نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Jounrnal of Science & Research Civil and Enviromental Engineering (ASJR-CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۲۷ تا ۲۴۰
Vol. 48, No. 3, Fall 2016, pp. 227-240

مدیریت بهینه رواناب شهری با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی

احمد رادمهر[1*]، شهاب عراقی‌نژاد[2]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۱۳۹۱/۸/۵، پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۶)

چکیده

مدیریت آب در مناطق شهری شامل کنترل جریان هرزاب‌ها و اصلاح شبکه‌های زهکشی است. رشد سریع شهرها به همراه افزایش جمعیت آن، مشکلات زیادی را در زمینه مدیریت رواناب در هنگام رخدادهای سیلابی به همراه دارد. در این راستا، نقشه‌هایی که میزان پتانسیل سیل‌گیری مناطق مختلف را نشان می‌دهند، می‌توانند ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های شهری در آینده باشند. تحلیل آسیب‌پذیری در مناطق مختلف محیط‌های شهری، اغلب شامل معیارهای چندگانه‌ای بوده که به صورت مکانی به یکدیگر مرتبط هستند. هدف از انجام این تحقیق، تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب به منظور اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر در مدیریت سیلاب شهری با استفاده از ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بوده که در قالب یک سیستم پشتیبان در برنامه‌ریزی است. با توجه به نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب، مناطق جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه از درجه خطرپذیری بالایی برخوردارند. این در حالی است که این مناطق در محدوده زمین‌های پست (با ارتفاع کم) و شیب کمتر از ۲ درصد واقع شده‌اند. همچنین شبکه کانال‌های جمع‌آوری رواناب در این مناطق سیستم‌های نگهداری ضعیفی را دارند. به منظور ارزیابی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، از ایجاد قابلیت مدلسازی مکانی با شبکه‌های عصبی استفاده شده است. نقشه تخمینی تولید شده از مدل شبکه عصبی نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین هر یک از نقشه‌های معیار با نقشه نهایی پتانسیل سیل‌خیزی برقرار است. با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان عنوان کرد که کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزاری توانمند در تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب با دقت بالا مطرح است.

کلمات‌کلیدی:

مدیریت سیلاب شهری، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تصمیم‌گیری چندمعیاره، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم پشتیبان برنامه‌ریزی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please site this article using:
Radmehr, and A., Araghinejad, S., 2016. "Optimal Urban Flood Management Using Spatial Multi Criteria Decision Making Approach". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 227-240.
DOI: 10.22060/ceej.2016.672
URL: http://ceej.aut.ac.ir/article_672.html

نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: E-mail: aradmehr414@yahoo.com

۱- مقدمه

طراحی سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی در شهرها ارتباط بسیار نزدیکی با برنامه‌ریزی شهری دارد و بخشی از آن تلقی می‌شود. طبعاً هرگونه سهل‌انگاری در این زمینه، مستقیماً در طرح شهرسازی اثرگذار است و می‌تواند برای جوامع و کانون‌های شهری مشکل‌آفرین باشد. در این تحقیق، ضمن بررسی کارهای انجام‌شده قبلی در زمینه مدیریت سیلاب و استفاده از تجارب آن‌ها، به ارائه دستاوردهای حاصل از این پروژه پرداخته خواهد شد؛ به نحوی که تحقیقات قبلی در این زمینه را می‌توان در دو دسته کلی طبقه‌بندی نمود. در ابتدا به ارائه تحقیقات پایه‌ای انجام‌شده در راستای مدیریت سیلاب پرداخته‌شده و در ادامه نیز تحقیقاتی که در آن‌ها از ابزارهای جدید مدیریتی مانند روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره گرفته شده‌اند، ارائه می‌شود.

مناسب‌ترین زمان برای تهیه طرح سیستم دفع آب‌های سطحی شهری، هنگامی است که مطالعات شهرسازی در جریان است و انعطاف‌پذیری در طرح‌ریزی شهری امکان دارد. مسئله دفع آب‌های سطحی از مسائل عمده ایمن‌سازی مناطق مسکونی از خطر وقوع سیلاب و نهایتاً رفع خسارات احتمالی از مناطق شهری است [۱]. مطالعه سیلاب در یک حوضه، مستلزم بکارگیری حجم بالایی از اطلاعات و داده‌های متنوع در مورد خصوصیات فیزیکی حوضه، کاربری اراضی، نوع خاک حوضه و وضعیت هیدرولیکی مسیر جریان بوده و از این‌رو، مدیریت سیلاب در یک حوضه نیازمند نگرش یکجا و سیستمی به سیکل هیدرولوژی در آن حوضه است [۲،۳].

کادیر (۱۹۹۶) اطلاعات مربوط به هیدرولوژی و عوامل مختلف مؤثر بر تولید هرزاب را در ۴۳ حوضه جمع‌آوری نمود. این حوضه‌ها در مناطق مختلف از نظر میزان بارندگی واقع بودند. با ارائه یک رابطه منطقی بین میزان بارندگی و هرزاب متوسط سالیانه، حوضه‌های مورد بررسی را در دو گروه می‌توان طبقه‌بندی کرد [۴].

ساندرز و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی کنترل فعال و غیرفعال در مخازن غیرخطی با هدف کاهش ارتفاع سیلاب در حوضه شهری واقع در شمال کالیفرنیا پرداختند. آن‌ها دریافتند که انتقال رواناب اضافی به یک مخزن غیرخطی خصوصاً در مناطقی مانند حوضه‌های شهری که دارای ذخایر غیرخطی معدودی هستند، برای کاهش ارتفاع حداکثر سیلاب بسیار مفید است [۵]. اسکولز (۲۰۰۷) در تحقیقی اقدام به طبقه‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت ذخیره سیلاب حوضه‌ای نمود. وی با بررسی ۳۴ متغیر کمی و کیفی موجود در ۳۴۰ حوضه آلمان، ظرفیت ذخیره حوضه‌ای را تعیین و طبقه‌بندی کرد. متغیرهای وجود مناطق ذخیره‌ای (سد، دریاچه طبیعی و مصنوعی)، آورد آب و گیاهان موجود بیشترین تأثیر را در میزان ظرفیت ذخیره‌ای حوضه داشتند [۶]. مدیریت پایدار حوضه‌های آبریز نیازمند همکاری گروهی از متخصصان علوم اجتماعی، علوم طبیعی، مدیران منابع آب، طراحان و سیاستمداران است. اختلاف‌های اساسی بین سیاست‌های کاری بخش‌های مختلف علمی منجر به خروجی‌های نامطمئن در بین آن‌ها خواهد شد. در این راستا، استفاده از تکنولوژی، شاخص‌ها، سناریوهای مکانی و تحلیل‌های چندمعیاره در بهبود مدیریت پایدار حوضه‌ای مؤثر واقع می‌شود [۷].

برخی از مسائل و مشکلات زندگی روزمره در زمینه مدیریت می‌توانند در ردیف مسائل تحلیل چندمعیاری قرار گیرند که از آن جمله می‌توان ارزیابی و انتخاب منابع، استراتژی‌ها، پژوهش‌ها، پیشنهادها، خط مشی‌ها و طرح‌ها را نام برد [۸]. در مسائل ارزیابی چندمعیاری، چندین معیار و ملاک به طور همزمان بر روی تعداد محدودی گزینه[1] مورد بررسی قرار گرفته و حالت بهینه انتخاب می‌شود. ابریشم‌چی و همکاران (۲۰۰۵) کاربرد روش برنامه‌ریزی سازشی (که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است) را به منظور مدیریت آب شهری در شهر زاهدان مورد بررسی قرار دادند [۹]. سیمونوویچ و ورما (۲۰۰۸) در یک مسئله مرتبط با جمع‌آوری آب‌های سطحی، از روش تاپسیس استفاده کردند و عدم قطعیت در مقادیر وزن معیارها را از طریق تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پرتوی فازی مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. افشار و همکاران (۲۰۱۰) کاربرد روش تاپسیس فازی را در ارزیابی سناریوهای مدیریتی منابع آب با درنظر گرفتن معیارهای اقتصادی-اجتماعی، اکولوژیکی، زیست‌محیطی، سیاسی و حقوقی در سد مخزنی کارون نشان دادند [۱۱]. از طرفی دیگر، امروزه روش‌های تصمیم‌گیری متنوعی توسعه یافته‌اند که در أخذ تصمیم‌های صحیح و فراگیر کمک فراوانی را به طراحان و تصمیم‌گیرندگان می‌نمایند. اگر این روش‌ها در تحلیل‌های مکانی GIS بکار گرفته شوند، می‌توان به طور جامع و فراگیرتری از دانش افراد خبره در تحلیل‌ها استفاده نمود. به عبارت دیگر، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری و دانش کارشناسی به افزایش توانایی GIS در کمک به اتخاذ تصمیم‌های مکانی خواهد انجامید.

کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در تحلیل مسائل مخاطرات طبیعی و تحلیل مناسبت‌ها به تفصیل توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از کارهای انجام‌شده در این زمینه می‌توان به مطالعه چنگ و همکاران (۲۰۰۸) اشاره نمود. آن‌ها با استفاده از تحلیل چندمعیاره فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی مکان‌های مناسبی را برای دفن زباله شناسایی نمودند. مطالعه آن‌ها در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول معیارهای ارزیابی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین شدند و سپس در مرحله دوم مکان‌های مناسب برای دفن زباله با استفاده از تحلیل چندمعیاره فازی شناسایی گردیدند [۱۲]. مالچوفسکی (۲۰۰۶) کاربرد کمیت‌های فازی را در مسئله تحلیل مناسبت اراضی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با استفاده از روش میانگین وزنی مرتب‌شده[3] (که یکی از روش‌های ارزیابی چندمعیاره است)، مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق با تغییر عوامل، عملگر میانگین وزنی مرتب‌شده

[1] Alternative
[2] Multi Criteria Decision Making
[3] Ordered Weighted Average Method

قادر به تولید محدوده گسترده‌ای از سناریوهای تصمیم‌گیری در رابطه با مسئله تحلیل مناسبت اراضی است [۱۳].

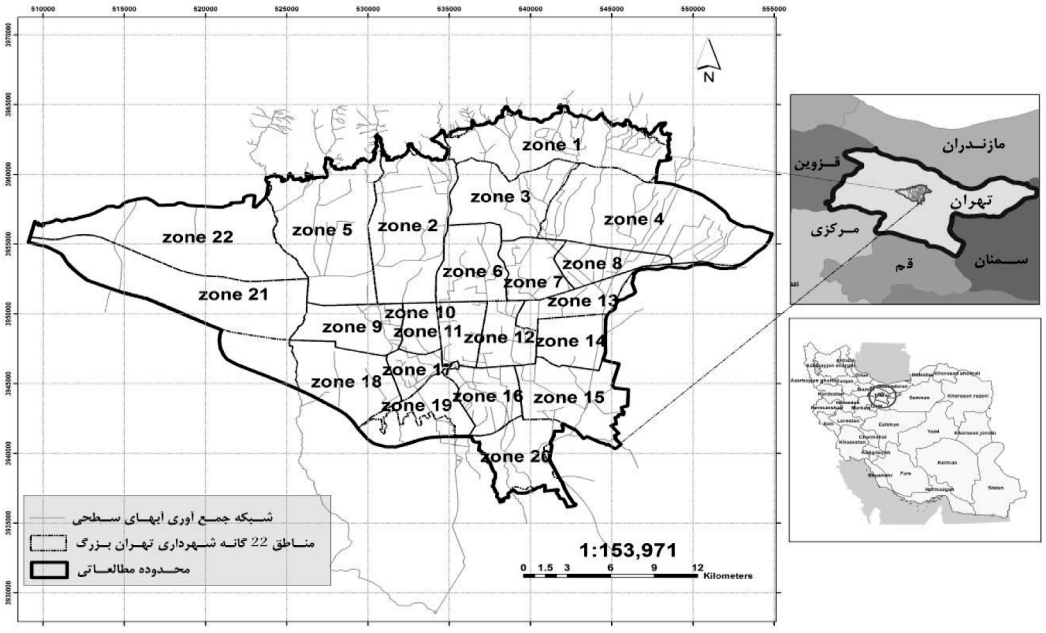
از روش تاپسیس نیز به صورت گسترده در مسائل رتبه‌بندی استفاده می‌شود که می‌توان به کاربردهای آن در ارتباط با مدیریت منابع آب (سیمونویچ و ورما، ۲۰۰۸)، محیط زیست (مونتاناری، ۲۰۰۴)، مدیریت مواد زائد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۳)، مدیریت پژوهش (کائو و همکاران، ۲۰۰۶) اشاره نمود [۱۶-۱۴،۱۰]. سرژویچ و همکاران (۲۰۰۴) کاربرد روش تاپسیس[1] را در ارزیابی سناریوهای مدیریتی منابع آب و اولویت‌بندی آن‌ها نشان دادند. شاخص‌های کارایی سیستم در تحقیق آن‌ها به صورت مکانی و زمانی تعیین شدند [۱۷]. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده قبلی توسط محققان در ارتباط با مدیریت سیلاب نشان می‌دهد که این تحقیقات، بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (یزدان‌دوست و بزرگی، ۲۰۰۸) و یا استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (رودریگز و همکاران، ۲۰۰۳) صورت گرفته است [۱۸،۱۹]. در حالی که در تحقیق حاضر، کاربرد این روش‌ها به صورت تلفیقی در قالب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی در زمینه مدیریت سیلاب انجام شده است. مطالعات مرتبط با مدیریت سیلاب را می‌توان در قالب دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود که شامل مسائل مربوط به پیش‌بینی سیلاب و ارزیابی آسیب‌پذیری سیلاب خواهد بود. بخش اول (پیش‌بینی سیلاب) بیشتر مرتبط با شاخص‌های دینامیک (پویا) سیلاب و عدم قطعیت‌های مربوط به آن‌ها است. این در حالی است که بخش دوم معمولاً به مشخصه‌های استاتیک مرتبط با پدیده سیلاب شامل مشخصه‌های منطقه‌ای و تأثیر آن‌ها در میزان خطرپذیری سیلاب بازمی‌گردد. با توجه به مواردی که مطرح شد، تحقیق حاضر مرتبط با بخش اخیر است؛ به گونه‌ای که با توجه به مطالعات پیشین انجام‌شده در زمینه مدیریت سیلاب و بررسی نتایج آن‌ها، به ارزیابی آسیب‌پذیری سیلاب در محدوده حوضه آبریز شهری تهران، با تکیه بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و انجام تحلیل‌های مکانی پرداخته شده است. با توجه به موارد مطرح‌شده، دستاوردهای این تحقیق را می‌توان به صورت مشخّص در موارد زیر خلاصه نمود:

- توسعه مدل شبکه عصبی به عنوان گزینه‌ای به منظور صحت‌سنجی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی
- توسعه یک ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سیلاب در محدوده حوضه آبریز شهری تهران
- توسعه جعبه ابزار قابل اجرا در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی به منظور اجرای فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی برای ارزیابی آسیب‌پذیری سیلاب در محدوده حوضه آبریز شهری تهران

۲- محدوده مورد مطالعه

در این تحقیق، حوضه شهری تهران به عنوان محدوده مورد مطالعه درنظر گرفته شده است (شکل (۱)). محدوده مطالعاتی حوضه آبریز تهران از شمال توسط دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز، از جنوب به دشت ورامین و ارتفاعات کهریزک، از شرق به حوضه آبریز رودخانه سرخه‌حصار و کوه‌های بی‌بی شهربانو و از غرب به حوضه رودخانه کن محدود می‌گردد. به طور کلی، شبکه آب‌های سطحی محدوده تهران بزرگ از سه سیستم تشکیل شده است: ۱-آبراهه‌ها و مسیل‌های منتهی به جنوب شرق تهران، ۲-آبراهه‌ها و مسیل‌های منتهی به جنوب غرب تهران و ۳-انهار و کانال‌های محدوده مرکزی و جنوب تهران بزرگ.

[1] Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution



شکل (۱): محدوده مطالعاتی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی تهران

۳- مواد و روش‌ها

۳- ۱- روش‌شناسی

روش انجام کار در این تحقیق به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. در بخش اول نقشه پتانسیل تولید رواناب برای محدوده مورد مطالعه بر اساس مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و با استفاده از جعبه‌ابزار توسعه داده شده تهیه می‌شود. در بخش دوم نیز با استفاده از ایجاد قابلیت مدلسازی مکانی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی و ارائه الگوریتم مربوطه، به صحت‌سنجی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته خواهد شد.

به منظور درنظر گرفتن تغییرات مکانی معیارهای مختلف در سطح حوضه و ارائه ابزار مناسبی که امکان تحلیل‌های مکانی را فراهم نماید، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است. از آن‌جایی که فرایند تصمیم‌گیری با استفاده از GIS انجام می‌شود، از این‌رو این روش با عنوان تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی مطرح می‌شود. همچنین به منظور انجام تحلیل‌های چندمعیاره در محیط GIS از برنامه‌نویسی در محیط ویژوال بیسیک[1] به عنوان واسط استفاده شده است. در حقیقت، واسط کاربر برای تصمیم‌گیر، یک سامانه پشتیبان تصمیم به حساب می‌آید که بیانگر تمام سازوکارهایی است که به واسطه آن فرمان‌ها، تقاضاها و داده‌ها در یک محیط پشتیبانی تصمیم‌گیری وارد شده و همچنین اشاره بر تمام روش‌هایی دارد که بر پایه آن‌ها نتایج و اطلاعات به صورت خروجی از سامانه شکل می‌گیرند. الگوریتم انجام تحقیق بر اساس موارد زیر در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل (۲): الگوریتم مدیریت سیلاب شهری با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی

- جمع‌آوری اطلاعات و انجام تجزیه و تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها
- تعیین معیارهای مناسب برای انجام فرایند تصمیم‌گیری
- استانداردسازی نقشه‌های معیار در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)
- استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (فرایند تحلیل سلسله مراتبی) برای تعیین وزن نسبی هر یک از نقشه‌های معیار
- استفاده از روش ترکیب خطی وزنی برای تولید نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب
- توسعه مدل شبکه عصبی برای صحت‌سنجی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی

لازم به ذکر است که عبارت «نقشه معیار» بیانگر همان معیارهای تصمیم‌گیری در ادبیات روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با عنوان نقشه معیار مطرح می‌شود. به عبارت دیگر، تغییرات مکانی معیارها در نقشه‌های معیار نیز در نظر گرفته می‌شوند.

