



Water-Energy Nexus at Reverse Osmosis Seawater Desalination Technology

S. Mohammadi Jouzdani¹, H. Vagharfard^{2*},
P. Daneshkar Arasteh³, and M.M. Zerfat⁴

Abstract

Generation of electrical energy requires water as well as water conveyance and treatment to energy. For encounter to challenges and uncertainty about the water and energy nexus, requires to understand the nature of this linkage to identify, approve and execute the appropriate policies. The aim of this study is the evaluation of water and energy nexus at freshwater production by SWRO desalination. For this purpose, assuming that the electric power supplier for the desalination plant is a thermal power plant with a cooling tower or once-through-cooled, the specific water withdrawal in a thermal wet tower- and once-through-cooled plants using S-GEM model and specific energy consumption in RO plants using solution-diffusion model was calculated. The results indicate in the production energy sector, the practical power effect on fuel consumption and consequently water withdrawal. Also, in the desalination plant, the physio-chemical parameter, and temperature of feed water, and ERD type effect on specific energy consumption. Finally, the indirect volume of water withdrawal, fuel and thermal energy consumption to produce a cubic meter of desalting water was obtained which could be used by effective institutions to better manage the supply and demand of water and energy.

Keywords: Desalination, SWRO, Water, Energy, Power Plant, Nexus.

Received: March 12, 2019

Accepted: September 21, 2019

همبست آب و انرژی در نمک‌زدایی آب دریا با فناوری اسمز معکوس

سمیه محمدی جوزدانی^۱، حسن وقار فرد^{۲*}،
پیمان دانش کار آراسته^۳ و محمدمهدی ظرافت^۴

چکیده

همان‌گونه که تولید انرژی الکتریکی نیاز به آب دارد، انتقال و تصفیه آب نیاز به انرژی دارد. برای رویارویی با چالش‌ها و عدم قطعیت برخوردار از همبست آب و انرژی، نیاز به درک طبیعت این ارتباط است تا سیاست‌های صحیح شناسایی، تصویب و اجرا گردد. هدف از این مطالعه، ارزیابی همبست آب و انرژی در حوزه استحصال آب شیرین از طریق نمک‌زدایی SWRO می‌باشد. بدین منظور، با فرض این‌که بخش تأمین‌کننده انرژی الکتریکی، نیروگاه‌های حرارتی با سیستم برج خنک‌کننده تر یا یک‌بارگذر باشد، شاخص برداشت آب در این نیروگاه‌ها با استفاده از مدل S-GEM و نیز مصرف ویژه انرژی در واحد صنعتی RO با استفاده از مدل انتشار- نفوذ محاسبه گردید. نتایج نشان داد در بخش تولید انرژی، قدرت عملی نیروگاه‌ها بر مصرف سوخت و به دنبال آن، برداشت ویژه آب تأثیر دارد. همچنین، در واحد نمک‌زدایی علاوه بر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی آب تغذیه، دمای آن و نوع ERD بر مصرف انرژی مخصوص مؤثر است. در نهایت حجم برداشت غیرمستقیم آب، مصرف سوخت و انرژی حرارتی برای تولید یک مترمکعب آب نمک‌زدایی بدست آمد که می‌تواند برای مدیریت بهتر عرضه و تقاضای منابع آب و انرژی، مورد استفاده نهادهای تأثیرگذار قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، SWRO، آب، انرژی، نیروگاه، همبست.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۳۰

1- Ph.D. Student in Watershed Management, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University.

2- Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University. Email: hvaghar52@yahoo.com

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University. Email: arasteh@eng.ikiu.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Nano Chemical Engineering, Faculty of Engineering at the University of Shiraz. Email: mmzerfat@shirazu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۴- استادیار گروه نانو مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز.

*- نویسنده مسئول

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

است. بنابراین، مهم خواهد بود که در برنامه‌ریزی‌ها، سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های کلان که بر پایه تحقیقات می‌باشد، به هر دو جنبه ارتباط آب و انرژی دقت شود.

تولید آب شیرین با هدف کاربرد در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت از طریق نمک‌زدایی آب شور دریا و یا آب‌های لب‌شور چندساله است به یکی از منابع آب در برخی کشورها و از جمله ایران تبدیل شده است. نوار ساحلی جنوب کشور به لحاظ نزدیکی به دریاهای آزاد و در دسترس بودن آب شور دریا مورد توجه بسیاری از سیاست‌گذاران بخش آب قرار گرفته است. بنابر آمار و اطلاعات سازمان برنامه و بودجه، میزان آب استحصال از آب‌شیرین‌کن‌ها در استان هرمزگان در حال افزایش است. همچنین، بر اساس برنامه ششم توسعه مصوب اسفندماه سال ۱۳۹۵، دولت مکلف است حداقل ۳۰ درصد آب آشامیدنی مناطق جنوبی کشور را از طریق شیرین کردن آب دریا تا پایان اجرای قانون برنامه تأمین نماید. تأسیسات نمک‌زدایی در بسیاری موارد بدون در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی، و اجتماعی به سرعت در این منطقه جایابی و ساخته شده و بر وضعیت تأمین آب منطقه تأثیر می‌گذارد. هزینه عمده در واحد صنعتی نمک‌زدایی چه در مرحله تولید آب شیرین و در مرحله چاره‌جویی برای شوراب حاصل شده مربوط به مصرف انرژی است. این انرژی به صورت الکتریکی و ترموالکتریکی از نیروگاه‌ها قابل تأمین است. در جدول ۱ فناوری‌های عمده نمک‌زدایی در جهان همراه با درصد ظرفیت بهره‌برداری، دامنه کاربرد بر اساس غلظت آب ورودی و انرژی مصرفی برای تولید یک مترمکعب آب شیرین بر اساس منابع مطالعه شده، ارائه شده است.

در حالی که فرآیندهای تقطیری در حدود سال‌های ۱۹۹۷ فرآیند غالب نمک‌زدایی بود، در حال حاضر نمک‌زدایی با روش RO به خاطر کارآمدی بالاتر انرژی، در ظرفیت‌های نصب شده، رشد ۶۵٪ داشته است (Ludwing, 2010). در روش RO هزینه عمده نمک‌زدایی (در حدود ۶۹٪ هزینه کل) مربوط به مصرف انرژی است. همچنین انرژی در بخش‌های تأمین آب خوراک (۴/۵٪)، پیش‌تصفیه (۲/۶٪)، پس‌تصفیه (۱/۸٪)، انتقال آب تصفیه شده (۶/۷٪) و به طور عمده در پمپ‌های فشار قوی (۸۴/۴٪) استفاده می‌شود (Gude, 2012).

آب و انرژی از حضور در محیط زیست طبیعی تا مصرف نهایی با یکدیگر ارتباط دارند. این ارتباط به دو شکل: (۱) مستقیم و (۲) غیرمستقیم می‌باشد. ارتباط مستقیم مصرف مستقیم آب یا انرژی در تولید آب یا انرژی است. اما ارتباط غیر مستقیم دربردارنده مصرف غیر مستقیم آب یا انرژی برای فراهم آوردن مواد و خدمات طی بهره‌برداری و نگهداری سیستم‌های آبی یا تولید انرژی است. (Marsh, 2008). ارتباط مستقیم آب و انرژی را در سه بخش تولید بالادستی (دریافت آب و انرژی از طبیعت)، بخش انتقالی و توزیع (پایین‌دستی) توصیف می‌کند: در بخش اول، ارتباط آب و انرژی در تأمین انرژی، تأمین آب به طور عمده و نمک‌زدایی منابع آب شور و غیره دیده می‌شود. در بخش دوم یا بخش انتقالی این ارتباط در انتقال و توزیع انرژی، انتقال و توزیع آب، جمع‌آوری پساب و غیره است. در بخش سوم یا بخش نزدیک‌تر به مصرف‌کننده نهایی، می‌توان این ارتباط را در تأمین آب و انرژی برای خرده‌مصرف‌کنندگان، تصفیه فاضلاب، پساب و غیره دید. به غیر از ارتباطی که در هر بخش بین آب و انرژی وجود دارد، بین دو کلاس یا دو بخش نیز ممکن است این ارتباط به وجود آید، به عنوان مثال، آب بازچرخانده شده در بخش مصرف، به منظور سرد کننده در نیروگاه تولید انرژی که در بالادست قرار دارد استفاده شود. ارتباط درونی و ذاتی بین دو بخش، همبست نامیده می‌شود.

