

ارزیابی و عدم قطعیت آسیب پذیری شهرها ناشی از زلزله با مدل FAHP (نمونه موردی: شهر سنندج)

پیمان یاریان- کارشناس ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلام واحد ممقان، آذربایجان شرقی، ایران
محمد رضا کرمی^۱- استادیار جغرافیا و برنامه ریزی شهری، گروه علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۶/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۴

چکیده

زلزله یک تهدید جدی برای جوامع بشری محسوب می شود. علاوه بر شرایط زمین شناسی و نوع گسل، عوامل مختلف محیطی، کالبدی و اجتماعی در تشدید میزان آسیب پذیری ناشی از آن تأثیر خواهند گذاشت. کشور ایران از جمله زلزله خیزترین کشورهای دنیا به حساب می آید و تاکنون تلفات زیاد مالی و جانی متوجه بسیاری از استانها و شهرهای آن شده است. شهر سنندج نیز به عنوان مرکز استان کردستان در غرب کشور به دلیل وجود گسل های مریوان - سیرجان، زاگرس، تراکم بالای جمعیت و... (عوامل طبیعی و انسانی) دارای شرایط نامساعدی است. به همین دلیل ارزیابی خطر از جمله برنامه های مهم در مدیریت پیش از بحران به حساب می آید. در فرایند ارزیابی خطر، انتخاب فاکتورها و معیارهایی که بیشترین میزان تأثیر در تشدید یا کاهش آسیب رادارند امری مهم و تخصصی محسوب می شود. هدف این پژوهش ارزیابی آسیب پذیری شهر سنندج در برابر زلزله است که با انتخاب ۱۳ لایه از معیارهای طبیعی، کالبدی و اجتماعی و انتخاب اوزان لایه ها بر مبنای پژوهش های و منابع سابق با استفاده از نرم افزارهای ArcGIS و IDRISI اقدام به ارزیابی نقشه خطر از طریق مدل FAHP گردید. با توجه به نتایج حاصل، مدل ترکیبی Fuzzy-AHP به عنوان مدل بهینه شناخته شد؛ و خروجی به صورت نقشه و درصد آسیب پذیری هر طیف استخراج گردید. نتایج حاصل حاکی از آسیب پذیری بالا در مناطق ۱ و ۲ شهر سنندج از جمله محلات قطارچیان، گلشن، بعثت، تازه آباد، جورآباد، تپه شیخ صادق و عباس آباد و در منطقه ۳ کلکه جار، مبارک آباد، ویلاشهر و شهرک بهاران است که آسیب پذیری در مناطق جنوبی شهر ناشی از شرایط محیطی و در مناطق شمالی بیشتر تحت تأثیر ویژگی های کالبدی و اجتماعی است.

کلیدواژه ها: عدم قطعیت، ارزیابی خطر زلزله، منطق فازی- ای اچ پی (Fuzzy-AHP)، مدل سازی، شهر سنندج.

۱- مقدمه

طبق پیش‌بینی‌های به‌عمل‌آمده برآورد می‌شود در سال ۲۰۲۵ حدود ۶۵ درصد از مردم دنیا جهت سکونت به شهرها روی آورند (Fengli et al, 2005) و از جمله حوادثی که گریبان‌گیر شهرها و کاربری‌های شهری است حوادث طبیعی است (Alexander, 2002: 38). این مخاطرات می‌تواند در صورت عدم وجود برنامه و سیستم‌های تقلیل و پیشگیری به فجایعی هولناک تبدیل شوند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۶). این‌گونه از حوادث مزید بر عواقب و پیامدهای زیان‌بار مالی و تلفات انسانی وسیع، دارای عواقب و اثرات روانی برای بازماندگان از حادثه خواهد داشت (مهدوی، هزاریان، ۱۳۹۶). بلایای طبیعی همچون زلزله از جمله تهدیدات همیشگی و جدی برای انسان و سکونتگاه‌های انسانی بوده‌اند که در مناطق با لرزه‌خیزی بالا موجب به خطر افتادن حیات بشر گردیده است (محمّدی و جاوید، ۱۳۹۵). امروزه با وجود پیشرفت‌های تکنولوژیکی و افزایش دانش و توانایی انسان در کنترل بلایای طبیعی، شهرها هنوز هم با خطر زلزله مواجه هستند و از این منظر آسیب‌پذیرند (مهدوی نژاد و جوانرودی، ۱۳۹۱). به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۱ به‌عنوان مرگبارترین سانحه در جهان از آن نام‌برده شده است که کشور ایران نیز از جمله کشورهای زلزله‌خیز در دنیا است و بر اثر وقوع این حادثه ناگوار متوجه تلفات بسیار سنگین جانی و مالی در شهرهایش بوده است (کرمی و امیریان، ۱۳۹۷). در قرن بیستم ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط مختلف کره زمین روی داده که در اثر آن بیش از ۱۵۰۰۰۰۰ نفر جان خود را از دست داده‌اند. (Lantada.N et al, 2008)؛ بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از این حادثه طبیعی به‌منظور بهینه‌سازی و مدیریت شهری باهدف کاهش تلفات و خسارات در شهرهایی که بیشتر در معرض این خطر قرار دارند امری ضروری تلقی می‌گردد (Ericson, 2005). با توجه به مطالعات و شواهد موجود در این زمینه می‌توان گفت که در اغلب کشورهای در حال توسعه به دلیل عدم آمادگی و نبود برنامه‌های مؤثر پیشگیرانه، رخداد این‌گونه بلایای طبیعی موجب بروز بحران خواهد شد (Alexander, 1993). توجه به این نکته حائز اهمیت است که نمی‌توان مانع از وقوع زلزله یا هر فاجعه طبیعی شد ولی می‌توان با بالا بردن ضریب امنیت و آمادگی لازم قبل از بروز رخداد از میزان تلفات و خسارات ناشی از جلوگیری نمود (Lewis, 1981). کشور ایران در مرکز آخرین کمربند کوهزایی کره‌ی زمین قرار دارد که پوسته زمین در آن آرام نگرفته است (زمردیان، ۱۳۸۱). در ایران حدود ۸۰ درصد از تلفات جانی در اثر زلزله در آن رخ داده است که طبق آمار حدود ۱۸ درصد از زلزله‌های مخرب رخ داده در دنیا به کشور ما تعلق دارد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین بر اساس آمارهای رسمی هر ۱۰ سال یک‌بار زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۷ ریشتر و هر سال زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۶ ریشتر و ۱۰ زلزله با بزرگی ۵ ریشتر در کشور ایران روی خواهد داد (آبسالان و کنگی، ۱۳۹۳) که این امر موجب شده در طول ۲۵ سال گذشته تاکنون حدود ۶ درصد از مرگ‌ومیرهای جانی در ایران بر اثر وقوع زمین‌لرزه باشد (خاکپور و همکاران، ۱۳۹۲). مشکلات اقتصادی و اجتماعی نیز علاوه بر عوامل طبیعی باعث شده است که میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله در این کشور رشد روزافزونی داشته باشد، به‌نحوی که حدود

