dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973

Original Paper

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.7, pp: 15-34

# Using Life Cycle Assessment (LCA) to Evaluate Environmental Impact of Kangan Desalination Plant

*M. Bakhshayesh[1], M. Farahani[2], A. Behbahani Nia[3]*

1. PhD Student, Dept. of Environment, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Environment, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
(Corresponding Author) mfarahani@riau.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Environment, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

*(Received Dec. 31, 2019 Accepted Mar. 16, 2020)*

**To cite this article:**
Bakhshayesh, M., Farahani, M., Behbahani Nia, A. 2021. "Using life cycle assessment (LCA) to evaluate environmental impact of Kangan desalination plant" Journal of Water and Wastewater, 31(7), 15-34. Doi: 10.22093/wwj.2020.214063.2973. (In Persian)

## Abstract

Freshwater limitation as one of the most important challenges of water resources management of the country has caused seawater desalting to be considered a suitable option for utilizing non-conventional water resources in some parts of the country. Due to the lack of a comprehensive understanding of the environmental impacts of desalination plants, this study was carried out to investigate the potential environmental impacts of the Kangan desalination plant. In this study, the Life Cycle Assessment (LCA) method was used. So, after preparing an inventory of materials and energy at all stages of freshwater production in the Kangan desalination plant, impact 2002+ version (2.15) as impact assessment method and SimaPro9 software were used to investigate environmental impacts of all stages of seawater desalination process on impact categories, including: global warming, reduction of non-renewable energies, ozone layer depletion, aquatic and terrestrial ecotoxicity, etc. Based on the results, most of the environmental impact is related to climate change and reduction of primary resources. So that, 3.224 Kg carbon dioxide equivalent has been released and reduced 55.035 MJ in primary sources to produce 1 $m^3$ of desalinated water. Also, electricity supply through desalination cycle stages had the most contribution on all impact categories except ozone layer depletion and eutrophication. Due to the maximum contribution of energy on environmental impacts of seawater desalination process, utilization of renewable energy sources can play an important role in reducing the environmental impacts of these plants.

***Keywords:*** Life Cycle Assessment, Persian Gulf, LCA, Desalination, Environmental Impact.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973

مجله آب و فاضلاب، دوره 31، شماره 7، صفحه: 34-15

# به‌کارگیری ارزیابی‌چرخه حیات (LCA) در بررسی اثرات محیط‌زیستی سامانه نمک‌زدایی کنگان

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

۱- دانشجوی دکترا، گروه محیط‌زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲- استادیار، گروه محیط‌زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
(نویسنده مسئول) mfarahani@riau.ac.ir
۳- استادیار، گروه محیط‌زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

(دریافت ۹۸/۱۰/۱۰ پذیرش ۹۸/۱۲/۲۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
بخشایش، م.، فراهانی، م.، بهبهانی‌نیا، آ.، ۱۳۹۹، "به‌کارگیری ارزیابی‌چرخه حیات (LCA) در بررسی اثرات محیط‌زیستی سامانه نمک‌زدایی کنگان"
مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۷)، ۳۴-۱۵. Doi: 10.22093/wwj.2020.214063.2973

## چکیده

**محدودیت منابع آب شیرین، به‌عنوان مهم‌ترین چالش فراروی مدیریت منابع آب کشور، نمک‌زدایی آب دریا را به‌عنوان یکی از گزینه‌های مناسب در به‌کارگیری منابع آب نامتعارف در برخی مناطق کشور مطرح کرده است. با توجه به عدم درک جامع از اثرات محیط‌زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات محیط‌زیستی احتمالی سامانه نمک‌زدایی کنگان انجام شد. در این پژوهش، روش ارزیابی چرخه حیات استفاده شد. به نحوی که پس از تهیه لیست کاملی از موجودی مواد و انرژی در تمامی مراحل تولید آب شیرین در سامانه نمک‌زدایی کنگان، با بهره‌گیری از روش ارزیابی Impact 2002+ نسخه (۲/۱۵) و نرم‌افزار SimaPro 9 اثرات محیط‌زیستی تمامی مراحل فرایند نمک‌زدایی آب دریا بر طبقات اثر پتانسیل گرمایش جهانی، کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر، تخریب لایه ازن، سمیت در اکوسیستم‌های آبی و خشکی و اثرات سرطان‌زایی بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین اثر محیط‌زیستی مربوط به تغییرات اقلیمی و کاهش منابع اولیه است. به‌طوری که به ازای تولید ۱ مترمکعب آب شیرین معادل ۳/۲۲۴ کیلوگرم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود و ۵۵/۰۳۵ مگاژول کاهش در منابع اولیه ایجاد می‌شود. همچنین تأمین انرژی الکتریکی از بین مراحل چرخه نمک‌زدایی آب دریا بیشترین سهم را در ایجاد همه طبقات اثر به جز تخریب لایه ازن و یوتریفیکاسیون نشان داده است. با توجه به سهم حداکثری انرژی در اثرات محیط‌زیستی فرایند نمک‌زدایی آب دریا، به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی این سامانه‌ها داشته باشد.**

***واژه‌های کلیدی***: ارزیابی چرخه حیات، خلیج فارس، نمک‌زدایی، شیرین‌سازی، اثرات محیط‌زیستی

## ۱- مقدمه

یکی از اساسی‌ترین حقوق انسان‌ها، دسترسی کافی به آب سالم برای شرب، کشاورزی و صنایع است. به‌طوری که حفظ سلامت و توسعه اقتصادی را در هر جامعه‌ای امکان‌پذیر کند (Mahdavi et al., 2011, Khani et al., 2012).

امروزه، اکثر کشورها با چالش رشد جمعیت و کمبود منابع آب شیرین مواجه هستند. بر اساس گزارش انجمن جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۶ کمبود آب یکی از مخاطرات اصلی جهان با بیشترین امکان فراگیری و بیشترین اثرات است (World Economic Forum, 2016) در ایران نیز محدودیت منابع آب شیرین، یکی از مهم‌ترین چالش‌های فراروی مدیریت منابع آب تلقی می‌شود. به‌طوری که منابع آب به‌دلیل بارش‌های نامنظم در مکان و زمان، در همه جای کشور یکسان توزیع نشده و فعالیت‌های انسانی را با

ایجاد کمبود آب تحت فشار قرار داده است. به‌همین دلیل نیاز به شناسایی منابع تقویت کننده به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی در برخی از استان‌های کشور تبدیل شده است (Esfandiarnejad et al., 2014).

بر این اساس بهره‌گیری از شیوه‌های مختلف استفاده از منابع آب غیرمتعارف، رو به توسعه است و با تشدید تنش‌های آبی در مراکز جمعیتی، سرعت بیشتری نیز خواهد گرفت. در حال حاضر در دنیا روش‌های متعددی برای بهبود و افزایش منابع آب به‌کار گرفته می‌شود. بسیاری از کشورهای نواحی خشک یا دچار بحران، نیاز آبی خود را از طریق شیرین‌سازی یا نمک‌زدایی آب دریا[1] تأمین می‌کنند (Salehi et al., 2015). آن‌چنان که فرایندهای نمک‌زدایی از گزینه‌های مؤثر برای کاهش رشد شکاف بین عرضه و تقاضای آب و پاسخگویی به تقاضای در حال رشد آن شده است (Sadeghi et al., 2016). نمک‌زدایی آب، اشاره به هر یک از چند فرایندی است که مقداری نمک و سایر مواد معدنی را از آب شور جدا می‌کند. سیستم‌های نمک‌زدایی معمولاً در دو گروه فرایندهای غشایی و فرایندهای حرارتی قرار می‌گیرند. در فرایندهای غشایی برای جداسازی نمک‌های محلول و تولید آب شیرین، از نیروی محرکه الکتریکی یا مکانیکی استفاده می‌شود (Ghasemi and Ashrafzadeh, 2012). در فرایندهای حرارتی از فرایند تبخیر برای تبدیل آب به بخار استفاده شده و با میعان بخار تولیدی، آبی کم نمک تولید می‌شود.

در توسعه سامانه‌های نمک‌زدایی بیش از هر چیز اثرات محیط‌زیستی آن حائز اهمیت است و لازم است در خصوص بهینه‌سازی محیط‌زیستی این تأسیسات طرح‌ریزی و بررسی لازم انجام شود. در مورد اثرات نمک‌زدایی آب دریا بر روی محیط‌زیست، اثرات ایجاد شده ناشی از برداشت آب و اثرات ناشی از تخلیه پساب باید مدنظر قرار گیرد. مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌های هوا و ایجاد آلودگی صوتی از دیگر اثرات محیط‌زیستی نمک‌زدایی است (Ibrahim et al., 2018, Ebrahimi and Pourghissari, 2014). عمده اثرات محیط‌زیستی پروژه‌های نمک‌زدایی به ساختمان، سازه‌های دریایی، پساب دفعی و انرژی مصرفی بستگی دارد و اهمیت این تأثیرات به فناوری به‌کار رفته برای جداسازی نمک بستگی دارد (González-Bravo et al., 2017, Fazeli, 2016). روش‌های گوناگونی برای بررسی آثار محیط‌زیستی پروژه‌های نمک‌زدایی و تحلیل مقدار پایداری سامانه‌های نمک‌زدایی وجود دارد که یکی از ابزارهای مناسب در این زمینه ارزیابی چرخه حیات[2] است (Belkaid et al., 2012). LCA، گردآوری و ارزیابی درون‌دادها (محصول، ماده یا جریان انرژی که وارد یک واحد/ فرایند می‌شود)، برون‌دادها (محصول، ماده یا جریان انرژی که از واحد/ فرایند خارج می‌شود) و پیامدهای بالقوه محیط‌زیستی یک سیستم محصول در تمام چرخه حیات آن است. به طوری که جنبه‌های محیط‌زیستی و پیامدهای بالقوه محیط‌زیستی را مانند استفاده از منابع و نتایج زیست‌محیطی ناشی از رهاسازی‌ها در سراسر چرخه حیات یک محصول از مرحله به‌دست آوردن ماده خام در طول تولید، استفاده، پایان عملیات حیات و بازیافت تا دفع نهایی در برمی‌گیرد. LCA امکان تخمین اثرات محیط‌زیستی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخه حیات محصول را فراهم می‌آورد (Mohamed-Zine et al., 2013).

از جمله پژوهش‌هایی که در خارج کشور با استفاده از LCA پیرامون سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا انجام شده است به پژوهشی که توسط استوکس و هوروات در سال ۲۰۰۶ انجام شده است اشاره می‌شود. در این پژوهش روش‌های مختلف تأمین آب موردنیاز در کالیفرنیا شامل، استفاده از منابع آب شیرین، استفاده مجدد از پساب تصفیه شده و نمک‌زدایی آب دریا مقایسه شده و نتایج آنها نشان داده است که بیشترین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به مرحله بهره‌برداری و بخش تولید انرژی مورد نیاز سامانه‌های آب‌رسانی بوده است (Stokes and Horvath, 2006).

