



اولویت‌بندی روش‌های توسعه کم اثر به منظور مدیریت رواناب سطحی شهری، با استفاده از روش Topsis و Fuzzy Topsis (مطالعه موردی: شهرک سپاهان شهر اصفهان)

نیلوفر عقلی مهابادی، حامد رضا ظریف صنایعی*، سید مرتضی هاتفی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

رواناب
روش‌های LID
مدل SWMM
روش Topsis
روش Fuzzy Topsis

خلاصه: در دهه‌های اخیر به دلیل گسترش شهرنشینی، درصد مناطق مسکونی و صنعتی و در نتیجه درصد مناطق نفوذناپذیر افزایش یافته است. این امر موجب افزایش رواناب سطحی شهرها شده است. بنابراین لازم است تا با استفاده از راهکارهایی همچون روش‌های توسعه کم‌اثر، مقادیر رواناب سطحی در شهرها کنترل شود. در این پژوهش از ۶ روش توسعه کم اثر (LID) که شامل: روکش نفوذپذیر، بشکه ذخیره باران، ترانسه نفوذ، سیستم نگهداشت زیستی، روکش نفوذپذیر-ترانسه نفوذ و بشکه ذخیره باران-سیستم نگهداشت زیستی، استفاده شده است. این روش‌ها توسط ۴ شاخص کاهش حجم رواناب، کاهش دبی اوج رواناب، اقتصادی و اجتماعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تعیین مقادیر شاخص‌های هیدرولوژیک حجم و دبی اوج رواناب از مدل SWMM، برای تعیین مقادیر شاخص اقتصادی (هزینه) از فهرست آنالیز بها و برای شاخص اجتماعی، تعداد ۲۰ پرسشنامه توسط متخصصان محلی، تکمیل شد. در ادامه و به منظور اولویت‌بندی روش‌های LID، از دو معیار تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل: Topsis و Fuzzy Topsis، با در نظر گرفتن حالت‌های وزن‌دهی آن‌روپی شانون، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک برای روش Topsis و حالت وزن‌دهی آن‌روپی شانون فازی برای روش Fuzzy Topsis، استفاده شد. نتایج نشان داد که در روش Topsis و در حالت‌های وزن‌دهی یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک، سناریوی ترکیبی بشکه باران-سیستم نگهداشت زیستی و در حالت وزن‌دهی آن‌روپی شانون، سناریوی بشکه باران به عنوان سناریوی برتر انتخاب شدند. همچنین در روش Fuzzy Topsis، سناریوی سیستم نگهداشت زیستی، رتبه اول را کسب نمود.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با رشد سریع جمعیت، توسعه روزافزون شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز شهری، دچار تغییرات زیادی شده است. این تغییرات در طی زمان موجب بروز سیلاب و آبگرفتگی معابر در نواحی شهری شده و از سویی دیگر وقوع سیلاب در مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت و امکانات، می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد. همچنین به دلایل کمبود منابع آب، وجود اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک و توزیع نامناسب مکانی و زمان بارش، ضرورت مدیریت پایدار منابع آب و همچنین بهره‌برداری بهینه از آن در کشور، بسیار حائز اهمیت است [۱]. به همین منظور مطالعه و بررسی راهکارهای مدیریت و کنترل رواناب سطحی، در مناطق شهری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از راهکارهای نوینی که امروزه در مدیریت رواناب سطحی در مناطق

شهری مورد استفاده قرار گرفته است، روش‌های توسعه کم اثر یا LID است. این تکنیک در واقع یک روش ابتکاری برای مدیریت سیلاب‌های شهری است. هدف استفاده از این تکنیک، شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک منطقه شهری، قبل از توسعه است. استفاده از این تکنیک‌ها مزایای زیادی به همراه دارد که از جمله آن می‌توان به حفظ طبیعت و اکولوژی موجود، جلوگیری از افزایش سطوح نفوذناپذیر، کاهش حجم و سرعت رواناب سطحی، حفظ کیفیت آب‌های سطحی و زیرسطحی، کاهش آلاینده‌های ورودی به رواناب و ارتقاء محیط زندگی به لحاظ مسائل زیبایی‌شناختی، اجتماعی، فرهنگی و غیره اشاره کرد. از جمله دلایل برتری استفاده از این روش‌ها، نسبت به روش‌های سنتی کنترل سیلاب‌های شهری، می‌توان به سازگاری بیشتر این روش‌ها با محیط زیست، مدیریت رواناب در نزدیکی منشأ تولید، امکان اصلاح و بهبود کیفیت رواناب سطحی در مقایسه با روش‌های سنتی



حدود ۳۰ درصد میزان رواناب را کاهش داد. لیو^۴ و همکاران [۸] به طراحی بهینه روش‌های LID، با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه‌ای پرداختند (MOSFLA). سپس پیشنهادها برای کاهش تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD)، در حوضه‌ای واقع در چین، مورد آزمایش قرار گرفت. برای این کار از مدل SWMM و زنجیره‌ی مارکو^۵ بهره گرفتند. نتایج تحقیقات نشان داد که استفاده از الگوریتم جدید در مقایسه با الگوریتم‌های متداول ۵۰۰ برابر مؤثر واقع شده است. خطای نسبی بین دو روش SWMM و زنجیره مارکو کمتر از پنج درصد بود. راندال^۶ و همکاران [۹] به بررسی تأثیر استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر (LID) بر میزان رواناب شهری و نگهداشت آب باران پرداختند. هدف آن‌ها از اجرای این روش‌ها ذخیره‌سازی ۸۵-۸۰ درصد آب باران شهر پکن در چین بود. آن‌ها با اجرای سه سناریوی بام سبز، جوی باغچه و روکش نفوذپذیر در دوره بازگشت ۳۵ ساله‌ی بارندگی، به این نتیجه رسیدند که با اجرای ۳۰ درصد بام سبز، ۱۰ درصد جوی باغچه و ۳۵ درصد روکش نفوذپذیر، از مساحت کل منطقه، میزان ذخیره آب باران از ۵۹/۹ درصد به ۸۲/۲ درصد افزایش می‌یابد.

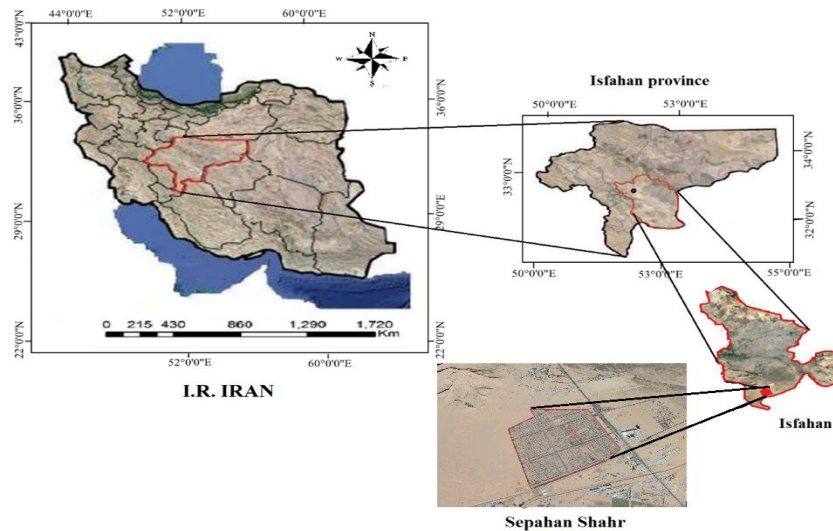
تقسیم‌بندی مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، به دو دسته مدل‌های چند هدفه^۷ و مدل‌های چند شاخصه، می‌باشد. کارایی مدل‌های چند هدفه به منظور طراحی و کارایی مدل‌های چند شاخصه به منظور انتخاب گزینه برتر از میان تعدادی گزینه است. معرفی مدل‌های چند شاخصه در سال ۱۹۷۵ توسط چرچمن^۸، اکاف^۹ و آرنوف^{۱۰} صورت گرفت [۱۰]. از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نیز می‌توان به جبل‌عاملی و همکاران [۱۱] اشاره نمود. آن‌ها با استفاده از روش TOPSIS برای حل مسأله رتبه‌بندی ریسک‌های یک پروژه واقعی صنعت انرژی در کشور ایران پرداختند. لگزبان [۱۲] به شناسایی سناریوهای مدیریت رواناب سطحی در شهر نیشابور، پرداخت. برای این منظور با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و با بکارگیری پنج معیار اجتماعی، اقتصادی، هیدرولوژیک فنی و زیست‌محیطی، سناریوهای مدیریتی را در حالت‌های مختلف وزن‌دهی، اولویت‌بندی نمود.

