بررسی و مقایسه گزینه های رقیب تولید آب شیرین در کشور با هدف تعیین استراتژی توسعه فناوری مناسب

محمد ابراهیم سربندی فراهانی، حسین رضازاده

پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده تولید نیرو، گروه بهره برداری

hrezazadeh@nri.ac.ir - **efarahani@nri.ac.ir**

چکیده — در این مقاله به بررسی و مقایسه گزینه های رقیب تولید آب شیرین در کشور با هدف تعیین استراتژی توسعه فناوری مناسب پرداخته شده است. در این راستا بررسی قیمت تمام شده آب شیرین تولیدی به روشهای اسمز معکوس و تبخیری در واحدهای گازی ساده و سیکل ترکیبی در دستور کار قرار گرفته است. برای این منظور سناریو های مختلف تولید همزمان برق و آب شیرین مدلسازی و نتایج خروجی از آن بر اساس محاسبه جریان وجوه و هزینه ها و شاخص های مختلف اقتصادی هر یک از طرح ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. محاسبات با در نظر گرفتن دو سناریوی قرار دادن مرزهای جریان وجوه بر روی واحد تولید آب شیرین و یا بر روی مجموعه تولید همزمان آب و برق صورت گرفته است.

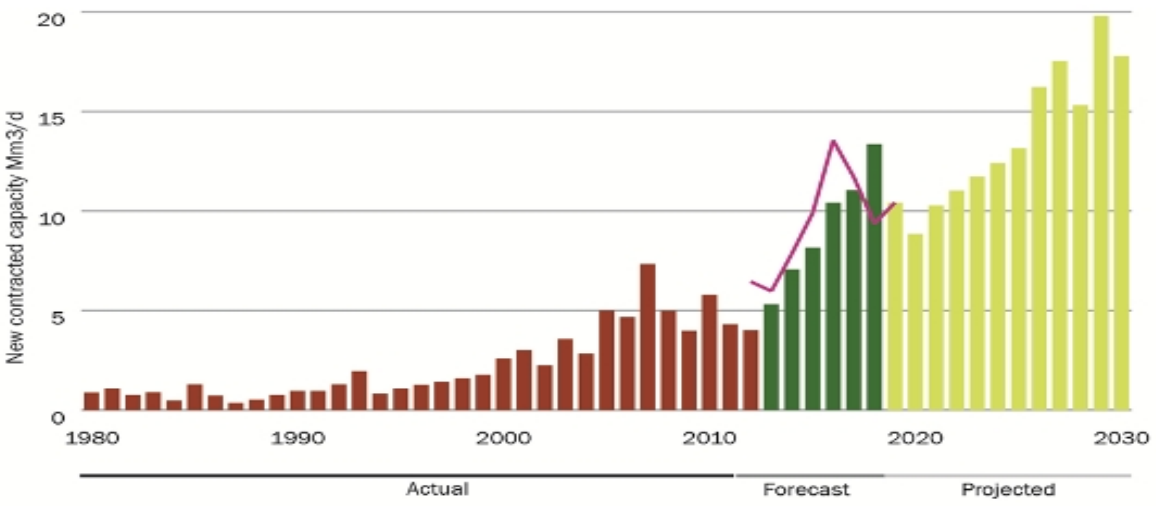
واژه‌های کلیدی — آب شیرین کن، تولید همزمان، قیمت تمام شده، اسمز معکوس، تبخیری

۱ -مقدمه

نیاز به آب در سرتاسر دنیا هم به دلیل رشد جمعیت و هم به دلیل رشد صنعت به طور فزاینده ای افزایش یافته است و منابع آب به سرعت در حال تهی شدن می باشند. از سال ۱۹۹۰ بیش از ۸۰ کشور با مشکل کمبود آب مواجه هستند و تنها راه حل، استفاده از تکنیکهای آب شیرین کن است که می تواند راه گشای مشکلات کمبود آب باشد. از این رو همان طور که در شکل (۱) دیده می‌شود ظرفیت کل کارخانه‌های آب شیرین کن در سال های اخیر در سطح جهان با رشد فزاینده‌ای رو به رو شده است و پیش بینی می‌شود این افزایش رشد همچنان ادامه داشته باشد.

