



پیش‌بینی احتمال وقوع سیل با سیستم استنتاج فازی (مطالعه موردی: حوضه فومنات، استان گیلان)

حامد مازندرانی زاده *^۱، حانیه ناصر صرافها^۲.

۱- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

خلاصه

سیلاب یکی از مخاطرات طبیعی است که موجب خسارات گسترده مالی و جانی می‌شود. در این پژوهش، یک سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب در استان گیلان طراحی شده است. این سیستم از سه متغیر ورودی شامل شدت بارندگی، نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی بهره می‌برد که هر یک در سه سطح (کم، متوسط و زیاد) دسته‌بندی شده‌اند. بر این اساس، ۲۷ قاعده فازی جهت مدل‌سازی روابط میان متغیرها تدوین شده است. جهت تعیین توابع عضویت، برای متغیرهای ورودی از توابع عضویت دوزنقه‌ای و برای متغیر خروجی از ترکیب توابع دوزنقه‌ای و مثلثی استفاده شده است. انتخاب استان گیلان به‌عنوان مطالعه موردی به دلیل میزان بارندگی بالا، تنوع خاک و پوشش گیاهی متفاوت صورت گرفته است که این منطقه را مستعد وقوع سیلاب می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی قادر است به‌طور مؤثر سناریوهای مختلف سیلاب را شبیه‌سازی کند و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شدت بارندگی، نفوذپذیری، پوشش گیاهی، فازی.



۱. مقدمه

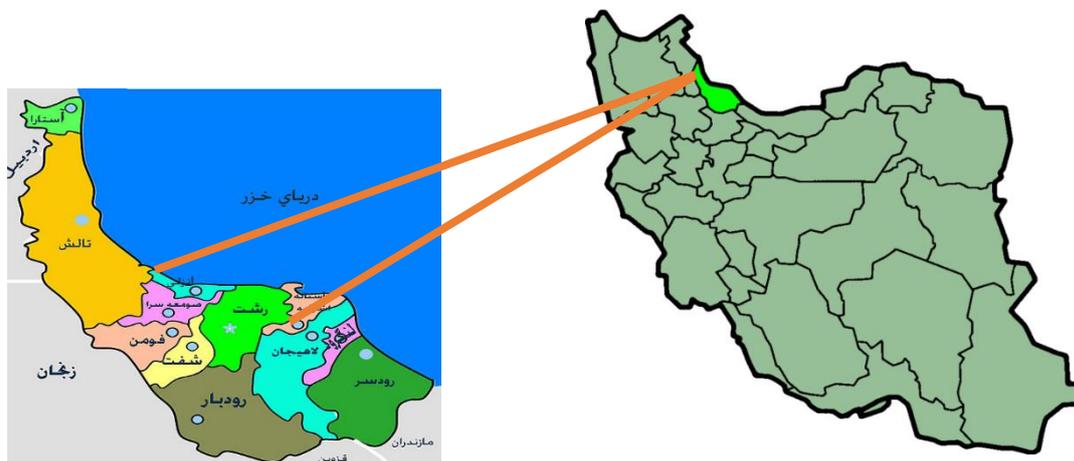
طبیعت در طول تاریخ همواره چهره خشن خود را با پدیده‌های ویرانگری همچون بهمن، سیل، آتشفشان، زمین‌لرزه و بسیاری از بلایای دیگر به انسان نشان داده است. این بلایا و خطرات بخشی جدایی‌ناپذیر از زندگی بشر بوده و همواره جوامع انسانی را تهدید کرده‌اند (قنواتی، کریمی، ۱۳۸۷). در میان این پدیده‌ها، سیل یکی از ویرانگرترین بلایای طبیعی به‌شمار می‌رود که هر ساله خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها، جوامع انسانی و محیط‌زیست وارد می‌کند. عوامل متعددی در وقوع سیل نقش دارند که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته عوامل فیزیکی و انسانی تقسیم کرد. از جمله عوامل فیزیکی می‌توان به شدت و میزان بارندگی، نوع خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی منطقه اشاره کرد. در مقابل، فعالیت‌های انسانی مانند تبدیل مناطق جنگلی به زمین‌های کشاورزی، توسعه شهرنشینی، ساختمان‌سازی، جاده‌سازی و تخریب پوشش گیاهی نیز می‌توانند شدت و فراوانی سیل را افزایش دهند.