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از مدل SWMM به شبیه‌سازی رواناب سطحی شهرک سپاهان‌شهر و بررسی تأثیر استفاده از روش‌های LID بر میزان حجم و دبی اوج رواناب پرداخته شود. در ادامه به

و حفاظت از سلامت عمومی و ارتقاء وضعیت محیط زیستی و زیبایی نواحی شهری اشاره کرد [۲]. مطالعات زیادی در خصوص استفاده از روش‌های توسعه کم اثر برای کنترل رواناب شهری انجام شده است. جیا^۱ و همکاران [۳] در تحقیقی برای کنترل رواناب شهری از روش‌های LID_BMP استفاده کردند. دهکده المپیک پکن (BOV)، به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. روش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل: آسفالت نفوذپذیر، بام سبز و مخازن ذخیره باران بودند که با استفاده از مدل SWMM به شبیه‌سازی شبکه زهکشی پرداختند. عملکرد سیستم فاضلاب این منطقه با مدل (BMPDSS) که بهترین مدل مدیریت و تجزیه و تحلیل می‌باشد، ارزیابی شد. در نهایت بهترین اقدامات لازم در خصوص کنترل رواناب سطحی در منطقه مورد مطالعه را ارائه نمودند. سلیمانی و همکاران [۴] با استفاده از مدل SWMM و با فرض سناریوهای سنتی (افزایش ابعاد کانال) و نوین (جوی‌باغچه) به شبیه‌سازی میزان رواناب ایجاد شده در شهر گلستان استان تهران پرداختند. این پژوهش نشان داد که سیستم جوی‌باغچه کارایی بهتری نسبت به روش سنتی دارد و قادر به کاهش سیلاب به میزان ۵۹ درصد در این منطقه است. کامپیزانو^۲ و همکاران [۵] به ارزیابی یکی از روش‌های LID-BMP یعنی روش توسعه‌ی کم اثر توسط مدل SWMM در بارش‌های طولانی مدت و کم رخداد پرداختند و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دقت استفاده از این سیستم در بارش‌های طولانی مدت بیشتر است. پورصاحبی و همکاران [۶] اقدام به بررسی تأثیر روش‌های LID-BMP با استفاده از مدل SWMM بر میزان رواناب منطقه ۲۲ تهران کردند. این پژوهش شامل پنج سناریوی شرایط فعلی، بام سبز، صفحه‌ی نفوذپذیر، جوی‌باغچه و بام سبز- صفحه‌ی نفوذپذیر- جوی‌باغچه، با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای ۱۹ زیرحوضه در این منطقه بود. نتایج نشان داد که اثر بخشی هر ۵ روش، در کاهش رواناب با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۵۰ سال روند صعودی داشته، ولی در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، اثر این روش‌ها کاهش می‌یابد. اجرای بام سبز بیشترین و جوی باغچه کمترین اثر را در کاهش مقدار رواناب داشتند. ونگ^۳ و همکاران [۷] به ارزیابی و مدل‌سازی ابزارهای کاهش رواناب، با استفاده از مدل SWMM پرداختند. آن‌ها از سه سناریوی سنگ فرش متخلخل، جمع‌آوری آب باران و بام سبز استفاده کردند که سنگ فرش متخلخل بهترین ابزار در کاهش حجم رواناب بود و

4 Liu
5 the markov chain
6 Randall
7 Multi-objective Decision
8 Churchman
9 Acoff
10 Arnoff

1 Jia
2 Campisano
3 Wang



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

Fig. 1. Location of the study region

شانون^۱، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک، اولویت‌بندی شدند. از طرفی به دلیل وجود دو شاخص عدم قطعیت اقتصادی و اجتماعی، از الگوریتم Fuzzy TOPSIS، براساس وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی، برای اولویت‌بندی راهکارهای ارائه شده استفاده شد و بهترین روش LID، انتخاب گردید.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

شهرک سپهان‌شهر در ۳/۵ کیلومتری جنوب غربی اصفهان با طول جغرافیایی $51^{\circ} 40' 28''$ شرقی و عرض جغرافیایی $33^{\circ} 33' 57''$ شمالی واقع شده است. این محدوده در سال ۱۳۷۱ شمسی جانمایی شد و عملیات اجرایی آن به مساحت ۴۱۱۷۹۱۲ متر مربع آغاز گردید. موقعیت منطقه مطالعاتی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

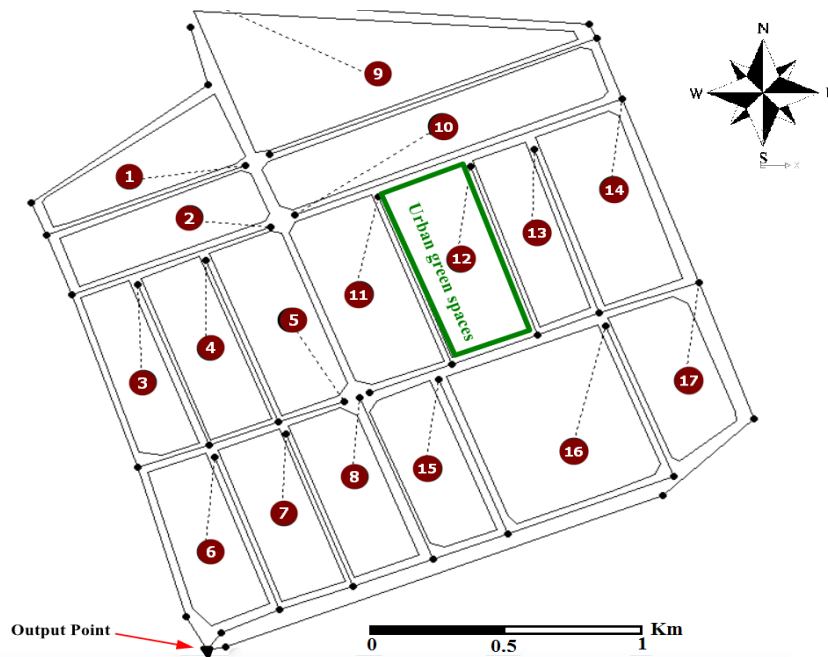
این شهرک به دلیل داشتن شیب متوسط ۴ درصدی (که جهت شیب از شمال به جنوب می‌باشد) و عدم وجود کانال برای هدایت رواناب در برخی خیابان‌های منطقه مطالعاتی، با مشکل آبرفتگی معابر بخصوص در قسمت جنوبی مواجه است. از طرفی موقعیت جغرافیایی این منطقه سبب شده است که باران‌ها به صورت رگباری با شدت زیاد و مدت کم رخ دهند که در بازه زمانی کوتاهی شاهد آبرفتگی خیابان‌های این شهرک هستیم. بنابراین وجود راهکارهای مدیریت رواناب شهری در این منطقه، لازم و ضروری است.

منظور اولویت‌بندی این روش‌ها در منطقه مطالعاتی، بر اساس ۴ شاخص تصمیم‌گیری، از الگوریتم TOPSIS، در حالت‌های وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک، و از الگوریتم Fuzzy TOPSIS، در حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی، استفاده شده است. در نهایت نیز بهترین روش‌ها نیز در منطقه مطالعاتی مورد نظر معرفی شده‌اند.

۲-۲ مواد و روش‌ها

ابتدا با شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری شهرک سپهان‌شهر در مدل SWMM، مقدار حجم و دبی اوج رواناب کل حوضه در خروجی منطقه مطالعاتی به دست آمد. سپس با اعمال ۶ روش توسعه‌ای کم اثر «بشکه باران»، «آسفالت نفوذپذیر»، «ترانشه نفوذ»، «سیستم نگهداشت زیستی»، «آسفالت نفوذپذیر-ترانشه نفوذ» و «بشکه باران-سیستم نگهداشت زیستی»، میزان حجم و دبی اوج رواناب کاهش یافته در اثر هر کدام از این روش‌ها بررسی شد. بعد از این مرحله و به منظور تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین روش LID، از ۴ شاخص تصمیم‌گیری «حجم رواناب» کاهش یافته، «دبی اوج رواناب» کاهش یافته، «اقتصادی» و «اجتماعی» استفاده شده است. در نهایت، هر یک از روش‌های توسعه کم اثر، با بکارگیری الگوریتم TOPSIS، در حالت‌های وزن‌دهی آنتروپی

1 Shannon entropy



شکل ۲. حوضه‌بندی شهرک سپاهان شهر و خروجی حوضه

Fig. 2. Location of sub-catchment and output point of catchment

میدانی و با کمک نرم‌افزار Civil 3D به دست آمدند. اطلاعات هواشناسی (شامل رابطه و منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی بارش‌ها، مقادیر مشاهداتی بارش‌ها در چند رویداد مشخص و ...) که از طریق روابط و نمودارهای ارائه شده توسط صفوی و همکاران [۱۳] و داده‌های ارائه شده توسط سازمان هواشناسی تهیه شدند. مقادیر شدت بارش‌ها بر حسب میلی‌متر بر ساعت در ۶ دوره بازگشت مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بدست آمده است که این مقادیر بر حسب مدت تداوم، در جدول ۱ و نمودارهای شکل ۳ آورده شده‌اند [۱۳].

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شدت بارش در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله دارای بیشترین مقدار و دوره بازگشت ۲ ساله دارای کمترین مقدار و در پایین‌ترین قسمت نمودار قرار گرفته است.