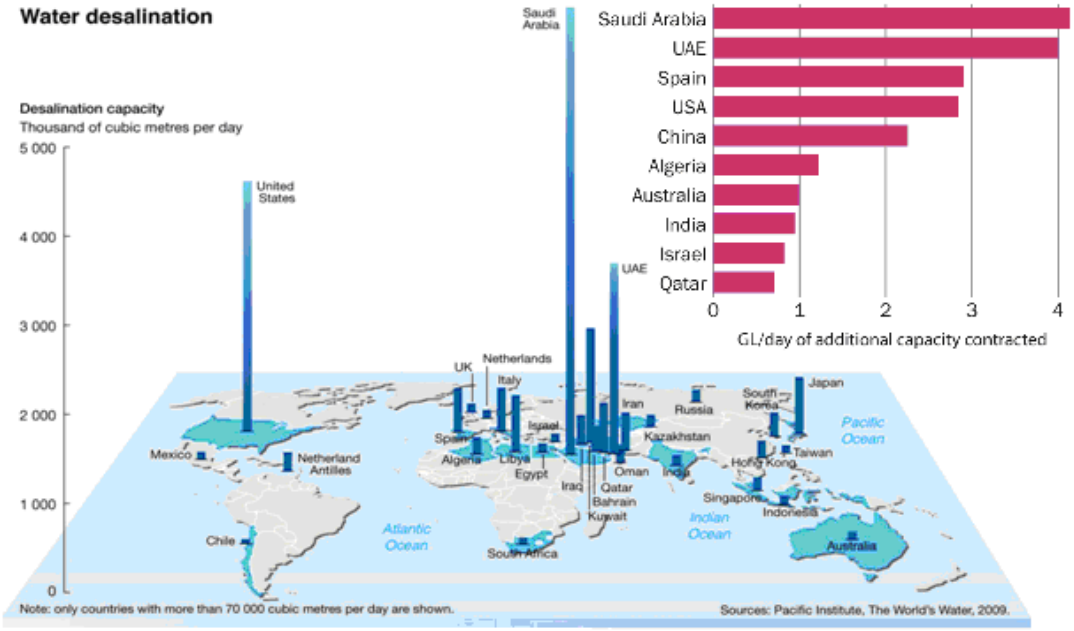
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۱): روند توسعه ظرفیت کل کارخانه‌های آب شیرین کن در سطح جهان [۱]

شکل (۲) پراکندگی کارخانه های آب شیرین کن در سطح جهان را به همراه ظرفیت کل کشورهایی که تا سال ۲۰۱۱ دارای بیشترین ظرفیت آب شیرین کن جهان بودند، به تصویر کشیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود خاورمیانه، بزرگ ترین بازار شیرین‌سازی آب دریا می باشد و عربستان صعودی با ۱۷ درصد بیشترین ظرفیت آب شیرین کن جهان را در اختیار دارد [۲].