با وجود ارتباط بسیار بین بخش آب و انرژی، این دو بخش به صورت جداگانه قانون‌بندی و مدیریت می‌شوند. در بیشتر مواقع حکومت‌ها و شرکت‌های خصوصی برای تأمین آب در آینده، با فرض این‌که انرژی اجرای کار موجود باشد، و یا در بخش تولید انرژی، با فرض موجود بودن آبی که هر لحظه مقدار آن متغیر است، برنامه‌ریزی می‌کنند، غافل از این‌که این دو بخش اثر شدیدی بر یکدیگر دارند و در بعضی مناطق فشار بر روی یک بخش، سبب فشار بر بخش دیگر خواهد شد. آسیب‌پذیری ارتباط آب و انرژی در ترکیب با رشد جمعیت، که سبب افزایش تقاضا برای آب و انرژی می‌شود (به ویژه در کشورهای در حال توسعه) و تغییر اقلیم که سبب دوره‌های طولانی‌مدت خشک‌سالی و وخیم‌تر شدن مسأله کمبود آب می‌شود، اهمیت بیشتری پیدا کرده

Table 1- Some properties of main desalination technology at global level

جدول ۱- برخی خصوصیات عمده‌ترین فناوری‌های نمک‌زدایی در سطح جهان

Technology	The percent capacity at global level*	Concentration range (mg/L)	Specific energy (kWh/m ³)
Reverse Osmosis (RO)	69	50-50,000	2-5
Multi Stage Flash (MSF)	18	20,000-100,000	5-6
Multi-Effect Distillation (MED)	7	20,000-100,000	3-4
Source	Jones et al. (2019)	Clayton (2015)	Ghalavand et al. (2014)

پرداختند. Lianying et al. (2013). با در نظر گرفتن تقاضا برای آب و انرژی، مدلی ریاضی از سیستم تولید همزمان با هدف به حداقل رساندن کل هزینه سالیانه، که شامل نیروگاه، فلش چند مرحله‌ای و اسمز معکوس است، پیشنهاد دادند. Perron and Hornberger (2014)، سه رابطه تولید نیروی ترموالکتریک و کشاورزی، تولید نیروی هیدروالکتریک و کشاورزی، و تولید سوخت‌های زیستی و تولید غذا را بررسی کردند. Rasul (2015). با توجه به تقاضای بالا و در حال رشد آب، انرژی و غذا در آفریقای جنوبی، چهارچوبی برای همکاری‌های بین‌بخشی و مدیریت چالش‌های همبست ارائه دادند. Healy (2015). در گزارش خود به مرور پیچیدگی‌های ارتباط آب و انرژی پرداختند. Mekonnen et al. (2015). در پژوهش خود با استفاده از داده‌های موجود، ردیابی آب در تولید انرژی الکتریکی در سطح جهانی را ارزیابی نمودند. Kichonge (2018) به بررسی منابع آبی کشور تانزانیا و پتانسیل تولید انرژی الکتریکی با استفاده از آن‌ها به منظور توسعه پایدارتر در حال و آینده پرداخته است. در بررسی بحران آب در ایران نیز Sharabiani et al. (2018) بر شناسایی شاخص‌های انسجام سیاسی جهت مقابله با مشکل آب در ایران و روابط آن‌ها پرداخته‌اند.

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان داد در بررسی همبست آب و انرژی، به مطالعه داده‌های ثبت شده و یا محاسبه مقدار مصرف یا استفاده از آب در بخش تولید انرژی یا بررسی مصرف انرژی در بخش استحصال آب، پرداخته شده است. برای نویسندگان این پژوهش این سؤال پیش آمد که برای استحصال واحد حجم آب نمک‌زدایی شده، چه حجم آب مصرف خواهد شد. بنابراین نوآوری این مطالعه، تعیین حجم برداشت آب (در بخش تولید انرژی) در ازای حجم آب شیرین‌شده (در بخش نمک‌زدایی) است. پیوند بین این دو بخش را میزان مصرف انرژی (در بخش نمک‌زدایی) و به تبع آن حجم سوخت و میزان انرژی حاصل از احتراق آن (در بخش تولید انرژی) برقرار می‌کند. بدین منظور شاخص برداشت ویژه آب در تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های حرارتی با سردکننده‌های برج خنک‌کننده‌تر و یک‌بارگذر (به عنوان مصرف‌کننده‌های آب و سوخت فسیلی و تولید کننده عمده انرژی) و شاخص مصرف ویژه انرژی در واحدهای صنعتی نمک‌زدایی RO (به عنوان بخش استحصال آب)، همچنین حجم ویژه مصرف سوخت‌های فسیلی و انرژی حرارتی، در نیروگاه‌های حرارتی مورد بررسی، محاسبه و ارائه می‌گردید تا با فرض این‌که تنها راه تأمین انرژی واحد نمک‌زدایی SWRO، نیروگاه‌های حرارتی با سردکننده برج خنک‌کننده تر و یا یک بارگذر باشد، مقدار غیرمستقیم آب، سوخت و انرژی حرارتی

همچنین، اولویت منابع انرژی در تولید انرژی الکتریکی در ایران به ترتیب سوخت‌های فسیلی، انرژی آب، اتمی، دیزلی، بادی و غیره است. با توجه به گزارش تفصیلی شرکت توانیر، نیروگاه‌های حرارتی، برقی و اتمی بوشهر نقش عمده در تأمین انرژی الکتریکی در ایران را ایفا می‌کنند. طبق این آمار، نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با ۳۵/۹، بخاری با ۲۹/۴، گازی با ۲۶/۳، برقی با ۵/۶ و اتمی بوشهر با ۲/۳ درصد در تولید انرژی الکتریکی کشور سهم دارند.

تحلیل‌ها و پژوهش‌های متعددی برای فهم بهتر همبست آب و انرژی انجام شده است. در بررسی و یا تعیین برداشت یا مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی، Torcellini et al. (2003)، مقدار برداشت آب شیرین برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه‌های حرارتی با برج تر و نیروگاه‌های آبی را با یکدیگر مقایسه نمودند، Rutberg (2012). در رساله خود مدل ساده‌ای برای تعیین مقدار استفاده و مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی با انواع سردکننده‌ها ارائه و راست‌آزمایی نمود، Diehl et al. (2014). از مدل‌های موازنه آب و حرارت در محدوده قابل قبول ترمودینامیکی برای تخمین برداشت و مصرف آب استفاده کردند. Ansorge and Zeman (2016) در پژوهش خود برای تعیین مقدار آب مورد نیاز در نیروگاه‌های حرارتی از مدل‌سازی اقتصادسنجی تحت تأثیر عوامل طبیعی، اجرایی و اقتصادی- اجتماعی استفاده کردند.

در زمینه انرژی مصرفی در بخش نمک‌زدایی، Ludwig (2010)، روش‌های بهینه‌سازی طراحی و اجرای واحدهای نمک‌زدایی SWRO با رویکرد کاهش انرژی مصرفی را بررسی نمودند. Mazlan et al. (2016)، با استفاده از مدل‌سازی، مصرف انرژی ویژه در دو روش نمک‌زدایی RO و FO، را مقایسه کردند. Voutchkov (2017) نیز ضمن مرور وضعیت فعلی مصرف انرژی در نمک‌زدایی، حداقل مصرف انرژی برای تولید آب شیرین و عوامل کلیدی مؤثر بر مصرف انرژی در نمک‌زدایی برای یک سایت معین SWRO را مورد بحث قرار داده است. در تحلیل همبست آب و انرژی و کاربرد آن، Leese et al. (2010)، استفاده از رویکرد همبست را به عنوان وسیله‌ای برای پیوند بین توسعه پایدار و امنیت مورد بحث قرار دادند. Liang and Zhang (2011)، بر اساس میزان برهمکنش توسعه فناوری‌های انرژی و استحصال انرژی‌های جدید با توسعه فناوری در بخش آب، اقتصاد کشور چین را به چهار بخش تقسیم و بررسی نمودند. Stillwell et al. (2011)، به بررسی کیفی ارتباط آب و انرژی به ویژه در بخش تولید الکتریسیته و منابع آب از دیدگاه سیاسی و اجتماعی پرداخته‌اند. Martin (2012)، در پایان‌نامه خود به بررسی ردیابی آب در تولید انرژی الکتریکی

$$I_{ww} = 3600 \frac{(1-\eta_{net}-k_{os})(1-k_{sens})}{\eta_{net} \rho_{wh} h_{fg}} \left(1 + \frac{1}{n_{cc} - 1}\right) + I_{proc} \quad (1)$$

که در آن I_{ww} شدت برداشت آب (L/MWh)، η_{net} بازده واحد نیروگاهی، k_{os} پارامتر بدون بعد که درصدی از حرارت تولیدی از احتراق سوخت است که از دیگر خروجی‌ها به خارج از محیط منتشر می‌شود که در مورد نیروگاه با برج تر و سوخت گاز طبیعی یا نفت کوره معمولاً ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود (Rutberg, 2012)، n_{cc} تعداد چرخه‌های تغلیظ‌سازی، هر چه جریان ورودی خالص‌تر باشد، تعداد بیشتر چرخه‌های تغلیظ می‌تواند ناخالصی‌های معدنی آب سردکننده را تا رسیدن به سطح غیرقابل قبول تاب بیاورد؛ مقادیر معمول برای n_{cc} در ایالات متحده آمریکا بین ۲ تا ۱۰ می‌باشد (Rutberg, 2012)، I_{proc} مقدار آب مورد نیاز برای فرآیندهای غیرخنک‌کنندگی در نیروگاه است که مقدار آن برای هر نیروگاه بر اساس فن‌آوری تولید و نوع سوخت متفاوت است، در این‌جا این مقدار ۱۰ L/MWh در نظر گرفته می‌شود (Rutberg, 2012)، ρ_w چگالی آب (۰/۹۹۸ kg/L) است. همچنین k_{sens} بخشی از بار حرارتی دفع شده از طریق انتقال گرمای محسوس است که از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$Y = (-0.000279 \times x^3) + (0.00109 \times x^2) - (0.345 \times x) + 26.7 \quad (2)$$

که در آن x میانگین دمای نرمال سالیانه و y مقدار k_{sens} است.

در این پژوهش به منظور تعیین شاخص ویژه برداشت آب در نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر از داده‌های شرکت برق حرارتی کشور و توانیر استفاده گردید. از بین نیروگاه‌های حرارتی، ۱۲ نیروگاه با ۳۸ واحد بر اساس اطلاعات در دسترس انتخاب گردید (جدول ۲).