۳- ۲- معیارهای ارزیابی

معیارهای ارزیابی به منظور تهیه نقشه پتانسیل تولید رواناب به سه دسته اصلی شامل معیارهای آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی تقسیم شدند. همچنین هر کدام از معیارهای اصلی خود به زیرمعیارهای دیگری تقسیم‌بندی شده‌اند که توصیف آن‌ها در ادامه آمده است. مشخصات اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

داده‌های مورد استفاده برای تولید اطلاعات مکانی	محل أخذ داده‌ها	فرمت اطلاعات دریافتی
نقشه توپوگرافی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	.dwg
نقشه کاربری اراضی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	.dwg
نقشه زمین‌شناسی	شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس	.dwg
سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی	شرکت مدیریت منابع آب	.xls

*اطلاعات دریافتی به فرمت dwg. بعد از رقومی سازی به فرمت شیپ فایل برای تولید لایه‌های اطلاعاتی تبدیل شدند.

معیار آسیب‌پذیری شامل سه دسته معیار کاربری اراضی شهری، معیار فاصله از کانال‌ها و مسیل‌های شهری و معیار تراکم شبکه کانال‌ها و زهکش‌ها، معیار هیدرولیکی شامل دو دسته معیار ارتفاع و شیب، و معیار اثرات محیطی نیز به دو دسته معیار زمین‌شناسی (ژئولوژی) و سطح ایستابی تقسیم‌بندی شدند. در تحقیقی که توسط فوا و مینووا (۲۰۰۵) در خصوص مسئله برنامه‌ریزی حفاظت از مناطق جنگلی انجام شده است، معیار حفاظت از آب و خاک به عنوان یکی از معیارهای اصلی در تحقیق ایشان لحاظ شده است؛ به نحوی که یکی از زیرمعیارهای مربوط به حفاظت از آب و خاک، معیار مدیریت سیلاب بوده که برای آن عواملی نظیر شیب، بارش سالیانه، عمق خاک، ژئولوژی و توپوگرافی به عنوان زیرمعیار درنظر گرفته شده است [۲۰]. همان‌طور که در بخش‌های قبل

[1] Visual Basic

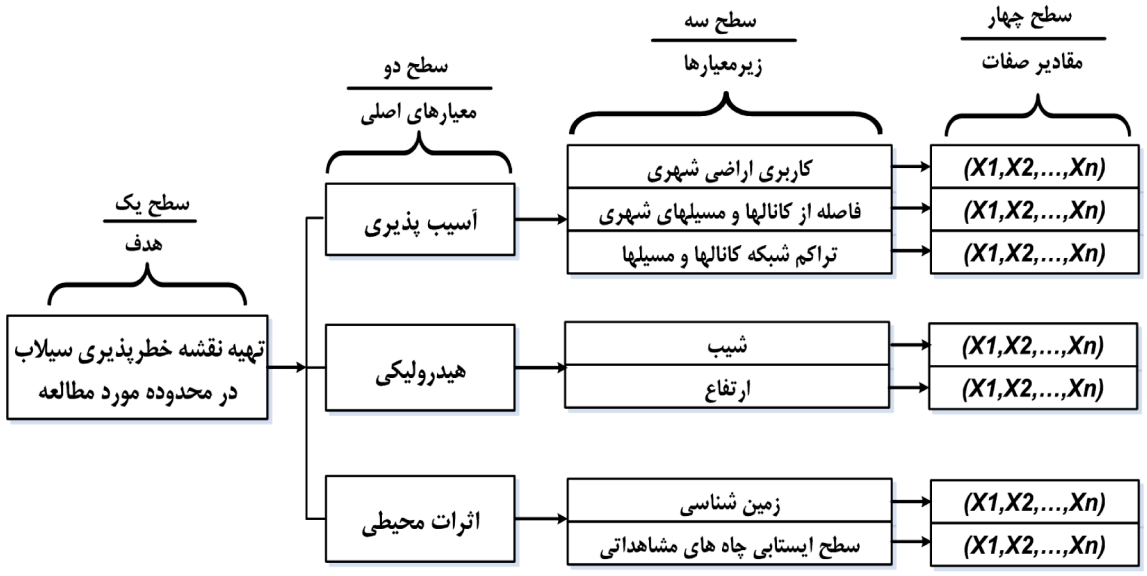
نیز اشاره شد، در این تحقیق معیارهای مرتبط با مسئله کنترل سیلاب بر اساس بررسی مطالعات انجام‌شده قبلی و همچنین کمیت و کیفیت اطلاعات موجود صورت گرفته است که در صورت دسترسی به اطلاعات دقیق‌تر نظیر خصوصیات خاک در محدوده حوضه آبریز شهری تهران می‌توان به نتایج دقیق‌تری نیز دست یافت. همچنین بر اساس مطالب ارائه‌شده در مقدمه، تأکید اصلی این تحقیق بر جنبه آسیب‌پذیری سیلاب است که دربردارنده مشخصه‌های استاتیک مرتبط با پدیده سیلاب بوده و به همین دلیل نیز از معیارهای بالا برای انجام ارزیابی‌ها استفاده شده است. در خصوص عوامل شیب و ارتفاع باید اشاره شود که این معیارها به منظور درنظر گرفتن مسائل طراحی با عنوان معیار هیدرولیکی لحاظ شدند. لازم به ذکر است که سایر خصوصیات هیدرولیکی جریان مانند عوامل دبی، سرعت، عمق و غیره، می‌توانند برای تعیین مسیرهای مناسب برای جمع‌آوری رواناب‌های شهری مورد استفاده قرار گیرند.

لازم به ذکر است که به منظور انجام تحلیل‌های مکانی، تمامی نقشه‌های معیار باید به فرمت اطلاعات رستری تبدیل شوند. بنابراین، هر یک از زیرمعیارهای تصمیم‌گیری با توجه به میزان تأثیر آن‌ها در تولید نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب در محدوده مورد مطالعه، به کلاس‌های مختلف خطرپذیری تقسیم شدند. کلاسه‌بندی معیارهای اصلی و زیرمعیارهای مربوطه به این صورت است که کلاس‌های به سمت اعداد پایین‌تر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر در میزان پتانسیل سیل‌خیزی و کلاس‌های به سمت اعداد بالاتر نشان‌دهنده تأثیر کمتری در میزان پتانسیل سیل‌خیزی هستند. بر این اساس، نقشه معیار کاربری اراضی شهری در محدوده مورد مطالعه به ۵ کلاس شامل خیابان، تجاری–بازرگانی، صنعتی، مسکونی و فضای باز تقسیم‌بندی شد. نقشه معیار فاصله از کانال‌ها به ۷ کلاس، نقشه معیار تراکم شبکه کانال‌ها و زهکش‌ها به ۶ کلاس، نقشه‌های معیار ارتفاع و شیب هر کدام به ۹ کلاس، نقشه معیار زمین‌شناسی به ۵ کلاس و در نهایت نیز نقشه معیار سطح ایستایی چاه‌های مشاهداتی به ۶ کلاس خطرپذیری تقسیم‌بندی شده است. در خصوص تقسیم‌بندی معیار کاربری اراضی شهری به کلاس‌های مختلف، باید اشاره شود که این تقسیم‌بندی توسط محققان دیگری مانند فرناندز و لاتز (۲۰۰۹) نیز انجام گرفته است [۲۱]. همچنین نقشه‌های معیار فاصله از کانال‌ها و مسیل‌ها، نقشه معیار شیب و ارتفاع بر اساس وسعت محدوده مطالعاتی به کلاس‌های فوق تقسیم شدند. برای نمونه، در مورد معیار شیب باید اشاره شود که با توجه به این‌که در حدود ۹۰ درصد از محدوده مطالعاتی در محدوده شیب کمتر از ۱۰ درصد واقع شده است، اکثر کلاس‌های معیار شیب در محدوده شیب ۱۰ درصد تقسیم‌بندی شدند. در خصوص معیار زمین‌شناسی باید اشاره نمود که ساختار زمین‌شناسی شهر تهران به چهار بخش اصلی طبقه‌بندی شده است. این طبقات شامل سازند آبرفتی هزاردره (آبرفت‌های A)، سازنده آبرفتی ناهمگن شمال تهران (آبرفت‌های Bn) و سیلت‌های رسی کهریزک (آبرفت‌های Bs) (منظور از حروف n و s به ترتیب بیانگر شمال و جنوب تهران است)، سازنده آبرفتی تهران (آبرفت‌های C) و آبرفت‌های کنونی (آبرفت‌های D) هستند. به این ترتیب، کلاس‌های زمین‌شناسی شامل ساختارهای A و R و C و $D1$ و $D2$ و Bn و Bs بودند و کلاسه‌بندی لایه زمین‌شناسی نیز بر اساس میزان نفوذپذیری هر یک از آن‌ها صورت گرفته است.

۳- ۳- فرایند تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی[1] یکی از کارآمدترین روش‌های تصمیم‌گیری است که اولین بار توسط توماس ال ساتی مطرح شد [۲۲]. این روش، بر اساس مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد. مدلسازی با استفاده از این

[1] Analytic Hierarchy Process



شکل (۳): سلسله مراتبی مدیریت سیلاب شهری

روش شامل گام‌های زیر است: ۱-ساختن یک ساختار سلسله مراتبی برای مسئله، ۲-تعیین ماتریس‌های مقایسه زوجی، محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها و ۳-بررسی سازگاری سیستم. مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسه‌های زوجی بر اساس پیشنهاد ساعتی در جدول (۲) نشان داده شده است [۱۳]. در شکل (۳) ساختار سلسله مراتبی مدیریت سیلاب شهری نشان داده شده و همانگونه که مشاهده می‌شود، سطح اول مربوط به هدف، سطح دوم مربوط به معیارهای اصلی، سطح سوم مربوط به زیرمعیارها و در سطح چهارم کلاس‌های هر یک از زیرمعیارها واقع می‌شوند.

