

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.2, pp: 42-53

Multi-Criteria Design and Evaluation of Reverse Osmosis Desalination Systems, Case Study: the University of Tabriz Qanat

S. Safari¹, M. Zarghami², R. Yegani³, M. Mosaferi⁴

1. MSc. in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(Corresponding Author) soheilssafari@gmail.com
2. Prof., Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran and Adjunct Prof. Energy, Water and Environment, Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
3. Prof., Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran
4. Prof., Faculty of Environmental Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

(Received June 5, 2020 Accepted Oct. 5, 2020)

To cite this article:

Safari, S., Zarghami, M., Yegani, R., Mosaferi, M. 2021. "Multi-criteria design and evaluation of reverse osmosis desalination systems, case study: the university of Tabriz qanat" Journal of Water and Wastewater, 32(2), 42-53.
Doi: 10.22093/wwj.2020.233753.3031. (In Persian)

Abstract

In recent years, reverse osmosis method has played a major role in desalination of brackish and saline waters. The purpose of this study is to provide a proper desalination system for the use of aqueduct water in the University of Tabriz for health consumption in order for proper water management. According to the results of qualitative experiments, in the first step, the reverse osmosis desalination system was selected and designed. Through that, according to the different types of membranes and pre-purifiers, 15 scenarios were evaluated by 4 main criteria (economic, technical, environmental and social) and 6 sub-criteria. With the help of water application value engine (WAVE) software, the scenarios were modeled based on the opinion of decision makers and the weight of each criterion was calculated. Finally, group fuzzy decision making (GFDM) software was used to analyze group multi-criteria decision making to



determine the best scenario. In this study, by combining the WAVE and GFDM software the opinions of officials and experts are directly applied in the design and selection of the treatment system, leading to increase in the users' satisfaction. Finally, the results show that the M scenario is the best choice of the decision-makers' point of view, which includes XLE-440 membranes for reverse osmosis and SFD-2880 ultrafiltration filter. In addition, to more accurately examine the behavior of the scenarios, sensitivity analysis on the parameters has also been performed.

Keywords: Desalination, Reverse Osmosis Design, Salinity, Multi-Criteria Decision Making, WAVE Software.



مجله آب و فاضلاب، دوره 32، شماره 2، صفحه: 42-53

طراحی و ارزیابی چند معیاره سیستم‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس مطالعه موردی: قنات دانشگاه تبریز

سهیل صفری^۱، مهدی ضرغامی^۲، رضا یگانی^۳، محمد مسافری^۴

- ۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران - مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(نویسنده مسئول) soheilssafarii@gmail.com
- ۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران و استاد مدعو، پژوهشکده علوم و فناوری‌های انرژی، آب و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران
- ۴- استاد، دانشکده بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی، تبریز، ایران

پذیرش ۹۹/۷/۱۴

دریافت ۹۹/۳/۱۶

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

صفری، س.، ضرغامی، م.، یگانی، ر.، مسافری، م.، ۱۴۰۰، "طراحی و ارزیابی چند معیاره سیستم‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس مطالعه موردی: قنات دانشگاه تبریز" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۲): ۴۲-۵۳.
Doi: 10.22093/wwj.2020.233753.3031

چکیده

در سال‌های اخیر اسمز معکوس سهم زیادی را در نمک‌زدایی آب‌های شور و لب‌شور داشته است. هدف از این پژوهش ارائه سیستم نمک‌زدایی مناسب برای بهره‌برداری از آب قنات دانشگاه تبریز در مصارف بهداشتی در راستای مدیریت صحیح آب است. با توجه به نتایج آزمایش‌های کیفی در گام اول اقدام به طراحی و انتخاب سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس شد. در این راستا با توجه به انواع مختلف غشا و پیش‌تصفیه‌ها، ۱۵ سناریو پیشنهاد شد و برای تحلیل و انتخاب بهترین سناریو از ۴ معیار اصلی (اقتصادی، فنی، محیط‌زیستی و اجتماعی) و ۶ زیر معیار بهره گرفته شد. با کمک نرم‌افزار WAVE سناریوها مدل‌سازی شد و سپس بر اساس نظر تصمیم‌گیران، وزن هر معیار محاسبه و در نهایت از نرم‌افزار GFDM برای تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره گروهی استفاده شد تا برترین گزینه از دید تصمیم‌گیران مشخص شود. در این پژوهش با ترکیب نرم‌افزارهای WAVE و GFDM نظرات مسئولین و متخصصان به صورت مستقیم در طراحی و انتخاب سیستم تصفیه اعمال می‌شود که موجب افزایش کارایی سیستم و رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود. در نهایت، سناریو M برترین گزینه از دیدگاه تصمیم‌گیران انتخاب شد که شامل غشاهای XLE-440 برای اسمز معکوس و فیلترهای مدل Ultrafiltration SFD-2880 برای اولترافیلتراسیون است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها، تحلیل حساسیت روی پارامترها انجام شد.

