



## بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای نمک‌زدایی با استفاده از مبدل حرارتی

سوراب نوادی<sup>۱</sup>، کیوان اعدادی<sup>۲</sup>، تورج خلیلی پروجی<sup>۳</sup>، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب  
چکیده

افزایش دمای نفت نمکی در اثر کاهش گرانیوی نفت، عامل بسیار مهمی جهت تسریع جداسازی آب شور از نفت خام محسوب می‌شود. در فرآیند نمک‌زدایی گرمکن‌های مشعل‌دار جهت گرمایش نفت نمکی استفاده می‌شوند. امروزه استفاده از مبدل حرارتی جهت بازیافت انرژی حرارتی و در نتیجه بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش افت ارزش نفت و کاهش هزروزی، امری ضروری تلقی می‌شود.

در این مقاله میزان صرفه‌جویی مصرف انرژی ناشی از نصب مبدل حرارتی با استفاده از داده‌های عملیاتی واحدهای نمک‌زدایی شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مبدل حرارتی در واحدهای نمک‌زدایی به‌طور میانگین منجر به کاهش ۳۰ درصدی مصرف سوخت خواهد شد. همچنین با توجه به واحدهای موجود و پروژه‌های جاری، واحدهای نمک‌زدایی شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب سالیانه حدود ۶۲۰ میلیارد ریال صرفه‌جویی اقتصادی به‌همراه دارند.

واژگان کلیدی: نفت خام نمکی<sup>۱</sup>، آب شور، نمک‌زدایی<sup>۲</sup>، گرمکن مشعل‌دار<sup>۳</sup>، مبدل حرارتی<sup>۴</sup>

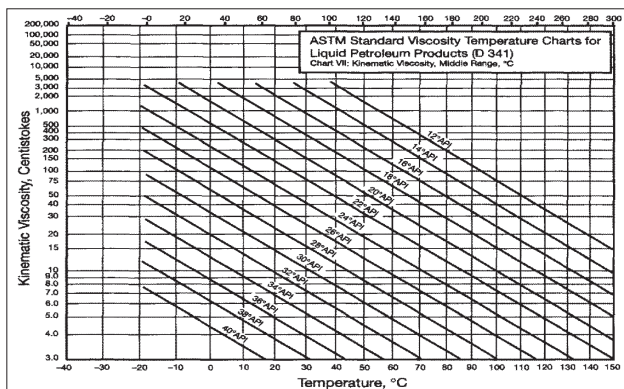
### مقدمه

### ۱- اثرات دما در فرآیند آب‌گیری<sup>۱</sup> و نمک‌زدایی

به‌طور کلی افزایش دما اثر مثبتی بر سرعت جداسازی آب شور از نفت خام دارد. اما افزایش بیش از حد دما اثراتی منفی بر کمیت و کیفیت نفت خام بر جای می‌گذارد. بنابراین شرایط بهینه‌ی افزایش دما باید در هر مرحله کنترل گردد.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱- نشان داده شده افزایش دمای نفت خام سبب کاهش گرانیوی فاز پیوسته‌ی نفت خام و در نتیجه افزایش سرعت ته‌نشینی قطرات فاز ناپیوسته‌ی آب شور می‌شود [۲]. از دیگر اثرات مثبت افزایش دما، افزایش حرکت برنولی و جابجایی آزاد فاز ناپیوسته‌ی آب شور و همچنین ضعیف شدن پیوند بین لایه‌ها و ذوب شدن پارافین‌ها و جامدهای پایدارکننده‌ی امولسیون اطراف قطرات آب