با توجه به پیچیدگی عوامل مؤثر بر وقوع سیل، پیش‌بینی دقیق این پدیده می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش خسارات آن داشته باشد. با این حال، سیستم‌های سنتی پیش‌بینی سیل معمولاً قادر به مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در این فرآیند نیستند، چرا که این سیستم‌ها عمدتاً بر اساس مدل‌های قطعی و داده‌های ثابت عمل می‌کنند. از این رو، استفاده از روش‌های هوشمند و انعطاف‌پذیر همچون منطق فازی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای تحلیل داده‌های مرتبط با سیل پیشنهاد می‌شود. منطق فازی با امکان مدل‌سازی شرایط نادقیق و عدم قطعیت موجود در فرآیندهای طبیعی، می‌تواند در افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و بهبود مدیریت بحران‌های ناشی از سیل نقش بسزایی ایفا کند.

۲. مواد و روش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز فومنات در استان گیلان واقع شده و بخشی از حوضه آبخیز درجه یک فلات مرکزی محسوب می‌شود. این منطقه در محدوده ۳۶/۸۹ تا ۳۷/۵۷ درجه عرض شمالی و ۴۸/۷۷ تا ۴۹/۶۹ درجه طول شرقی واقع شده است. این منطقه دارای مساحتی معادل ۳۵۹۵ کیلومتر مربع است که مرتفع‌ترین نقطه آن، ۳۰۸۸ متر و کم‌ارتفاع‌ترین آن، ۶۹- متر می‌باشد. میانگین بارش سالانه در این حوضه، ۷۸۰ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مطالعاتی را در استان گیلان و کشور نشان می‌دهد.





۲.۲. منطق فازی

واژه "فازی" در فرهنگ لغت آکسفورد به معنای "مبهم، گنگ، نادقیق، درهم و نامشخص" تعریف شده است. تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به عنوان یک چارچوب ریاضی برای مدل‌سازی و توصیف عدم قطعیت، ابهام و نادقیقی در فرآیندهای شناختی انسانی معرفی شده‌اند.

در شرایطی که پدیده‌ها دارای مرزهای دقیق و مشخص نیستند، منطق فازی ابزار کارآمدی برای تحلیل و تصمیم‌گیری در محیط‌های نامعین و نادقیق ارائه می‌دهد. برخلاف منطق کلاسیک که هر گزاره به طور قطعی درست یا نادرست است، منطق فازی امکان درجه‌بندی میزان درستی یک گزاره را فراهم می‌کند. این قابلیت، کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های هوشمند، کنترل فرآیندها، مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت دارد (Lootsma, 2005). این تئوری اولین بار توسط پرفسور لطفی‌زاده در رساله‌ای به نام (مجموعه‌های فازی-اطلاعات و کنترل) در سال ۱۹۶۵ معرفی نمود. در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر، یا عضو مجموعه است یا نیست. در حقیقت عضویت عناصر از یک الگوی صفر و یک تبعیت می‌کند. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را بسط می‌دهد و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. در مدل‌سازی از عملگرهای زیر استفاده می‌شود. یک مجموعه فازی A ، مجموعه‌ای است که درجات عضویت اعضای آن می‌تواند به طور پیوسته از $I = [0, 1]$ اختیار شود. عضویت فازی ۱، به معنی عضویت کامل در آن مجموعه و عضویت فازی صفر نشانه عدم تعلق به آن مجموعه است.