واژه‌های کلیدی: نمک‌زدائی، طراحی اسمز معکوس، شوری، تصمیم‌گیری چند معیاره، نرم‌افزار Wave



۱- مقدمه

جمعیت دنیا از دهه ۱۹۵۰ به بعد از سه میلیارد نفر به حدود هشت میلیارد نفر رسیده که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به ده میلیارد نفر برسد. با این وجود، روندهای تاریخی نشان داده است که استفاده از آب دو برابر رشد جمعیت افزایش یافته و آب بیشتری نه تنها برای تأمین نیازهای اساسی آشامیدنی بلکه برای تولید غذا، صنعت، ارتقای بهداشت و سلامت انسان مورد نیاز است. این رشد سریع و پیش‌بینی نشده تقاضای آب از توان اکوسیستم‌ها و مدیریت انسانی برای عرضه آب سالم برای همه افراد پیش‌بینی گرفته است (Padowski and Jawit, 2009).

ایران از جمله کشورهایی است که در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده و علاوه بر کم بودن متوسط بارش سالانه با پراکنش زمانی و مکانی ناهمگون و نامناسب آن نیز مواجه است. این مسائل به‌طور کلی پتانسیل کم‌آبی و احتمال خشک‌سالی را در ایران افزایش داده و حتی در شرایط عادی نیز در برخی نقاط کشور به‌ویژه نواحی جنوبی، جنوب شرقی و مرکزی در زمینه تأمین آب مورد نیاز مشکلات وسیعی را به‌وجود آورده است (Afrasiabi et al., 2008).

با توجه به افزایش جمعیت و افزایش نرخ مصرف سرانه آب و نیز کمبود منابع آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در سال‌های اخیر روش‌های نمک‌زدایی و شیرین‌سازی آب‌های شور و لب‌شور به‌عنوان یکی از راه‌های مهم تأمین آب در مناطق مذکور مورد توجه ویژه قرار گرفته است. روزانه بیش از ۵۹/۹ میلیون مترمکعب آب نمک‌زدایی شده در ۱۴۴۵۱ سایت موجود در سرتاسر جهان تولید می‌شود. اکثر کشورهای منطقه خاورمیانه و حوزه خلیج فارس مانند امارات متحده عربی، کویت و عربستان سعودی به‌دلیل منابع محدود آب شیرین و البته دسترسی به انرژی ارزان قیمت، در این زمینه پیش‌تاز هستند (Gharibi and Ali Qardashi, 2012).

از آنجا که تمامی منابع آبی آشامیدنی استفاده شده‌اند، در نتیجه استخراج آب آشامیدنی از آب‌های شور می‌تواند به حل این معضل کمک شایانی کند (Morad et al., 2017).

یکی از پرکاربردترین روش‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس^۱

است، اگر یک غشای نیمه‌تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت مثل آب شور و شیرین قرار گیرد، مقداری از آب شیرین از غشا عبور کرده و به سمت آب شور تراوش می‌کند تا محلول را رقیق‌تر کند. این پدیده را اسمز و به این فشار، فشار اسمزی می‌گویند. از آنجایی که غشا نسبت به نمک ناتراوا است، در صورتی که نیرو یا فشار بر قسمت محلول غلیظ وارد شود، جهت جریان آب، برعکس پدیده اسمز، از محلول غلیظ به سمت محلول رقیق خواهد بود که آن را اسمز معکوس می‌نامند. چنین حرکتی عبور محلول غلیظ از فیلتر سبب کاهش غلظت آن شده و املاح آن را به حد قابل قبول برای مصارف آشامیدنی می‌رساند (Salehi et al., 2016).

هدف از این پژوهش طراحی و انتخاب یک سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس است که در معیارهای اقتصادی، فنی، محیط‌زیستی و اجتماعی قابل قبول بوده و بیشترین امتیاز را از دیدگاه تصمیم‌گیران کسب کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محل پژوهش

دانشگاه تبریز یکی از بزرگ‌ترین دانشگاه‌های کشور و دومین دانشگاه قدیمی کشور است که در سال ۱۳۲۸ محوطه این دانشگاه در منطقه‌ای یکپارچه، با سطحی معادل ۲۷۵ هکتار تأسیس شد و اکنون دارای ۶۰۰ هکتار مساحت است. دانشگاه تبریز در ناحیه شرقی تبریز قرار گرفته است و در حال حاضر دارای فضای سبز و درخت‌کاری معادل ۸۷/۶ هکتار است، این دانشگاه ۸۰۰ نفر عضو هیئت علمی، ۲۴۰۰۰ نفر دانشجو و ۱۰۰۰ نفر پرسنل اداری دارد. دانشگاه تبریز دو قنات دارد که مصب آنها در داخل محوطه دانشگاه واقع شده است. دبی این قنات‌ها به ترتیب معادل ۳۵ و ۵ لیتر بر ثانیه است. این پژوهش بر روی قنات با دبی ۵ لیتر بر ثانیه انجام شد.

۲-۱-۱- مشکلات آبی محل انجام پژوهش

مقدار قابل توجهی از آب قنات دانشگاه تبریز مخصوصاً در فصول سرد سال به‌دلیل عدم نیاز به آبیاری فضای سبز به خارج از دانشگاه هدایت شده است و از دسترس خارج می‌شود. این درحالی است که دانشگاه تبریز هزینه زیادی را برای تأمین آب متحمل می‌شود، در

¹ Reverse Osmosis (RO)



یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مواد گروه پلیمرهای طبیعی اصلاح شده محصولات تولید شده بر پایه سلولز هستند استات سلولز، نیترات سلولز و سلولز سولفانات است.

