



با ورود یا نزدیک شدن تعدادی از میادین نفتی مناطق نفت‌خیز جنوب به دوره کاهش تولید، در سال‌های اخیر توجه بیشتری به استفاده از روش‌های نوین حفظ و نگهداشت تولید از جمله روش‌های فراآوری مصنوعی معطوف شده است. به طوری که پس از انجام چند پروژه آزمایشی، در حال حاضر استفاده از روش‌های فراآوری مصنوعی به‌ویژه انواع پمپ‌های درون‌چاهی (پمپ الکتریکی شناور، پمپ میله‌ای مکشی و پمپ خلاء پیشرو) در برنامه‌های آتی توسعه میادین نفتی به‌طور جدی‌تری مورد توجه قرار گرفته است. در بین انواع پمپ‌های درون‌چاهی نصب شده در چاه‌های مناطق نفت‌خیز جنوب، پمپ‌های الکتریکی شناور نسبت به پمپ‌های میله‌ای مکشی عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده و در اغلب موارد، طول عمر این پمپ‌ها (متوسط زمان کارکرد پمپ پیش از خراب شدن) کمتر از آمار متوسط جهانی و طول عمر پیش‌بینی شده توسط شرکت نصب‌کننده بوده است. در این مقاله پس از معرفی اجزاء اصلی پمپ الکتریکی شناور و شایع‌ترین عوامل مؤثر در کاهش طول عمر کارکرد این پمپ‌ها، طول عمر متوسط پمپ‌های نصب شده در میادین مناطق نفت‌خیز جنوب و علل شایع خرابی آنها مورد بررسی و مقایسه با آمار جهانی قرار گرفته و راهکارهایی برای افزایش طول عمر آنها پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور، علل شایع خرابی پمپ، افزایش طول عمر پمپ، سامانه پایش مداوم عملکرد پمپ‌ها

مقدمه

یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین انواع پمپ‌های درون‌چاهی، پمپ الکتریکی شناور (ESP)^۴ است که برای اولین بار در سال ۱۹۲۶ توسط آرمیس آروتونف^۵ (مؤسس شرکت روسی سازنده پمپ‌های الکتریکی شناور REDA) ابداع گردید. نقاط قوت منحصر به فرد این پمپ‌ها نسبت به انواع دیگر پمپ‌های درون‌چاهی، از جمله ظرفیت تولید بسیار بالا (تا ۶۰ هزار بشکه در روز)، کاهش فشار ته‌چاه و افزایش فشار سرچاه به میزان دلخواه، انعطاف‌پذیری زیاد نسبت به شرایط ویژه درون‌چاهی (زاویه انحراف،

عمق، دما، برش آب و ...) باعث مطرح شدن این نوع سیستم فراآوری مصنوعی به‌عنوان یکی از گزینه‌های اصلی در پروژه‌های توسعه و افزایش تولید میادین نفتی دنیا شده است. به طوری که در سال ۲۰۰۴ حدود ۱۲ درصد از چاه‌های تحت فراآوری مصنوعی دنیا به پمپ الکتریکی شناور مجهز بوده‌اند (جدول-۱). برآورد مؤسسه اسپیرز نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۹ حدود ۵۸ درصد از سرمایه‌گذاری فراآوری مصنوعی به پمپ‌های الکتریکی شناور اختصاص یافته است. این آمار که نسبت به سال ۲۰۰۴، حدود ۶ درصد رشد داشته نشان‌دهنده روند روبه‌رشد سرمایه‌گذاری روی پمپ الکتریکی شناور در دنیاست (شکل‌های-۱ و ۲) [۱]. محدودیت مهم این پمپ‌ها که موجب حفظ جذابیت انواع دیگر پمپ‌های درون‌چاهی از جمله پمپ میله‌ای مکشی و خلاء پیشرو به‌ویژه برای چاه‌های با پتانسیل کم تولیدی شده، احتمال خرابی زودهنگام آنها در صورت بی‌توجهی و عدم کنترل پارامترهای عملیاتی است. عدم تعیبه سیستم پایش و کنترل مداوم عملکرد پمپ‌های نصب شده در یک میدان موجب عدم آگاهی و تشخیص به موقع تغییر شرایط تولید و عملکرد نامطلوب اجزاء پمپ یا چاه و