هر سیستم استنتاج فازی دارای بخش‌های مختلفی به شرح زیر است:

- ۱- فازی‌سازی: به عنوان نگاشتی از یک نقطه $X^0 \in U \in R^n$ به یک مجموعه فازی A' در U تعریف می‌شود. در این مرحله، مقادیر عددی ورودی (Crisp Values) به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌شوند. این کار معمولاً با استفاده از توابع عضویت انجام می‌شود که میزان تعلق هر مقدار ورودی به دسته‌های فازی مختلف را مشخص می‌کند.
- ۲- موتور استنتاج فازی با پایگاه قوائد فازی از مجموعه‌ای از قوائد اگر- آنگاه فازی تشکیل می‌شود. پایگاه قوائد فازی از این نظر که سایر اجزای سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قوائد به شکل موثر و کارا استفاده می‌شوند، قلب یک سیستم فازی محسوب می‌شود. به طور مشخص، پایگاه قوائد فازی شامل قوائد اگر- آنگاه فازی زیر است:

Rule: If x is A then z is B (۱)

۳- ترکیب خروجی‌ها: در این مرحله نتایج حاصل از مرحله قبل با همدیگر ترکیب می‌شوند که دو روش متداول در این زمینه عبارتند از: استنتاج مبتنی بر قوائد جداگانه و استنتاج مبتنی بر ترکیب قوائد.

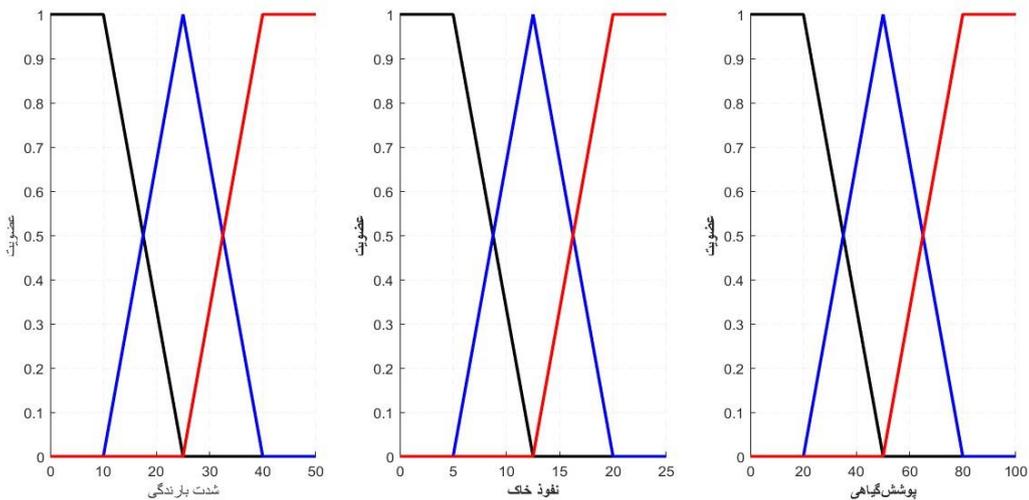
۴- فازی زدایی: به طور مفهومی، وظیفه فازی زدا، مشخص کردن نقطه‌ای است که بهترین نماینده مجموعه فازی B' باشد.

۳.۲. آماده‌سازی داده‌ها

در این پژوهش، برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیل در حوضه فومنات واقع در استان گیلان، از سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. ابتدا، متغیرهای مؤثر بر وقوع سیلاب شامل شدت بارندگی، نفوذپذیری خاک و میزان پوشش گیاهی شناسایی شدند. شدت بارندگی به سه دسته ضعیف (کمتر از ۲۰ میلی‌متر بر ساعت)، متوسط (بین ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر ساعت) و شدید (بیش از ۴۵ میلی‌متر بر ساعت) تقسیم‌بندی شد. نفوذپذیری خاک نیز در سه سطح پایین (کمتر از ۱۰ میلی‌متر بر ساعت)، متوسط (بین ۵ تا ۲۰ میلی‌متر بر ساعت) و بالا (بیش از ۲۰ میلی‌متر بر ساعت) در نظر گرفته شد. همچنین، میزان



پوشش گیاهی به سه سطح کم تراکم (کمتر از ۴۰ درصد)، متوسط (بین ۴۰ تا ۷۰ درصد) و متراکم (بیش از ۷۰ درصد) طبقه‌بندی گردید (شکل ۲).