از جمله مشکلات وجود آب شور در نفت خام تولیدی می‌توان به افزایش هزینه‌های حمل و نقل دریایی، انتقال توسط پمپ، کاهش ارزش تجاری نفت خام و همچنین افزایش خوردگی و گرفتگی تجهیزات فرآیندی در پایین دست اشاره کرد [۱]. بنابراین جداسازی آب شور از نفت خام قبل از ارسال آن به پالایشگاه‌ها یا پایانه‌های صادراتی ضروری است. روش مرسوم جداسازی آب همراه نفت، ته‌نشینی ثقلی است که بر اساس اختلاف چگالی فازهای آب و نفت صورت می‌گیرد. عوامل مؤثر بر افزایش سرعت جداسازی آب از نفت کاهش گرانیوی فاز پیوسته‌ی نفت و افزایش اندازه‌ی قطرات فاز غیر پیوسته‌ی آب است. فرآیندهای مورد استفاده در واحدهای نمک‌زدایی با تغییر کمیت این متغیرهای مؤثر، منجر به افزایش سرعت ته‌نشینی می‌شوند. تجهیزات اصلی فرآیندی مورد استفاده در واحدهای نمک‌زدایی شامل مخازن ته‌نشینی ثقلی (جهت افزایش زمان ماند)، نمک‌گیرهای برقی (جهت به‌هم پیوستگی اجباری قطرات فاز غیر پیوسته‌ی آبی و افزایش اندازه‌ی قطرات از طریق اعمال میدان الکتریکی) و تجهیزات حرارتی نظیر مبدل‌ها و گرمکن‌ها (جهت کاهش گرانیوی فاز پیوسته از طریق افزایش دمای سیال) است. لازم به‌ذکر است با توجه به تشکیل لایه‌های مزاحم آسفالتینی و رزینی در اطراف قطرات آب همراه معلق در نفت، افزودن مواد شیمیایی تعلیق‌شکن<sup>۲</sup> نیز یکی از الزامات عملیات آب‌گیری و نمک‌زدایی تلقی می‌شود.



شکل ۱ | تاثیر دمای نفت بر گرانیوی سبب‌نماتیک نفت خام [۲]

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (keyvan\_eghtedary@yahoo.co.uk)

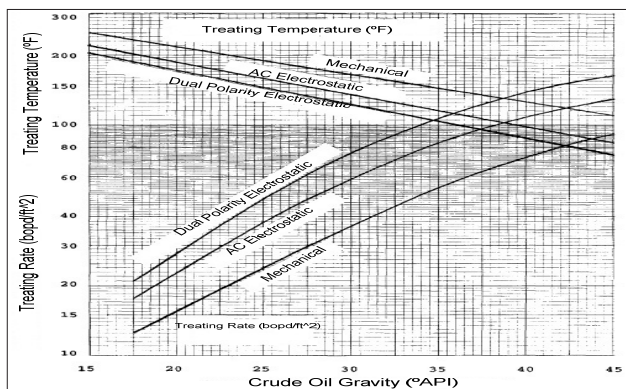
بهبودسازی انرژی و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و همچنین جلوگیری از افت کمیّت و کیفیت نفت، در دو بخش نفت و آب علاوه بر گرمکن از مبدل حرارتی نیز استفاده می‌شود. در همین راستا همه‌ی واحدهای قدیمی نیز مجهز به مبدل حرارتی شده‌اند. در شکل ۴- شمای کلی واحدهای نمک‌زدایی قدیم و جدید نشان داده شده است.

### ۳- گرمکن‌های مشعل‌دار

اساس کار گرمکن‌های مشعل‌دار انتقال گرمای همراه محصولات حاصل از احتراق گاز سوخت به سیال فرآیندی است. بازدهی انتقال حرارت این گرمکن‌ها حدود ۸۰ درصد است که به‌طور عمده از طریق تابش و همرفت انجام می‌شود و حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد انتقال حرارت توسط مکانیسم تابش است. به‌طور کلی گرمکن‌ها دو نوع شعله مستقیم<sup>۱۱</sup> و شعله غیرمستقیم<sup>۱۲</sup> هستند. در گرمکن‌های شعله مستقیم گرمای حاصل از احتراق مستقیماً به سیال فرآیندی منتقل می‌شود و در گرمکن‌های شعله غیرمستقیم گرمای حاصل از احتراق از طریق سیالی واسطه به سیال فرآیندی منتقل می‌گردد [۳].

در واحدهای قدیم نمک‌زدایی مناطق نفت‌خیز جنوب گرمایش نفت فقط توسط گرمکن‌های شعله مستقیم صورت می‌گرفت که با وجود بازده مناسب، به‌علت مشکلات عملیاتی و هزینه‌های فراوان تعمیر و نگهداری، این گرمکن‌ها به تدریج جای خود را به گرمکن‌های شعله غیرمستقیم دادند. در تمامی واحدهای نمک‌زدایی جدید نیز از گرمکن شعله غیرمستقیم استفاده می‌شود. گرمکن‌های شعله غیرمستقیم مورد استفاده در مناطق نفت‌خیز جنوب از سازندگانمانند GASTECH، ICE، PETROTECHNA، FLARETEC، PETROCOMPANY، TERMO ENGINEERING، SECEC تأمین شده است.