ابتدا مقدار دمای سالیانه از میانگین دمای ماهانه بلند مدت ۲۶ ایستگاه سینوپتیک مجاور به نیروگاه‌های مورد مطالعه بدست آمد. برای مناطقی که در محدوده ایستگاه سینوپتیک قرار نداشتند با استفاده از روش معکوس فاصله، مقدار دما محاسبه شد. سپس از طریق معادله (۲)، مقدار k_{sens} برای نیروگاه‌های مورد مطالعه بدست آمد. با مشخص شدن پارامترهای لازم، شاخص برداشت ویژه آب به منظور سرمایش در نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر، برای n_{cc} از ۲ تا ۱۰، محاسبه شد. با در نظر گرفتن حداکثر TDS مجاز برای آب ورودی به عنوان آب سردکننده به نیروگاه که برابر با ۱۸۵۰ ppm است (Guideline WG-2, 2009)، حداکثر مقدار TDS مجاز به ازای هر n_{cc} بدست آمد.

لازم برای استحصال یک واحد حجم آب شیرین از طریق نمک‌زدایی آب شور دریا بدست آید.

۲- روش انجام کار

۱-۲- تخمین برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های حرارتی

دیاگرام سانکی در شکل ۱ جریان انرژی در یک نیروگاه ترموالکتریک را نشان می‌دهد:

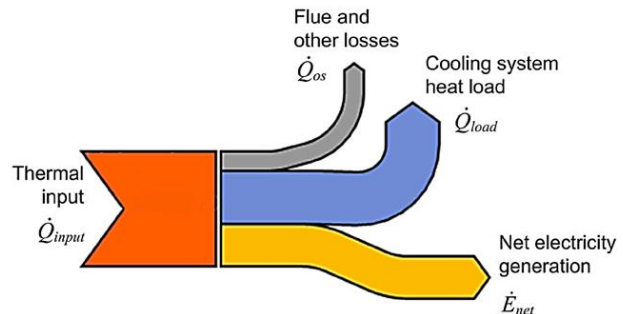


Fig. 1- Energy flow through a generic thermal power plant (Rutberg, 2012)

شکل ۱- جریان حرارت در یک نیروگاه حرارتی معمولی (Rutberg, 2012)

در شکل ۱، مقدار انرژی حرارتی تولید شده از احتراق سوخت، Q_{input} ، مقدار انرژی الکتریکی خالص تولید شده، Q_{load} ، بار حرارتی دفع شده از طریق سیستم سردکننده و Q_{os} ، بار حرارتی خروجی از طریق دیگر خروجی‌ها غیر از سیستم سردکننده در یک نیروگاه حرارتی خارج هستند.

۲-۲- مدل کلی در سطح سیستمی (S-GEM)

در رساله (Rutberg, 2012) مدل S-GEM^۲ برای تعیین مصرف یا برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم سردکننده معرفی گردید. در این پژوهش از این مدل برای تخمین برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم خنک‌کننده تر و یک‌بار گذر، استفاده می‌شود.

۳-۲- تخمین مقدار برداشت ویژه آب برای نیروگاه‌های با برج خنک‌کننده تر

مکانیزم اصلی مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی با برج تر، تبخیر آن از برج خنک‌کننده است. مدل S-GEM برای تخمین شدت آب برداشت شده به منظور سردکنندگی در این نیروگاه‌های حرارتی به صورت زیر است:

Table 2- The understudied wet tower-cooled plants
جدول ۲- نیروگاه‌های حرارتی با سیستم برج خنک‌کننده تر مورد مطالعه

Power plant	Number of units	Practical power (MW)
Ramin (Ahvaz)	6	1823
Shahid Mofateh Hamedan	4	1000
Esfahan (Eslam Abad)	5	830
Bokhari Tabriz	2	650
Bistoon	2	640
Montazerolghaem	4	548
Zarghan (Shahid Modhej)	1	255
Shahid Beheshti (Loshan)	2	240
Besat	3	216
Mashhad	3	133
Zarand	2	46.75
Shahid Firoozi (Tarasht)	4	40

با استفاده از اطلاعات تأمین شده از شرکت مادر تخصصی تولید برق حرارتی و شرکت توانیر، برداشت ویژه آب برای تولید یک واحد الکتریسیته محاسبه شد. نیروگاه‌های حرارتی با سردکننده یک‌بارگذر انتخاب شده در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۵- محاسبه حجم سوخت مصرفی برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های حرارتی

نیروگاه‌های مورد بررسی برای تأمین انرژی حرارتی لازم به منظور تیخیر آب از سوخت‌های فسیلی نفت کوره، گاز و گازوئیل با درصدهای متفاوت بهره می‌برند. به منظور تعیین حجم سوخت مصرفی برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی از اطلاعات جدول ۴ استفاده شد.

۲-۴- تخمین مقدار برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های با سیستم سردکننده یک بارگذر

مدل S-GEM برای سردکننده یک‌بارگذر با درک این که سرعت جریان آب سردکننده یک بارگذر از طریق مبرد چقدر است، توسعه و به صورت زیر توسط Rutberg (2012) ارائه گردید:

$$I_{wo} = 3600 \frac{(1-\eta_{net}-k_{os})}{\eta_{net}} \frac{1}{\rho_w c_{p,w} \Delta T_{cond}} + I_{proc} \quad (3)$$

که در آن، I_{wo} شدت برداشت آب به ازای استحصال یک مگاوات ساعت انرژی الکتریکی است. مقدار k_{os} همچون سیستم سردکننده با برج خنک‌کننده تر مساوی ۰/۱ در نظر گرفته شد. ρ_w و $c_{p,w}$ به ترتیب چگالی و گرمای ویژه آب هستند که به ترتیب مساوی ۰/۹۹۸ kg/L و ۰/۰۴۱۸۴ (MJ/kg-K) قرار داده شد. ΔT_{cond} تفاوت دمای آب ورودی و خروجی از سردکننده هست که بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتیگراد (۲۸۱/۱۵ و ۲۸۳/۱۵ درجه کلونین) است (Abbaspoor, 2013) که در نتایج از میانگین آن استفاده شد.

Table 3- The understudied thermal power plants with once-through cooling
جدول ۳- نیروگاه‌های با سردکننده یک بارگذر مورد مطالعه

Power plant	Unit number	Practical power (MW)	Net production (MW/year)	Efficiency
Shahid salimi	1	122	548859	0.33
Combined cycle	2	122	553185	0.31
	1	320	1379910	0.35
Bandar abbas	2	320	1891572.5	0.36
	3	320	1513313.3	0.32
	4	320	1684022.5	0.33
	1	423.75	1985093	0.37
Shahid salimi (Neka)	2	423.75	2093820	0.38
	3	423.75	2211923	0.37
	4	423.75	2576528	0.37

Table 4- The characteristics of used fuels in studied power plants
جدول ۴- خصوصیات سوخت‌های مورد استفاده در نیروگاه‌های مورد مطالعه

Fuel	HHV MJ/kg	Density (kg/m ³)	Source
Fuel oil	43.3	968	Mekkonen et al. (2015)
Gasoil	45.5	0.847	GREET 1.8 (USA)
Natural gas	43.9	0.777	NIGC Standardization (2014)

۲-۶- محاسبه مقدار مصرف انرژی ویژه در واحد نمک‌زدایی با فن‌آوری RO

یک واحد نمک‌زایی (RO شامل: ۱) آبگیر آب خوراک، (۲) پیش تصفیه، (۳) پمپ‌های فشار قوی (همراه یا بدون تجهیزات بازیابی)، (۴) غشاهای و ماژول‌ها، (۵) پس تصفیه و (۶) انتقال محصول است. بنابراین، انرژی مورد نیاز برای کل فرآیند RO را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$E_T = E_{in} + E_{pt} + E_{hp} + E_A - E_{ERD} \quad (6)$$

که در آن E_T ، کل انرژی مصرفی، E_{in} ، انرژی مورد نیاز برای دریافت آب تغذیه، E_{pt} ، انرژی مورد نیاز برای پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه (میکروفیلتراسیون و پمپاژ)، E_{hp} ، انرژی لازم برای پمپ‌های فشار قوی، E_A ، انرژی لازم برای اقدامات جانبی (مواد شیمیایی، شست‌وشوی فیلترها/ تمیز کردن و پمپاژ آب) و، E_{ERD} ، انرژی بازیابی شده توسط ERD^A هستند (Gude, 2011). عمده مصرف انرژی توسط پمپ‌های فشار قوی برای تأمین انرژی لازم برای غلبه بر فشار اسمزی آب خوراک (آب ورودی به سیستم) و عبور آب از غشای تصفیه صورت می‌گیرد. در این بخش مقدار انرژی مخصوص مرتبط با انتقال آب از غشاهای در نظر گرفتن پیش‌تصفیه مرتبط با نوع آب خوراک بررسی خواهد شد.

