تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸
Volume 15, No. 1, Spring 2019 (IR-WRR)
۷۶-۹۱

استفاده از ترکیب منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بمنظور مکانیابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب استان قم

مصطفی رضاعلی[۱] و عبدالرضا کریمی[۲*]

چکیده

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به بحث آلودگی آب‌ها شده است که یکی از دلایل آن، کم‌آبی یا خشکسالی است. یکی از روش‌هایی که به برون‌رفت از این بحران کمک شایانی می‌کند، استفاده مجدد از پساب است. در شهرهای بزرگ فاضلاب کل شهر در قالب یک شبکه جمع‌آوری شده و در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متمرکز تصفیه می‌گردد. این رویکرد از جنبه‌های مختلف از جمله هزینه‌های جمع‌آوری فاضلاب، ریسک حوادث غیرمترقبه و استفاده مجدد از پساب تصفیه شده دارای محدودیت‌های زیادی است. در شهرهای با جمعیت کمتر، استفاده از تصفیه‌خانه متمرکز ممکن است از لحاظ زیرساختی و هزینه‌های عملیاتی مسأله داشته باشد. برای این شرایط استفاده از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب غیرمتمرکز در پژوهش‌های مختلف توصیه شده است. لذا شناسایی و مکانیابی جوامعی که دارای بیشترین پتانسیل برای استفاده از تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز هستند بسیار ضروری است. در این تحقیق با استفاده از ترکیب منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، استان قم و مراکز جمعیتی آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و جوامعی که بیشترین پتانسیل اجرای تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز را دارند مکانیابی شده و به هر کدام از این جوامع یک اندیس فازی-سلسله مراتبی تعلق گرفته است. بر این اساس برای استان قم مراکز جمعیتی که بیشترین پتانسیل احداث تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز را دارند بصورت صرم، ورناچ، جنداب، ورجان و کهک اولویت می‌یابد. در پایان برای روستاهای تحت مطالعه مقایسه میزان هزینه احداث شبکه جمع‌آوری فاضلاب تصفیه غیرمتمرکز با روش متمرکز در مدل WPM انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش غیرمتمرکز نسبت به روش متمرکز چندین برابر کم هزینه‌تر است.

کلمات کلیدی: تصفیه فاضلاب، تصفیه‌خانه غیرمتمرکز فاضلاب، تحلیل مکانی فازی، سلسله مراتبی، کاربری پساب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۷/۱۹

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Site Selection of Decentralized Wastewater Treatment Plants in Qom Province by Using Fuzzy Logic and AHP

*M. Rezaali[1] and A. Karimi[2]**

Abstract

Water pollution has received particular attention in recent years. Among its reasons can be the water scarcity or drought. One of the methods which significantly help to manage this crisis is reuse of the effluent of wastewater treatment plants. In big cities, wastewater is usually collected by an integrated wastewater collection system and then treated in a centralized wastewater treatment plant. This approach has lots of limitations regarding wastewater collection costs, risks of unanticipated events and treated effluent reuse. Furthermore, in less populated cities, using centralized wastewater treatment plants might be costly when concerning infrastructural and operational costs. In this situation, it is recommended in the literature to use decentralized wastewater treatment plants (DWWTPs). Therefore, it is crucial to highlight and locate communities with more potential to use such facility. This study aimed to locate the communities which have the most potential for construction of DWWTPs and dedicate them a fuzzy-AHP index. Based on the findings of this study, the prioritized societies with high potential to build DWWTP in Qom Province are Sarm, Vanarch, Jandab, Varjan, and Kahak. Finally, the communities under the study were compared regarding wastewater collection system costs by using WPM model. The results indicated that constructing DWWTPs are multiple of times more economical than the centralized approach.

Keywords: Wastewater Treatment, Decentralized WWTP, Fuzzy-AHP Analysis, Wastewater Reuse.

Received: May 4, 2018
Accepted: October 11, 2018

1- M.Sc. Graduate of Civil and Environmental Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran. Email: Karimi@qut.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

در گذشته بدلیل کم بودن جمعیت، نفوذپذیری لایه‌های زمین در بیشتر نقاط شهری و وجـود مسیل‌ها یـا آبراهه‌های طبیعی، مسأله جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب چندان مطرح نبود و فاضلاب شهرهـا، از طریق چاه‌های جاذب دفع می‌گردید. همچنین جهت اجتناب از آلودگی آب چاه‌ها و قنوات، تمهیداتی به منظور دور نگه‌داشتن چاه‌های فاضلاب از آنها به کار برده می‌شد و فقدان سیستم فاضلاب به شکل حاد محسوس نبود. عواملی از جمله افزایش نرخ رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، دسترسی هر چه بیشتر به علوم و فنون، توسعه مراکز صنعتی و تجاری، سبب تولید انواع و اقسام مواد زایدی شده که منجر به آلودگی محیط زیست و تهدید سلامت انسان‌ها گردیده است. در این میان طبیعتاً یکی از مشکلاتی که موجبات نگرانی را فراهم می‌آورد، آلودگی‌های گسترده تولید شده و مسأله حفاظت محیط زیست در برابر این آلودگی‌ها می‌باشد.

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به بحث آلودگی آب‌ها شده است که یکی از دلایل آن، کم‌آبی و خشکسالی است. یکی از روش‌هایی که به برون‌رفت از این بحران کمک می‌کند، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. در شهرهای بزرگ عمدتاً فاضلاب کل شهر در قالب یک شبکه یکپارچه جمع‌آوری‌شده و در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متمرکز تصفیه می‌گردد. این رویکرد از جنبه‌های مختلف از جمله هزینه‌های جمع‌آوری فاضلاب، ریسک حوادث غیرمترقبه و استفاده مجدد از پساب تصفیه شده دارای محدودیت‌های زیادی است (Wilderer and Schreff, 2000). طبق مطالعه انجام شده در کلان‌شهر تهران در افق ۱۴۱۰، مجموع پساب تصفیه‌خانه‌های شهر حـدود ۸۵۲ میلیون مترمکعب در سال پیش‌بینی می‌شـود (Ghaffari Moghadam et al., 2012) که این میزان از پساب نشانگر اهمیت استفاده مجدد در کلان‌شهرها است.

از جمله نقاط ضعف مـوجـود در تصفیه‌خانه‌های فـاضلاب متمرکز، هـزینه‌هـای اجـرا و بهره‌بـرداری بـالای آنها است (Massoud et al., 2009). از دیگر مشکلات شایع در این نوع تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، عدم صرفه اقتصادی اجرای آنها برای شهرک‌ها و روستاهای کم جمعیت است. علاوه بر موارد ذکر شده، حتی اگر تصمیم بر اتصال شبکه فاضلاب به تصفیه‌خانه متمرکز گرفته شود، هزینه‌های اتصال و پمپاژ نیز ممکن است مطرح شود و درنهایت تأسیس این تصفیه‌خانه‌ها از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. تصفیه فاضلاب غیرمتمرکز یکی از راهکارهایی است که می‌تواند تا حدودی مشکلات مذکور را برطرف نماید.

مطالعات علمی نشان داده که استفاده از سیستم فاضلاب غیرمتمرکز از لحاظ اقتصادی و به دلیل سادگی اجرا می‌تواند بسیار مفید واقع شود (Butler and MacCormick, 1996; Otterpohl et al., 1997; Hedberg, 1999; Wilderer and Schreff, 2000). از عمده دلایلی که باعث شده نتایج مطالعات به سمت سیستم فاضلاب غیرمتمرکز گرایش پیدا کند، عدم نیاز به شبکه گسترده فاضلاب، پمپاژ و سرمایه اولیه بالا برای اجرای این نوع سیستم‌های تصفیه‌ای است. طبق گزارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA[1])، سیستم‌های غیرمتمرکز برای جوامع جمعیتی کم‌تراکم و با شرایط محیطی گوناگون نسبت به سیستم‌های متمرکز مناسب‌تر بوده و از نظر اقتصادی باصرفه‌تر هستند (Massoud et al., 2009). بطور کلی می‌توان به مزایای سیستم تصفیه غیر متمرکز به شرح زیر اشاره کرد:

۱- تصفیه غیرمتمرکز قابلیت تطبیق‌پذیری بهتر نسبت به افزایش جمعیت روستایی، تجاری و صنعتی دارد (Wilderer and Schreff, 2000; Ho, 2005; Ho and Anda, 2006).

۲- احتمال کاهش کیفیت آب‌های سطحی در اثـر تخلیه تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز کمتر است (Brown et al., 2010).

۳- تصفیه غیرمتمرکز در شهرهای بزرگ می‌تواند با ترکیب با تصفیه متمرکز افت کیفیت پساب ناشی از افزایش جمعیت را جبران کند (Brown et al., 2010; Ho, 2005; Ho and Anda, 2006; Weber et al., 2007).

۴- برای جوامع کوچکتر این روش می‌تواند به توسعه شهری کمک کند (Hong et al., 2005; Lamichhane, 2007; Borsuk et al., 2008).

۵- شبکه جمع‌آوری و سیستم لوله‌کشی به مراتب با قطر کمتر و کم هزینه‌تر در مقایسه با تصفیه متمرکز استفاده می‌شود (Rauch et al., 2003; Brown et al., 2010; Ho, 2005; Ho and Anda, 2006)

۶- هزینه‌های مربوط به تکنولوژی مورد استفاده در تصفیه غیرمتمرکز در حـال رقابتی‌تر شـدن در مقایسه بـا سیستم متمرکز است (Fane and Fane, 2005).

۷- تصفیه‌خانه‌های کوچک قابلیت تضمین پایداری زیست‌محیطی بیشتری را با در نظر گرفتن توانایی استفاده مجدد و بازیابی مواد مغذی به‌صورت محلی دارند (Borsuk et al., 2008; Brown et al., 2010; Fane and Fane, 2005; Ho, 2005).

۸- تصفیه غیرمتمرکز تـوانـایی بالاتری را در زمینه جلوگیری از نشت سیلاب بـارانـی بـه شبکـه جمع‌آوری دارد (Ho, 2005; Ho and Anda, 2006).

۹- تصفیه غیرمتمرکز قابلیت جداسازی فاضلاب در محل را دارد که باعث کاهش هزینه‌های تصفیه و مصرف انرژی می‌شود (Ho, 2005; Ho and Anda, 2006).

