تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
Volume 16, No. 1, Spring 2020 (IR-WRR)
۲۷۵-۲۸۸

بکارگیری ارزیابی چرخه حیات (LCA) در مقایسه اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس با آبگیری مستقیم از دریا و چاه‌های ساحلی در سامانه‌های نمک‌زدایی چابهار و کنگان

مرتضی بخشایش[۱]، مریم فراهانی[۲*] و آزیتا بهبهانی‌نیا[۳]

چکیده

رشد روز افزون تقاضا برای آب و محدودیت دسترسی به منابع آب شیرین منجر به استفاده از نمک‌زدایی آب دریا در کشورهای زیادی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک گردیده است. با توجه به اهمیت اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی، تحقیق حاضر با هدف مقایسه اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی چابهار و کنگان انجام پذیرفت. روش نمک‌زدایی در هر دو سامانه، اسمز معکوس بوده و در سامانه کنگان روش تأمین آب از چاه‌های ساحلی و به‌طور غیرمستقیم از آب خلیج فارس و در چابهار به‌طور مستقیم از آب دریای عمان می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی اثرات زیست محیطی از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) استفاده گردید. پس از تهیه لیست کاملی از موجودی مواد و انرژی در تمامی مراحل تولید آب شیرین، با بهره‌گیری از روش ارزیابی IMPACT 2002+ نسخه (۲,۱۵) و نرم‌افزار SimaPro9 اثرات محیط زیستی تمامی مراحل فرآیند نمک‌زدایی آب دریا بر طبقات مختلف اثر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین اثر در هر دو سامانه مربوط به تغییرات اقلیمی و کاهش منابع اولیه بود. به طوری که به ازای تولید ۱ مترمکعب آب شیرین در سامانه کنگان و چابهار به ترتیب معادل ۳/۲۲۴ و ۳/۶۲۷ کیلوگرم دی اکسیدکربن تولید و ۵۵/۰۳۵ و ۶۱/۹۲۸ مگاژول کاهش در منابع اولیه ایجاد می‌شود. اثرات محیط زیستی در سامانه کنگان به صورت معنی‌داری کمتر از سامانه چابهار است. لذا به‌نظر می‌رسد، استفاده از چاه‌های ساحلی برای تأمین آب ورودی در سامانه‌های نمک‌زدایی مناسب‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: ارزیابی چرخه حیات، دریای عمان، خلیج فارس، LCA، نمک‌زدایی، اثرات محیط زیستی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱/۱۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
۲- استادیار، گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
۳- استادیار، گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Using Life Cycle Assessment (LCA) in Comparing the Environmental Impacts of Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Open Intake and Beach Wells Intake in Chabahar and Kangan Desalination Plants

M. Bakhshayesh [1], M. Farahani [2], and A. Behbahaninia [3]*

Abstract

Increasing water demand and limitation of accessing to freshwater resources have been caused using of seawater desalination in most countries, especially arid and semiarid regions. Due to the importance of environmental impacts of desalination plants, the present study carried out to comparing the environmental impacts of Chabahar and Kangan desalination plants. Desalting method is reverse osmosis in both plants. The extraction of the raw seawater in the Kangan plant is beach well intake which supplying indirectly from Persian Gulf and in Chabahar plant is open intake and supplying directly from Oman Seawater. Therefore, the Life Cycle Assessment (LCA) method was used. After preparing a complete inventory of materials and energy at all stages of freshwater production, the environmental impacts of all seawater desalting processes on different environmental impact classes were evaluated using Impact 2002+ version (2.15) and SimaPro9 software. According to the results, the greatest impact on both plants were climate change and reduction of primary resources. So that, equivalent 3.224 and 3.627 Kg carbon dioxide has been released and reduced 55.035 and 61.928 MJ in primary sources, in Kangan and Chabahar plants, respectively, as producing 1 m3 of desalinated water. Therefore, it seems that using beach wells intake to extracting seawater in desalination plants is more appropriate.

Keywords: Life Cycle Assessment, Oman Sea, Persian Gulf, LCA, Desalination, Environmental Impacts.

Received: January 30, 2020
Accepted: April 2, 2020

1- Ph.D. Student, Environment Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email: mbakhshayesh@ut.ac.ir
2- Assistant Professor, Environment Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email: mfarahani@riau.ac.ir
3- Assistant Professor, Environment Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email: azitabehbahani@yahoo.com
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

حدود یک و نیم میلیارد نفر از مردم دنیا به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند و در عین حال مصرف آب سالانه ۴ درصد در جهان افزایش می‌یابد (Wu et al., 2015) با افزایش جمعیت، افزایش مصرف سرانه آب و افزایش استانداردهای سطح زندگی و از طرفی وجود مقادیر ثابت آب قابل دسترس، رویارویی با کم‌آبی امری اجتناب‌ناپذیر است (Dehghani et al., 2020; Mahdavi et al., 2011). در ایران نیز محدویت منابع آب شیرین، یکی از مهمترین چالش‌های فراروی مدیریت منابع آب تلقی می‌شود (Nouri et al., 2017). به منظور مواجهه با چالش‌های کمبود منابع آب طبیعی، نمک‌زدایی آب دریا[1] به عنوان روشی جایگزین برای تأمین آب آشامیدنی مطرح گردیده است که از نظر مقدار و کیفیت، قابل قبول و اطمینان می‌باشد (Ebrahimi and Pourghissari, 2014). سیستم‌های نمک‌زدایی عمدتا در دو گروه فرآیندهای غشایی و فرآیندهای حرارتی قرار می‌گیرند. در فرآیندهای غشایی برای تولید آب شیرین، از نیروی محرکه الکتریکی یا مکانیکی استفاده می‌شود (Ghasemi and Ashrafzadeh, 2012). در فرآیندهای حرارتی از فرآیند تبخیر برای تبدیل آب به بخار استفاده شده و با میعان بخار تولیدی، آبی کم‌نمک تولید می‌گردد. بر اساس تجارب کشورهای مختلف، روش نمک‌زدایی آب دریا علیرغم هزینه زیاد ساخت و مشکلات زیست محیطی در دریا، بهترین راه ممکن برای جبران کمبود آب در مناطق ساحلی می‌باشد (Esfandiarnejad et al., 2014). مصرف بالای انرژی، انتشار آلاینده‌ها به هوا، اثرات ناشی از تخلیه پساب به دریا و ایجاد آلودگی صوتی از مهمترین اثرات محیط زیستی نمک‌زدایی آب دریا است (Ebrahimi and Pourghissari, 2014; Ibrahim et al., 2018). میزان و اهمیت پیامدهای محیط زیستی فوق به فناوری به کار رفته جهت نمک‌زدایی بستگی دارد (Latteman, 2010; Kvadsheim, 2013; Fazeli et al., 2016; González-Bravo et al., 2017) لذا بکارگیری ارزیابی چرخه حیات (LCA)[2] روش مناسبی جهت برآورد اثرات محیط زیستی، بهینه‌سازی و طرح‌ریزی مناسب سامانه‌های نمک‌زدایی می‌باشد. ارزیابی چرخه حیات با گردآوری و ارزیابی دروندادها، بروندادها و پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی یک سیستم محصول در تمام چرخه حیات آن، امکان تخمین اثرات زیست‌محیطی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخه حیات محصول را فراهم می‌آورد (Mohamed-Zine et al., 2013). ارزیابی چرخه حیات یک رویکرد گهواره تا گور برای ارزیابی سیستم‌های صنعتی است. فرآیند ارزیابی چرخه حیات می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب محصول یا فرآیند با کمترین اثرات محیط‌زیستی کمک کند. LCA به جلوگیری از انتقال مشکلات محیط‌زیستی از مرحله‌ای به مرحله دیگر کمک می‌کند (Hancock et al., 2012). از جمله استراتژی‌هایی که معمولا برای کاهش اثرات محیط زیستی در سامانه‌های نمک‌زدایی پیشنهاد شده است می‌توان به تغییر در فرآیند نمک‌زدایی از روش‌های حرارتی نظیر تقطیر ناگهانی (MSF)[3] به روش اسمز معکوس (RO)[4]، بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تأمین انرژی مورد نیاز، استفاده از سوخت‌های فسیلی پاک‌تر، تغییر در اندازه واحدها و بهینه‌سازی موقعیت محل قراگیری سامانه اشاره نمود (Fazeli et al., 2016; González-Bravo et al., 2017). اگر چه فرآیندهای حرارتی در حدود سال‌های ۱۹۹۷ فرآیند غالب نمک‌زدایی بوده است، ولی در حال حاضر به دلیل کارآمدی بالاتر در شیوه اسمز معکوس، روش RO رشد ۶۵ درصدی ظرفیت سامانه‌های نمک‌زدایی را به خود اختصاص داده است (Mohammadi Jouzdani et al., 2019).