معادله انتقال انتشار- نفوذ برای اسمز معکوس را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$N_{Aw} = L(\Delta p - \Delta \pi) \quad (7)$$

که در آن N_{Aw} شار آب از غشا، Δp اختلاف فشار دو سمت غشا، $\Delta \pi$ اختلاف فشار اسمزی بین جریان ورودی و خروجی و L عدد ثابتی که ویژگی‌های شیمیایی خود غشا را توصیف می‌کند. همچنین، در اسمز معکوس شار نمک، تابع غلظت نمک است:

$$N_s = B(C_{feed} - C_{permeat}) \quad (8)$$

که در آن N_s شار نمک از طریق غشا، B عدد ثابت قابلیت نفوذ نمک است که توصیف کننده ویژگی‌های فیزیکی غشا است، C_{feed} غلظت نمک در محلول خوراک و $C_{permeat}$ غلظت نمک در محلول نفوذ یافته هستند (Baker, 2004). با در نظر گرفتن سایر پارامترهای مؤثر در شار نمک و آب از غشا، دفع نمک بر اساس مدل انتشار- نفوذ، R ، طبق معادله زیر تعریف شده است (Riley et al., 1967):

بدین ترتیب که با استفاده از چگالی سوخت‌های مصرفی، جرم آن‌ها محاسبه و با استفاده از حداکثر ارزش حرارتی^۷ هر نوع سوخت، ارزش حرارتی تولیدی از احتراق آن، بدست آمد. مجموع ارزش حرارتی سوخت‌های مصرفی در هر واحد برابر با کل ارزش حرارتی تولیدی در آن سال است. با تقسیم مقدار انرژی حرارتی هر نوع سوخت بر تولید خالص نیروگاه، نرخ حرارتی حاصل از هر نوع سوخت و مجموع آن، نرخ حرارتی کل واحد نیروگاهی را بدست می‌دهد. سپس سهم هر نوع سوخت در تولید انرژی الکتریکی کل بدست آمد.

با فرض این‌که هر نوع از سوخت‌های مصرفی تنها تأمین کننده انرژی حرارتی واحد تولیدی باشد، با استفاده از رابطه زیر حجم لازم از سوخت مصرفی برای تأمین ارزش حرارتی کل محاسبه گردید:

$$HHV_f / \text{مجموع ارزش حرارتی کل} = \text{حجم لازم از سوخت} \quad (4)$$

که در آن HHV_f حداکثر ارزش حرارتی یک واحد حجم از سوخت مصرفی می‌باشد. سپس با استفاده از رابطه ۵ حجم سوخت مصرفی لازم برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی در واحد تولیدی محاسبه گردید:

$$V_t = (p_{oil} \times v_{oil}) + (p_{gas} \times v_{gas}) + (p_{gasoil} \times v_{gasoil}) \quad (5)$$

که در آن: V_t ، حجم کل سوخت مصرفی برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی یا مصرف ویژه سوخت (I_{fc}) ، p_{oil} ، سهم نفت کوره در تولید کل انرژی حرارتی واحد نیروگاهی (%)، v_{oil} ، حجم نفت کوره برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی (m^3/MWh)، p_{gas} سهم گاز طبیعی در تولید کل انرژی حرارتی واحد نیروگاهی (%)، v_{gas} ، حجم گاز طبیعی مورد نیاز برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی (m^3/MWh)، p_{gasoil} ، سهم گازوئیل در تولید کل انرژی حرارتی واحد نیروگاهی (%)، v_{gasoil} ، حجم گازوئیل مورد نیاز برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی (m^3/MWh)، می‌باشند. نتایج برای نیروگاه‌های حرارتی با سیستم خنک کننده برج تر و یک بارگذر بدست آمد.

طراحی نیز از این عناصر بهره گرفته شد. مجراهای تحت فشار برای عناصر غشایی در اندازه‌های مختلف وجود دارد که با توجه به سفارش (DeMichele, 2014) برای سیستم‌های مختلف و نیز با استفاده از مدل، مجرای با شعاع ۸ اینچ انتخاب گردید.

دو راه برای کاهش انرژی مصرفی در فن‌آوری RO وجود دارد: (۱) بالا بردن قدرت نفوذ غشاها، (۲) استفاده از ERD ها. در میحث عبور آب از غشا، طبق معادلات انتشار- نفوذ، قابلیت نفوذ غشا، دمای آب و اختلاف چگالی یا املاح دو سوی غشا از عوامل مؤثر در انتقال آب از غشاها هستند. دستگاه‌های ERD که برای بازیابی انرژی و کار در طراحی این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند: (۱) نوع توربینی (گریز از مرکز) و (۲) نوع جابه‌جایی مثبت هستند که شامل مبدل کار و مبدل فشار می‌باشد. در این پژوهش در میحث غشاها عامل دما و در میحث پیکره‌بندی سیستم استفاده یا عدم استفاده و نوع ERD ها مورد بررسی قرار گرفت و در کل سیستم تغییر ظرفیت بر میزان مصرف انرژی مخصوص که بر پیکره‌بندی سیستم مؤثر است، بررسی شد.

۲-۸- تغییر ظرفیت

در این حال مقدار مصرف انرژی مخصوص و هزینه مخصوص در حالت اول مدل بدون استفاده از ERD برای ظرفیت‌های ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب در روز با استفاده از اطلاعات فیزیکی شیمیایی آب خام دریافتی، اجرا و مصرف انرژی مخصوص و هزینه تولید محاسبه گردید. هزینه تولید در اینجا مربوط به هزینه انرژی، مواد شیمیایی، جایگزینی غشاها و نگهداری است.

۲-۹- اثر دمای آب تغذیه

بازیابی آب در فرآیند RO با افزایش دمای آب تغذیه بهبود می‌یابد (DeMichele, 2014). ارتباط بین نرخ شار نفوذ یافته و دمای آب تغذیه در معادله (۱۰) نشان داده شده است. تحمل دمای غشاهای RO در گستره ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد است. به صورت تئوری، سرعت شار تغذیه هنگامی که دمای تغذیه از ۲۵ درجه سانتیگراد به ۳۵ درجه سانتیگراد می‌رسد، تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد (Gude, 2011):

$$Q = Q_0 * 1.03^{(T_f - 25)} \quad (10)$$

برای نشان دادن اثر دما آنالیز حساسیت نسبت به تغییر دما از ۲۰ تا ۳۴ درجه با فواصل دو واحد تغییر دما و از ۳۴ تا ۳۵ با یک واحد تغییر دما اجرا و در هر اجرا مقدار حداکثر شار جریان نفوذی و مقدار مصرف انرژی مخصوص مورد نیاز برای یک ظرفیت معین، محاسبه گردید.

$$R = \left(\frac{\frac{L}{B}(\Delta p - \Delta \pi)}{1 + \frac{L}{B}(\Delta p - \Delta \pi)} \right) \times 100\% \quad (9)$$

رابطه ۹، دفع نمک را به خصوصیات فیزیکی غشا (که بر L و B مؤثر است)، اختلاف فشار عبوری کاربردی و اختلاف فشار اسمزی بین مایع ورودی و نفوذیافته، مرتبط می‌سازد. این معادله این امکان را فراهم می‌آورد که دفع نمک از غشا بر اساس شرایط آزمایشگاهی و ویژگی‌های غشا پیش‌بینی گردد.

در این پژوهش از نرم‌افزار IMSDesign طراحی شرکت Hydranautics برای طراحی سیستم‌های RO بر اساس مدل انتشار- نفوذ، استفاده گردید. در این مدل دفع نمک به خصوصیات فیزیکی غشا، اختلاف فشار عبوری کاربردی و اختلاف فشار اسمزی بین مایع ورودی و نفوذیافته مرتبط است. اطلاعات آب خام ورودی شامل، نوع آب (آب زیرزمینی، سطحی، دریا، پساب)، pH، دما، گل‌آلودگی و شیمی آب (همچون غلظت مواد معدنی به خصوص، هدایت الکتریکی و / یا غلظت کل مواد محلول) است. داده‌ها از سایت نمک‌زدایی بندرعباس و شرکت آب و فاضلاب استان هرمزگان تأمین گشت. اطلاعات مقیاس شامل دما، بازیابی طراحی، مواد شیمیایی و مقدار مورد نیاز آن‌ها برای تنظیم pH، است. دمای آب خوراک یا آب ورودی به سیستم ۲۰/۵ درجه سانتیگراد طبق داده‌های تأمین شده است.

میزان بازیابی برای انواع مختلف آب بر اساس میزان مواد محلول متفاوت می‌باشد. از آنجایی که آب تغذیه مورد بررسی آب دریا می‌باشد، سطح بازیابی ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود (DeMichele, 2014). طبق دستورالعمل AWWA، برای این سطح بازیابی، یک مرحله عبور از غشا کافی است. نوع و مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای تنظیم pH پس و پیش از تصفیه، طبق پیش‌فرض مدل قرار داده شد.

۲-۷- پیکره‌بندی مدل

از آنجایی که مقدار TDS آب خام ورودی ۳۹۱۴۲ mg/L است و سطح بازیابی ۵۰ درصد در نظر گرفته شد، محدودیت بازچرخانی شوراب خروجی وجود خواهد داشت. بنابراین بازچرخانی شوراب در این مورد نخواهیم داشت. حداکثر شار در این حالت، ۱۳/۵ L/m²h است که رعایت گردید. دبی جریان خوراک بر اساس بازیابی برابر با ۵۰٪، مساوی با دو برابر جریان آب نفوذیافته خواهد بود. انتخاب عناصر غشایی^۹ بر اساس نوع آب ورودی مورد بررسی و سرعت شار عبوری، انجام شد و طبق آیین‌نامه AWWA در هر مجرای تحت فشار ۱۰ تعداد عناصر غشایی برابر با ۶ انتخاب و سن غشا یک روز، تعیین گردید. عناصر غشایی ماریچی شکل نسبت به دیگر عناصر غشایی RO انرژی مخصوص کمتری را مصرف می‌کنند (Gude, 2011). در این

۱۰-۲- تعیین اثر ERD

با در نظر گرفتن شرایط ثابت فیزیکوشیمیایی آب و همچنین پارامترهای تعیین شده بر اساس دستورالعمل AWWA، سناریوهای زیر برای تعیین اثر ERD بر کاهش مصرف انرژی مخصوص برای ظرفیت ۱۰۰,۰۰۰ مترمکعب در روز، انجام و نتایج ثبت گردید:

۱- اجرای مدل طراحی بدون استفاده از ERD، (Test0)
 ۲- اجرای مدل طراحی با استفاده از ERD، الف) استفاده از Pressure Work Exchanger، (Test1)، و ب) استفاده از Turbo، (Test2)

۳- نتایج و بحث

هدف از این پژوهش تعیین ارزش یک مترمکعب آب استحصال یافته از طریق روش نمکزدایی SWRO، بر اساس درک مفهوم همبست آب و انرژی با محاسبه حجم آب برداشت شده به عنوان سردکننده در نیروگاه تأمین کننده انرژی و به تبع آن میزان سوخت و انرژی حرارتی حاصل از آن در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم سردکننده برج تر و یک بارگذر است. نتایج حاصل از محاسبه برداشت ویژه آب و مصرف ویژه سوخت و انرژی در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم سردکننده برج تر و یک بارگذر در ادامه ارائه شده است.