۱۰- تصفیه غیرمتمرکز برای مراکز کم جمعیت و پراکنده مناسب است (Bakir, 2001; Brown et al., 2010; Libralato et al., 2012).

با درنظرگرفتن تمام این مزیت‌ها می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که تصفیه غیرمتمرکز برای این جوامع می‌تواند افزایش کارایی آب، کیفیت بهداشتی و استفاده مجدد را در پی داشته باشد.

انتخاب محل‌های مناسب برای تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی تاثیرگذار به سادگی قابل انجام نیست. علاوه بر آن، این فرآیند در مقیاس بزرگ، نظیر استانی که تعداد زیادی از مراکز جمعیتی را شامل می‌گردد، می‌تواند بسیار دشوار باشد. از این رو، محققان برای رسیدن به بهترین تصمیم موجود برای مکانیابی آن‌ها، روش‌های تحلیل موقعیت مکانی را مطرح کرده‌اند.

لطفی‌زاده برای اولین بار تئوری مجموعه‌های فازی[۲] را معرفی کرد (Zadeh, 1965) و تاکنون بسیاری از پژوهش‌ها و مطالعات کاربردی حول مجموعه‌های فازی، منطق فازی، کنترل فازی و احتمالات فازی انجام شده است. هدف اصلی استفاده از سیستم‌های فازی، پوشش عدم قطعیت‌های مرتبط با توصیف پدیده‌های طبیعی جهان است که بوسیله متغیرهای زبانی[۳] بیان می‌شود (Wang et al., 2009). عدم قطعیت‌ها شامل موارد گوناگونی می‌شود که مجموعه‌های فازی به خوبی آنها را توصیف می‌کند، اما قسمت عمده پوشش عدم قطعیت‌ها در مجموعه‌های فازی مرتبط با تصمیم‌گیری در ابعاد بزرگ است. این مسأله با در نظر گرفتن پارامترهای متعدد که هرکدام می‌توانند از نظر اهمیت، وزن‌های گوناگونی داشته باشد با معرفی توابع عضویت فازی[۴] به خوبی پوشش داده شده است (Chang et al., 2008).

علاوه بر مزیت‌های ذکر شده، تعیین وزن‌های یک سیستم فازی بدلیل نشان دادن میزان اهمیت یک پارامتر بسیار حائز اهمیت است. در همین راستا فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[۵] (AHP) که در اواخر دهه ۱۹۷۰ معرفی شده بود (Saaty, 1980) در پژوهش‌های گوناگون، بخصوص با ترکیب با منطق فازی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، مهمترین مزیت موجود در ترکیب روش AHP با منطق فازی، توصیف دقیق و کامل رابطه بین معیارها و انتخاب‌های موجود است (Lee et al., 1998; Chiadamrong, 1999; Karsak and Tolga, 2001).

روش تحلیل و پهنه‌بندی تناسب اراضی[۶] برای انتخاب محل مورد نظر، یکی از روش‌هایی است که در سطح جهان مورد استقبال پژوهشگران فعال در زمینه سیستم اطلاعات جغرافیایی[۷] (GIS) قرار گرفته است (Collins et al., 2001; Shafiei and Ghanbarzadeh Lak, 2018; sadeghian et al., 2018; Heydari Aghagol et al., 2017). مبنای این روش بر اعمال محاسبات بر روی انواع لایه‌های جغرافیایی سلولی (رستری) یا برداری (وکتوری) است.

با توجه به محدودیت منابع آبی استان قم و ضرورت توجه به کلیه پتانسیل‌های آبی، در این تحقیق مکانیابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب تحت بررسی قرار گرفته است. از دیگر اهداف این پژوهش، استفاده حداکثری از پساب مراکز جمعیتی در برنامه‌ریزی منابع آب استان در قالب الزامات مدیریت بهم پیوسته منابع آب، است. استان قم یکی از استان‌های فلات مرکزی ایران است که چندین دهه است که با بحران کم‌آبی مواجه شده است. در این راستا مسئولین آب و فاضلاب استان، استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده را یکی از روش‌های اصلاح الگوی مصرفی معرفی کرده‌اند (Donya-e-Eghtesad, 2008). از طرفی تعداد چاه‌های مجاز برای برداشت آب در این استان ۲۰۰۰ حلقه برآورد شده است. این در حالی است که تعداد چاه‌های غیرمجاز این استان حدود ۴۳۰۰ حلقه است (Tasnim news agency, 2018).

به این ترتیب با در نظر گرفتن معیارهای مختلف تاثیرگذار و با بکارگیری مقایسات فازی و نقشه‌های مربوطه و روش مکانیابی فازی-AHP، پتانسیل اجرای تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز برای مراکز جمعیتی استان قم مشخص گردید. لازم به ذکر است در این پژوهش منظور از مراکز جمعیتی استان قم، تمام شهرها و روستاهای استان، به غیر از شهر قم است.

۲- محل مطالعه

استان قم با مساحتی بالغ بر ۱۱۲۴۰ کیلومتر مربع به مرکزیت شهر قم دارای ۵ بخش (مرکزی، جعفرآباد، خلجستان، کهک و سلفچگان)، ۶ شهر، ۹ دهستان و ۲۲۵ روستا می‌باشد (Management and Planning Organization of Qom Province, 2017). جمعیت روستایی استان قم مطابق با سرشماری سال ۱۳۹۵ معادل ۶۲۳۱۷ نفر است (Statistical center of Iran, 2015).

منابع آبی این استان شامل منابع آبی سطحی و زیرزمینی می‌باشد. مهم‌ترین منابع آب سطحی استان عبارت از رودخانه‌های قره‌چای و قمرود و رودخانه‌های فرعی امامزاده اسماعیل، بیدهند (ابرجس)، قره‌سو

و طغرود است. محدودیت منابع آبی استان قم، ضرورت توجه به کلیه منابع آبی از جمله پساب‌ها را دوچندان می‌کند. مکانیابی مناسب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بصورت غیرمتمرکز به نحوی که هم هزینه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب را به حداقل برساند و هم امکان استفاده بهینه از پساب کلیه شهرها و روستاها را در قالب مدیریت بهم پیوسته منابع آب استان فراهم سازد، موضوع مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

بطور کلی استان قم دارای ۷ تصفیه‌خانه فاضلاب است که تنها ۲ واحد از آنها با جمعیت تحت پوشش حدود ۲۰۰۰ نفر برای تصفیه فاضلاب روستایی طراحی شده است. جدول ۱ اطلاعات کلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استان را نشان می‌دهد.

عدم وجود تصفیه‌خانه در شهرهای استان، باعث شده فاضلاب بدون تصفیه وارد آبراهه‌ها، رودخانه‌ها، زمین‌های کشاورزی و سفره‌های آب زیرزمینی استان شود. این درحالی است که در صورت وجود تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز انتظار می‌رود زمینه و بستر استفاده مجدد از پساب برای مصارف کشاورزی و آبیاری شهری تا حدودی فراهم شود و از طرفی اکولوژی رودخانه‌ها و حیات وابسته به آنها کمتر در معرض تهدید قرار گیرد.

۳- مواد و روش‌ها

در محدوده استان قم مراکز جمعیتی مختلف پراکنده هستند. در این تحقیق به منظور مشخص‌سازی محدوده‌ها با مزیت‌های بالاتر برای احداث تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب، معیارهای مختلف از قبیل موقعیت مراکز جمعیتی، موقعیت رودخانه‌ها، موقعیت گسل‌ها، کاربری اراضی، شیب زمین و محدودیت‌ها مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور نقشه رقوم ارتفاعی NASA SRTM [۸] با رزولوشن ۳۰ متر از سایت www.usgs.gov برای استان بدلیل دسترسی آسان و رایگان، تصاویر به‌روزتر، کالیبراسیون و صحت‌سنجی قابل اعتماد تهیه شد. سپس فایل رقوم ارتفاعی تبدیل به فایل شیب بر اساس درجه شد، تا نقاط پرشیب و مسطح تفکیک شوند.

به منظور تسهیل انجام محاسبات بر روی داده‌ها، لازم بود لایه‌های برداری تبدیل به لایه‌های سلولی بشوند تا در حین محاسبات، هر سلول از داده‌های سلولی تبدیل به نقطه قابل بررسی برای پژوهش بشود. لازم به ذکر است که اکثر پردازش‌های مقدماتی و گرافیکی در نرم افزار ArcGIS (بسته‌ی ArcMap) انجام شد.

سپس در نرم‌افزار TerrSet Geospatial (Version 18.31) Monitoring and Modeling System (نسخه‌های قدیمی‌تر این نرم‌افزار با نام IDRISI در بین پژوهشگران این حوزه شناخته شده است.) مدلی ساخته شد تا ابتدا لایه‌های سلولی را بر اساس توابع عضویت فازی نرمالیزه کند. لازم به ذکر است که این توابع بر اساس اهداف پژوهش برای هر لایه سلولی بطور جداگانه و اختصاصی طراحی گردید. در نهایت لایه‌های فازی شده برای استخراج خروجی معنی‌دار، از حالت فازی خارج شد. شمای کلی مدل ساخته شده در نرم‌افزار TerrSet و روند کلی انجام محاسبات با تأکید بر نقشه‌های مرتبط با پارامترهای مختلف استان قم در شکل ۱ نشان داده شده است.