مطالعات متعددی در زمینه انتخاب استراتژی مناسب جهت کاهش اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی به‌وسیله LCA صورت گرفته است. آن‌چنان که (Al-Shayji and Aleisa, 2018) در مطالعه‌ای با استفاده از ارزیابی چرخه حیات، اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی کشور کویت را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان داده است نوع سوخت فسیلی بکار رفته جهت تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز، تأثیر معنی‌داری در اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی دارد. به‌طوری که گازطبیعی به جز اثر پتانسیل تخریب محیط غیر زنده در سایر اثرات محیط زیستی کمترین تأثیر را نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی (نفت خام، دیزل و نفت سنگین) نشان داده است. در مطالعه دیگری (Liu et al., 2015) از ابزار LCA در برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرآیند تولید آب نمک‌زدایی شده در سامانه‌های نمک‌زدایی امارات متحده عربی استفاده کرده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که سهم سامانه‌های نمک‌زدایی در تولید گازهای گلخانه‌ای در واحدهایی که از روش‌های MSF و RO استفاده می‌کنند به ترتیب معادل ۲/۹۸۸ و ۲/۵۶۲ کیلوگرم CO_2 به ازای ۱ مترمکعب آب بوده است. سامانه‌های نمک‌زدایی از دو شیوه مستقیم و غیر مستقیم برای آبگیری از دریا استفاده می‌کنند. در روش مستقیم یا سطحی، آب به شکل مستقیم از دریا استخراج و به سامانه هدایت می‌شود. درحالی‌که در روش غیرمستقیم، برداشت آب شور از آبخوان‌های ساحلی به‌وسیله حفر چاه‌های ساحلی انجام می‌گیرد (Missimer and Maliva, 2018). در این ارتباط Shahabi et al. (2015) از ارزیابی چرخه حیات جهت مقایسه اثرات محیط زیستی دو سامانه نمک‌زدایی در استرالیا استفاده کرده‌اند. عملیات نمک‌زدایی در هر دو سامانه با استفاده از فرآیند اسمز معکوس دریایی (SWRO)[5] انجام می‌شده است. با این تفاوت که در یکی از واحدها آب ورودی به شکل مستقیم از دریا تأمین و عملیات

پیش تصفیه با استفاده از سیستم غشایی انجام می‌گردیده است. درحالی‌که در سامانه دیگر، آب ورودی از چاه‌های ساحلی تأمین و از فیلترهای کارتریج برای پیش تصفیه استفاده می‌گردیده است. نتایج آنها نشان داده است در واحدی که از چاه‌های ساحلی استفاده می‌شده‌است، اثرات محیط زیستی ۳۱ درصد کمتر بوده است. Missimer et al. (2015) نیز اظهار داشته‌اند بکارگیری تکنیک زیرسطحی جهت تأمین آب ورودی در سامانه‌های SWRO ضمن بهبود کیفیت آب ورودی به سامانه، منجر به کاهش ۷۵ تا ۹۰ درصدی شاخص چگالی لجن، حذف تقریباً همه جلبک‌ها، حذف بیش از ۹۰ درصد باکتری‌ها، کاهش غلظت کربن آلی (TOC) و از بین بردن بیوپلیمرها و پلی‌ساکاریدهایی می‌گردد که باعث گرفتگی ممبران‌ها می‌شوند. همچنین تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی آنها نشان داده است؛ هزینه‌های عملیاتی SWRO با استفاده از سیستم‌های زیرسطحی تأمین آب، می‌تواند ۵ تا ۳۰ درصد کاهش یابد.

در کشور ایران تاکنون ارزیابی چرخه حیات پروژه‌های نمک‌زدایی انجام نشده است. ولی مطالعاتی پیرامون ارزیابی اثرات پروژه‌های نمک‌زدایی یا بررسی تأثیر پساب این صنایع بر محیط زیست دریا انجام شده است. به‌طوری‌که (Asadpour and Mirhosseini, 2009) ضمن ارزیابی اثرات زیست محیطی پروژه‌های نمک‌زدایی در جزیره قشم به این نتیجه رسیده‌اند که به‌طور کلی ایجاد آلودگی از نوع شوری (پساب شور) تأثیر در بالابردن دمای آب ساحل، اشغال ساحل جهت نصب تأسیسات کارخانه به جای کاربری‌های تفریحی و توریستی، اثرات منفی بر سفره‌های آب، آلودگی صوتی، نشت مواد نفتی از تاسیسات کارخانه به ساحل، آلودگی هوا و غیره مهمترین اثرات محیط زیستی این سامانه‌ها هستند. با عنایت به مطالب فوق مشخص گردید، ارزیابی چرخه حیات شیوه مناسبی جهت انتخاب گزینه بهینه برای کاهش اثرات محیط زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا می‌باشد که البته تاکنون در کشور مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته است. همچنین، اغلب مطالعات خارج از کشور مربوط به مقایسه اثرات محیط زیستی نوع فرآیند نمک‌زدایی و یا تأثیر منبع تأمین انرژی بوده و به مقایسه روش تأمین آب ورودی در ایجاد اثرات محیط زیستی کمتر پرداخته شده است. لذا مطالعه حاضر با هدف مقایسه اثرات محیط زیستی در سامانه‌های نمک‌زدایی که آب خام ورودی به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم توسط چاه‌های ساحلی تأمین می‌گردد، انجام گرفت. برای این منظور، دو سامانه نمک‌زدایی چابهار در کنار سواحل دریای عمان و کنگان در کنار سواحل خلیج فارس که هر دو از روش SWRO برای نمک‌زدایی بهره‌گیری می‌کنند، انتخاب شدند و جهت مقایسه اثرات محیط زیستی از روش LCA استفاده گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی سامانه‌های آب شیرین کن مورد مطالعه

سامانه نمک‌زدایی کنگان به مساحت ۱۱۳۶۰ متر مربع در کنگان (استان بوشهر) قرار دارد. این واحد برای تأمین آب شیرین به ظرفیت ۱۰۰۰۰ متر مکعب در شبانه روز، با ۴ دستگاه نمک‌زدایی RO دریایی، هر یک به ظرفیت تولید ۲۵۰۰ متر مکعب در شبانه روز طراحی شده است. شیوه آبگیری در این سامانه، به‌طور غیر مستقیم و با استفاده از چاه‌های ساحلی می‌باشد. فرایند تولید آب شیرین در این واحد شامل چند مرحله می‌باشد: ابتدا آب خام ورودی از طریق تأسیسات و تجهیزات برداشت آب از چاه‌های ساحلی تأمین می‌گردد. سپس از طریق خط لوله پس از کلرزنی اولیه، وارد فیلترهای شنی ثقلی شده و پس از ذخیره در مخزن آب خام، از طریق ایستگاه پمپاژ به فیلترهای کارتریج و از آنجا به سمت واحدهای اسمز معکوس هدایت می‌گردد. آب شیرین تولیدی در واحدهای اسمز معکوس، در ادامه وارد سیستم پساتصفیه شده و بعد از کلرزنی و تنظیم pH از طریق ایستگاه پمپاژ و خط انتقال به طول تقریبی ۶ کیلومتر به مخازن بتنی منتقل و سپس وارد شبکه توزیع شهر کنگان می‌گردد.

سامانه نمک‌زدایی چابهار به مساحت ۱۶۵۰۰ مترمربع در دو فاز و در مجموع با ظرفیت ۳۷۵۰۰ مترمکعب در شبانه روز، تأمین آب شیرین شهرهای چابهار و کنارک در استان سیستان و بلوچستان را برعهده دارد. آب خام ورودی از طریق تأسیسات و تجهیزات برداشت مستقیم آب از دریا، تأمین می‌گردد. سپس، از طریق خط لوله و ضمن تزریق مواد منعقد کننده، وارد فیلترهای شنی ثقلی شده و پس از ذخیره در مخزن آب خام، از طریق ایستگاه پمپاژ به فیلترهای کارتریج و از آنجا به سمت واحدهای اسمز معکوس، هدایت می‌شود. آب شیرین تولیدی واحدهای اسمز معکوس، از طریق ایستگاه پمپاژ و خط انتقال، به مخزن بتنی منتقل و از آنجا وارد شبکه توزیع شهرهای چابهار و کنارک می‌گردد.

لازم به ذکر است این واحدها، سامانه‌ای مختص مدیریت ضایعات ندارند. ضایعات به فروش رسیده و بخشی از آنها نظیر قسمت‌های پلیمری مربوط به ممبران‌ها توسط خریداران مورد بازیافت قرار می‌گیرد. همچنین پساب تولیدی در دریا تخلیه می‌گردد (NVCO, 2012).

۲-۲- ارزیابی چرخه حیات

یکی از ابزارهای مدیریت محیط‌زیست LCA می‌باشد. ارزیابی چرخه حیات یک رویکرد گهواره تا گور برای ارزیابی سیستم‌های صنعتی

است. ارزیابی چرخه حیات امکان تخمین اثرات محیط‌زیستی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخه حیات محصول را فراهم می‌آورد. فرآیند ارزیابی چرخه حیات می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب محصول یا فرآیند با کمترین اثرات محیط‌زیستی کمک کند. LCA به جلوگیری از انتقال مشکلات محیط‌زیستی از مرحله‌ای به مرحله دیگر کمک می‌کند. بر اساس استاندارد ISO 14040 (2006) ارزیابی چرخه حیات شامل ۴ مرحله: تعریف هدف و محدوده، تجزیه و تحلیل فهرست موجودی یا سیاهه‌نویسی (LCI)، ارزیابی اثر (LCIA) و تفسیر می‌باشد. در تحقیق حاضر، با استفاده از نرم‌افزار SimaPro9، اثرات محیط زیستی تمامی مراحل فرآیند نمک‌زدایی آب دریا بر طبقات مختلف اثر محیط زیستی در دو سامانه نمک‌زدایی کنگان و چابهار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. از آنجایی که نرم‌افزار سیماپرو مطابق با استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ۱۴۰۴۴ طراحی شده است، مراحل انجام ارزیابی در این نرم‌افزار مطابق با این استانداردها و به ترتیب مراحل زیر انجام گرفت (شکل ۱).