* نویسنده‌عهد دار مکاتبات

خراب شدن زود هنگام پمپ و افزایش شدید هزینه‌های جریانی پروژه می‌گردد. امروزه شرکت‌های نفتی پیشرو در زمینه ساخت و توسعه پمپ‌های الکتریکی شناور با رفع یا بهبود محدودیت‌های مکانیکی پمپ‌ها از طریق بهینه‌سازی قطعات و هم‌چنین کنترل مستمر و نگهداشت عملکرد پمپ در شرایط بهینه، موفق شده‌اند طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده را به طرز چشم‌گیری افزایش دهند. شناخت عوامل مؤثر در کاهش طول عمر اجزاء پمپ و پیش‌گیری از وقوع این شرایط در کلیه مراحل طراحی، نصب و راه‌اندازی پمپ در کنار استفاده از سیستم پایش مستمر عملکرد پمپ‌ها از عوامل مؤثر در افزایش طول عمر پمپ الکتریکی شناور به‌شمار می‌رود.

۱- اجزاء و قطعات پمپ الکتریکی شناور

شناخت عوامل تأثیرگذار بر کاهش طول عمر قطعات پمپ، در گرو آشنایی با اجزاء اصلی یک پمپ الکتریکی شناور است. اجزاء یک پمپ الکتریکی شناور معمولی که

در شکل ۳- نشان داده شده به شرح زیر می‌باشد:

- الکترو موتور پرسرعت (۳۵۰۰ دور در دقیقه) دوقطبی سه‌فاز القایی (شکل-۴) که با تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی دورانی، نیروی محرکه لازم برای کارکرد پمپ را فراهم می‌کند.
- محافظ^۶ یا نشت‌بند^۷ که امکان هم‌فشار کردن روغن موتور با سیال چاه و انبساط و انقباض روغن موتور و خنثی‌سازی نیروهای سایشی ایجاد شده در پمپ را توسط یاتاقان^۸ تعبیه شده در آن فراهم می‌کند (شکل-۵).
- پمپ‌گریز از مرکز چندمرحله‌ای که انرژی جنبشی (مکانیکی) تولید شده توسط موتور را به انرژی پتانسیل سیال تولیدی (افزایش فشار) تبدیل می‌کند (شکل-۶).
- بخش ورودی پمپ^۹ که ورود سیال به داخل پمپ، از طریق شبکه‌های روی محفظه آن میسر می‌شود.
- کابل الکتریکی سه‌ رشته‌ای که پس از اتصال به الکتروموتور، به لوله‌های مغزی بسته شده و به‌همراه رشته تکمیلی درون چاه رانده شده و با

عبور از آویزه لوله مغزی، به تجهیزات الکتریکی سطحی متصل شده و انرژی الکتریکی را به موتور انتقال می‌دهد (شکل-۷).

■ حس‌گر^{۱۰} که پارامترهای عملیاتی مورد نیاز برای پایش و کنترل عملکرد پمپ از جمله دمای موتور، فشار ورودی و خروجی پمپ، لرزش پمپ، هرزروی جریان الکتریسته و ... را اندازه‌گیری کرده و به سطح انتقال می‌دهد (شکل-۸).

■ سیستم تأمین و انتقال انرژی الکتریکی شامل ژنراتور، مبدل ولتاژ^{۱۱}، تابلو برق^{۱۲}، سیستم تغیردهنده فرکانس (VSD یا VFG / VFD) (شکل-۹).