۲-۲-۲ شاخص اقتصادی (هزینه)

یکی از اصلی‌ترین بخش‌های انجام هر پروژه‌ای، بخش اقتصادی و هزینه‌هایی است که اجرای آن طرح به همراه دارد. در این پژوهش ابتدا مساحت تحت پوشش هر روش LID تعیین شد. سپس هزینه اجرای هر یک از سناریوهای مدیریت رواناب شهری در کل حوضه و با توجه به

در این پژوهش شهرک سپاهان شهر به ۱۷ زیر حوضه تقسیم‌بندی شده است که در ۱۶ زیر حوضه به بررسی روش‌های LID پرداخته شد (به غیر از زیر حوضه ۱۲ که فضای سبز شهری است و به خودی خود شامل یکی از روش‌های توسعه کم اثر می‌شود، لذا سعی شده است، سناریوها در زیرحوضه‌هایی اعمال شوند که ماهیت روش‌های توسعه کم اثر را نداشته باشند). در شکل ۲ نحوه حوضه‌بندی منطقه مطالعاتی و خروجی حوضه، نشان داده شده است.

۲-۲-۲ شاخص‌های تصمیم‌گیری

۲-۲-۱- شاخص حجم و دبی اوج رواناب

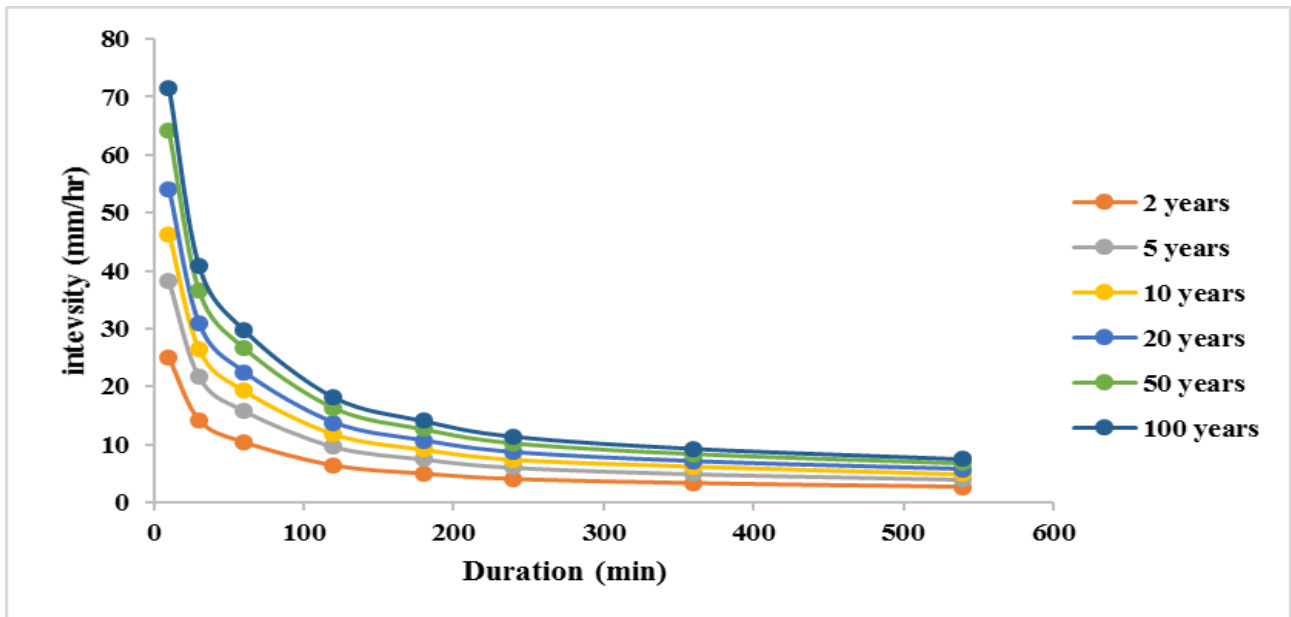
برای به دست آوردن میزان حجم و دبی اوج رواناب کاهش‌یافته در اثر اعمال روش‌های LID، شبیه‌سازی رواناب سطحی شهر، یک‌بار بدون در نظر گرفتن روش‌های LID و بار دیگر با اعمال این روش‌ها انجام شد.

اطلاعات ورودی به مدل SWMM، جهت انجام شبیه‌سازی عبارت بودند از: اطلاعات زیرحوضه‌ها (شامل مساحت، محیط، درصد مناطق نفوذناپذیر، عدد منحنی رواناب، شیب متوسط هر زیرحوضه و غیره) که با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های طرح تفصیلی بازدیدهای

جدول ۱. مقادیر شدت-مدت-فراوانی بارش‌ها برای دوره بازگشت‌های مختلف در اصفهان

Table 1. Intensity-Duration-Frequency values of precipitation for different return periods in Isfahan

۴۵۰	۳۶۰	۲۴۰	۱۸۰	۱۲۰	۶۰	۳۰	۱۰	تداوم (دقیقه) دوره بازگشت (سال)
۲/۶۱۲	۳/۲۶۴	۳/۹۷۶	۴/۹۱۲	۶/۳۳۳	۱۰/۳۹۰	۱۴/۲۶۴	۲۵/۰۰۲	۲
۳/۹۹۴	۴/۹۶۱	۶/۰۷۵	۷/۵۰۳	۹/۶۷۲	۱۵/۸۶۴	۲۱/۷۵۶	۳۸/۱۸۶	۵
۴/۸۴۸	۶/۲۰۱	۷/۳۷۳	۹/۱۰۵	۱۱/۷۳۷	۱۹/۲۴۹	۲۶/۴۰۰	۴۶/۲۹۱	۱۰
۵/۶۶۵	۷/۰۳۵	۸/۶۱۴	۱۰/۶۳۷	۱۳/۷۱۲	۲۲/۴۷۸	۳۰/۸۳۴	۵۴/۰۷۲	۲۰
۶/۷۲۳	۸/۳۴۹	۱۰/۲۲۲	۱۲/۶۲۳	۱۶/۲۷۱	۲۶/۶۸۲	۳۶/۵۸۱	۶۴/۱۵۵	۵۰
۷/۵۰۰	۹/۳۱۲	۱۱/۴۰۱	۱۴/۰۷۹	۱۸/۱۴۶	۲۹/۷۵۶	۴۰/۷۹۲	۷۱/۵۴۳	۱۰۰



شکل ۳. دسته منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی ایستگاه هواشناسی اصفهان

Fig. 3. The Intensity-Duration-Frequency curves of Isfahan Meteorological Station

مطالعات قبلی و فهرست بهای ابنیه تعیین گردید.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

۲-۲-۳ شاخص اجتماعی

به منظور تعیین سطح پذیرش هر یک از سناریوهای مدیریت رواناب شهری، تعدادی پرسش‌نامه تهیه و توسط متخصصان تکمیل شد. سوالات پرسش‌نامه با گزینه‌های خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم، سطح پذیرش هر یک از روش‌های LID را توسط متخصصین می‌سنجد و در نهایت پرسش‌نامه کیفی توسط مقیاس لیکرت^۱ جهت اولویت‌بندی سناریوها، کمی شد.

عملگرهای حسابی بین دو عدد فازی مثلثی $\tilde{A}=(a,b,c)$ و $\tilde{B}=(a,b,c)$ به صورت زیر می‌باشند [۸]:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a, b, c) \oplus (e, f, g) = (a+e, b+f, c+g) \quad (3)$$

۲-۳-۳ نظریه مجموعه فازی

۲-۳-۱ مجموعه‌های فازی

نظریه مجموعه‌های فازی که برای اولین بار توسط زاده [۱۴] ارائه شده است، راهکاری برای مقابله با عدم قطعیت، می‌باشد. مجموعه فازی A به صورت زیر تعریف می‌گردد که در آن $\mu_A(x)$ تابع عضویت مجموعه فازی A می‌باشد [۸]:

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = (a, b, c) \ominus (e, f, g) = (a-e, b-f, c-g) \quad (4)$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a, b, c) \otimes (e, f, g) \cong (ae, bf, cg) \quad (5)$$

$$r \otimes \tilde{A} \cong (ra, rb, rc) \quad (6)$$

$$\tilde{A} \circ \tilde{B} = (a, b, c) \circ (e, f, g) \cong \left(\frac{a}{g}, \frac{b}{f}, \frac{c}{e} \right) \quad (7)$$

$$A = \left\{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in A, \mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \right\} \quad (1)$$

در این پژوهش نیز برای در نظر گرفتن عدم قطعیت دو شاخص اقتصادی و اجتماعی، از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است.