رالوی و همکاران نیز از روش LCA برای بررسی اثرات محیط‌زیستی مهم‌ترین فناوری‌های نمک‌زدایی تجاری‌شده شامل، تقطیر ناگهانی[3]، تقطیر چند مرحله‌ای[4] و اسمز معکوس[5] استفاده کرده است. نتایج این پژوهش نشان داده که به‌طور قابل‌توجهی، اثرات محیط‌زیستی تکنولوژی RO کمتر از فرایندهای نمک‌زدایی حرارتی (MSF و MED) بوده است. به‌نحوی که مقدار انرژی

[1] Desalination

[2] Life Cycle Assessment (LCA)
[3] Multi-Stage Flashing (MSF)
[4] Multiple-Effect Distillation (MED)
[5] Reverse Osmosis (RO)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973

مصرفی در روش RO حدود ۵-۶ برابر کمتر از فناوری حرارتی، اندازه‌گیری شده است (Raluy et al., 2006). همچنین نتایج LCA سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا توسط هانکوک و همکاران نشان داد با به‌کارگیری فرایند نانوفیلتراسیون - RO اثرات محیط‌زیستی نسبت به روش RO معمول، کاهش می‌یابد (Hancock et al., 2012).

در پژوهش دیگری ضمن بررسی در مورد واحدهای نمک‌زدایی آب دریا اظهار داشتند، معادل ۳۸۹۰ تن $CO_2$ از تولید ۱ گیگا لیتر آب نمک‌زدایی انتشار می‌یابد. این تجزیه و تحلیل چرخه حیات همچنین نشان داد، چنانچه در فرایند RO از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق موردنیاز استفاده شود، موجب انتشار مقدار قابل‌توجهی گازهای گلخانه‌ای در نتیجه مصرف برق می‌شود (Kvadsheim, 2013, Biswas, 2009, Latteman, 2010, Greenlee et al., 2009).

در پژوهشی چالش‌های نمک‌زدایی به روش RO از حیث منابع آب و تکنولوژی و مباحث اقتصادی بررسی شد. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد نمک‌زدایی پایدار آب دریا نیاز به یک تعهد برای تأمین آب در قیمتی است که نه تنها شامل ساخت‌وساز و هزینه‌های عملیاتی و بهره‌برداری باشد، بلکه هزینه‌هایی که برای کاهش اثرات محیط‌زیستی لازم است را نیز در برگیرد. به‌طوری که این مطلب از طریق مطالعات محیط‌زیستی، استفاده از فناوری‌های مناسب‌تر و اقدامات جبرانی به نتیجه خواهد رسید (Latteman, 2010).

اگرچه در کشور ما تاکنون LCA پروژه‌های نمک‌زدایی انجام نشده است ولی پژوهشی توسط اسدپور و میرحسینی در سال ۲۰۰۹ انجام شده است که در این پژوهش ضمن ارزیابی اثرات محیط‌زیستی پروژه‌های نمک‌زدایی به‌ویژه در جزیره قشم به این نتیجه رسیدند که به‌طور کلی ایجاد آلودگی از نوع شوری توسط پساب شور، تأثیر در افزایش دمای آب ساحل، اشغال ساحل برای نصب تأسیسات کارخانه به جای کاربری‌های تفریحی و توریستی، اثرات منفی بر سفره‌های آب، آلودگی صوتی، نشت مواد نفتی از تأسیسات کارخانه به ساحل و آلودگی هوا مهمترین اثرات محیط‌زیستی کارخانه‌های نمک‌زدایی هستند. همچنین اظهار کردند در سال ۲۰۰۹، ۱۵ دستگاه نمک‌زدایی در جزیره قشم فعال بوده و تأمین بخش اعظم آب جزیره را به عهده داشته‌اند که این دستگاه‌ها می‌توانند آثار محیط‌زیستی عدیده‌ای بر اکوسیستم ساحلی و دریایی جزیره داشته باشند (Asadpour and Mirhosseini, 2009).

سهرابی‌پور و ربیعی در سال ۲۰۱۵ بر روی استفاده بهینه از پساب سامانه‌های نمک‌زدایی بررسی کرده و نشان دادند که گونه‌های متعددی از جلبک‌های سبز و سیانوفیسه میکروسکوپی قادرند در شوری‌های زیاد این پساب‌ها و در معرض دمای زیاد و شدت نور، بهترین عملکرد تولید را داشته باشند (Sohrabipour and Rabiei, 2015).

با توجه به سابقه پژوهش‌های قبلی در این زمینه مشخص شد LCA با رویکرد تمامی طول عمر پروژه می‌تواند تفسیر مناسب و کاملی از مشکلات محیط‌زیستی ارائه دهد. همچنین با مشخص کردن سهم فرایندها در ایجاد پیامدهای محیط زیستی، در انتخاب مناسب‌ترین گزینه برای کاهش معضلات و حل بحران استفاده شود و از آنجایی که در کشور ما LCA در زمینه سامانه‌های نمک‌زدایی انجام نشده این موضوع می‌تواند نگرشی نو در این زمینه محسوب شود. همچنین گامی نوین و مؤثر در انتخاب روش مناسب بهینه‌سازی تأسیسات آب‌شیرین‌کن‌های RO در کشور و مدیریت محیط‌زیستی آنها باشد و از بروز نگرانی‌های محیط‌زیستی در منطقه خلیج فارس بکاهد. بنابراین با توجه به حساسیت اکولوژیکی منطقه قرارگیری تأسیسات نمک‌زدایی کنگان در سواحل خلیج فارس، این پژوهش با هدف بررسی و شناخت اثرات محیط‌زیستی این سامانه نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از روش LCA انجام شد.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- معرفی سامانه نمک‌زدایی مورد بررسی

سامانه نمک‌زدایی کنگان به مساحت ۱۱۳۶۰ متر مربع در شهر کنگان استان بوشهر قرار دارد. این واحد برای تأمین آب شیرین به ظرفیت ۱۲۵۰۰ متر مکعب در شبانه‌روز، با ۵ دستگاه نمک‌زدایی RO دریایی، هر یک به ظرفیت تولید ۲۵۰۰ متر مکعب در شبانه‌روز طراحی شده است که البته ظرفیت تولید به‌کار گرفته شده از زمان تولید تاکنون ۱۰۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز است. شیوه آب‌گیری در این سامانه، به‌طور غیرمستقیم و با استفاده از چاه‌های ساحلی است. فرایند تولید آب شیرین در این واحد شامل چند مرحله است. ابتدا آب خام ورودی از طریق تأسیسات و تجهیزات برداشت آب از چاه‌های ساحلی تأمین می‌شود. 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 RO هدایت می‌شود. آب شیرین تولیدی در واحدهای RO، در ادامه وارد سیستم پساتصفیه شده و بعد از کلرزنی و تنظیم pH از طریق ایستگاه پمپاژ و خط انتقال به‌طول تقریبی ۶ کیلومتر به مخازن بتنی منتقل و سپس وارد شبکه توزیع شهر کنگان می‌شود. این واحد، سامانه‌ای مختص مدیریت ضایعات ندارد. بنابراین ضایعات به فروش می‌رسد و بخشی از آنها مانند قسمت‌های پلیمری مربوط به ممبران‌ها توسط خریداران بازیافت می‌شود. همچنین پساب تولیدی در دریا تخلیه می‌شود (NVCO, 2012).

اجزای اصلی سیستم در این واحد تولیدی عبارت از، خط لوله ورودی برای انتقال آب از سیستم برداشت آب دریا، فیلترهای شنی ثقلی، مخزن ذخیره و ایستگاه پمپاژ آب فیلتر شده، واحد تزریق مواد شیمیایی، فیلترهای کارتریج، پمپ‌های فشار قوی، محفظه‌های فشار و ممبران‌های RO، مخزن ذخیره و ایستگاه پمپاژ آب شیرین، واحد شستشوی شیمیایی، خط انتقال برق، واحد پست کاهنده برق، تابلوهای فشار قوی و متوسط و واحد کنترل مرکزی، ایستگاه پمپاژ و خط انتقال آب شیرین تولیدی هستند (NVCO, 2012).

## ۲-۲- ارزیابی چرخه حیات

یکی از ابزارهای مدیریت محیط‌زیست، LCA است. LCA یک رویکرد گهواره تا گور برای ارزیابی سیستم‌های صنعتی است و امکان تخمین اثرات محیط‌زیستی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخه حیات محصول را فراهم می‌کند. همچنین LCA یک تکنیک برای ارزیابی جنبه‌های محیط‌زیستی و اثرات بالقوه همراه با محصول، فرایند یا خدمات است. این فرایند می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب محصول یا فرایند با کمترین اثرات محیط‌زیستی کمک کند و به جلوگیری از انتقال مشکلات محیط‌زیستی از مرحله‌ای به مرحله دیگر کمک می‌کند.

LCA شامل ۴ مرحله است، تعریف هدف و محدوده[1]، تجزیه و تحلیل فهرست موجودی (سیاهه‌نویسی)[2]، ارزیابی اثر[3] و تفسیر[4]. شکل ۱ مراحل مختلف LCA را نشان می‌دهد (Zhou et al., 2014).

مرحله هدف و محدوده مهم‌ترین مرحله است. زیرا در این مرحله مرزهای مفهومی، جغرافیایی و زمانی سیستم تعیین شده و کیفیت داده‌های مورد استفاده تعیین می‌شود. همچنین تعیین واحد عملیاتی از نکات کلیدی این مرحله است. واحد کارکردی مرجعی است که کارکرد سیستم و اثرات محیط زیستی بر مبنای آن به‌صورت کمّی بیان می‌شوند. در مرحله سیاهه‌نویسی، کلیه داده‌ها برای کمّی کردن منابع لازم در سیستم، برای تولید محصول و کلیه خروجی‌ها (انتشارات) به محیط‌زیست طبق آنچه در هدف پژوهش مشخص شده است، جمع‌آوری و فهرست‌برداری می‌شوند. با توجه به استاندارد (ISO 14040, 1998) ارزیابی اثر "مرحله‌ای از ارزیابی چرخه حیات است که هدف آن سنجش اندازه پتانسیل اثرات محیط زیستی سیستم تولید" است. ارزیابی اثر به‌طور کلی شامل دسته‌بندی و ویژگی‌سازی[5]، نرمال کردن[6] و وزن دهی[7] است (Roy et al., 2009).

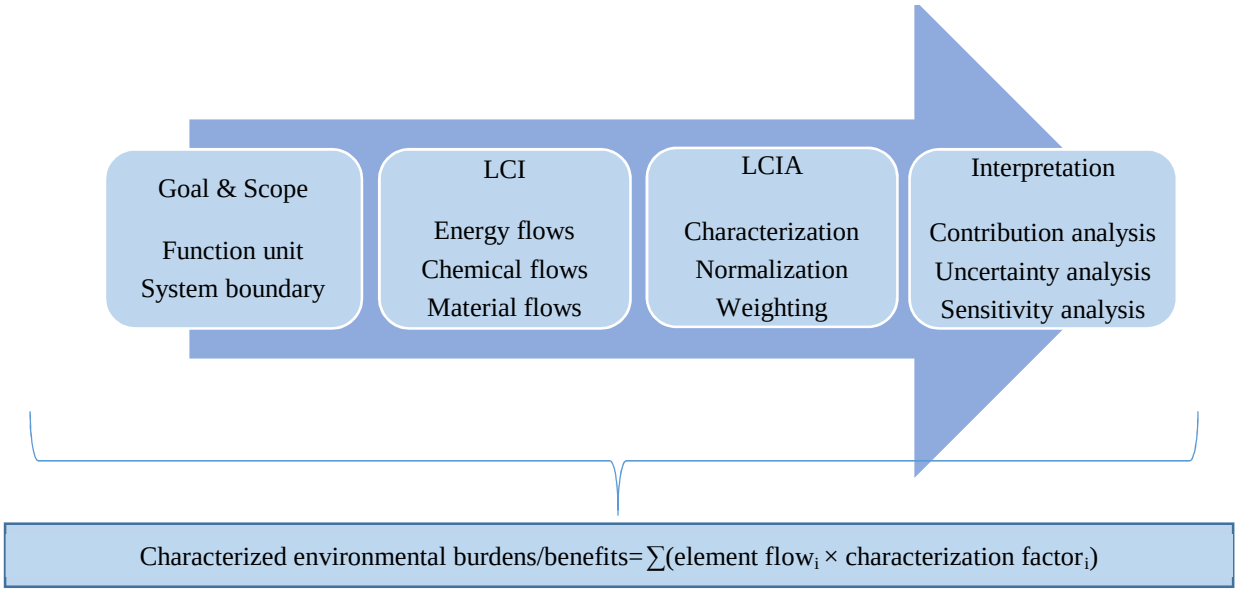
دسته‌بندی، فرایند اختصاص اولیه داده‌های صورت‌برداری‌شده به گروه‌های اثر است. ویژگی‌سازی شامل ارزیابی مقدار اهمیت و بزرگی هر جریان صورت‌برداری به اثر محیط‌زیستی متناظر با آن است مانند اثرات بالقوه دی‌اکسید کربن روی اثر گرمایش جهانی. ویژگی‌سازی به‌طور مستقیم امکان مقایسه نتایج مرحله صورت‌برداری را فراهم 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 محیط‌زیستی شناسایی می‌شود در مراحل دسته‌بندی، ویژگی‌سازی و نرمال‌سازی از طریق وزن‌دهی آنها مشخص و قابل‌مقایسه می‌شوند (Roy et al., 2009) . سپس در آخرین مرحله، تفسیر نتایج تجزیه و تحلیل، ارزشیابی شده و نتیجه‌گیری کلی انجام می‌شود. به‌طوری‌که نتایج به‌صورت ترکیبی نمایش داده شده و نتایج آثار بحرانی و گزینه‌های کاهش اثرات نشان داده می‌شوند (Tabesh et al., 2019).