لازم به ذکر است که عملیات گرمایش نفت نمکی در واحدهای نمک‌زدایی پس از جداسازی آب آزاد و قبل از ورود به نمک‌گیر برقی



شکل ۳ | دمای بهینه برای فرآیند نمک‌زدایی در انواع تجهیزات فرآیندی [۱]

و در نتیجه افزایش سرعت ته‌نشینی است [۱]. از اثرات منفی افزایش دما می‌توان به افزایش افت درجه‌ی API نفت<sup>۹</sup> و افزایش افت حجم نفت<sup>۱۰</sup> در اثر تبخیر شدن ترکیبات سبک‌تر هیدروکربنی اشاره کرد. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۲- نشان داده شده با افزایش دمای نفت، افت درجه‌ی API و افت حجم نفت افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به نوع نفت، میزان تغییرات مذکور متفاوت است.

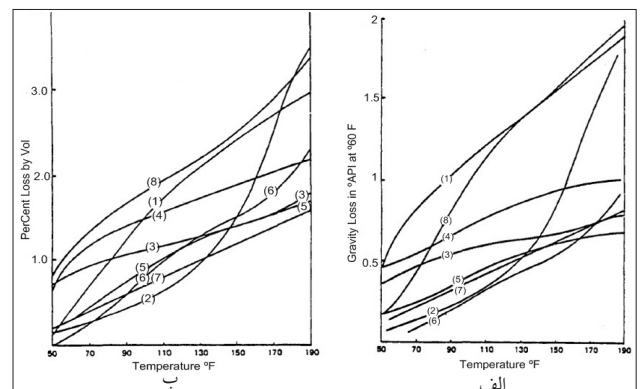
- 38.0° API Mid-Continent Crude
- 34.2° API West Texas Composite
- 32.0° API Southern Oklahoma
- 31.5° API Wyoming
- 28.6° API Sugerland, Texas
- 24.4° API Southern Louisiana
- 37.2° API Sprayberry, West Texas
- 33.3° API Mid-Continent Crude

با توجه به محدودیت‌های افزایش دمای نفت، دمای بهینه برای فرآیند نمک‌زدایی با توجه به نوع تجهیز و درجه‌ی API نفت‌خام از نمودار شکل ۳- تعیین می‌شود.

در واحدهای نمک‌زدایی مناطق نفت‌خیز جنوب، نفت‌خام قبل از ورود به نمک‌گیر برقی حداکثر تا دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم می‌شود.

### ۲- تجهیزات حرارتی مورد استفاده در واحدهای قدیم و جدید نمک‌زدایی

گرمایش نفت در واحدهای نمک‌زدایی قدیم فقط توسط گرمکن‌های مشعل‌دار انجام می‌شد. اما در واحدهای نمک‌زدایی جدید به‌منظور



شکل ۲ | تأثیر افزایش دمای نفت‌خام بر درجه‌ی API و حجم [۱]



می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴]:

- تعمیرات و نگهداری آنها از سایر انواع مبدل‌ها راحت‌تر است.
- از نظر نرخ سیال بسیار انعطاف‌پذیر هستند و می‌توان به راحتی تعداد صفحات آنها را کم یا زیاد کرد.
- برای مواد با گرانش زیاد مناسب هستند.
- اختلاف دمای سیال سرد و گرم جهت انتقال حرارت برای مبدل‌های صفحه‌ای یک درجه‌ی سانتی‌گراد است؛ در حالی که برای مبدل‌های پوسته و لوله ۵ تا ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد.
- گرفتگی میسر در این نوع مبدل‌ها کم است.
- رژیم جریان در این نوع مبدل‌ها از نوع جریان متقابل است.

جهت استفاده از این نوع مبدل باید به انتخاب جنس مناسب نشت‌بند از نظر مقاومت شیمیایی و حرارتی و همچنین فشار عملیاتی توجه شود. در شکل ۵- اجزای اصلی یک مبدل صفحه‌ای نشان داده شده است. مبدل‌های صفحه‌ای مورد استفاده در شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب مربوط به شرکت‌های ALFA LAVAL، GEA، SONDEX، CPT، APV، COOL SUMER، طاه‌ها قالب طوس و گرماگستر است.