۲-۳-۲ اعداد فازی

عدد فازی A ، یک مجموعه فازی روی خط اعداد حقیقی است که در دو شرط نرمال بودن و تحدد صدق کند و اعداد فازی، مرسوم‌ترین نوع مجموعه‌های فازی می‌باشند. اعداد فازی انواع مختلفی دارند، که یکی از آن‌ها عدد فازی مثلثی است. $\tilde{A}=(a, b, c)$ را عدد فازی مثلثی گویند؛ به طوری که a کران پایین، b میانه و c کران بالا می‌باشند. تابع عضویت \tilde{A} به صورت زیر تعریف می‌شود:

۲-۴-۲ وزن‌دهی به معیارها

به طور کلی، وزن دادن به یک معیار، به معنای آن است که نقش آن معیار در تصمیم‌گیری پررنگ‌تر از دیگر معیارها باشد. برای وزن‌دهی به ۴ معیار استفاده شده در این پژوهش در الگوریتم TOPSIS، از وزن‌دهی آنتروپی شانون، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک و در الگوریتم Fuzzy TOPSIS، از وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی استفاده شده است. در وزن‌دهی یکسان، وزن تمامی معیارها با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است. در وزن‌دهی تأکید بر معیار اقتصادی و هیدرولوژیک

1 Likert scale

۲-۴-۲- آنالیز شانون فازی

آنالیز شانون فازی یکی از روش‌های وزن‌دهی به شاخص‌های ماتریس تصمیم می‌باشد و هنگامی از آن استفاده می‌شود که داده‌های ماتریس تصمیم به صورت بازه‌ای یا اعداد فازی باشند. مراحل روش آنالیز شانون فازی به شرح زیر است [۱۵-۱۷]:

گام اول: تبدیل داده‌های فازی به داده‌های بازه‌ای (استفاده از مجموعه برش آلفا). یک مجموعه سطح آلفا از متغیر فازی (\tilde{x}_{ij}) شامل مجموعه عناصری می‌باشد که متعلق به متغیر فازی (\tilde{x}_{ij}) می‌باشند به طوری که درجه عضویت این عناصر از آلفا بزرگتر یا مساوی باشد:

$$(\tilde{x}_{ij})_{\alpha} = \{x_{ij} \in R \mid \mu_{\tilde{x}_{ij}}(x_{ij}) \geq \alpha\} \quad (11)$$

فرم بازه‌ای مجموعه سطح آلفا به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} [x_{ij}^l, x_{ij}^u] &= [(\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^l, (\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^u] = \\ &[\min_{x_{ij} \in R} \{x_{ij} \in R \mid \mu_{\tilde{x}_{ij}}(x_{ij}) \geq \alpha\}, \\ &\max_{x_{ij} \in R} \{x_{ij} \in R \mid \mu_{\tilde{x}_{ij}}(x_{ij}) \geq \alpha\}] \end{aligned} \quad (12)$$

در این رابطه، $0 < \alpha \leq 1$ است که با قرار دادن مقادیر مختلف برای سطح اطمینان یعنی $1 - \alpha$ ، داده فازی به بازه تبدیل می‌شوند.

گام دوم: نرمال‌سازی مقادیر (p_{ij}^u, p_{ij}^l) :

$$\begin{aligned} p_{ij}^l &= \frac{x_{ij}^l}{\sum_{j=1}^m x_{ij}^u}, \\ p_{ij}^u &= \frac{x_{ij}^u}{\sum_{j=1}^m x_{ij}^l} \quad j = 1, \\ &\dots, m, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

گام سوم: تعیین کران بالا و کران پایین بازه به ترتیب با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) قابل محاسبه می‌باشند:

$$h_i^l = \min \left\{ -h_0 \sum_{j=1}^m p_{ij}^l \cdot \ln p_{ij}^l, -h_0 \sum_{j=1}^m p_{ij}^u \cdot \ln p_{ij}^u \right\}, \quad (14)$$

$i = 1, \dots, n$

وزن این معیارهای اقتصادی، کاهش حجم رواناب و دبی اوج، تقریباً دو برابر دیگر شاخص‌ها، است. در ادامه به مراحل دو روش وزن‌دهی آنالیز شانون و آنالیز شانون فازی می‌پردازیم.

۲-۴-۱- آنالیز شانون

در این روش فقط از اطلاعات ماتریس تصمیم استفاده می‌شود و پراکندگی بیشتر در مقادیر یک شاخص، نشان‌دهنده اهمیت بیشتر آن شاخص می‌باشد. در واقع، اهمیت هر یک از شاخص‌ها نسبت به یکدیگر، از خود اعداد درون ماتریس تعیین می‌شود. به عنوان مثال، اگر مقادیر یک شاخص در ماتریس تصمیم یکسان باشند، این شاخص نمی‌تواند اطلاعات زیادی در اختیار ما بگذارد، بنابراین از درجه اهمیت بالایی هم برخوردار نمی‌باشد. گام‌های روش آنالیز شانون به شرح زیر است [۱۵]:

گام اول: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم. ماتریس تصمیم ترجیحاً با روش نرم مجموع، نرمال می‌گردد.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}}, \quad i=1, \dots, m, j=1, \quad (8)$$

که در این رابطه X_{ij} درایه‌های ماتریس تصمیم می‌باشند.

گام دوم: محاسبه میزان آنالیز شانون هر یک از شاخص‌ها (C_j) از فرمول زیر بدست می‌آید (منظور از میزان آنالیز شانون، همان پراکندگی شاخص‌ها می‌باشد):

$$E_j = - \frac{1}{\ln(m)} \left(\sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \right) \quad (9)$$

$i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$

گام سوم: تعیین اندازه عدم اطمینان یا درجه انحراف برای شاخص‌ها (d_j) :

$$d_j = 1 - E_j \quad (10)$$

گام چهارم: تعیین وزن هر یک از شاخص‌ها (W_j) :

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (11)$$

شود، رتبه آن بالاتر خواهد بود. بر این اساس، گزینه ایده‌آل مثبت گزینه‌ای است که بیشترین میزان مطلوبیت (کارآمدترین حالت) و گزینه ایده‌آل منفی، کمترین میزان مطلوبیت (ناکارآمدترین حالت) را داشته باشد.

از دلایل انتخاب این الگوریتم در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) روشی ساده و برای تعداد زیادی از گزینه‌ها و معیارها مناسب است و محدودیتی ندارد.

(۲) با توجه به وجود معیار کیفی در این پژوهش، این روش قابلیت تبدیل معیارهای کیفی را به کمی دارد.

(۳) علاوه بر تعیین گزینه برتر، رتبه سایر گزینه‌ها به صورت عددی بیان می‌شود.

به سه نکته اساسی در این روش باید توجه کرد:

(1) معیار فاصله بین گزینه‌ها در این روش، بر اساس فاصله اقلیدسی است. اگر a و b را دو نقطه در فضای دو بعدی در نظر بگیریم فاصله بین این دو (d) از طریق فرمول (۲۰) بدست می‌آید:

$$d(a,b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (20)$$

(۲) مطلوبیت هر یک از شاخص‌ها (C_i)، باید به صورت یکنوا (افزاینده یا کاهنده) باشد.

(۳) شاخص‌ها باید از یکدیگر مستقل باشند.

مراحل روش TOPSIS در هشت گام زیر خلاصه می‌شود [۱۹].

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم.

گام دوم: بی‌مقیاس سازی یا نرمال سازی ماتریس تصمیم (N). برای این منظور بهترین روش نرم اقلیدسی می‌باشد که در فرمول (۲۱) آورده شده است:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{ij})^2}} \quad (21)$$

که در این رابطه X_{ij} درایه‌های ماتریس تصمیم و r_{ij} درایه‌های ماتریس تصمیم نرمال می‌باشند.

گام سوم: تعیین بردار وزن شاخص‌ها (W). برای این کار از روش‌های متفاوتی مانند: مقایسات زوجی، وزن دهی ساده، آنتروپی و غیره می‌توان

$$h_i^u = \max \left\{ -h_0 \sum_{j=1}^m p_{ij}^l \cdot \ln p_{ij}^l, -\sum_{j=1}^m p_{ij}^u \cdot \ln p_{ij}^u \right\}, \quad (15)$$

$$i = 1, \dots, n$$

در روابط بالا $h_0 = (Lnm)^{-1}$ است و اگر p_{ij}^l و p_{ij}^u برابر صفر باشند، آنگاه $p_{ij}^l \cdot \ln p_{ij}^l$ و $p_{ij}^u \cdot \ln p_{ij}^u$ برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

گام چهارم: کران پایین و کران بالا درجه تنوع به ترتیب از روابط (۱۶) و (۱۷) بدست می‌آیند:

$$d_i^l = 1 - h_i^u, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

$$d_i^u = 1 - h_i^l, \quad i = 1, \dots, n \quad (17)$$

گام پنجم: کران بالا و پایین برای وزن معیار λ_m به ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) بدست می‌آیند:

$$w_i^l = \frac{d_i^l}{\sum_{i=1}^n d_i^l}, \quad i = 1, \dots, n \quad (18)$$

$$w_i^u = \frac{d_i^u}{\sum_{i=1}^n d_i^u}, \quad i = 1, \dots, n \quad (19)$$

۲-۵- الگوریتم TOPSIS

این روش برای اولین بار توسط هوانگ^۱ و یون^۲ [۱۸] در سال ۱۹۸۱ ارائه شده است و یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه محسوب می‌شود. در این روش رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس بیشترین میزان شباهت یا نزدیکی به گزینه ایده‌آل مثبت و کمترین میزان شباهت به گزینه ایده‌آل منفی صورت می‌گیرد. این بدین معناست که سایر گزینه‌ها نسبت به گزینه ایده‌آل مثبت و منفی، مقایسه می‌گردند. اگر گزینه‌ای به ایده‌آل منفی نزدیک گردد، رتبه آن پایین‌تر و اگر گزینه‌ای به ایده‌آل مثبت نزدیک

1 Hwange

2 Yoon

گام هشتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها. هر گزینه که مقدار $C_i^{(*)}$ آن بیشتر باشد، گزینه بهتری محسوب می‌گردد.