۲-۳- تعریف هدف و محدوده

در این مرحله مرزهای مفهومی، جغرافیایی و زمانی سیستم تعیین شده و کیفیت داده‌های مورد استفاده تعیین می‌گردد. همچنین تعیین واحد عملیاتی از نکات کلیدی این مرحله است. واحد کارکردی، مرجعی است که کارکرد سیستم و اثـرات محیط زیستی بر مبنای آن به‌صورت کمی بیان می‌شوند (ISO 14044, 2006). هدف از بکارگیری LCA در تحقیق حاضر بررسی و مقایسه اثرات محیط زیستی تولید آب شیرین در دو سناریو برداشت مستقیم آب از دریا و برداشت توسط چاه‌های ساحلی بود. لذا ۲ سامانه نمک‌زدایی کنگان و چابهار انتخاب و مطالعه شدند. تکنولوژی مورد استفاده درهر دو سامانه SWRO می‌باشد. با این تفاوت که در سامانه کنگان آب خام ورودی از طریق چاه‌های ساحلی خلیج فارس تأمین می‌گردد و بنابراین در این تحقیق سناریو ۱ نامیده می‌شود. ولی در سامانه چابهار به‌طور مستقیم از دریای عمان تأمین می‌شود که در تحقیق حاضر سناریو ۲ نامیده می‌شود. دلیل انتخاب تأسیسات فوق، قرارگیری آنها در مناطق حساس و با ارزش زیست‌محیطی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان و تفاوت در شیوه آبگیری بود. لازم به ذکر است، شوری آب دریای عمان بین ۲ تا ۴ گرم بر لیتر کمتر از خلیج فارس می‌باشد (Oladi et al., 2019). مرز سیستم در این تحقیق، کلیه مراحل از استخراج مواد اولیه مورد نیاز برای تولید آب شیرین تا انتهای مرحله تولید محصول و نیز کلیه ورودی‌ها و فرآیندهای مورد نیاز برای تولید آب شیرین و تحویل آن درب کارخانه مدنظر قرار گرفته است. در واقع کلیه فرایندهای تولید آب شیرین شامل: آبگیری از دریا، انجام فرایندهای پیش‌تصفیه (از قبیل فیلتراسیون و گندزدایی)، پمپاژ آب شور به واحد نمک‌زدایی، انجام فرایندهای نمک‌زدایی، پساتصفیه و دفع پساب به دریا، مورد توجه قرار گرفت. همچنین از مرحله ساخت، به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی و دقیق، صرف‌نظر گردید.

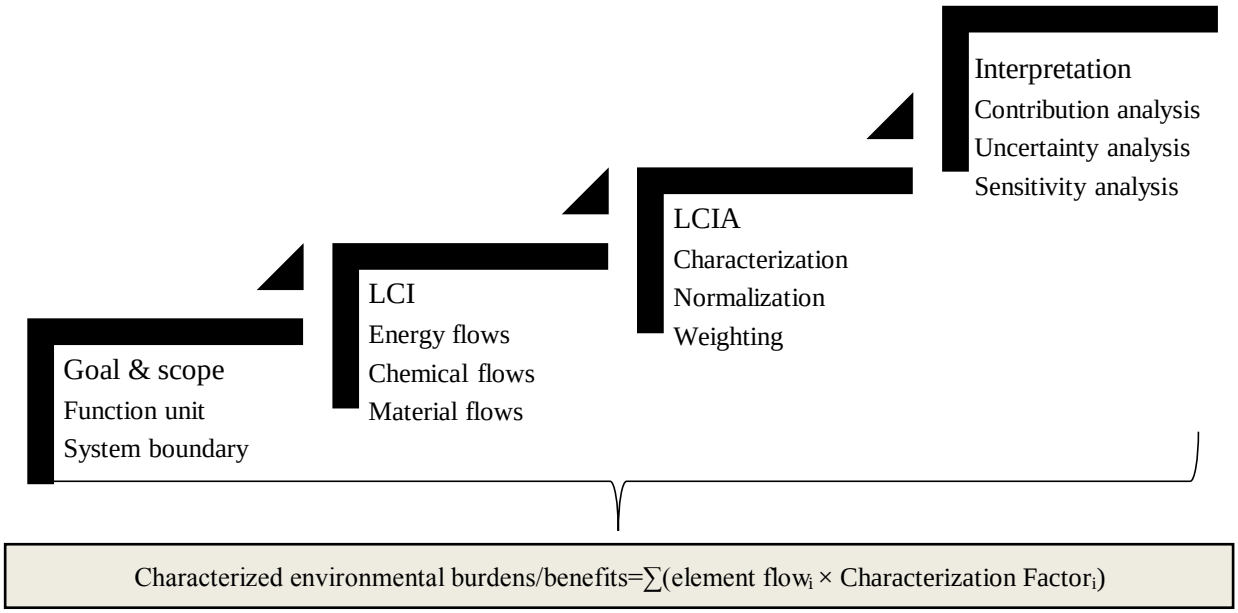

Fig. 1- LCA methodology steps (Zhou et al., 2014)
شکل ۱- مراحل ارزیابی چرخه حیات (Zhou et al., 2014)

واحد عملکردی، «متر مکعب آب شیرین تولیدی» در نظر گرفته شد. جهت تأمین انرژی الکتریکی در سامانه‌های فوق از شبکه برق کشور ایران استفاده می‌شود که یک شبکه ترکیبی با ولتاژ بالا می‌باشد. همچنین، جهت فرایند نمک‌زدایی از تکنیک اسمز معکوس با مدل استفاده می‌گردد. شکل ۲ مرز سیستم در سامانه‌های نمک‌زدایی مورد بررسی و بکارگیری زیر سیستم‌های فرآیندی در روش LCA جهت ارزیابی پتانسیل اثرات محیط زیستی فرآیند نمک‌زدایی آب دریا را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ مشخص می‌باشد، در مطالعه حاضر، گزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی، ترکیبات شیمیایی مورد استفاده، عملیات اسمز معکوس و رهاسازی پساب شور به دریا، جهت بررسی سهم فرآیندهای شاخص در مطالعه ارزیابی چرخه حیات عملیات نمک‌زدایی آب دریا انتخاب و لحاظ گردیده است.

۲-۴- تهیه فهرست موجودی چرخه حیات

تهیه فهرست موجودی از مراحل کلیدی LCA است. چنان که گفته شد، با توجه به محدودیت دسترسی به اطلاعات، در تحقیق حاضر از بخش ساخت صرف‌نظر گردید. لذا جریان مواد و انرژی در بخش عملیاتی تولید آب شیرین در سامانه‌های نمک‌زدایی کنگان (سناریو۱) و چابهار (سناریو۲) بر اساس روش LCI انجام گردید. به‌طوری‌که کلیه منابع لازم در سیستم جهت تولید ۱ مترمکعب آب شیرین با استفاده از آب دریا و کلیه خروجی‌ها (انتشارات) به محیط زیست تعیین و فهرست‌برداری شدند. ویژگی‌های آب ورودی به تأسیسات و میزان املاح آن، کلیه موادشیمیایی و ممبران‌های مورد استفاده در بخش‌های مختلف فرآیند تولید از فاکتورهای مهمی بودند که صورت‌برداری و بررسی گردیدند. با توجه به ماهیت فرایند نمک‌زدایی و آلاینده‌های تأسیسات فوق، انتشار گازهای گلخانه‌ای به دو شکل انتشار مستقیم حین فرایند تولید و انتشار غیر مستقیم با توجه به نوع انرژی مصرفی در کارخانه و تکنولوژی تولید انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. پساب دفعی این تأسیسات از خروجی‌های مهم دیگر به محیط می‌باشد که تهدید جدی برای محیط زیست دریایی است. لذا انتشار املاح موجود در پساب از فاکتورهای دیگر مورد بررسی می‌باشد. همانطور که در بررسی پیشینه تحقیق ذکر گردید، تاکنون در کشور، ارزیابی چرخه حیات در زمینه تأسیسات نمک‌زدایی انجام نگرفته است. لذا کلیه اطلاعات صورت‌برداری شده توسط نویسندگان به صورت آزمایشگاهی یا به‌صورت میدانی بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد مربوطه مورد اندازه‌گیری و محاسبه قرار گرفت. جدول ۲ لیست برخی از اطلاعات مورد استفاده در مرحله LCI را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است منبع تأمین انرژی الکتریکی در سامانه فوق، شبکه برق با ولتاژ بالای کشور می‌باشد که ترکیبی از منابع مختلف تأمین نیرو است. همچنین برای سایر اطلاعات مورد نیاز نیز از پایگاه داده‌های معتبر موجود در نرم‌افزار استفاده گردید. ویژگی‌های مربوط به آب ورودی و پساب خروجی سامانه از پارامترهای تأثیرگذار دیگر می‌باشد که این اطلاعات درباره سامانه‌های نمک‌زدایی مورد بررسی در جدول ۲ ارایه شده است.

۲-۵- ارزیابی اثر در چرخه حیات

در این مرحله پتانسیل اثرات محیط‌زیستی سیستم تولید مورد سنجش قرار گرفت. ارزیابی اثر به طورکلی شامل دسته‌بندی و ویژگی‌سازی[۶]، نرمال کردن[۷] و وزن‌دهی[۸] است (Roy et al., 2009). دسته‌بندی، فرآیند اختصاص اولیه داده‌های صورت‌برداری‌شده به گروه‌های اثر است. ویژگی‌سازی شامل ارزیابی مقدار اهمیت و بزرگی هر جریان صورت‌برداری به اثر محیط‌زیستی متناظر با آن است (مانند اثرات بالقوه دی اکسید کربن بر اثر گرمایش جهانی).