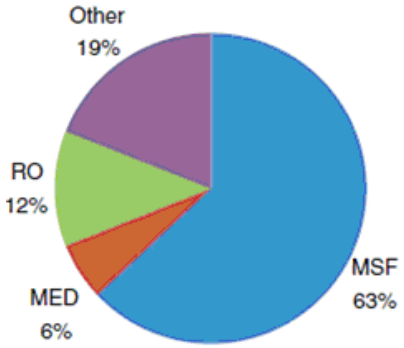


شکل (۲): پراکندگی کارخانه های آب شیرین کن در سطح جهان

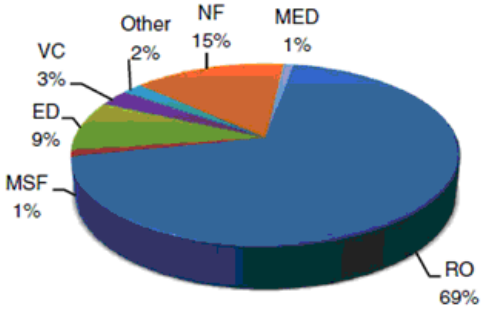
www.SID.ir

روشهای تبخیری در مناطقی نظیر خاورمیانه که منابع انرژی عظیمی وجود دارد، معمول می باشند. طی نیم قرن اخیر با ورود سیستمهای اسمز معکوس به بازار نمک‌زدایی از آب این صنعت متحول گردیده است و در اکثر کشورهای غربی روش غالب شیرین‌سازی آب محسوب می‌شود. شکلهای (۳) و (۴) توزیع روش های مختلف آب شیرین کن در کشورهای آمریکا و امارات را با هم مقایسه می کند. همانطور که ملاحظه می‌شود در آمریکا روش RO و در امارات روش MSF غالب هستند.

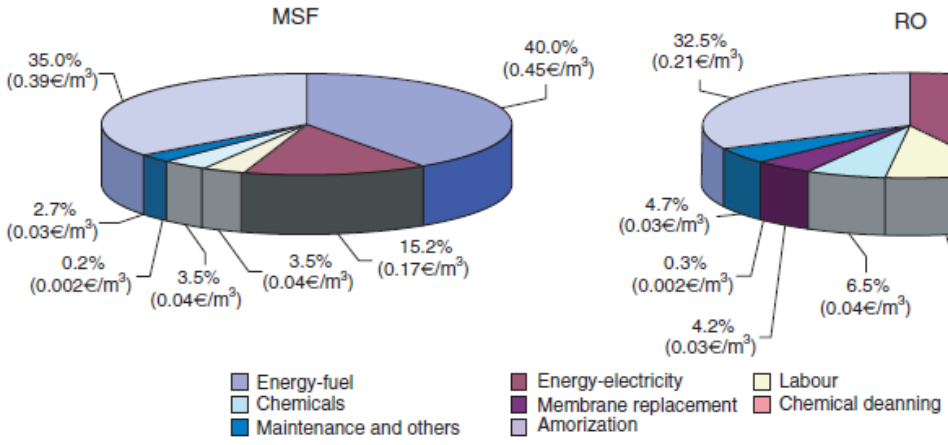
بهبود فناوری روش اسمز معکوس در سالهای اخیر استفاده از این فناوری را در کشورهای واقع در خاورمیانه جذاب نموده است. به گونه‌ای که بخش مهمی از ظرفیت های جدید تولید آب شیرین در خاور میانه بر مبنای استفاده از فناوری اسمز معکوس بنیان گذاشته شده است. در روشهای حرارتی و به ویژه روش MSF با افزایش ظرفیت واحد هزینه‌های تعمیر و نگهداری و سرمایه اولیه به صورت توانی کاهش می یابند در حالی که هزینه انرژی مصرفی مستقل از این پارامتر است. در روش RO نیز میزان سرمایه مورد نیاز بر واحد آب تولیدی، به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش ظرفیت طرح کاهش پیدا می کند البته هزینه‌های O&M با شدت بسیار کمتری نسبت به سرمایه اولیه کاهش خواهد یافت. به عبارتی هر چه واحد غشایی کوچکتر باشد, هزینه های O&M و به ویژه تعویض غشاها درصد بیشتری از هزینه‌های کلی را به خود اختصاص خواهد داد.



شکل(۳): توزیع روشهای مختلف آب شیرین‌کن در امارات[۲]



شکل(۴): توزیع روشهای مختلف آب شیرین‌کن در آمریکا [۲]