۳۲ درصد از حجم مساحت و حدود ۷۰ درصد از جمعیت در ایران در حوزه‌های لرزه‌خیز قرار دارند (WDL, 2004). به دلیل اینکه مراکز زمین‌لرزه موجود در ایران بسیار کم‌عمق است به همین دلیل زلزله‌های رخ داده در ایران مخرب و آسیب‌زا بوده و با توجه به طول گسل‌های فعال کشور و منطقه احتیاط آن‌ها (۲۰ کیلومتر اطراف گسل)، ۳۵ درصد از خاک ایران با خطر زمین‌لرزه مواجه است (نگارش، ۱۳۸۴) همچنین بر اساس مطالعات وزارت راه و شهرسازی در طرح کالبد ملی، ۵۰ درصد جمعیت شهرنشین کشور در پهنه‌هایی سکونت دارند که بیشترین خطر لرزه‌خیزی آن‌ها را تهدید می‌نماید شهر سنندج در زون ساختاری نسبتاً آرام سنندج سیرجان قرار دارد، ولی با توجه به عبور دو گسل معروف زاگرس جوان و گسل مریوان - سیرجان در معرض زلزله‌های اطراف نیز قرار دارد (کرمی و نیری، ۱۳۹۵) که بر پایه مطالعات قبادی و همکاران (۱۳۹۰) بزرگی زلزله ناشی از فعالیت این گسل‌ها در اطراف سنندج به ۶/۱ تا ۶/۹ در ریشتر خواهد رسید و در عمق ۱۵-۲۵ کیلومتر اتفاق خواهد افتاد. ناحیه زاگرس از جمله لرزه‌خیزترین نقاط کشور محسوب خواهد شد که بر پایه‌ی تحقیقات صورت گرفته رشته‌کوه زاگرس دارای گسل‌های زیادی است (Amiri G, 2009). ویژگی‌های اقتصادی، فرهنگی، اجتماعی و سیاسی شهری بزرگ همچون سنندج سبب می‌شود که وقوع هرگونه زمین‌لرزه در این شهر بر کل کشور اثرات منفی و جبران‌ناپذیری بگذارد، بنابراین ارزیابی میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله باوجود گسل‌های مروراید، سرتخت، پیرانشهر، دینور زاگرس لازم و ضروری است (Kaveh A, 2007) که چنین ویژگی‌هایی از لرزه‌خیز بودن بالا در این شهر حکایت می‌کند و بر مبنای تحقیقات کایوشه و متشرعی (۱۳۹۲) نواحی شرقی شهر سنندج نسبت به سایر مناطق دیگر خطرناک است. علاوه بر این قسمت‌های زیادی از شهر سنندج دارای بافت فرسوده و سکونتگاه‌های فاقد اصول ایمنی است. از دیگر تحقیقات انجام‌شده در راستای پهنه‌بندی و ارزیابی آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله می‌توان به پژوهش خالق پناه و همکاران (۱۳۹۴) با موضوع پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با استفاده از دو مدل تحلیل سلسله مراتبی و مدل تاپسیس اشاره نمود که نتایج تحقیق آن‌ها از پتانسیل بالای آسیب‌پذیری در شمال شهر سنندج اشاره دارد. ملکی (۱۳۸۵) و شهابی و همکاران (۱۳۸۹) به پهنه‌بندی خطر زلزله در استان کردستان پرداختند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد شهر سنندج در موقعیت با خطر نسبی متوسط قرار دارد. همچنین حبیبی و جوانمردی (۱۳۹۱) در پژوهشی دیگر با بهره‌گیری از مدل AHP به ارزیابی خطر هسته مرکزی سنندج پرداختند که نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آسیب‌پذیری بالا در محدوده ذکرشده است. در ایران نیز از مهم‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری شهری در برابر زلزله می‌توان به تحقیقات ولی زاده (۱۳۸۰)، فرج زاده و بصیرت (۱۳۸۵)، شیعیه و همکاران (۱۳۸۹)، قنبری و همکاران (۱۳۹۲)، کریمی و همکاران (۱۳۹۲)، ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۳۹۳)، علوی و همکاران (۱۳۹۴)، روستایی و معبودی (۱۳۹۵)، بهزاد افشار و اکبری (۱۳۹۶) و امیریان و کرمی (۱۳۹۷)، اشاره نمود که با استفاده از معیارهای طبیعی و کالبدی اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از

زلزله نموده‌اند. در مقالات و تحقیقات از مدل‌ها و متغیرهای مختلفی استفاده شده که بر اساس بررسی‌های انجام شده برای پژوهش حاضر باهدف ارزیابی آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با تأکید بر رویکرد عدم قطعیت، ۳ شاخص به همراه ۱۳ معیار در قالب شاخص‌های کالبدی، اجتماعی و طبیعی انتخاب شدند گزینش معیارها بر اساس مطالعات و پژوهش‌های سابق بوده و سعی بر آن بوده متغیرهایی که بیشترین ارتباط و تأثیر را داشته‌اند انتخاب و در مدل‌های موردنظر (FAHP - AHP) اجرا شوند (شکل شماره ۱).

۲- منطقه مورد مطالعه

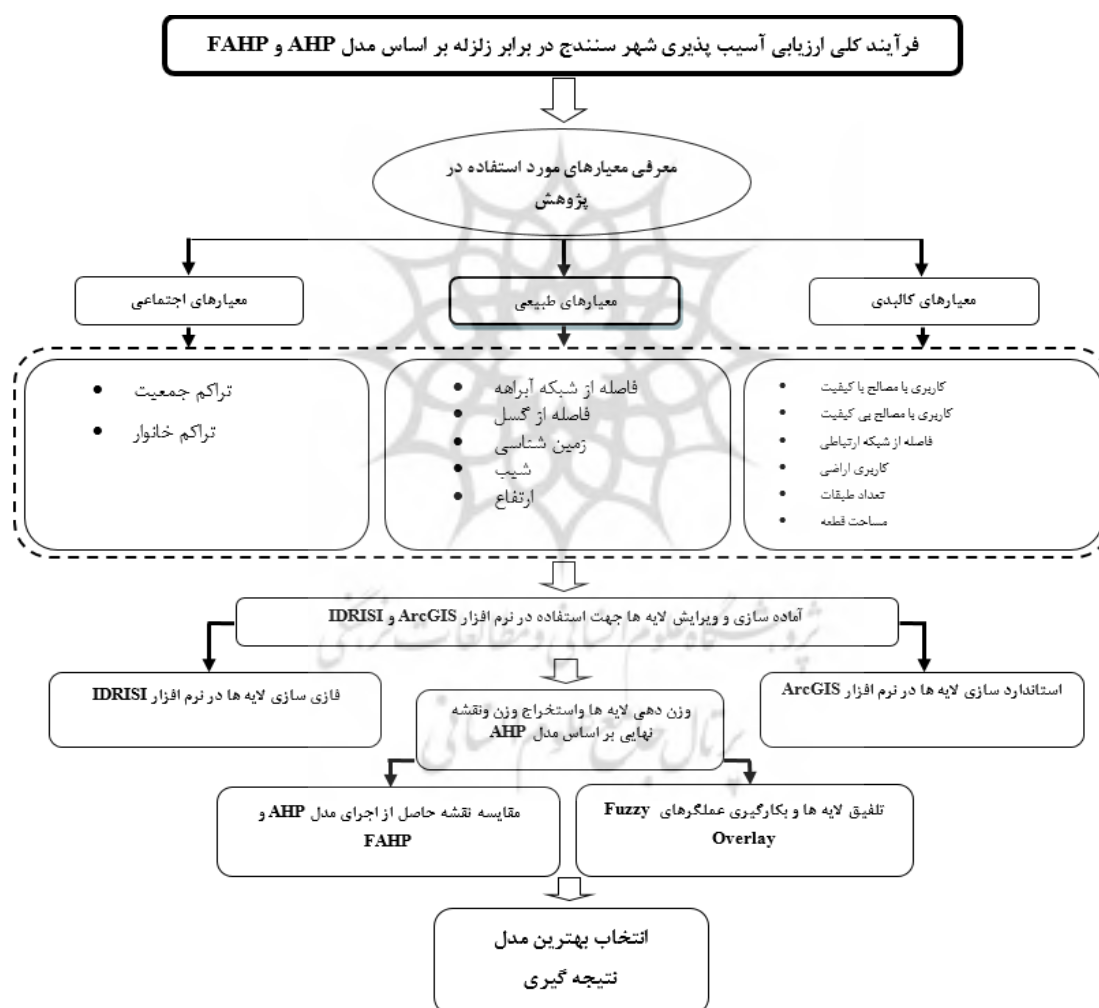
محدوده مورد مطالعه، شهر سنندج می‌باشد که مرکز استان کردستان است که در موقعیت طول ۴۴ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵ دقیقه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و در غرب ایران واقع شده است که مساحتی معادل ۲۹۰۶۷۰۴ کیلومترمربع در حدود ۱۰٫۳ درصد از وسعت استان کردستان را شامل می‌شود (نیری و کرمی، ۱۳۹۵). بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ۴۱۴۰۶۹ نفر است. این شهر دارای بافت تاریخی فرهنگی با وسعت ۱۱۲ هکتار است که همان بافت فرسوده و قدیمی شهر است. شهر سنندج از منظر ویژگی طبیعی بین کوه‌های و تپه‌های (آبیدر، کوچکه رش و توش نوذر) که از جمله جبال زاگرس هستند محصور شده است که ارتفاع تپه‌های داخل شهر باعث شده تا فقط ۸۱ درصد از محیط شهر جهت توسعه مفید باشد (انتظاری نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به نقشه گسل‌های فعال ایران تهیه شده توسط حسامی و همکاران (۱۳۸۲) بر اساس نظر پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، شهر سنندج در زون ساختاری نسبتاً آرام سنندج - سیرجان واقع شده است، اما با توجه به عبور دو گسل معروف زاگرس جوان و گسل مریوان - سیرجان در معرض زلزله‌های اطراف قرار دارد. همچنین گسل‌های (مروارید، سرتخت، پیرانشهر، دینور، صحنه، نهاوند، زاگرس، گارون و تخت سلیمان) در شعاع ۱۵۰ کیلومتری این شهر قرار دارند که بر اساس مطالعات خاجی و همکاران (۱۳۹۴) حدود ۱۲۰ زلزله با بزرگی بین ۴ الی ۷ ریشتر از سال ۱۹۰۰ الی ۲۰۱۳ در ۱۵۰ کیلومتری سنندج به وقوع پیوسته است (خاجی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۱- موقعیت شهر سنندج در تقسیمات کشوری و استانی

۳- مواد و روشها

پژوهش حاضر از بعد ماهیت، جنبه‌ی کاربردی و از بعد شیوه تحقیق به صورت ترکیبی مبتنی بر روش‌های توصیفی و کمی است که در اینجا با بهره‌گیری از دو مدل ریاضی AHP و FAHP باهدف ارزیابی آسیب‌پذیری کاربری‌های شهر سنندج مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه فرآیند برنامه‌ریزی شهری دارای سه رکن اصلی شناخت وضع موجود، تجزیه و تحلیل و تدوین برنامه است (شیعه، ۱۳۸۵) به همین دلیل با استفاده از ترکیب معیارهای مختلف با یکدیگر و انجام تجزیه و تحلیل‌های خاص و بومی ساختن آن برای منطقه مورد مطالعه بتوان نقشه پهنه‌بندی خطر را تهیه نمود.



