بررسی فنی و اقتصادی آب‌شیرین‌کن‌های HDH, RO, MSF, MED

حمیدرضا حیدرزاده*
دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی
hamidreza_heydarzadeh@yahoo.com

سعید نجفی‌زاده
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان
s.najafi2014@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

چکیده

از جمله عوامل توسعهٔ هر کشور و حرکت به‌سمت رفاه عمومی، استفادهٔ بهینه و کارا از منابع طبیعی است. اگر جامعه‌ای بخواهد با کاروان تمدن و توسعهٔ فراگیر همراه شود، ناچار است از منابع طبیعی به‌طور مطلوب استفادکند. از جمله منابع مهم و حیاتی، که در زندگی روزمره و تداوم تولید نقش مهمی دارد، منابع آب است. شناخت آب از نظر کیفیت و کمیت و چگونگی حصول آن گامی اساسی در جهت بهینه‌سازی مصرف آن است. اگرچه حجم کلی آب موجود در زمین نسبتاً زیاد می‌نماید، اما متجاوز از ۹۷ درصد آن در دریاها و اقیانوس‌ها متمرکز است و حدود دو درصد نیز به‌صورت یخ و یخچال‌ها در مناطق قطبی تجمع یافته است. از یک درصد آب باقیمانده نیز بخش زیادی در اعماق زمین بوده که استخراج آن مشکل و دور از دسترس است. به‌علاوه، منابع آب شیرین در سطح زمین به‌طور یکنواخت توزیع نشده‌اند. در حال حاضر ۹ کشور (کانادا، چین، کلمبیا، پرو، برزیل، روسیه، ایالات متحده امریکا، اندونزی و هند) ۶۰ درصد کل منابع آب شیرین را به‌خود اختصاص می‌دهند. در مقابل حدود ۸۰ کشور با کمبود آب مواجه‌اند که برخی از آنها همچون کویت، بحرین، مالت، امارات متحدهٔ عربی، سنگاپور، اردن و لیبی تقریباً به‌هیچ منبع آب شیرین قابل توجهی دسترسی ندارند. به‌دنبال افزایش بحران آب در دهه‌های اخیر، ظرفیت شیرین‌سازی آب روزبه‌روز رشد نموده است و همچنین با پیشرفت‌های فناوری هزینهٔ شیرین‌سازی آب مخصوصاً به روش اسمز معکوس[1] نیز کاهش قابل توجهی داشته است.

واژگان کلیدی: انرژی، آب‌شیرین‌کن، فرایند تقطیر، غشاء، جوشش

۱. مقدمه

امروزه در ایران مصرف سرانهٔ انرژی کشور حدود سه برابر استانداردهای جهانی و معیارهای بین‌المللی است. در واقع، در مقایسه با دیگر کشورها تقریباً بیشترین مصرف انرژی و هدررفت در منابع انرژی را در ایران می‌توان مشاهده کرد.

این در حالی است که منابع انرژی موجود در ایران علاوه بر تأمین مصرف داخلی انرژی کشور منبع ارزشمند و بااهمیتی در تأمین بیش از ۹۰ درصد درآمد ارزی کشور است [۱-۴].

در واقع منابع انرژی ایران به اتمام برسد و در جاهای دیگر انرژی وجود داشته باشد، ایران دیگر پولی برای خرید این منابع نخواهد داشت و تخمین‌های انجام شده نشان می‌دهد چنانچه مصرف انرژی در ایران در حد سال ۱۳۸۳ ثابت باقی بماند، حدود ۸۴ سال آینده این منابع پایان خواهند یافت. در حالی‌که سالیانه حدود ۶ درصد رشد در میزان مصرف انرژی در ایران مشاهده می‌شود، لذا اگر میزان صادرات منابع ثابت فرض شوند، تا ۸۴ سال آینده همهٔ منابع تأمین انرژی داخلی و درآمد ارزی کشور به پایان خواهد رسید.