در گروه پلیمرهای سنتزی، تعداد زیادی از پلیمرها مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلیمرهای فلئوئوره شده، الاستومرها و پلی‌آمیدها قرار دارند. خواص مطلوب یک غشای سنتزی از نظر ماده مصرفی و ساختار عبارت‌اند از: قابلیت عملکرد انتخابی مطلوب، نفوذپذیری زیاد، استحکام فیزیکی - مکانیکی خوب، مقاومت دمایی و مقاومت زیاد در برابر مواد مهاجم شیمیایی.

با توجه به انواع مختلف غشاها و پلیمرهای تشکیل‌دهنده آنها هر یک از غشاها و فیلترها دارای خصوصیات متفاوتی هستند که برای تصفیه آب با کیفیت‌ها و شرایط‌های مختلفی مناسب هستند.

در طراحی سناریوها از ترکیب ۵ نوع فیلتر اولترا فیلتر و ۳ نوع غشا استفاده شد که هر یک از این فیلترها و غشاها دارای خصوصیات متفاوت مانند سایز، مقاومت شیمیایی و مقدار مصرف انرژی بودند. در این پژوهش برای انتخاب مناسب‌ترین سناریو نیاز به در نظر گرفتن معیارهای گوناگونی بود. در این پژوهش سعی شد با نگاهی جامع با در نظر گرفتن کلیه جوانب، مناسب‌ترین غشا و فیلتر برای قسمت نمک‌زدایی و پیش‌تصفیه تصفیه آب قنات انتخاب شود.

۲-۳- آنالیز چند معیاره

آنالیز تصمیم، علم و هنر طراحی و یا انتخاب بهترین گزینه بر اساس اهداف و ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. تصمیم‌گیری مستلزم آن است که گزینه‌های دیگری نیز برای انتخاب موجود باشد. در چنین مواردی، نیازی نیست تا تمامی گزینه‌های ممکن شناسایی شود اما نیاز است گزینه‌ای که انتخاب می‌شود، بهترین گزینه باشد که متناسب با اهداف، خواسته‌ها، شیوه زندگی و ارزش‌ها است. به عبارت دیگر، تصمیم‌گیری، علم انتخاب است. به‌عنوان مثال، انتخاب بهترین فناوری برای تأمین آب شهری، تدوین راهکارهای حفاظت از سیل و یا بهینه‌سازی عملکرد مخزن، همگی چالش‌های تصمیم‌گیری و انتخاب هستند (Zarghami and Szidarovszky, 2011).

این راستا تصمیم به تأمین قسمتی از مصارف بهداشتی از آب قنات شد که با توجه به آزمایش‌های کیفی، آب لب‌شور بوده و برای استفاده در مصارف بهداشتی نیاز به نمک‌زدایی دارد.

۲-۲- سیستم اسمز معکوس

اسمز معکوس یکی از فرایندهای غشایی است و برای نمک‌زدایی آب‌های شور، حذف ترکیبات آلی طبیعی، کنترل تشکیل ترکیبات جانبی ناشی از گندزدایی، حذف آلاینده‌های خاص و نرم‌سازی آب به‌کار می‌رود. در این روش از فشار برای معکوس کردن جریان اسمزی آب از درون یک غشای نیمه‌تراوا استفاده می‌شود (Kamran Fard et al., 2018).

یک سیستم اسمز معکوس از بخش‌های اصلی، پیش تصفیه و سیستم تصفیه غشایی اصلی و تصفیه نهایی تشکیل شده است. پیش تصفیه برای جلوگیری یا کم کردن گرفتگی غشایی، پدیده رسوب و کاهش کارایی غشا طراحی می‌شود. سیستم تصفیه اصل همان سیستم RO است. فرایند RO، امکان جداسازی یون‌های معلق و مواد معلق بزرگتر از جریان آب ورودی را فراهم می‌سازد. سیستم تصفیه نهایی، برای سیستم‌های تصفیه غشایی معمولاً شامل تصفیه شیمیایی یا ضد عفونی است (Sami et al., 2019).

سیستم RO در مقایسه با روش‌های دیگر اعم از ED^۱، VC^۲، MSF^۳ و MED^۴ دارای مزایای چون امکان کارکرد پیوسته و مداوم در ۲۴ ساعت روز، قابلیت دریافت ورودی TDS^۵ زیاد، مقدار بازدهی بالا در کل سیستم، نرخ بالای بازیافت آب‌های آلوده تا ۹۸ درصد منابع ورودی بسته به نوع و میزان آلاینده‌ها و مصرف انرژی کم است. همچنین می‌توان از معایب آن به قیمت نسبتاً زیاد غشاها، احتمال وقوع پدیده گرفتگی غشایی، احتمال تشکیل رسوب در غشا و تولید پساب خروجی با TDS بسیار زیاد اشاره کرد.