شکل (۵): مراکز هزینه واحد تولید آب شیرین به روش های MSF و RO [۳]

www.SID.ir

۲ -مقایسه فنی و اقتصادی تولید آب شیرین به روشهای مختلف

در بررسی حاضر روشهای تولید آب شیرین تبخیری MED و MSF و روش RO به صورت تولید همزمان در نیروگاه سیکل ترکیبی و سیکل گاز ساده برای مدلهای V94.2 و Frame5 مورد مقایسه قرار گرفته است. علاوه بر این تولید آب شیرین با استفاده از برق ناشی از منابع تجدید پذیر (خورشیدی) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تحلیل های لازم بر روی عوامل تاثیرگذار بر روی اقتصاد تولید آب و برق انجام شده است. در این راستا مدل ترمودینامیکی برای هر یک از حالت های گفته شده در نرم افزار ترموفلو ساخته شده و از خروجی نرم افزار برای داده های مورد نیاز در مدل اقتصادی تهیه شده به این منظور استفاده شده است. در این پژوهش برای محاسبه قیمت تمام شده آب شیرین مدل ترمودینامیکی برای هر روش در نرم افزار ترموفلو ساخته شده است. علاوه بر این بر اساس ملاحظات مدون شده توسط دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی نسبت به تهیه مدل فنی و اقتصادی در قالب فایل اکسل اقدام گردید. با فراهم شدن امکانات پیش گفته، خروجی نرم افزار ترموفلو به همراه فایل محاسباتی اکسل برای محاسبه قیمت تمام شده در هر روش مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه نیروگاه تولید همزمان برق و آب دارای دو محصول خروجی می باشد برای محاسبه قیمت تمام شده دو حالت برای محاسبات می تواند در نظر گرفته شود.

۲-۱ مرزهای ورودی و خروجی جریان وجوه بر روی آب شیرین کن

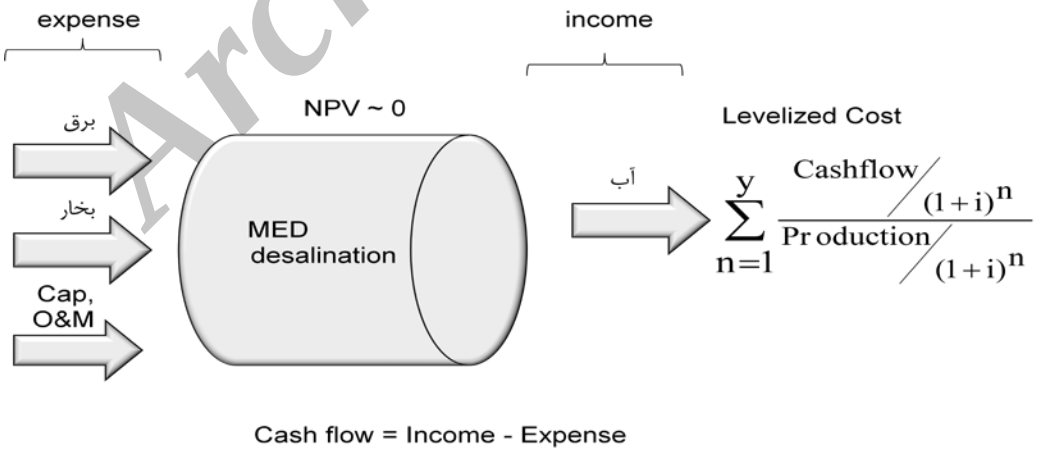
در این حالت در نیروگاه تولید همزمان مرزهای ورودی و خروجی جریان وجوه فقط بر روی آب شیرین کن قرار داده می شود. به این ترتیب جریان هزینه ها و جریان درآمدها به صورت زیر خواهد بود

الف) جریان هزینه ها:

- هزینه برق مصرفی
- هزینه بخار مصرفی
- هزینه سرمایه گذاری اولیه
- هزینه نگهداری و تعمیرات