۲. فناوری‌های مربوط به انرژی تجدیدپذیر

اگر از منابع انرژی تجدیدپذیر شامل زیست‌توده، برقابی، خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و اقیانوسی، به‌روشی مدرن استفاده شوند، می‌توانند برای اهداف زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی مناسب باشند. مزایای بسیاری برای این فناوری‌ها وجود دارد؛ از جمله آنکه:

۱. به حامل‌های انرژی، فناوری‌ها و زیرسازی تولید حرارت، سوخت‌ها و الکتریسیته تنوع می‌دهند.
۲. دستیابی به منابع انرژی پاک را بهبود می‌بخشند.
۳. در استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد توازن می‌کنند و در نتیجه آنها را برای کاربردهای دیگر و برای مصرف در آینده ذخیره می‌سازند.
۴. انعطاف‌پذیری سیستم‌های تولید برق را برای مواجهه با تغییرات در تقاضای الکتریسیته افزایش می‌دهند.
۵. آلودگی ناشی از سیستم‌های مرسوم انرژی را کاهش می‌دهند.
۶. وابستگی و هزینه‌های صرف‌شده برای واردات سوخت را حداقل می‌کنند.
۷. باعث ایجاد اشتغال می‌شوند.

۳. فرایندهای متعارف آب‌شیرین‌کن

فرایندهای شیرین‌سازی، فرایندهایی به‌منظورخالص‌سازی آب دریا برای مصارف آشامیدنی است. به‌طور کلی یک سیستم آب‌شیرین‌کن آب شور را به دو جریان تقسیم می‌کند: یکی جریان آب خالص با درصد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک و املاح باقیمانده. جداسازی نمک از مخلوط آب نمک، فرایند ترمودینامیکی است که به انرژی نیاز دارد. یک فرایند ایده‌آل آب‌شیرین‌کن به‌عنوان فرایند جداسازی برگشت‌پذیر محسوب می‌شود [۳]. کارآمدترین فناوری آب‌شیرین‌کن دارای مصرف ۴ تا ۵ کیلووات به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین هستند. فناوری‌های آب‌شیرین‌کن از لحاظ تغییرفاز به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. فرایندهایی که در آنها تغییر فاز صورت می‌گیرد.
۲. فرایندهایی که در آنها شیرین‌سازی آب بدون تغییر فاز انجام می‌شود.

کارایی هر کدام از این فرایندها به غلظت نمک در آب تغذیه و همچنین ارزش هزینهٔ آب بستگی دارد. هر یک از فناوری‌های آب‌شیرین‌کن برای انجام فرایند جداسازی به انرژی احتیاج دارند. این انرژی می‌تواند از طریق انرژی گرمایی، مکانیکی یا الکتریکی تأمین شود. پنج فناوری عمده به‌منظور زدودن نمک و دیگر مواد جامد غیرقابل حل از آب وجود دارد که عبارت‌اند از: تقطیر، اسمز معکوس، الکترودیالیز، تبادل یونی، نمک‌زدایی انجمادی تقطیر و انجماد شامل خارج ساختن آب خالص، به‌صورت بخار آب یا یخ از آب شور. درفناوری‌های RO و ED یک غشاء بسیار ظریف باعث جداسازی نمک‌ها و املاح سبک‌تر و مطلوب‌تر در طی عبور آب از یک محفظهٔ شیمیایی می‌شود.

۳-۱. روش تقطیر

اکثر روش‌های معمول نمک‌زدایی آب شامل فرایندهای جوشش و تبخیر می‌باشد. در یک دستگاه تقطیر، آب به جوش می‌آید و بخار تولید می‌کند و از چگالش آن آب خالص تولید می‌شود. تقطیر آب هنوز بهترین و مرسوم‌ترین روش شیرین‌سازی آب دریاست. دراین فرایند از تبخیر آب شور و چگالش آب به آب خالص می‌رسیم، با اینحال فناوری غشا به‌خاطر اطمینان بیشتر و مصرف انرژی کمتر به‌طورگسترده‌ای طی ده سال اخیر گسترش یافته است. فرایندهای خالص‌سازی آب به روش تقطیر نسبت به فرایندهای غشایی دارای کیفیت بالاتری است. فرایندهای تقطیر هنوز سهم بزرگی درصنعت شیرین‌کردن آب دریا داراست.

روش تقطیر وقتی صرفهٔ اقتصادی دارد که بخار با انرژی حرارتی پایین به‌عنوان منبع اصلی انرژی در دسترس باشد. لذا روش‌های حرارتی در کشورهای که کوپلینگ با ایستگاه‌های قدرت ممکن نیست، کمتر استفاده می‌شود. از طرفی بزرگترین پلنت‌های آب شیرین در کشورهای شبه‌جزیره عرب یا جاهایی که تولید همزمان توان و آب دارند، بر پایهٔ تقطیر است.