۱-۳- نیروگاه حرارتی با برج خنک کننده تر

شدت برداشت آب برای تولید یک واحد الکتریسیته برای واحدهای هر نیروگاه به ازای ncc از ۲ الی ۱۰ محاسبه گردید. با هدف ncc مناسب بر اساس کاهش ذخیره‌سازی آب با افزایش دوره‌های چرخش، نسبت تغییرات مقدار ذخیره آب به ازای افزایش دوره‌های تغلیظ محاسبه گردید. بدین منظور: تغییر در برداشت آب به ازای تغییر در تعداد

گردش‌های متوالی (ΔI) و اختلاف برداشت به ازای کمترین چرخش (۲) و بیشترین چرخش (۱۰) محاسبه شد (ΔI_{2-10}). سپس درصد نسبت $(\Delta I_n - \Delta I_{n+1}) / (\Delta I_{2-10})$ برای هر تغییر تعداد گردش، محاسبه و نتایج در شکل ۲ ارائه گردید. جدول مربوط به حداکثر TDS مجاز آب برداشتی محاسبه شده نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

میزان تغییرات ذخیره آب به ازای دور گردش ششم به بعد کمتر از یک صدم است. لذا دور گردش ششم مناسب‌تر شناخته شد. بنابراین در شکل ۳ میزان برداشت ویژه آب به ازای $ncc = 6$ در واحدهای نیروگاهی حرارتی با برج خنک کننده تر محاسبه و ارائه گردید.

نتایج مربوط به محاسبه مصرف ویژه سوخت در واحدهای نیروگاهی با برج خنک کننده تر در شکل ۴ ارائه گردید.

همچنین نمودار مقدار برداشت ویژه آب و مصرف ویژه سوخت به ازای قدرت عملی واحدهای تولیدی نیروگاه با برج خنک کننده تر نیز ترسیم گردید (شکل ۵ الف و ب). ارتباط رگرسیونی قدرت عملی این واحدهای نیروگاهی با برداشت ویژه آب نشان داد که حداقل برداشت ویژه آب و مصرف ویژه سوخت در واحدهای نیروگاهی با قدرت عملی ۲۵۰ مگاوات رخ می‌دهد.

۲-۳- نتایج نیروگاه حرارتی با سردکننده یک بارگذر

با استفاده از مدل S-GEM مقدار برداشت آب برای تولید یک مگاوات انرژی الکتریکی برای هر یک از واحدهای نیروگاهی با سردکننده یک بارگذر محاسبه و در شکل ۶- الف نمایش داده شد.

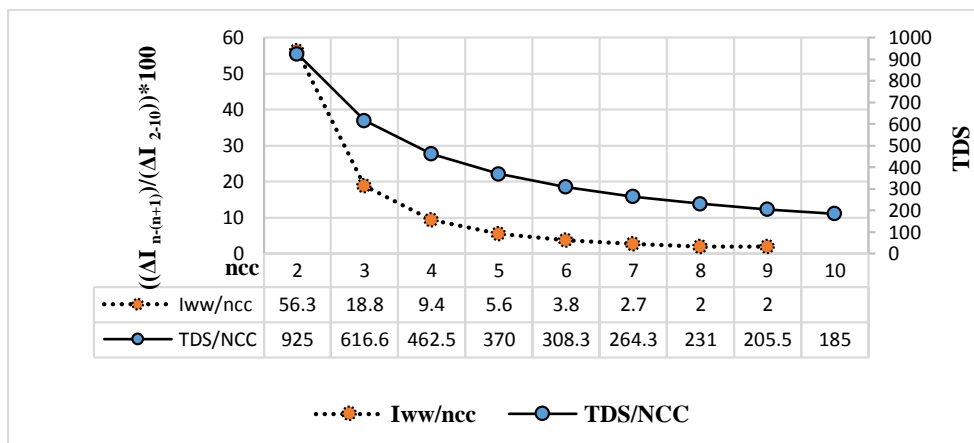


Fig. 2- The effect of ncc on water withdrawal and allowed TDS

شکل ۲- اثر ncc بر برداشت ویژه و TDS مجاز آب

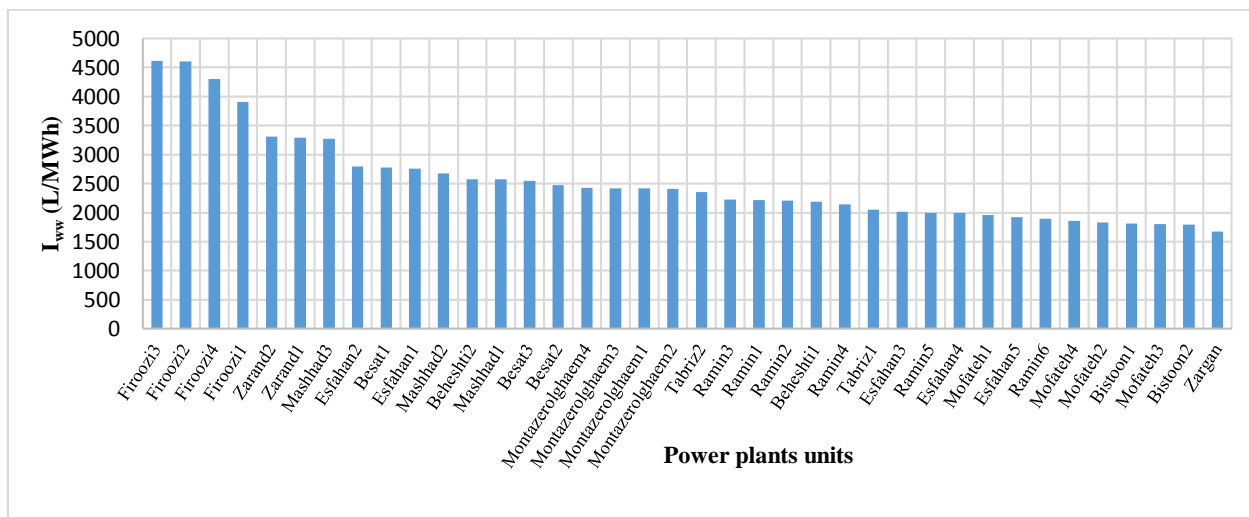


Fig. 3- Calculated specific water withdrawal for $ncc=6$
 شکل ۳- مقدار برداشت ویژه آب محاسبه شده برای $ncc=6$

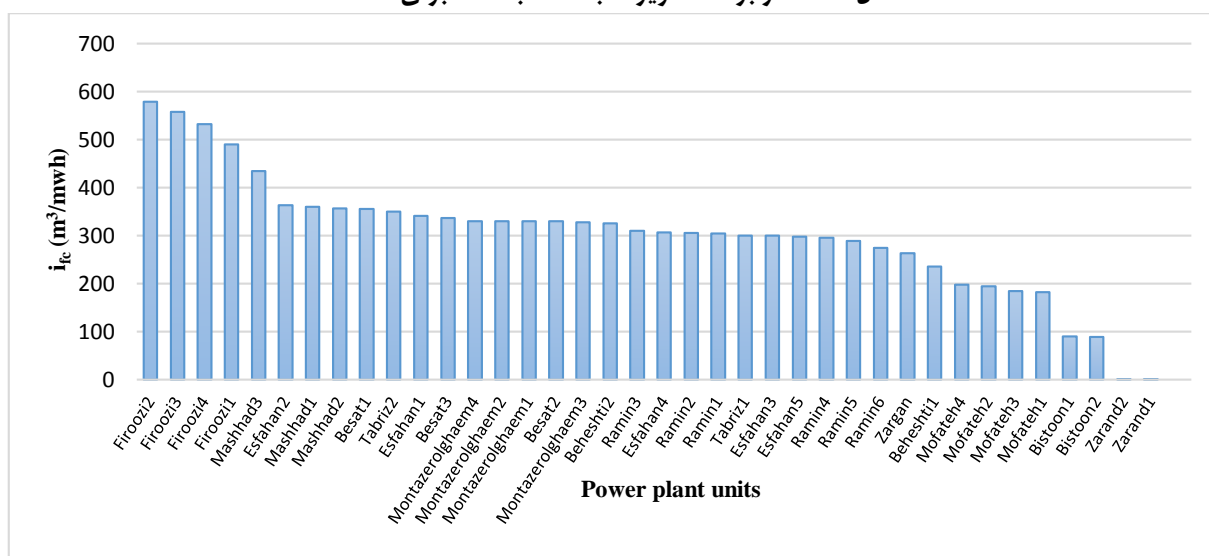


Fig. 4- Calculated Specific fuel consumption for wet tower-cooled plants units
 شکل ۴- مصرف ویژه سوخت محاسبه شده واحدهای با برج خنک کننده تر