به‌طور کلی می‌توان پلیمرهای مصرف‌شده در ساخت غشاها را در دو گروه پلیمرهای طبیعی اصلاح شده و پلیمرهای سنتزی تقسیم‌بندی کرد.

¹ Electro-Dialysis (ED)

² Vapor Compression Desalination (VC)

³ Multi Stage Flash Distillation (MSF)

⁴ Multi Effect Distillation (MED)

⁵ Total Dissolved Solids (TDS)



۲-۳-۱- روش جمع وزنی ساده^۱

این روش ساده‌ترین و پرکاربردترین روش تحلیل چند معیاره است. در این روش، همه معیارها به یک مقیاس متعارف تبدیل می‌شوند. این مقیاس، معمولاً بین صفر و یک اختیار می‌شود که عدد یک، نمایانگر بهترین عملکرد است. انتخاب گزینه‌ها بر اساس مقدار S_i است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j r_{ij}}{\sum_{i=1}^n W_j} \quad (1)$$

که در آن

W_j وزن معیار r_{ij} امتیاز نرمال گزینه i ام از دید معیار j ام است که توسط معادله ۱ قابل محاسبه است.

۲-۳-۲- روش تاپسیس^۲

روش تاپسیس در این روش گزینه انتخابی باید کوتاه‌ترین فاصله از جواب ایده‌آل و بیشترین فاصله از جواب غیرایده‌آل را داشته باشد. مقدار فاصله هر گزینه با جواب‌های ایده‌آل S_i^* و غیرایده‌آل S_i^- که به ترتیب زیر نشان داده می‌شوند

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

که در آن

v_{ij} مقدار نرمال موزون عملکرد گزینه i ام از دید معیار j ام است. v_j^* و v_j^- به ترتیب مقدارهای آرمانی و نامطلوب برای معیار j ام هستند. رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از محاسبه نزدیکی نسبی C_i^* هر گزینه به جواب ایده‌آل به دست می‌آید (Zarghami and Ehsani, 2011)

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

۲-۳-۳- فازی^۳

در تعریف اکثر مسائل عملی، قضاوت‌های انسانی اغلب مبهم

هستند و بنابراین نمی‌توان با استفاده از مقدار، عدد دقیقی بیان کرد. مجموعه‌های فازی راهی برای نشان دادن و تغییر داده‌هایی که دقیق نیستند بلکه نسبتاً مبهم هستند، ارائه می‌دهند. چنین قضاوت‌های مبهم اغلب برای ارزیابی پروژه‌های منابع آب استفاده می‌شود و بنابراین باید از نظریه مجموعه فازی در برخورد با عدم قطعیتشان استفاده شود. با فرض اینکه X مجموعه‌ای غیرتهی و مشخص باشد، یک مجموعه فازی A در X با تابع عضویتش مشخص می‌شود

$$\mu_A: X \rightarrow [0 - 1] \quad (5)$$

که در آن

μ به عنوان درجه‌ای که المان X به مجموعه A تعلق دارد، تعریف می‌شود.

در این روش وزن هر معیار با استفاده از معادله ۵ به دست می‌آید

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} W_i \quad (6)$$

که در آن

W_i وزن معیار i ام و a_{ij} امتیاز نرمال شده گزینه i ام از دید معیار j ام است (Zarghami and Szidarovszky, 2011).

۲-۳-۴- محاسبه درجه اجماع

برای محاسبه درجه اجماع ابتدا درجه عدم توافق یا شاخص دوری نظر هر ذی‌نفع به ایده‌گروهی را مطابق معادله زیر تعریف می‌کنند

$$d_q(C_i) = |IS(C_i) - IGS(C_i)|^p \quad (7)$$

که در آن

$d_q(C_i)$ شاخص دوری ایده فرد q از ایده گروه، $IS(C_i)$ مقدار ارزش عددی ایده ذی‌نفع و $IGS(C_i)$ مقدار ارزش عددی ایده گروه درباره اهمیت معیارها هستند.

حال به کمک شاخص فوق درجه اجماع گروه محاسبه می‌شود. در این پژوهش میزان اجماع روی هر معیار با استفاده از معادله ۷ به صورت معادله زیر تعریف می‌شود

¹ Simple Additive Weighing (SAW)

² Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

³ Fuzzy



۲-۳-۵-۲- نرم افزار GFDM

برای ارزیابی و بهینه‌سازی هر چه بهتر سناریوهای پیشنهادی، از نرم افزار GFDM استفاده می‌شود. این نرم افزار با توجه به تصمیم‌گیری‌های تصمیم‌گیران ابتدا اقدام به تعیین وزن معیارها کرده و سپس با مقایسه سناریوهای ارائه شده بر اساس روش موجود، نتایج حاصل را بر اساس اولویت و اهمیت معیارها برای تصمیم‌گیران مشخص می‌کند. در این بخش نرم افزار از روش‌های TOPSIS و جمع وزنی ساده استفاده شد. در واقع ابتدا به کمک یک سیستم هوشمند بین دو روش ذکر شده انتخاب انجام شد. این انتخاب با یک قانون اگر-آنگاه بوده و به صورت زیر است:

اگر در ماتریس تصمیم‌گیری تعداد گزینه‌ها کمتر از نصف تعداد معیارها باشند آنگاه روش جمع وزنی ساده، به خاطر عملکرد بهتر، انتخاب می‌شود. در غیر این صورت از روش TOPSIS برای انجام محاسبات استفاده می‌شود (Ardakanian and Zarghami, 2010). همچنین قابل ذکر است که در این پژوهش سعی شد که تصمیم‌گیران افراد متخصص و با تجربه در بخش‌های مرتبط با این پژوهش باشند، معیارهای اصلی و زیر معیارها برای تصمیم‌گیری به صورت زیر هستند:

- معیار اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری
 - معیار فنی شامل کارایی سیستم RO و مقدار مصرف انرژی
 - معیار محیط‌زیستی شامل غلظت پساب خروجی
 - معیار اجتماعی شامل کیفیت آب تولیدی
- با توجه به آزمایش‌های کیفی آب قنات و لپ‌شور بودن آن برای استفاده بهداشتی از این آب نیاز به نمک‌زدایی است. در این راستا برای انتخاب مناسب‌ترین سیستم نمک‌زدایی RO ۱۵ سناریو در جدول ۱ تعریف شده است که از فیلترها و غشاهای مختلف که دارای خصوصیات متفاوت هستند، استفاده شد.

۲-۴- مدل‌سازی سیستم RO

برای آنالیز و شبیه‌سازی هر یک از سناریوهای جدول ۱ از نرم افزار WAVE استفاده شد. نرم افزار WAVE قابلیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم RO را به صورت کامل دارد. برای مدل‌سازی از سیستم اولترافیلتراسیون برای بخش پیش تصفیه و از سیستم RO برای بخش تصفیه اصلی استفاده شد و به علت غلظت نسبتاً کم آلاینده‌ها از بخش تصفیه نهایی صرف نظر شد.

$$CGS(C_i) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m d_q(C_i) \quad (۸)$$

که در آن

$CGS(C_i)$ میزان اجماع افراد گروه روی معیار $d_q(C_i)$ شاخص عدم توافق هر ذی‌نفع و m تعداد ذی‌نفعان است (Zarghami and Szidarovszky, 2011)

۲-۳-۵- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روی وزن دسته معیارهای اقتصادی، فنی، محیط‌زیستی و اجتماعی انجام می‌شود. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان تغییرات پارامترهای موجود در تصمیم‌گیری را بر روی گزینه‌ها بررسی کرد. برای آنالیز حساسیت، مجموعه معیارهای مختلف شامل فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی در نرم افزار GFDM^۱ با تعریف یک تصمیم‌گیر واحد امتیاز معیارهای مرتبط با آن ویژگی را خیلی زیاد فرض کرده و برای سایر معیارها از امتیاز خیلی کم استفاده می‌شود.

۲-۳-۵-۱- مراحل انجام آنالیز چند معیاره

در این پژوهش برای انتخاب سیستم تصفیه مناسب ابتدا ۱۵ سناریو پیشنهاد شد، سپس با استفاده از نرم افزار WAVE^۲ سناریوها مدل‌سازی شده و امتیاز هر سناریو نسبت به زیر معیار مشخص شد. در مرحله بعدی قدرت هر تصمیم‌گیر از گروه تصمیم‌گیران متشکل از مدیریت امور فنی و نظارت بر طرح‌های عمرانی دانشگاه، معاونت امور فنی و نظارت بر طرح‌های عمرانی دانشگاه، هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران (مدیریت منابع آب) دانشگاه تبریز، هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی سهند و هیئت علمی دانشکده بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی تبریز، با توجه به مسئولیت، سابقه کاری، تجربه و تحصیلات عالی هر تصمیم‌گیرنده، مشخص شد. سپس نظرات هر تصمیم‌گیر نسبت به میزان اهمیت هر زیرمعیار برای تصمیم‌گیری مشخص شد. در نهایت با نظر تصمیم‌گیران و با کمک نرم افزار GFDM امتیاز هر سناریو مشخص شد.

¹ Group Fuzzy Decision Making (GFDM)

² Water Application Valu Engine (WAVE)



۵-۲- تنظیمات نرم‌افزار GFDM

جدول ۲ ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل یافته است که مقدار وارد شده در ماتریس بر اساس داده‌های جدول ۴ که خروجی‌های نرم‌افزار WAVE است می‌باشد. در هزینه سرمایه‌گذاری خرید ممبران‌های RO و فیلترهای اولترا در نظر گرفته شد و به دلیل نوسان بازار، ۵ میلیون ریال بازه‌ی چپ و راست لحاظ شد. قابل ذکر است تمامی هزینه‌ها در جداول به میلیون ریال نوشته شده است. همچنین زیر معیارهایی که تأثیر منفی بر ارزیابی دارند، با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. تأثیر منفی به این معنی است که افزایش مقدار آنها سبب کاهش مطلوبیت آن معیار می‌شود. بنابراین با تغییر نحوه محاسبه آن به ارائه ماتریس مذکور پرداخته شد. در جدول ۳ نظرات اساتید و متخصصان برای هر معیار و همچنین وزن هر تصمیم‌گیرنده به صورت مقدار بیانی آورده شده است. با توجه به مسئولیت، سابقه کاری، تجربه و تحصیلات عالی هر تصمیم‌گیرنده، وزن هر تصمیم‌گیرنده عنوان شده است.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۴ نتایج مدل‌سازی سناریوها توسط نرم‌افزار WAVE و محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری برای هر سناریو نوشته شده است.