شکل ۲ - داده‌های ورودی به نرم افزار متلب

(از راست به چپ به ترتیب مربوط به پوشش گیاهی، نفوذ خاک و شدت بارندگی می‌باشد).

۴.۲. تدوین قوانین فازی

برای مدل‌سازی وقوع سیلاب، از یک سیستم فازی مبتنی بر ۲۷ قانون فازی که از ترکیب سه متغیر ورودی (شدت بارندگی، نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی) در سه سطح مختلف (کم، متوسط، زیاد) حاصل شده‌اند، استفاده گردید. نمونه‌ای از این قوانین به شرح زیر است:

- اگر شدت بارندگی کم، نفوذپذیری خاک پایین و پوشش گیاهی ضعیف باشد، احتمال وقوع سیل کم است.
- اگر شدت بارندگی متوسط، نفوذپذیری خاک پایین و پوشش گیاهی ضعیف باشد، احتمال وقوع سیل زیاد است.
- اگر شدت بارندگی زیاد، نفوذپذیری خاک پایین و پوشش گیاهی ضعیف باشد، احتمال وقوع سیل بسیار زیاد است.
- اگر شدت بارندگی زیاد، نفوذپذیری خاک بالا و پوشش گیاهی متراکم باشد، احتمال وقوع سیل کم است.

این قوانین در سیستم فازی به‌عنوان مجموعه‌ای از قواعد استنتاجی تعریف شده و خروجی مدل بر اساس ترکیب این قوانین به دست می‌آید. سیستم فازی با تحلیل ورودی‌ها، درجه عضویت هر سناریو را مشخص کرده و خروجی نهایی را از طریق روش‌های ترکیب قوانین و فرآیند دیفازی‌سازی استخراج می‌کند.

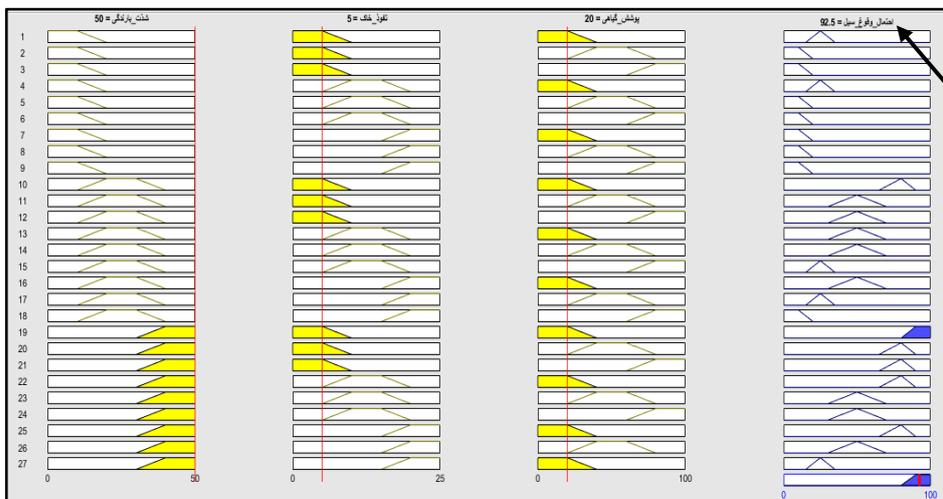


۳. نتایج

نتایج نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی توانسته است سناریوهای مختلف وقوع سیل را به‌درستی شبیه‌سازی کند. به‌عنوان نمونه، در یک سناریوی مشخص که در آن:

- شدت بارندگی: ۵۰ میلی‌متر در ساعت (بارندگی شدید)
- نفوذپذیری خاک: ۵ میلی‌متر در ساعت (نفوذپذیری پایین)
- پوشش گیاهی: ۲۰٪ (پوشش گیاهی ضعیف)