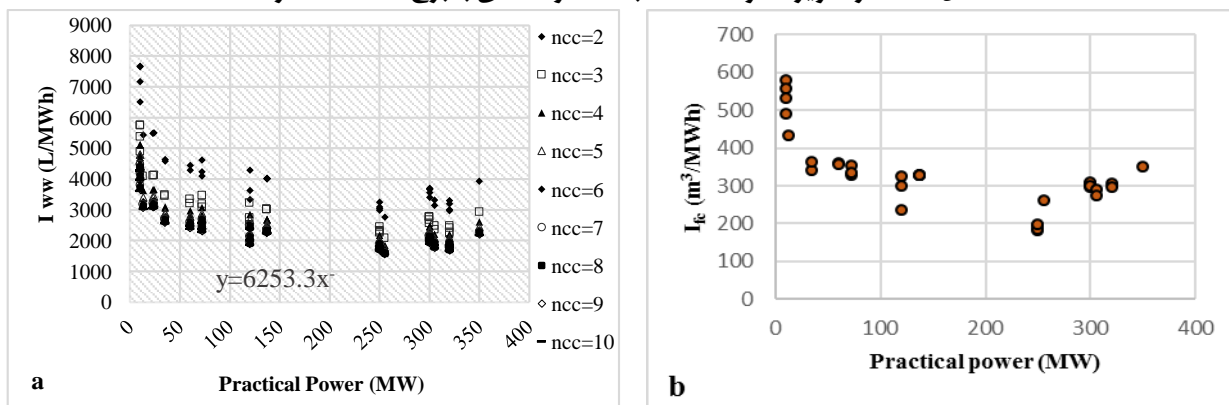


Fig. 5- a) Effect of practical power on specific water withdrawal (I_{wv}) and, b) Specific fuel consumption (I_{fc}) for wet tower-cooled plants units

شکل ۵- الف) تأثیر قدرت عملی بر برداشت ویژه آب و ب) مصرف ویژه سوخت در واحدهای نیروگاهی با برج خنک کننده تر

نتایج مقایسه مقدار آب و سوخت مورد نیاز برای تولید یک مگاوات انرژی الکتریکی در واحدهای تولیدی نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر و سیستم یک‌بارگذر در جدول ۵ ارائه گردید. بررسی حداقل، حداکثر و میانگین برداشت آب برای نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر با در نظر گرفتن چرخه تغلیظ برابر با ۶، انجام شد. نتایج این جدول شامل بررسی محاسبات مربوط به تمامی واحدهای مورد بررسی است.

میانگین قدرت عملی در واحدهای تولیدی با برج خنک‌کننده تر مورد بررسی ۱۶۸/۶۵ مگاوات ساعت و در واحدهای با سردکننده یک‌بارگذر ۳۸۵/۳۶ است.

همچنین، حجم مصرف سوخت برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی با استفاده از حداکثر ارزش حرارتی سوخت‌ها و سهم سوخت‌های مصرفی در تولید انرژی هر واحد محاسبه، و در شکل ۶-ب ارائه گردید.

برای بررسی اثر قدرت عملی نیروگاه‌ها، نمودار برداشت ویژه آب و مصرف ویژه سوخت به ازای میانگین قدرت عملی واحدهای نیروگاهی با سردکننده یک‌بارگذر نیز ترسیم گردید. نتایج در شکل ۷ نمایش داده شد. طبق نمودار شکل ۷، با افزایش قدرت عملی واحد نیروگاهی، برداشت ویژه آب به صورت خطی، و مصرف ویژه سوخت مطابق تابعی چندجمله‌ای کاهش می‌یابد.

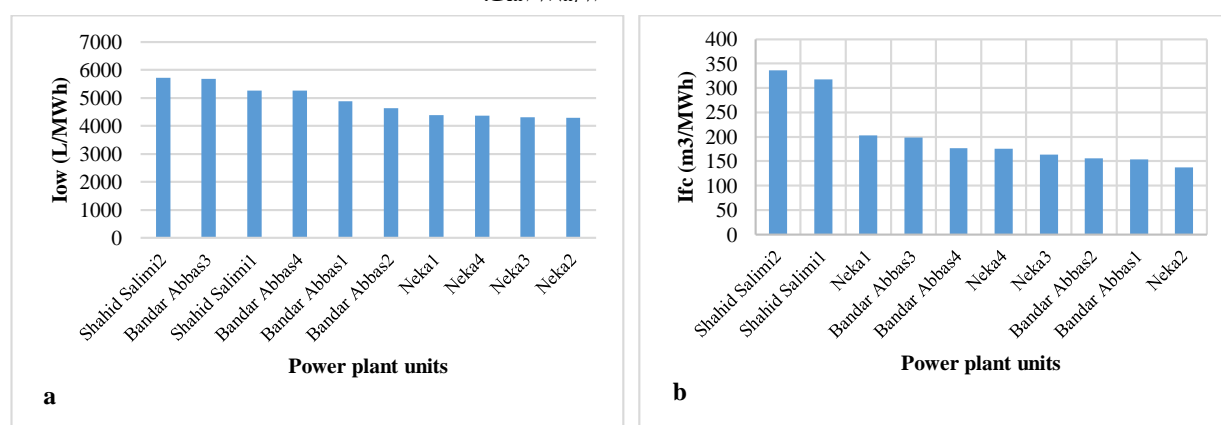


Fig. 6- a) Calculated specific water withdrawal and, b) Fuel consumption for once-through-cooled plants units (شکل ۶- الف) برداشت ویژه آب، و ب) مصرف ویژه سوخت در واحدهای نیروگاهی با سردکننده یک‌بارگذر

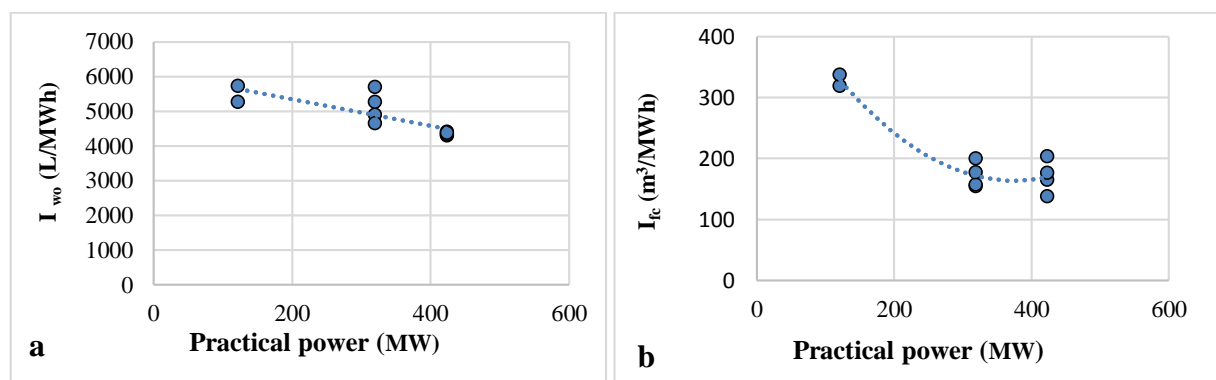


Fig. 7- a) Effect of practical power on specific water withdrawal and, b) Specific fuel consumption for once-through-cooled plants units

شکل ۷- الف) اثر قدرت عملی نیروگاه بر برداشت ویژه آب، و ب) مصرف ویژه سوخت در نیروگاه‌های با سردکننده یک‌بار گذر

Table 5- The calculated specific water and fuel consumption in power plants

جدول ۵- مصرف ویژه آب و سوخت محاسبه شده در واحدهای نیروگاهی

Cooling system	Specific water withdrawal (m³/MWh)			Specific fuel consumption (m³/MWh)		
	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum
Wet tower cooling	2.529	4.611	1.669	301.375	578.756	0.3672
Once-through cooling	4.938	5.716	4.283	201.985	336.551	137.229

آمد. همچنین (Ansoorge and Zeman 2016) با استفاده از مدل رگرسیونی، مقدار آب برداشتی به منظور خنک‌کنندگی در نیروگاه‌های ترموالکتریک با برج خنک‌کننده تر را بین ۱۷۷۵ تا ۵۴۸۵ لیتر بر مگاوات ساعت بدست آوردند.

۳-۳- نتایج بخش نمک‌زدایی

با استفاده از داده‌های TDS و مقدار کاتیون‌ها و آنیون‌های آب تغذیه، همچنین، آیین‌نامه AWWA و سفارش (DeMichele 2014)، طراحی سیستم SWRO در نرم‌افزار IMSDesign انجام شد. نتایج بررسی اثر دما و ظرفیت بر مصرف انرژی مخصوص و هزینه در واحدهای نمک‌زدایی SWRO در شکل ۸ ارائه گردید.

همان‌گونه که از شکل ۸ الف مشهود است با افزایش دما، مقدار شار عبوری از غشا افزایش، در همین حال مصرف انرژی مخصوص کاهش یافته و در دمای ۳۴ درجه به مقدار ثابتی می‌رسد. طبق نمودار بدست آمده، آب تغذیه با دمای ۳۴°C برای تصفیه از طریق غشای RO حداقل انرژی مخصوص را مصرف می‌کند که مطابق با نتایج Gude (2011)، و تئوری اثر دما بر شار از طریق غشای RO می‌باشد. از این دما به عنوان دمای بهینه برای بررسی‌های بعدی استفاده گردید.