دلائلی که هنوز روش تقطیر بهترین انتخاب برای شیرین‌سازی آب دریا به‌خصوص در ایستگاه‌های قدرت می‌باشد بدین شرح است:

۱. فرایندهای تقطیر آب با کیفیت بالا تولید می‌کنند (با باقیمانده نمک ۱ تا ۲ ذره در میلیون) و به شوری آب دریا بستگی ندارند، در صورتی که فرایندهای غشایی کاملاً به ذرات جامد حل‌شده و ترکیب آب دریا بستگی دارند و آب با کیفیت پایین‌تر تولید می‌کنند [۷].

۲. انرژی مصرفی در واحدهای تقطیر آب دریا، حرارت ورودی به‌وسیلهٔ بخار سطح حرارتی پایین است که معمولاً به ارزانی در ایستگاه‌های توان حرارت و در خروجی توربین های بخار قابل دسترس است.

۳. شیرین‌سازی به روش تقطیر نسبت به نوع غشایی کمتر به کیفیت آب دریا حساسیت دارند، در حالی‌که پیش تصفیهٔ آب دریا در مورد نوع غشایی حتماً باید صورت گیرد.

۴. هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگه‌داری با وجود یک نیروگاه حرارتی، به‌طور عمومی برای تقطیر پایین‌تر از واحدهای غشایی است.

۳-۱-۱. انواع فرایندهای تقطیر

فرایندهای تقطیر آب دریا به شرح زیر است:

۱. تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی[۲]

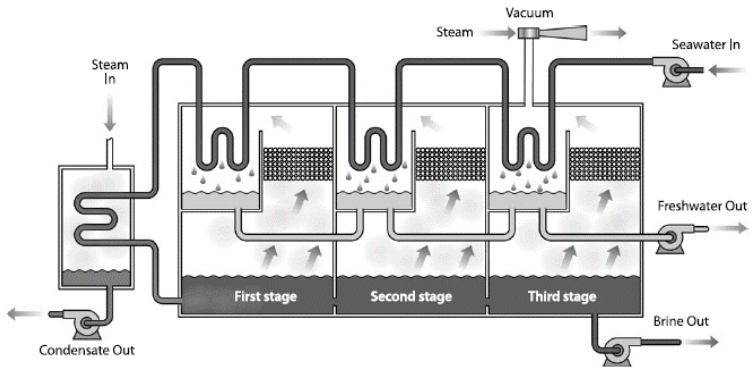
۲. تقطیر چندمرحله‌ای به‌همراه لولهٔ افقی و فیلم نازک انبساط[۳]

۳. تقطیر چندمرحله‌ای با گردش بخار توسط ترموکمپرسور

۴. تقطیر یک یا چندمرحله‌ای توسط تراکم بخار مکانیکی[۴]

طی فرایند تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی، در داخل محفظه‌ای به نام گرمکن، محلول آب شور دریا گرم می‌شود. این کار عمدتاً از طریق چگالش بخار روی تعدادی لولهٔ موازی که در داخل محفظه عبور کرده و در عین‌حال آب دریا را گرم می‌کنند، انجام می‌شود. سپس آب گرم‌شده به‌داخل محفظهٔ دیگری، که مرحلهٔ اواپراتور نامیده می‌شود، جریان یافته و در آنجا غشاء در حدی تنظیم می‌شود که آب بلافاصله به جوش می‌آید. تغذیهٔ ناگهانی آب گرم به‌داخل اطاقک سبب جوشش سریع آن می‌گردد. در واقع آب به‌صورت انفجاری یا فلاشینگ به بخار تبدیل می‌شود، این تبدیل به فشار کنترل‌شده در این مرحله بستگی دارد؛ زیرا فرایند جوشش تا زمانی ادامه می‌یابد که آب سرد شود. مفهوم تقطیر آب به‌کمک ظرفی که تحت فشار کاهش داده شده، کار می‌کند ابداع جدیدی نیست، بلکه بیش از یک قرن است که کاربرد دارد [۱۰]. در دههٔ ۱۹۵۰ م، دستگاهی که از یک سری طبقات STAGE با شیب فزاینده فشارهای اتمسفری پایین‌تر تشکیل می‌شد ابداع گردید. در این دستگاه، آب تغذیه می‌توانست از یک مرحله