شکل ۲- فرآیند ارزیابی آسیب پذیری شهر در برابر زلزله

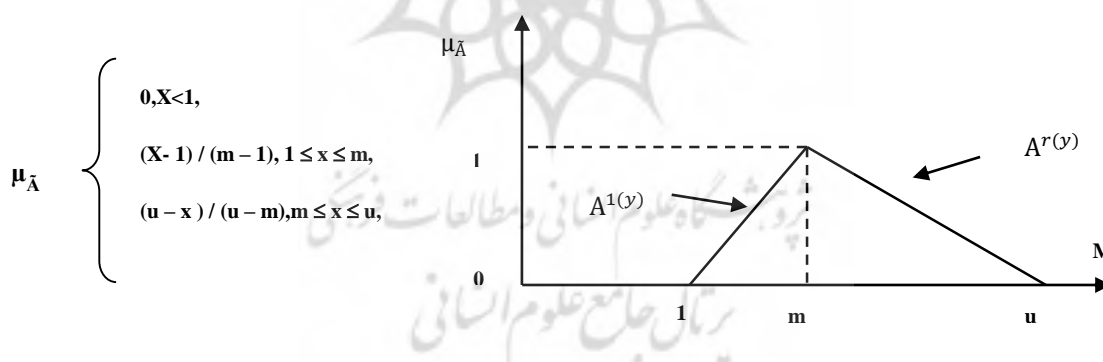
از معیارهای مورد استفاده جهت ارزیابی، معیارهای طبیعی (شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، زمین شناسی، آب‌های سطحی و زیرزمینی) می‌باشد که بیشتر محققین از اسمیت (۱۹۹۲) و نگارش (۱۳۸۲)، کرمی ونیری (۱۳۹۵)، کریمی کردآبادی و نجفی (۱۳۹۴)، شهین فر (۱۳۹۳)، جهت آسیب‌پذیری طبیعی از آن استفاده نموده‌اند. معیارهای کالبدی مورد استفاده جهت ارزیابی از جمله: کاربری اراضی، مساحت قطعه، تعداد کاربری دارای مصالح باکیفیت در هکتار، تعداد کاربری دارای مصالح بی کیفیت در هکتار، تعداد طبقات، شبکه‌های ارتباطی و... در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته که توسط، احمدیانی و همکاران (۱۳۹۴)، احدنژادروشتی و همکاران (۱۳۹۴)، روستایی و همکاران (۱۳۹۵)، نیز از آن استفاده نموده‌اند. همچنین معیارهای اجتماعی استفاده شده تراکم جمعیت و بعدخانوار می‌باشد که لی (۲۰۰۸)، قبری و همکاران (۱۳۹۳)، محمدی و همکاران (۱۳۹۵) و... نیز جهت پهنه‌بندی و ارزیابی آن را تجزیه و تحلیل نموده‌اند. روش AHP ابتدا توسط Thomas L. Saaty پیشنهاد شده است و در طول بیش از ۲۰ سال، این رویکرد به‌طور گسترده در مواردی مختلف همچون برنامه‌ریزی، جایگزینی، بهینه‌سازی، تخصیص منابع و حل منازعات و... به‌ویژه برای تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره (MCDM) مورد استفاده قرار گرفته است (Ming-Ian Lin et al, 2011)، این تکنیک تصمیم‌گیری منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسان است که مطالعه مشکلات پیچیده بر اساس اثر متقابل آن‌ها می‌باشد و به‌طور ساده‌ای آن‌ها را حل می‌کند (Rezaei.A et al, 2018). به گفته ساتی AHP یکی از روش‌های MCDM برای حل مشکلات پیچیده و غیر ساختاری با ایجاد یک سلسله‌مراتب کاربردی می‌باشد. (T.L. Saaty, 1988) مفهوم اصلی AHP این است که وزن مطلوب هر تصمیم‌گیرین را توسعه دهیم. بدین معنا که تنظیمات را می‌توان با استفاده از زبان طبیعی یا مقادیر عددی برای تعیین اهمیت هر ویژگی مشخص کرد. پس برای تعیین مقدار مطلوب، ابتدا هر دو عنصر با استفاده از یک مقیاس ۹ نقطه‌ای از اهمیت مقایسه خواهند شد (Z. Gungor et al, 2009) این روش در ارزیابی زمانی که تصمیم‌گیرنده دارای گزینه‌ها و فاکتورهای متفاوتی است روش مفیدی است (Özdağoğlu & Özdağoğlu, 2007). این مدل یک روش جبری تصمیم‌گیری با مقیاس نسبی می‌باشد که ترکیب معیارها و لایه‌های کیفی را با معیارهای کمی ممکن می‌سازد که برای تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد فاقد از هرگونه نفوذ بر روی دو معیار تمرکز نماید (معصوم زاده، تراب زاده، ۱۳۸۳: ۵). در روش AHP هرگونه تصمیم‌گیری با توجه به سلسله‌مراتب، با سطوح مختلف معیارها و جایگزینی شکل می‌گیرد سپس عناصر در سطوح مختلف به‌صورت دویه دو باهم مقایسه می‌شوند (Sadeghiravesh.M.H et al, 2014). تعیین وزن جایگزین تصمیم‌گیری از طریق مجموعه‌ای از محاسبات عددی مرحله بعدی این مدل به‌منظور تعیین اولویت هر جایگزین به‌وسیله‌ی ماتریس مقایسات دوگانه است و وزن نسبی هر عنصر باید توسط عناصر با وزن بالا ضرب شود تا وزن نهایی را برای رتبه‌بندی جایگزین کند که برای هر جایگزین نمره نهایی بر مبنای معادله زیر محاسبه خواهد شد:

$$Pr = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m W_k \cdot \dots_i (g_{ij}) \quad (1)$$

W_k یک ضریب ترجیحی برای معیار W_i می‌باشد و k ضریب ترجیح زیرمجموعه i است و g_{ij} معیار نمره مربوط به زیرمجموعه i می‌باشد (E. W. Stein et al, 2009).

محاسبه نسبت یا شاخص ناسازگاری (CR)

این محاسبه مکانیزی می‌است که به منظور در نظر گرفتن ثبات در تجزیه و تحلیل محاسبه نسبت تناقض (CR) به دست آمده از شاخص عدم تطابق تقسیم بر روی شاخص تصادفی که اگر این نسبت کمتر یا برابر 0.1 باشد سازگاری قضاوت پذیرفته می‌شود، در غیر این صورت باید قضاوت مجدداً مورد بررسی قرار گیرد (Rezaei, A et al, 2018). علی‌رغم محبوبیت‌های مدل AHP به دلیل ناتوانی در ترکیب ابهام‌های ذاتی و عدم وجود صراحت در خصوص نگاهت ادراک‌های تصمیم‌گیرندگان و محققان با مقدار و اعداد دقیق، مورد نقد می‌باشد (Deng, 1999). با مطرح شدن منطق فازی در مقابل منطق کلاسیک به عنوان ابزاری توانا برای حل مسائل و چالش‌های مربوط به سیستم‌های پیچیده، نشان داد که در مسائل مربوط به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری قابلیت بسزایی داشته باشد (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۷). نظریه مجموعه‌های فازی و منطق فازی را اولین بار پرفسور لطفی زاده (۱۹۶۵) در رساله‌ای به نام الگوریتم‌های فازی معرفی کرد. بر اساس این نظریه، یک مجموعه فازی زیرمجموعه‌ای است که میزان عضویت عناصر آن در مجموعه اصلی بین صفر و یک باشد. مقدار درجه عضویت بر اساس نظرات کارشناسی و استفاده از دانش داده‌ای تعیین می‌گردد (ابراهیمی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل ۲- تابع عضویت فازی مثلثی (Kilinceci, O et al, 2011)

اعداد فازی به‌طور مستقیم در ارزیابی کیفی تصمیم‌گیرنده استفاده خواهند شد و هر عدد فازی می‌تواند توسط نماد سمت چپ و راست مربوط به هر درجه عضویت داده شود (Sun, C. C, 2010).

$$\tilde{A} = (A^1(y), A^r(y)) = (1 + (m-1)y, u + (m-u)y), y \in [0, 1] \quad (3)$$

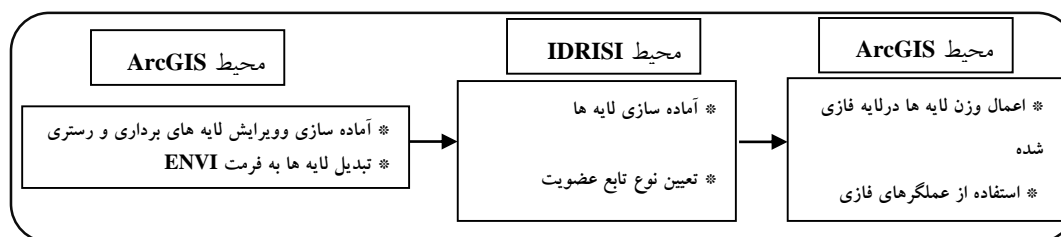
$1(y)$ و $r(y)$ به ترتیب بیانگر نماد سمت چپ و راست عدد فازی هستند.