انجام می‌شود. گرم کردن غیر ضروری آب همراه نفت که به سادگی و بدون عملیات گرمادهی قابل جداسازی است علاوه بر افزایش رسوب‌گذاری سیال در خطوط لوله و تجهیزات، سبب اتلاف زیاد انرژی نیز می‌شود. این شیوه‌ی طراحی سبب بهینه‌سازی قابل توجهی در مصرف انرژی می‌گردد؛ چراکه جهت گرم کردن یک پوند آب به اندازه‌ی یک درجه‌ی فارنهایت، حدود ۳۵۰ BTU انرژی مصرف می‌شود؛ در صورتی که این مقدار برای نفت خام برابر ۱۵۰ BTU خواهد بود [۱].

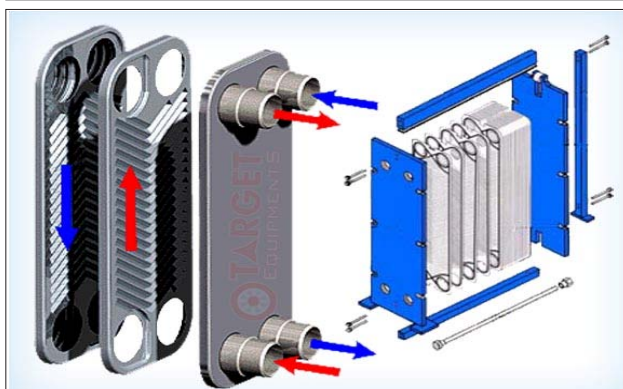
#### ۴- مبدل‌های حرارتی<sup>۱۳</sup>

به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای نمک‌زدایی می‌توان از گرمای نفت و آب خروجی از نمک‌گیر برقی که دمای آن حدود ۶۰ تا ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است جهت گرم کردن اولیه‌ی نفت نمکی و آب رقیق‌کننده‌ی ورودی استفاده کرد.

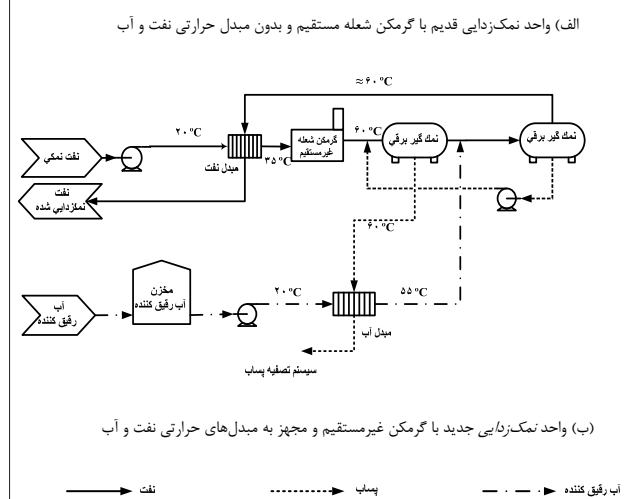
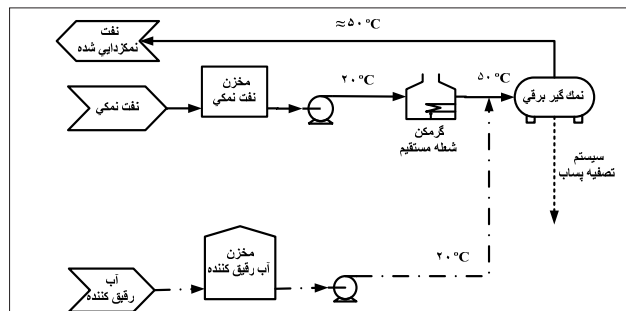
به‌طور کلی انواع مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در صنایع نفت و گاز شامل مبدل‌های دولوله‌ای<sup>۱۴</sup>، پوسته و لوله<sup>۱۵</sup> و صفحه‌ای<sup>۱۶</sup> هستند [۳]. در حال حاضر در واحدهای نمک‌زدایی مناطق نفت‌خیز جنوب از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای استفاده می‌شود. از جمله مزایای این مبدل‌ها

جدول ۱ | داده‌های میدانی واحدهای نمک‌زدایی شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون

$T_{eff}$	$T'_{H, Out}$	$T_{H, Out}$	$T'_{C, in}$	$T_{C, in}$	Q	
۸	۵۸	۵۰	۳۴	۲۰	۵۶	مارون-۱
۱۰	۵۸	۴۸	۳۶	۲۳	۶۳	مارون-۳
۹	۵۸	۴۹	۳۴	۲۴	۴۴	مارون-۴
۵	۵۸	۵۳	۳۸	۲۰	۵۳	مارون-۵
۷	۵۵	۴۸	۳۵	۲۱	۷۲	مارون-۶



شکل ۵ | اجزای اصلی مبدل حرارتی صفحه‌ای

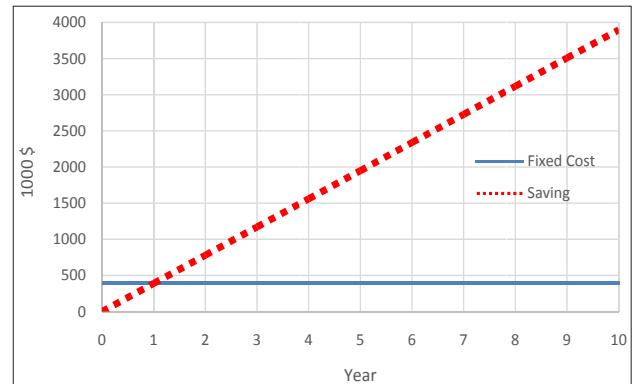


شکل ۴ | شمای کلی واحدهای نمک‌زدایی قدیم و جدید

### ۵- نقش مبدل حرارتی در بهینه‌سازی مصرف انرژی

همان‌گونه که در شکل ۴- نشان داده شده در واحدهای جدید نمک‌زدایی، انرژی حاصل از گرمایش نفت و آب همراه، قبل از خروج از واحد نمک‌زدایی در حد امکان توسط مبدل‌های حرارتی نفت و آب بازیافت می‌شود. در حالی که واحدهای قدیم نمک‌زدایی در طراحی اولیه فاقد مبدل حرارتی بودند و نفت ورودی به گرمکن‌ها دمای کمی داشت. در نتیجه میزان سرمایه‌گذاری اولیه و مصرف انرژی جهت افزایش دمای نفت تا دمای مدنظر به‌طور قابل ملاحظه‌ای زیاد بود.

با توجه به داده‌های میدانی جمع‌آوری شده‌ی مربوط به پروژه‌ی نصب مبدل‌های حرارتی واحدهای نمک‌زدایی شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون، اطلاعات و محاسبات مربوط به بهینه‌سازی مصرف انرژی حاصل از نصب مبدل حرارتی نفت و آب در جداول ۱- و ۲- ارائه شده است. جریان‌های گرم خروجی نمک‌زدایی شامل نفت نمک‌زدایی شده و پساب خروجی از نمک‌گیرهای برقی است که به ترتیب در مبدل نفت و مبدل آب با جریان‌های سرد ورودی شامل نفت نمکی و آب رقیق‌کننده تبادل حرارتی می‌کند. با نصب مبدل حرارتی، علاوه بر کاهش مصرف



شکل ۶ | دوره‌ی بازگشت سرمایه

انرژی، امکان افزایش دمای خروجی از گرمکن مشعل‌دار تا حدود ۸ درجه‌ی سانتی‌گراد نیز میسر شد.

- Q : MBbl/Day نرخ نفت (هزار بشکه در روز)  
 $T_{C,in}$  : [C] دمای نفت سرد ورودی به گرمکن بدون مبدل  
 $T'_{C,in}$  : [C] دمای نفت نیمه‌گرم ورودی به گرمکن با مبدل  
 $T_{H,Out}$  : [C] دمای نفت خروجی از گرمکن بدون مبدل  
 $T'_{H,Out}$  : [C] دمای نفت خروجی از گرمکن با مبدل  
 $T_{eff}$  : [C] افزایش دمای نفت خروجی از کوره با نصب مبدل

با توجه به داده‌های میدانی جدول ۱-، میزان مصرف و همچنین صرفه‌جویی روزانه‌ی گاز مورد نیاز محاسبه و در جدول ۲- درج شده است. مقادیر مذکور بر اساس اختلاف دمای نفت سرد ورودی به واحد نمک‌زدایی که بدون گرمایش وارد گرمکن می‌شود ( $T_{C,in}$ ) با نفت گرم خروجی از گرمکن ( $T'_{H,Out}$ ) به‌ازای یک درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش دما و برای هزار بشکه نفت خام محاسبه شده است.