[1] Goal and Scope
[2] Inventory Analysis
[3] Environmental Impact Assessment
[4] Interpretation

[5] Characterization
[6] Normalization
[7] Weighting

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973




**شکل ۱-** مراحل ارزیابی چرخه حیات (Zhou et al., 2014)

**Fig. 1.** LCA methodology steps (Zhou et al., 2014)

### ۲-۳- معرفی نرم‌افزار SimaPro

SimaPro جدیدترین نسل از نرم‌افزارهای LCA است که به‌طور گسترده در جهان استفاده می‌شود. این نرم‌افزار ابزارهای حرفه‌ای را برای جمع‌آوری، ارزیابی و پایش کارایی محیط‌زیستی محصولات، فرایندها و خدمات مهیا می‌کند.

SimaPro شامل گستره نامحدودی از داده‌های فراوان، شفاف و با کیفیتی از اکثر مواد مورد استفاده معمول و فرایندهای آنها است. این نرم‌افزار می‌تواند اثرات محیط‌زیستی محصولات و خدمات را در سراسر مراحل چرخه زندگی آنها اندازه‌گیری کند و همچنین اثرات همه مراحل از استخراج مواد خام تا تولید، توزیع، استفاده و دفع را شناسایی کند. SimaPro امکان لینک به نرم‌افزار Excel را نیز دارد. SimaPro با استفاده از ماتریس معکوس محاسبات مربوط به نظام تولید را انجام می‌دهد. بر این اساس از الگوریتم‌های با کارایی بسیار زیاد استفاده می‌کند که امکان محاسبه هزاران فرایند در ارتباط با یک محصول را فراهم می‌کند. رویکرد ماتریس به‌عنوان روشی کلی برای انجام LCA پذیرفته شده است. روش ماتریس برای حل مشکلات مربوط به تجزیه و تحلیل جداول سیاهه در LCA توسعه یافته است. آن‌چنان که با اشاره به نقش مقیاس در کلیه فرایندهای واحد در سیستم، یک جریان مرجع یا واحد عملکردی کاملاً دقیق ایجاد می‌شود که برای انجام محاسبات جداول سیاهه به کار خواهد رفت. در این زمینه، معادلاتی مانند معادله ۱ در اکثر منابع مطالعاتی مربوط به LCA ارائه شده است (Heijungs and Suh, 2002, Peters, 2007).

$$g=BA^{-1}f \qquad (۱)$$

که در آن

پارامتر B ماتریس اثر، A ماتریس فناوری، f بردار تقاضای نهایی و g به مداخلات کلی اشاره دارند. جدول ۱ لیست پارامترهایی که تحت عنوان داده‌های ورودی در LCA مشاهده می‌شوند و ابعاد ماتریس‌های محاسباتی مربوط به آنها را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار SimaPro با بیش از ۲۵۰۰ پایگاه داده، دارای طیف وسیعی از اطلاعات است که اکثر مواد و فرایندهای صنایع را پوشش می‌دهد. از آنجایی که نرم‌افزار SimaPro مطابق با استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ۱۴۰۴۴ تهیه شده است، مراحل انجام ارزیابی در این نرم‌افزار مطابق با این استانداردها و به‌ترتیب چهار گام تعیین هدف و حوزه کاربرد، تحلیل سیاهه، ارزیابی پیامد و تفسیر است. در این پژوهش با به‌کارگیری نرم‌افزار SimaPro 9 اثرات محیط‌زیستی تمامی مراحل فرایند نمک‌زدایی آب دریا بررسی شد.

جدول ۱- پارامترهای به‌کار رفته در روش ارزیابی چرخه حیات

**Table 1.** Overview of parameters representing input data in the LCA

| Name | Dimension (rows × columns) | Defined in |
|---|---|---|
| Final demand vector | Economic flows× 1 | Goal and scope definition |
| Technology matrix | Economic flows × processes | Inventory analysis |
| Intervention matrix | Environmental flows × processes | Inventory analysis |
| Characterization matrix | Categories × environmental flows | Impact assessment |
| Intervention totals | Environmental flows× 1 | Impact assessment |
| Category totals | Categories× 1 Impact assessment | Impact assessment |
| Weighting factors | 1× categories | Impact assessment |

### ۲-۴- مراحل مدل‌سازی پژوهش

#### ۲-۴-۱- تعریف هدف و محدوده

هدف از به‌کارگیری LCA در این پژوهش بررسی اثرات زیست محیطی تولید آب شیرین توسط تأسیسات نمک‌زدایی کنگان در بوشهر بود، به‌طوری که ضمن بررسی مشکلات محیط‌زیستی تولید آب شیرین در چرخه حیات این واحد صنعتی و تجزیه و تحلیل منشأ مشکلات مرتبط با آنها به راهکارهای بهینه‌سازی فرایند توسعه تأسیسات نمک‌زدایی در سواحل خلیج فارس پرداخته شد. دلیل انتخاب تأسیسات فوق، قرارگیری آن در مناطق حساس و با ارزش محیط‌زیستی در سواحل خلیج فارس بود. همچنین فرایند تولید آب شیرین در تأسیسات کنگان به روش RO و شیوه تأمین آب ورودی به تأسیسات فوق از طریق تأسیسات و تجهیزات برداشت غیرمستقیم آب از دریا است.

از آنجایی که مرحله صورت‌برداری و تهیه فهرست موجودی چرخه حیات از مهم‌ترین مراحل LCA است که نیاز به جمع‌آوری داده‌های مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم و کمّی‌سازی آنها دارد، به‌دلیل محدودیت دسترسی به اطلاعات مربوط به مرحله ساخت تأسیسات نمک‌زدایی کنگان، مرز سیستم از سواحل خلیج فارس یعنی ورودی آب به محدوده کارخانه و خروجی پساب به محیط پذیرنده تا تحویل آب شیرین در خروجی کارخانه برای توزیع به مبادی مصرف انتخاب شد. به‌عبارت دیگر مرزهای سیستم از بخش استخراج مواد اولیه موردنیاز برای تولید آب شیرین تا انتهای مرحله تولید محصول و کلیه ورودی‌ها و فرایندهای موردنیاز برای تولید آب شیرین و تحویل آن درب کارخانه در نظر گرفته شدند. به‌دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی و دقیق، از مرحله ساخت تأسیسات نمک زدایی کنگان صرف‌نظر شد. واحد عملکردی، «متر مکعب آب شیرین تولیدی» در نظر گرفته شد. شکل ۲ مرز سیستم در سامانه‌های نمک‌زدایی و به‌کارگیری روش LCA برای ارزیابی پتانسیل اثرات محیط‌زیستی فرایند نمک‌زدایی آب دریا را نشان می‌دهد (Zhou et al., 2014).

#### ۲-۴-۲- تهیه فهرست موجودی چرخه حیات

در این مرحله کلیه منابع لازم در سیستم برای تولید ۱ مترمکعب آب شیرین با استفاده از آب دریا و کلیه خروجی‌ها به محیط زیست تعیین و فهرست‌برداری شدند. در تهیه فهرست موجودی به موارد اصلی شامل، کلیه فرایندهای تولید آب شیرین از جمله آب‌گیری از دریا، انجام فرایندهای پیش‌تصفیه مانند فیلتراسیون و گندزدایی، پمپاژ آب شور به واحد نمک‌زدایی، انجام فرایندهای نمک‌زدایی، تصفیه پساب شور یا دفع پساب به دریا توجه شد. با توجه به مقدار دسترسی به اطلاعات و آمار موجود در پژوهش حاضر از بخش ساخت صرف‌نظر شد. ویژگی‌های آب ورودی به تأسیسات و مقدار املاح آن، کلیه مواد شیمیایی و ممبران‌های مورد استفاده در بخش‌های مختلف فرایند تولید از فاکتورهای مهمی هستند که صورت‌برداری و بررسی شدند.

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 بررسی شد. پساب دفعی این تأسیسات از خروجی‌های مهم دیگر به محیط است که تهدید جدی برای محیط‌زیست دریایی است. لذا انتشار املاح موجود در پساب از فاکتورهای دیگر این بررسی بود. کلیه اطلاعات صورت‌برداری شده توسط نویسندگان به‌صورت آزمایشگاهی یا به‌صورت میدانی بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد مربوطه اندازه‌گیری و محاسبه شد. جدول ۲ لیست برخی

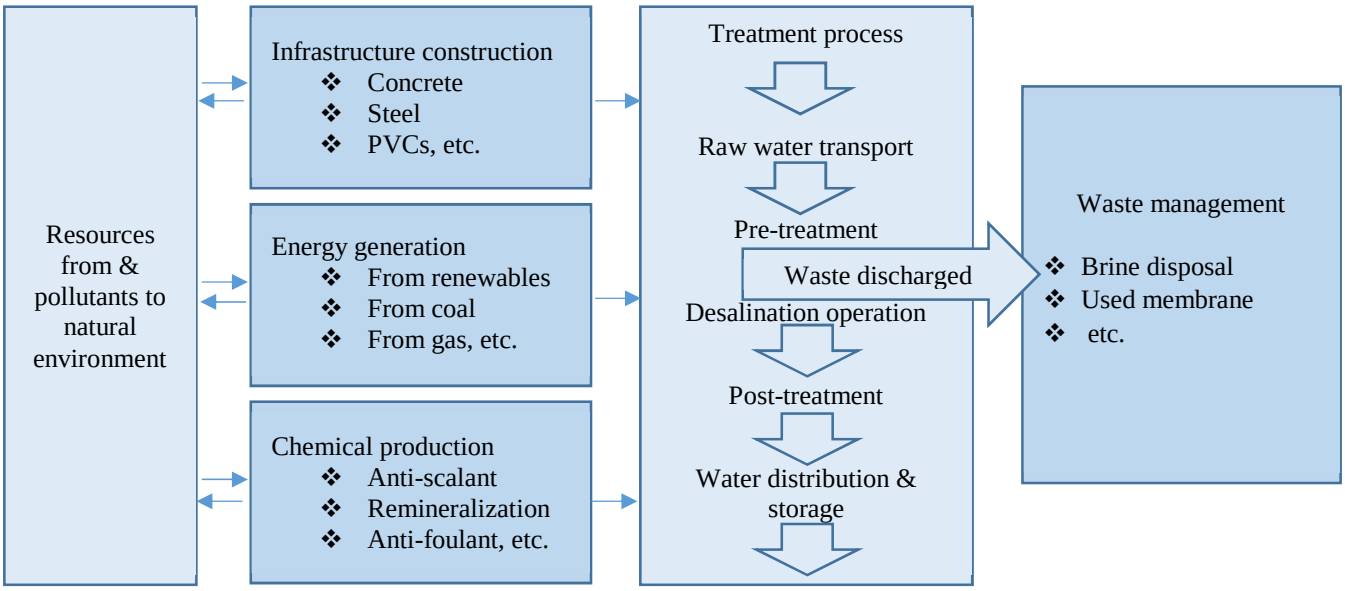



**Fig. 2.** System boundary and LCA methodology used to assess the potential environmental impacts of desalination (Zhou et al., 2014)