با توجه به منابع مختلف فارسی و انگلیسی ۱۳ لایه در سه شاخص محیطی، کالبدی و اجتماعی در قالب داده‌های رستری و برداری از سازمان‌ها و ادارات رسمی و معتبر همانند شهرداری و سازمان آمار اخذ شدند. پس از ویرایش و اصلاح خطاهای احتمالی کلیه لایه‌ها به فرمت رستری در نرم‌افزار ArcGIS تبدیل شدند. بعد از آن انتخاب شیوه استانداردسازی لایه سپس بر اساس منابع و مقالات محققان و پژوهشگران، وزن هر یک از لایه‌ها اوزان ۱-۹ مدل AHP و همچنین آستانه فازی هر یک از لایه‌ها به دست آمدند؛ بنابراین مبنای اوزان و آستانه کلیه لایه‌ها مورداستفاده در این مقاله مبتنی بر مطالعات پیشین بوده است. در نهایت نتیجه و خروجی نهایی در ۵ کلاس جهت نشان دادن مقدار آسیب‌پذیری به ترتیب: آسیب‌پذیری خیلی کم، آسیب‌پذیری کم، آسیب‌پذیری متوسط، آسیب‌پذیری زیاد، آسیب‌پذیری خیلی زیاد مشخص شد؛ بنابراین پس تعریف ماهیت پژوهش، شاخص‌های مؤثر آسیب‌پذیری مشخص و از هر شاخص معیارهایی انتخاب و بر مبنای آن ماتریس تصمیم‌گیری جهت اجرای مدل AHP تشکیل شد. بعد از بی‌مقیاس‌سازی، محاسبه وزن شاخص‌ها و در نهایت پیاده‌سازی مدل‌ها صورت پذیرفت. برای بی‌مقیاس‌سازی لایه‌ها از دستور MAP Algebra در نرم‌افزار IDRISI و استفاده از روش حداکثر - حداقل استفاده شد که شامل ۲ دستور ساده زیر می‌باشد.

بزرگ‌ترین عدد پیکسل لایه / لایه (الف)

(علامت جبر ب تقسیم) / بزرگ‌ترین عدد پیکسل لایه / (لایه - ۱) (ب)

در هر دو دستور (الف و ب)، نتیجه نقش‌هایی با دامنه بین صفر و یک است. در روش الف هر قدر که ارزش پیکسل بزرگ‌تر باشد به سمت یک میل می‌کند. روش (ب) برعکس روش الف عمل می‌کند به عبارتی هر قدر ارزش پیکسل لایه رستری کوچک‌تر باشد به سمت یک میل می‌کند. در این پژوهش نزدیکی به یک کاهش آسیب‌پذیری و بالعکس نزدیکی به صفر نشانه افزایش آسیب‌پذیری است. برای مثال با افزایش فاصله از گسل آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین بایستی از فرمول روش (ب) استفاده شود و برای لایه نزدیکی به شبکه ارتباطی با کاهش فاصله از آن آسیب‌پذیری کاهش یافته بنابراین فرمول شماره (الف) بایستی استفاده شود تا همه لایه یکسان و استاندارد شوند. پس از استانداردسازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4 اقدام به تشکیل ماتریس مقایسات زوجی به روش AHP گردید و با معرفی اوزان اولیه، اوزان نهایی و نقشه AHP با استفاده از اکستنشن AHP تهیه گردید. جهت اجرای مدل FAHP از لایه‌های رستری از شیوه فازی‌سازی در محیط نرم‌افزار IDRISI از طریق دستور Fuzzy و مشخص نمودن نوع تابع عضویت و میزان افزایشی یا کاهشی هر کدام از لایه‌ها استفاده شد. سپس در نرم‌افزار ArcGIS و دستور Raster calculator هر کدام از لایه‌های فازی شده در وزن نهایی حاصل از ماتریس مقایسات زوجی مدل AHP ضرب و باهم جمع شده، سپس خروجی نهایی نقشه حاصل از اجرای مدل FAHP به دست آمد.



شکل ۳- فرآیند کلی اجرای مدل FAHP در خصوص آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله

جدول شماره ۱- معرفی لایه‌ها و اهمیت هر کدام از آنها.

شاخص	نام معیار	ویژگی و اهمیت
در اول مرتبه	فاصله از شبکه آبراهه	از عوامل تأثیرگذار و تشدیدکننده میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله هستند که هرچقدر فاصله از این شبکه‌ها بیشتر باشد آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد
	زمین‌شناسی	هراندازه کالبد زمین‌شناسی محدوده سخت‌تر باشد، توان امواج زلزله و در نتیجه میزان آسیب‌رسانی آن کم خواهد شد
	فاصله از گسل	نزدیکی به گسل موجب افزایش آسیب‌پذیری می‌شود و با دور شدن از خط گسل در هر نقطه‌ای شرایط مطلوب‌تری در خصوص کاهش خطر زلزله حاصل می‌گردد.
	ارتفاع	ارتباط با حساسیت زمین‌لرزه، ارتباط با فعالیت‌های انسانی، در ارتفاع بالا به دلیل ناپایداری خطر لرزش بیشتر می‌باشد.
در اول کالبدی	شیب	افزایش شیب موجب افزایش آسیب‌پذیری می‌شود، زلزله احتمال روانگرایی را تشدید می‌کند.
	فاصله از شبکه ارتباطی	امداد و نجات، افزایش جابجایی، فضای باز، اختلال در آن باعث اختلال در سایر زیرساخت‌ها می‌شود، ساختار سلسله‌مراتب شبکه ارتباطی
	کاربری اراضی	سازگاری اراضی، همجواری، تراکم ساختمان‌ها، جانمایی مناسب کاربری‌های حساس، برنامه‌ریزی کاربری اراضی می‌تواند موجب افزایش ایمنی در برابر زلزله شود.
	مساحت قطعه	کاهش اندازه قطعات سازه‌ها موجب افزایش جدی آسیب‌پذیری می‌شود.
در اول تراکم و تراکم خانوار	تعداد کاربری‌های دارای مصالح باکیفیت کاربری‌های دارای مصالح بی‌کیفیت	نوع مصالح از معیارهای مهم پایداری و کیفیت بنا می‌باشد، سازه با مصالح مقاوم و استاندارد موجب کاهش آسیب‌پذیری می‌شود و بالعکس.
	تعداد طبقات	افزایش تعداد طبقات احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر (کالبدی - انسانی) خواهد شد.
	تراکم جمعیت تراکم خانوار	افزایش تراکم جمعیت احتمال افزایش آسیب‌پذیری را بالا می‌برد ساختار خانوارها به دلیل گستردگی و پیچیدگی می‌توانند در میزان صدمات جانی تأثیرگذار باشد.

مأخذ: (مرکز مقابله با سوانح طبیعی ایران، ۱۳۸۰)، (Monge, et al, 2004)، (علوی و همکاران، ۱۳۹۲، ۱). (پنت و پاچاپوری، ۱۹۹۲؛ گمتزی و همکاران، ۲۰۱۰). (ایلو و همکاران، ۲۰۰۵؛ گرتیزنر و همکاران، ۲۰۰۱). (وگروسوسکی، ۲۰۱۰؛ بای و همکاران، ۲۰۱۰). (Coburn & Spence, 2003)، (فاندرحمی و همکاران، ۱۳۹۰). (Gay, 2007)، (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۲). (زیاری و همکاران، ۱۳۸۹)، (احدنزاد و همکاران، ۱۳۹۲). (بحرینی و همکاران، ۱۳۷۵). (Azizi & Akbari, 2008). (Lewis et al, 2005). (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳). (حجازی، ۱۳۹۱).