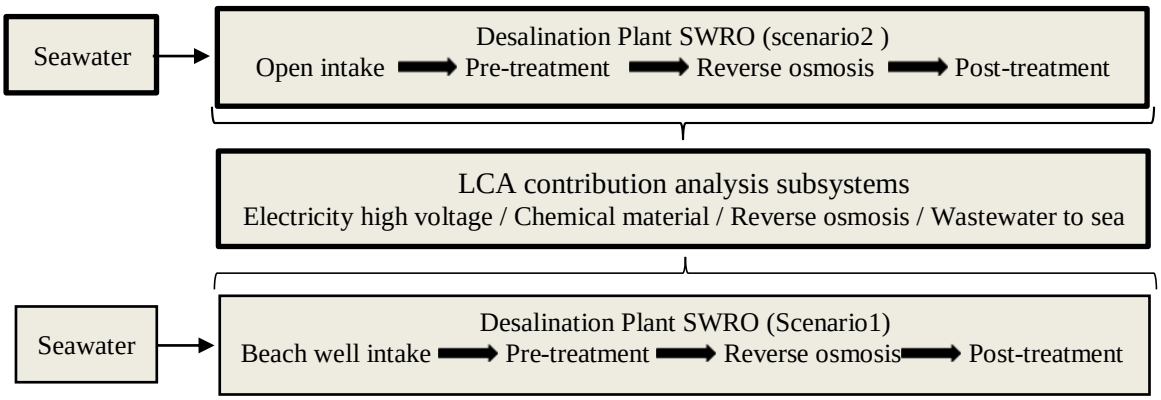

Fig. 2- System boundary and LCA methodology used to assess the potential environmental impacts of desalination

شکل ۲- مرز سیستم و بکارگیری روش LCA جهت ارزیابی پتانسیل اثرات محیط زیستی فرآیند نمک‌زدایی آب دریا

Table 1- Input data of desalination plants to produce 1 m^3 of desalinated water

جدول ۱- لیست ترکیبات مورد استفاده جهت تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی‌شده

Parameter	Unit process	Chemical formula	Unit	Amount for 1m^3 of desalinated water
Sea water (Raw material)	Extraction	-	m^3	2.56
Chlorination	Pre-treatment	NaOCl	ppm	2-3
Coagulation	Pre-treatment	$FeCl_3$	ppm	10-20
Membrane	Desalination operation	-	Kg	16-25
Water pass through membrane	Desalination operation	-	$m^3 day^{-1}$	14.5
Dechlorination	Desalination operation	$Na_2S_2O_5$	ppm	1-2
Anti-scalant	Desalination operation	-	ppm	3-4
Disinfection	post-treatment	NaOCl	ppm	1
pH adjustment	post-treatment	Ca (OH)2	ppm	15-20
Wastewater to sea	End of operation	-	M^3	1.56
Energy	Electricity supply	-	MJ	16.4(Kangan) 18.4(Chabahar)

Table 2- Properties of the input raw seawater and wastewater discharged of desalination plants

جدول ۲- ویژگی‌های آب خام ورودی و پساب خروجی از سامانه‌های نمک‌زدایی

Parameter	Unit	Seawater		Wastewater	
		Kangan	Chabahar	Kangan	Chabahar
Cl^-	ppm	21023	22500	32369	40718
Na^+	ppm	11200	11625	18240	16000
SO_4^{2-}	ppm	2930	3400	5329	4432
Mg^{2+}	ppm	5697	5900	8772	8000
Ca^{2+}	ppm	1608	1228	2879	2000
K^+	ppm	584	542	798	-
HCO_3^-	ppm	-	122	136	-
Br^-	ppm	55	77	-	-
No_3^-	ppm	2	1.18	5	11.1
Po_4^{3-}	ppm	0.009	-	0.2	0.3
TDS	ppm	40300	43300	60500	67600
EC	S/cm	70780	63900	103900	117200
pH	1:1	7.3	8.1	7.5	7.7
Temperature	^0C	Environment	Environment	Environment	Environment

ویژگی‌سازی به طور مستقیم امکان مقایسه نتایج مرحله صورت‌برداری را فراهم می‌کند. انجام نرمال‌سازی باعث می‌شود که تمامی شاخص‌های طبقات اثر، دارای واحدی یکسان شوند و امکان تسهیل مقایسه آن‌ها فراهم شود. در مرحله ارزش‌گذاری، اهمیت نسبی بار محیط زیستی شناسایی‌شده در مراحل دسته‌بندی، ویژگی‌سازی و نرمال‌سازی از طریق وزن‌دهی آن‌ها مشخص و قابل مقایسه می‌شوند (Roy et al., 2009). سپس در آخرین مرحله، نتایج تجزیه و تحلیل، تفسیر و ارزشیابی شده و نتیجه‌گیری کلی انجام می‌شود. برای ارزیابی اثرات در LCA بسته به نوع محصول، روش‌های متفاوتی وجود دارد. روش‌های LCIA تا حد امکان قصد ایجاد ارتباط بین هر یک از موارد سیاهه تهیه شده با پیامد زیست‌محیطی متناظر با آن را دارند. نتایج LCI در رده پیامدهای مختلف که هر یک دارای یک شاخص رده هستند، طبقه‌بندی می‌شوند. شاخص رده می‌تواند در هر نقطه‌ای بین نتایج LCI و رده آسیب (جایی که اثر زیست‌محیطی اتفاق می‌افتد) در این زنجیره قرار گیرد. در مطالعه حاضر پس از بررسی تحقیقات پیشین zhou et al. (2013) و با توجه به ماهیت تحقیق و فرآیند نمک‌زدایی، روش ارزیابی IMPACT 2002+ انتخاب و نسخه (۲,۱۵) آن در نرم‌افزار سیماپرو اجرا گردید. روش ارزیابی IMPACT 2002+ توسط مؤسسه فناوری فدرال سوییس توسعه یافته است. این روش اجرای عملی از یک رویکرد ترکیبی گروه‌های تأثیرات میانی و گروه‌های آسیب پیشنهاد می‌کند. به‌طوری‌که ارتباط انواع نتایج LCA را از طریق ۱۵ گروه تأثیرات میانی و ۴ گروه تأثیرات کلی (خطر) برقرار می‌نماید. طبقات اثر در نظر گرفته شده، عبارت از مواد سرطان‌زا، مواد غیر سرطان‌زا، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی، پرتوهای یونیز کننده، پتانسیل تخریب لایه ازن، اثر تنفسی ناشی از مواد آلی (اکسیداسیون فتوشیمیایی)، سمیت اکوسیستم آبی، سمیت اکوسیستم خشکی، اسیدی شدن/کاهش مواد مغذی خاک، اشغال زمین، اسیدی شدن آب‌ها، یوتریفیکاسیون آب‌ها، گرمایش جهانی، انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی بودند، که در ۴ گروه آسیب شامل تأثیر بر سلامت انسان، کاهش کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و کاهش

منابع، دسته‌بندی شدند. در روش IMPACT 2002+ برای تبدیل مقادیر واقعی تأثیرات زیست‌محیطی به آسیب‌های زیست‌محیطی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی از ضرایبی بهره‌گیری می‌گردد که این ضرایب از نرم‌افزار سیماپرو استفاده گردید. لذا میزان مداخلات محیط‌زیستی تخصیص داده شده به هر طبقه اثر بر اساس واحدهای پیشنهادی در روش IMPACT 2002+ به صورت کمی در آورده شده و در ادامه، نرمال‌سازی داده‌ها و مقایسه شاخص‌های زیست‌محیطی در نرم‌افزار انجام گرفت. سپس برای برآورد شاخص کلی که از مجموع شاخص‌های زیست محیطی مختلف به‌دست می‌آید، مرحله وزن‌دهی انجام گردید. به‌گونه‌ای که نتایج حاصل از شاخص‌های طبقه‌بندی تأثیرات در عامل وزن‌دهی ضرب و یک رقم نهایی برای میزان اثرات محاسبه می‌گردد. در نهایت ۴ گروه آسیب نهایی محاسبه و سهم هر یک از فرآیندها و طبقات میانی در ایجاد آن بررسی و مورد تفسیر قرار گرفت. به‌طوری‌که در مجموع، اثرات سامانه‌های نمک‌زدایی بر محیط زیست در سناریوهای ۱و ۲ ارزشیابی و جنبه‌های محیط زیستی مربوطه مورد شناسایی و مقایسه قرار گرفت.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- مقایسه اثرات محیط زیستی در سامانه‌های SWRO مورد مطالعه