**شکل ۲-** مرز سیستم و به‌کارگیری روش LCA برای ارزیابی پتانسیل اثرات محیط‌زیستی فرایند نمک‌زدایی آب دریا (Zhou et al., 2014)

**جدول ۲-** لیست ترکیبات مورد استفاده برای تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی شده در سامانه نمک‌زدایی کنگان

**Table 2.** Input data of Kangan desalination plant to produce 1 $m^3$ of desalinated water

| Parameter | Unit process | Chemical formula | Unit | Amount for 1$m^3$ of desalinated water |
|---|---|---|---|---|
| Sea water (Raw material) | Extraction | - | $m^3$ | 2.56 |
| Chlorination | Pre-treatment | NaOCl | ppm | 2.5 |
| Coagulation | Pre-treatment | $FeCl_3$ | ppm | 15 |
| Membrane | Desalination operation | - | Kg | 16-25 |
| Water pass through membrane | Desalination operation | - | $m^3$day | 14.5 |
| Dechlorination | Desalination operation | $Na_2S_2O_5$ | ppm | 1.5 |
| Anti-scalant | Desalination operation | - | ppm | 3.5 |
| Disinfection | Post-treatment | NaOCl | ppm | 1 |
| pH adjustment | Post-treatment | $Ca(OH)_2$ | ppm | 17.5 |
| Wastewater to sea | End of operation | - | $M^3$ | 1.56 |
| Energy | Electricity supply | - | MJ | 16.4 |

از اطلاعات مورد استفاده در انجام LCA سامانه نمک‌زدایی کنگان را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است منبع تأمین انرژی الکتریکی در سامانه فوق، شبکه برق شهری کشور است که ترکیبی از منابع مختلف تأمین نیرو است. همچنین برای سایر اطلاعات موردنیاز نیز از پایگاه داده‌های معتبر موجود در نرم‌افزار استفاده شد. ویژگی‌های مربوط به آب ورودی و پساب خروجی سامانه از پارامترهای تأثیرگذار دیگر است که این اطلاعات درباره سامانه نمک‌زدایی کنگان در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۲-۴-۳- ارزیابی اثر در چرخه حیات

برای ارزیابی اثرات در LCA بسته به نوع محصول روش‌های متفاوتی وجود دارد. روش‌های ارزیابی اثر تا حد امکان قصد ایجاد ارتباط بین هر یک از موارد سیاهه تهیه شده با پیامد محیط‌زیستی متناظر با آن را دارند. نتایج سیاهه‌نویسی در رده پیامدهای مختلف

**جدول ۳-** ویژگی‌های آب خام ورودی و پساب خروجی از سامانه نمک‌زدایی کنگان

**Table 3.** Properties of the raw seawater input and wastewater discharge from from Kangan Desalination plant

| Parameter | Unit | Seawater | Wastewater |
|---|---|---|---|
| $Cl^-$ | ppm | 21023 | - |
| $Na^+$ | ppm | 11200 | - |
| $SO_4^{2-}$ | ppm | 2930 | 5329 |
| $Mg^{2+}$ | ppm | 5697 | 8772 |
| $Ca^{2+}$ | ppm | 1608 | 2879 |
| $K^+$ | ppm | 584 | 798 |
| $HCO_3^-$ | ppm | - | 136 |
| $Br^-$ | ppm | 55 | - |
| $No_3^-$ | ppm | 2 | 5 |
| $Po_4^{3-}$ | ppm | 0.009 | 0.2 |
| TDS | ppm | 40300 | 60500 |
| EC | S/cm | 70780 | 103900 |
| pH | 1:1 | 7.3 | 7.5 |
| Temperature | $^0C$ | Environment | |

که هر یک دارای یک شاخص رده هستند، طبقه‌بندی می‌شوند. شاخص رده می‌تواند در هر نقطه‌ای بین نتایج سیاهه‌نویسی و رده آسیب یعنی جایی که اثر محیط‌زیستی اتفاق می‌افتد در این زنجیره قرار گیرد. بر این اساس روش‌های ارزیابی اثر به ۲ گروه کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول، رویکرد مسئله محور یا روش نقطه میانی مانند روش CML 2 است. روش دوم رویکرد آسیب محور یا روش نقطه نهایی مانند Eco-Indicator 99 و IMPACT 2002+ است.

در این مرحله پس از بررسی پژوهش‌های پیشین ژو و همکاران در سال ۲۰۱۴ و با توجه به ماهیت پژوهش و فرایند نمک‌زدایی، روش ارزیابی IMPACT 2002+ انتخاب و نسخه ۲/۱۵ آن در نرم‌افزار SimaPro اجرا شد (Zhou et al., 2014). از دلایل دیگری که منجر به انتخاب روش IMPACT 2002+ شد، می‌توان به طیف گسترده رده پیامدهای مورد بررسی اشاره کرد. آن‌چنان که ضمن اجرای عملی یک رویکرد ترکیبی خط میانی / آسیب، انواع نتایج موجودی چرخه حیات (جریان‌های ابتدایی و سایر مداخلات) از طریق چندین دسته خط میانی ارائه شده است. نکته قوت دیگر این روش این است که ترکیبی از روش‌های Eco-indicator 99، IPCC و CML 2 است و نسبت به روش‌های دیگر نه تنها تعداد طبقات اثر بیشتری دارد بلکه ساختار کامل‌تری برای ویژگی‌سازی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی دارد (Boroon, 2015).

همچنین در روش ارزیابی IMPACT 2002+ برای برآورد ضرایب تعیین خسارت و برآورد انتقال آلودگی، به‌جای روش‌های نظرسنجی از تکنیک‌های دقیق‌تری مانند تعیین سطوح کاربری‌ها استفاده می‌شود (Stavropoulos et al., 2016). واحدهای اندازه‌گیری آن با روش‌های دیگر LCA مانند ReCiPe، CED و CML 2 مشابه است و امکان مقایسه مستقیم نتایج وجود دارد (Jolliet et al., 2003).

روش ارزیابی IMPACT 2002+ توسط مؤسسه فناوری فدرال سویس توسعه یافته است. این روش اجرای عملی از یک رویکرد ترکیبی گروه‌های تأثیرات میانی و گروه‌های آسیب پیشنهاد می‌کند. به‌طوری که ارتباط انواع نتایج LCA را از طریق ۱۵ گروه تأثیرات میانی و ۴ گروه تأثیرات کلی خطر مطابق شکل ۳ برقرار می‌کند. طبقات اثری که در نظر گرفته شد عبارتند از مواد سرطان‌زا، مواد غیر سرطان‌زا، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی، تابش یونی‌کننده، پتانسیل تخریب لایه ازن، اثر تنفسی ناشی از مواد آلی (اکسیداسیون فتوشیمیایی)، سمیّت اکوسیستم آبی، سمیّت اکوسیستم خشکی، اسیدی شدن /کاهش مواد مغذی خاک، اشغال زمین، اسیدی شدن آب‌ها، یوتریفیکاسیون آب‌ها، گرمایش جهانی، انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی، 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 مقدار واقعی تأثیرات

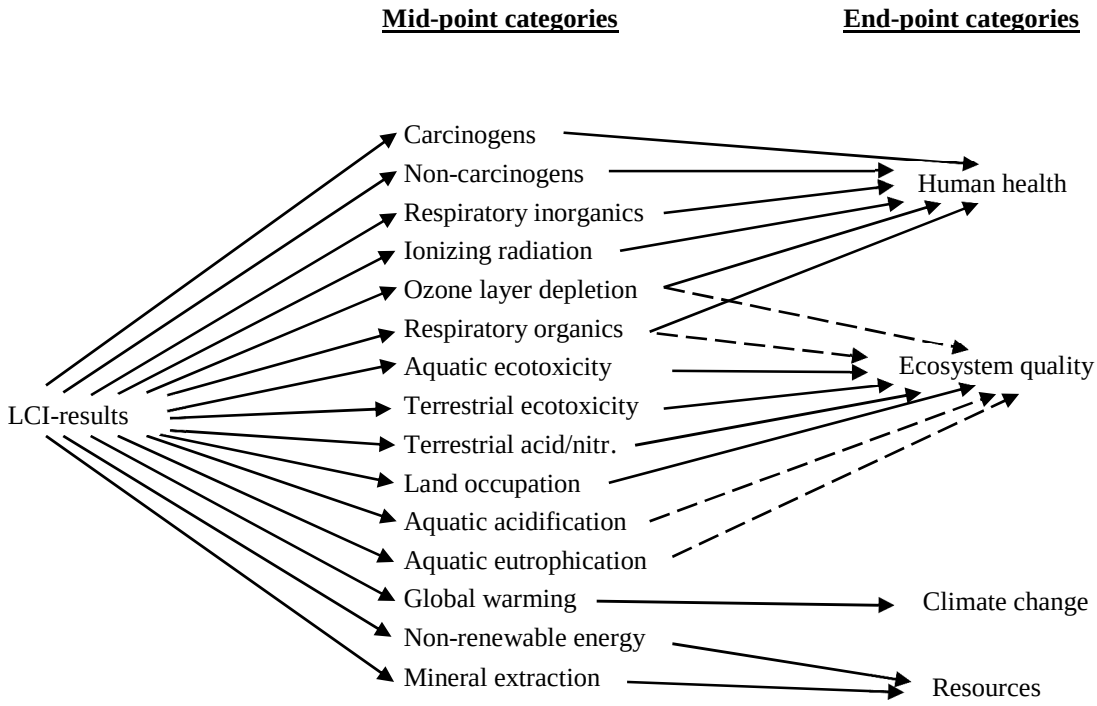



**Fig. 3.** Linking LCI results via the midpoint categories to damage categories in IMPACT 2002+ (Humbert et al., 2012)

**شکل ۳-** ارتباط گروه‌های اثر میانی و آسیب نهایی در روش IMPACT 2002+ (Humbert et al., 2012)

محیط‌زیستی[1] به آسیب‌های محیط‌زیستی[2]، نرمال‌سازی و وزن دهی از ضرایبی استفاده می‌شود که این ضرایب در نرم‌افزار SimaPro موجود است. بنابراین مقدار مداخلات محیط‌زیستی تخصیص داده شد به هر طبقه اثر بر اساس واحدهای پیشنهادی در روش IMPACT 2002+ به‌صورت کمّی در آورده شد و در ادامه، نرمال‌سازی داده‌ها و مقایسه شاخص‌های محیط‌زیستی در نرم‌افزار انجام شد. سپس برای برآورد شاخص کلی که از مجموع شاخص‌های محیط‌زیستی مختلف به‌دست می‌آید، مرحله وزن‌دهی انجام شد. به‌طوری که نتایج حاصل از شاخص‌های طبقه‌بندی تأثیرات در عامل وزن‌دهی ضرب و یک رقم نهایی برای مقدار اثرات محاسبه می‌شود.