Table 1- Detailed description of Qom Province wastewater treatment plants

جدول ۱- جزییات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استان قم

WWTP	Treatment Method	Status	Population Coverage
Emergency	Aerated lagoon	Constructed and in operational phase	110000
Number 3	Activated Sludge	Constructed and in operation phase (One module)	250000
Number 2	Activated Sludge	Constructed but in maintenance phase	251000
Pardisan	Activated Sludge	Conceptual planning and feasibility studies	115000
Moshkabad	Septic tank	Constructed and in operational phase	207
Khourabad	Activated Sludge	Constructed and in operational phase	1769
Shokouhie Industrial Zone	Activated Sludge	Constructed and in operational phase	No data available
Sirou Industrial Zone	Activated Sludge	Constructed and in operational phase	No data available

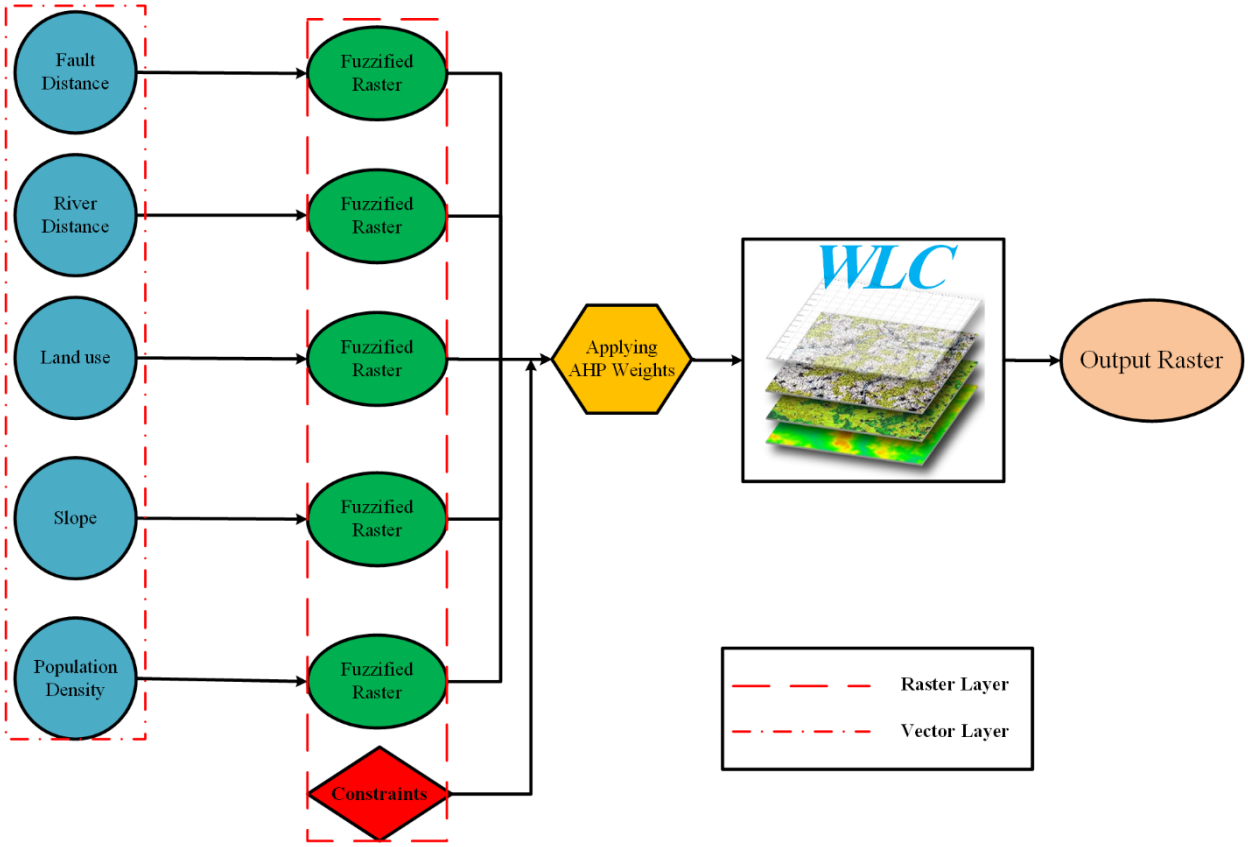


Fig. 1- Scheme of the model built in Terrset and the study scheme

شکل ۱- شمای کلی مدل ساخته شده در Terrset و روند انجام مطالعات

۳-۱- روند محاسبه فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی توسط توماس ساعتی ابداع شد (Saaty, 1977). این روش بدلیل سادگی اجرا از همان ابتدا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011). اساس روش AHP بر انجام محاسبات روی ماتریس مقایسه زوجی است که در نهایت با مشخص شدن ضریب یکپارچگی[۹] (CR)، میزان صحت قضاوت امتیازدهی ماتریس مقایسه زوجی مشخص می‌شود. ترکیب روش AHP با سیستم اطلاعات جغرافیایی، بمنظور اعمال ضرایب آن در هر پیکسل (سلول) فایل سلولی است.

از نظر علمی در روش AHP ماتریس مربعی که مقادیر آن با قضاوت صاحب‌نظران این حوزه تعیین شده، بدست می‌آید. بعد از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، برای تعیین میزان یکپارچگی و صحت آن لازم است ضریب یکپارچگی برای آن تعیین شود. در معادلات ۱ و ۲ روند محاسبه ضریب یکپارچگی ماتریس آورده شده است (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011). در این معادلات حداکثر مقدار ویژه ماتریس[۱۰] در Eigenvector با علامت λ_{max} مشخص شده، n تعداد معیارها، CR ضریب یکپارچگی و RI شاخص تصادفی است که بر اساس تعداد معیارها تعیین می‌شود و مقدار آن باید کمتر از ۰/۱ باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش تمام محاسبات انجام شده مربوط به AHP در نرم‌افزار اکسل انجام شد. تمام ضرایب AHP برای هرکدام از لایه‌های بکار رفته بجز لایه محدودیت‌ها، از طریق توزیع و تکمیل پرسشنامه بین متخصصین این حوزه و اساتید دانشگاه بدست آمد و سپس میانگین آنها در محاسبات AHP لحاظ شد. شکل ۳ نحوه کلی انجام محاسبات روی هر سلول را نشان می‌دهد.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n-1} \quad (۱)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۲)$$

۳-۲- روند محاسبات فازی

دلیل اصلی استفاده از منطق فازی در تصمیم‌گیری، پوشش عدم قطعیت‌های مرتبط با فرآیند تصمیم‌گیری است. اما دلیل ترکیب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با منطق فازی، تبدیل اعداد قطعی[۱۱] به کمیت‌های مشخص است تا بتوان با استفاده از توابع عضویت فازی، عدم قطعیت‌های مرتبط با روش AHP را پوشش داد

Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011; Banai, 1993;)
.(Saaty, 1978

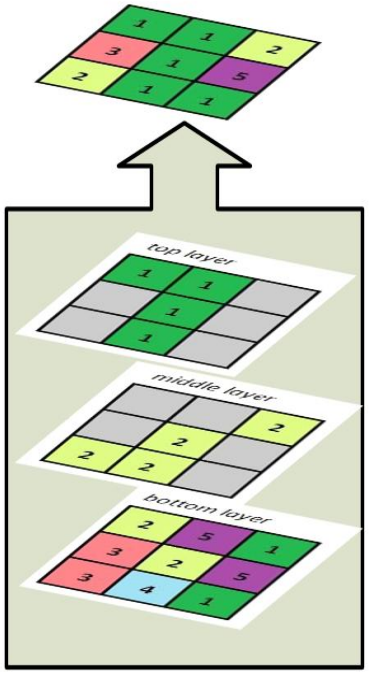


Fig. 2- Process of applying calculations on each pixel
شکل ۲- روند کلی اعمال محاسبات بر روی هر سلول

۳-۲-۱- فازی‌سازی (Fuzzification)

بطور کلی انتخاب نوع توابع عضویت فازی به منظور فازی‌سازی و نرمالیزه کردن لایه‌های سلولی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش با توجه به نوع و کاربرد هر لایه، از توابع عضویت خطی و ذوزنقه‌ای با میزان عضویت متفاوت برای فازی‌سازی استفاده شد. سپس لایه‌های فازی شده ارزیابی شد تا با واقعیت‌های میدانی در استان حداکثر مطابقت را داشته باشد.

توابع عضویت ذوزنقه‌ای از چهار پارامتر اصلی a، b، c و d برای تعیین درجه عضویت تشکیل شده‌اند. شکل ۳ نمونه‌ای از تابع عضویت ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. روابط حاکم بر شکل ۳ در معادله ۳ تعریف شده است که در آن b و c نشان دهنده حداکثر میزان عضویت، a، باند پایین (Lower Bound)، d باند بالایی (Upper Bound) تابع ذوزنقه‌ای و μ_{Ideal} میزان عضویت در تابع است.

$$\mu_{Ideal}(x)=\begin{cases}0 & (x<a)\ or\ (x>d)\\ \dfrac{x-a}{b-a} & a\le x\le b\\ 1 & b\le x\le c\\ \dfrac{d-x}{d-c} & c\le x\le d\end{cases} \qquad (۳)$$

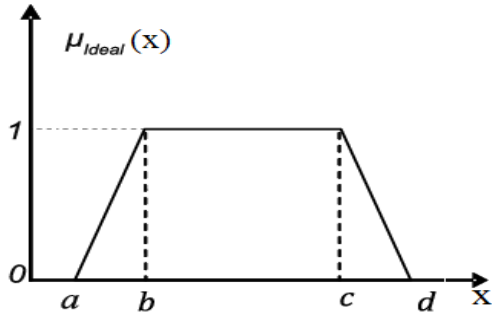


Fig. 3- An example of trapezoidal fuzzy membership function
شکل ۳- نمونه‌ای از تابع عضویت ذوزنقه‌ای

۳-۲-۲- روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC)

روش ترکیب خطی وزن‌دار[۱۲]، مرسوم‌ترین روش بـرای اعمال تجمیع لایه‌ها در فرآیندهای تصمیم‌گیری در محیط GIS است (Hopkins, 1977; Carver, 1991; Heywood et al., 1995). این روش معمولاً با هدف تعیین میزان تناسب اراضی، انتخاب محل هدف، ارزیابی منابع معدنی و بررسی احتمال رانش زمین بکار می‌رود (Ayalew et al., 2004; Akgun et al., 2008; Moeinaddini et al., 2010; Malczewski, 2000). دلیل اصلی محبوبیت این روش، سادگی محاسبات آن و قابلیت بکارگیری این روش با استفاده از ابزارهای محاسبات جبری در محیط ArcGIS است (Malczewski, 2000). در معادله ۴ نحوه محاسبه WLC آمده که در آن ω، وزن نرمالایز شده هر لایه، r_{ij} عدد سلول[۱۳] در هر لایه و $V(x_i)$ مقدار نهایی WLC است.

$$V(x_i)=\sum_j \omega_j r_{ij} \qquad (۴)$$

شایان ذکر است که روند انجام محاسبات برای برآورد شاخص نهایی پتانسیل اجرای تصفیه غیرمتمرکز برای مراکز جمعیتی استان قم بعد از فازی‌سازی و تبدیل به لایه سلولی وارد معادله ۴ شده که در آن وزن‌های خروجی از روش AHP بر روی هر یک از لایه‌ها وارد می‌شود و سپس میزان پتانسیل اجرای تصفیه غیرمتمرکز بصورت یک لایه سلولی برای تمام استان به شکل خروجی تهیه می‌شود. این لایه سپس با استفاده از ابزار Intersect با مکان‌یابی مراکز جمعیتی میزان این شاخص را برای آنها مشخص می‌سازد.