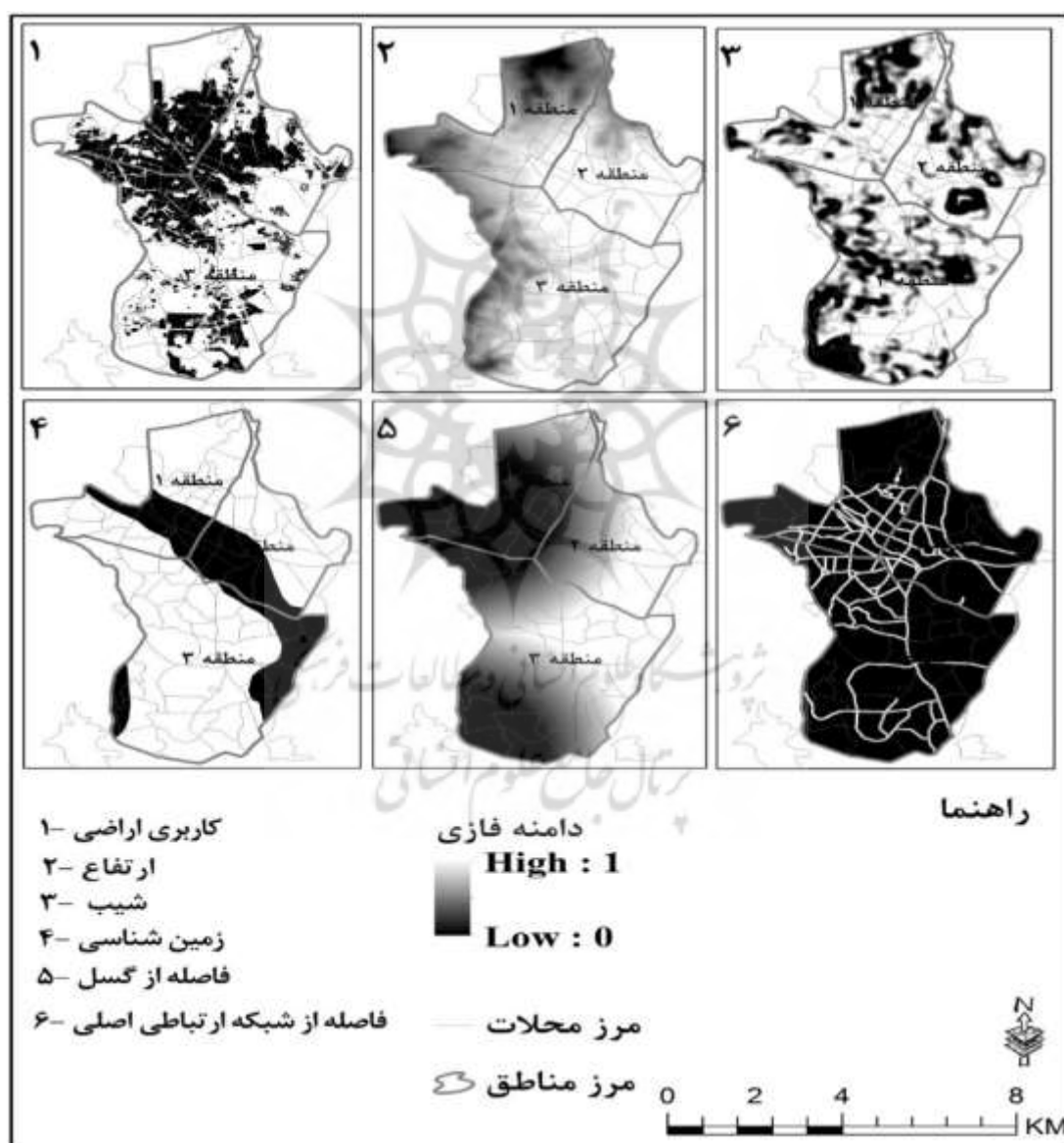
پس از استانداردسازی لایه‌ها و انتقال آن‌ها به مدل AHP علاوه بر تهیه نقشه خروجی، وزن نهایی معیارها (شکل ۵) و میزان همبستگی فضایی معیارها نسبت به مدل AHP (شکل ۶) به دست آمد. همچنین نسبت CR به دست آمده برابر با ۰,۰۰۲۱ که کمتر از ۰,۱ می‌باشد و نشان دهنده قابل قبول بودن نتیجه است.

جدول ۲- فرآیند آماده‌سازی لایه‌ها جهت تبدیل به فازی

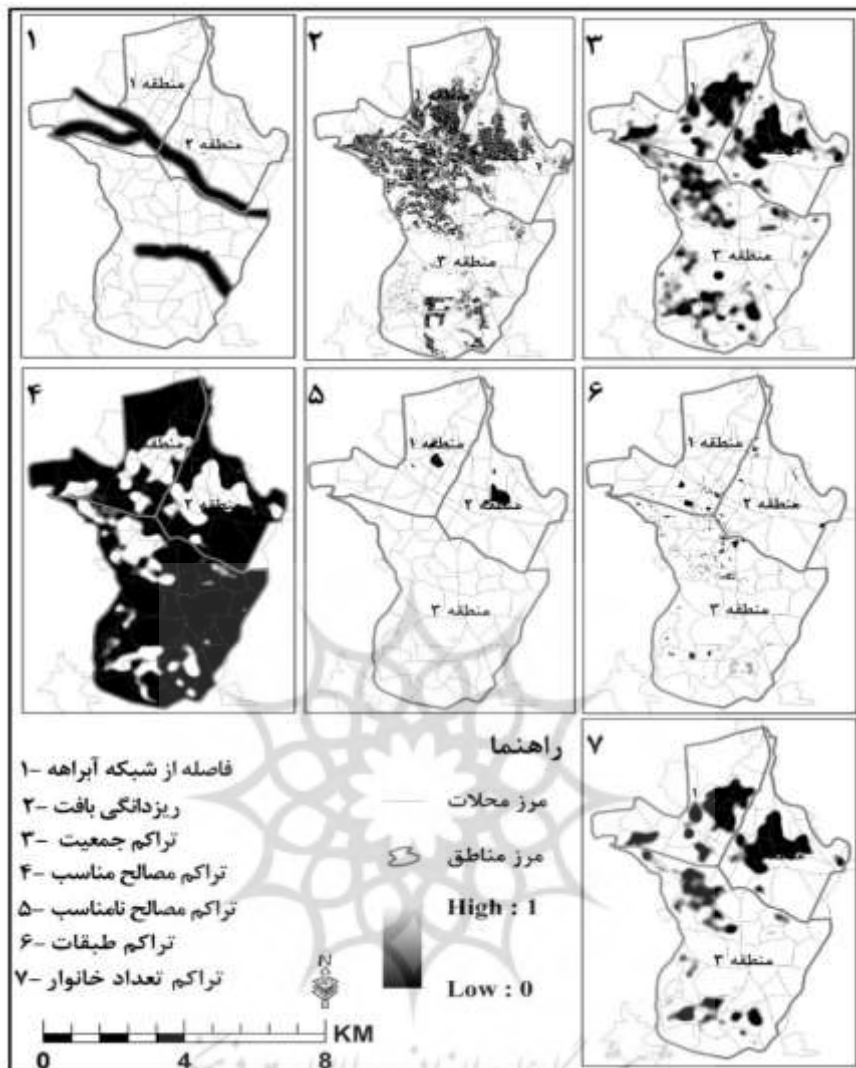
ردیف	لایه نقشه	آماده سازی و ویرایش لایه‌ها در نرم افزار Arc GIS	وزن اولیه AHP	وزن نهایی AHP	حد بالا و پایین	آستانه فازی	نوع تابع فازی	شماره نقشه
عوامل طبیعی	فاصله از شبکه آبراهه	Euclidean distance	۴	۰,۱۱۷۰۵۵	۰ - ۳۹۳۰ متر	۱۰۱ - ۳۰۱	افزایشی	(۱)
	زمین شناسی	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۷	۰,۰۷۰۶۵۵	۱ - ۶	۵ - ۳	کاهشی	(۲)
	فاصله از گسل	Euclidean distance	۹	۰,۰۵۲۲۲۵	۰ - ۶۰۳۰ متر	۲۰۰۰ - ۴۰۰۰	افزایشی	(۳)
	ارتفاع	ارتفاع (به متر)	۵	۰,۱۰۰۲۳۲	۱۳۷۰ - ۱۷۲۰ متر	۱۵۰۰ - ۱۷۰۰	کاهشی	(۴)
	شیب	طیف شیب به درصد	۶	۰,۰۸۲۳۸۵	۰ - ۵۰	۲۰ - ۱۰	کاهشی	(۵)
عوامل کالبدی	فاصله از شبکه ارتباطی	Euclidean distance	۷	۰,۰۶۹۹۵۷	۰ - ۱۳۹۰ متر	۲۰ - ۴۰	کاهشی	(۶)
	کاربری اراضی	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۸	۰,۰۶۰۱۵۵	۱ - ۵	۲ - ۴	افزایشی	(۷)
	مساحت قطعه	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۷	۰,۰۶۹۹۵۷	۱ - ۵	۲ - ۴	افزایشی	(۸)
	تعداد کاربری های دارای مصالح با کیفیت	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۶	۰,۰۸۴۵۵	۱۴۱ - ۰ (کاربری در هکتار)	۴۰ - ۶۰,۱	افزایشی	(۹)
	کاربری های دارای مصالح بی کیفیت	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۶	۰,۰۸۴۵۵	۸۶ - ۰ (کاربری در هکتار)	۴۰ - ۶۰,۱	کاهشی	(۱۰)
	تعداد طبقات	ویرایش بانک اطلاعاتی و تبدیل به رستر	۷	۰,۰۷۰۱۷۳	۰ - ۵	۲ - ۴	کاهشی	(۱۱)
عوامل اجتماعی	تراکم جمعیت	Kernel Density	۹	۰,۰۵۵۶۰۹	۰ - ۴۴۴ (نفر در هکتار)	۱۰۰ - ۲۰۰	کاهشی	(۱۲)