نتایج مربوط به مقایسه اثر سامانه‌های نمک‌زدایی مورد مطالعه در ایجاد شاخص‌های اثر محیط زیستی ۱۵ گانه مورد بحث در جدول ۳ ارایه شده است. با توجه به این نتایج، سناریو ۲ در تمامی طبقات اثر محیط زیستی به جز پتانسیل ایجاد پدیده یوتریفیکاسیون نسبت به سناریو ۱ تأثیر بیشتری نشان داده است. به‌نحوی که روش SWRO با برداشت مستقیم آب از دریا نسبت به روش بردلشت از چاه‌های ساحلی بین ۱۲/۵ تا ۱۳ درصد تأثیر بیشتری در طبقات اثر مواد سرطان‌زا، مواد غیر سرطان‌زا، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی، پرتوهای یونیز کننده، اثر تنفسی ناشی از مواد آلی (اکسیداسیون فتوشیمیایی)، سمیت اکوسیستم آبی، سمیت اکوسیستم خشکی، اسیدی شدن/کاهش مواد مغذی خاک، اشغال زمین، اسیدی شدن آب‌ها، گرمایش جهانی، انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی نشان داده است. این تفاوت در مورد طبقه اثر پتانسیل تخریب لایه ازن فقط ۴/۱ درصد بوده است. در حالی که سناریو ۲ نسبت به سناریو ۱ حدود ۹/۵ درصد کمتر در ایجاد پدیده یوتریفیکاسیون مؤثر بوده است. با عنایت به تفاوت روش آبگیری در سامانه‌های مورد بررسی، اگرچه در پهنه‌های مختلف آبی در خلیج فارس و دریای عمان معمولا شوری آب خلیج فارس بین ۲ تا ۴ گرم بر لیتر بیشتر از شوری دریای عمان است (Oladi et al., 2019)، به‌نظر می‌رسد تأمین آب از چاه‌های ساحلی منجر به کاهش املاح در آب ورودی شده است. به‌گونه‌ای که در سناریو ۱ که به‌طور غیر مستقیم از خلیج فارس آبگیری می‌شود، نسبت به سناریو ۲ که مستقیم از دریای عمان تغذیه می‌شود، املاح مورد اندازه‌گیری و فاکتورهای TDS و EC کمتر بوده (جدول ۲) و با افزایش راندمان نمک‌زدایی منجر به مصرف کمتر مواد و انرژی گردیده است و تأثیر مثبت آن در کاهش اثرات محیط زیستی مشاهده شده است (جدول ۳). در راستای تأیید این مطالب Shahabi et al. (2015) و Al-Kaabi and Mackey (2019) نیز با مطالعه بر روی سامانه‌های SWRO با تکنیک‌های آبگیری متفاوت اظهار داشته‌اند؛ تأمین آب ورودی توسط چاه‌های ساحلی با کاهش مصرف انرژی منجر به کاهش اثرات محیط زیستی آنها نسبت به سامانه‌های با آبگیری مستقیم شده است. همچنین، Missimer and Maliva (2018) ضمن مروری بر روش‌های آبگیری در سامانه‌های نمک‌زدایی و مقایسه اثرات محیط زیستی آنها، تأثیر مثبت روش‌های آبگیری زیر سطحی نظیر چاه‌های ساحلی بر کاهش مصرف مواد شیمیایی و کاهش مصرف انرژی در فرآیند پیش‌تصفیه را تأیید کرده‌اند. همچنین تأثیر موقعیت مکانی سامانه‌های نمک‌زدایی و کیفیت آب خام ورودی را از فاکتورهای مهم دیگر برشمرده‌اند که علاوه بر تحت تأثیر قرار دادن شرایط تصفیه، بر کیفیت پساب تولیدی که نیازمند دفع می‌باشد نیز مؤثر خواهد بود. چنان‌که در امارات متحده عربی، سامانه‌های SWRO به دلیل پایین بودن شوری متوسط و پایین بودن غلظت کربن آلی به جای خلیج فارس در امتداد سواحل دریای عرب ساخته شده‌اند. به‌طوری‌که مزایای کیفیت بهتر آب ورودی، هزینه‌های اضافی مربوط به ساخت و بهره‌برداری از یک خط لوله طولانی برای انتقال آب تصفیه شده به مراکز جمعیتی را جبران می‌نماید.

در جدول ۴ نیز نتایج مربوط به نرمال‌سازی در ۱۵ طبقه اثر میانی مربوط به دو سامانه نمک‌زدایی کنگان و چابهار قابل مشاهده است. با توجه به اینکه شاخص نرمالیزه بدون واحد است، امکان مقایسه اهمیت و دامنه نسبی نتایج مربوط به طبقات اثر محیط زیستی در هر سناریو و مقایسه آنها بین سناریوها وجود دارد. با توجه به نتایج جدول ۴ در مورد سناریو ۱ از بین ۱۵ طبقه اثر فوق، طبقات کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر (۰/۰۰۰۳۶۲)، گرمایش جهانی (۰/۰۰۰۳۲۶) و اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی (۰/۰۰۰۱۹۲) به ترتیب بیشترین شاخص نرمالیزه را به خود اختصاص داده‌اند. در مورد سناریو ۲ نیز به طریق مشابهی طبقات کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر (۰/۰۰۰۴۰۷)، گرمایش جهانی (۰/۰۰۰۳۶۶) و اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی (۰/۰۰۰۲۱۶) به ترتیب بیشترین شاخص نرمالیزه را دارا بوده‌اند. همچنین نکته قابل ملاحظه دیگر در رابطه با طبقه اثر سمیت بر اکوسیستم آبی می‌باشد که از نظر اهمیت در هر دو سناریو در رتبه ۶ بین ۱۵ طبقه اثر مورد بررسی قرار

داشته است. با توجه به قرارگیری تأسیسات نمک‌زدایی در جوار اکوسیستم‌های آبی و از آنجایی که این سامانه‌ها معمولاً پساب به شدت شور خود را در نواحی ساحلی دریا تخلیه می‌نمایند، می‌توانند تهدیدی جدی برای اکوسیستم دریایی خصوصاً موجودات کفزی باشند؛ زیرا پساب این سامانه‌ها به دلیل شوری بالا از دانسیته بالایی برخوردار بوده و به لایه‌های پایین‌تر آب نفوذ و به صورت ستونی در کف دریا جریان دارند (Frank et al., 2017). در این راستا نتایج مطالعات Cambridge et al. (2017) نیز بیانگر تأثیرات مخرب ناشی از رهاسازی پساب سامانه‌های نمک‌زدایی بر علف‌های دریایی و کاهش رشد و فتوسنتز در آنها بوده است. آن‌چنان‌که اسموزیته برگ، غلظت یون‌های پتاسیم و کلسیم، قند و آمینو اسیدها در این گیاهان می‌توانند به عنوان شاخص‌های زیستی مناسبی در به نمایش گذاشتن تأثیر نامناسب رهاسازی پساب واحدهای نمک‌زدایی در دریا باشد. لذا تداوم تخلیه پساب این سامانه‌ها در نزدیکی ساحل می‌تواند اکوسیستم دریایی را تهدید نماید. به عنوان یک راهکار مناسب در کاهش اثرات ناشی از تخلیه پساب سامانه‌های نمک‌زدایی بر اکوسیستم‌های آبی، بکارگیری سیستم دیفیوژ در تخلیه پساب و تخلیه در فاصله‌ای از ساحل و مناطقی با بستر شنی که انرژی امواج از قابلیت مناسب جهت اختلاط برخوردار باشند، پیشنهاد شده است (Lykkebo Petersen et al., 2019).

۳-۲- مقایسه سهم فرآیندها در ایجاد اثرات محیط زیستی

مقایسه درصد سهم ۴ فرآیند تأمین انرژی الکتریکی، ترکیبات شیمیایی، عملیات اسمز معکوس و تخلیه پساب شور به دریا در ایجاد اثرات محیط زیستی مربوط به تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی شده در ۱۵ طبقه اثر مورد بررسی برای سامانه SWRO با روش آبگیری از

Table 3- Results of environmental impact categories
جدول ۳- نتایج مربوط به شاخص‌های طبقات اثر محیط زیستی

Impact category	Unit	Beach well intake	Direct intake
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.214544	0.241420
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.021574	0.0242758
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0.001947	0.0021910
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	14.86086	16.722343
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1.23E-06	1.28E-06
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0.00077	0.00087
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	153.0888	172.2631
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	21.66398	24.37689
Terrestrial acid/nutria	kg SO2 eq	0.040907	0.046032
Land occupation	m2org.arable	0.004343	0.004886
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0.012624	0.014205
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0.0004407	0.0003986
Global warming	kg CO2 eq	3.223744	3.627291
Non-renewable energy	MJ primary	55.0234	61.9159
Mineral extraction	MJ surplus	0.011433	0.012864

Table 4- Comparison of the normalization Results in the SWRO plants
جدول ۴- مقایسه نتایج مربوط به نرمال‌سازی در سامانه‌های SWRO

Impact category	Beach well intake	Direct intake
Carcinogens	8.47021E-05	9.53E-05
Non-carcinogens	8.51759E-06	9.58E-06
Respiratory inorganics	0.000192177	0.000216
Ionizing radiation	4.4003E-07	4.95E-07
Ozone layer depletion	1.81979E-07	1.89E-07
Respiratory organics	2.31222E-07	2.6E-07
Aquatic ecotoxicity	5.61009E-07	6.31E-07
Terrestrial ecotoxicity	1.25094E-05	1.41E-05
Terrestrial acid/nutri	3.10569E-06	3.49E-06
Land occupation	3.45533E-07	3.89E-07
Aquatic acidification	0	0
Aquatic eutrophication	0	0
Global warming	0.000325598	0.000366
Non-renewable energy	0.000362054	0.000407
Mineral extraction	7.52291E-08	8.46E-08