۳-۱- نتایج نرم‌افزار GFDM

برای انتخاب، هر معیاری نیازمند اجماع تصمیم‌گیران است. این درجه اجماع نشان‌دهنده آن است که معیارهایی در ارزیابی گزینه‌ها دخیل باشند که وزن آنها حداقل درجه اجماع را از دید افراد گروه داشته باشند. در واقع درجه اجماع، نشان‌دهنده اهمیت هر معیار برای تصمیم‌گیران است. با توجه به این که درجه اجماع متوسط انتخاب شده و تمامی گزینه‌ها از مقدار متوسط بیشترند، بنابراین معیاری حذف نشد. با توجه به جدول ۵ به نظر می‌رسد که انتخاب معیارها و زیر معیارها به صورت مناسبی انجام شده و از نظر تصمیم‌گیران اهمیت دارند و برای ارزیابی پژوهش پیش‌رو مؤثر هستند.

جدول ۱- سناریوهای سیستم RO

Table 1. Reverse osmosis system scenarios

Scenarios	UF module	UF config	RO module	RO 1 st stage config	RO 2 st stage config.	Total ELS per stage
A	Ultrafiltration SFD-2880	1×4	BW30-4040	3×7	1×5	26
B	IntegraFluxSFD- 2880XP	1×4	BW30-4040	3×7	1×5	26
C	IntegraFlux UXA-2680XP	1×6	BW30-4040	3×7	1×5	26
D	Ultrafiltration SFD-2880	1×4	LC LE-4040	1×6	1×5	11
E	IntegraFluxSFD- 2880XP	1×4	LC LE-4040	1×6	1×5	11
F	IntegraFlux UXA-2680XP	1×6	LC LE-4040	1×6	1×5	11
G	Ultrafiltration SFD-2880	1×4	XLE-4040	2×2	1×7	11
H	IntegraFluxSFD- 2880XP	1×4	XLE-4040	2×2	1×7	11
I	IntegraFlux UXA-2680XP	1×6	XLE-4040	2×2	1×7	11
J	Ultrafiltration SFD-2880	1×4	BW30-400	1×1	1×4	5
K	IntegraFluxSFD- 2880XP	1×4	BW30-400	1×1	1×4	5
L	IntegraFlux UXA-2680XP	1×6	BW30-400	1×1	1×4	5
M	Ultrafiltration SFD-2880	1×4	XLE-440	1×1	1×2	3
N	IntegraFluxSFD- 2880XP	1×4	XLE-440	1×1	1×2	3
O	IntegraFlux UXA-2680XP	1×6	XLE-440	1×1	1×2	3



جدول ۲- ماتریس تصمیم‌گیری
Table 2. Decision matrix

Index name	Initial cost	Operating cost	Water quality	System efficiency	Output effluent concentration	Energy consumption
Index data type	Fuzzy	Certain	Certain	Certain	Certain	Certain
Index weight	w:0.7053	w:0.6387	w:0.6593	w:0.6725	w:0.4451	w:0.5363
Scenario A	m:2087.5, a:5, b:5	45.8	105.3	72.6	10338	1063.26
Scenario B	m:2107.5, a:5, b:5	45.875	105.3	72.6	10337	1066.6
Scenario C	m:2097.5, a:5, b:5	45.65	105.3	72.5	10338	1056.57
Scenario D	m:1041.25, a:5, b:5	416.25	107.2	69.4	9552	17447.54
Scenario E	m:1061.25, a:5, b:5	413.75	107.2	69.4	9556	17337.45
Scenario F	m:1051.25, a:5, b:5	406.5	107.2	69.4	9563	17008.9
Scenario G	m:1055, a:5, b:5	177.1	112.9	71.4	9986	6866.02
Scenario H	M1075, a:5, b:5	175.825	112.9	71.4	9988	6810.81
Scenario I	m:1065, a:5, b:5	172.125	112.9	71.3	9993	664653
Scenario J	m:1077.5, a:5, b:5	71.4	105.5	72.4	10272	2194.82
Scenario K	m:1097.5, a:5, b:5	71.075	105.5	72.4	10273	2181.62
Scenario L	m:1087.5, a:5, b:5	70.325	105.5	72.3	10275	2147.26
Scenario M	m:735, a:5, b:5	36.475	121.3	72.7	10308	650.76
Scenario N	m:755, a:5, b:5	36.45	121.3	72.7	10308	650.19
Scenario O	m:745, a:5, b:5	36.4	121.3	72.6	10308	648.76