۲- روش محاسبه طول عمر متوسط پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در یک میدان

روش‌های مختلفی برای محاسبه طول عمر متوسط پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در یک میدان وجود دارد. اما متداول‌ترین روش برای این کار در اصطلاح "زمان متوسط پیش از خراب‌شدن" (MTBF)^{۱۳} است که از این پس طول عمر متوسط نامیده می‌شود. در

۱ | آمار تعداد چاه‌های مجهز به سیستم‌های مختلف فراز‌آوری مصنوعی در دنیا [۱]

روش فراز‌آوری مصنوعی	تعداد چاه‌های مجهز شده دنیا تا سال ۲۰۰۴	درصد چاه‌های تجهیز شده دنیا تا سال ۲۰۰۴	سرمایه گذاری در سال ۲۰۰۴ (میلیون دلار)	درصد سرمایه گذاری ۲۰۰۴	سرمایه گذاری در سال ۲۰۰۹ (میلیون دلار)	درصد سرمایه گذاری ۲۰۰۹
پمپ میله‌ای مکشی	۶۶۹۷۱۶	٪۷۹	۷۱۷	٪۲۲	۱۰۷۵	٪۱۸
پمپ الکتریکی شناور	۹۸۰۶۵	٪۱۲	۱۷۲۵	٪۵۲	۳۳۵۰	٪۵۸
پمپ خلا، پیشرو	۳۰۱۴۴	٪۴	۳۶۹	٪۱۱	۴۷۰	٪۸
فراز‌آوری با گاز	۲۶۸۹۲	٪۳	۱۳۰	٪۴	۲۴۰	٪۴
پمپ هیدرولیکی	۵۰۰۰	٪۱<	۳۰	٪۱	۱۱۰	٪۲
روش‌های دیگر	۱۴۸۵۶	٪۲	۳۲۰	٪۱۰	۵۷۸	٪۱۰
مجموع	۸۴۴۶۷۳	٪۱۰۰	۳۲۹۱	٪۱۰۰	۵۸۲۳	٪۱۰۰

شناور نصب شده در یازده کشور مختلف را نشان می‌دهد.

بر این اساس متوسط طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور در فاصله سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۰ برابر ۲۴ ماه و در فاصله سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۵ برابر ۳۱/۵ ماه بوده که نشان‌دهنده تأثیر مثبت پیشرفت‌های حاصله در زمینه فن آوری ساخت و همچنین روش‌های پایش و نگهداشت این نوع پمپ‌ها در دنیا می‌باشد. بر همین اساس میانگین طول عمر پمپ‌های

هر چاه در سال است و از آن برای برنامه‌ریزی تخصیص دکل و تأمین کالا و قطعات پمپ در سال‌های آینده استفاده می‌شود.

$$\text{Failure Index (شاخص خرابی)} =$$

$$(۲) \sum_{t=0}^t \left(\frac{\text{تعداد خرابی در هر بازه زمانی}}{\text{تعداد چاه‌های در حال تولید در هر بازه زمانی}} \right) \times \text{تعداد بازه‌ها در سال} = t$$

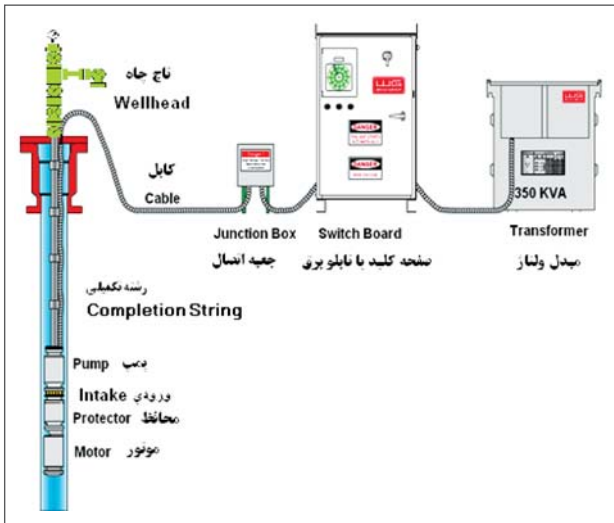
جدول ۲- نتایج یک بررسی آماری از طول عمر متوسط بیش از ۱۵۰۰۰ پمپ الکتریکی

این روش مجموع زمان کارکرد پمپ‌های یک میدان در یک دوره زمانی مشخص به تعداد پمپ‌های خراب شده تقسیم می‌گردد.