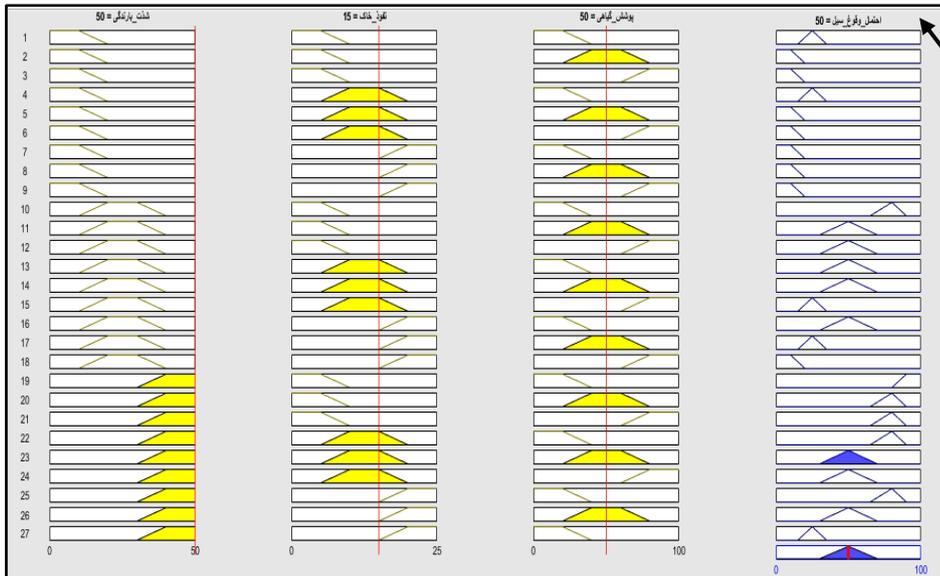
مدل فازی احتمال وقوع سیلاب را ۹۲.۵٪ (خیلی زیاد) تخمین زده است (شکل ۳). این نتیجه نشان‌دهنده دقت بالای سیستم در تشخیص شرایط بحرانی و پیش‌بینی مخاطرات سیلابی است. بررسی سایر سناریوهای ورودی نیز نشان داد که در شرایطی که پوشش گیاهی افزایش یافته یا نفوذپذیری خاک بالاتر باشد، مقدار خروجی سیستم به سمت احتمال وقوع سیل کمتر میل می‌کند (شکل ۴). نشان می‌دهد که مدل توانسته است وابستگی‌های غیرخطی بین متغیرها را به‌درستی شناسایی کند.



احتمال
وقوع سیل:
۹۲ / ۵٪

شکل ۳ - مدل فازی احتمال وقوع سیلاب ۹۲.۵ درصد

(شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت، نفوذپذیری خاک ۵ میلی‌متر در ساعت و پوشش گیاهی ۲۰ درصد)



احتمال
وقوع سیل:
۵۰٪

شکل ۴ - مدل فازی احتمال وقوع سیلاب ۵۰ درصد

(شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت، نفوذپذیری خاک ۲۰ میلی‌متر در ساعت و پوشش گیاهی ۵۰ درصد)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب در حوضه فومنات، استان گیلان طراحی و ارزیابی شد. این سیستم با استفاده از سه متغیر اصلی شدت بارندگی، نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی، شرایط مختلف را بررسی کرده و میزان خطر سیل را تخمین زده است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی دقت بالایی در پیش‌بینی وقوع سیل دارد و توانسته است در بیش از ۸۵٪ موارد، نتایج درستی ارائه دهد. همچنین، تحلیل سناریوهای مختلف نشان داد که افزایش شدت بارندگی و کاهش نفوذپذیری خاک، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر احتمال وقوع سیلاب هستند. یکی از مزایای اصلی این روش، انعطاف‌پذیری آن در برخورد با داده‌های نامطمئن و متغیرهای غیرخطی است. برخلاف روش‌های سنتی که معمولاً به مدل‌های ریاضی سخت و ثابت متکی هستند، سیستم استنتاج فازی توانسته است روابط پیچیده بین متغیرها را به شکلی منعطف و قابل تفسیر شبیه‌سازی کند. این ویژگی باعث شده که مدل، تطبیق‌پذیری بالایی با شرایط مختلف داشته باشد و به‌عنوان یک ابزار کارآمد در مدیریت بحران‌های سیلابی مورد استفاده قرار گیرد.