اثر افزایش ظرفیت بر مقدار انرژی مخصوص نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترها با افزایش ظرفیت از ۱۰ هزار تا ۸۰ هزار مترمکعب در روز تغییری در مصرف انرژی مخصوص بوجود نمی‌آید. در ظرفیت ۸۰ هزار مترمکعب مصرف انرژی مخصوص در تست صفر یک دهم و در تست یک، دو صدم افزایش داشت. همچنین در میزان هزینه یک صدم افزایش در تست صفر دیده شد. برای ظرفیت ۹۰ هزار مترمکعب به بعد برای پیکره‌بندی سیستم از دو ترن^{۱۱} استفاده شد که باعث شد مقدار مصرف انرژی مخصوص دوباره به مقدار قبل از ظرفیت ۸۰ هزار مترمکعب برسد. از تست ظرفیت مشخص گشت که ظرفیت واحد RO تأثیر زیادی بر هزینه و مصرف انرژی مخصوص در مرحله نمک‌زدایی از آب ندارد.

از آنجایی که حداقل برداشت ویژه آب و مصرف سوخت در واحدهای نیروگاهی ۲۵۰ مگاواتی با برج خنک‌کننده تر دیده شد (شکل ۶)، از این قدرت عملی به منظور بررسی حجم‌های برداشت ویژه آب، مصرف سوخت و انرژی حرارتی حاصل از آن، استفاده شد. در مورد واحدهای نیروگاهی با سردکننده یک‌بارگذر، از آنجایی که انحراف معیار کمی بین مقادیر بدست آمده دیده شد نیز، از قدرت عملی ۲۵۰ استفاده گردید. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن سهم هر یک از سوخت‌ها در تأمین انرژی هر واحد، حجم کل سوخت مصرفی $189/98 \text{ m}^3/\text{MWh}$ برای واحدهای با سیستم سرد کننده برج تر و $205/69$ برای واحدهای با سیستم یک بارگذر بدست آمد. مطابق با نتایج جدول ۶ حجم برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم سردکننده یک‌بارگذر تقریباً چهار برابر حجم برداشت ویژه آب، و حجم ویژه مصرف سوخت تقریباً ۱/۱ برابر نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر است. هدف از این مقایسه توجه به حجم آب استحصال شده از طبیعت است. چه برداشت آب شیرین که در مناطق مرکزی در برج‌های تر مورد استفاده قرار گیرد و چه آب شور دریا، هر دو از مسیر اکولوژیکی خود منحرف و به صورت غیرمستقیم وارد سیستم تولید آب نمک‌زدایی شده می‌شوند.

در مورد میزان برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر، (Rutberg 2012) با استفاده از داده‌های نیروگاه‌های حرارتی با برج خنک‌کننده تر در مجموعه نیروگاهی اسکوم در کشور آفریقای جنوبی با تعداد چرخه تغلیظ ۲۰ بار، $1819-2327$ لیتر به ازای یک مگاوات ساعت تولید انرژی بدست آورد. NREL در سال ۲۰۰۳ با استفاده از داده‌های تولید توان خالص EIA و تخمین‌های مصرف آب UAGS، مصرف آب در بخش تولید برق حرارتی را در ایالات متحده آمریکا $1776/6$ لیتر به ازای هر مگاوات ساعت، برآورد نمود (Torcellini et al., 2003). در پژوهشی (Lee et al. 2016)، مقدار مصرف آب در نیروگاه‌های ترموالکتریک با برج خنک‌کننده تر را با استفاده از داده‌های EIA-923 به طور متوسط، 2268 لیتر به ازای هر مگاوات ساعت تولید برق تخمین زدند و برای سردکننده‌های یک‌بارگذر، $113/4$ به ازای تولید هر مگاوات ساعت تولید برق بدست

Table 6- The Specific water withdrawal and fuel consumption in 250 MW units

جدول ۶- حجم ویژه برداشت آب و مصرف سوخت در واحدهای ۲۵۰ مگاواتی

Cooling system	Specific water withdrawal (m^3/MWh)	Specific fuel consumption (m^3/MWh)			Specific energy consumption (MJ/MWh)
		Fuel oil	Natural gas	Gasoil	
Wet tower cooling	1.898	0.265	268.94	305.26	11677.75
Once-through cooling	4.965	0.318	395.30	349.2	13458.35

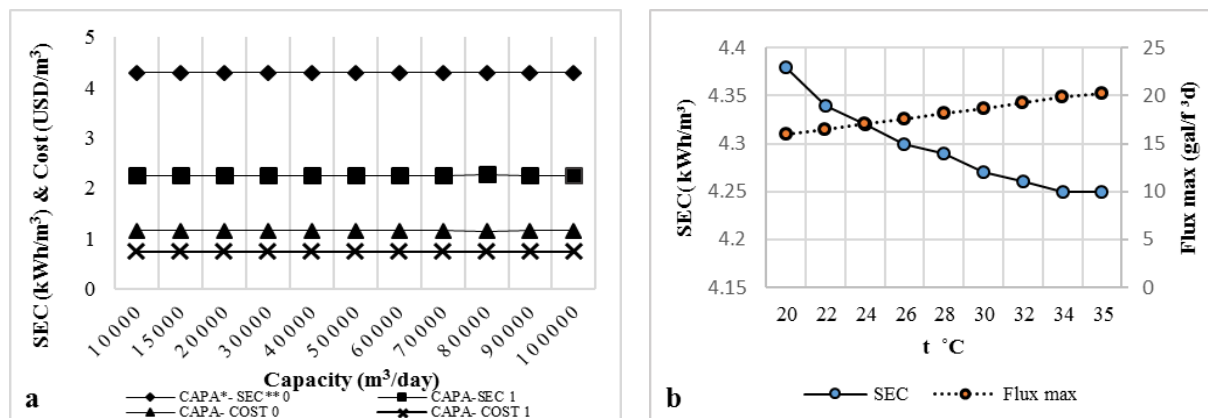


Fig. 8- a) Effect of capacity on specific energy consumption and desalination cost, b) Effect of temperature on water flux and specific energy * = capacity, ** = Specific Energy Consumption

شکل ۸- الف) اثر ظرفیت بر انرژی مخصوص و هزینه نمک‌زدایی، ب) اثر افزایش دما بر شار آب و مصرف انرژی مخصوص.

ساعت، Mazlan et al. (2016)، با استفاده از مدل Aspen Plus environment، مقدار مصرف انرژی مخصوص را برای بازیابی ۵۰٪ دفع غشایی: ۱۰۰٪، راندمان پمپ پرفشار: ۹۰٪، راندمان‌های ERD ۹۰٪ و ۱۰۰٪، به ترتیب ۲/۳ و ۲/۲ کیلووات ساعت و Voutchkov (2017) با مروری بر مصرف انرژی در حال حاضر در سیستم‌های مختلف RO از لحاظ ظرفیت و نوع آب تغذیه آن، برای آب دریا ۲/۵ تا ۴ کیلووات ساعت بر مترمکعب، بدست آوردند.

با در نظر گرفتن حداقل مصرف انرژی ویژه محاسبه شده در واحد نمک‌زدایی SWRO که برابر با ۲/۲۶ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب آب نمک‌زدایی است، و با فرض این‌که نیروگاه حرارتی با سیستم خنک‌کننده برج تر یا یک‌بارگذر، تأمین‌کننده انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واحد RO باشد، مقادیر غیرمستقیم برداشت ویژه آب، مصرف ویژه سوخت و انرژی حرارتی حاصل از آن، برای استحصال یک متر مکعب آب نمک‌زدایی شده به صورت جدول ۸ بدست آمد.

سه سناریو به منظور شناسایی میزان اثر ERD بر مصرف انرژی مخصوص و به تبع آن هزینه مخصوص برای بدست آمدن بهینه‌ترین حالت مصرف انرژی، برای ظرفیتی معین (۱۰۰ هزار مترمکعب) و برای آب با دمای ۳۴°C در روز با ثابت بودن سایر شرایط، انجام گرفت. نتایج در جدول ۷ ارائه شد.

نتایج انجام این سه تست نشان داد که با ثابت بودن سایر شرایط، حداقل مصرف انرژی مخصوص با بکارگیری تست ۲، که استفاده از ERD نوع Pressure Work Exchanger است، حاصل می‌شود که این مقدار برابر با ۲/۲۶ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب آب نمک‌زدایی شده بدست آمد که مطابق با نتیجه پژوهش (2011) Gude می‌باشد. در پژوهشی (2010) Ludwig با بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی سیستم RO، مقدار مصرف انرژی ویژه را برای ظرفیت ۲۰۰۰ مترمکعب در روز بین ۳/۹ تا ۵/۶ کیلووات

Table 7- The results of running 0, 1 & 2 tests for determined capacity

جدول ۷- نتیجه تست‌های ۰، ۱ و ۲ بر ظرفیتی معین

Capacity (m ³ /day)	Test0		Test1		Test2	
	SEC	Cost	SEC	Cost	SEC	Cost
100000	4.29	1.16	2.26	0.75	2.57	0.81

unit: (SEC) Specific Energy Consumption (kWh/m³) & Cost (USD/m³)

Table 8- Withdrawal water and consumed fuel and thermal energy

جدول ۸- برداشت غیرمستقیم ویژه آب، مصرف سوخت و انرژی حرارتی حاصل

Cooling System	Water withdrawal (m ³)	Fuel consumption (m ³)	Thermal energy consumption (MJ)
Wet tower cooling	4.43 × 10 ⁻³	0.443	26.39
Once-through cooling	11.568 × 10 ⁻³	0.479	29.15

۲- روند کلی اثر قدرت عملی بر برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های با سردکننده برج تر نشان داد، کمینه برداشت ویژه آب و مصرف سوخت در واحدهای با قدرت عملی ۲۵۰ مگاوات اتفاق می‌افتد.