ادامه جدول ۲

ردیف	لایه نقشه	آماده سازی و ویرایش لایه‌ها در نرم افزار Arc GIS	وزن اولیه AHP	وزن نهایی AHP	حد بالا و پایین	آستانه فازی	نوع تابع فازی	شماره نقشه
عوامل اجتماعی	تراکم خانوار	Kernel Density	۶	۰,۰۸۲۹۰۸	۱۱۴ - ۰ (خانوار) (درهکتار)	۶۰ - ۴۰	کاهشی	(۱۳)



شکل ۵- لایه‌های فازی شده ۱



شکل ۶- لایه‌های فازی شده ۲

از بعد کاربری اراضی منطقه یک به دلیل تراکم بالای کاربری‌ها بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. مرکز شهر و بخش‌هایی از جنوب در منطقه ۳ نیز شرایط نامساعدی را نشان می‌دهند. لایه ارتفاعات حاکی از آن است که بخش شرقی شهر (مناطق ۱ و ۳) به‌علاوه بخش شمالی در منطقه ۱ شهرداری سندانج آسیب‌پذیری بالایی را خواهند داشت؛ اما وضعیت شیب شرایط متفاوتی را نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن از مرکز شهر به سمت حاشیه و بخش‌های مرکزی منطقه ۳ احتمال آسیب‌پذیری بالایی را خواهد داشت. زمین‌شناسی محل نیز به ترتیب مناطق ۲، ۱ و ۳ بیشترین پهنه‌های خطرناک را نشان می‌دهد. تمام منطقه ۱ از نظر نزدیکی به خط گسل بیشترین احتمال آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد بخش جنوبی منطقه ۳ و در منطقه ۲ حاشیه مرزی آن با منطقه ۱ شرایط نامساعدی را دربر دارد. به دلیل

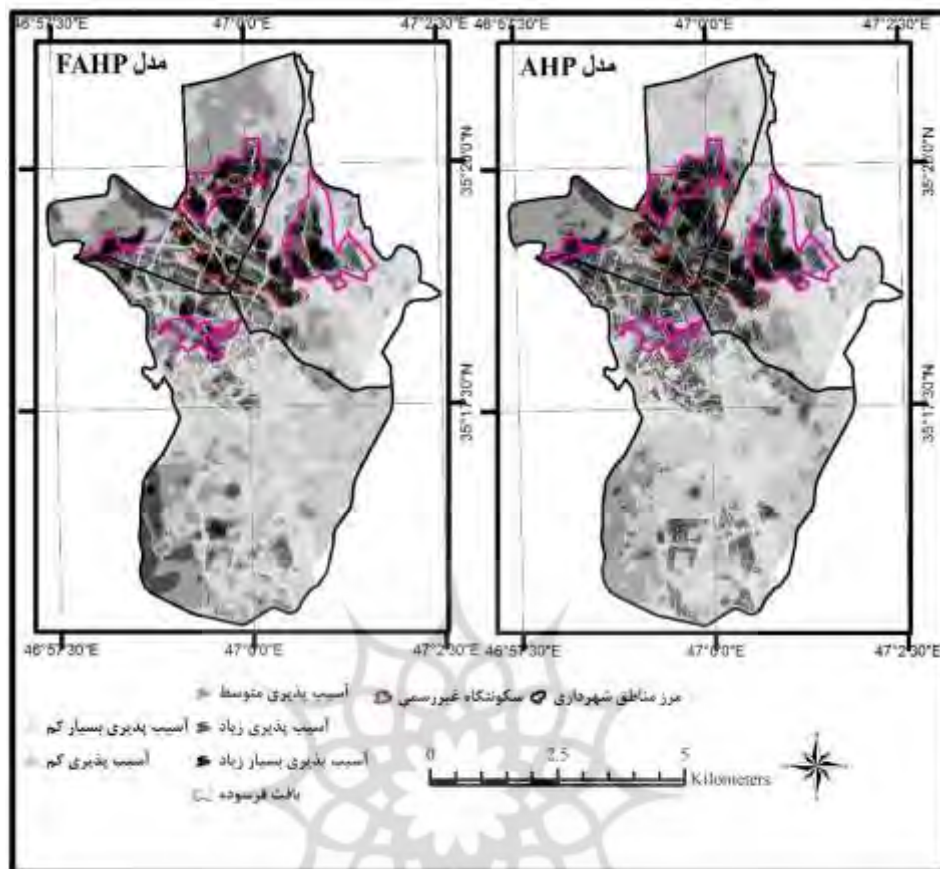
تمرکز شبکه ارتباطی بخش مرکزی شهر از این نظر وضعیت آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد. از نظر فاصله از آبراهه پهنه‌های اندکی از شهر آسیب‌پذیر می‌باشد. بخش مرکزی و بخش‌های اعظمی از منطقه ۱ از نظر ریزدانگی بافت شرایط نامناسبی را نشان می‌دهد و منطقه ۳ نسبت به سایر مناطق آسیب‌پذیری کمتری را تجربه خواهد نمود. بیشترین حجم تراکم جمعیت در مناطق ۲ و ۱ متمرکز بوده (به دلیل ریزدانگی بافت و حاشیه‌نشینی) بوده که آسیب‌پذیری بالایی را به همراه خواهند داشت. بخش‌های مرکزی مناطق ۲ و ۱ و بخش جنوبی و شمال غربی منطقه ۳ از نظر به‌کارگیری مصالح مناسب شرایط خوبی را نشان می‌دهند و مرکز شهر به دلیل فرسودگی و قدمت بالای بافت شرایط نامساعدی را نشان می‌دهد؛ اما از نظر مصالح ضعیف و کم‌دوام پهنه‌های کوچکی از مناطق ۲ و ۱ (مرکز مناطق) به ترتیب شرایط نامساعد و منطقه ۳ به دلیل نوساز بودن بافت فاقد آسیب‌پذیری از این منظر است. تراکم طبقات نیز پهنه‌هایی کوچکی را در کل مناطق نشان می‌دهد. بیشترین تراکم جمعیت در مناطق ۲ و ۱ و بخشی از شمال غرب منطقه ۳ وجود دارد.

همپوشانی فازی

عملیات همپوشانی فازی در محیط ArcGIS امکان‌پذیر است (Alois H, et al, 2013). مدل‌های مبتنی بر عملیات پوشش با استفاده از وزن‌ها، در مقایسه با عملیات بر اساس منطق بولین، امکان ترکیب نقشه‌های انعطاف‌پذیرتر را فراهم می‌کند (Luis M. T. C et al, 2007). در اینجا ابتدا هر کدام از لایه‌های فازی سازی شده به‌صورت مجزا در وزن مربوط به خود در دستور Raster calculator ضرب شدند سپس نقشه‌های جدید توسط پنج عملگر فازی (SUM, GAMMA, OR, AND, PRODUCT) اجرا شدند و جواب حاصل از بهترین عملگر یعنی عملگر SUM به‌عنوان نقشه نهایی انتخاب گردیده است. تابع پوشش فازی SUM مجموع مقادیر فازی هر مجموعه را که محل سلولی متعلق به آن است اضافه می‌کند. مجموع نتیجه یک تابع ترکیبی در حال افزایش است که بر اساس تعداد معیارهای وارد شده در تجزیه و تحلیل است (P. Pahlavani et al, 2015).

جدول شماره ۳- مقایسه برآورد میزان آسیب‌پذیری ۲ مدل AHP و FAHP

میزان آسیب‌پذیری شهر سندج بر اساس نتیجه مدل AHP		میزان آسیب‌پذیری شهر سندج بر اساس نتیجه مدل FAHP	
کلاس آسیب‌پذیری	درصد	کلاس آسیب‌پذیری	درصد
آسیب‌پذیری خیلی کم (۱)	۰.۶۳	آسیب‌پذیری خیلی کم (۱)	۲۵.۳۸
آسیب‌پذیری کم (۲)	۲۵.۸۱	آسیب‌پذیری کم (۲)	۳۰.۷۶
آسیب‌پذیری متوسط (۳)	۵۵.۹۸	آسیب‌پذیری متوسط (۳)	۲۵.۱۶
آسیب‌پذیری زیاد (۴)	۱۵.۸۵	آسیب‌پذیری زیاد (۴)	۱۴.۶
آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۵)	۱.۷۳	آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۵)	۴.۱



شکل شماره ۷- نقشه حاصل از مدل FAHP

بر اساس نتایج حاصل از هر دو مدل AHP و FAHP بیشتر مناطق با آسیب‌پذیری بالا از لحاظ کالبدی دارای ویژگی‌هایی نامطلوبی چون ریزدانگی، عدم کیفیت مصالح، فرسودگی کاربری‌ها، تراکم بالای کاربری‌ها و از منظر اجتماعی دارای تراکم بالای جمعیت می‌باشند که با بافت فرسوده و محلات حاشیه‌نشین مطابقت دارد؛ اما مقایسه ۲ مدل بر اساس شکل شماره ۸ حاکی از دقت بیشتر مدل FAHP دارد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