۳-۲-۳- لایه نزدیکی به مناطق پر جمعیت

یکی از مهمترین بخش‌های پژوهش، تعیین میزان نزدیکی به مناطق پر تراکم جمعیتی است. با توجه به اهداف پژوهش، منطقه هدف طرح، مکانیابی تصفیه‌خانه فاضلاب غیرمتمرکز برای مراکز جمعیتی استان قم می‌باشد. به این منظور ابتدا با استفاده از اطلاعات جمعیتی استان،

مراکز جمعیتی خالی از سکنه از اعمال محاسبات حذف شدند. سپس بر اساس جمعیت هر مرکز، با استفاده از ابزار درون‌یابی از نوع نزدیکترین همسایه[۱۴]، نواحی متراکم جمعیتی از نواحی غیرمتراکم تفکیک شد و بعد از نرمالیزه شدن لایه، تابع عضویت خطی بمنظور فازی‌سازی لایه روی آن اعمال شد. شکل ۴ مقایسه حالت اولیه لایه با خروجی لایه تراکم جمعیتی استان قم است. با توجه به اینکه میزان حداقلی برای ساخت تصفیه‌خانه غیرمتمرکز تعیین نشده و این امر وابسته به تکنولوژی تصفیه است، در این پژوهش بمنظور فازی‌سازی نقشه و مقایسه بهتر میان مراکز جمعیتی استان قم، حداقل میزان تابع عضویت ۵۰۰ نفر و میزان ایده‌آل آن طبق پژوهش‌های مرتبط بین ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ نفر لحاظ شد (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011; Guest et al., 2009; Libralato et al., 2012; Massoud et al., 2009). بدیهی است که گذر از میزان فوق یعنی ۲۰۰۰ نفر باعث کاهش عضویت تابع خواهد شد و در نتیجه آن لزوم غیرمتمرکزسازی کاهش خواهد یافت. همچنین نوع تابع عضویت براساس این اصل که با افزایش جمعیت تا رسیدن به میزان ایده‌آل لزوم استفاده از مبانی طراحی غیرمتمرکز بیشتر خواهد شد انتخاب شد.

۳-۲-۴- لایه نزدیکی به رودخانه‌ها

بطور کلی نزدیکی به رودخانه‌ها می‌تواند پارامتری مهم برای مکانیابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز بشمار بیاید که از مهمترین دلایل این امر، تسهیل هدایت پساب تصفیه‌خانه غیرمتمرکز به زمین‌های کشاورزی در فصل کشت و امکان زنده نگاه داشتن اکولوژی بستر رودخانه و یا اکولوژی وابسته به رودخانه (Metcalf et al., 2003) در فصول دیگر و خاصیت خود پالایی رودخانه‌ها (Karrasch et al., 2006) است. از طرفی، نزدیکی بیش از حد به رودخانه امکان نشت فاضلاب تصفیه‌خانه را افزایش داده (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011) و در نتیجه می‌تواند سفره‌های آب زیرزمینی و اکولوژی رودخانه را نیز تهدید کند. بمنظور کاهش ریسک پدیده مذکور، برای فازی‌سازی لایه فاصله از رودخانه، از تابع عضویت ذوزنقه‌ای استفاده شد. در شکل ۵ مقایسه بین قبل و بعد از حالت فازی نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، درجه عضویت این نوع تابع با افزایش فاصله از ۱۰۰ متر (Environmental Protection Agency, 2018) تا رسیدن به فاصله ایده‌آل ۵۰۰ متر الی ۶۰۰ متر، افزایش یافته و با دور شدن از فاصله ایده‌آل و تا رسیدن به فاصله ۱۰۰۰ متر کاهش می‌یابد.

۳-۲-۵- لایه نزدیکی به گسل‌ها

وجود گسل، چه فعال و چه غیرفعال می‌تواند تهدیدی برای فعالیت درست تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌شمار بیاید، بطوری که در اکثر مطالعات اولیه مرتبط با امکان‌سنجی احداث تصفیه‌خانه فاضلاب، وجود و یا عدم وجود گسل در نزدیکی محل احداث تصفیه‌خانه فاضلاب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بمنظور فازی‌سازی لایه فاصله از گسل‌ها (فعال و غیرفعال)، از تابع عضویت خطی استفاده شد، بطوری‌که به حداقل فاصله تا ۵۰۰ متر از گسل‌ها، میزان عضویت حداقل تعلق گرفت و بعد از ۱ کیلومتر، حداکثر میزان عضویت تعلق گرفت (Anagnostopoulos and Vavatsikos, 2011). لازم به ذکر است باتوجه به نبود ضوابط ساخت و ساز در حریم گسل‌ها برای استان قم و مجاورت این استان با استان تهران، این مقدار براساس ضوابط ساخت و ساز در حریم گسل‌های شهر تهران در نظر گرفته شد.

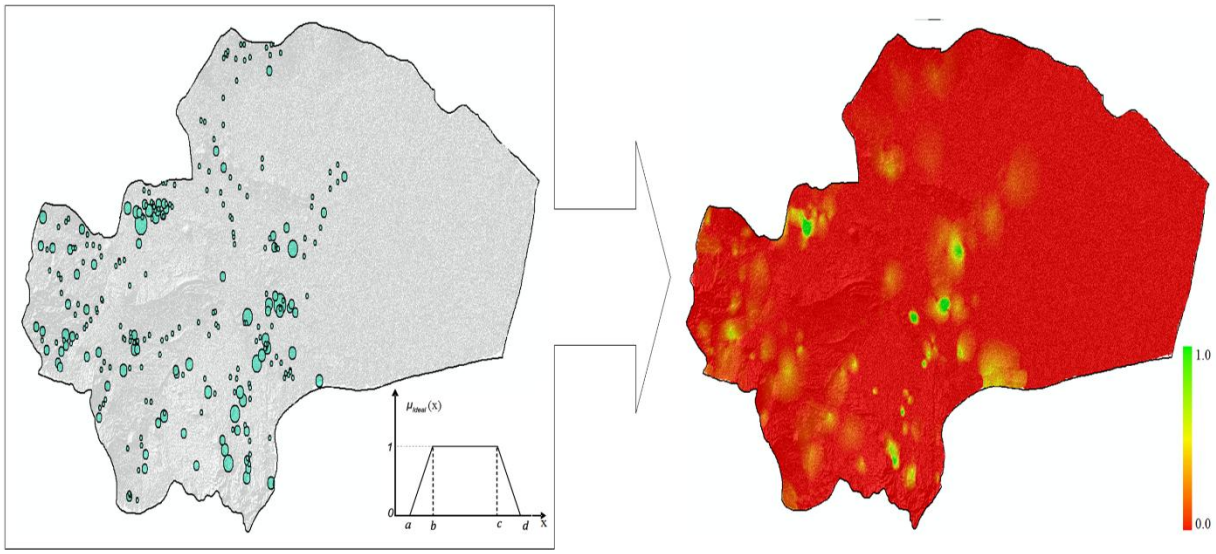


Fig. 4- Comparison between before (left side) and after (right side) applying fuzzy membership function on the Population Density layer

شکل ۴- مقایسه قبل (تصویر سمت چپ) و بعد (تصویر سمت راست) از اعمال توابع عضویت فازی بر روی لایه تراکم جمعیت

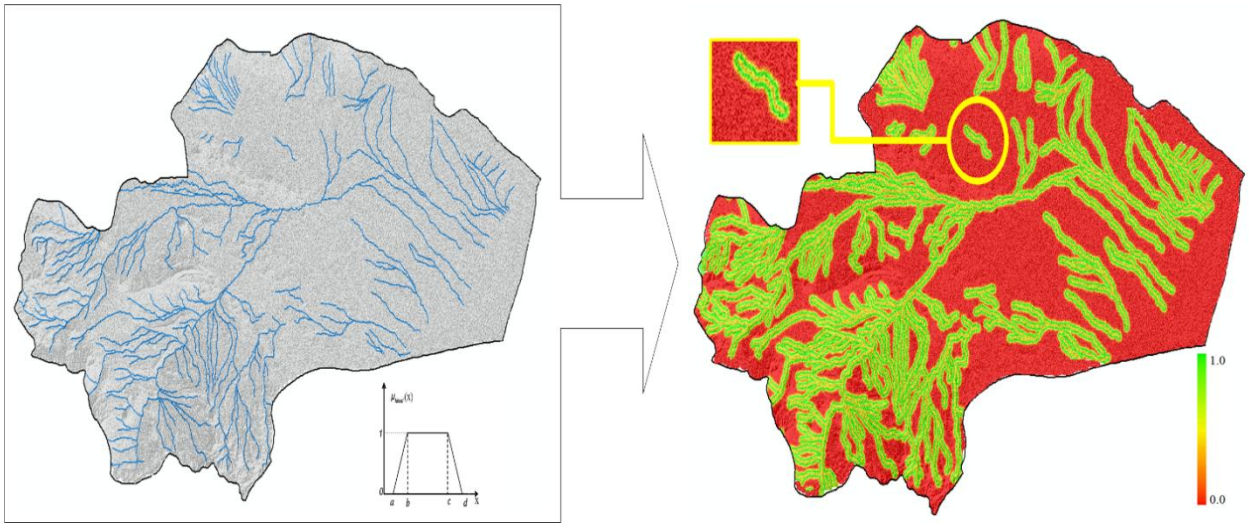


Fig. 5- Comparison between before (left side) and after (right side) applying fuzzy membership function on the Distance to Rivers layer

شکل ۵- مقایسه قبل (تصویر سمت چپ) و بعد (تصویر سمت راست) از اعمال توابع عضویت فازی بر روی لایه رودخانه