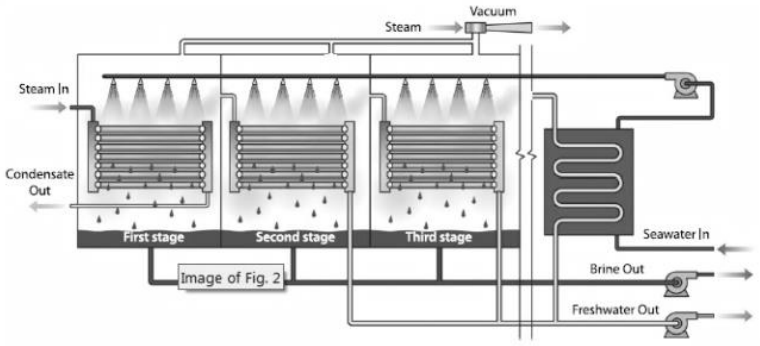
به مرحلهٔ دیگر راه یابد و به‌طور مکرر و بدون افزودن حرارت به حالت جوش برسد.



شکل ۱. نماییشماتیک از تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی [۲]

۳-۱-۲. فرایند تقطیر چندمرحله‌ای

فرایند تقطیر چندمرحله‌ای مدت زیادی است که در تقطیر صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از کاربردهای معمول این فرایند، تبخیر شیره از نیشکر در تولید نمک با استفاده از پدیدهٔ تبخیر می‌باشند. فرایند تقطیر چندمرحله‌ای نخستین فرایندی است که برای تولید مقادیر قابل توجهی آب شیرین از آب دریا و در مقیاس تجاری به‌کار گرفته شده است. طی ۲۵ سال گذشته این فرایند از لحاظ تکنیکی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. در حال حاضر ۸ درصد ظرفیت تولید آب شیرین در جهان به این روش اختصاص دارد. فرایند این دستگاه آب‌شیرین‌کن بر پایهٔ سیستم نمک‌زدایی تقطیری به روش چندمرحله‌ای به همراه چرخش بخار می‌باشد. مانند شکل ۳ هر واحد آب‌شیرین‌کن از چند افکت و یک کندانسور تشکیل شده است. افکت‌ها مبدل‌های پوسته - لوله‌ای با آرایش افقی می‌باشند.



شکل ۲. نمایی شماتیک از آب‌شیرین‌کن چندمرحله‌ای [۲]

۳-۲. روش اسمز معکوس

فرایند غشایی به شیوه‌های فیزیکی برای جداسازی حلال از نمک‌های محلول در آن، با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا اطلاق می‌شود [۳]. این فرایندها در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی داشته است. سابقهٔ استفاده از غشاء برای صاف‌کردن به اوائل قرن بیستم بازمی‌گردد. در دههٔ سوم قرن بیستم غشاها برای جداسازی، خالص‌سازی و یا غلیظ‌سازی محلول‌ها به‌ویژه سیال‌های حاوی ریزجاندارها مورد استفاده قرار گرفت .سیر تکاملی این پدیده با انجام پژوهش‌ها روی ساخت انواع غشاها و شناخت فرایند در طی

زمان به‌گونه‌ای ادامه یافت که در حال حاضر این فرایند یکی از شیوه های اصلی شیرین‌سازی آب محسوب می‌شود. فرایندهای غشایی بر اساس اندازهٔ کوچکترین ذره که تحت تأثیر نیروی فشاری از غشا عبور می‌کند به نام‌های زیر نامیده می‌شوند.

۱. میکروفیلتراسیون[۵]
۲. اولترافیلتراسیون[۶]
۳. نانوفیلتراسیون[۷]
۴. اسمز معکوس[۸]

۳-۲-۱. برخی از کاربردهای روش اسمز معکوس

برخی از کاربردهای مرسوم این روش عبارت است از:

۱.تهیه و تولید آب شرب از آب شور (مصارف شرب)
۲.تهیه و تولید آب مورد نیاز جهت رشد سریع دام و طیور
۳.تأمین جهت مصارف کشاورزی و گلخانه‌ای
۴.تأمین و تولید آب فرایندی کارخانه‌های داروسازی و لوازم بهداشتی
۵.تولید آب فرایندی کارخانه‌های پتروشیمی، نساجی، کاغذسازی و رنگ‌سازی
۶.تولید آب مصرفی نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی
۷.تأمین و تولید آب دستگاه‌های دیالیز بیمارستان‌ها
۸.بازیافت پساب‌های صنعتی