۳- رابطه برداشت ویژه آب و قدرت عملی در نیروگاه‌های حرارتی با سیستم سردکننده یک‌بارگذر، به صورت خطی بوده که با افزایش قدرت عملی، برداشت ویژه آب نیز کاهش می‌یابد. اما رابطه رگرسیونی قدرت عملی واحدهای نیروگاهی و برداشت ویژه سوخت به صورت یک تابع چندجمله‌ای است که کمینه برداشت ویژه سوخت در حداکثر میانگین قدرت عملی است.

۴- بررسی مصرف انرژی در واحدهای RO، نشان داد که افزایش ظرفیت واحد RO تأثیر چندانی بر مصرف انرژی مخصوص در نمک‌زدایی آب شور در عبور از غشا ندارد و حداقل مصرف انرژی زمانی حاصل گردید که دمای آب تغذیه‌ای 34°C بوده و ERD نوع Pressure Work Exchanger با اختلاف بار ۵۰٪ به کارگرفته شد.

۵- در قدرت عملی یکسان، نیروگاه حرارتی با سیستم سردکننده یک‌بارگذر نیاز به انرژی حرارتی بیشتر برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی نسبت به نیروگاه با برج تر دارد. بنابراین، با وجود استفاده از سوخت‌های یکسان در این نیروگاه‌ها، برای استحصال یک واحد آب نمک‌زدایی شده با استفاده از انرژی الکتریکی حاصل از نیروگاه با سردکننده یک‌بارگذر، نیاز به مصرف سوخت بیشتر خواهد بود.

۶- توجه به اثرات بلندمدت هر تصمیم در تدوین سیاست‌های بخش آب و مدیریت تقاضا ضروری است.

۵- تشکر

این پژوهش با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در قالب رساله دکتری با کد طرح ۹۶۰۱۳۳۶۸، انجام پذیرفته است.

براساس سیاست‌های تأمین آب برنامه پنج‌ساله ششم، ۳۰ درصد آب شرب استان‌های جنوبی کشور از طریق نمک‌زدایی آب دریا تأمین می‌گردد. طبق اطلاعات مرکز آمار ایران ۳۰ درصد جمعیت سه استان سیستان و بلوچستان، هرمزگان و بوشهر در سال ۱۳۹۸ برابر با ۱۸۲۳۳۳۱ نفر خواهد بود. با در نظر گرفتن حجم ۲۲۴ لیتر به عنوان سرانه مصرف آب شرب هر شخص ایرانی، حجم روزانه برداشت غیر مستقیم آب، مصرف سوخت و انرژی حرارتی حاصل از آن به ازای مصرف شرب روزانه آب نمک‌زدایی شده برای این سه استان، محاسبه و در جدول ۹ ارائه گردید.

طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ استان‌های بوشهر و هرمزگان در رده‌های دوم و سوم و استان سیستان و بلوچستان در رده هفتم قرار دارند. با در نظر گرفتن نیازهای آب شرب برای جمعیت در حال رشد این سه استان، و مقادیر محاسبه شده ضرورت توجه به مدیریت تقاضا در مصرف آب ضروری‌تر به نظر می‌رسد همچنان‌که Sharabiani et al. (2018) نیز طبق نظر متخصصین و خبرگان، تغییر از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا در حکمرانی مؤثر آب را لازم دانستند. این نتایج می‌تواند مورد استفاده نهادهای تصمیم‌گیرنده قرار گیرد تا با اجرای راه‌حل‌های مدیریتی صحیح، تأمین و مصرف آب و انرژی بهینه گردد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد:

۱- در برداشت ویژه آب در نیروگاه‌های با سیستم خنک‌کننده تر، علاوه بر مقدار املاح موجود در آب برداشتی، مقدار ذخیره‌سازی آب هم اهمیت دارد.

Table 9- Withdrawal water and energy versus desalinated water

جدول ۹- برداشت آب و مصرف انرژی به ازای آب نمک‌زدایی شده

Cooling System	Water withdrawal (m ³)	Fuel consumption (m ³)	Thermal energy consumption (MJ)
Wet tower cooling	1809.327	180932.782	10778365.94
Once-through cooling	4724673.633	195636.123	11905622.097

6- k_{sens} : The Fraction of Heat Load Rejected Through Sensible Heat Transfer

7- HHV_F: Higher Heating Value of Fuel

8- ERD: Energy Recovery Device

9- RO Element

10- Pressure Vessel

11- Train

پی‌نوشت‌ها

1- SWRO: Seawater Reverse Osmoses

2- S-GEM: The System-Level Generic Model

3- I_{ww} : Intensity Withdrawal Water

4- k_{os} : The Fraction of Heat Lost to Other Sinks

5- ncc: Number of Cycle of Concentration

- exploitation with water technology development in China. *Energy* 36:6960-6966
- Lianying W, Yangdong H, Congjie G (2013) Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power. *Desalination* 324:111-117
- Ludwig H (2010) Energy consumption of reverse osmosis seawater desalination-possibilities for its optimisation in design and operation of SWRO plants. *Desalination and Water Treatment* 13(1-3):13-25
- Management and Programming Organization of Hormozgan Province (2016) Selection criteria and indicators of economic, social and cultural province of Hormozgan province. 54p (In Persian)
- Manual A W W A (1999) M46. Reverse osmosis and nanofiltration. American Water Works Association, Denver, USA. World Health Organization (2004) Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, 595p
- Marsh D M (2008) The water-energy nexus: a comprehensive analysis in the context of New South Wales. Ph.D. Thesis Philosophy (Engineering), University of Technology, Sydney: 395 p
- Martin A D (2012) Water footprint of electric power generation: modeling its use and analyzing options for a water- scarce future. M.Sc. Thesis Science in Technology and Policy, Massachusetts Institute of Technology, 117p
- Mazlan N M, Peshev D, Livingston A G (2016) Energy consumption for desalination- a comparison of forward osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 377:138-151
- Mekonnen M, G-Leenes P W, Hoekstra A Y (2015) The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Water Res, Technol. Environmental Science* 1:285-297
- Parliament (2016) The sixth five-year development program of the Islamic Republic of Iran.
- Perrone D, Hornberger G (2014) Water, food, and energy secure ty: scrambling for resources or solutions? *WIREs Water* 1:49-68
- Queen Sland Water Commission (2009) Cooling tower guideline WG-2. 10p
- Rasul G (2015) Managing the food, water, and energy nexus for achieving the sustainable development Goals in South Asia. *Environmental Development*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.12.001>
- Riley R L, Lonsdale H K, Lyons C R, Merten U (1967) Preparation of ultrathin reverse osmosis membranes and the attainment of theoretical salt rejection.
- Abbaspour M (1392) Electric generator power plants. Sharif University Press, 512p (In Persian)
- Ansorge L, Zeman M (2016) Model of water needs for energy production. *Statistika* 96(3):35-46
- Baker R W (2012) Membrane technology and applications. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd, Chichester
- Clayton R (2015) Review of current knowledge, desalination for water supply. Third Edition Foundation for Water Research, U.K, 52p
- DeMichele D, Seacord T F, Sutherland J (2014) Manual of practice for the use of computer models for the design of reverse osmosis/ nanofiltration membrane processes. Texas Water Development, Board Report
- Diehl Timothy H, Melissa A Harris (2014) Withdrawal and consumption of water by thermoelectric power plants in the United States, 2010. USGS Numbered Series 2014-5184, Scientific Investigations Report
- Ghalavand Y, Hatamipour M S, Rahimi A (2015) A review on energy consumption of desalination processes. *Desalination and Water Treatment* 54(6):1526-1541
- Ghasem Sharabiani M, Razzavi M, Tabibi S J (2018) Policy coherence generators for coping with water problems in Iran: Case Study on ministry of energy and ministry of agricultural jihad based on survey of experts in grounded theory. *Iran- Water Resources Research* 14(3):42-56 (In Persian)
- Gude V G (2011) Energy consumption and recovery in reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment* 36:239-260
- Healy R W, Alley W M, Engle M A, McMahon PB, Bales J D (2015) The water-energy nexus-An earth science perspective. U.S. Geological Survey Circular 1407, 107 p
- Jones E, Qadir M, van Vliet M T, Smakhtin V, Kang S M (2018) The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment* 657:1343-1356
- Kichonge B (2018) The status and future prospects of hydropower for sustainable water and energy development in Tanzania. *Journal of Renewable Energy*, vol. 2018, 12 p
- Leese M, Meisch S (2015) Securitising sustainability? Questioning the water, energy and food-security nexus. *Water Alternatives* 8(1):695-709
- Liang S, Zhang T (2011) Interactions of energy technology development and new energy

- Torcellini P A, Long N, Judkoff R (2003) Consumptive water use for us power production. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, Golden, 18p
- Voutchkov N (2017) Energy use for membrane seawater desalination—current status and trends. *Desalination* 431:2-14
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>
- Journal of Applied Polymer Science 11(11):2143-2158
- Rutberg M J (2012) Modeling water use at thermoelectric power plants. M.Sc. Thesis Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 page
- Stillwell A S, King C W, Webber M E, Duncan I J, Hardberger A (2010) The energy-water nexus in Texas. *Ecology and Society* 16(1):2, 20p, URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art2/>