جدول (۲): مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی

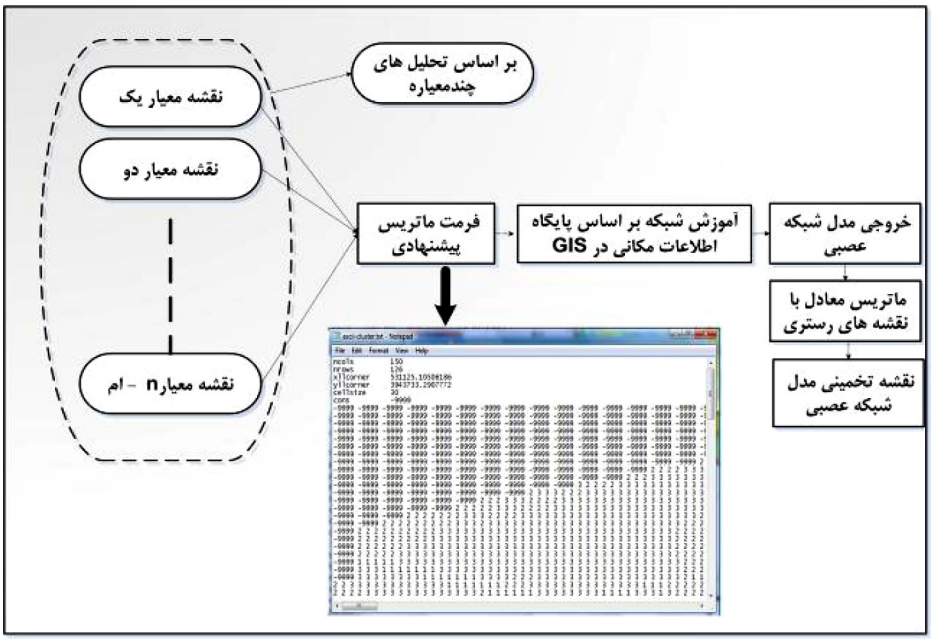
ترجیحات (قضاوت شفاهی)	مقدار عددی
کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر	۹
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی	۷
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی	۵
کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر	۳
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۲، ۴، ۶ و ۸

۳- ٤- ارزیابی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با ایجاد قابلیت مدلسازی مکانی شبکه عصبی مصنوعی

در این بخش از تحقیق، به ارزیابی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با استفاده از ایجاد قابلیت مدلسازی مکانی توسط شبکه‌های عصبی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم دسترسی به نقشه رخدادهای سیلابی در محدوده مورد مطالعه، از شبکه‌های عصبی برای ارزیابی نقشه خروجی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی استفاده شده است. یک شبکه عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از نورون‌ها است که با قرار گرفتن در لایه‌های مختلف، معماری خاصی را بر مبنای ارتباط بین نورون‌ها در لایه‌های مختلف تشکیل می‌دهد. نورون یک واحد ریاضی یا یک دستگاه غیرخطی است. در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود نیز یک سیستم پیچیده و غیرخطی خواهد بود [۲۳] تاکنون شبکه‌های عصبی به منظور انجام پیش‌بینی‌های نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در مدلسازی مکانی با شبکه‌های عصبی، ورودی‌ها و خروجی‌های مدل به صورت داده‌های رستری هستند. یکی از مشکلاتی که در مسئله مدلسازی مکانی شبکه عصبی با آن مواجه شدیم، عدم وجود خروجی‌های مشاهداتی به صورت لایه‌های رستری بوده که برای رفع این مشکل، از تلفیق مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با شبکه عصبی استفاده شده است. به این صورت که خروجی‌های مشاهداتی شبکه عصبی، از خروجی‌های مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی حاصل می‌شوند. در حقیقت از مدل شبکه عصبی به منظور گزینه‌ای برای انجام فرایند وزن‌دهی در مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی استفاده شده است.

۳- ٥- فرایند مدلسازی مکانی شبکه عصبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

در شکل (۴)، فرایند مدلسازی مکانی شبکه عصبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارائه شده است. اولین مرحله برای استفاده از مدل شبکه عصبی در محیط GIS، آموزش شبکه بر اساس اطلاعات موجود در پایگاه اطلاعات مکانی در GIS است. ابتدا داده‌های



شکل (۴): فرایند مدلسازی مکانی شبکه عصبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

ورودی (نقشه‌های معیار تصمیم‌گیری) بر اساس تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به عنوان ورودی به شبکه عصبی درنظر گرفته شده و سپس بر اساس آموزش شبکه، نقشه‌های خروجی شبکه عصبی تولید می‌شوند. با توجه به این‌که نقشه‌های رستری ورودی به مدل شبکه عصبی باید به صورت یک ماتریس کامل به عنوان ورودی به مدل شبکه عصبی معرفی شوند. به همین دلیل به منظور تبدیل لایه رستری ورودی به ماتریس معادل با آن، از مؤلفه «remove constant» در مدل شبکه عصبی استفاده شد. باید اشاره شود که با علم به این موضوع، نقشه رستری تولید شده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) که به صورت یک محدوده نامنظم است، با درنظر گرفتن مقادیر ثابت برای سلول‌های خارج از محدوده مورد مطالعه، به ماتریس معادل با آن تبدیل می‌شود که این مقادیر ثابت، تأثیری در نتایج نهایی مدلسازی با شبکه عصبی نخواهند داشت.

به منظور مدلسازی مکانی با شبکه‌های عصبی، اطلاعات ورودی به شبکه که همان نقشه‌های معیار هستند، به فرمت اطلاعات اسکی (ASCII) تبدیل می‌شوند. لازم به ذکر است با توجه به بالا بودن حجم اطلاعات براساس ماتریس تولید شده از کل محدوده مورد مطالعه که به صورت یک ماتریس با ابعاد ۹۶۲×۱۱۲۵ است، برای کاهش تعداد وروردی‌های شبکه عصبی مصنوعی از تکنیک خوشه‌بندی[1] به منظور انجام تحلیل‌های بعدی استفاده شده است. برای خوشه‌بندی داده‌ها، از روش نزدیک‌ترین همسایه بهره گرفته شد. در این روش، نشان دسته‌ای به عنوان نماینده مجموع داده‌ها انتخاب می‌شود که کمترین فاصله اقلیدسی را از مجموعه داده‌های دسته خود دارد. بنابراین ضمن کاهش ابعاد ورودی، کمترین خطا به دلیل جایگزینی مجموعه داده‌ها با یک نماینده (نشان دسته) حاصل می‌شود. در این قسمت، با توجه به خصوصیات مناطق مختلف از نظر معیارهای آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی، خوشه مورد نظر انتخاب شده است. فایل اسکی معادل با نقشه‌های معیار، شامل اطلاعاتی بوده که در ادامه آمده است. فرمت فایل اسکی تولید شده نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. علائم موجود در فایل مربوطه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- xxx: ارزش پیکسل‌های هر یک از نقشه‌های معیار
- CONS: ارزش پیکسل‌ها در نقشه‌های معیار فاقد اطلاعات مکانی
- ncols: تعداد ستون‌های ماتریس
- nrows: تعداد ردیف‌های ماتریس
- XLLCORNER و YLLCORNER: موقعیت مکانی نقشه‌های رستری
- CELLSIZE: دقت پیکسل‌های نقشه‌های معیار
- row 1: ارزش پیکسل‌های ردیف اول ماتریس معادل با نقشه‌های رستری

[1] Clustering Method

```
NCOLS xxx
NROWS xxx
XLLCORNER xxx
YLLCORNER xxx
CELLSIZE xxx
CONS xxx
row 1
row 2
.
.
row n
```

شکل (۵): فرمت فایل اسکی تولید شده معادل با نقشه‌های رستری

- row n: ارزش پیکسل‌های ردیف n-ام ماتریس معادل با نقشه‌های رستری

٤- نتایج و بحث

٤- ١- محاسبه وزن معیارهای تصمیم‌گیری به منظور تهیه نقشه خطرپذیری سیلاب

بعد از تعیین ساختار سلسله مراتبی تحقیق، وزن معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) محاسبه می‌شود. به این منظور، مقادیر ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از جدول نه‌گانه ساعتی تعیین می‌گردد. نتایج مربوط به محاسبات ماتریس مقایسه زوجی در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار نرخ ناسازگاری[2] (IR) نیز برای ماتریس‌های مقایسه زوجی به دست آمده که نشان‌دهنده سازگاری نتایج است. در صورتی‌که نرخ نهایی ناسازگاری ماتریس‌ها از حد آستانه (۰/۱) کمتر باشد، نیازی به تجدید نظر در قضاوت‌ها نبوده و اوزان محاسباتی بر روی ورودی‌ها (یعنی نقشه‌های کلاسه‌بندی‌شده) اعمال می‌شود [۲۲].