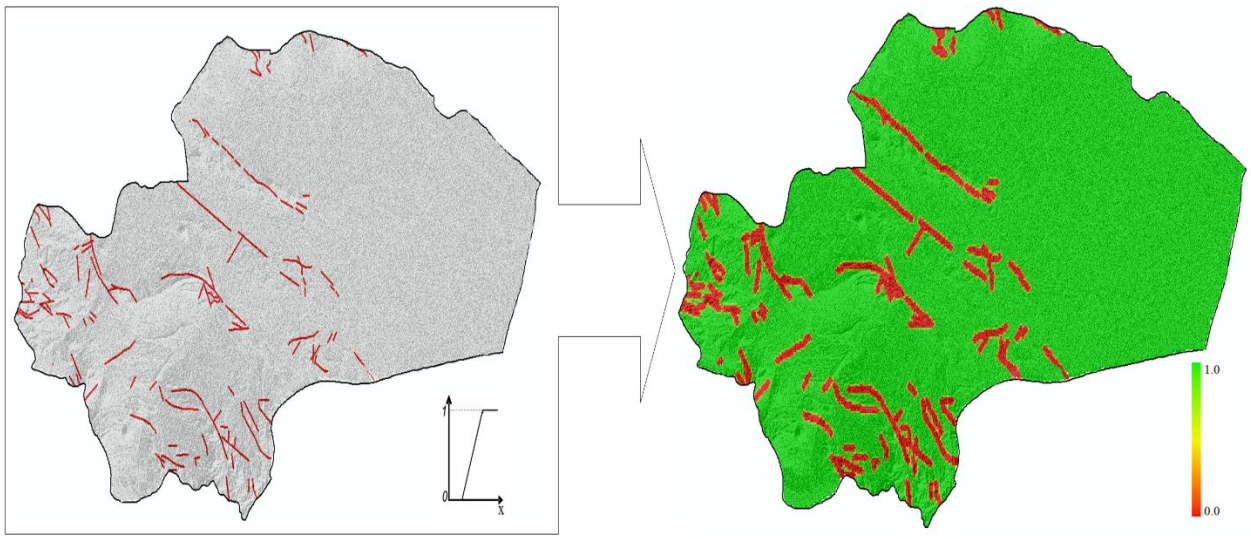


Fig. 6- Comparison between before (left side) and after (right side) applying fuzzy membership function on the Distance to Faults layer

شکل ۶- مقایسه قبل (تصویر سمت چپ) و بعد (تصویر سمت راست) از اعمال توابع عضویت فازی بر روی لایه گسل‌ها

بطور کلی فاصله مجاز بین حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۸۰۰ متر از گسل‌ها (باتوجه به نوع فعالیت و بزرگی آنها) برآورد شده است. در این پژوهش این فاصله با درنظر گرفتن مقالات مشابه و در نظر گرفتن ضوابط ساخت و ساز این مقدار در نظر گرفته شد. در شکل ۶ مقایسه بین حالت فازی و برداری فاصله از گسل‌ها نمایش داده شده است.

۳-۲-۶- لایه کاربری اراضی

امکان استفاده مجدد می‌تواند یکی از جنبه‌های مثبت تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز باشد که این امر وابسته به نوع کاربری اراضی موجود در محل مورد مطالعه است. در پژوهش کنونی اراضی به چند دسته کلی تقسیم‌بندی شدند که شامل: اراضی کشاورزی، اراضی باغی، اراضی تالابی، اراضی نمکی یا خشک می‌باشد. باتوجه به کاربری مشابه زمین‌های کشاوزی و باغی، محاسبات این دو کاربری با امتیاز مساوی اعمال شد و بقیه کاربری‌ها به ترتیب کم و کم‌ترین امتیازات را دریافت کردند. در نهایت، یک رده‌بندی میان هر نوع کاربری شکل گرفت که این رده‌بندی وارد انجام محاسبات فازی شد. شکل ۷ مقایسه قبل و بعد از اعمال تابع عضویت فازی خطی را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشخص شده است، نوع تابع عضویت فازی بکار رفته در

این لایه بصورت خطی نزولی انتخاب شده است. این نوع از تابع براساس ایجاد تفکیک بهتر میان نوع کاربری و تناسب این تابع با نظرات تصمیم‌گیران این حوزه انتخاب شد.

۳-۲-۷- لایه شیب زمین

شیب زمین یکی از عوامل تأثیرگذار بر هزینه‌های مربوط به سیستم فاضلاب است. احداث تصفیه‌خانه فاضلاب در مکانی که ارتفاع آن بالاتر از مرکز جمعیتی است یا محلی که حرکت ثقلی فاضلاب را تضمین نمی‌کند، می‌تواند هزینه‌های مربوط به پمپاژ و احداث ایستگاه پمپاژ را بوجود بیاورد. بدین منظور لازم است که تصفیه‌خانه در محلی با ارتفاع کمتر نسبت به مرکز جمعیتی احداث شود تا فاضلاب بصورت ثقلی جریان پیدا کند. موقعیت ارتفاعی تصفیه‌خانه از نقطه‌نظر امکان انتقال ثقلی پساب تصفیه شده به کاربری تعریف شده نیز اهمیت دارد. بمنظور مکانیابی بهتر تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز، شرط وجود شیب حداقلی برای جریان فاضلاب قید شد تا مکان‌هایی که شیب حداقلی دارند از بقیه مکان‌ها تفکیک شوند. همچنین لازم بـــود محل‌های کوهستانی بـــا شیب زیـــاد، بمنظور کاهش هزینه‌های احداث، کم‌ترین امتیاز را دریافت کنند. در نتیجه بازه مشخصی ۴ تا ۸ درجه برای تعیین حداقل شیب مورد نیاز تعیین شد (USEPA, 2018; Metcalf et al., 2003) که برای اعمال این بازه در محاسبات فازی لازم بود از تابع ذوزنقه‌ای استفاده شود. شکل ۸ مقایسه بین حالت اولیه و فازی شده لایه شیب است. همانطور که در شکل ۸ مشخص است، نقاط پرشیب، نقاط کم شیب و نقاط ایده‌آل بخوبی از هم تفکیک شده‌اند. به منظور حفظ شیب ایده‌ال برای احداث تصفیه‌خانه غیر متمرکز تابع عضویت فازی ذوزنقه‌ای انتخاب شد تا با افزایش یا کاهش شیب از این محدوده درجه عضویت به تدریج کم‌تر شود.

۳-۲-۸- لایه محدودیت‌ها[۱۵]

وجود برخی نقاط و اعمال محاسبات بر روی آنها می‌تواند باعث ایجاد تناقض در لایه خروجی از مدل باشد. به عنوان مثال اعمال محاسبات بر روی محل گسل‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مناطق شهری، تالاب‌ها و محل تصفیه‌خانه‌های کنونی روستاهای خورآباد و مشک‌آباد می‌تواند غیر ضروری و یا متناقض با نتایج مدنظر باشد. یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، استفاده از لایه محدودیت‌ها بمنظور عدم لحاظ برخی نقاط در انجام محاسبات است. این لایه با ترکیب با چند لایه برداری و در نهایت با خروجی سلولی از آن در نرم‌افزار ArcGIS بوجود آمد که در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ توابع عضویت هر لایه به همراه درجه عضویت و ضرایب تأثیر AHP آنها مشخص شده است.

۴- نتایج و بحث

باتوجه به لزوم مکانیابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز، لایه‌های مختلفی برای اعمال محاسبات مطابق شکل ۱ وارد مدل شد. با مشورت با متخصصین این حوزه، مرور مقالات مرتبط و شرایط کنونی استان، در ابتدا اولویت‌های غیرمتمرکزسازی نظیر فاصله از مراکز جمعیتی، شیب، فاصله از گسل‌ها و غیره تعیین شد و سپس پارامترهای حداقلی، حداکثری و ایده‌آل در هر لایه بوسیله توابع عضویت فازی از هم تفکیک شدند.

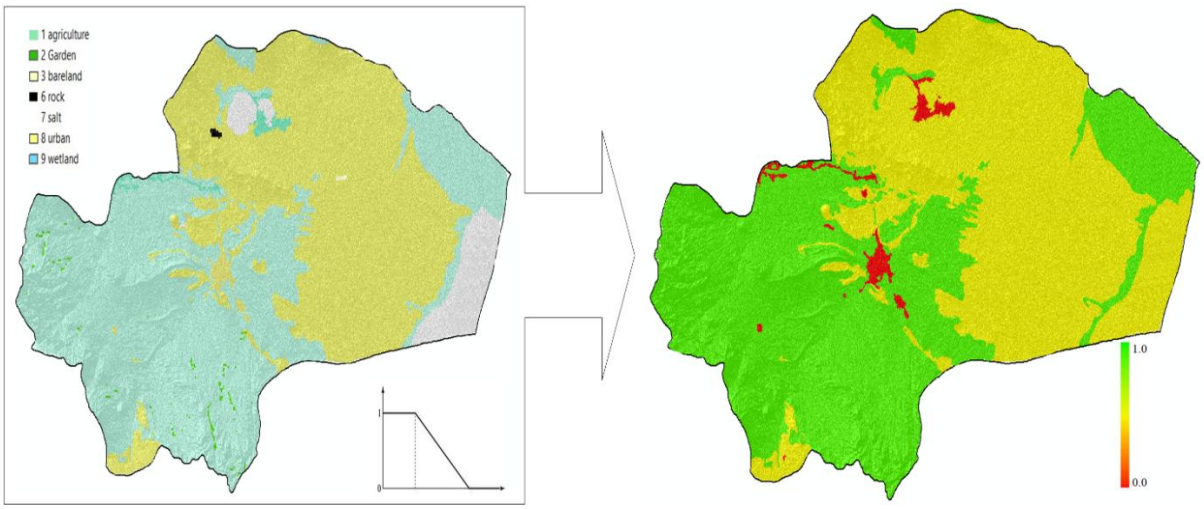


Fig. 7- Comparison between before (left side) and after (right side) applying fuzzy membership function on the Land Use layer

شکل ۷- مقایسه قبل (تصویر سمت چپ) و بعد (تصویر سمت راست) از اعمال توابع عضویت فازی بر روی لایه کاربری اراضی