جدول ۳- وزن تصمیم‌گیران روی معیارها
Table 3. Decision makers weight on criteria

Rank	Name	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
	Power	Very much	Very much	Very much	High	Very much
1	Initial cost	Relatively large	High	High	Very much	Relatively large
2	Operating cost	High	Relatively large	Relatively large	High	Normal
3	Water quality of production	Very much	Relatively large	High	Relatively low	Normal
4	System efficiency	Normal	Very much	Very much	Normal	Normal
5	Output effluent concentration	Relatively low	Relatively low	Normal	Relatively large	Normal
6	Energy consumption	Relatively large	Relatively large	High	Low	Low



جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار WAVE بر اساس معیارهای اصلی و زیر معیارها

Table 4. The results of WAVE software analysis based on the main and sub-criteria

Scenarios	Technical		Social	Environmental	Economic	
	The reverse osmosis system efficiency %	Energy consumption (Kws/d)	Quality of produced water (ppm)	Output effluent concentration (ppm)	Initial cost	Operating cost (\$/d)
A	72.6	1063.26	105.3	10338	2087.5	45.8
B	72.6	1066.6	105.3	10337	2107.5	45.875
C	72.5	1056.57	105.3	10338	2097.5	45.65
D	69.4	17447.54	107.2	9552	1041.25	416.25
E	69.4	17337.45	107.2	9556	1061.25	413.75
F	69.4	17008.9	107.2	9563	1051.25	406.5
G	71.4	6866.02	112.9	9986	1055	177.1
H	71.4	6810.81	112.9	9988	1075	175.85
I	71.3	6646.53	112.9	9993	1065	172.125
J	72.4	2194.82	105.5	10272	1077.5	71.4
K	72.4	2181.62	105.5	10273	1097.5	71.075
L	72.3	2147.26	105.5	10275	1087.5	281.3
M	72.7	650.76	121.3	10308	735	36.475
N	72.7	650.19	121.3	10308	755	36.45
O	72.6	645.76	121.3	10308	745	36.4

تصمیم‌گیرندگان گروه داشته باشند. هر چقدر این مقدار به یکدیگر نزدیک تر باشند، نشان‌دهنده آن است که نظرات تصمیم‌گیران به یکدیگر نزدیک هستند و اتفاق نظر مناسبی وجود دارد. با توجه به اینکه در پژوهش پیش‌رو از تصمیم‌گیری متخصص در این حوزه نظرسنجی انجام شد، به نظر می‌رسد نظرات نزدیک به هم است و اختلاف نظر کمی وجود دارد.

نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۷ آمده است. این نتایج حاکی از آن است که سناریوی M، برترین گزینه بر اساس نظرات تصمیم‌گیران است. در سناریو M از غشاهای XLE-440 و فیلترهای اولترافیلتر مدل Ultrafiltration SFD-2880 استفاده شده است که موجب کاهش هزینه اولیه، هزینه بهره‌برداری و مصرف انرژی شده و افزایش بازده را نیز به همراه داشت و گزینه مناسبی به نظر می‌رسد.

۳-۲- آنالیز حساسیت

برای بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها در جدول ۸ تحلیل حساسیت روی پارامترها ارائه می‌شود.

جدول ۵- درجه اجماع معیارها

Table 5. Degree of consensus of criteria

Number	Index name	Degree of consensus
1	Initial cost	C:89.61
2	Operating cost	C:90.32
3	Water quality of production	C:82.31
4	System efficiency	C:79.55
5	Output effluent concentration	C:89.90
6	Energy consumption	C:76.73

درجه اجماع تصمیم‌گیر نیز نشان‌دهنده نزدیک بودن نظرات هر تصمیم‌گیرنده با نظرات گروه تصمیم‌گیری است. به این معنی که هرکسی امتیاز بیشتری داشته باشد، نظراتش به گروه تصمیم‌گیری نزدیک‌تر است و بالعکس. با توجه به جدول ۶ به نظر می‌رسد نظرات تصمیم‌گیر D₂ و D₃ بیشترین مطابقت را با نظرات



جدول ۷- جدول امتیازدهی گزینه‌ها

Table 7. Options scoring table

Scenarios	Score
M	R:94.60
O	R:94.58
N	R:94.55
J	R:86.68
L	R:86.62
K	R:86.29
A	R:67.94
C	R:67.79
B	R:69.62
I	R:66.17
H	R:65.25
G	R:65.19
F	R:27.11
D	R:26.74
E	R:26.50

جدول ۶- درجه اجماع تصمیم‌گیران

Table 6. The degree of consensus of decision makers

Name	Degree of consensus
D ₁	C:85.61
D ₂	C:90.39
D ₃	C:86.37
D ₄	C:76.60
D ₅	C:84.72

با توجه به آنالیز حساسیت معیارهای اقتصادی شامل هزینه بهره‌برداری و هزینه سرمایه‌گذاری مشاهده می‌شود سناریو M، O و N به ترتیب در اولویت اول تا سوم اقتصادی قرار دارند، سپس حساسیت معیارهای فنی شامل میزان مصرف انرژی و کارایی سیستم بررسی شد که سناریو M در اولویت اول قرار گرفت. همچنین تحلیل حساسیت معیار محیط‌زیستی شامل غلظت پساب خروجی انجام شد که با تفاوت اندک سناریو M در اولویت قرار گرفت و در نهایت تحلیل حساسیت با تأکید روی وزن معیار اجتماعی که شامل کیفیت آب است انجام شد که در آن سناریو L در اولویت اول قرار دارد.