ب) جریان درآمدها

- درآمد حاصل از فروش آب



شکل (۶) جریان هزینه ها و درآمدها برای واحد تولید آب شیرین

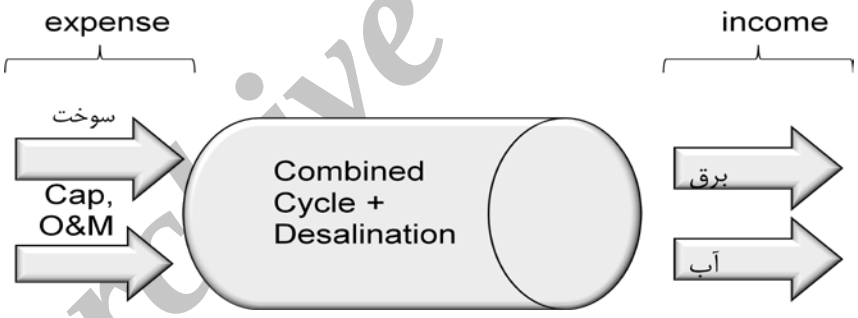
در حالت فوق هزینه برق مصرفی برابر قیمت تمام شده برق در نیروگاه می باشد. اما قیمت بخار مصرفی می بایست محاسبه شود. با توجه به اینکه برای تهیه بخار مصرفی از دود خروجی از توربین گاز استفاده شده است می بایست برای ارزش حرارتی

Archive of SID

www.SID.ir

دود خروجی از توربین گاز مورد محاسبه قرار گرفته و یا در مواردی که این دود هیچ کاربردی ندارد ارزش دود برابر صفر لحاظ گردد. واضح است که در نظر گرفتن ارزش صفر برای دود خروجی به جز برای توربین های گاز قدیمی در حال کار نظیر واحدهای فرسوده F5 که برنامه برای تبدیل آنها به سیکل ترکیبی وجود ندارد فرض صحیحی نمی باشد و منجر به نتایج غیر واقعی برای قیمت تمام شده آب می گردد. برای باقی موارد می بایست از ارزش دود خروجی توربین گاز تخمین مناسبی وجود داشته باشد.

۲-۲- مرزهای ورودی و خروجی جریان وجوه بر روی کل نیروگاه تولید همزمان آب و برق



شکل شماره (۷) جریان هزینه ها و درآمدها برای واحد تولید همزمان

در این حالت با توجه به اینکه مرزهای جریان وجوه بر روی کل نیروگاه قرار می گیرد، هزینه بخار مصرفی و هزینه سرمایه گذاری مشترک برای آب و برق از ورودی حذف شده است و جریان هزینه های ورودی های نیروگاه معلوم می باشند. اما با توجه به اینکه محصول خروجی نیروگاه هم آب و هم برق می باشد امکان محاسبه قیمت تمام شده از رابطه levelized cost وجود ندارد. لذا در این حالت شاخص مورد استفاده برای تصمیم گیری در خصوص انتخاب طرح برتر می بایست نرخ بازگشت داخلی IRR و یا در صورتی که هزینه های سرمایه گذاری اولیه یکسان باشند NPV باشد که در این صورت با توجه به وارد شدن درآمدهای حاصل از فروش آب و برق در محاسبات، نتیجه حاصله متفاوت از هزینه انجام شده برای تولید هر مترمکعب آب خواهد بود.

در اینجا برای خارج کردن درآمدهای فروش از محاسبات و پیدا کردن عددی از جنس هزینه تمام شده برای تولید هر متر مکعب آب تخمین زیر به کار گرفته شده است به این صورت که ابتدا با مدلسازی یک بلوک سیکل ترکیبی در شرایط ایزو جریان وجوه و در این حالت مرزهای ورودی و خروجی جریان وجوه بر روی کل نیروگاه تولید همزمان آب و برق قرار داده می شود و جریان وجوه به صورت زیر خواهد بود:

الف) جریان هزینه ها:

هزینه سوخت مصرفی

هزینه سرمایه گذاری اولیه

هزینه نگهداری و تعمیرات

ب) جریان درآمدها

درآمد حاصل از فروش آب

درآمد حاصل از فروش برق

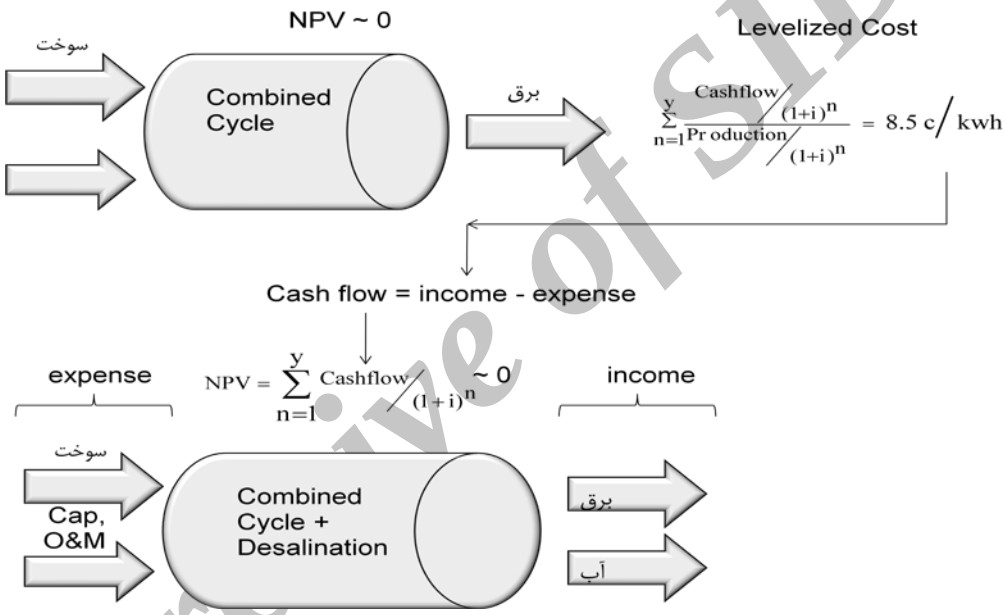
Archive of SID

www.SID.ir

NPV برای دوره بهره برداری ۲۰ ساله طرح با نرخ تنزیل ۱۲٪ محاسبه می شود و قیمت تمام شده برق برای بلوک سیکل ترکیبی محاسبه می گردد. در این حالت قیمت تمام شده برق برای سیکل ترکیبی با مفروضات داده شده برابر ۸.۵ cent/kwh خواهد بود که اگر برق تولیدی نیروگاه به این قیمت فروخته شود NPV نیروگاه در طول دوره بهره برداری عددی نزدیک به صفر خواهد شد.

چنانچه در نیروگاه سیکل ترکیبی فوق هزینه اضافه تری برای تولید آب شیرین انجام شود هزینه سرمایه گذاری و نگهداری و تعمیرات در جریان هزینه ها نسبت به حالت سیکل ترکیبی افزایش می یابد و میزان تولید برق و به تبع آن جریان درآمدها از این محل کاهش می یابد. لذا قیمت تمام شده تولید آب برابر عددی است که بتواند IRR نیروگاه تولید همزمان را با فروش برق به قیمت 8.5 cent/kwh مانند حالت سیکل ترکیبی به 12% برساند.

عددی که در این حالت برای فروش آب به دست می آید تخمینی از هزینه تولید هر مترمکعب آب برای سرمایه گذار می باشد و بدون در نظر گرفتن درآمدهای فروش برق بوده و معادل levelized cost می باشد.