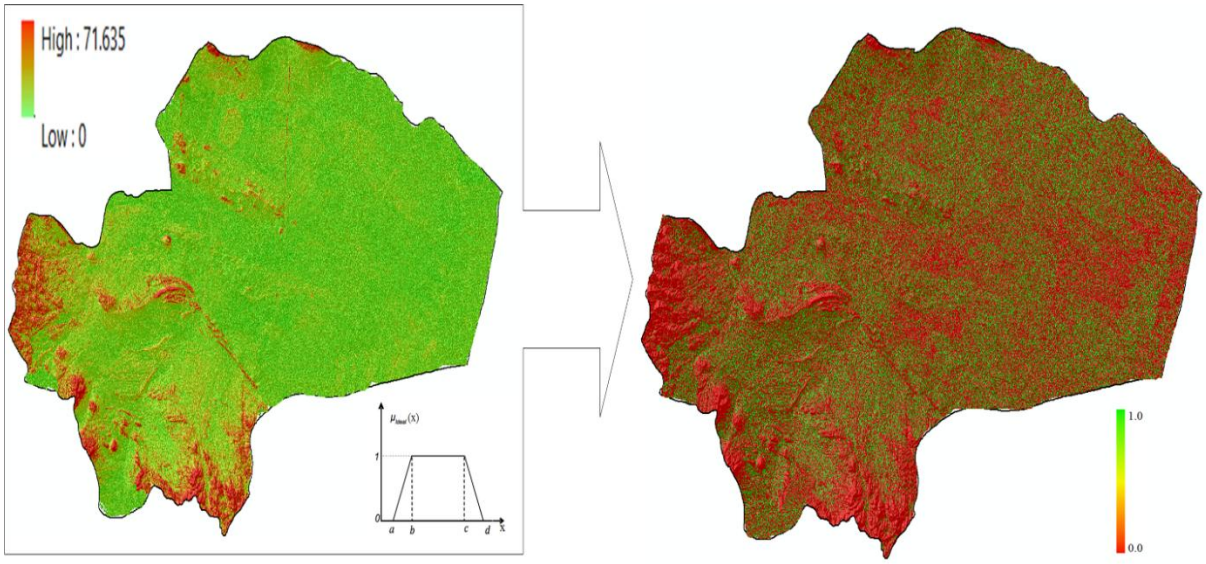


Fig. 8- Comparison between before (left side) and after (right side) applying fuzzy membership function on the Slope layer

شکل ۸- مقایسه قبل (تصویر سمت چپ) و بعد (تصویر سمت راست) از اعمال توابع عضویت فازی بر روی لایه شیب زمین

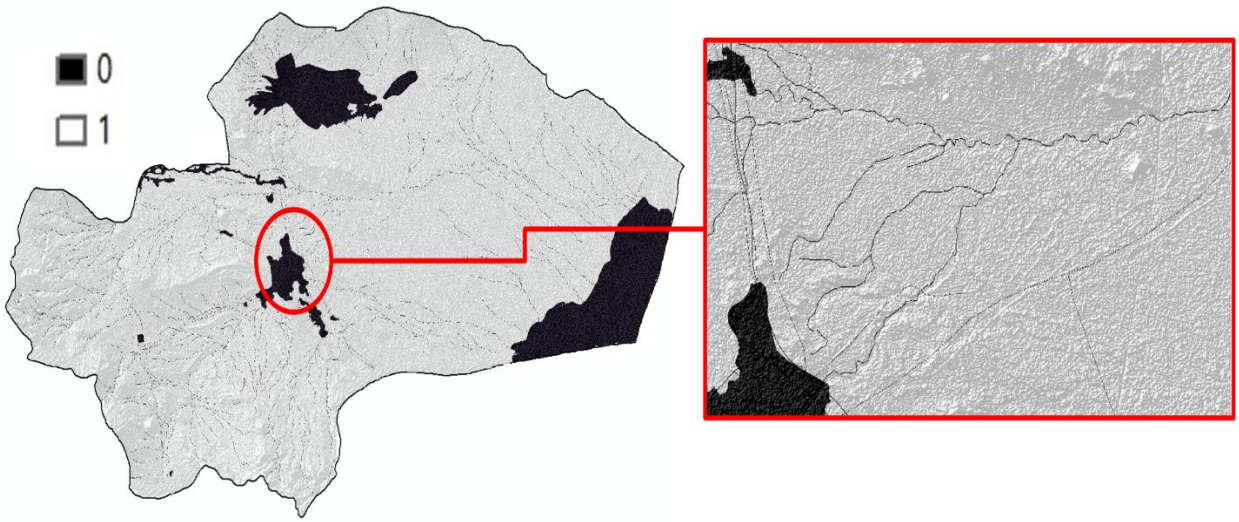


Fig. 9- Constraints layer of the study area

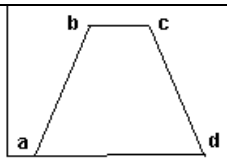
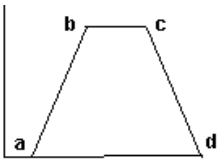
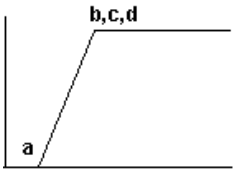
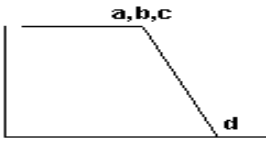
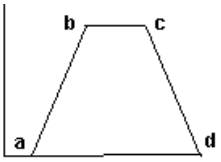
شکل ۹- لایه محدویت‌های محل مورد مطالعه

بعد از تعریف پارامترهای مذکور مدلی که حاصل ترکیب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با منطق فازی است در نرم‌افزار Terrset Geospatial Monitoring and Modeling System طراحی شد. جدول ۲ جزئیات طراحی مدل را نشان می‌دهد. پیش‌نیاز این عملیات پردازش‌های مقدماتی مانند تبدیلات سلولی، ریجستری، پروجکشن، محاسبات برداری و سلولی و غیره بر روی لایه‌ها است که تمامی آنها در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. بعد از فازی‌سازی لایه‌ها در مدل، ضرایب AHP به هر لایه بجز لایه محدودیت‌ها اعمال شد تا وزن هر لایه باتوجه به اهداف پژوهش مشخص شود. بعد از اعمال ضرایب AHP در هر لایه، لایه نهایی با روش ترکیب وزن‌دار بوجود آمد و بعد از آن لایه محدودیت‌ها اعمال شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همانطور که از مقایسه شکل ۱۰ با سایر اشکال مشخص است، نقاطی که بیشترین پتانسیل احداث تصفیه‌خانه غیرمتمرکز را دارا هستند بیشتر در نزدیکی مراکز جمعیتی، با فاصله قابل قبولی از گسل‌ها، رودخانه‌ها و در مناطقی با کاربری کشاورزی یا باغی واقع شده‌اند. لازم به ذکر است که بعد از دریافت خروجی مدل ساخته شده، فایل سلولی با برخی

روش‌های حذف نویز موجود در جعبه‌ابزار Generalization که عمدتاً ناشی از لایه شیب زمین و فاصله از رودخانه‌ها بود، پردازش مجدد شده تا تصویر نهایی بصورت واضح توصیف کننده خروجی مدل باشد. هدف از استفاده از این روش‌ها خواناتر بودن فایل سلولی خروجی و کاهش خطای بصری مرتبط با نویز است. همانطور که در حالت زوم شده مشخص است، تمام محدودیت‌های محل مورد مطالعه شامل مناطق شهری، دریاچه‌ها، تالاب‌ها، محل رودخانه‌ها، جاده‌ها و گسل‌ها بخوبی اعمال شده است.

Table 2- Type, fuzzy membership score and AHP weights
جدول ۲- نوع، درجه عضویت فازی و ضرایب تاثیر AHP لایه‌ها

Criteria	Type of Membership Function	Name of Fuzzy Membership Function	Membership Function Parameters	AHP Weight
Population		Symmetric trapezoidal	(500, 800, 2000, 2500)	0.37
Distance to Rivers and Streams		Symmetric trapezoidal	(200, 500, 600, 1200)	0.26
Distance to Faults		Linear-ascending	(500, 1000)	0.07
Land use		Linear-descending	(3,1)	0.2
Slope		Symmetric trapezoidal	(2, 4, 8, 12)	0.1 Consistency: 0.03

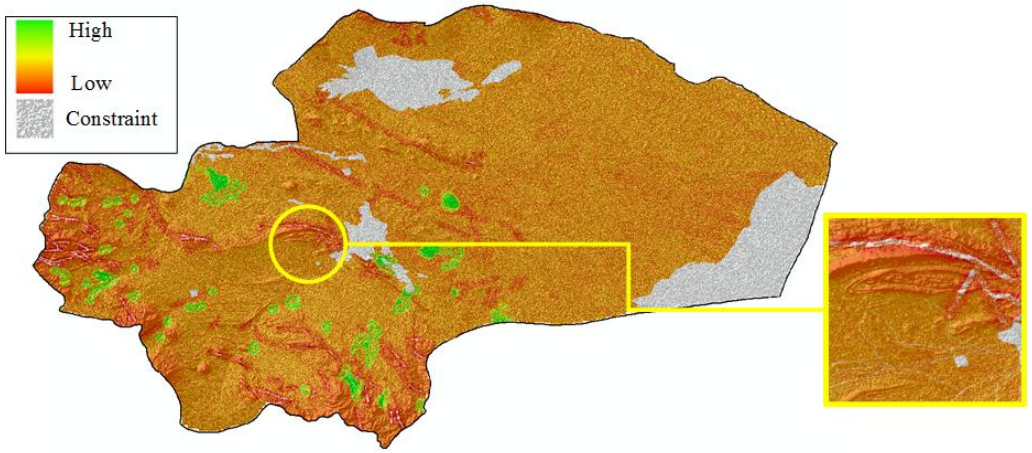


Fig. 10- Fuzzy-AHP model output
شکل ۱۰- خروجی مدل فازی- AHP

استفاده از منطق فازی در این پژوهش باعث تعریف توابع عضویت فازی رابطه خطی یا غیرخطی بین معیارها و اهداف پژوهش شد که این امر در روش‌های چندمعیاره غیر فازی دشوار و چه بسا غیرعملی بنظر می‌رسید. نکته دیگر در مورد این روش این است که استفاده از توابع عضویت فازی پلی بین تصمیم‌گیری برحسب کمیت‌های دوتایی[16] و روش‌های برپایه WLC که در نرم‌افزار ArcMap موجود است، می‌باشد. بطوری که توانایی ارزیابی عدم‌قطعیت‌های مرتبط با این دو روش را دارا است (Jiang and Eastman, 2000). هرچند که نرم‌افزار ArcMap توانایی فازی‌سازی لایه‌ها را بصورت پیش‌فرض دارد، اما توابع عضویت موجود در این نرم‌افزار در مقایسه با نرم‌افزار بکار برده شده بسیار محدود است. همچنین اعمال لایه‌های خاص نظیر محدودیت‌ها در این نرم‌افزار احتیاج به استفاده از ابزار محاسبات رستری دارد که باتوجه به تجمیع لایه‌ها ممکن است با خطای محاسباتی روبه‌رو شود.