چاه‌های ساحلی و آبگیری مستقیم به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ سهم حداکثری فرآیند تأمین انرژی الکتریکی بر تمامی طبقات اثر به جز پتانسیل تخریب لایه ازن و وقوع پدیده یوتریفیکاسیون در هر دو سامانه مورد مطالعه تأیید گردید. همچنین، با توجه به شکل ۳ در سناریوی ۱ در رابطه با پتانسیل تخریب لایه ازن، ۶۸ درصد مربوط به مرحله اسمز معکوس، ۳۱ درصد مربوط به تأمین انرژی الکتریکی و ۱ درصد ناشی از استفاده از مواد شیمیایی و ورود پساب به دریا بوده است. با توجه به شکل ۴ نیز در سناریو ۲ فرآیند اسمز معکوس ۶۶ درصد، تأمین انرژی الکتریکی ۳۳ درصد و موادشیمیایی مصرفی و ورود پساب به دریا در مجموع ۱ درصد در پتانسیل تخریب ازن نقش داشته اند. در راستای تأیید این مطلب Shahabi et al. (2015) نیز با مقایسه سهم فرآیندهای مختلف در تولید اثرات محیط زیستی در دو سامانه SWRO با شیوه‌های آبگیری سطحی و زیر سطحی، نتیجه‌گیری کرده‌اند که تأثیر فرآیندها در هر دو روش تقریبا مشابه بوده است. به‌طوری‌که فرآیند تأمین انرژی الکتریکی به جز طبقه اثر پتانسیل تخریب لایه ازن در سایر طبقات اثر بیش از ۷۵ درصد در تولید اثرات محیط زیستی مؤثر بوده است. درحالی‌که نقش تأمین انرژی در طبقه اثر تخریب لایه ازن ۲۳ تا ۲۶ درصد بوده است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، در سناریو ۱ در رابطه با طبقه اثر یوتریفیکاسیون ۶۷ درصد سهم فرآیندی مربوط به تخلیه پساب در دریا، ۳۲ درصد مربوط به مصرف انرژی الکتریکی و ۱ درصد نیز مجموع اثر مراحل اسمز معکوس و بکارگیری مواد شیمیایی بوده است. در همین رابطه در سناریو ۲، تخلیه پساب به دریا ۵۹ درصد، تأمین انرژی الکتریکی ۴۰ درصد و مراحل اسمز معکوس و بکارگیری مواد شیمیایی نیز در مجموع ۱ درصد مؤثر بوده‌اند. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ در سایر طبقات اثر، سهم ۹۹/۹ درصدی فرآیند تأمین انرژی الکتریکی در کلیه طبقات اثر در هر دو سامانه SWRO تأیید گردید. لذا روند تأثیر فرآیندها در ایجاد اثرات محیط زیستی در دو سناریو مشابه بوده است و تفاوت معنی‌داری بین آنها مشاهده نشده است. به‌طوری‌که در هر دو سناریو، بیشترین سهم در ایجاد اثرات محیط زیستی مربوط به مرحله تأمین انرژی الکتریکی بوده است. در راستای تأیید این مطلب Zhou et al. (2011)، Hancock et al. (2012) و González-Bravo et al. (2017) با مطالعه بر روی سامانه‌های مختلف SWRO اظهار داشته‌اند فرآیند تأمین انرژی الکتریکی در نمک‌زدایی آب دریا به شیوه اسمز معکوس بیشترین سهم را در ایجاد اثرات محیط زیستی دارد، آنچنان که با بازیافت انرژی و تغییر نوع سوخت مصرفی در تولید برق و بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، اثر محیط زیستی آنها کاهش خواهد یافت.

۳-۴- مقایسه سهم طبقات اثر در کل اثر محیط زیستی

پس از انجام نرمال‌سازی و وزن‌دهی، سهم طبقات اثر در ایجاد اثر تجمعی با واحد یکسان (µPt) مشخص و قابل مقایسه گردید.

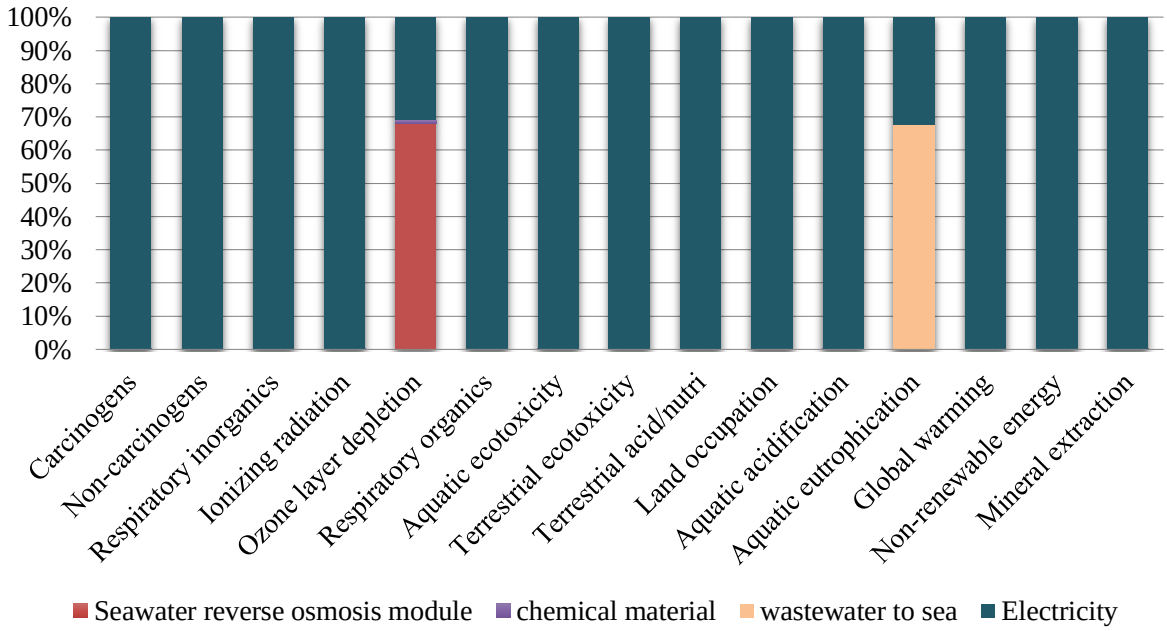

Fig. 3- The contribution of process stages on environmental impact indicators in SWRO with beach well intake

شکل ۳- سهم مراحل مختلف فرآیند بر شاخص‌های اثر محیط زیستی در سامانه SWRO با آبگیری از چاه‌های ساحلی

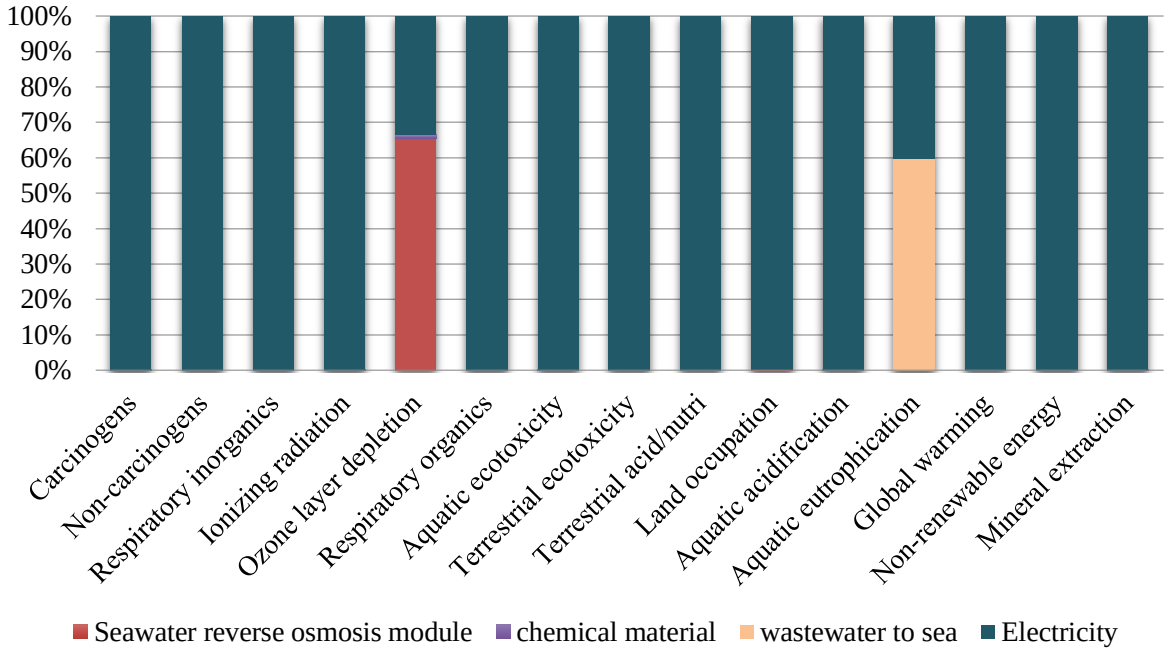

Fig. 4- The contribution of process stages on environmental impact indicators in SWRO with open intake
شکل ۴- سهم مراحل مختلف فرآیند بر شاخص‌های اثر محیط زیستی در سامانه SWRO با آبگیری مستقیم از دریا