شهر سنندج با مرکزیت استان کردستان و مساحت و تراکم بالای جمعیت، افزایش روند حاشیه‌نشینی، عدم رعایت اصول مهندسی در ساخت‌وسازها و وجود بافت‌های فرسوده شهری با تراکم بالا از جمله شهرهای آسیب‌پذیر در برابر زلزله است. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، به‌رغم استفاده روش AHP از متغیرهای کمی و کیفی، این روش توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت^۱ در خصوص قضاوت تصمیم‌گیرندگان را ندارد. اغلب روش‌های بکار رفته در

1 Uncertainty

مقالات و تحقیقات صورت گرفته‌شده با استفاده از یک مدل (غالباً مدل AHP یا ANP) استفاده‌شده است. به‌علاوه مقایسه تطبیقی بین دو یا چند مدل بل اخص مدل AHP با یک مدل عدم قطعیت همانند فازی و ترکیب آن با مدل AHP صورت نگرفته است؛ اما برخلاف روش فوق، مدل FAHP قابلیت فرموله نمودن عدم قطعیت‌های مربوط به پژوهش حاضر را دارا است. همچنین از توانایی‌های دیگر مدل Fuzzy – AHP در این پژوهش، بهره‌گیری از طیف‌های مختلف از طریق روش‌های غیرفازی سازی^۱ بر مبنای مسئله مورد مطالعه از حداقل گیری تا حداکثر گیری است و این روش عدم اطمینان در رتبه‌بندی عملکردها و تصمیمات موجود در روش AHP را از بین برده؛ همچنین در منطق فازی ابهامات موجود در قضاوت فرموله شده و به زبان ریاضی بیان شده است؛ بنابراین روش FAHP قابلیت اطمینان بیشتری در تعیین آسیب‌پذیری در اینجا بررسی شهر سنج در برابر زلزله دارد؛ زیرا در تعیین کاربری‌های آسیب‌پذیر در فضای شهر با استفاده از معیارهای مختلف نمی‌توان به‌صورت قطعی مناطق یا محلاتی را در طیف خاصی قرارداد که با استفاده از این مدل می‌توان تحلیلی بهتر با انعطاف‌پذیری بیشتر ارائه نمود. با توجه به نتایج نقشه مدل و جدول شماره ۲، در منطقه ۱ شهر سنج محلاتی همچون قطارچیان، تازه آباد، حاجی آباد، بعثت، تپه شیخ صادق، جورآباد و در منطقه ۲ محلات عباس‌آباد، گلشن، پیرمحمد و در نهایت در منطقه ۳ مبارک آباد، کلکه جار، ویلاشهر و شهرک بهاران، دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد هستند. بطور کلی به ترتیب مناطق ۱، ۲ و ۳ بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند که با بافت فرسوده و حاشیه نشین شهر انطباق دارند؛ بنابراین مهمترین پیشنهاد این پژوهش برنامه‌ریزی جامع و عملیات‌های عمرانی همه جانبه مناطق حاشیه نشین و بافت فرسوده به صورت اولویت دار جهت مقابله با زلزله احتمالی می‌باشد.

کتابنامه

- ابراهیم‌زاده، عیسی؛ کاشفی، دیمین و حسینی، احمد؛ ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری محله‌های شهری در برابر زلزله (نمونه موردی: شهر پیرانشهر). فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا). سال پنجم، شماره اول، پیاپی ۱۶. بهار ۱۳۹۴. صفحات ۱-۲۶.
- احدنژاد روشتی، محسن؛ روستایی، شهریور و کاملی فر، محمدجواد؛ ۱۳۹۴. ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری در برابر با رویکرد مدیریت بحران (مطالعه موردی: منطقه ۱ شهر تبریز). فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۴. شماره ۹۵. پاییز ۹۴.
- انتظاری نجف‌آبادی، مژگان؛ یوسفی، فاطمه؛ ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر عوامل ژئومورفولوژی در توسعه شهرنشینی شهر سنج. مجله علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، سال سوم. شماره چهارم، پیاپی ۱۱. زمستان ۱۳۹۲. صفحات ۷۷ - ۹۴.

- آبسالان، علی؛ کنگی، عباس؛ ۱۳۹۳. گزارش تحقیقاتی مجموعه دستاوردهای تحقیقاتی-کاربردی سامانه مدیریت بحران زلزله شهر هوشمند مشهد. سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد. شماره نشر ۱۰۱.
- بهزاد افشار، کتابون؛ اکبری، پرویز؛ ۱۳۹۶. ارزیابی متغیرهای کالبدی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بناهای شهری با استفاده از مدل TOPSIS (مطالعه موردی: ناحیه منفصل شهری باباریز سنندج). فصلنامه علمی - پژوهشی مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی. دوره ۱۲، شماره ۴. پایپ ۴۱. زمستان ۱۳۹۶. صفحات ۸۵۷ - ۸۷۳.
- پناهی کایوشه، محمدحسین؛ متشرعی، آرش؛ ۱۳۹۲. تحلیل زمین‌لرزه‌ای به روش قطعی در ناحیه سنندج استان کردستان، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. ۷ تا ۹ آبان. دانشگاه شهید بهشتی.
- حبیبی، کیومرث؛ جوانمردی، کومار؛ ۱۳۹۱. تحلیل ناپایداری بافت‌های شهری و پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله با استفاده از GIS&AHP. نمونه موردی: بخشی از هسته مرکزی شهر سنندج. نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر شماره ۱۱. پاییز و زمستان ۹۲.
- خاکپور، براتعلی؛ حیاتی، سلمان؛ کاظمی بی‌نیاز، مهدی وربانی ابوالفضل، غزاله؛ ۱۳۹۲. مقایسه تطبیقی-تحلیلی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی و فازی (نمونه موردی: شهر لامرد). فصلنامه آمایش محیط. شماره ۲۲. صفحات ۳۸-۲۱.
- خالق پناه، کمال؛ نیری، هادی؛ کرمی، محمدرضا و احمدی، خبات؛ ۱۳۹۴. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهر سنندج ناشی از زلزله با استفاده از دو مدل تحلیل سلسله مراتبی و مدل تاپسیس. نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی. سال ۲۰. شماره ۵۷. پاییز ۱۳۹۵. صفحات ۲۹۴-۲۷۷.
- روستایی، شهرپور؛ معبودی، محمدتقی؛ ۱۳۹۵. تحلیل فضایی آسیب‌پذیری اجتماعی مناطق شهری در مقابل زلزله با استفاده از مدل SVI (نمونه موردی: منطقه ۲ شهرداری تبریز). فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی شهری، سال سوم. شماره ۱۱. پاییز ۱۳۹۴. صفحات ۱۰۵ - ۱۲۶.
- زمردیان، محمدجعفر؛ ۱۳۸۱. ژئومورفولوژی ایران. جلد اول. مشهد. انتشارات دانشگاه فردوسی.
- شهابی، هیمین؛ قلیزاده، محمدحسین و نیری، هادی؛ ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با روش تحلیل چند معیاره فضایی. جغرافیا و توسعه. شماره ۲۱. صفحات ۶۵-۸۰.
- شهبان فر، حمید؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه صوفیان با استفاده از مدل AHP. فصلنامه علمی-پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست. سال نهم، شماره ۳۱. تابستان ۱۳۹۴.
- شیعه، اسماعیل؛ حبیبی، کیومرث و ترابی، کمال؛ ۱۳۸۹. بررسی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش سلسله مراتبی معکوس و GIS (مطالعه موردی: منطقه ۶ تهران). چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام. صفحات ۱۲ - ۱.
- شیعه، اسماعیل؛ ۱۳۸۵. کتاب مقدمه‌ای بر مبانی برنامه‌ریزی شهری. ناشر دانشگاه علم و صنعت ایران. تعداد صفحات ۲۲۶.