مطابق تصویر نهایی خروجی مدل، اکثر نواحی که مناسب ارزیابی شدند بطور معمول دارای کاربری کشاورزی یا در برخی نقاط جنوبی و کوهستانی استان دارای کاربری باغی هستند که این امر هدف استفاده مجدد از پساب را پر رنگ‌تر می‌کند. از طرفی باتوجه به هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری کمتر تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز نسبت به تصفیه‌خانه‌های متمرکز، استفاده از این روش تصفیه برای مراکز جمعیتی توجیه اقتصادی بیشتری دارد.

به‌منظور تحلیل بهتر نتایج، لازم بود تا به هر مرکز جمعیتی ضریب فازی تعلق گیرد تا پتانسیل اجرای تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز در آن مرکز جمعیتی مشخص شود. در همین راستا در جدول شماره ۳، پنج مرکز جمعیتی با بالاترین ضریب فازی مشخص شده‌اند تا بتوان به دید بهتری نسبت به خروجی پژوهش دست یافت.

Table 3- Fuzzy suitability indices for constructing DWWTP

جدول ۳- شاخص فازی پتانسیل اجرای تصفیه‌خانه غیرمتمرکز فاضلاب

Village/City Name	Population	Suitability Index (%)
Sarm	2000	100
Vanarch	1500	81
Jandab	1403	77
Varjaan	1024	74
Kahak	4826	69

۴-۱- مقایسه هزینه‌های غیرمتمرکزسازی با روش متمرکز

باتوجه به نوع و تکنولوژی تصفیه‌ای، مکان دقیق تصفیه‌خانه و بسیاری از پارامترهای دیگر، ممکن است هزینه ساخت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب غیرمتمرکز متفاوت باشد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، برخی مناطق با رنگ سبز مشخص شده‌اند که دلالت بر برتری نسبی شاخص پتانسیل احداث تصفیه‌خانه فاضلاب غیرمتمرکز را دارد. لازم به ذکر است که نوع روش تصفیه فاضلاب کاملاً بستگی به شرایط محلی در روستا دارد. از طرفی شهرستان‌ها و روستاهای نام برده در جدول ۳ فقط بخش کوچکی از تعداد کل مراکز جمعتی ارزیابی شده است که باتوجه به محدودیت فضا فقط به ۵ روستای اول اشاره شده است. بطور کلی اجرای تصفیه‌خانه غیرمتمرکز در مقایسه با سیستم متمرکز در شهرهایی که سیستم جمع‌آوری فاضلاب دارند از نظر اقتصادی ممکن است قابل توجیه نباشد (Crites and Tchobanoglous, 1998; Bakir, 2001; Ho and Anda, 2006; Ho, 2005). همچنین حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد هزینه‌های مربوط به احداث تصفیه‌خانه فاضلاب متمرکز مرتبط با شبکه جمع‌آوی فاضلاب است (Otis, 1996; Bakir, 2001; Maurer et al., 2005). به طور مشابه پیش‌بینی می‌شود که هر ۵۰ تا ۶۰ سال شبکه جمع‌آوری فاضلاب یا قسمتی از آن باید بازسازی بشود (Maurer et al., 2005). همچنین احتمال اینکه در محیط پذیرنده بدلیل تخلیه گسترده پساب پدیده یوتریفیکاسیون یا شکوفایی جلبکی رخ دهد بیشتر محتمل است (Wilderer and Schreff, 2000; Ho and Anda, 2006; Ho, 2005). درنهایت می‌توان گفت که تصفیه‌خانه‌های متمرکز بطور معمول جمعیت از پیش تعریف شده‌ای را تحت پوشش قرار می‌دهند که با رشد جمعیت شهری، تصفیه‌خانه نمی‌تواند پاسخگوی دبی ورودی با حفظ کیفیت پساب خروجی سابق باشد.

در این پژوهش مقایسه بین تصفیه‌خانه متمرکز و غیرمتمرکز فقط در زمینه سیستم جمع‌آوری فاضلاب بین این دو روش مذکور انجام شده است. باتوجه به اینکه سایر هزینه‌ها شامل هزینه تکنولوژی تصفیه و خرید زمین و غیره وابسته به مطالعات میدانی دقیق و کارشناسی است، از مقایسه این دو روش در این زمینه‌ها اجتناب شده است. این برآورد توسط مدل WPM[17] انجام شده که توسط سازمان تحقیقات آب آمریکا[18] تهیه و تنظیم شده است، در نتیجه واحد ارزی بکار رفته در این مدل برحسب دلار بوده که با تقسیم هزینه‌های برآورد شده نسبت به یکدیگر حدود بدون واحد آنها برآورد شده است. لازم به ذکر است که این مدل فقط به‌منظور مقایسه بین روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز تهیه شده است، لذا با درنظر گرفتن تغییرات هزینه‌ها بر اساس اقتصاد محدوده تحت مطالعه، شرایط جوی و ژئولوژی منطقه از آن نمی‌توان برای برآورد دقیق هزینه‌ها استفاده کرد (WRF, 2018). در جدول ۴

مقایسه نسبی هزینه‌های شبکه جمع‌آوری تصفیه غیرمتمرکز با متمرکز بصورت میانگین برای مراکز جمعیتی خروجی از مدل فازی-AHP تهیه شده است. شایان ذکر است که در جدول ۴ منظور از On-Lot هزینه‌های مربوط به تجهیزات درون ملکی/ یا خانه است شامل هزینه‌های مرتبط با لوله‌کشی از خانه تا شبکه فاضلاب شهری برای تصفیه متمرکز و هزینه‌های مرتبط با روش‌های جداسازی جامدات از مایعات[۱۹] فاضلاب که معمولاً توسط سپتیک تانک‌ها در محل انجام می‌پذیرد است.

همانطور که در جدول ۴ نسبت هزینه‌های غیرمتمرکزسازی برای مراکز جمعتی ذکر شده، بطور عمده بسیار کمتر از حالت متمرکز است. اما در دو مورد هزینه‌های غیرمتمرکزسازی بیشتر برآورد شده است. دلیل عمده این امر تجهیزات بیشتر درون ملکی یا On-Lot است که برای غیرمتمرکزسازی لازمه آن استفاده از تجهیزات بیشتر است. لازم به ذکر است که پارامترهای مرتبط با هزینه‌های چرخه حیات هر دو روش شامل نرخ تورم و انرژی برای هر دو روش میزان ثابتی لحاظ شده است. در این رابطه می‌توان حدس زد که دلیل عمده بیشتر بودن هزینه‌های تصفیه متمرکز بدلیل چگالی بیشتر فاضلاب، قطر لوله بیشتر و در نتیجه هزینه تعمیرات و نگهداری بیشتر در مقایسه با پساب روش غیرمتمرکز است. بطور عکس، هزینه‌های مربوط به نگهداری تجهیزات درون ملکی مربوط به تصفیه متمرکز (ردیف ۲ و ۵) کمتر از تصفیه غیرمتمرکز برآورد شده است.

۵- نتیجه‌گیری

افـــزایش جمعیـــت لزوم استفاده از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را توجیه می‌کند. اما نمی‌توان اینطور برداشت کرد که مناطق کم‌جمعیت و پراکنده نیازی به تصفیه‌خانه فاضلاب ندارند. محدودیت منابع آبی، آلودگی منابع آب به دلیل افزایش فاضلاب‌ها و دیگر منابع آلاینده به همراه تقاضای روز افزون آب، اهمیت توجه به کاربرد پساب تصفیه شده را دو چندان می‌کند. به منظور امکان استفاده از پساب در آبیاری اراضی کشاورزی، باغی و یا فضای سبز روستایی ضرورت دارد که پساب با حداقل هزینه‌ها به محل مصرف برسد. لذا، در نظر گرفتن تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز جهت تصفیه فاضلاب علاوه‌بر کاهش هزینه‌های اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب، در مدیریت بهم پیوسته منابع آب نیز می‌تواند نقش کلیدی داشته باشد. در نتیجه بررسی فنی و محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز برای یک منطقه و انتخاب موقعیت‌های مکانی مناسب برای این تصفیه‌خانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود که این مهم در این پژوهش برای استان قم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در گذشته انتخاب فرآیند بهینه و مطلوب تصفیه فاضلاب و انتخاب مکان مناسب برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بیشتر بر اساس قضاوت مهندسی صورت می‌گرفت. امروزه با استفاده از مدل تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توان انتظار داشت محل معرفی شده، کلیه معیارهای مورد نظر را به نسبت وزنی که برای آنها تعریف شده ارضاء کند. در پژوهش کنونی با استفاده از منطق فازی و فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره، مناطق مناسب برای احداث تصفیه‌خانه فاضلاب غیرمتمرکز برای مراکز جمعیتی استان قم ارزیابی شدند و به هر مرکز جمعیتی یک اندیس فازی تعلق گرفت که تعیین کننده پتانسیل بکارگیری تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز است. در نتیجه انجام این پژوهش، مراکز جمعیتی استان قم جهت ایجاد سیستم‌های تصفیه فاضلاب غیرمتمرکز اولویت‌بندی شدند که پنج اولویت اول به ترتیب شامل مراکز جمعیتی صرم، ونارچ، جنداب، ورجان و کهک می‌باشد.