در جدول ۵ نتایج وزن‌دهی شده در طبقات اثر ۱۵ گانه مورد بررسی و میزان اثر تجمعی مربوط به سامانه‌های مورد بررسی به ازای تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی شده، به نمایش گذاشته شده است. با توجه به جدول ۵ مقدار کل انتشار آلاینده‌ها بـــه ازای تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی شـــده در سناریو ۱ و ۲ بـــه ترتیب ۹۹۰/۴۹۹ و ۱۱۱۴/۵۲۸ µPt محاسبه گردیده است. به‌نحوی‌که در سناریو ۲ به‌میزان ۱۲/۵ درصد اثرات محیط زیستی بیشتر بوده است. در تأیید این مطلب در تحقیقات تقریباً مشابهی که در سایر کشورها صورت گرفته است نیز نتایج نشان داده است؛ بکارگیری شیوه‌های زیرسطحی در تأمین آب سامانه‌های SWRO منجر به کاهش اثرات محیط زیستی گردیده است (Missimer et al., 2013; Al-Kaabi and Mackey, 2019). همچنین با توجه به جدول ۵ کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر، گرمایش جهانی و اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی به ترتیب بیشترین سهم را در ایجاد اثرات محیط زیستی ناشی از سامانه‌های SWRO در هر دو سناریو به خود اختصاص داده‌اند. به‌گونه‌ای‌که حدود ۷۴ درصد از این اثرات در دو طبقه اثر کاهش انرژهای تجدیدناپذیر و گرمایش جهانی، ۲۰ درصد طبقه اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی و مابقی در سایر طبقات اثر مشاهده شده است. لذا با توجه به محدودیت منابع انرژی تجدیدناپذیر و لزوم حفاظت از آنها برای نسل‌های آینده بر اساس اهداف توسعه پایدار، بکارگیری استراتژی آبگیری از منابع زیر سطحی نظیر چاه‌های ساحلی در طراحی سامانه‌های SWRO می‌تواند تا حدودی در حفاظت از این منابع باارزش مؤثر واقع گردد. همچنین با توجه به پیامدهای زیان بار ناشی از پدیده گرمایش جهانی نظیر تغییرات اقلیمی، وقوع خشکسالی‌ها، آب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن سطح آب دریاها، به زیرآب رفتن زمین‌های کشاورزی و تأکید کنوانسیون‌ها و پروتکل‌های جهانی در مشارکت همه کشورها در مقابله با این رویداد، توجه به طراحی مناسب سامانه‌های SWRO می‌تواند گام مناسبی جهت نیل به این اهداف باشد. در این زمینه محققین دیگر نیز اظهار داشته‌اند، استفاده از سیستم‌های آبگیری زیرسطحی در سامانه‌های SWRO کیفیت آب خام ورودی را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. چنان‌که به صورت معنی‌داری منجر به کاهش مصرف مواد شیمیایی و اثرات محیط زیستی شده، کاهش رد پای کربن و کاهش هزینه‌های آب تصفیه شده برای مصرف‌کنندگان را در پی خواهد داشت (Missimer and Maliva, 2018).

۳-۵- مقایسه سهم فرآیندها در کل اثر محیط زیستی

نتایج مربوط به سهم فرآیندهای تولید در ایجاد اثر محیط زیستی کلی ناشی از چرخه حیات سامانه‌های نمک‌زدایی در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۶ از مجموع ۹۹۰/۴۹۹ µP اثر محیط زیستی ناشی از تولید ۱ مترمکعب آب شیرین در سناریو ۱، میزان ۹۹۰/۰۶۰ µP مربوط به فرآیند تأمین انرژی الکتریکی بوده است. همچنین در رابطه با سناریو ۲ نیز از مجموع ۱۱۱۴/۵۲۸ µP اثر محیط زیستی، میزان ۱۱۱۴/۰۸۹ µP مربوط به تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز بوده است.

Table 5- Comparison of the weighting impacts in the SWRO plants
جدول ۵- مقایسه شاخص‌های اثر وزن‌دهی شده در سامانه‌های SWRO مورد مطالعه

Impact category	Beach well intake Weighting (µPt)	Open intake Weighting (µPt)
Carcinogens	84.702	95.313
Non-carcinogens	8.517	9.584
Respiratory inorganics	192.177	216.249
Ionizing radiation	0.440	0.495
Ozone layer depletion	0.182	0.189
Respiratory organics	0.231	0.260
Aquatic ecotoxicity	0.561	0.631
Terrestrial ecotoxicity	12.509	14.076
Terrestrial acid/nutri	3.106	3.495
Land occupation	0.345	0.389
Aquatic acidification	0	0
Aquatic eutrophication	0	0
Global warming	325.598	366.356
Non-renewable energy	362.054	407.407
Mineral extraction	0.075	0.085
Total	990.499	1114.528

درحالی‌که فرآیندهای اسمز معکوس و بکارگیری مواد شیمیایی سهم بسیار ناچیزی داشته‌اند. همچنین در بین این فرآیندها سهم ورود پساب به دریا در مقابل فرآیندهای دیگر، قابل چشم پوشی بوده است. در تأیید این مطلب لازم به ذکر است که در شکل ۳ و ۴ نیز ورود پساب به دریا در هر دو سناریو تنها اثر خود را در پدیده یوتری فیکاسیون نشان داده است. با توجه به جدول ۵ نیز وزن این طبقه نسبت به سایر طبقات اثر قابل صرف نظر کردن بوده است. لذا در هر دو سناریو سهم حداکثری تأمین انرژی الکتریکی در ایجاد اثرات محیط زیستی به شکل مشابهی مشاهده شده است. بنابراین بکارگیری کلیه روش‌هایی که منجر کاهش مصرف انرژی الکتریکی در سامانه‌های SWRO گردد و اثر نامناسبی بر سایر طبقات اثر نداشته باشد می‌تواند منجر بـــه کاهش اثرات محیط زیستی در این تأسیسات گردد. مقایسه سناریوهای تحقیق حـاضر نشان داد که در تمامی طبقات اثر بـــه جز یوتری فیکاسیون (جدول ۴) اثرات محیط زیستی در سناریو ۱ کمتر بـوده است. در مجموع نیز طبقه اثر یوتری فیکاسیون سهم قابل ملاحظه‌ای در اثر تجمعی نشان نداد. لذا تأمین آب ورودی توسط چاه‌های ساحلی می‌تواند نقش مثبتی در این زمینه داشته باشد. به‌طور مشابهی در تحقیقات سایر کشورها بـــر این نقش تأکید شـــده است (Missimer et al., 2015; Stein et al., 2016; Al-Kaabi and Mackey, 2019).

۳-۶- مقایسه میزان شاخص‌های آسیب نهایی در سامانه‌های SWRO مورد مطالعه

نتایج حاصل از دسته‌بندی شاخص‌های زیست‌محیطی ۱۵ گانه در ۴ گروه آسیب نهایی (سلامت انسان، کاهش کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع) جهت مقایسه میزان آلایندگی ناشی از تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی‌شده در جدول ۷ به نمایش گذاشته شده است.

Table 6- Comparison of the contribution of different process stages in total environmental impacts
جدول ۶- مقایسه سهم مراحل مختلف تولید در ایجاد کل اثرات محیط زیستی

Impact category	Unit	Total	reverse osmosis	chemical material	wastewater to sea	Electricity, high voltage
Beach well intake	µPt	990.499	0.409	0.0288	0	990.060
Open intake	µPt	1114.528	0.410	0.0289	0	1114.089

Table 7- Comparison of the different damage categories in the SWRO plants
جدول ۷- مقایسه میزان شاخص‌های آسیب نهایی در سامانه‌های مورد بررسی

Damage category	Unit	Beach well intake	Open intake
Human health	DALY	2.03E-06	2.28E-06
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0.226	0.255
Climate change	kg CO2 eq	3.224	3.627
Resources	MJ primary	55.035	61.928

براساس جدول ۷ بیشترین آسیب محیط زیستی در هر دو سناریو مربوط به تغییرات اقلیمی و کاهش منابع اولیه می‌باشد. به طوری که به ازای تولید ۱ مترمکعب آب شیرین در سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب معادل ۳/۲۲۴ و ۳/۶۲۷ کیلوگرم دی اکسیدکربن تولید و ۵۵/۰۳۵ و ۶۱/۹۲۸ مگاژول کاهش در منابع اولیه ایجاد می‌شود. لذا اثرات محیط زیستی در سامانه کنگان به صورت معنی‌داری کمتر از سامانه چابهار است. بنابراین استفاده از چاه‌های ساحلی برای تأمین آب ورودی در سامانه‌های SWRO می‌تواند منجر به کاهش آسیب‌های محیط زیستی گردد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