جدول ۸- نتیجه آنالیز حساسیت بر روی معیارها

Table 8. Results of sensitivity analysis on criteria

Rank	Economical		Technical		Environmental		Social	
	Scenario	Point	Scenario	Point	Scenario	Point	Scenario	Point
1	M	99.39	M	99.35	M	75.84	L	89.41
2	O	99.29	N	99.35	O	75.82	J	89.41
3	N	99.6	O	99.34	N	75.80	K	89.16
4	J	85.57	A	95.23	J	73.29	A	75.35
5	L	85.43	C	95.22	L	73.25	C	75.22
6	K	85.06	B	95.17	K	73.17	B	75.07
7	I	66.93	L	91.02	A	65.29	M	62.16
8	G	66.06	K	90.81	C	65.21	O	62.14
9	H	66.02	J	90.74	B	65.11	N	62.12
10	A	63.49	I	64.31	I	63.34	I	61.97
11	C	63.33	H	63.34	H	62.60	H	61.32
12	B	63.15	G	63.01	G	62.52	G	61.23
13	F	30.84	F	4.17	F	31.98	F	39.80
14	D	30.47	E	3.29	D	31.65	E	39.26
15	E	30.19	D	3.26	E	31.55	D	39.22



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده به وسیله نرم‌افزار WAVE مدل‌سازی شد. سپس اقدام به تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و انتخاب سناریو برتر از دید تصمیم‌گیران شد. در نهایت سناریو M از دیدگاه تصمیم‌گیران بیشترین امتیاز را کسب کرد که شامل غشاهای XLE-440 و فیلترهای اولترا مدل Ultrafiltration SFD-2880 است که موجب کاهش هزینه اولیه، هزینه بهره‌برداری و مصرف انرژی شده همچنین افزایش بازده را نیز همراه داشته است و گزینه مناسبی به نظر می‌رسد. همچنین استفاده از دو نرم‌افزار WAVE و GFDM باعث افزایش کارایی سیستم تصفیه و مطابقت آن با نظر تصمیم‌گیران می‌شود. در نهایت برای بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها

تحلیل حساسیت روی پارامترها انجام شد. تا اولویت هر سناریو برای هر یک از معیارها مشخص شود که در سه معیار اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی سناریو M و در معیار اجتماعی سناریو L در اولویت اول قرار گرفتند.

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش از حمایت‌های و زحمات، مدیریت امور فنی و نظارت بر طرح‌های عمرانی دانشگاه تبریز، جناب آقای مهدی صنعتی‌پور (پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه تبریز)، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز و جناب آقای محمد علی عابدپور (آزمایشگاه شیمی محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تبریز) کمال تقدیر و تشکر را دارند.

References

- Afrasiabi, N., Ehteshami, M. & Ardakanian, R. 2008. Optimal design of reverse osmosis water treatment system by ROSA model, 2nd Specialized Conference on Environmental Engineering, University of Tehran, Faculty of Environment, Tehran, Iran. (In Persian)
- Ardakanian R. & Zarghami M. 2010. *Management of water resources development projects*. 1st Edition. University Jihad Publications, Iran. (In Persian)
- Gharibi, H., & Ali Qardashi, A. 2012. New achievements in reducing the physical environmental chemical effects of saltwater desalination projects, Specialized Conference on Saltwater Desalination, *Brackish and Wastewater Treatment*, University of Water and Power Industry, Tehran, Iran. (In Persian)
- Kamran Fard, T., Khanian Lish, M. & Haji Ali Gol, A. 2018, Review and comparison of different methods of seawater desalination, 4th International Conference on New Findings in Agricultural Sciences, *Natural Resources and Environment*, Association for the Development and Promotion of Fundamental Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian).
- Morad, M. M., El-Maghawry, H. A. & Wasfy, K. I. 2017. A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity, *Solar Energy*, 146, 20-29.
- Padwsky, J. C. & Jawits, J. W. 2009. The future of global water scarcity: policy and management challenges and opportunities. *The Whitehead Journal of Diplomacy and International Relations*, 10, 99-114.
- Salehi, S., Khanjani, M. & Barani, Gh. 2016. Economic evaluation of different desalination technologies, *International Conference on Sustainable Development, Strategies and Challenges with a Focus on Agriculture, Natural Resources, Environment Biology and Tourism*, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian)
- Sami, B., Zarghami, M., Yegani, R. & Mehran, P. 2019, Design of solar water supply system by reverse osmosis-photovoltaic method (case study: brackish water in Sarband village of Ardabil). *Scientific Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 4(2), 37-46. (In Persian)
- Zarghami, M. & Ehsani A. 2011. Evaluation of different multi-criteria decision making methods in selecting water transfer projects to Urmia Lake basin. *Iran-Water Resources Research*, 7(2), 1-14. (In Persian)
- Zarghami, M. & Szidarovszky, F. 2011. *Multi criteria analysis: applications to water and environment management*, Springer Science and Business Media, New York, USA.