Table 4- Comparison between the collection system costs in decentralization and centralization approaches

جدول ۴- مقایسه هزینه‌های مرتبط با شبکه جمع‌آوری تصفیه غیرمتمرکز با متمرکز

Row Num.	Cost Description	Centralization to Decentralization Ratio (Unitless)
1	Installation Cost of Collection Network	6.7
2	Installation Cost of On-Lot Components (one connection)	0.5
3	Total Installation Cost for Collection Network & On-Lot Components	5.3
4	Total Collection System Cost on a per Connection Basis	5.3
5	Annual On-Lot Maintenance Costs (assuming lot owner is responsible for maintenance)	0.3
6	Annual Maintenance Cost for both Collection Network & On-Lot Components (assuming the utility conducts the on-lot maintenance)	1.5
7	Life Cycle Costs	3.3

باید توجه داشت که روش اتخاذ شده، بخش مقدماتی مطالعات مربوط به مکانیابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز است. لذا بمنظور مکانیابی دقیق تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز و سطح متمرکزسازی که شامل انفرادی (به ازای هر خانه یا مشترک)، خوشه‌ای[20] (الحاق ۴ تا ۱۲ خانه به یک سیستم تصفیه غیرمتمرکز)، نیمه متمرکز و ماهواره‌ای[21] (الحاق شبکه غیرمتمرکز به یک شبکه تصفیه متمرکز به‌منظور افزایش کیفیت پساب) لازم است تا مطالعات میدانی در مناطقی که ایده‌آل شناسایی شده‌اند انجام شود.

از طرفی باتوجه به اینکه قسمت اعظمی از فرآیند ساخت تصفیه‌خانه مربوط به شبکه جمع‌آوری آن است، در این پژوهش با استفاده از مدل WPM به مقایسه هزینه‌های مرتبط با شبکه جمع‌آوری فاضلاب دو روش متمرکز و غیرمتمرکز پرداخته شد. نتایج این مدل‌سازی نشان داد که روش غیرمتمرکز در زمینه هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبت به روش متمرکز عمدتاً کمتر بوده که گمان می‌رود دلیل اصلی آن جداسازی جامدات از مایعات در محل باشد. در طرف مقابل هزینه‌های روش متمرکز در زمینه‌های مرتبط با نگهداری و نصب تجهیزات درون ملکی، بدلیل عدم جداسازی جامدات از مایعات در محل، کمتر از روش غیرمتمرکز است.

پی‌نوشت‌ها

1. Environmental Protection Agency
2. Fuzzy Sets Theory
3. Linguistic Variables
4. Fuzzy Membership Functions
5. Analytic Hierarchy Process
6. Land Use Suitability Analysis and Mapping
7. Geographic Information System
8. NASA Shuttle Radar Topography Mission
9. Consistency Ratio
10. Eigenvalue
11. Crisp Values
12. Weighted Linear Combination
13. Pixel Value
14. Nearest Neighbor Interpolation Tool
15. Constraints
16. Binary Numbers
17. Water Planning Model
18. The Water Research Foundation
19. Liquid-Solid Separation
20. Cluster System
21. Satellite Treatment

۷- مراجع

Akgun A, Dag S & Bulut F (2008) Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. Environmental Geology 54:1127-1143

Anagnostopoulos K & Vavatsikos A (2011) Site suitability analysis for natural systems for wastewater treatment with spatial fuzzy analytic hierarchy process. Journal of Water Resources Planning and Management 138:125-134

Ayalew L, Yamagishi H & Ugawa N (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture. Japan Landslides 1:73-81

Bakir H A (2001) Sustainable wastewater management for small communities in the Middle East and North Africa. Journal of Environmental Management 61:319-328

Banai R (1993) Fuzziness in geographical information systems: contributions from the analytic hierarchy process. International Journal of Geographical Information Science 7:315-329

Borsuk M E, Maurer M, Lienert J & Larsen T A (2008) Charting a path for innovative toilet technology using multicriteria decision analysis. ACS Publications

Brown V, Jackson D & Khalifé M (2010) Melbourne metropolitan sewerage strategy: a portfolio of decentralised and on-site concept designs. Water Science and Technology 62:510-517

Butler R & Maccormick T (1996) Opportunities for decentralized treatment, sewer mining and effluent re-use. Desalination 106:273-283

Carver S J (1991) Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International Journal of Geographical Information System 5:321-339

Chang N-B, Parvathinathan G & Breeden J B (2008) Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. Journal of environmental management 87:139-153

Chiadamrong N (1999) An integrated fuzzy multi-criteria decision making method for manufacturing strategies selection. Computers & Industrial Engineering 37:433-436

Collins M G, Steiner F R & Rushman, M J (2001) Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. Environmental Management 28:611-621

Karrasch B, Parra O, Cid H, Mehrens M, Pacheco P, Urrutia R, Valdovinos C & Zaror C (2006) Effects of pulp and paper mill effluents on the microplankton and microbial self-purification capabilities of the Biobio River, Chile. Science of the Total Environment 359(1-3):194-208

Karsak E E & Tolga E (2001) Fuzzy multi-criteria decision-making procedure for evaluating advanced manufacturing system investments. International journal of production economics 69:49-64

Lamichhane K (2007) On-site sanitation: a viable alternative to modern wastewater treatment plants. Water Science and Technology 55:433-440

Lee S-J, Lim S-I & Ahn B-S (1998) Service restoration of primary distribution systems based on fuzzy evaluation of multi-criteria. IEEE Transactions on Power Systems 13:1156-1163

Libralato G, Ghirardini A V & Avezzù F (2012) To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. Journal of Environmental Management 94:61-68

Malczewski J (2000) On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. Transactions in GIS 4:5-22

Massoud M A, Tarhini A & Nasr J A (2009) Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. Journal of Environmental Management 90:652-659

Maurer M, Rothenberger D & Larsen T (2005) Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: at what cost are they competitive?. Water Science and Technology: Water Supply 5:145-154

Metcalf Eddy, Burton F L, Stensel H D & Tchobanoglous G (2003) Wastewater engineering: treatment and reuse. McGraw Hill

Moeinaddini M, Khorasani N, Danehkar A & Darvishsefat A A (2010) Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj). Waste Management 30:912-920

Otis R (1996) Small diameter gravity sewers: experience in the United States Low-cost sewerage. Wiley, Chichester 123-133

Otterpohl R, Grottker M & Lange J (1997) Sustainable water and waste management in urban areas. Water Science and Technology 35:121-133

Rauch W, Brockmann D, Peters I, Larsen T A & Gujer W (2003) Combining urine separation with waste

Crites R & Tchobanoglous G (1998) Small and decentralized wastewater management systems. WCB/McGraw-Hill Boston

Environmental Protection Agency (2018). EPA Code of Practice [Online] Available: https://wwwepaie/pubs/advice/water/wastewater/code%20of%20practice%20for%20single%20houses/Code%20of%20Practice%20Part%201%202010pdf [Accessed]

Fane A & Fane S (2005) The role of membrane technology in sustainable decentralized wastewater systems. Water Science and Technology 51:317-325

Guest J S, Skerlos S J, Barnard J L, Beck M B, Daigger G T, Hilger H, Jackson S J, Karvazy K, Kelly L & Macpherson L (2009) A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. ACS Publications

Ghaffari Moghadam Z, Keikhah A & Sabouhi M (2012) Optimum water resources allocation using game theory. Iran Water Resources Research 8:12-23

Hedberg T (1999) Attitudes to traditional and alternative sustainable sanitary systems. Water Science and technology: 39:9-16

Heydari Aghagol M, Ghoami E & Rostami Barani H R (2017) Finding potential groundwater resources using fuzzy logic (case study: south khorasan province). Iran Water Resources Research 13:211-215

Heywood I, Oliver J & Tomlinson S (1995) Building an exploratory multi-criteria modelling environment for spatial decision support. Innovations in GIS2, Taylor & Francis, London, pp.127-136

Ho G (2005) Technology for sustainability: the role of onsite, small and community scale technology. Water Science and Technology 51:15-20

Ho G & Anda M (2006) Centralised versus decentralised wastewater systems in an urban context: the sustainability dimension. 2nd IWA leading edge on sustainability in water-limited environments IWA Publishing pp.81-89

Hong S-W, Choi Y-S, Kim S-J & Kwon G (2005) Pilot-testing an alternative on-site wastewater treatment system for small communities and its automatic control. Water Science and Technology 51:101-108

Hopkins L D (1977) Methods for generating land suitability maps: a comparative evaluation. Journal of the American Institute of Planners 43:386-400

Jiang H & Eastman J R (2000) Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Science 14:173-184

using fuzzy weighted geometric mean. Expert Systems with Applications 36:1195:1207

Weber B, Cornel P & Wagner M (2007) Semi-centralised supply and treatment systems for (fast growing) urban areas. Water Science & Technology 55(1-2):349-56

Wilderer P A & Schreff D (2000) Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers. Water Science and Technology 41(1)

Wrf (2018) Decentralized systems performance and costs fact sheets [Online] Available: http://wwwwerforg/i/c/DecentralizedCost/Decentralized_Costaspx [Accessed]

Zadeh L A (1965) Fuzzy sets. Inform Control 8:338-365

Tasnim News Agancy (2017) Criticism of regional water company for excessive groundwater consumption of authorized wells. (In Persian)

Donya-e-Eqtesad (2015) Wastewter reuse from the treated wastewater in water and wastewater of Qom. (In Persian) [Online] Available at: https://googl/rz3qvQ [Accessed]

Management and Planning Organization of Qom Province (2018) Province features. [Online] Available at: http://sdighomir/ [Accessed] (In Persian)

design: an analysis using a stochastic model for urine production. Water Research 37:681-689

Saaty T (1980) The analytical hierarchy process: planning, setting priorities, resource allocation. McGraw-Hill International Book Co, New York

Saaty T L (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology 15:234-281

Saaty T L (1978) Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems 1:57-68

Sadeghian M, Rezaei H, Behmanesh J & Khanmohammadi N (2018) Evaluation of groundwater quality parameters using GIS and geostatistical (case study: Urmia plain). Iran Water Resources Research 14:284-289

Shafiei M & Ghanbarzadeh Lak M (2018) Modeling artificial groundwater nourishing (through flood spreading) site selection process based on gis technique and ahp method (case study: khoy plain aquifer). Iran Water Resources Research 14(5):253:264

USEPA (2018) Land application of biosolids. [Online] Available at: https://wwwepagov/biosolids/land-application-biosolids [Accessed]

Wang Y-M, Chin K-S, Poon, G K K & Yang J-B (2009) Risk evaluation in failure mode and effects analysis