۲-۶- الگوریتم Fuzzy TOPSIS

این روش نیز، همانند TOPSIS، یکی از روش‌های معروف و پرکاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره، جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌باشد، با این تفاوت که در محیط فازی به کار گرفته می‌شود. این الگوریتم علاوه بر در نظر گرفتن عوامل عدم قطعیت در حل مسأله، از سادگی و سرعت مناسبی برخوردار است. برای استفاده از این روش، وزن هر یک از معیارها باید توسط روش‌هایی همچون AHP یا آنتروپی شانون فازی محاسبه گردد. روش Fuzzy TOPSIS در ۶ گام خلاصه می‌شود [۲۰]:

گام اول: ایجاد ماتریس تصمیم فازی. در ماتریس تصمیم فازی، بر خلاف ماتریس تصمیم قطعی، هر درایه شامل سه عدد می‌باشد که نمایان‌گر کران بالا، کران وسط و کران پایین هستند.

گام دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم فازی (\tilde{r}_{ij}). برای بدست آوردن

ماتریس نرمال فازی، در صورتی که معیار مثبت باشد از فرمول (۲۸) و اگر معیار منفی باشد از فرمول (۲۹) استفاده می‌گردد:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right) \rightarrow c_j^* = \max c_{ij} \quad (28)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right) \rightarrow a_j^- = \min a_{ij} \quad (29)$$

که در آن a_{ij} حد پایین، b_{ij} کران وسط و c_{ij} کران بالا ماتریس تصمیم فازی می‌باشد.

گام سوم: ایجاد ماتریس نرمال وزن دار (\tilde{v}_{ij}) برای این منظور ماتریس نرمال را در وزن هر معیار (w_j) ضرب می‌کنیم.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * w_j \quad (30)$$

گام چهارم: مشخص نمودن ایده‌آل مثبت (A^*) و ایده‌آل منفی (A^-) فازی. ایده‌آل مثبت برابر با بزرگترین درایه هر ستون و ایده‌آل منفی برابر با

استفاده کرد. در این پژوهش از وزن‌دهی آنتروپی شانون استفاده شده است که در ادامه به شرح مراحل این روش می‌پردازیم.

گام چهارم: تعیین ماتریس تصمیم نرمال وزن دار (V). این ماتریس از ضرب ماتریس تصمیم نرمال در بردار وزن معیارها بدست می‌آید.

$$V_{ij} = W_j \times r_{ij} \quad (22)$$

گام پنجم: تعیین گزینه ایده‌آل مثبت و منفی. گزینه ایده‌آل مثبت (بردار) از بهترین گزینه‌های موجود در هر ستون و گزینه ایده‌آل منفی (بردار) از بدترین گزینه‌های موجود در هر ستون می‌باشد. در واقع ایده‌آل مثبت، بیشترین مقدار هر ستون در ماتریس و ایده‌آل منفی، کمترین مقدار هر ستون در ماتریس می‌باشد و به ترتیب از روابط (۲۳) و (۲۴) بدست می‌آیند:

$$A^{(+)} = \{ \max v_{i1}, \max v_{i2}, \dots, \max v_{in} \} \quad (23)$$

$$A^{(-)} = \{ \min v_{i1}, \min v_{i2}, \dots, \min v_{in} \} \quad (24)$$

گام ششم: محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی. فاصله از گزینه ایده‌آل مثبت ($S_i^{(*)}$) و فاصله از گزینه ایده‌آل منفی ($S_i^{(-)}$) به ترتیب از روابط (۲۵) و (۲۶) بدست می‌آیند:

$$S_i^{(+)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - \max v_{ij})^2} \quad (25)$$

$$S_i^{(-)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - \min v_{ij})^2} \quad (26)$$

گام هفتم: محاسبه نزدیکی نسبی به ایده‌آل مثبت ($C_i^{(*)}$). این مقدار همواره بین صفر و یک می‌باشد و هر چه گزینه به ایده‌آل مثبت نزدیک‌تر شود مقدار $C_i^{(*)}$ به عدد یک نزدیک‌تر خواهد شد. مقدار $C_i^{(*)}$ از رابطه (۲۷) بدست می‌آید:

$$C_i^{(*)} = \frac{S_i^{(-)}}{S_i^{(+)} + S_i^{(-)}} \quad (27)$$

جدول ۲. مقادیر حجم رواناب کاهش یافته در اثر استفاده از هر یک از سناریوها

Table 2. Reduction of runoff volume due to the use of the scenarios

سناریوها	روکش نفوذ پذیر	ترانشه نفوذ	سیستم نگهداشت زیستی	بشکه باران	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران	ترانشه نفوذ + روکش نفوذ پذیر
کاهش حجم (m ³)	۲۹۰۳	۳۸۱	۴۳۲	۲۸۱۷	۳۳۰۵	۳۳۳۷

جدول ۳. مقادیر دبی اوج رواناب کاهش یافته در اثر استفاده از هر یک از سناریوها

Table 3. Reduction of peak discharge of runoff due to use of the scenarios

سناریوها	روکش نفوذ پذیر	ترانشه نفوذ	سیستم نگهداشت زیستی	بشکه باران	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران	ترانشه نفوذ + روکش نفوذ پذیر
کاهش دبی اوج (m ³ /s)	۰/۳۷۲	۰/۰۳۹	۰/۰۵۲	۰/۳۴۲	۰/۴	۰/۴۱۷

کوچکترین درایه هر ستون می باشد.

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (35)$$

گام هفتم: رتبه بندی گزینه ها. بر اساس ترتیب نزولی CC_i گزینه های موجود رتبه بندی می شوند. یعنی هر چه مقدار شاخص شباهت بیشتر باشد، در رتبه بالاتر و هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، در رتبه پایین تر قرار خواهد گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجزیه تحلیل هیدرولوژیک

با اجرای ۶ سناریوی مدیریت رواناب سطحی، مقادیر حجم و دبی رواناب کل حوضه کاهش یافت. این روش ها در ۱۶ زیرحوضه منتخب از تعداد ۱۷ زیرحوضه (به غیر از زیرحوضه ۱۲)، اعمال شدند. در هر زیرحوضه، بسته به نوع منطقه و پتانسیل اجرای هر روش، نسبت های متفاوتی از مساحت برای هر کدام از این روش ها در نظر گرفته شده است که این موضوع منجر به تفاوت در میزان حجم و دبی اوج رواناب کاهش یافته شده است. در جداول ۲ و ۳، به ترتیب مقادیر حجم رواناب کاهش یافته و دبی اوج کاهش یافته، نشان داده شده اند.

با توجه به نتایج جدول بالا مشاهده می شود که بیشترین میزان

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_1^*, \dots, \tilde{v}_n^*) \text{ where } \tilde{v}_j^* = (\tilde{c}_j^*, \tilde{c}_j^*, \tilde{c}_j^*) \text{ and } \tilde{c}_j^* = \max \{ \tilde{c}_{ij} \} \quad (31)$$

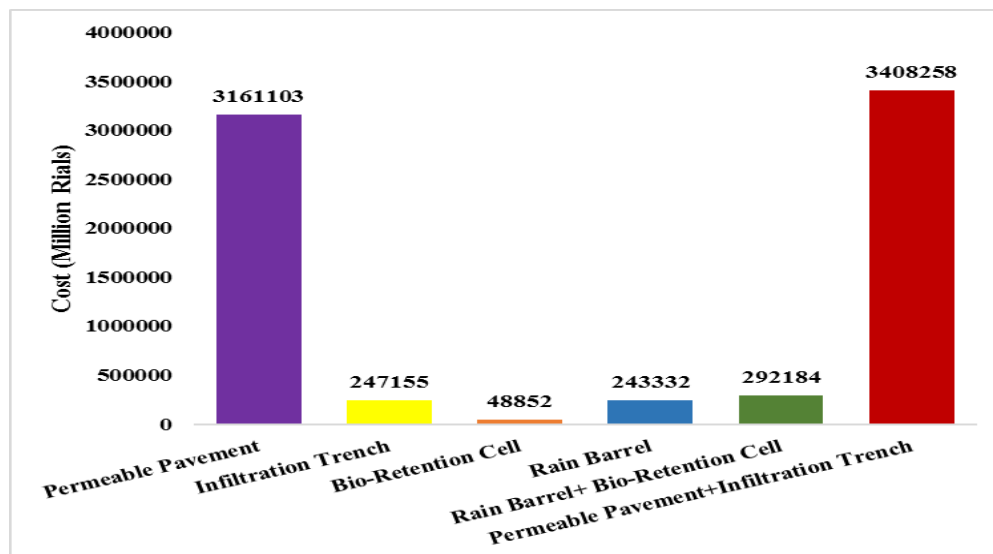
$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_1^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \text{ where } \tilde{v}_j^- = (\tilde{a}_j^-, \tilde{a}_j^-, \tilde{a}_j^-) \text{ and } \tilde{a}_j^- = \min \{ \tilde{a}_{ij} \} \quad (32)$$

گام پنجم: محاسبه فواصل از ایده آل مثبت (d_i^+) و منفی (d_i^-) که از فرمول (۳۳) و (۳۴) قابل محاسبه است:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n dv(\tilde{v}_{ij}^*, \tilde{v}_j^*), \quad i=1,2,\dots,m \quad (33)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n dv(\tilde{v}_{ij}^-, \tilde{v}_j^-), \quad i=1,2,\dots,m \quad (34)$$

گام ششم: محاسبه شاخص شباهت به گزینه ایده آل (CC_i).