با توجه به تشدید کاهش منابع آب شیرین در کشور و سیاست‌های گسترش بهره‌برداری از سامانه‌های نمک‌زدایی جهت جبران بخشی از این کمبودها و با عنایت به تبعات محیط زیستی آنها، در تحقیق حاضر از روش LCA جهت مقایسه اثرات محیط زیستی سامانه‌های SWRO که از شیوه‌های مستقیم و غیرمستقیم (چاه‌های ساحلی) جهت تأمین آب ورودی استفاده می‌کنند، انجام گرفت. روش LCA با مقایسه اثرات محیط زیستی تجمعی در طی چرخه حیات تولید محصول و بررسی سهم فرآیندهای مختلف در ایجاد این اثرات، امکان انتخاب گزینه‌های مناسب جهت کاهش اثرات محیط زیستی و بهینه‌سازی فرآیندها، سیاست‌گذاری و طراحی مناسب تأسیسات جدید را فراهم می‌نماید. از آنجایی که تاکنون در کشور ما ارزیابی چرخه حیات سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا انجام نگرفته بود و بیشتر تأسیسات موجود در کشور از تکنولوژی RO استفاده می‌کنند، دو سامانه نمک‌زدایی چابهار در کنار سواحل دریای عمان و کنگان در کنار سواحل خلیج فارس که هر دو از تکنیک SWRO برای نمک‌زدایی بهره می‌گیرند، جهت مقایسه اثرات محیط زیستی آنها با روش LCA انتخاب شدند. شیوه آبگیری در دو سامانه متفاوت است. در سامانه نمک‌زدایی کنگان آب خام ورودی از چاه‌های ساحلی تأمین می‌گردد درحالی‌که در سامانه چابهار به‌طور مستقیم از دریا وارد می‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد در سامانه‌ای که از چاه‌های ساحلی آبگیری می‌کند به دلیل افزایش کیفیت آب خام ورودی هنگام عبور از محیط متخلخل آبخوان، با کاهش مصرف ترکیبات شیمیایی و انرژی منجر به کاهش اثرات محیط زیستی می‌شود. به‌طوری که اگرچه سامانه کنگان در سواحل خلیج فارس قرار دارد که به‌طور معمول شوری بیشتری از دریای عمان دارد ولی بکارگیری شیوه زیر سطحی در تأمین آب ورودی منجر به کاهش اثرات محیط زیستی در این سامانه به میزان ۱۲/۵ درصد نسبت به سامانه چابهار که از شیوه مستقیم آبگیری می‌نماید شده است. همچنین فرآیند تأمین انرژی بیشترین سهم را در ایجاد آسیب‌های محیط زیستی در هر دو سامانه SWRO مورد بررسی نشان داد. لذا در مجموع نتیجه‌گیری می‌شود؛ بکارگیری چاه‌های ساحلی در تأمین آب ورودی در سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا می‌تواند در کاهش اثرات محیط زیستی آنها به شکل معنی‌داری مؤثر واقع گردد. همچنین با توجه به تبعات زیانبار تولید گازهای گلخانه‌ای در تغییرات اقلیمی و لزوم مشارکت تمامی صنایع در کاهش تولید این گازها، استفاده از شیوه آبگیری زیر سطحی در طراحی سامانه‌های SWRO می‌تواند اقدام مناسبی در این راستا باشد. شایان ذکر است، چاه‌های ساحلی (عمودی) ساده‌ترین سیستم‌های جذب زیرسطحی هستند که طبق طرح‌ها و فرآیندهای مشابه با چاه‌های تولید آب زیرزمینی معمولی در امتداد ساحل، جایی که در آنها ماسه‌های طبیعی و مواد آبرفتی واقع شده‌اند، ساخته شده و مجهز به پمپ‌هایی هستند که منجر به ایجاد جریان شعاعی آب دریا و آب‌های زیرزمینی داخلی به درون چاه‌ها می‌شود (Missimer et al., 2015). از آنجایی که میزان و پایداری شارژ مجدد آب دریا از چاه‌های ساحل توسط هیدروژئولوژی محلی، به ویژه انتقال آب سفره‌ها محدود می‌گردد، بنابراین چاه‌های ساحلی ظرفیت تولید محدودی دارند که منجر به استفاده مناسب آنها برای سامانه‌های نمک‌زدایی کوچک می‌شود. این در حالی است که بکارگیری انواعی از پمپ‌های ESP [۹] که در صنایع نفت بکار می‌روند، قابلیت افزایش کارایی در سیستم‌های SWRO غیر مستقیم را نشان داده‌اند (Al-Kaabi and Mackey, 2019). لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی، قابلیت انواع پمپ‌ها در افزایش کارایی سامانه‌های SWRO غیر مستقیم کشور و اثرات محیط زیستی آنها مورد مطالعه قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

1- Desalination
2- Life Cycle Assessment
3- Multi-Stage Flash Distillation
4- Reverse Osmosis
5- Sea Water Reverse Osmosis
6- Characterization
7- Normalization
8- Weighting
9- Electric Submersible Pump

۵- مراجع

Al-Kaabi AH and Mackey HR (2019) Life-cycle environmental impact assessment of the alternate subsurface intake designs for seawater reverse osmosis desalination. Computer Aided Chemical Engineering 1561–1566

Al-Shayji K and Aleisa E (2018) Characterizing the fossil fuel impacts in water desalination plants in

dilution desalination and established seawater desalination and wastewater reclamation processes. Water Research 46(4):1145–1154

Ibrahim Y, Arafat HA, Mezher T, and AlMarzooqi F (2018) An integrated framework for sustainability assessment of seawater desalination. Desalination 447:1–17

Kvadsheim MH (2013) Life cycle assessment of desalinated water for enhanced oil recovery. Institutt for Energi-Og Prosessteknikk

Latteman S (2010) Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants. CRC Press

Liu J, Chen S, Wang H, and Chen X (2015) Calculation of carbon footprints for water diversion and desalination projects. Energy Procedia 75:2483–2494

Lykkebo Petersen K, Heck N, G Reguero B, Potts D, Hovagimian A, and Paytan A (2019) Biological and physical effects of brine discharge from the carlsbad desalination plant and implications for future desalination plant constructions. Water 11(2):208

Mahdavi M, Nasseri S, Younessian M, Mahvi A H, and Ali Mohammadi M (2011) Investigation of indirect freezing process of desalting on saltwater of Persian Gulf. Health and Environment 4(3):363–374 (In Persian)

Missimer TM, Ghaffour N, Dehwah AHA, Rachman R, Maliva RG, and Amy G (2013) Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics. Desalination 322:37–51

Missimer TM, Jones B, and Maliva RG (2015) Intakes and outfalls for seawater reverse-osmosis desalination facilities: Innovations and environmental impacts. Springer

Missimer TM and Maliva RG (2018) Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: intakes and outfalls. Desalination 434:198–215

Mohamed-Zine M-B, Hamouche A, and Krim L (2013) The study of potable water treatment process in Algeria (boudouaou station)-by the application of life cycle assessment (LCA). Journal of Environmental Health Science and Engineering 11(1):37

Mohammadi Jouzdani S, Vagharfard H, Daneshkar Arasteh P, and Zerafat MM (2019) Water- energy nexus at reverse osmosis seawater desalination technology. Iran-Water Resources Research 15(3):324–338 (In Persian)

Kuwait: A Life Cycle Assessment approach. Energy 158:681–692

Asadpour G A and Mirhosseini SM (2009) Environmental impacts of desalination plants with special view on Qeshm island title. 3rd Specialized conference on environmental engineering. Tehran: Tehran University (In Persian)

Cambridge ML, Zavala-Perez A, Cawthray GR, Mondon J, and Kendrick GA (2017) Effects of high salinity from desalination brine on growth, photosynthesis, water relations and osmolyte concentrations of seagrass Posidonia australis. Marine Pollution Bulletin 115(1–2):252–260

Dehghani B, Farahani M, and Aminnejad B (2020) Evaluation artificial recharge and flood spreading scenarios for integrated Ssurface and groundwater resources management Using WEAP Model Case Study(Varamin Plain). Iran-Water Resources Research 15(4):242–258 (In Persian)

Ebrahimi A and Pourghissari H (2014) Investigation and evaluation of environmental impacts of seawater desalination. 3rd National conference on health, Environment and sustainable development. Bandar Abbas: Bandar Abbas Branch. Islamic Azad University (In Persian)

Esfandiarnejad A, Ardalan H, and Vafaie F (2014) A survey of global experiences on new methods of water extraction in arid and semi-arid coastal areas. 2nd National Conference on Water Crisis, Shahrekord, Iran: Shahrekord University (In Persian)

Fazeli M, Sheikhi F, Abdoli R, and Zoughipour R (2016) Desalination concentrate management. Tehran, Iran. Rural Water and Wastewater Company of Tehran (In Persian)

Frank H, Rahav E, and Bar-Zeev E (2017) Short-term effects of SWRO desalination brine on benthic heterotrophic microbial communities. Desalination 417:52–59

Ghasemi A and Ashrafzadeh MH (2012) Prediction and management of environmental impacts of desalination processes with system dynamics approach. International workshop and specialized conference on saline water and brackish water desalination, Wastewater Treatment, Tehran, Iran: University of Water and Power Technology (Shahid Abbaspour) (In Persian)

González-Bravo R, Ponce-Ortega JM, and El-Halwagi MM (2017) Optimal design of water desalination systems involving waste heat recovery. Industrial & Engineering Chemistry Research 56(7):1834–1847

Hancock NT, Black ND, and Cath TY (2012) A comparative life cycle assessment of hybrid osmotic

Shahabi MP, McHugh A, and Ho G (2015) Environmental and economic assessment of beach well intake versus open intake for seawater reverse osmosis desalination. Desalination 357:259–266

Stein S, Russak A, Sivan O, Yechieli Y, Rahav E, Oren Y, and Kasher R (2016) Saline groundwater from coastal aquifers as a source for desalination. Environmental Science & Technology 50(4):1955–1963

Zhou J, Chang VW-C, and Fane AG (2011) Environmental life cycle assessment of reverse osmosis desalination: the influence of different life cycle impact assessment methods on the characterization results. Desalination 283:227–236

Zhou J, Chang VW-C, and Fane AG (2014) Life cycle assessment for desalination: a review on methodology feasibility and reliability. Water Research 61:210–223

Nouri Mi, Homaee M, and Bannayan M (2017) An Assessment of reference evapotranspiration changes during the 21st century in some semi-arid regions of Iran. Iranian Journal Of Soil and Water Research 48(2):241-252 (In Persian)

NVCO (2012) NVCO projects report. Tehran (In Persian)

Oladi M, Shokri MR, and Rajabi-Maham H (2019) Extremophile symbionts in extreme environments; a contribution to the diversity of symbiodiniaceae across the northern Persian Gulf and Gulf of Oman. Journal of Sea Research 144:105–111

Roy P, Nei D, Orikasa T, Xu Q, Okadome H, Nakamura N, and Shiina T (2009) A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. Journal of food Engineering 90(1):1–10