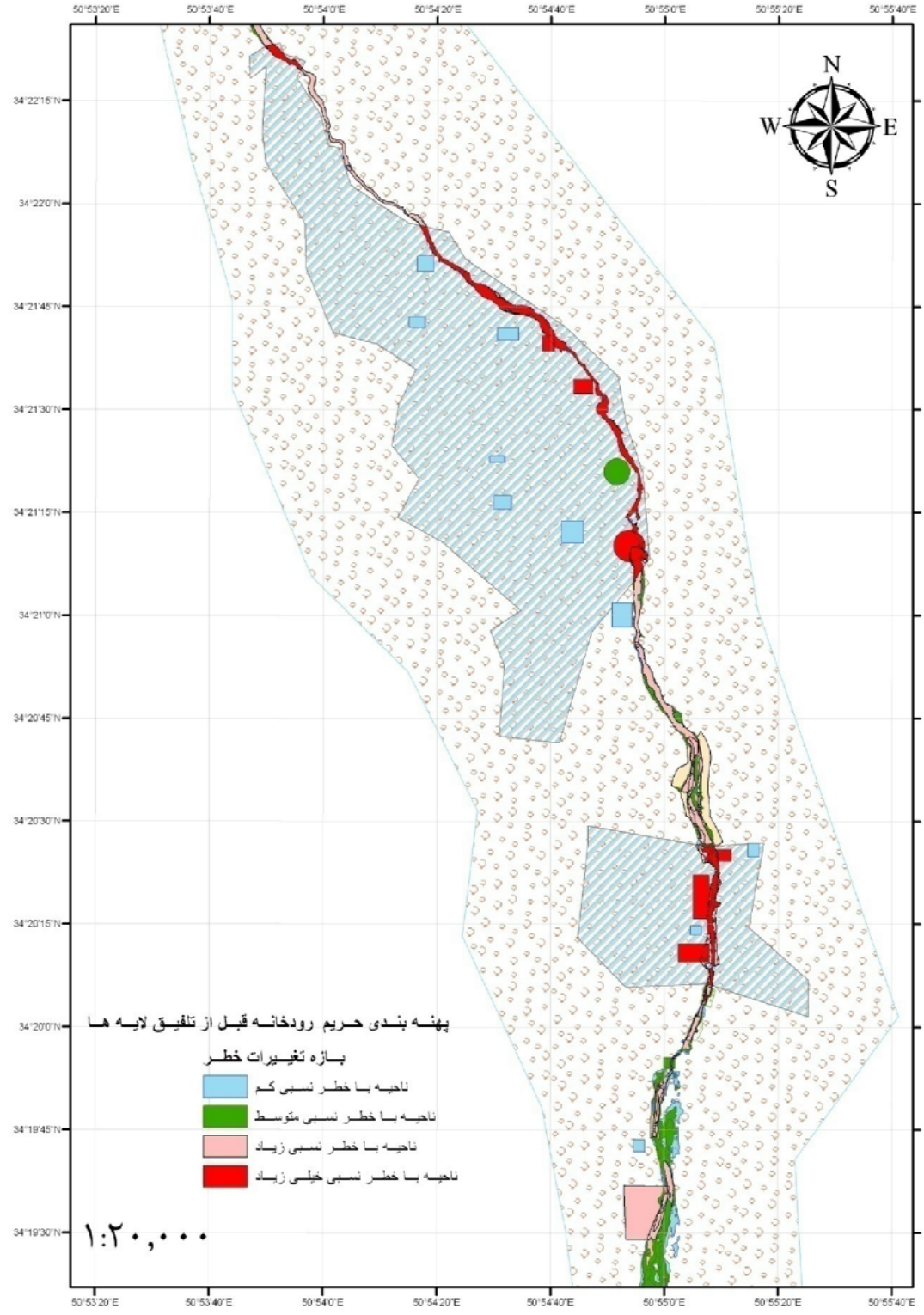
مطالب مطرح شده در روش پیشنهادی در این تحقیق بر موارد متعددی از مطالعات مهندسی رودخانه اثر دارد که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعیین مناسب‌تر حریم سیل و بستر رودخانه‌ها (که علاوه بر حیات طبیعی رودخانه، موارد مختلفی مانند مسائل حقوقی، آسیب‌پذیری از دیدگاههای مختلف اقتصادی، اجتماعی و مانند آن را در خود جای می‌دهد)
- مطالعه و توجیه اقتصادی طرح‌های عمرانی (که به ارزش‌گذاری صحیح سرمایه‌گذاران خصوصی و دولتی در زمین‌های با خطر کمتر کمک می‌کند)
- پیش‌بینی، هشدار و نجات و امداد (برای مثال در سیستم‌های هشدار امکان تعیین خطرپذیری هر منطقه ممکن می‌شود و در برنامه‌ریزی عملیات نجات و اعلام هشدار، زمان تلف‌شده کاهش می‌یابد، ضمن اینکه شناسایی نقاط امن و دسترسی به جاده‌ها و مسیریابی نیز تسهیل می‌شود)
- بیمهٔ سیل اراضی بستر و حریم رودخانه (شرکت‌های بیمه برای تعیین نرخ خطر مناطق مختلف حاشیهٔ رودخانه و دریافت حق بیمه متناسب با خطرپذیری هر منطقه به این نقشه‌ها نیاز دارند و این روش از روند سنتی بیمه‌گذاری بر مبنای وسعت اراضی و ارزش سرمایه‌گذاری‌ها در سیلاب‌دشت جلوگیری کرده و سهم شرکت‌های بیمه با تضمین بالاتری تأمین خواهد شد)
- تعیین نقاط با حساسیت بالا با در نظر گرفتن رویکردهای مختلف به‌منظور ساماندهی رودخانه
- مشخص کردن محدودهٔ حیاتی رودخانه و در نظر گرفتن آن در طرح‌های هادی و تفضیلی روستایی و شهری

یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای این روش، تعیین حریم و بستر برای رودخانه‌هایی است که از داخل شهرها عبور می‌کنند. نوع تفکیک انجام شده و مباحث IFM به‌خوبی می‌تواند شرایط را برای تعیین خطرپذیری در شهر مهیا سازد.



شکل ۷ نقشهٔ پهنه‌بندی سطوح خطر نواحی در معرض سیل رودخانه فردو قبل و بعد از تلفیق داده‌ها



پیوست الف نقشه سطوح خطر نواحی مواجه با سیلاب رودخانه فردو در کنار کاربری‌های هفت‌گانه

۵- منابع

اصغرپور، محمد جواد، تصمیم گیری‌های چند معیاره، ۱۳۸۷، چاپ ششم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران .

برخوردار، مهرداد، چاوشیان، سیدعلی، ۱۳۸۶، پهنه‌بندی سیلاب، کارگاه فنی روش‌های غیر سازه‌ای مدیریت سیلاب، تهران.

جوان، پوریا، ۱۳۸۸، تعیین حدبستر و حریم سیل رودخانه‌ها با استفاده از تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

خسروشاهی، محمد، ۱۳۸۶، بررسی اثر برخی عوامل فیزیکی مؤثر بر سیل‌خیزی زیر حوضه‌های آبخیز با استفاده از تحلیل هیدروگراف خروجی حوضه، تهران.

رهبربصیر، احمد، ۱۳۸۵، پهنه‌بندی پتانسیل خطر ناشی از سیل در محیط GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مهدوی، محمد، ۱۳۸۱، آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی سیل، انتشارات دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

Barredo, J., Lavalle, C. (2002), European flood risk mapping, European Commission Joint Research Gentry, Germany.

Erich J. Plate, "Flood risk and flood management", Journal of Hydrology 267 (2002) 2-11.

Federal Emergency Management Agency (1993), Flood insurance study guideline & specification for contactors, United State of America.

Gary Higgs., Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation, 2006, Journal of Waste Management & Research, Volume 24, n.2, pp. 105-117.

Güler Yalçin, Zuhal Akyürek, "Multiple criteria analysis for flood vulnerable areas", Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.

Howard Wheatera, Edward Evans, "Land use, water management and future flood risk", Land Use Policy 26S (2009) S251–S264.

P. Pramojanee, C. Tanavud. "An Application of GIS for Mapping of Flood Hazard and Risk Area in Nakorn Sri Thammarat Province, South of Thailand", Asian disaster preparedness center, April 2000.

Rosgen, David L, " Applied River Morphology", Wildland Hydrology Books, Colorado (1996).

Saaty T. L., The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, 1980, Resource Allocation, New York, McGraw Hill Pub.

Tanavud, C., Yongchalermchai C. (2004), "Assessment of flood risk in Hat Yai Municipality, Southern Thailand, using GIS", Journal of Natural Disaster Science, Volume 26, Number 1, pp. 1-14.

WMO/GWP, Associated programmed on Flood Management (APFM), Technical Document No. 2, Flood Management Policy Series, Legal & Institutional Aspects of Integrated Flood Management, 2006, ISBN: 92-663-10997-4.

WMO/GWP, Flood Hazard Research Center at the University of Middlesex, “Integrated Flood Management, Concept Paper”, 2004, APFM Technical Document No. 1, U.K.

WMO/GWP, Flood Management Policy Series, Economic Aspects of Integrated Flood Management, June 2007, Geneva.

WMO/GWP, Flood Management Policy Series, Environmental Aspects of Integrated Flood Management, Aug. 2006, Geneva.

WMO/GWP, Flood Management Policy Series, Social aspects and Stakeholder Involvement in Integrated Flood Management, Aug. 2006, Geneva.