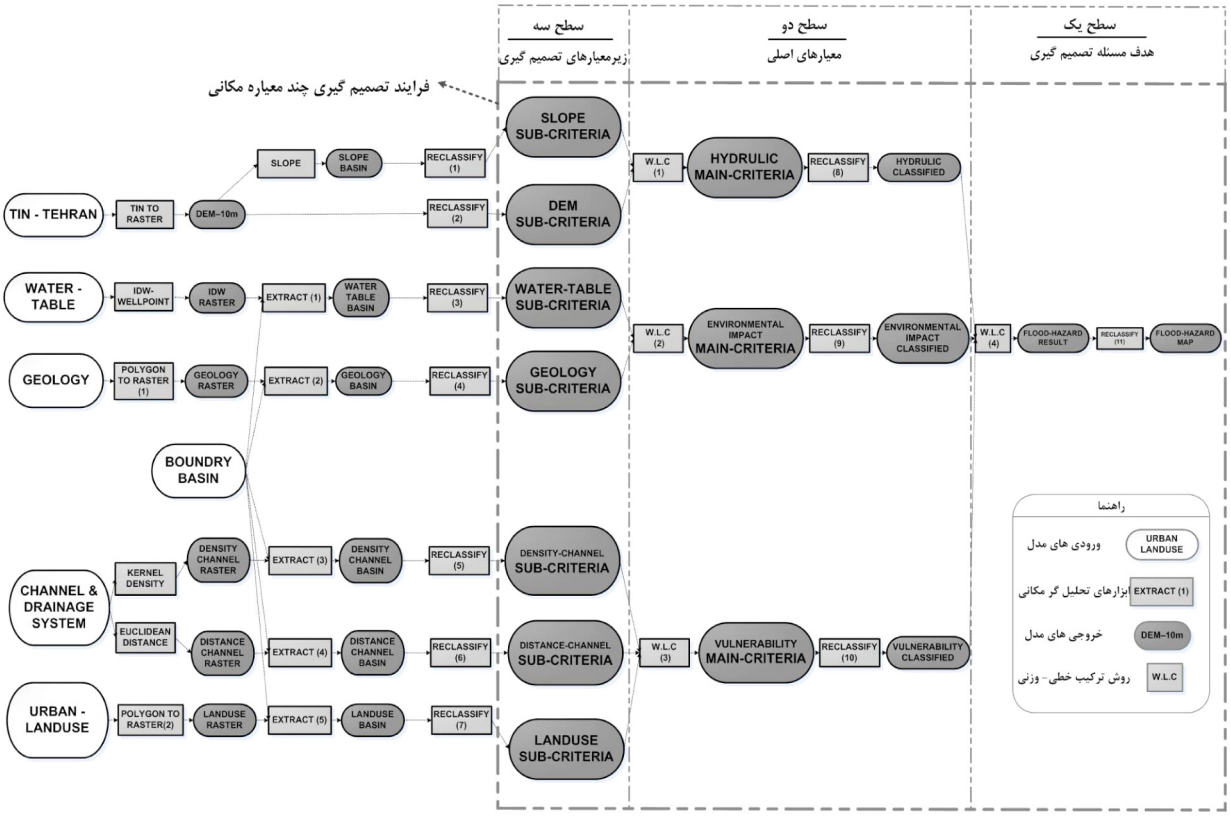
٤- ٢- تولید نقشه‌های معیار و نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب

به منظور تهیه نقشه‌های معیار و نقشه نهایی پتانسیل تولید رواناب، از یک جعبه ابزار[3] توسعه داده شده در محیط نرم‌افزار Arc Gis 9.3 استفاده شده است. در مدل تهیه‌شده، تمامی اطلاعات، متغیرهای ورودی، پردازش‌های لازم بر روی این متغیرها، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره انتخابی (فرایند تحلیل سلسله مراتبی) که شامل تولید معیارهای اصلی اعم از معیارهای آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی و همچنین زیرمعیارهای مربوط به آن‌ها و وزن‌دهی آن‌ها بوده، گنجانده شده است (شکل (۶)). لازم به ذکر است که جعبه‌ابزار تهیه‌شده در قالب یک برنامه الحاقی در محیط نرم افزار Arc Gis 9.3 که بر مبنای یکی از

[2] Inconsistency Ratio
[3] Tool Box

جدول (۳): کلاس‌های مناسبت معیارها، زیرمعیارها و وزن‌های مربوطه به منظور مدیریت سیلاب شهری

معیارهای اصلی	وزن	IR	زیرمعیار	وزن	IR	کلاس‌های زیرمعیار	وزن	IR	وزن نهایی
آسیب‌پذیری	۰/۶۳۵		کاربری اراضی شهری	۰/۵۷۱	۰/۰۰۱	خیابان	۰/۴۳۹	۰/۰۴	۰/۱۵۹
						تجاری-بازرگانی	۰/۲۸۹		۰/۱۰۵
						صنعتی	۰/۱۴۹		۰/۰۵۴
						مسکونی	۰/۰۷۴		۰/۰۲۷
						فضای باز	۰/۰۴۹		۰/۰۱۸
			فاصله از کانال‌ها و زهکش‌های شهری	۰/۲۸۶		۱۰۰-صفر	۰/۳۵۳	۰/۰۳	۰/۰۶۴
						۱۰۰-۲۰۰	۰/۲۳۹		۰/۰۴۳
						۲۰۰-۳۰۰	۰/۱۵۸		۰/۰۲۹
						۳۰۰-۴۰۰	۰/۱۰۴		۰/۰۱۹
						۴۰۰-۵۰۰	۰/۰۶۷		۰/۰۱۲
						۵۰۰-۱۰۰۰	۰/۰۴۹		۰/۰۰۹
						>۱۰۰۰	۰/۰۳		۰/۰۰۵
			تراکم شبکه کانال‌ها و زهکش‌های شهری	۰/۱۴۳		۰/۶۴-صفر	۰/۴۲۸	۰/۰۷	۰/۰۳۹
						۰/۶۴-۱/۳	۰/۲۵۵		۰/۰۲۳
						۱/۳-۱/۹۳	۰/۱۵		۰/۰۱۴
						۱/۹۳-۲/۵۷	۰/۰۸۸		۰/۰۰۸
						۲/۵۷-۳/۲۲	۰/۰۴۷		۰/۰۰۴
						۳/۲۲-۳/۸۶	۰/۰۳۳		۰/۰۰۳
هیدرولیکی	۰/۲۸۷	۰/۰۹	ارتفاع	۰/۵	صفر	<۱۱۰۰	۰/۲۷۳	۰/۰۱	۰/۰۳۹
						۱۱۰۰-۱۲۰۰	۰/۲۰۳		۰/۰۲۹
						۱۲۰۰-۱۳۰۰	۰/۱۵۲		۰/۰۲۲
						۱۳۰۰-۱۴۰۰	۰/۱۱۲		۰/۰۱۶
						۱۴۰۰-۱۵۰۰	۰/۰۸۲		۰/۰۱۲
						۱۵۰۰-۱۶۰۰	۰/۰۵۹		۰/۰۰۸
						۱۶۰۰-۱۷۰۰	۰/۰۷۶		۰/۰۱۱
						۱۷۰۰-۱۸۰۰	۰/۰۴۳		۰/۰۰۶
						>۱۸۰۰	۰/۰۳۳		۰/۰۰۵
			شیب	۰/۵		<۲٪	۰/۳۱۲	۰/۰۳	۰/۰۴۵
						۲-۵٪	۰/۲۲۲		۰/۰۳۲
						۵-۸٪	۰/۱۵۵		۰/۰۲۲
						۸-۱۰٪	۰/۱۰۸		۰/۰۱۵
						۱۰-۱۲٪	۰/۰۷۴		۰/۰۱۱
						۱۲-۱۵٪	۰/۰۵۱		۰/۰۰۷
						۱۵-۲۰٪	۰/۰۳۵		۰/۰۰۵
						۲۰-۳۰٪	۰/۰۲۵		۰/۰۰۴
						>۳۰٪	۰/۰۱۸		۰/۰۰۳
اثرات محیطی	۰/۰۷۸		زمین‌شناسی	۰/۶۴۳	صفر	A	۰/۴۷۳	۰/۰۶	۰/۰۲۴
						Bs,R	۰/۲۶۳		۰/۰۱۳
						D1	۰/۱۴۴		۰/۰۰۷
						D2	۰/۰۷۲		۰/۰۰۴
						Bn,C	۰/۰۴۸		۰/۰۰۲
			سطح ایستابی	۰/۳۵۷		<۱۲	۰/۴۳۴	۰/۲۶	۰/۰۱۲
						۱۲-۱۵	۰/۲۸۱		۰/۰۰۸
						۱۵-۲۰	۰/۱۵۱		۰/۰۰۴
						۲۰-۲۵	۰/۰۶۳		۰/۰۰۲
						۲۵-۳۰	۰/۰۴۲		۰/۰۰۱
						>۳۰	۰/۰۳		۰/۰۰۱



شکل (۶): دیاگرام مدل پیشنهادی مدیریت سیلاب شهری

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (فرایند تحلیل سلسله مراتبی) استوار بوده، قابل اجرا است. همچنین فرایند تحلیل سلسله مراتبی به صورت یک فرمان در نرم‌افزار GIS قابل اجرا بوده و نحوه اجرای برنامه فوق به این ترتیب است که ابتدا لایه‌های برداری[1] ورودی توسط برنامه خوانده شده و بعد از انجام پردازش‌های لازم بر روی آن‌ها به فرمت اطلاعات رستری تبدیل می‌شوند. در گام بعدی، ساختار سلسله مراتبی با توجه به هدف مسئله شکل گرفته و در مرحله بعد نیز وزن معیارهای تصمیم‌گیری بر اساس ماتریس مقایسه زوجی محاسبه می‌شوند. در نهایت و در گام آخر برنامه، نقشه خروجی بعد از کلاسه‌بندی تولید می‌شود. با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی[2] و نسبت‌دادن مقایر وزن نهایی بر اساس جدول (۳) به متغیرهای ورودی که به لایه‌های رستری تبدیل شده‌اند، نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب حاصل می‌شود. با توجه به رابطه (۱) میزان مناسبت برای هر محدوده محاسبه می‌شود:

$$F_i = \sum_{j=1}^{n} w_j . x_{ij} \qquad (۱)$$

- Fi: شاخص مرتبط با میزان سیل‌خیزی محدوده i
- w_j: وزن نسبی معیار j $(\sum w_j = ۱)$
- X_{ij}: مقادیر استاندارد شده محدوده i تحت معیار j
- n: تعداد کل معیارها

لازم به ذکر است که ابعاد سلول رسترهای خروجی در تمام مراحل برابر ۳۰ متر درنظر گرفته شده است. به منظور تهیه نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب، معیارهای اصلی آسیب‌پذیری (V)، هیدرولیکی (H) و اثرات محیطی (EI) با استفاده از رابطه‌های (۲) تا (۴) تولید می‌شوند.