- $T_{Dif}$  : [C] اختلاف دمای نفت ورودی و خروجی بدون مبدل  
 $T'_{Dif}$  : [C] اختلاف دمای نفت ورودی و خروجی با مبدل  
 $G$  : [(Sm<sup>3</sup>/C.Mbbl)] مصرف گاز بدون نصب مبدل  
 $G'$  : [(Sm<sup>3</sup>/C.Mbbl)] مصرف گاز با نصب مبدل  
 $G_S$  : [(Sm<sup>3</sup>/C.Mbbl)] صرفه‌جویی مصرف گاز با نصب مبدل

میزان مصرف و هزینه‌ی روزانه‌ی گاز سوخت برای یک واحد ۵۵ هزار بشکه در روز بر اساس اعداد میانگین مندرج در جدول ۲- محاسبه و در جدول ۳- درج شده است.

- $Q_G$  : [1000Sm<sup>3</sup>/Day] مصرف روزانه‌ی گاز سوخت گرمکن  
 $C_D$  : [Day/1000\$] هزینه‌ی روزانه‌ی مصرف سوخت

### ۶- محاسبات اقتصادی مربوط به نصب مبدل حرارتی

#### ۱-۶- دوره‌ی بازگشت سرمایه

دوره‌ی بازگشت سرمایه عبارت است از مدت زمانی که سرمایه‌ی

شکل ۲ | میزان صرفه‌جویی مصرف گاز سوخت بعد از نصب مبدل حرارتی

	GS	G'	G	$T'_{Dif}$	$T_{Dif}$	
مارون-۱	۳	۷	۱۰	۳۸	۳۰	
مارون-۳	۲	۷	۹	۳۵	۲۵	
مارون-۴	۱	۸	۹	۳۴	۲۵	
مارون-۵	۵	۶	۱۱	۳۸	۳۳	
مارون-۶	۳	۷	۱۰	۳۴	۲۷	
میانگین	۲/۸	۷	۹/۸	۳۵/۸	۲۸	

شکل ۳ | مصرف روزانه‌ی سوخت گرمکن برای یک واحد نمک‌زدایی ۵۵ هزار بشکه در روز

$C_D$	$Q_G$	
۳/۷۸	۱۹/۳	گرمایش بدون نصب مبدل
۲/۷۰	۱۳/۸	گرمایش با نصب مبدل
۱/۰۸	۵/۵	اختلاف مصرف و هزینه‌ی گاز



### ۶-۲- صرفه‌جویی سالیانه

صرفه‌جویی سالیانه‌ی حاصل از نصب مبدل حرارتی برای یک واحد نمک‌زدایی به ظرفیت ۵۵ هزار بشکه در روز (با احتساب نرخ تسعیر ارز معادل ۳۰۰۰۰ ریال)، با استفاده از رابطه‌ی ۳- حدود ۱۲ میلیارد ریال محاسبه می‌شود.