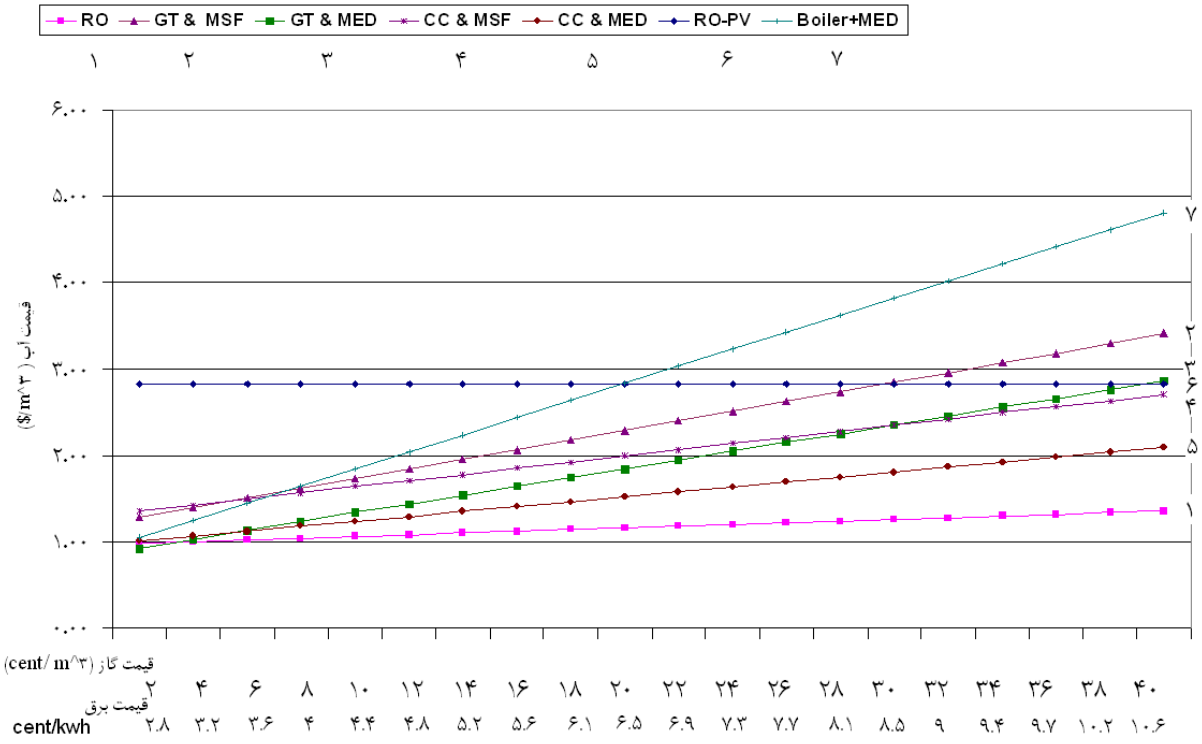


شکل شماره (۸) محاسبه قیمت تمام شده آب تولیدی در واحد تولید همزمان

نتایج حاصل از این محاسبات با انجام آنالیز حساسیت نرخ گاز از ۲ تا ۴۰ سنت در شکل شماره (۹) نشان داده شده است.(علایم اختصاری مندرج در نمودار توضیح داده شود خورشیدی اضافه شود) همانطور که مشاهده می شود تولید آب به روش RO تقریبا برای تمامی قیمت های سوخت گاز به جز حالتی که سوخت بسیار ارزان باشد نسبت به آب شیرین کن های تبخیری ارجحیت دارد. تحلیل حساسیت نشان می دهد با افزایش قیمت سوخت فاصله قیمت تمام شده آب برای حالت های تبخیری نسبت به روش RO بیشتر می شود. این مساله با توجه به مصرف انرژی بالا در روشهای تبخیری منطقی می باشد. در نمودار زیر هزینه آب تولید شده با استفاده از برق تولید شده در سلول های خورشیدی با احتساب هزینه برق برابر ۴۱ cent/kwh محاسبه شده است . نمودار نشان می دهد درصورتی که هزینه گاز مصرفی به ۴۰ سنت برای هر متر مکعب افزایش یابد حالت RO PV از GT&MED پیشی میگیرد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل شماره(۹) تحلیل حساسیت قیمت آب بر اساس نرخ گاز (قیمت برق متناظر با قیمت گاز در نیروگاه سیکل ترکیبی در شرایط ایزو محاسبه شده است).

Archive of SID

[1] CC: Combined Cycle, GT: Gas Turbine, MSF: Multi Stage Flash, MED: Multiple Effects Desalination, RO: Reverse Osmosis, PV: Photovoltaic

www.SID.ir

در جدول شماره (۱) مشخصات خلاصه طرح های مورد اشاره آورده شده است. همچنین قیمت فروش آب برای رسیدن به IRR = 12% با فرض قیمت فروش برق برای سه مقدار ۵ ، ۱۰ و ۱۵ سنت نشان داده شده است. با توجه به اینکه قیمت تمام شده برق تولیدی در واحد سیکل ترکیبی با گاز ۳۰ سنت در شرایط ایزو تقریبا برابر ۸.۵ سنت می باشد لذا فرض فروش برق به قیمت بالاتر از ۱۰ سنت منجر به حاصل شدن قیمت های منفی برای فروش آب جهت رسیدن به نرخ IRR =12% برای کل طرح تولید همزمان می گردد.