در نهایت ۴ گروه آسیب نهایی محاسبه و سهم هر یک از فرایندها و طبقات میانی در ایجاد آن بررسی و تفسیر شد. به‌طوری که در مجموع اثرات سامانه نمک‌زدایی کنگان بر محیط‌زیست، ارزشیابی و جنبه‌های محیط‌زیستی مربوطه شناسایی شد.

### ۲-۴-۴- محدودیت‌های پژوهش

مرحله صورت‌برداری و تهیه فهرست موجودی چرخه حیات از مهم‌ترین مراحل LCA است که نیاز به جمع‌آوری ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم و کمّی‌سازی آنها دارد. بنابراین فقدان داده‌های قابل اعتماد برای بعضی مراحل از چرخه حیات از محدودیت‌های این روش است. در این راستا با هدف کاهش خطا در این پژوهش همان طور که در بخش تعیین محدوده پژوهش نیز اشاره شد، به‌دلیل محدودیت دسترسی به اطلاعات از مرحله ساخت تأسیسات نمک زدایی کنگان صرف‌نظر شد.

محدودیت دیگر، عدم همگنی زمانی داده‌ها بود که اطلاعات اغلب به دوره‌های زمانی مختلف اشاره دارد و این می‌تواند باعث عدم دقت در مقایسه‌های مختلف شود. بنابراین در این پژوهش از میانگین‌گیری استفاده شد.

[1] Characteristics
[2] Damage Assessment

انتخاب و شناسایی شاخص‌های محیط‌زیستی مورد استفاده برای طبقه‌بندی اثرات و روش LCA و ویژگی‌سازی اثرات از محدودیت‌های دیگر این پژوهش بود. بنابراین در پژوهش حاضر برای کاهش خطا ضمن بررسی پژوهش‌های پیشین و مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی با توجه به مزیت‌های روش IMPACT 2002+ که در بخش روش پژوهش ارائه شد، از این روش استفاده شد.

با توجه به اینکه مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی مربوط به انتشار آلاینده‌ها به هوا و آب است، تلاش شد با روش‌های کمی و کیفی، میدانی و مطالعاتی، اطلاعات مربوط به پساب و پسماند، آب ورودی، انرژی مصرفی و مواد اولیه موردنیاز تولید و با تکرار مطالعات میدانی و مقایسه اسناد و گزارش‌های موجود و مصاحبه با کارشناسان، پرسنل و مسئولین مربوط به سامانه کنگان تدقیق شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مقایسه مقدار انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی چرخه حیات (شاخص ویژگی‌سازی) و سهم فرایند

پس از به‌دست آوردن داده‌ها و تکمیل مرحله صورت‌برداری و ورود آنها به نرم‌افزار SimaPro نتایج پژوهش مربوط به ارزیابی اثر تأسیسات نمک‌زدایی کنگان به‌دست آمد. نتایج مربوط به مقدار انتشار آلاینده‌ها حاصل از ارزیابی اثر چرخه حیات تأسیسات نمک‌زدایی کنگان بر مبنای شاخص‌های روش IMPACT 2002+ در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول مقدار انتشار آلاینده‌ها در ۱۵ طبقه اثر میانی در نظر گرفته شده مانند مواد سرطان‌زا، مواد غیر سرطان‌زا، اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی، تابش یونی‌کننده، پتانسیل تخریب لایه ازن، اثر تنفسی ناشی از مواد آلی، سمیّت اکوسیستم آبی، سمیّت اکوسیستم خشکی، اسیدی شدن / کاهش مواد مغذی خاک، اشغال زمین، اسیدی شدن آب‌ها، یوتریفیکاسیون آب‌ها، گرمایش جهانی، انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج مواد معدنی مربوط به مراحل RO، به‌کارگیری مواد شیمیایی، ورود فاضلاب به دریا و استفاده از انرژی الکتریکی با ولتاژ زیاد و مقدار کل انتشار آلاینده در طول چرخه حیات تولید ۱ مترمکعب آب شیرین قابل مشاهده است.

با توجه به جدول ۴ در طی چرخه حیات تولید آب شیرین از دریا در تأسیسات نمک‌زدایی کنگان معادل ۳/۲۲۳۷۴۴ کیلوگرم گاز دی‌اکسید کربن به محیط انتشار می‌یابد که مقدار ۳/۲۲۱۲۸۹ کیلوگرم از آن معادل ۹۹/۹ درصد مربوط به استفاده از انرژی الکتریکی با ولتاژ زیاد است. همچنین مقدار مصرف منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند گاز، زغال سنگ و نفت ۵۵/۰۲۳۴ مگاژول است که تقریباً ۹۹/۹۹ درصد آن برای تأمین انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. بنابراین از آنجایی که برای تأمین انرژی الکتریسته در واحد نمک‌زدایی کنگان از شبکه برق کشور که معمولاً بر پایه نیروگاه‌های سوخت فسیلی است استفاده می‌شود، مهم‌ترین بار آلایندگی محیط‌زیستی در این واحد مربوط به مصرف انرژی برای مراحل مختلف نمک‌زدایی آب دریا است که از جنبه‌های مهم محیط‌زیستی در چرخه حیات نمک‌زدایی آب دریا محسوب می‌شود. با توجه به شکل ۴ که سهم گازهای گلخانه‌ای مختلف در ایجاد اثر گرمایش جهانی در تأسیسات نمک‌زدایی کنگان را نشان می‌دهد، گاز دی‌اکسید کربن مهم‌ترین عامل در ایجاد این اثر است و بیشترین سهم را دارد و گاز متان و دی‌نیتروژن منواکسید در رتبه دوم و سوم قرار دارند.

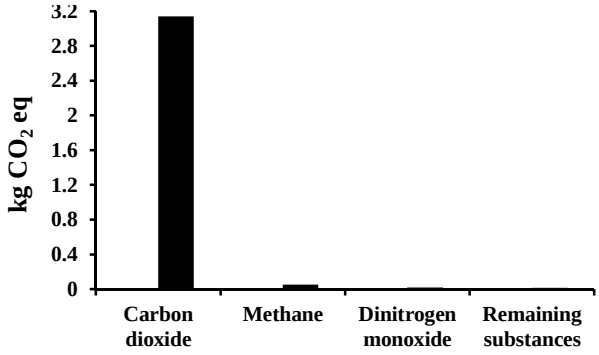



**Fig. 4.** Comparison of the contribution of different greenhouse gases in global warming for production of 1 $m^3$ of desalinated water

**شکل ۴-** مقایسه سهم گازهای گلخانه‌ای مختلف در گرمایش جهانی به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین

در راستای تأیید نتایج این پژوهش، بررسی‌های انجام شده توسط بیسواس بر روی تأسیسات نمک‌زدایی در غرب استرالیا نشان داده است، فرایند RO تأثیر معنی‌داری در انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه مصرف انرژی الکتریکی که از نیروگاه‌های سوخت فسیلی تأمین شده است دارد (Biswas, 2009). نتایج

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973

**جدول ۴-** نتایج مربوط به شاخص‌های طبقات اثر محیط‌زیستی

**Table 4.** Results of environmental impact categories

| Impact category | Unit | Total | Reverse osmosis | Chemical material | Wastewater to sea | Electricity, high voltage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Carcinogens | kg $C_2H_3Cl$ eq | 0.214544 | 8.7E-06 | 2.55E-06 | 0 | 0.214533 |
| Non-carcinogens | kg $C_2H_3Cl$ eq | 0.021574 | 9.01E-06 | 1.64E-06 | 0 | 0.021564 |
| Respiratory inorganics | kg PM2.5 eq | 0.001947 | 1.55E-07 | 1E-07 | 0 | 0.001947 |
| Ionizing radiation | Bq C-14 eq | 14.86086 | 0.001082 | 0.000581 | 0 | 14.8592 |
| Ozone layer depletion | kg CFC-11 eq | 1.23E-06 | 8.37E-07 | 1.1E-08 | 0 | 3.81E-07 |
| Respiratory organics | kg $C_2H_4$ eq | 0.00077 | 3E-07 | 1.47E-08 | 0 | 0.00077 |
| Aquatic ecotoxicity | kg TEG water | 153.0888 | 0.015079 | 0.015254 | 0 | 153.0584 |
| Terrestrial ecotoxicity | kg TEG soil | 21.66398 | 0.003655 | 0.004606 | 0 | 21.65572 |
| Terrestrial acid/nitr | kg $SO_2$ eq | 0.040907 | 2.22E-06 | 9.44E-07 | 0 | 0.040904 |
| Land occupation | $m^2$org.arable | 0.004343 | 6.37E-06 | 6.06E-07 | 0 | 0.004336 |
| Aquatic acidification | kg $SO_2$ eq | 0.012624 | 6.22E-07 | 2.86E-07 | 0 | 0.012623 |
| Aquatic eutrophication | kg $PO_4$ P-lim | 0.0004407 | 4.16E-08 | 1.54E-08 | 0.000298 | 0.000143 |
| Global warming | kg $CO_2$ eq | 3.223744 | 0.00239 | 6.56E-05 | 0 | 3.221289 |
| Non-renewable energy | MJ primary | 55.0234 | 0.002953 | 0.000942 | 0 | 55.0195 |
| Mineral extraction | MJ surplus | 0.011433 | 5.49E-06 | 2.81E-06 | 0 | 0.011425 |

بررسی LCA در پژوهش فوق، بیانگر انتشار ۳۸۹۰ تن معادل گاز دی‌اکسید کربن در فرایند نمک زدایی ۱ گیگا لیتر آب دریا بوده است (Biswas, 2009). همچنین بر نقش حداکثری گاز دی‌اکسید کربن در این اثر تأکید داشته‌اند.

بنابراین، بررسی بر روی امکان به‌کارگیری روش‌های کاهش مصرف انرژی در فرایند RO مانند بازیافت انرژی از دستگاه‌ها، بهینه‌سازی فرایند RO و سایر عملیات اجرایی، افزایش بهره‌وری تجهیزات اصلی سیستم مانند پمپ‌ها و ممبران‌ها برای کنترل اثرات محیط‌زیستی این تأسیسات بسیار حائز اهمیت است (González-Bravo et al., 2017, Hancock et al., 2012, Zhou et al., 2011).

همچنین استفاده از سایر منابع انرژی برای تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز در واحدهایی که از سیستم RO به‌عنوان تکنیک نمک‌زدایی استفاده می‌کنند مانند نیروگاه‌هایی با سوخت گاز طبیعی یا منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی از گزینه‌های مطرح دیگر است. در تأیید مطالب فوق، مقایسه نتایج LCA انجام شده توسط ژو و همکاران بر روی تأسیسات نمک‌زدایی در ۳ کشور سنگاپور، ایالات متحده آمریکا و استرالیا که از سیستم RO برای نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور استفاده می‌کردند نشان داد در کشور سنگاپور که مقدار گاز طبیعی در تأمین انرژی الکتریکی تأسیسات نمک‌زدایی در ترکیب سوخت‌های فسیلی استفاده شده بیشتر از ۲ کشور دیگر است، در تمامی طبقات اثر محیط‌زیستی مورد بررسی آسیب کمتری به محیط‌زیست وارد شده است (Zhou et al., 2011).