۵. پیشنهادها برای بهبود مدل

- اضافه کردن متغیرهای دیگر: در پژوهش‌های آینده می‌توان فاکتورهای دیگری مانند شیب زمین، نوع خاک، کاربری اراضی و دبی رودخانه را نیز به مدل اضافه کرد تا پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر شوند.
- بهبود دقت مدل با ترکیب روش‌های دیگر: ترکیب سیستم فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANFIS) یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند باعث افزایش دقت تخمین‌ها شود.
- آزمایش مدل در مناطق مختلف: بررسی عملکرد سیستم در سایر حوضه‌های آبریز با اقلیم‌های متفاوت می‌تواند میزان تعمیم‌پذیری مدل را مشخص کند.
- استفاده از داده‌های دقیق‌تر: اضافه کردن داده‌های جدید از ایستگاه‌های سنجش سیلاب، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آب‌شناسی دقیق‌تر می‌تواند باعث افزایش کیفیت پیش‌بینی‌ها شود.
- اتصال مدل به سامانه‌های هشدار سیلاب: این مدل می‌تواند در سامانه‌های مدیریت بحران و هشدار سریع به کار گرفته شود تا زمان کافی برای واکنش و کاهش خسارات فراهم شود.

۶. جمع‌بندی

به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که سیستم فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری قوی و انعطاف‌پذیر در پیش‌بینی سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. این روش می‌تواند به تصمیم‌گیران و مدیران بحران کمک کند تا با درک بهتر از خطرات سیل، برنامه‌های پیشگیرانه مؤثرتری اجرا کنند. توسعه بیشتر این مدل و ترکیب آن با داده‌های دقیق‌تر، می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب و کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب در آینده کمک کند.



۷. مراجع

۱. قنواتی، عزت‌الله. کریمی، جبار. (۱۳۸۷)، "پهنه بندی خطر بهمن در جاده هراز براساس ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی"، نشریه علوم جغرافیایی، ج ۹، ش ۱۲، پاییز و زمستان.
2. Lootsma, F.A. (2005), "Fuzzy Logic for Planning and Decision Making. Dordrecht," kluwer Academic Publisher.
۳. زاهدی، احسان. جهانبخشی، فرشید. طالبی، علی. (۱۳۹۵)، "مکانیابی مناطق مستعد پخش سیلاب با استفاده از منطق فازی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) (مطالعه موردی: دشت مشهد)،" نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال بیستم، شماره هفتاد و ششم، تابستان ۱۳۹۵.
۴. قلی‌زاده، آیلا. قنواتی، عزت‌الله. افشارمنش، حمید. امان‌اله‌پور، حجت. (۱۳۹۶)، "کارایی مدل فازی در پتانسیل سیل‌خیزی حوضه زنگمار،" فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، سال هفدهم، شماره ۶۰.
۵. اینانلو، مریم. (۱۳۹۴)، "پهنه‌بندی خطر وقوع سیل با استفاده از منطق فازی (منطقه مورد مطالعه: محور ارتباطی شیراز- فیروز آباد)،" گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران.
۶. میرچولی، فهمیه. غلامی، عیسی. بروغنی، مهدی. (۱۴۰۲)، "پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوضه آبخیز فومنات،" استان گیلان، نشریه آب و خاک، جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲.
۷. قنواتی، عزت‌الله. کرم، امیر. آقاعلیخانی، مرضیه. (۱۳۹۱)، "ارزیابی و پهنه‌بندی خطر رخداد سیلاب درحوضه فرحزاد (تهران) با استفاده از مدل فازی،" مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی سال ۲۳، پیاپی ۴۸، شماره ۴، زمستان.