جدول شماره (۱) خلاصه مشخصات طرح های مختلف

2XV94 CC+ RO	2XV94 CC+ MED	1XF5 + MED	2x V94.2 + MED	2x V94.2 + MSF	
100,000	115,000	14,000	144,000	143,000	ظرفیت تولید آب m3/d
447	400	23	308	295	ظرفیت تولید برق MW
5.20	1.40	1.40	1.40	3.75	برق مصرفی kwh/m^3
-	8.14	8.14	8.14	8.50	Performance Ratio kg/2325.9 kj
1,100	1,100	1,300	1,100	1,570	هزینه سرمایه گذاری آب شیرین کن $/ (m3/d)
670	670	550	540	540	هزینه سرمایه گذاری تولید برق $/kw
455,000	457,000	60,000	395,000	475,000	کل هزینه سرمایه گذاری ۱۰۰۰ $
قیمت فروش آب برای رسیدن به IRR =۱۲٪ با فرض قیمت گاز ۳۰cent/m^۳ ($ / m^۳)					قیمت فروش برق به شبکه cent/kwh
-5.79	-3.65	1.35	-1.01	-0.41	15
-0.39	0.52	3.30	1.56	2.07	10
4.80	4.69	5.26	4.12	4.54	5

۳ –جمع بندی

در محاسبات نشان داده شده با توجه به نکات ذکر شده در مورد محاسبه قیمت تمام شده یک محصول در یک واحد تولیدی که با انجام هزینه مشترک برای محصولات خروجی دارای دو محصول خروجی می باشد با توجه به ممکن نبودن محاسبه قیمت تمام شده، از روش مقایسه NPV طرح های آب شیرین کن با NPV طرح سیکل ترکیبی استفاده شده است.

هرچند این روش محاسبات با تقریب مناسبی قیمت تمام شده آب را محاسبه می نماید اما خالی از خطا نمی باشد. درواقع برای چنین طرح هایی که محصول خروجی نیروگاه بیشتر از یک محصول می باشد. نرخ بازگشت داخلی کل طرح می تواند معیار مناسب تری برای تصمیم گیری باشد. در این مطالعه برای حالت های مختلف تولید آب شیرین با فرض قیمت فروش برق شبکه برابر قیمت تمام شده تولید برق در نیروگاه سیکل ترکیبی محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد روش RO پایین ترین هزینه تولید آب شیرین را دارد پس از آن به ترتیب تولید آب

www.SID.ir

شیرین در نیروگاه سیکل ترکیبی و واحد گازی ساده و در نهایت بیشترین هزینه تولید مربوط به واحد تولید آب شیرین تک منظوره خواهد بود. در همه موارد در قیمت های پایین گاز مصرفی اختلاف هزینه تولید آ فاحش نمی باشد اما با افزایش قیمت گاز این اختلاف قابل توجه می شود. همچنین تولید آب با استفاده از برق تولیدی در نیروگاه فتوولتائیک با توجه به قیمت تمام شده بالای برق تنها در قیمت های گاز بالای ۴۰ سنت می تواند با روشهای دیگر قابل رقابت باشد.

منابع

[1] L. Henthorne, "The Current State of Desalination," IDA - The State of Desalination, 2011

[2] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, "Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies" Desalination, V. 266, pp. 263–273, 2011

[3] X. Bernat, O. Gibert, R. Guiu , J. Tobella, C. Campos, " The economics of desalination for various uses," CHAPTER 18

[4] P.Pacenti et al., "Submarine seawater reverse desalination system," Desalination, V. 126, 1999

[5] M. Al-Shammiri, M.Safar, "Multi-effect distillation plants: state of the art," Desalination, V. 126, 1999

[6] J.E. Miller, "Review of Water Resources and Desalination Technology," Materials Chemistry Department Sandia National Laboratories, 2003

Archive of SID

www.SID.ir