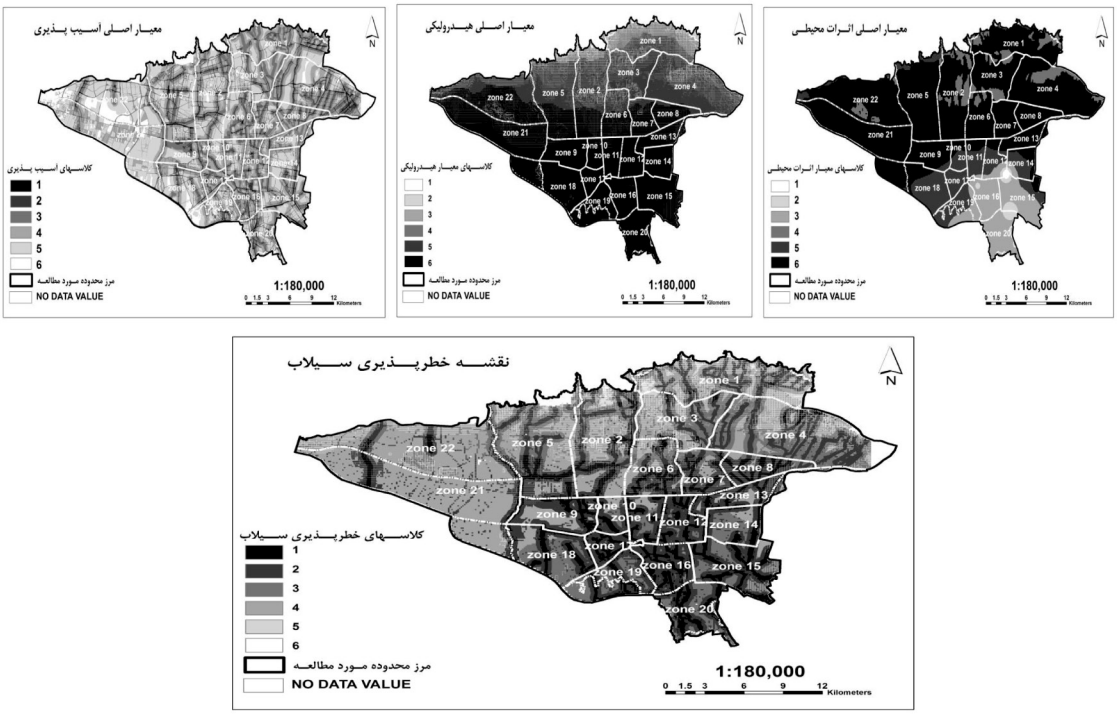
$$\begin{aligned} &\text{Vu ln erability} - \text{Grid} = \text{Grid} - \\ &\text{landuse} \times 0.571 + \text{Grid} - \\ &\text{dis tan cechannel} \times 0.286 \\ &+\text{Grid} - \text{densitychannel} \times 0.143 \end{aligned} \qquad (۲)$$

$$\begin{aligned} &\text{Hydrulic} - \text{Grid} = \text{Grid} - \text{dem} \\ &\times 0.5 + \text{Grid} - \text{slope} \times 0.5 \end{aligned} \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned} &\text{Environmental Im pact} - \text{Grid} = \\ &\text{Grid} - \text{geo log y} \times 0.643 + \text{Grid} \\ &-\text{watertable} \times 0.357 \end{aligned} \qquad (۴)$$

در این روابط، Hydrulic-Grid، Vulnerability-Grid و Invironmental-Grid به ترتیب نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی هستند که با اعمال وزن زیرمعیارهای مربوطه تولید شده‌اند. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب نیز با توجه به رابطه (۵) تولید می‌شود.

[1] Vector Layers
[2] Weighted Linear Combination Method

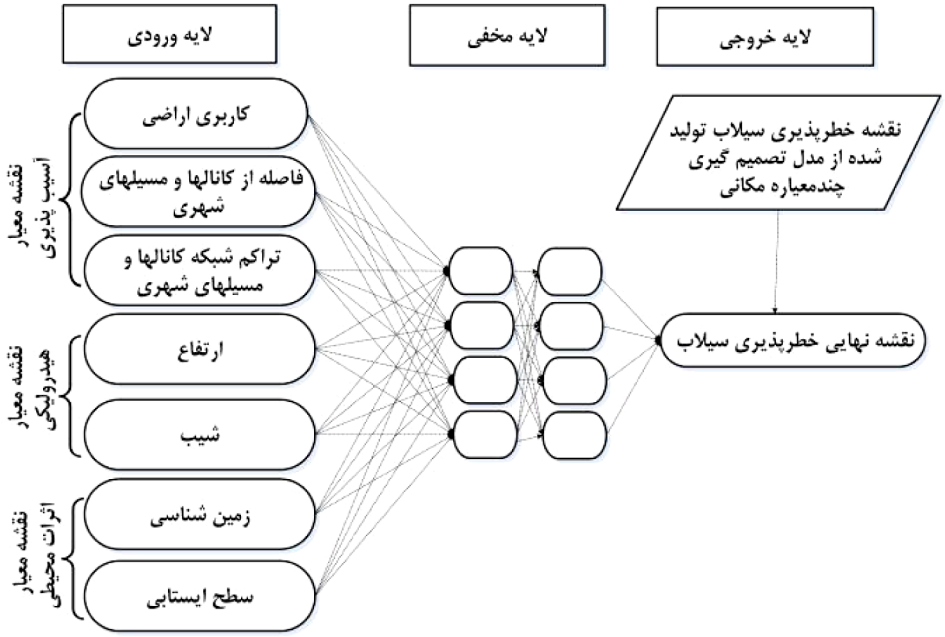


شکل (۷): نقشه خطرپذیری سیلاب در محدوده مورد مطالعه

$$F=[V\times(\sum_{i}\left(W_{V_1}\times W_{V_{i1}}\right)+\sum_{i}\left(W_{V_2}\times W_{V_{i2}}\right)+\sum_{i}\left(W_{V_3}\times W_{V_{i3}}\right))]+[H\times\left(\sum_{i}\left(W_{H_1}\times W_{H_{i1}}\right)+\sum_{i}\left(W_{H_2}\times W_{H_{i2}}\right)\right)]+\left[EI\times\left(\sum_{i}\left(W_{EI_1}\times W_{EI_{i1}}\right)+\sum_{i}\left(W_{EI_2}\times W_{EI_{i2}}\right)\right)\right] \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، F شاخص مربوط به نقشه خروجی (خطرپذیری سیلاب) است. همچنین V معیار اصلی آسیب‌پذیری و W_{V1} و W_{V2} و W_{V3} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای کاربری اراضی، فاصله از کانال‌ها و زهکش‌ها و تراکم شبکه کانال‌ها هستند. W_{Vi1} و W_{Vi2} و W_{Vi3} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیرمعیارهای آسیب‌پذیری است. شاخص H معیار اصلی هیدرولیکی W_{H1} و W_{H2} و W_{H3} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای ارتفاع و شیب، W_{Hi1} و W_{Hi2} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیرمعیارهای هیدرولیکی هستند. شاخص EI بیانگر معیار اصلی اثرات محیطی، W_{EI1} و W_{EI2} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای ژئولوژی و سطح آب زیرزمینی و W_{EIi1} و W_{EIi2} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیر معیارهای اثرات محیطی هستند. نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی و همچنین نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب با توجه به تحلیل‌های چندمعیاره در شکل (۷) نشان داده شده است.