همچنین با توجه به مقدار مربوط به سایر طبقات اثر در این پژوهش که در جدول ۴ نشان داده شده است، به جز طبقه‌های اثر پتانسیل تخریب لایه ازن، و پدیده یوتریفیکاسیون، نقش حداکثر مصرف انرژی در تولید آلودگی در تمامی طبقات اثر تأیید می‌شود. این در حالی است که در مورد طبقه اثر پتانسیل تخریب لایه ازن از مجموع مقدار اثر مربوط به تولید ۱ متر مکعب آب نمک‌زدایی‌شده

(معادل 1.23E-06 کیلوگرم، CFC-11 [1]) بیشترین اثر (۶۸ درصد) مربوط به مرحله RO و سپس به‌ترتیب ۳۱ درصد مربوط به مصرف انرژی و ۱ درصد ناشی از استفاده از مواد شیمیایی است. به‌طوری که با توجه به شکل ۵ که سهم ترکیبات مختلف در این اثر را نشان می‌دهد، بیشترین اثر مربوط به CFC-113 و هالون ۱۳۰۱ است. ژو و همکاران نیز طی بررسی‌ای که بر روی LCA تأسیسات نمک‌زدایی با تکنیک RO در آمریکا انجام دادند، مقدار پتانسیل تخریب لایه ازن را توسط دو روش متفاوت ارزیابی اثر (CML2 و TRACI) به ازای تولید ۱ مترمکعب آب شیرین، حدوداً معادل 3E-08 .4 کیلوگرم، CFC-11 به‌دست آوردند که مقدار آن در دو روش، تفاوت معنی‌داری نداشته است و بیش از ۸۰ درصد آن مربوط به CFC-114 و هالون ۱۳۰۱ بوده است (Zhou et al., 2012).

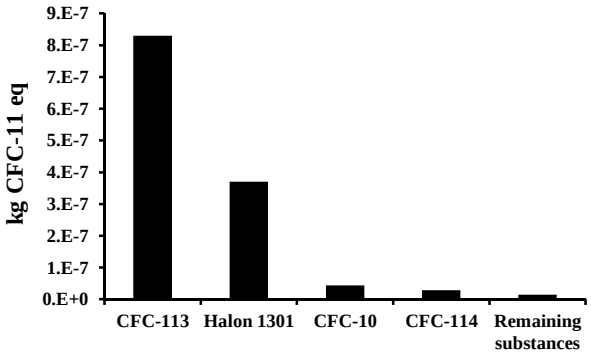



**Fig. 5.** Comparison of the contribution of different chemical compounds in ozone layer depletion for production of 1 $m^3$ of desalinated water

**شکل ۵-** مقایسه سهم ترکیبات شیمیایی مختلف در تخریب لایه ازن به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین

از آنجایی که ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در واحدهای نمک‌زدایی که از روش RO استفاده می‌کنند به شدت وابسته به کیفیت آب ورودی به سیستم، مدل تأمین انرژی الکتریکی و دفع فاضلاب شور تولیدی است، تفاوت موجود بین نتایج در پژوهش‌ها قابل‌توجیه است. تخریب لایه ازن باعث رسیدن بخش مضری از اشعه ماوراء بنفش به سطح زمین می‌شود که موجب اثرات بالقوه مضر بر سلامت انسان، سلامت حیوانات، اکوسیستم‌های خشکی و آبی و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی می‌شود. با این حال نتایج بسیاری از پژوهش‌های موجود نشان داده است که در سامانه‌های نمک‌زدایی آب دریا به شیوه RO می‌توان با طراحی مناسب بر اساس یک تحلیل منطقی، اثرات زیست‌محیطی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش داد (Missimer and Maliva, 2018, Shemer and Semiat, 2017). از جمله این راهکارها می‌توان به پیشرفت فناوری غشایی و ایجاد ممبران‌های بسیار قابل‌نفوذ یا تولید کامپوزیت‌هایی با قابلیت گرفتگی پایین و افزایش طول عمر ممبران‌ها اشاره کرد.

در مورد پدیده یوتریفیکاسیون در اکوسیستم آبی، شاخص اثر معادل ۱ kg $PO_4$ P-lim [2] ۰/۰۰۰۴۴۰۷ به‌دست آمد که ۶۷ درصد مربوط به تخلیه پساب در دریا و ۳۲ درصد مربوط به مصرف انرژی الکتریکی و ۱ درصد نیز مجموع اثر مراحل RO و به‌کارگیری مواد شیمیایی است. یوتریفیکاسیون در واقع غنی‌شدن اکوسیستم‌های آبی از مواد مغذی همچون نیتروژن و فسفر است که با افزایش رشد جلبک‌ها منجر به کاهش اکسیژن آب، نوسانات pH و افت کیفیت آب برای زندگی آبزیان، مرگ ماهی‌ها و مشکلات اقتصادی اجتماعی ناشی از آن می‌شود (Acelas et al., 2015, Panagopoulos et al., 2019).

بر اساس شکل ۶ که سهم ترکیبات مختلف در این اثر را نشان می‌دهد، بیشترین سهم مربوط به فسفات آب و سپس اکسیژن‌خواهی شیمیایی آب بود. در تأیید این مطلب، نتایج پژوهش‌های بسیاری از پژوهشگران نشان داد که ورود فاضلاب شور و غنی از مواد مغذی فسفات و نیترات سامانه‌های نمک‌زدایی به اکوسیستم آبی همچنین به‌کارگیری سوخت فسیلی برای تأمین انرژی در این سامانه‌ها با آزادسازی اکسیدهای نیتروژن و گوگرد حاصل از احتراق، پتانسیل وقوع پدیده یوتریفیکاسیون و اسیدی‌شدن آب را افزایش می‌دهند (Frank et al., 2019, Kim et al., 2016, Yin and Kong, 2014, Zhou et al., 2013).

علاوه بر ورود فاضلاب به دریا و به‌کارگیری سوخت فسیلی برای تأمین انرژی الکتریسته، عامل دیگر مؤثر بر یوتریفیکاسیون در واحدهای نمک‌زدایی، اسید فسفریک یا ترکیبات دیگر فسفاته است که به‌عنوان ضد رسوب در عملیات نمک‌زدایی استفاده می‌شود (Zhou et al., 2013).

[1] Chloro Fluoro Carbon (CFC)

[2] Equivalents Into a P-limited Water

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.214063.2973

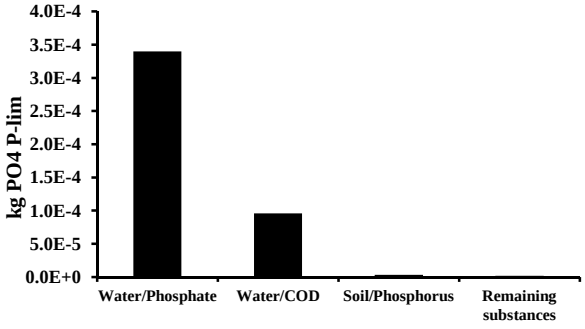



**Fig. 6.** Comparison of the contribution of different chemical compounds in eutrophication for production of 1 $m^3$ of desalinated water

**شکل ۶-** مقایسه سهم ترکیبات شیمیایی مختلف در یوتریفیکاسیون به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین

## ۳-۲- مقایسه نتایج نرمال‌سازی و وزن‌دهی شاخص‌های ارزیابی اثر چرخه حیات

در جدول ۵ نتایج مربوط به نرمال‌سازی و وزن‌دهی در ۱۵ طبقه اثر میانی قابل‌مشاهده است. با توجه به اینکه شاخص نرمالیزه بدون واحد است، امکان مقایسه اهمیت و دامنه نسبی نتایج مربوط به آنها وجود دارد. از بین ۱۵ طبقه اثر فوق، طبقات کاهش انرژی‌های تجدیدناپذیر برابر ۰/۰۰۰۳۶۲، گرمایش جهانی برابر ۰/۰۰۰۳۲۶ و اثر تنفسی ناشی از مواد معدنی برابر ۰/۰۰۰۱۹۲ به‌ترتیب بیشترین شاخص نرمالیزه را به خود اختصاص دادند. شکل ۷ تأثیر مراحل مختلف چرخه حیات نمک‌زدایی در بخش‌های اثر نرمال‌شده را نشان می‌دهد. به‌طوری که تأثیر حداکثری مصرف انرژی الکتریکی در ایجاد آلودگی محیط‌زیست در تمامی طبقات اثر به وضوح مشخص شده است.

در جدول ۵ نیز مقدار انتشار آلاینده‌های وزن‌دار شده و بار محیط‌زیستی آنها در تمامی گروه‌های اثر با واحد یکسان µPt [1] مشخص و قابل مقایسه است. همچنین مقدار کل انتشار آلاینده‌ها از مجموع گروه‌های اثر فوق به ازای تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی شده ۹۹۰/۴۹۸۸ µPt محاسبه شد. همان طور که در جدول ۵ مشخص است، قسمت اعظم این اثرات مربوط به کاهش منابع سوخت‌های تجدیدناپذیر، تولید گازهای گلخانه‌ای و اثر بر گرمایش جهانی و اثرات تنفس حاصل از ورود این گازها به اتمسفر است.

با توجه به جدول ۶ که سهم مراحل مختلف فرایند تولید آب نمک‌زدایی شده در انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست را نشان می‌دهد، بیشترین تأثیر مربوط به اثرات ناشی از مصرف انرژی الکتریکی برابر ۹۹۰/۰۶ µPt بود که در واحد نمک‌زدایی کنگان از نیروگاه‌های سوخت فسیلی تأمین می‌شود. اگرچه مصرف انرژی مهمترین عامل انتشار آلاینده‌ها در تأسیسات نمک‌زدایی کنگان است، از آنجایی که تکنولوژی نمک‌زدایی در این تأسیسات RO است، نسبت به تکنولوژی‌های حرارتی مانند MSF [2] و MED [3] انرژی کمتری مصرف می‌کند (Zhou et al., 2011, Ibrahim et al., 2018, Raluy et al., 2006).

به‌کارگیری شیوه‌هایی مانند استفاده از پمپ‌های فشار قوی، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، تجهیزات و ساختار فرایند RO قادر است با کاهش مصرف انرژی الکتریکی، پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از آن را نیز کاهش دهد. با توجه به این که در روش RO گرفتگی غشاها مسئله‌ای است که همواره باعث بروز مشکلاتی چون کاهش آبدهی، مصرف بیشتر انرژی به‌دلیل افزایش فشار عملیاتی و نهایتاً نیاز به شستشوی در جای غشاها می‌شود که منجر به کاهش بازدهی، افزایش هزینه‌ها و مشکلات محیط‌زیستی به‌دلیل دفع مواد شیمیایی ناشی از شستشو می‌شود، استفاده از مواد شیمیایی حد واسط به‌عنوان راهکاری برای غلبه بر محدودیت حلالیت املاح معدنی و افزایش قابلیت بازیافت آب می‌تواند مناسب باشد (Gabelich et al., 2011).

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی، باد، امواج و زمین‌گرمایی در فرایندهای نمک‌زدایی ابزاری برای کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی و مصرف منابع انرژی در فرایند تولید آب نمک‌زدایی‌شده است.

ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر با فرایندهای نمک‌زدایی، با چالش‌های فنی از جمله ذخیره انرژی و در دسترس بودن منابع انرژی تجدیدپذیر کم‌هزینه روبرو است. علاوه بر این، فرایند نمک‌زدایی به یک منبع انرژی ثابت نیاز دارد. بنابراین، اکثر اوقات برای رفع مشکل مربوط به احتمال قطعی و وقفه در نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر از اضافه کردن آنها به شبکه برق استفاده می‌شود تا مصرف روزانه استفاده از جریان متناوب برق نیز کاسته شود

[1] Micro Point

[2] Multi Stage Flash Distillation (MSF)
[3] Multi Effect Distillation (MED)

**جدول ۵-** نتایج مربوط به مراحل نرمال‌سازی و وزن‌دهی

**Table 5.** Results of normalization and weighting stages

| Impact category | Normalization | Weighting (µPt) |
|---|---|---|
| Carcinogens | 8.47021E-05 | 84.70213921 |
| Non-carcinogens | 8.51759E-06 | 8.517585735 |
| Respiratory inorganics | 0.000192177 | 192.1768146 |
| Ionizing radiation | 4.4003E-07 | 0.44003009 |
| Ozone layer depletion | 1.81979E-07 | 0.181979226 |
| Respiratory organics | 2.31222E-07 | 0.231221572 |
| Aquatic ecotoxicity | 5.61009E-07 | 0.561009055 |
| Terrestrial ecotoxicity | 1.25094E-05 | 12.50942956 |
| Terrestrial acid/nutri | 3.10569E-06 | 3.105692427 |
| Land occupation | 3.45533E-07 | 0.345532804 |
| Aquatic acidification | 0 | 0 |
| Aquatic eutrophication | 0 | 0 |
| Global warming | 0.000325598 | 325.5981898 |
| Non-renewable energy | 0.000362054 | 362.0539497 |
| Mineral extraction | 7.52291E-08 | 0.075229142 |
| Total | | 990.4988 |

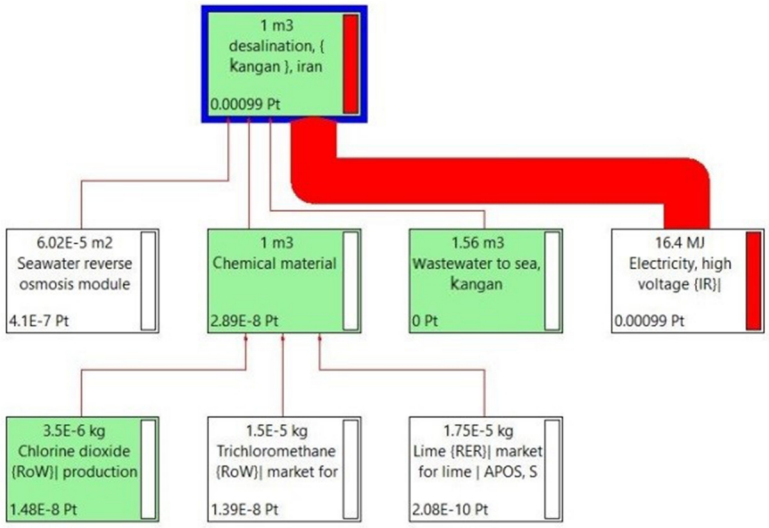



**Fig. 7.** Sankey diagram of life cycle assessment of Kangan desalination plant

**شکل۷-** نمودار سنکی ارزیابی چرخه حیات تولید آب شیرین در تأسیسات نمک‌زدایی کنگان

**جدول ۶-** مقایسه سهم مراحل مختلف تولید در ایجاد کل اثرات محیط‌زیستی

**Table 6.** Comparison of the contribution of different process stages in total environmental impacts

| Damage category | Unit | Total | Reverse osmosis | Chemical material | Wastewater | Electricity |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Total damage | µPt | 990.4988 | 0.409975 | 0.028863 | 0 | 990.06 |

**جدول ۷-** مقایسه سهم مراحل مختلف تولید در گروه‌های آسیب نهایی

**Table 7.** Comparison of the contribution of different process stages in final damage categories

| Damage category | Unit | Total | Reverse osmosis | Chemical material | Wastewater to sea | Electricity, high voltage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Human health | DALY | 2.03E-06 | 1.04E-09 | 9.36E-11 | 0 | 2.03E-06 |
| Ecosystem quality | PDF*m2*yr | 0.226324 | 3.89E-05 | 3.88E-05 | 0 | 0.226246 |
| Climate change | kg CO2 eq | 3.223744 | 0.00239 | 6.56E-05 | 0 | 3.221289 |
| Resources | MJ primary | 55.03483 | 0.002958 | 0.000945 | 0 | 55.03093 |

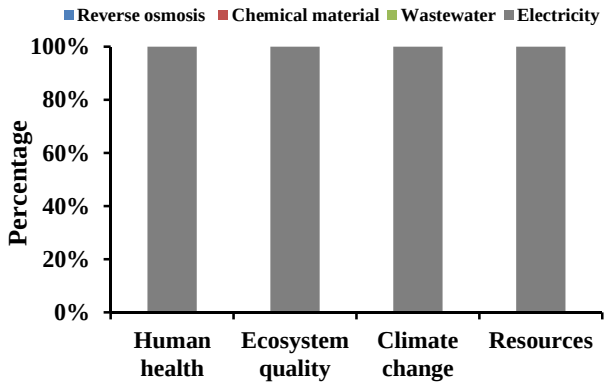
(Karvounis, 2017, Shemer and Semiat, 2017).

## ۳-۳- تحلیل سهم فرایندها در گروه‌های آسیب نهایی و تفسیر

در شکل ۷ نمودار سنکی[1] مربوط به LCA تولید آب شیرین درتأسیسات نمک‌زدایی کنگان به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین نمایش داده شده است. نمودار سنکی در واقع نوع خاصی از نمودارهای جریانی است که پهنای هر پیکان متناسب با مقدار جریان است (Lupton and Allwood, 2017). با کمک این نمودار می‌توان منبع پیامدهای محیط‌زیستی را مشخص کرد. نمودارهای سنکی تمام جریان‌های داده‌های اولیه و انرژی مربوط به فرایندهای مختلف تولید را نمایش می‌دهند. با توجه به شکل ۷ و تعریف نمودار سنکی، بخش تولید برق سهم عمده‌ای در بارهای محیط‌زیستی سامانه‌های نمک‌زدایی دارد زیرا پهنای پیکان نسبت به دیگر بخش‌ها ضخامت بیشتری دارد. همچنین در این نمودار اطلاعات مربوط به کل ماده صورت‌برداری شده در هر یک از مراحل فرایندی و مجموع اثر محیط‌زیستی نرمال‌سازی شده مربوط به آن فرایند به نمایش در آمده است.

نتایج حاصل از دسته‌بندی، شاخص‌های محیط‌زیستی در ۴ گروه آسیب نهایی شامل سلامت انسان، کاهش کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع، برای مقایسه مقدار آلایندگی ناشی از تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی‌شده در جدول ۷ نشان داده شده است.

همچنین برای درک ساده‌تر نتایج، سهم مراحل مختلف فرایند تولید در انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست در این ۴ گروه به‌صورت درصد در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج این مرحله امکان انتخاب گزینه‌های مناسب برای کاهش اثرات محیط‌زیستی و بهینه سازی فرایندها، سیاست گذاری و طراحی مناسب تأسیسات جدید را فراهم می‌کند. باتوجه به نتایج جدول ۷ و شکل ۸ مشخص شد، مرحله تأمین انرژی الکتریکی در آسیب به سلامت انسان، کاهش کیفیت اکوسیستم، وقوع تغییرات اقلیمی و آسیب به منابع طبیعی بیشترین سهم معادل ۹۹/۹ درصد را دارد. بنابراین مهم‌ترین جنبه محیط‌زیستی در این سامانه مرحله تأمین انرژی الکتریکی تشخیص داده شد.




**شکل ۸-** درصد سهم مراحل مختلف فرآیند نمک‌زدایی آب دریا در ۴ گروه آسیب نهایی

**Fig. 8.** Percentage of the contribution of different processes of seawater desalination stages in 4 final damage categories

مهم‌ترین اقدامات ضروری برای مقابله و کاهش اثرات محیط‌زیستی در این سامانه کنترل این مرحله است. به‌طوری که با افزایش کارایی مصرف انرژی، کاهش مصرف و جایگزینی منابع تأمین انرژی با منابع تجدیدپذیر گام مؤثری برای حفاظت از اکوسیستم و منابع طبیعی، سلامت انسان و مقابله با تغییرات اقلیمی برداشته خواهد شد. شاخص آسیب به سلامتی انسان در این

[1] Sankey

پـژوهش بـه مقـدار (2.03E-06) $DALY_S$ [1] بـه‌دسـت آمـد. ایـن شاخص، مجموعه‌ای از دسته‌های میانی سـمیت انسـان، اثـر تنفسـی، تابش یونی کننده، کاهش لایه ازن و اکسیداسیون فتوشیمیایی اسـت که شدت ایجاد عوارض در انسان را با افـزایش مـوارد مـرگ و میـر زودرس یا ناتوانی در اثر بیماری مشخص می‌کند.

با توجه به مقایسه نتـایج موجـود در جـدول ۷ و نتـایج وزن‌دهـی شده در جدول ۵ مشخص شد تنفس ترکیبات معدنی انتشـار یافتـه بـه هوا و ترکیبات سرطان‌زا، به‌ترتیب مهم‌تـرین عوامـل تهدیـد سـلامتی انسان محسوب می‌شوند. با توجه به نتایج موجـود در جـدول ۷ تـأثیر مراحل مختلف نمک‌زدایی آب دریـا بـر کیفیـت اکوسیسـتم برحسـب کسـری از گونـه‌هـای بـالقوه ناپدیـد شـده در مسـاحت مشـخص از اکوسیستم و مدت زمان معینی از سال $(PDF \cdot m^2 \cdot yr)$ [2] مشخص شد.

در رابطـه بـا اثـر بـر کـاهش کیفیـت اکوسیسـتم اگرچـه تفـاوت قابـل‌ملاحظـه‌ای بـین عوامـل تأثیرگـذار وجـود نـدارد ولـی تـأثیر ترکیبات سمّی بر اکوسیستم خشکی و اسیدی شدن اکوسیستم آبی تا حدودی نقش بیشتری داشته است. بر اساس جدول ۷ به ازای تولیـد هر مترمکعب آب شیرین در سامانه نمک‌زدایـی کنگـان، کـاهش بـر منـابع طبیعـی تغییـرات اقلیمـی معـادل ۵۵/۰۳۴۸۳ primary مگاژول در منابع اولیه موجود کاهش ایجاد می شود که بخـش عمـده آن مربوط به به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدناپذیر است و در مقایسـه با آن، کاهش در معادن طبیعی جزئـی اسـت کـه در جـدول ۵ نشـان داده شده است. اثر بر تغییرات اقلیمـی در روش IMPACT 2002+ تنها با گازهای گلخانه‌ای تولیدی پیوند دارد که در اثر فعالیت سامانه نمک‌زدایی کنگان به ازای تولید هر مترمکعـب آب شیـرین معـادل ۳/۲۲۳۷۴۴ کیلـوگرم گـاز دی‌اکسـید کـربن بـه اتمسـفر انتشـار می‌یابد.

## ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی و شناخت اثرات محیط‌زیسـتی سـامانه نمک‌زدایی کنگان انجام شد. در این راسـتا بـا بـه‌کـارگیری رویکـرد LCA در طـی ۴ گـام بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار SimaPro 9 اثـرات محیط‌زیستی تجمعی ناشی از همه مراحل چرخـه حیـات تأسیسـات نمک‌زدایی کنگان در ۱۵ طبقه اثر میانی و ۴ گروه نهایی تعیین شد.