$$\text{Saving} = 360 \times G_s \times C_G \times Q \times \Delta T \quad (3)$$

### نتیجه‌گیری

افزایش دما یکی از عوامل بسیار مؤثر در فرآیند نمک‌زدایی است و تأثیر مستقیمی بر بازده جداسازی آب شور از نفت دارد. از سوی دیگر، افزایش دمای نفت با محدودیت‌هایی نظیر کاهش حجم نفت یا کاهش درجه‌ی API و در نتیجه کاهش ارزش آن همراه است. بنابراین افزایش دمای نفت در مراحل مختلف نمک‌زدایی باید در شرایط بهینه انجام شود. به همین منظور از مبدل‌های حرارتی استفاده می‌گردد که منجر به بازیافت انرژی و کاهش بار مصرفی در گرمکن‌های مشعل‌دار نیز خواهند شد. نصب مبدل حرارتی نفت در واحدهای نمک‌زدایی با صرفه‌جویی ۳۰ درصدی مصرف سوخت، برای یک واحد نمک‌زدایی به ظرفیت ۵۵ هزار بشکه در روز سالیانه در حدود ۱۲ میلیارد ریال صرفه‌جویی اقتصادی به همراه دارد. با توجه به وجود ۲۲ واحد نمک‌زدایی در مناطق نفت‌خیز جنوب، میزان کل صرفه‌جویی اقتصادی سالیانه‌ی این شرکت در این زمینه، حدود ۴۱۰ میلیارد ریال برآورد می‌شود. با اجرای پروژه‌های جاری نمک‌زدایی این رقم به ۶۲۰ میلیارد ریال افزایش خواهد یافت. علاوه بر موضوع بهینه‌سازی مصرف انرژی، سایر کارکردهای نصب مبدل حرارتی از قبیل جلوگیری از هزرروی، کاهش ارزش نفت و همچنین اثرات زیست‌محیطی مطلوب مربوط به کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق گاز سوخت نیز قابل توجه است. ■

اولیه توسط درآمدهای سالیانه جبران می‌شود. اگر درآمدهای دوره‌ای در پایان هر دوره ثابت فرض شود رابطه‌ی کلی محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت سرمایه به صورت رابطه‌ی ۱- خواهد بود [۵]:

$$-P + \sum_{j=1}^n (F)_j = 0 \quad (1)$$

P: سرمایه‌گذاری ثابت [\$]

n: دوره‌ی بازگشت سرمایه [Year]

F: سود در پایان هر دوره [\$ / Year]

در این رابطه F درآمد حاصل در پایان دوره‌ی سالیانه است. با بسط رابطه‌ی ۱- و تعیین متغیرهای آن، با استفاده از رابطه‌ی ۲- دوره‌ی بازگشت سرمایه محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{P}{G_s \times C_G \times Q \times \Delta T} \quad (2)$$

$\Delta T$ : افزایش دمای نفت [C]

$C_G$ : [\$/Sm<sup>3</sup>] [۶] ۰/۱۹۶ میانگین قیمت گاز

بر اساس پروژه‌های اجرا شده در مناطق نفت‌خیز جنوب، هزینه‌ی خرید و نصب مبدل‌های حرارتی نفت و آب برای یک واحد نمک‌زدایی به ظرفیت ۵۵ هزار بشکه در روز حدود ۴۰۰ هزار دلار برآورد می‌شود. طبق جدول ۲- میانگین افزایش دما با نصب مبدل حرارتی ۳۵/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و میزان صرفه‌جویی مصرف سوخت  $2/8 [(Sm^3/(C.Mbb))]$  است. با استفاده از رابطه‌ی ۲- دوره‌ی بازگشت سرمایه حدود یک‌سال محاسبه می‌شود که در شکل ۶- نشان داده شده است.

### پانویس‌ها

<sup>1</sup>moradi.s@nisoc.ir

<sup>2</sup>tooraj.khalili@gmail.com

<sup>3</sup>Salty Crude Oil

<sup>4</sup>Desalting

<sup>5</sup>Fired Heater

<sup>6</sup>Heat Exchanger

<sup>7</sup>De-Emulsifier

<sup>8</sup>Dehydration

<sup>9</sup>Gravity Loss in API

<sup>10</sup>Percent Loss by Volume

<sup>11</sup>Direct Fired Heater

<sup>12</sup>Indirect Fired Heater

<sup>13</sup>Heat Exchanger

<sup>14</sup>Double-pipe exchanger

<sup>15</sup>Shell and tube exchanger

<sup>16</sup>Plate and frame exchanger

### منابع

- [1] Oilfield Processing, Volume 2: Crude Oil", Francis S. Manning, Richard E. Thompson, Pennwell Publishing Company, 1995.  
 [2] Surface Production Operations, Volume 1: Design Of Oil-Handling Systems And Facilities", Second Edition, Ken Arnold, Maurice Stewart, Butterworth-Heinemann Publications, 1999.  
 [3] Perry's Chemical Engineering", Eighth Edition, Don W. Green,

Robert H. Perry, Mcgraw-Hill Companies, 2008.

[4] Chemical Engineering Design", Gavin Towler, Ray Sinnott, Elsevier Inc, 2008.

[۵] "اقتصاد مهندسی، محمد مهدی اسکونژاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.

[6] U.S. Energy Information Administration: Www.Eia.Org