به طور کلی، در مورد کلاسه‌بندی معیارهای مورد استفاده در این تحقیق باید اشاره شود که کلاس‌های به سمت عدد یک نشان‌دهنده تأثیر بیشتری در میزان پتانسیل سیل‌خیزی و کلاس‌های به سمت اعداد بالاتر بیانگر تأثیر کمتری در میزان پتانسیل سیل‌خیزی هستند. لازم به ذکر است که این منطق در مورد همه نقشه‌های معیار برقرار است. همچنین نحوه استاندارد کردن نقشه‌های معیار به این ترتیب است که در ابتدا هر یک از نقشه‌های معیار تصمیم‌گیری بر اساس اطلاعات خام اولیه و پس از انجام پردازش‌های لازم بر روی این نقشه‌ها تولید می‌شوند. در ادامه و با توجه به کلاس‌های هر یک از نقشه‌های معیار و تأثیر آن‌ها در میزان پتانسیل تولید رواناب، کلاسه‌بندی هر یک از این معیارها صورت می‌گیرد. برای نمونه، در مورد استاندارد کردن نقشه معیار کاربری اراضی شهری باید اشاره شود که برای کاربری‌های مختلف شهری که در تخمین میزان رواناب و دبی پیک مؤثر هستند، نحوه استاندارد کردن به این صورت است که با توجه به تأثیر هر یک از کلاس‌های نقشه معیار کاربری اراضی شهری در میزان تولید رواناب براساس درجه نفوذپذیری، هر یک از کلاس‌های نقشه معیار بین مقادیر یک الی پنج استاندارد می‌شوند. به این ترتیب که کلاس‌های به سمت اعداد پایین‌تر (یعنی عدد یک) نشان‌دهنده تأثیر بیشتری در میزان پتانسیل تولید رواناب و کلاس‌های به سمت اعداد بالاتر (یعنی عدد پنج) بیانگر تأثیر کمتری در میزان پتانسیل تولید رواناب هستند. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب (شکل (۷)) به شش کلاس مختلف از نظر خطرپذیری تقسیم‌بندی شده است. کلاس‌های یک، دو، سه، چهار و پنج به ترتیب نشان‌دهنده خطرپذیری بسیار زیاد، متوسط تا زیاد، متوسط، کم، بسیار کم و در نهایت کلاس شش بیانگر پایین‌ترین میزان خطرپذیری است.



شکل (۸): ساختار شبکه عصبی تحقیق

بر این اساس، در حدود ۶ درصد از محدوده مورد مطالعه در کلاس خطرپذیری یک، حدود ۴۳ درصد در کلاس‌های دو و سه، ۴۲ درصد در کلاس چهار و در حدود ۹ درصد هم در کلاس‌های خطرپذیری پنج و شش واقع می‌شوند. این نقشه نشان می‌دهد که مناطق جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه از درجه خطرپذیری بالایی برخوردارند. این در حالی است که این مناطق در محدوده زمین‌های پست (با ارتفاع کم) و شیب کمتر از دو درصد واقع شده‌اند. همچنین شبکه کانال‌های جمع‌آوری رواناب در این مناطق از سیستم‌های نگهداری ضعیفی برخوردارند و در مقابل نیز مناطق غربی درجه خطرپذیری پایینی را دارا هستند.

٤- ۳- صحت‌سنجی[1] مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی

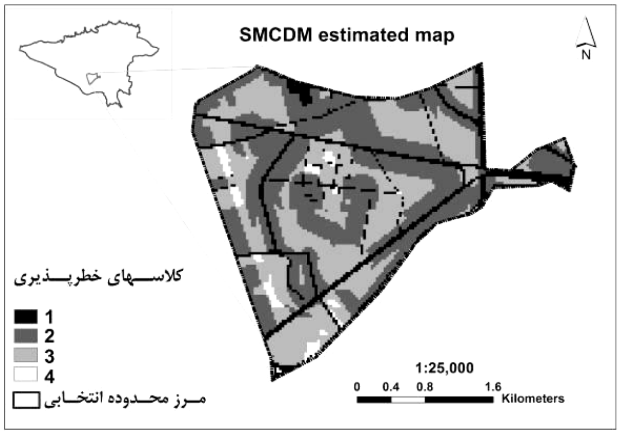
مؤلفه‌های اصلی طراحی در شبکه‌های عصبی شامل تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نورون‌ها در هر لایه و تابع پردازش نورون است. شبکه مذکور شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و دو لایه مخفی است. تعداد مناسب نورون‌های لایه مخفی برای شبکه پیشخور[2] با روش سعی و خطا و با تغییر تعداد نورون‌ها تعیین می‌شود. بر این اساس، تعداد ۷ نورون در لایه ورودی، ۴ نورون در هر یک از دو لایه مخفی و یک نورون در لایه خروجی درنظر گرفته شد. در شکل (۸) ساختار شبکه عصبی در این بخش از تحقیق نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نقشه‌های معیار کاربری اراضی، فاصله از کانال‌ها و مسیل‌ها، تراکم شبکه کانال‌ها، ارتفاع، شیب، ژئولوژی و سطح آب زیرزمینی به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی و نقشه خطرپذیری سیلاب تولید شده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، به عنوان خروجی شبکه عصبی درنظر گرفته شدند.

به منظور آموزش شبکه عصبی حداقل تعداد داده‌های لازم باید بیشتر از $30*N_i*(N_i+1)$ باشد که N_i بیانگر تعداد متغیرهای ورودی است [۲۴]. همان‌طور که اشاره شد، به دلیل بزرگ‌بودن ابعاد ماتریس معادل با کل محدوده مورد مطالعه (که یک ماتریس با ابعاد ۱۱۲۵×۹۶۲ است)، از روش خوشه‌بندی استفاده می‌شود. خوشه انتخاب‌شده به صورت یک لایه رستری بوده که ماتریس معادل آن به ابعاد ۱۵۰×۱۲۶ است. بعد از آموزش شبکه عصبی با استفاده از خروجی مشاهداتی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، به منظور آزمودن شبکه از یک نقشه آسیب‌پذیری به ازای تغییر وزن زیرمعیارهای آن در ترکیب با نقشه‌های معیار هیدرولیکی و اثرات محیطی استفاده شد. در مرحله آخر، بر اساس مقادیر تخمین‌زده‌شده توسط مدل شبکه عصبی و تبدیل آن به فایل اسکی معادل با فرمت اطلاعات رستری (شبکه‌ای)، نقشه تخمینی حاصل از مدل شبکه عصبی تولید می‌شود.

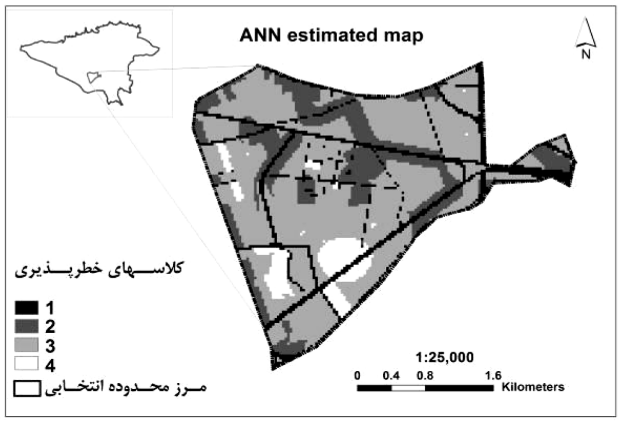
در شکل‌های (۹) و (۱۰)، نقشه پتانسیل سیل‌خیزی تولید شده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و نقشه تخمینی تولید شده از مدل شبکه عصبی برای خوشه انتخابی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نقشه خروجی از مدل شبکه عصبی دربردارنده اطلاعات مربوط به لایه‌های ورودی در قالب اطلاعات شبکه‌ای[3] است. در حقیقت مدل شبکه عصبی به عنوان یک تابع هم‌پوشانی یا واسط برای مدلسازی مکانی در GIS عمل می‌کند. شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده همبستگی قابل‌قبولی در سلول‌های مربوط به خوشه انتخابی به غیر از بخش‌های (سلول‌ها) محدودی واقع در مناطق مرکزی و جنوبی این محدوده است. این مسئله یعنی همبستگی قابل‌قبول بین نقشه پتانسیل سیل‌خیزی تولید

[1] Validation
[2] Feed-Forward
[3] Grid

شده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و نقشه تخمینی تولید شده از مدل شبکه عصبی، با محاسبه مقادیر معیارهای کارایی محقق شده است (جدول (۴)).



شکل (۹): نقشه پتانسیل سیل‌خیزی تولید شده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی برای خوشه انتخابی



شکل (۱۰): نقشه تخمینی مدل شبکه عصبی برای خوشه انتخابی

جدول (۴): مقادیر معیارهای کارایی برای مراحل مختلف آموزش، صحت‌سنجی و تست

معیارهای کارایی	CORR	RMSE	VE (درصد)
آموزش	۰/۸۷	۰/۱۹۰	۰/۳۸
صحت‌سنجی	۰/۸۲	۰/۲۳۱	۰/۳۳
تست	۰/۷۶	۰/۲۷۶	۰/۳۲

به این منظور، از شاخص‌های کارایی ضریب همبستگی ($CORR$)، ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) و شاخص درصد خطای پیش‌بینی ($VE\%$) بین مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده، استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که بهترین پیش‌بینی‌ها با توجه به حداقل مقادیر $RMSE$ و $VE\%$ و حداکثر $CORR$، در هر سه قسمت آموزش، صحت‌سنجی و آزمون حاصل می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای اصلاح زیرساخت‌های جمع‌آوری رواناب در حوضه‌های شهری مورد استفاده طراحان و تصمیم‌گیرندگان در این زمینه قرار گیرد. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب به شش کلاس مختلف از نظر خطرپذیری تقسیم‌بندی شد. کلاس‌های یک، دو، سه، چهار و پنج به ترتیب نشان‌دهنده خطرپذیری بسیار زیاد، متوسط تا زیاد، متوسط، کم، بسیار کم و در نهایت کلاس شش بیانگر پایین‌ترین میزان خطرپذیری است. بر این اساس، در حدود ۶ درصد از محدوده مورد مطالعه در کلاس خطرپذیری یک، حدود ۴۳ درصد در کلاس‌های دو و سه، ۴۲ درصد در کلاس چهار و در حدود ۹ درصد در کلاس‌های خطرپذیری پنج و شش واقع می‌شوند. این نقشه نشان می‌دهد که مناطقی که در نزدیکی سیستم‌های اصلی جمع‌آوری رواناب مطرح هستند، در معرض خطرپذیری قرار دارند. از جمله ویژگی‌های مناطقی که در محدوده با ریسک خطرپذیری بالا واقع می‌شوند، می‌توان به تجمع کانال‌ها، توپوگرافی پست و شیب ملایم (کمتر از ۲ درصد) در این نواحی اشاره نمود.