۳-۳. الکترودیالیز

فرایند الکترودیالیز به‌صورت تجاری از اوائل دههٔ ۶۰ یعنی حدود ده سال قبل از روش اسمز معکوس به بازار عرضه شد. طراحی و ساخت سیستم الکترودیالیز راه مؤثری برای کاهش هزینه در فرایند نمک‌زدایی آب کم‌نمک ابداع کرد و در این زمینه موفقیت قابل ملاحظه‌ای به‌دست آورد.

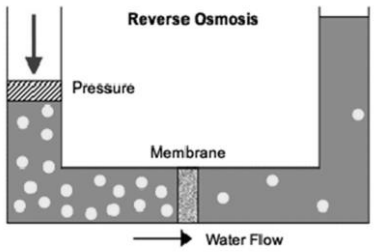
۳-۴. روش رطوبت‌زنی، رطوبت‌زدایی

روش نسبتاً جدیدی که در دههٔ ۹۰ میلادی و قرن حاضر جهت تولید آب شیرین مورد توجه قرار گرفته، روش رطوبت زنی، رطوبت‌زدایی هوا[۹] است. این روش برای ظرفیت‌های نسبتاً کم مناسب است و به‌علت پایین‌بودن میزان مصرف انرژی حرارتی، می‌توان کل انرژی حرارتی مورد نیاز واحد را به‌وسیلهٔ انرژی خورشید تأمین کرد [۱۱]. تولید آب شیرین به روش رطوبت‌زنی، رطوبت‌زدایی یا به اختصار HD هنوز به مرحلهٔ تجاری نرسیده است، اما فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در بسیاری از کشورها به‌خصوص مناطق گرمسیر صورت گرفته است.

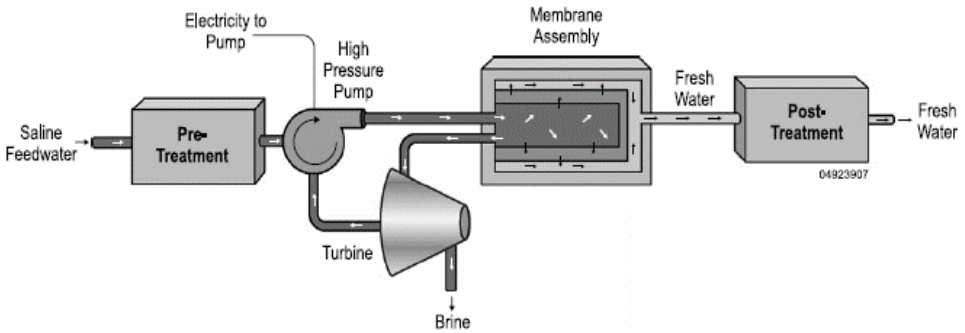
٤. نتیجه‌گیری

صنعت شیرین‌سازی آب به‌دلیل افزایش کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان، افزایش جمعیت و رشد اقتصاد و صنعت همچنان رشد می‌کند. فناوری‌های شیرین‌سازی آب در دهه‌های گذشته شاهد توسعهٔ مکرر هم در بخش طراحی سیستم‌ها و هم در بخش بهبود عملکردها بوده است که منجر به صرفه‌جویی زیادی در مصرف توان و کاهش هزینهٔ تولید آب گشته است. در سال ۱۹۶۰ م، هزینهٔ تولید آب حدود ۱۰ دلار امریکا به ازای هر متر مکعب بوده است که به تازگی با استفاده از دو فناوری پرکاربرد در این زمینه (RO و MSF) تا کمتر از ۰/۶ دلار امریکا به ازای هر متر مکعب رسیده است. انتخاب فناوری مناسب براساس چند فاکتور صورت می‌پذیرد که عبارت‌اند از شرایط خاص منطقه‌ای، نوع و کیفیت آب تغذیه، میزان دسترسی و مصرف انرژی، مسائل اقتصادی و آثار زیست محیطی. مصرف انرژی و هزینهٔ تولید آب در شیرین‌سازی آب دریا به روش اسمز معکوس از سایر روش‌ها کمتر است که این مسئله به‌خاطر پیشرفت فناوری در ساخت غشاء، بازده بالا در تجهیزات بازیابی و پمپ‌های پربازده‌تر، کنترل بهتر رسوب‌گذاری و بهبود فرایندهاست. روش‌های اسمز معکوس و الکترودیالیز اقتصادی‌ترین روش‌ها برای نمک‌زدایی از آب دریا هستند. عموماً روش اسمز معکوس در مواردی که ذرات نامحلول بیش از ۵۰۰۰ ذره بر میلیون باشد از لحاظ هزینهٔ تمام‌شده پربازده‌تر است، در حالی‌که