برای ایـن منظـور از ضـرایب و شـاخص‌هـای ارزیـابی IMPACT 2002+ موجود در نرم‌افزار استفاده شد. بـر اسـاس نتـایج پـژوهش، فرایند تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز، مهم‌ترین جنبه محیط‌زیستی در چرخه حیات تولید آب شیرین در این واحـد تشـخیص داده شـد. بیشترین اثر محیط‌زیستی مربوط به تغییرات اقلیمی و کاهش منـابع اولیه بود. بـه ازای تولیـد ۱ مترمکعـب آب شـیرین معـادل ۳/۲۲۴ کیلوگرم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود و ۵۵/۰۳۵ مگـاژول کـاهش در منابع اولیه ایجاد می‌شود. همچنین تأمین انرژی الکتریکی از بـین مراحل چرخه نمک‌زدایی آب دریا بیشـترین سـهم را در ایجـاد همـه طبقات اثر بـه جـز تخریـب لایـه ازن و یوتریفیکاسـیون نشـان داده است. فرایند تأمین انرژی الکتریکی در مقایسه با مراحـل RO، مـواد شیمیایی و تخلیه پساب بـه دریـا، سـهم ۹۹/۹ درصـدی در ۴ طبقـه آسـیب نهـایی شـامل آسـیب بـه سـلامت انسـان، کـاهش کیفیـت اکوسیستم، ایجاد تغییـرات اقلیمـی و کـاهش منـابع طبیعـی داشـت. فرایند RO و تخلیه پساب بـه دریـا بـه‌ترتیـب بیشـترین سـهم را در طبقات اثر تخریـب لایـه ازن و یوتریفیکاسـیون نشـان دادنـد. عـدم تصفیه پساب شور تولیدی و تخلیه آن به دریا از عوامل دیگر آسیب به اکوسیستم و حیات آبزیان در این سامانه است. با توجـه بـه نتـایج به‌دست آمده پیشنهاد می‌شود، بررسـی بـر روی امکـان بـه‌کـارگیری روش‌هـای کـاهش مصـرف انـرژی در فراینـد RO ماننـد بازیافـت انرژی از دسـتگاه‌هـا، بهینـه‌سـازی فراینـد RO و بخـش‌هـای دیگـر عملیات اجرایی، افزایش بهره‌وری تجهیـزات اصـلی سیسـتم، ماننـد پمپ‌ها و ممبران‌ها، برای کنترل اثرات محیط‌زیستی این تأسیسـات انجام شود. همچنین استفاده از سایر منابع انرژی برای تأمین انـرژی الکتریکی موردنیاز به‌ویـژه منـابع انـرژی تجدیدپـذیر ماننـد انـرژی خورشـیدی در واحـدهایی کـه از سیسـتم RO بـه‌عنـوان تکنولـوژی نمک‌زدایی استفاده می‌کنند از گزینه‌های مطرح دیگر است.

## ۵- قدردانی

نویسـندگان پـژوهش بـه‌ایـن وسـیله از مـدیریت محتـرم سـامانه نمـک‌زدایـی کنگـان بـرای هماهنگی بـرای جمع‌آوری اطلاعـات موردنیاز و کلیه کارکنان آن که به‌نحوی ما را در انجام ایـن پـژوهش یاری رساندند، کمال تشکر و سپاسگزاری را به‌عمل می‌آورند.

[1] Disability-Adjusted Life Years (DALY)
[2] Potentially Disappeared Fraction of species over a certain amount of $m^2$ during a certain amount of year (PDF)

## References


Acelas, N. Y., Flórez, E. & López, D. 2015. Phosphorus recovery through struvite precipitation from wastewater: effect of the competitive ions. *Desalination and Water Treatment*, 54(9)**,** 2468-2479.

Asadpour, G. A. & Mirhosseini, S. M. 2009. Environmental impacts of desalination plants with special view on Qeshm Island. 3rd *Specialized Conference on Environmental Engineering*, Tehran, Iran. (In Persian)

Belkaid, A., Amzert, S. A., Bouaichaoui, Y. & Chibane, H. 2012. Economic study of nuclear seawater desalination for mostaganem site. *Procedia Engineering*, 33**,** 134-145.

Biswas, W. K. 2009. Life cycle assessment of seawater desalinization in Western Australia. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56(3)**,** 369-375.

Boroon, Z. 2015. Environmental assessment of waste management process of petrochemical special economic zone using life cycle assessment approach. MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)

Ebrahimi, A. & Pourghissari, H. 2014. Investigation and evaluation of environmental impacts of seawater desalination. *3rd National Conference on Health, Environment and Sustainable Development*, Bandar Abbas, Iran. (In Persian)

Esfandiarnejad, A., Ardalan, H. & Vafaie, F. 2014. A survey of global experiences on new methods of water extraction in arid and semi-arid coastal areas., 9 September (2014), Shahrekord University. *2nd National Conference on Water Crisis*, Shahrekord, Iran. (In Persian)

Fazeli, M., Sheikhi, F., Abdoli, R. & Zoughipour, R. 2016. *Desalination Concentrate Management*, Rural water and sewage company of Tehran Publisher, Tehran, Iran. (In Persian)

Frank, H., Fussmann, K. E., Rahav, E. & Zeev, E. B. 2019. Chronic effects of brine discharge form large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria. *Water Research*, 151**,** 478-487.

Gabelich, C. J., Rahardianto, A., Northrup, C. R., Yun, T. I. & Cohen, Y. 2011. Process evaluation of intermediate chemical demineralization for water recovery enhancement in production-scale brackish water desalting. *Desalination*, 272(1-3)**,** 36-45.

Ghasemi, A. & Ashrafzadeh, M. H. 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. (In Persian)

GonzáLez-Bravo, R. N., Ponce-Ortega, J. M. & El-Halwagi, M. M. 2017. Optimal design of water desalination systems involving waste heat recovery. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(7)**,** 1834-1847.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B. & Moulin, P. 2009. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9)**,** 2317-2348.

Hancock, N. T., Black, N. D. & Cath, T. Y. 2012. A comparative life cycle assessment of hybrid osmotic dilution desalination and established seawater desalination and wastewater reclamation processes. *Water Research*, 46(4)**,** 1145-1154.

Heijungs, R. & Suh, S. 2013. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment Vol. 11*, Springer Science and Business Media. Dordrecht, Netherlands.

Humbert, S., De Schryver, A., Margni, M. & Jolliet, O. 2012. IMPACT 2002+user guide draft for version Q2.2 (version adapted by Quantis). Quantis, Lausanne, Switzerland.

Ibrahim, Y., Arafata, H. A., Mezher, T. & Marzooqi, F. 2018. An integrated framework for sustainability assessment of seawater desalination. *Desalination*, 447**,** 1-17.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., et al. 2003. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6)**,** 324.

Karvounis, P. 2017. A review of desalination potential in greek islands using renewable energy sources, a life cycle assessment of different units. *European Journal of Sustainable Development*, 6(2)**,** 19-32.

Khani, M. R., Agha Seyed Abolghasem, P. & Ahmadzadeh, S. M. 2012. Using solar distillation for water desalination systems., Khaniran Publisher, Tehran, Iran. (In Persian)

Kim, D., Min, K. J., Yu, M. S., Lee, K., Kweon, J. & Park, K. Y. 2016. Use of concentrate water from seawater desalination plant as magnesium sources for struvite formation by using anaerobically digested effluent of swine wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57(55)**,** 26751-26757.

Kvadsheim, M. H. 2013. Life Cycle Assessment of Desalinated Water for Enhanced Oil Recovery. MSc Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway.

Latteman, S. 2010. Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants, PhD Thesis, Delf University of Technology, Netherlands.

Lupton, R. C. & Allwood, J. M. 2017. Hybrid Sankey diagrams: visual analysis of multidimensional data for understanding resource use. *Resources, Conservation and Recycling*, 124**,** 141-151.

Mahdavi, M., Nasseri, S., Younessian, M., Mahvi, A. H. & Ali Mohammadi, M. 2011. Investigation of indirect freezing process of desalting on saltwater of persian gulf. *Health and Environment*, 4(3)**,** 363-374.

Missimer, T. M. & Maliva, R. G. 2018. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: intakes and outfalls. *Desalination*, 434**,** 198-215.

Mohamed-Zine, M. B., Hamouche, A. & 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.

Nvco 2012. NVCO Projects Report NVCO, Noor Vije, Desalination Plant Operation Management, Tehran, Iran. (In Persian)

Panagopoulos, A., Haralambous, K. J. & Loizidou, M. 2019. Desalination brine disposal methods and treatment technologies-a review. *Science of The Total Environment*, 693**,** 133545.

Peters, G. P. 2007. Efficient algorithms for life cycle assessment, input-output analysis, and Monte-Carlo analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(6)**,** 373.

Raluy, G., Serra, L. & Uche, J. 2006. Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. *Energy*, 31(13)**,** 2361-2372.

Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., et al. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1)**,** 1-10.

Sadeghi, Z. A., Hori, H. & Safi Nataj, M. 2016. Economic comparison of persian gulf water desalination using renewable and fossil energy. *Journal of Environmental Economics and Natural Resources*, 1**,** 143-171.

Salehi, S., Khanjani, M. J. & Barani, G. A. 2015. Economic evaluation of different desalination technologies. *International Conference on Sustainable Development, Strategies and Challenges with a Focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourist*. Tabriz, Iran. (In Persian)

Shemer, H. & Semiat, R. 2017. Sustainable RO desalination–Energy demand and environmental impact. *Desalination*, 424**,** 10-16.

Sohrabipour, J. & Rabiei, R. & Rabiei, A. 2015. Optimal use of desalination wastewater. *1st Regional Maritime Conference Development and Water Resources of the Persian Gulf Coast*. Bandar Abbas, Iran. (In Persian)

Stavropoulos, P., Giannoulis, C., Papacharalampopoulos, A., Foteinopoulos, P. & Chryssolouris, G. 2016. Life cycle analysis: comparison between different methods and optimization challenges. *Procedia CIRP*, 41**,** 626-631.

Stokes, J. & Horvath, A. 2006. Life cycle energy assessment of alternative water supply systems (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(5)**,** 335-343.

Tabesh, M., Masooleh, M. F., Roghani, B. & Motevallian, S. S. 2019. Life-Cycle Assessment (LCA) of wastewater treatment plants: a case study of Tehran. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7)**,** 1155-1169.

World Economic Forum, 2016. The Global Risks Report. Cologny, Geneva, Switzerland.

Yin, H. & Kong, M. 2014. Simultaneous removal of ammonium and phosphate from eutrophic waters using natural calcium-rich attapulgite-based versatile adsorbent. *Desalination*, 351**,** 128-137.

Zhou, J., Chang, V. W. C. & Fane, A. G. 2011. Environmental life cycle assessment of brackish water reverse osmosis desalination for different electricity production models. *Energy and Environmental Science*, 4(6)**,** 2267-2278.

Zhou, J., Chang, V. W. C. & Fane, A. G. 2013. An improved life cycle impact assessment (LCIA) approach for assessing aquatic eco-toxic impact of brine disposal from seawater desalination plants. *Desalination*, 308**,** 233-241.

Zhou, J., Chang, V. W. C. & Fane, A. G. 2014. Life cycle assessment for desalination: a review on methodology feasibility and reliability. *Water Research*, 61**,** 210-223.