شکل ۴. نمودار ستونی هزینه کل هر یک از سناریوها

Fig. 4. Column diagram regarding the total cost of each of the scenarios

و کاهش حجم رواناب، با ۵ گزینه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، مورد بررسی قرار می‌دهد. سپس برای تبدیل نتایج پرسشنامه به اعداد فازی، میانگین هر یک از گزینه‌های خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به عنوان کران وسط، کمترین و بیشترین درصد پذیرش که توسط متخصصان به سناریو تعلق گرفته است، به ترتیب به عنوان کران پایین و کران بالا، در نظر گرفته شده‌اند. سپس با انتقال نتایج به نرم‌افزار SPSS، درصد فراوانی، میانگین و انحراف معیار هر یک از روش‌ها بدست آمد. جدول ۴ و نمودار ستونی شکل ۵، درصد فراوانی پذیرش هر یک از سناریوها را که توسط متخصصین تکمیل شده‌اند، نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴ و نمودار شکل ۵ می‌توان دریافت که از دید متخصصان، سناریوهای ترکیبی روکش نفوذپذیر+ترانشه نفوذ و بعد از آن سیستم نگهداشت‌زیستی+بشکه باران کارآمدترین سناریوها، جهت مدیریت رواناب شهری، در منطقه مطالعاتی موردنظر بوده و بیشترین درصد فراوانی را در گزینه زیاد و خیلی زیاد، دارند. سناریوی ترانشه نفوذ، با آرای ۴۰ درصدی متخصصین به گزینه خیلی کم، از کارآمدی کمتری نسبت به سایر سناریوها، برخوردار بوده است.

همان‌طور که از جدول ۵ پیداست، سناریوی ترکیبی روکش نفوذپذیر- ترانشه نفوذ، با میانگین ۷/۵، دارای بیشترین سطح پذیرش و ترانشه نفوذ، با

حجم و دبی اوج رواناب کاهش یافته مربوط به اجرای روش ترکیبی « روکش نفوذپذیر-ترانشه نفوذ» است. با اجرای این روش حجم و دبی اوج رواناب به ترتیب ۳۳۳۷ متر مکعب و ۰/۴۱۷ متر مکعب بر ثانیه کاهش می‌یابند.

۳-۲- نتایج تجزیه تحلیل اقتصادی (هزینه)

در نمودار شکل ۴، هزینه اجرای هریک از روش‌های LID، نشان داده شده است:

طبق نمودار شکل ۴ بیشترین هزینه را سناریوی ترکیبی روکش نفوذپذیر- ترانشه نفوذ و کمترین هزینه را سناریوی سیستم نگهداشت‌زیستی به خود اختصاص داده‌اند.

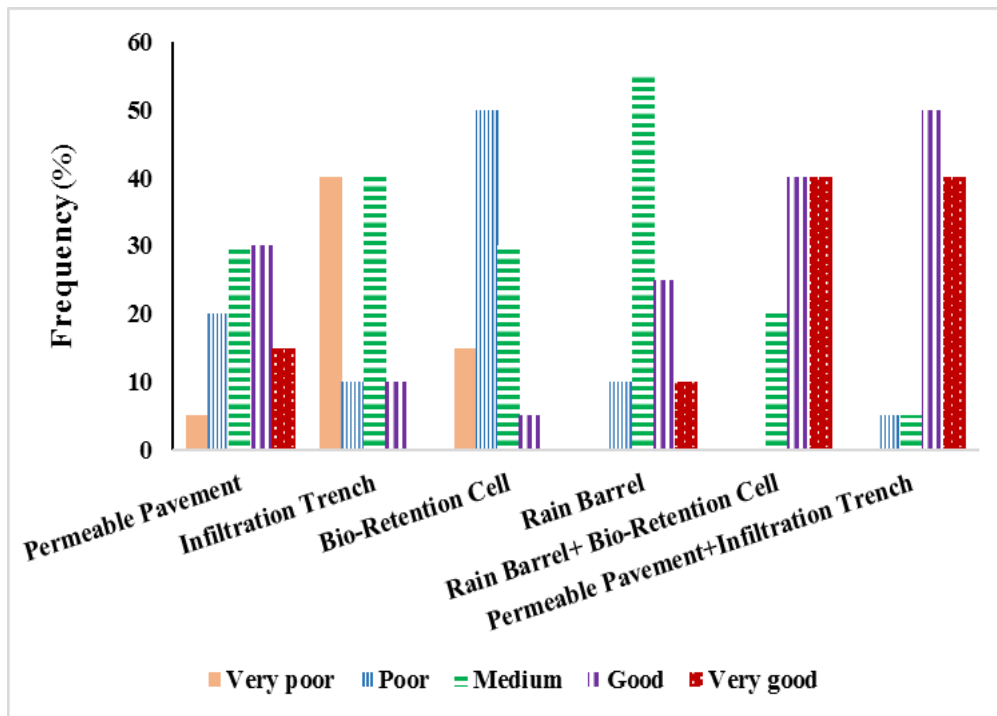
۳-۳- نتایج شاخص اجتماعی

برای سنجیدن میزان پذیرش هر یک از سناریوها توسط متخصصان محلی منطقه مطالعاتی، تعداد ۲۰ عدد پرسشنامه، تکمیل شد. پرسش‌نامه شامل سؤالاتی است که میزان آبگرفتنی معابر، انتقال آلودگی توسط رواناب، میزان عملکرد شهرداری منطقه مطالعاتی در خصوص مدیریت رواناب شهری، مؤثر بودن روش‌های توسعه کم اثر در کاهش حجم رواناب و میزان کارآمدی هر یک از سناریوهای مدیریت رواناب شهری را در کاهش آبگرفتنی معابر

جدول ۴. درصد فراوانی پذیرش سناریوها از نظر متخصصان

Table 4. The frequency of acceptance of the scenarios completed by the experts

سناریو/ میزان پذیرش	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
روکش نفوذپذیر	۵	۲۰	۳۰	۳۰	۱۵
ترانشه نفوذ	۴۰	۱۰	۴۰	۱۰	۰
سیستم نگهداشت زیستی	۱۵	۵۰	۳۰	۵	۰
بشکه باران	۰	۱۰	۵۵	۲۵	۱۰
سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران	۰	۰	۲۰	۴۰	۴۰
روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ	۰	۵	۵	۵۰	۴۰



شکل ۵. نمودار درصد فراوانی هر یک از سناریوها از دید متخصصین

Fig. 5. Diagram regarding the percentage of frequency for each scenario from the viewpoint of experts

جدول ۵. میانگین، انحراف معیار و اولویت هر یک از سناریوهای مدیریت رواناب شهری از نظر متخصصان

Table 5. Average, standard deviation and priority of the urban runoff management scenarios from the viewpoint of experts

سناریو	میانگین	انحراف معیار	اولویت
روکش نفوذپذیر	۵/۶	۲/۲۵	۴
ترانشه نفوذ	۳/۴	۲/۲۱	۶
سیستم نگهداشت زیستی	۳/۵	۱/۵۷	۵
بشکه باران	۵/۷	۱/۶۲	۳
سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران	۷/۴	۱/۵۳	۲
روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ	۷/۵	۱/۵۷	۱

جدول ۶. مقادیر نسبت‌های وزن‌دهی به شاخص‌ها

Table 6. Values of weighting ratios to criteria

وزن‌دهی	کاهش دبی	کاهش حجم	هزینه	اجتماعی
آنتروپی شانون	۱۵/۱۷	۱۴/۳۷۹	۶۷/۴۶۳	۲/۹۸۸
وزن‌دهی یکسان	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
تأکید بر معیار اقتصادی	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰
تأکید بر معیار هیدرولوژیک	۳۴	۳۴	۱۶	۱۶

میانگین ۳/۴، کمترین سطح پذیرش را دارا می‌باشد.