- علوی، سیدعلی؛ حسینی، سیدمصطفی؛ بهرامی، فریبا و عاشورلو، مهرباب؛ ۱۳۹۴. ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری با استفاده از ANP و GIS (مطالعه موردی: شهر سمیرم). فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۵. شماره ۱۰۰.
- غلامی، یونس؛ حیاتی، سلمان؛ قنبری، محمد و اسماعیلی، آسیه؛ ۱۳۹۴. پیش‌بینی فضا‌های آسیب‌پذیر شهر مشهد هنگام وقوع زلزله. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری. دوره ۳. شماره ۱. بهار ۱۳۹۴. صفحات ۶۷-۵۵.
- فرج زاده اصل، منوچهر؛ بصیرت، فروغ؛ ۱۳۸۵. پهنه‌بندی حساسیت تشکیلات زمین‌شناسی در مقابل زلزله منطقه شیراز. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۵۵. صفحات ۵۹ - ۷۲.
- قبادی، محمدحسین؛ اصغری، ژیلا و گودرزی، ذبیح‌ا...؛ ۱۳۹۰. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی شهرستان سنج. پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی. دانشگاه پیام نور استان زنجان.
- قنبری، ابوالفضل؛ سالکی، محمدعلی و قاسمی، معصومه؛ ۱۳۹۲. پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهرها در برابر خطر زلزله (نمونه موردی: شهر تبریز). مجله جغرافیا و مخاطرات طبیعی. شماره ۵. صفحات ۲۱ - ۳۵.
- کریمی، محمدرضا؛ امیریان، سهراب؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهری ناشی از زلزله با استفاده از مدل Fuzzy AHP (مطالعه موردی: شهر تبریز). نشریه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال سوم، شماره ۶. پایانی ۱۰. تابستان ۱۳۹۷. صفحات ۱۲۴-۱۱۰.
- کریمی کردآبادی، مرتضی؛ نجفی، اسماعیل؛ ۱۳۹۴. ارزیابی خطر زلزله با استفاده از مدل ترکیبی FUZZY AHP در امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران). مجله پژوهش و برنامه‌ریزی شهری. سال ششم. شماره بیستم. بهار ۱۳۹۴. صفحات ۱۷-۳۴.
- کوره‌پزان دزفولی، امین؛ ۱۳۸۷. اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌های مسائل مهندسی آب. جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر). ۱۳ مهر. ۱۳۸۷.
- محمدی احمدیانی، جمال؛ صحرائیان، زهرا و خسروی، فرامرز؛ ۱۳۸۹. نقش عوامل مؤثر در آسیب‌پذیری کالبدی شهر جهرم در برابر زلزله. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. جلد ۱۴. شماره ۱۷. تابستان ۱۳۸۹. صفحات ۱۲۱ - ۱۴۳.
- محمدی، علیرضا، جاوید مغوان، بهمن؛ ۱۳۹۵. سنجش میزان آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های غیررسمی در برابر خطر وقوع زمین‌لرزه با استفاده از GIS. مورد پژوهش: محله زیر نهر تراب شهر پارس‌آباد. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال سوم. شماره ۳. پاییز ۱۳۹۵. صفحات ۶۴-۴۱.
- مرکز آمار ایران؛ ۱۳۹۵. سرشماری نفوس و مسکن شهر سنج سال ۱۳۹۸.
- معصوم زاده، سیدمحسن؛ تراب زاده، اقدس؛ ۱۳۸۳. رتبه‌بندی تولیدات صنعتی کشور. فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی. شماره ۳۰. بهار ۱۳۹۳. ۶۷ - ۸۱.
- ملکی، امجد؛ ۱۳۸۵. پهنه‌بندی زمین‌لرزه و اولویت‌بندی مسکن استان کردستان. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۵۹. صفحات ۱۱۵-۱۲۴.

- ملکی، سعید؛ امانپور، سعید؛ صفایی پور، مسعود؛ پورموسوی، سیدناذر و مودت، الیاس؛ ۱۳۹۶. ارزیابی طیف تاب‌آوری کالبدی شهرها در برابر زلزله با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی (نمونه موردی: شهر ایلام). نشریه علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال دوم، شماره ۱. پیاپی ۵. بهار ۱۳۹۶.
- مهدوی، داوود؛ هزاریان، الهام؛ ۱۳۹۶. ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله. مطالعه موردی روستاهای شهرستان یزد. نشریه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی. سال دوم. شماره ۴ (سری جدید). پیاپی ۸. زمستان ۱۳۹۶. صفحات ۲۷-۴۵.
- مهدوی نژاد، محمدجواد، جوانرودی، کاوان؛ ۱۳۹۱. بررسی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در شبکه‌های ارتباطی تهران بزرگ مطالعه موردی: خیابان ولی‌عصر (عج) شمالی تا چهارراه پارک‌وی. فصلنامه مدیریت بحران. شماره اول.
- نگارش، حسین؛ ۱۳۸۲. کاربرد ژئومورفولوژی در مکان‌گزینی شهرها و پیامدهای آن، نشریه جغرافیا و توسعه. بهار و تابستان ۱۳۸۲. دوره ۱. صفحات ۱۳۳ - ۱۵۰.
- نگارش، حسین؛ ۱۳۸۴. زلزله، شهرها و گسل‌ها. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی دوره ۳۷. شماره ۵۲. صفحات ۹۳ - ۱۱۰.
- نیری، هادی؛ کرمی، محمدرضا؛ ۱۳۹۵. امکان‌سنجی آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله با استفاده از مدل متوسط وزنی مرتب‌شده (OWA). نشریه مطالعات نواحی شهری دانشگاه شهید باهنر کرمان. سال سوم. شماره ۱. پیاپی ۶. بهار ۱۳۹۵.
- ولیزاده کامران، خلیل؛ ۱۳۸۰. پهنه‌بندی خطر زلزله در شهرستان تبریز با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS. نشریه فضای جغرافیایی. شماره ۴. صفحات ۶۶ - ۴۹.

- Alexander, D., 1993. Natural Disaster. London.
- Andisheh, K., 2007. Seismic Hazard Assessment of Sanandaj City of Iran Based on Psha", 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28, 2007 Paper No. 157.
- Bosher, L., 2008. Hazards and the Built Environment: Attaining Built-in Resilience", Taylor & Francis Routledge.
- D. Smith, K.; N. Brune, J.; dePolo, D.; K. Savage, M.; Anooshehpour, R.; F. Sheehan, A., 2001. The 1992 Little Skull Mountain Earthquake Sequence, Southern Nevada Test Site" Geologic and Geophysical Characterization Studies of Yucca Mountain, Nevada. [https://doi: 10.1785/0120000089](https://doi.org/10.1785/0120000089)
- Deng, H., 1999. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparisons, International Journal of Approximate Reasoning 21:231-215. [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(99\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(99)00025-0)
- Ericson, Clifton. A., 2005. Hazard Analysis Techniques for System Safety. Published by John Wiley & Sons, Inc. <https://doi:10.1002/0471739421>
- Gungor, Z., Serhadlioglu, G., Erhan Kesen, S., 2009. A fuzzy AHP approach to personnel selection problem, p.p 5-7, Applied Soft Computing, vol. 9, pp. 641-646, September 2009. <http://doi: 10.1016/j.asoc.2008.09.003>

- han, F. T. & Kumar, N., 2007. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. *Omega*, 35(4), 417-431. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.08.004>
- Hofmann, A., Sarka Hoskova, M. and Talhofer, V., 2013. Usage of Fuzzy Spatial Theory for Modelling of Terrain Passability, *Advances in Fuzzy Systems Volume 2013*, Article ID 506406, 7 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/506406>
- Ian Lin, M., Duen Lee, Y., Neng Ho, T., 2011. Applying integrated DEA/AHP to evaluate the economic performance of local governments in China, *European Journal of Operational Research* 209 (2011) 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.006>
- Kilincci, O. & Onal, S. A., 2011. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Expert systems with Applications*, 38(8), 9656-9664. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.159>
- L. Saaty, T., 1988. *What is the analytic hierarchy process?* Springer Berlin Heidelberg, pp. 109-121. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5
- Lan Davis, Pergamon Press, Oxford. Michigan University.
- Lantada, N., Pujades, L. & Barbat, A., 2008. Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, *Nat Hazards* 51. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9212-4>
- Lewis, J., 1981. Mitigation Preparedness Measures, In *Disaster And The Small Dwelling*, Ed. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1979.tb00146.x>
- Li, F., Wang, R., Paulussen, J. & et al., 2005. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, china, *J. Land scape and urban planning*. 2005, 72. 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.04.002>
- M. T. Carvalho, L., S. Ribeiro, M., T. de Oliveira, L., C. A. Oliveira, T., N. Louzada, J., R. S. Scolforo, J., D. Oliveira, A., 2007. Weighted Overlay, Fuzzy Logic and Neural Networks for Estimating Vegetation Vulnerability within the Ecological Economical Zoning of Minas Gerais, Brazil, IX Brazilian Symposium on GeoInformatics, Campos do Jordão, Brazil, November 25-28, 2007, INPE, p. 171-182.
- Özdağoğlu, A., Özdağoğlu, G., 2007. Comparison Of Ahp And Fuzzy Ahp For The Multi-Criteria Decision Making Processes With Linguistic Evaluations, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* Yıl: 6 Sayı: 11 Bahar 2007/1 s. 65-85.
- Pahlavani, P., Abbaspour, R.A., Zare Zadiny, A., 2015. A Different Web-Based Geocoding Service Using Fuzzy Techniques, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W5, 2015 International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry, 23–25 Nov 2015, Kish Island, Iran. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-571-2015>
- Rezaei, A., Tahsili, S., 2018. Urban Vulnerability Assessment Using AHP”, *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, Volume 2018, Article ID 2018601, 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/2018601>
- Sadeghiravesh, M.H., Zehtabian, Gh.R., Khosravi, H., 2014. Application of AHP and ELECTRE models for a assessment of de-desertification alternatives, Received: 20 July 2014; Received in revised form: 8 September 2014; Accepted: 21 September 2014, *Desert-192(2014)141-153*.
- Stein, E. and Norita, A., 2009. Using the analytical hierarchy process (AHP) to construct a measure of the magnitude of consequent of moral intensity, *Journal of Business Ethics*, vol. 89, no. 3, pp. 391–407, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10551-008-0006-8>
- WDI., 2004. *Natural Disaster Hotspot: A Global Risk Analysis* (the world Bank), WDI for some contrise.