روش الکترودیالیز در مواردی که ذرات نامحلول کمتر از ۵۰۰۰ ذره بر میلیون باشد، پربازده‌تراست [۹]. تمامی فرایندهای شیرین‌سازی آب به‌دلیل مصرف زیاد انرژی و تخلیهٔ شورآب، اثار نامطلوبی بر محیط زیست دارند که با به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در فرایندهای نمک‌زدایی می‌توان این آثار نامطلوب را تا حدی کاهش داد. اگرچه هزینه‌های تولید آب از واحدهای آب‌شیرین‌کن کوپل شده با انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسهٔ واحدهای آب‌شیرین‌کن مرسوم بسیار بیشتر است، اما تا حدودی با مزایای زیست محیطی تعدیل می‌شود. هزینهٔ بالای تولید آب به‌کمک انرژی‌های تجدیدپذیر سبب شده تا این سیستم‌ها تنها در مناطق روستایی، که به شبکهٔ برق منطقه‌ای دسترسی نداشته و کمبود آب مهمترین معضل و انرژی بادی و خورشیدی نیز مناسب است، به‌کار روند. با پیشرفت فناوری، در آینده هزینهٔ سرمایه‌گذاری کاهش خواهد یافت و واقعی خواهد شد و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با قیمت معقولی در بازار عرضه خواهند شد تا بازار شاهد کاهش قابل توجهی در هزینهٔ تولید آب باشد.



شکل ۳. نمایی شماتیک از عملکرد روش اسمز معکوس



شکل ٤. نمایی از روش اسمز معکوس [۲]

۵. مآخذ

[1] Ghaffour, N., T. M. Missimer, G. L. Amy. "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability." *Desalination*, Volume 309, January 2013, pp. 197-207.

[2] "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 24, 2013, pp. 343-356.

[3] Eslamimanesh, A., M. S. Hatamipour, "Economical study of a small-scale direct contact humidification–dehumidification desalination plant". *Desalination*, Volume 250, 2010, pp. 203-207.

[۴] امامی میبدی، علی. "اقتصاد انرژی"، دانشکدهٔ اقتصاد دانشگاه علامه طباطبایی.

[5] Reddy, K.V, N. Ghaffour, "Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies." *Desalination*, Volume 205, 2007, pp. 340-353.

[6] Ioannis, C. Karagiannis, Petros G. Soldatos, "Water desalination cost literature: review and assessment". *Desalination*, Volume 223, Issues 1-3, March 2008, pp. 448-456.

[7] Georgopoulou, E., A. Kotronarou, "A methodology to investigate brackish groundwater desalination coupled with aquifer recharge by treated wastewater as an alternative strategy for water supply in Mediterranean areas". *Desalination*, Volume 136, 2001, pp. 307-315.

[8] IDA Desalination Yearbook 2008-2009.

[9] Sharaf, M. A., A. S. Nafey, "Exergy and thermo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process". *Desalination*, Volume 272, May 2011, pp. 135-147.

[10] Mezher, T., H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, "Techno-economic assessment and environment impacts of desalination technologies." *Desalination*, Volume 266, Issues 1-3, January 2011, pp. 263-273.

[11] Gasmi, A., J. Belgaieb, N. Hajji, "Technico-economic study of an industrial reverse osmosis desalination unit." *Desalination*, Volume 261, 2010, pp. 175-180.

[12] Al_Hallaj, S., S. Parekh, M. M. Farid, J. R. Selman, "Solar desalination with humidification–dehumidification cycle: Review of economics". *Desalination*, Volume 195, 2006, pp. 169-186.

پی‌نوشت

1. RO
2. MSF
3. MED
4. MVC
5. micro filtration
6. ultra filtration
7. nano filtration
8. reverse osmosis
9. humidification-dehumidification