در ادامه به منظور ارزیابی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با ارائه الگوریتم مربوطه، از قابلیت مدلسازی مکانی با شبکه‌های عصبی استفاده شد. نقشه تخمینی تولید شده از مدل شبکه عصبی نشان داد که همبستگی بالایی بین هر یک از نقشه‌های معیار با نقشه نهایی پتانسیل سیل‌خیزی برقرار است.

با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان عنوان کرد که کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزاری توانمند در تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب با دقت بالا مطرح است. همچنین تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های هوشمندی مانند مدل شبکه عصبی می‌تواند به عنوان یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری در مسائل پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که مدل تهیه‌شده باید در مطالعات مرحله اول مسائل مربوط به کنترل سیلاب در حوضه‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های با جزئیات بیشتر نیاز به اطلاعات دقیق‌تری از بارش و دبی‌های پیک در محدوده مطالعاتی دارند. با توجه به این‌که یکی از اصول اولیه مدیریت، اطلاع از اولویت‌های مدیریتی است، از این‌رو این الگو و نتایج حاصل از آن می‌تواند راهکاری مناسب برای اعمال مدیریت سیلاب در حوضه‌های شهری باشد.

٦- فهرست علائم

CELL_SIZE: دقت پیکسل‌های نقشه‌های معیار

CONS: ارزش پیکسل‌ها در نقشه‌های معیار فاقد اطلاعات مکانی

EI: معیار اصلی اثرات محیطی

F_i: شاخص مرتبط با میزان سیل‌خیزی محدوده i

Grid-dem: نقشه معیار ارتفاعی

Grid-density channel: نقشه معیار تراکم شبکه کانال‌ها و مسیل‌ها

Grid-distance channel: نقشه معیار فاصله از کانال‌ها و مسیل‌های شهری

Grid-geology: نقشه معیار ژئولوژی

Grid-Landuse: نقشه معیار کاربری اراضی

Grid-slope: نقشه معیار شیب

Grid-water table: نقشه معیار فاصله از سطح ایستایی

H: معیار اصلی هیدرولیکی

Hydrulic-Grid: نقشه معیار هیدرولیکی

Invironmental-Impact-Grid: نقشه معیار اثرات محیطی

n: تعداد کل معیارها

ncols: تعداد ستون‌های ماتریس

nrows: تعداد ردیف‌های ماتریس

row 1: ارزش پیکسل‌های ردیف اول ماتریس معادل با نقشه‌های رستری

Vulnerability-Grid: نقشه معیار آسیب‌پذیری

W_{EI1}: وزن معیار ژئولوژی

W_{EI2}: وزن معیار سطح آب زیرزمینی

W_{EIi1} : وزن کلاس‌های معیار ژئولوژی

W_{EIi2}: وزن کلاس‌های معیار سطح آب زیرزمینی

W_{H1}: وزن معیار ارتفاع

W_{H2}: وزن معیار شیب

W_{Hi1}: وزن کلاس‌های معیار ارتفاع

W_{Hi2}: وزن کلاس‌های معیار شیب

w_j: وزن نسبی معیار j

W_{v1}: وزن معیار کاربری اراضی

W_{v2}: وزن معیار فاصله از کانال‌ها و زهکش‌ها

W_{v3}: وزن معیار تراکم شبکه کانال‌ها

W_{vi1}: وزن کلاس‌های معیار کاربری اراضی

W_{vi2}: وزن کلاس‌های معیار فاصله از کانال‌ها و زهکش‌ها

W_{vi3}: وزن کلاس‌های معیار تراکم شبکه کانال‌ها

X_{ij}: مقادیر استاندارد شده محدوده i تحت معیار j

XLLCORNER: موقعیت مکانی نقشه‌های رستری

xxx: ارزش پیکسل‌های هر یک از نقشه‌های معیار

YLLCORNER: موقعیت مکانی نقشه‌های رستری

۷- مراجع

[1] Alcantara-Ayala, I.; "Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries," *J. Geomorphology*, Vol. 47, pp. 107–124, 2002.

[2] Bellal., M.; Sillen, X. and Zeck, Y.; "Coupling GIS with a Distributed Hydrological Model for Studying the Effect of Various Urban Planning Options on Rainfall-Runoff Relationship in Urbanized Watersheds," *Proc. Vienna Conference*, Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, pp. 99–106, 1996.

[3] Gumbo, B.; Munayamba, N.; Sithol, G. and Savenije, H. G.; "Coupling of Digital Elevation Model and Rainfall-Runoff Model in Storm Drainage Network Design," *J. Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 755–764, 2002.

[4] Cadier, E.; "Small Watershed Hydrology in Semi-Arid North Eastern Brazil Basin Topography and Transposition of Annual Runoff Data," *J. Hydrology*, Vol. 182, pp. 117–141, 1996.

[5] Sanders, B. F.; Pau, J. C. and Jaffe, D. A.; "Passive and Active Control of Diversions to an Off–Line Reservoir for Flood Storage Reduction," *J. Adv. Water Resour*, Vol. 29, pp. 861–871, 2006.

[6] Scholz, M.; "Classification Methodology for Sustainable Flood Retention Basins," *J. Landscape and Urban Planning*, Vol. 81, pp. 246–256, 2007.

[7] Macleod, C. J. A.; Scholefield, D. and Haygarth, P. M.; "Integration for Sustainable Catchment Management," *J. Science of the Total Environment*, Vol. 373, pp. 591–602, 2007.

[8] Asgharpour, M. J.; "Multi-Criteria Decision Making," *Tehran University Press*, 6th eds, 2004.

[9] Abrishamchi, A.; Ebrahimian, A.; Tajirishi, M. and Marino, M.; "Application of Multi Criteria Decision Making to Urban Water Supply," *J. Water Res. Planning and Management*, ASCE, Vol. 131, pp. 326–335, 2005.

[10] Simonovic, S. P. and Verma, R.; "A New Methodology for Water Resources Multi–Criteria Decision Making under Uncertainty," *J. Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33, pp. 322–329, 2008.

[11] Afshar, A.; Marino, M.; Saadatpour, M. and Afshar, A.; "Fuzzy TOPSIS Multi-Criteria Decision Analysis Applied to Karun Reservoirs system," *J. Water Resour Manage*, Vol. 25, pp. 545–563, 2010.

[12] Chang, N. B.; Parvathinathan, G. and Breeden, J. B.; "Combining GIS with Fuzzy Multi Criteria Decision Making for Landfill Siting in a Fast-Growing Urban Region," *J. Environmental Management*, Vol. 87, pp. 139–153, 2008.

[13] Malczewski, J.; "Ordered Weighted Averaging with

Fuzzy Quantifiers: GIS-Based Multicriteria Evaluation for Land-Use Suitability Analysis," *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 8, pp. 270–277, 2006.

[14] Cheng, S.; Chan, C. W. and Huang, G. H.; "An Integrated Multi–Criteria Decision Analysis and Inexact Mixed Integer Linear Programming Approach for Solid Waste Management," *J. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 16, pp. 543–554, 2003.

[15] Kao, H. P.; Wang, B.; Dong, J. and Ku, K. C.; "An Event–Driven Approach with Makespan/Cost Tradeoff Analysis for Project Portfolio Scheduling," *J. Computers in Industry*, Vol. 57, pp. 379–397, 2006.

[16] Montanari, R.; "Environmental Efficiency Analysis for Enel Thermopower Plants," *J. Cleaner Production*, Vol. 12, pp. 403–414, 2004.

[17] Srdjevic, B.; Medeiros, Y. D. P. and Faria, A. S.; "An Objective Multi-Criteria Evaluation of Water Management Scenarios," *J. Water Resources Management*, Vol. 18, pp. 35–54, 2004.

[18] Rodrigues, F.; Andrieu, H. and Creutin, J. D.; "Surface Runoff in Urban Catchments Morphological Identification of Unit Hydrograph from Urban Databanks," *J. Hydrology*, Vol. 283, pp. 146–168, 2003.

[19] Yazdandoost, F. and Bozorgy, B.; "Flood Risk Management Strategies Using Multi-Criteria Analysis," *J. ICE-Water Management*, Vol. 161, pp. 261–266, 2008.

[20] Phua, M. H. and Minowa, M.; "A GIS-Based Multi-Criteria Decision Making Approach to Forest Conservation Planning at a Landscape Scale," *J. Landscape and Urban Planning*, Vol. 71, pp. 207–222, 2005.

[21] Fernandez, D. S. and Lutz, M. A.; "Urban Flood Hazard Zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and Multicriteria Decision Analysis," *J. Engineering Geology*, Vol. 111, pp. 90–98, 2010.

[22] Saaty, T. L.; "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting," *Resource Allocation*, RWS Publication, 1996.

[23] Araghinejad, S.; Azmi, M. and Kholghi, M.; "Application of Artificial Neural Network Ensembles in Probabilistic Hydrological Forecasting," *J. Hydrology*, Vol. 407, pp. 94–104, 2011.

[24] Kavzoglu, T.; "An Investigation of the Design and Use of Feed-Forward Artificial Neural Networks in the Classification of Remotely Sensed Images," *Ph.D. Thesis*, Univ. of Nottingham, UK, 2001.