هیدرولوژیک، دو شاخص کاهش دبی و کاهش حجم، وزنی تقریباً دو برابر از شاخص‌های دیگر را به خود اختصاص داده‌اند، در نتیجه از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. لازم به ذکر است که مجموع وزن همه شاخص‌ها در حالت‌های وزن‌دهی مختلف برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

۳-۴ نتایج وزن‌دهی در حالت قطعی

در حالت قطعی و برای الگوریتم TOPSIS، از چهار حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیک استفاده شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

۳-۵ نتایج وزن‌دهی در حالت عدم قطعیت

برای استفاده از الگوریتم Fuzzy TOPSIS، در حالت عدم قطعیت، از روش آنتروپی شانون فازی استفاده شد که برای این منظور ابتدا به تشکیل ماتریس تصمیم فازی می‌پردازیم. لازم به ذکر است که دو شاخص اجتماعی و اقتصادی (هزینه)، به دلیل عدم قطعیت بودن آن‌ها، به فرم اعداد فازی مثلثی می‌باشند و بدینانه‌ترین مقدار، محتمل‌ترین مقدار و خوش‌بینانه‌ترین مقدار هر یک در نظر گرفته شده است. دو شاخص کاهش دبی و کاهش

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، شاخص هزینه، در حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون، از پراکندگی بیشتری برخوردار بوده است، در نتیجه مقدار بیشتری از سه شاخص دیگر را به خود اختصاص داده است و وزن و اهمیت بالاتری دارد. در وزن‌دهی یکسان، اهمیت هر سه شاخص به طور یکسان در نظر گرفته شده است. در حالت وزن‌دهی تأکید بر معیار اقتصادی، شاخص هزینه، وزنی دو برابر و در حالت وزن‌دهی تأکید بر معیار

جدول ۷. ماتریس تصمیم فازی

Table 7. The fuzzy decision matrix

ماتریس تصمیم	کاهش دبی اوج رواناب (C1)	کاهش حجم رواناب* (C2) ۱۰ ^۲	اقتصادی (C3)	اجتماعی (C4)
آسفالت نفوذپذیر (A1)	(۰/۳۷۲، ۰/۳۷۲) (۰/۳۷۲)	(۲۹۰۳، ۲۹۰۳، ۲۹۰۳)	(۳۱۶۱۱۰۳، ۶۷۰۵۳۷۰) (۲۳۹۴۷۷۵)	(۱، ۵/۶، ۹)
ترانشه نفوذ (A2)	(۰/۰۳۹، ۰/۰۳۹) (۰/۰۳۹)	(۳۸۱، ۳۸۱، ۳۸۱)	(۲۴۷۱۵۵، ۴۱۱۷۷۰) (۱۶۴۷۰۸)	(۱، ۳/۴، ۷)
سیستم نگهداشت زیستی (A3)	(۰/۰۵۲، ۰/۰۵۲) (۰/۰۵۲)	(۴۳۲، ۴۳۲، ۴۳۲)	(۳۱۱۹۲، ۴۸۸۵۲، ۶۲۳۸۴)	(۱، ۳/۵، ۷)
بشکه باران (A4)	(۰/۳۴۲، ۰/۳۴۲) (۰/۳۴۲)	(۲۸۱۷، ۲۸۱۷، ۲۸۱۷)	(۲۴۳۳۳۲، ۲۸۶۷۵۵) (۲۴۰۸۲۵)	(۳، ۵/۷، ۹)
سیستم نگهداشت زیستی+بشکه باران (A5)	(۰/۴، ۰/۴، ۰/۴)	(۳۳۰۵، ۳۳۰۵، ۳۳۰۵)	(۲۹۲۱۸۴، ۳۴۹۱۳۹) (۲۳۶۰۱۷)	(۵، ۷/۴، ۹)
روکش نفوذپذیر+ترانشه نفوذ (A6)	(۰/۴۱۷، ۰/۴۱۷) (۰/۴۱۷)	(۳۳۳۷، ۳۳۳۷، ۳۳۳۷)	(۳۴۰۸۲۵۸، ۷۱۱۷۱۴۰) (۲۵۵۹۴۸۳)	(۵، ۷/۶، ۹)

۳-۶- نتایج روش TOPSIS

نتایج اولویت‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش TOPSIS در جداول ۹ تا ۱۲ ارائه شده است. با توجه به روابط گفته شده، نزدیکی نسبی به ایده‌آل مثبت برای هر سناریو بدست آمده است که این مقادیر هموار بین صفر و یک می‌باشد. هر چه این مقدار به عدد یک نزدیکتر باشد، سناریو به جواب ایده‌آل نزدیک‌تر و راهکار بهتری می‌باشد.

با توجه به جداول ۹ تا ۱۲ می‌توان دریافت که در حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون بهترین سناریو بشکه باران و در حالت‌های وزن‌دهی یکسان و تأکید بر معیار اقتصادی و هیدرولوژیک، بهترین سناریو، سناریوی ترکیبی سیستم نگهداشت زیستی-بشکه باران در منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

۳-۷- نتایج روش Fuzzy TOPSIS

برای استفاده از این الگوریتم، از ماتریس فازی جدول شماره ۷ و برای وزن‌دهی به معیارها از روش آنتروپی شانون فازی که نتایج آن در جدول شماره ۸، آورده شده است، استفاده شد. جدول ۱۳ نتایج بدست آمده از روش

حجم رواناب به دلیل قطعی بودن که از نرم‌افزار SWMM بدست آمده‌اند، بدبینانه‌ترین مقدار، محتمل‌ترین مقدار و خوش‌بینانه‌ترین مقدار یکسان در نظر گرفته می‌شوند، مانند: (۰/۳۷۲، ۰/۳۷۲، ۰/۳۷۲). ماتریس تصمیم فازی نهایی در جدول ۷ نشان داده شده است:

پس از تشکیل ماتریس تصمیم فازی، با استفاده از فرمول (۹)، اعداد فازی به بازه تبدیل می‌شوند که برای این منظور مقدار α برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. پس از این، مقادیر نرمال شده $[p_{ij}^u, p_{ij}^l]$ ، کران بالا و کران پایین بازه آنتروپی $[h_i^l, h_i^u]$ ، درجه تنوع $[d_i^l, d_i^u]$ ، کران پایین و بالای وزن هر معیار $[w_i^l, w_i^u]$ و در آخر وزن نهایی هر معیار توسط میانگین حسابی به صورت $w_j = \frac{w_i^l + w_i^u}{2}$ ، محاسبه شده است. نتایج محاسبات وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به جدول ۸، وزن معیار C_3 (هزینه)، از همه بیشتر و از اهمیت بالاتری برخوردار است.

جدول ۸. داده‌های نرمال شده، بازه آنتروپی، بازه درجه تنوع معیارها، بازه وزن معیارها و وزن نهایی معیارها

Table 8. Computations of Fuzzy Shannon's entropy method

معیارها	(C1) $[p_{ij}^u, p_{ij}^l]$	(C2) $[p_{ij}^u, p_{ij}^l]$	(C3) $[p_{ij}^u, p_{ij}^l]$	(C4) $[p_{ij}^u, p_{ij}^l]$
(A1)	[۰/۲۲۹, ۰/۲۲۹]	[۰/۲۲, ۰/۲۲]	[۰/۲۴۸, ۰/۷۵۹]	[۰/۰۷۹, ۰/۰۲۹]
(A2)	[۰/۰۲۴, ۰/۰۲۴]	[۰/۰۲۸, ۰/۰۲۸]	[۰/۰۱۸, ۰/۰۰۵]	[۰/۰۵۲, ۰/۲۱۱]
(A3)	[۰/۰۳۲, ۰/۰۳۲]	[۰/۰۳۲, ۰/۰۳۲]	[۰/۰۰۳, ۰/۰۰۸]	[۰/۰۵۴, ۰/۲۱۳]
(A4)	[۰/۲۱, ۰/۲۱]	[۰/۲۱۳, ۰/۲۱۳]	[۰/۰۰۲, ۰/۰۰۴]	[۰/۱۰۴, ۰/۲۹۸]
(A5)	[۰/۲۴۶, ۰/۲۴۶]	[۰/۲۵, ۰/۲۵]	[۰/۰۲۳, ۰/۰۴۹]	[۰/۱۴۹, ۰/۳۳۳]
(A6)	[۰/۲۵۷, ۰/۲۵۷]	[۰/۲۵۳, ۰/۲۵۳]	[۰/۲۶۷, ۰/۸۱]	[۰/۱۵۱, ۰/۳۳۷]
$[h_i^l, h_i^u]$	[۰/۸۷, ۰/۸۷]	[۰/۸۷۷, ۰/۸۷۷]	[۰/۲۸۳, ۰/۴۴۸]	[۰/۷۳۶, ۱, ۱۷۸]
$[d_i^l, d_i^u]$	[۰/۱۲۹, ۰/۱۲۹]	[۰/۱۲۲, ۰/۱۲۲]	[۰/۵۵۱, ۰/۷۱۶]	[۰, ۰/۲۶۳]
$[w_i^l, w_i^u]$	[۰/۱۰۴, ۰/۱۰۴]	[۰/۰۹۹, ۰/۱۵۲]	[۰/۴۴۷, ۰/۸۹۲]	[۰, ۰/۳۲۸]
w_j	۰/۱۳۲	۰/۱۲۵	۰/۶۷	۰/۱۶۴

جدول ۹. رتبه‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش TOPSIS در حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون

Table 9. Ranking of urban runoff management scenarios using the TOPSIS method in Shannon's entropy weighting mode

رتبه‌بندی	فاصله نسبی از ایده‌آل مثبت	سناریو
۵	۰/۱۷۴	روکش نفوذپذیر
۴	۰/۸۱۲	ترانشه نفوذ
۳	۰/۸۳	سیستم نگهداشت زیستی
۱	۰/۹۳	بشکه باران
۲	۰/۹۲	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران
۶	۰/۱۷۲	روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ

جدول ۱۰. رتبه‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش TOPSIS در حالت وزن‌دهی یکسان

Table 10. Ranking of urban runoff management scenarios using the TOPSIS method in the equal weighting mode

رتبه‌بندی	شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل	سناریو
۶	۰/۴۷۲	روکش نفوذپذیر
۵	۰/۴۷۶	ترانشه نفوذ
۴	۰/۴۹۸	سیستم نگهداشت زیستی
۲	۰/۸۲۷	بشکه باران
۱	۰/۹۴۴	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران
۳	۰/۵۰	روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ

جدول ۱۱. رتبه‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش Topsis در حالت تأکید بر معیار اقتصادی

Table 11. Ranking of urban runoff management scenarios using the TOPSIS method in the emphasis on economic criteria weighting mode

رتبه‌بندی	شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل	سناریو
۶	۰/۳۱۶	روکش نفوذپذیر
۴	۰/۶۴۴	ترانشه نفوذ
۳	۰/۶۶۵	سیستم نگهداشت زیستی
۲	۰/۸۸	بشکه باران
۱	۰/۹۳	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران
۵	۰/۳۴	روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ

جدول ۱۲. رتبه‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش Topsis در حالت تأکید بر معیار هیدرولوژیک

Table 12. Ranking of urban runoff management scenarios using the TOPSIS method in the emphasis on hydrological criteria weighting mode

رتبه‌بندی	شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل	سناریو
۴	۰/۶۴۲	روکش نفوذپذیر
۶	۰/۳۱۳	ترانشه نفوذ
۵	۰/۳۳۳	سیستم نگهداشت زیستی
۲	۰/۸۱۸	بشکه باران
۱	۰/۹۵	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران
۳	۰/۶۷	روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ

جدول ۱۳. رتبه‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش تاپسیس فازی در حالت وزن‌دهی آنترپی شانون فازی

Table 13. Ranking of urban runoff management scenarios using the Fuzzy TOPSIS method in the fuzzy Shannon's entropy weighting mode

رتبه‌بندی	شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل	سناریو
۵	۰/۲۵۵	روکش نفوذپذیر
۶	۰/۱۶۷	ترانشه نفوذ
۱	۰/۴۲۸	سیستم نگهداشت زیستی
۳	۰/۳۰۱	بشکه باران
۲	۰/۳۱۹	سیستم نگهداشت زیستی + بشکه باران
۴	۰/۲۷۸	روکش نفوذپذیر + ترانشه نفوذ

یکی از مهم‌ترین ابزارهای کیفی پشتیبانی از تصمیم می‌باشد و تلفیق آن با روشی کیفی همچون دیمتال، جهت اولویت‌بندی سناریوهای مورد استفاده در این مطالعه، به پژوهشگران آتی، پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- [1] S.S. Eslamian, S.S. Okhravi, Principles of Designing Rainwater Harvesting Systems (Residential Application), Kankash 2015.
- [2] L.A. Rossman, Storm water management model user's manual, version 5.0, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development 2010.
- [3] H. Jia, Y. Lu, L.Y. Shaw, Y. Chen, Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village, Separation and Purification Technology, 84 (2012) 112-119.
- [4] M. Soleymani, K. Behzadian, A. Ardeshir, Evaluation of strategies for modifying urban storm water drainage system using risk-based criteria, (2015) 16-29.
- [5] A. Campisano, F.V. Catania, C. Modica, Evaluating the SWMM LID Editor rain barrel option for the estimation of retention potential of rainwater harvesting systems, Urban Water Journal, 14 (2017) 876-881.
- [6] Poursahebi, M.Z. Niri, S.M. Ghoudarzi, Simulating of LID-BMP Methods on Urban Runoff (Case Study: District 22, Tehran), Journal of Water and Wastewater, 30 (2019) 114-121. (In Persian)
- [7] Y. Wang, M. Sun, B. Song, Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China, Resources, Conservation and Recycling, 122 (2017) 11-20.
- [8] G. Liu, L. Chen, Z. Shen, Y. Xiao, G. Wei, A fast and robust simulation-optimization methodology for stormwater quality management, Journal of Hydrology, 576 (2019) 520-527.
- [9] M. Randall, F. Sun, Y. Zhang, M.B. Jensen, Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM, Journal of environmental management, 246 (2019) 745-757.

Fuzzy TOPSIS را نشان می‌دهد.

در این روش نیز هر چه شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل، به یک نزدیکتر باشد، سناریو کارآمدتر می‌باشد، بنابراین سیستم نگهداشت زیستی به عنوان سناریوی برتر شناخته می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور اولویت‌بندی روش‌های توسعه کم‌اثر (LID)، جهت مدیریت رواناب سطحی، در شهرک سپاهان شهر اصفهان، انجام شده است. در این پژوهش ۶ سناریو «سیستم نگهداشت زیستی»، «روکش نفوذپذیر»، «بشکه ذخیره باران»، «روکش نفوذپذیر-ترانشه نفوذ» و «بشکه ذخیره باران-سیستم نگهداشت زیستی» استفاده شد. توسط دو الگوریتم تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل: TOPSIS و Fuzzy TOPSIS. با در نظر گرفتن حالت‌های وزن‌دهی آنتروپی شانون، یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیکی برای روش TOPSIS و حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون فازی برای روش Fuzzy TOPSIS، استفاده شد. نتایج نشان داد که در روش TOPSIS و در حالت‌های وزن‌دهی یکسان، تأکید بر معیار اقتصادی و تأکید بر معیار هیدرولوژیکی، سناریوی ترکیبی بشکه باران-سیستم نگهداشت زیستی و در حالت وزن‌دهی آنتروپی شانون، سناریوی بشکه باران به عنوان سناریوی برتر انتخاب شدند. همچنین در روش Fuzzy TOPSIS، سناریوی سیستم نگهداشت زیستی، رتبه اول را کسب نمود. با توجه به متفاوت بودن سناریوی برتر در حالت قطعی و با وزن‌دهی‌های مختلف، انتخاب سناریوی کارآمد باید توسط متخصصان محلی و با توجه به اهمیت هر شاخص، متناسب با منطقه مطالعاتی صورت گیرد. سناریوی برتر سیستم نگهداشت زیستی، حاصل از الگوریتم Fuzzy TOPSIS به دلیل در نظر گرفتن عوامل عدم قطعیت و اجرای آسان این سناریو، در منطقه مطالعاتی پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر این، منطقه موردنظر دارای زمین‌های بسیاری برای اجرای این سناریو می‌باشد و از لحاظ بصری، جلوه ویژه‌ای به نمای شهر می‌بخشد.

با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان برنامه‌ریزی بهتری جهت مدیریت و کنترل رواناب سطحی شهری، در محدوده شهرک سپاهان شهر، انجام داد. همچنین مسئولان و مدیران شهری می‌توانند براساس دیگر سناریوهای مدیریتی و با توجه به اهداف و دیدگاه‌های مختلف خود، به اولویت‌بندی و انتخاب بهترین راهکار جهت مدیریت رواناب سطحی شهری بپردازند. استفاده از آنالیز ماتریس نقاط قوت و ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها (SWOT)، که

- and multi attribute decision making, *Entropy*, 12 (2010) 53-62.
- [16] A.J. Chaghooshi, M.R. Fathi, M. Kashef, Integration of fuzzy Shannon's entropy with fuzzy TOPSIS for industrial robotic system section, *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 5 (2012) 102-114.
- [17] S. Hatefi, N. Koochi Habibi, E. Abdollahi, Evaluating investment potential tourism centers using integrated model of fuzzy Shannon's entropy and fuzzy ARAS method, *Tourism Management Studies*, 14 (2019). (In Persian)
- [18] C.-L. Hwang, A.S.M. Masud, Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey, Springer Science & Business Media 2012.
- [19] H.-S. Shih, H.-J. Shyur, E.S. Lee, An extension of TOPSIS for group decision making, *Mathematical and computer modelling*, 45 (2007) 801-813.
- [20] S.K. Patil, R. Kant, A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers, *Expert systems with applications*, 41 (2014) 679-693.
- [10] A. De Montis, P. De Toro, B. Droste-Franke, I. Omann, S. Stagl, Criteria for quality assessment of MCDA methods, 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics, Vienna, Citeseer, 2000, pp. 3-6
- [11] M.S. Jebel Ameli, A. Rezaeifar, A. Chaeibaaksh Langroudi, Risk ranking of project using multicriteria decision-making processes, *journal of Faculty of Engineering*, 41 (2005) 863-871. (In Persian)
- [12] R. Lagzian, Identifying and prioritizing surface runoff management scenarios using multi-criteria decision making techniques for Neishabour city, *University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2014. (In Persian)
- [13] H.R. Safavi, S. Dadjou, N. G., Extraction of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves Under Climate Change, Case study: Isfahan Synoptic Station, *Iran-Water Resources Research*, 15 (2019) 217-227. (In Persian)
- [14] L.A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Learning systems and intelligent robots*, Springer 1974, pp. 1-10.
- [15] F.H. Lotfi, R. Fallahnejad, Imprecise Shannon's entropy

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Aghili Mahabadi, H. R. Zarif Sanaei, S. M. Hatefi, Prioritization of Low-Impact Development Methods for Management of Urban Surface Runoff, Using the Fuzzy TOPSIS and TOPSIS Method (Case Study: Sepahan-Shahr Town, Isfahan), Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4895-4912.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18619.6909](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18619.6909)