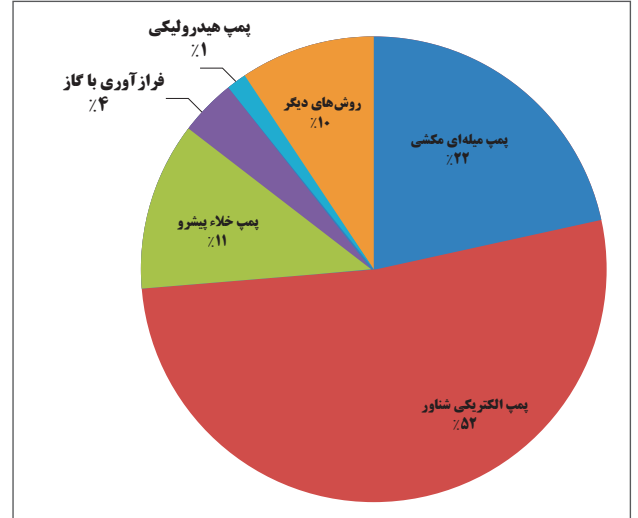
$$\text{MTBF} = (\text{طول عمر متوسط پمپ‌ها}) =$$

$$(۱) \frac{\sum_{t=0}^{t=tp} \text{زمان کارکرد پمپ‌های نصب شده در میدان}}{\text{تعداد پمپ‌های خراب شده}}$$

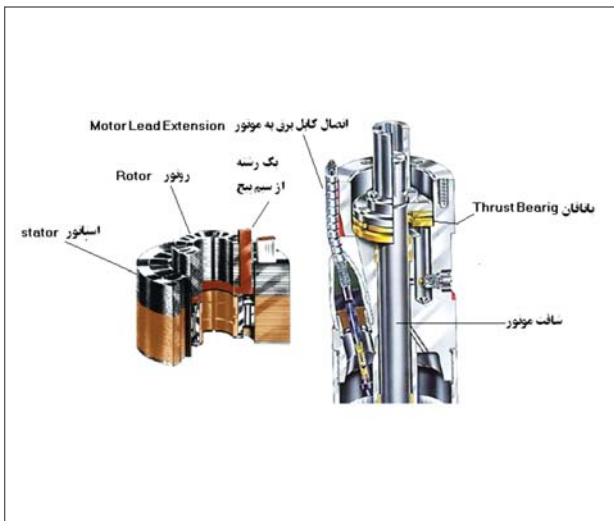
پارامتر دیگری به نام شاخص خرابی وجود دارد که بیانگر متوسط تعداد خرابی پمپ برای



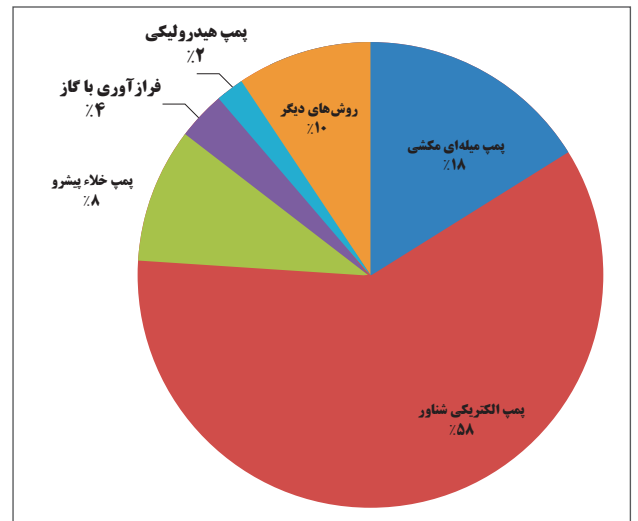
شکل ۱ | سیستم کلی پمپ الکتریکی شناور به همراه اجزاء اصلی



شکل ۱ | درصد سرمایه‌گذاری روی روش‌های مختلف فرازآوری مصنوعی در سال ۲۰۰۴ در دنیا [۲]



شکل ۴ | الکترو موتور و اجزاء اصلی آن



شکل ۲ | درصد سرمایه‌گذاری روی روش‌های مختلف فرازآوری مصنوعی در سال ۲۰۰۹ در دنیا [۲]

نصب شده در این کشورها طی یک دهه اخیر (۲۰۰۹-۲۰۰۰) برابر ۲۷ ماه بوده است.

۳- بررسی طول عمر متوسط پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در مناطق نفت خیز جنوب

استفاده از پمپ‌های درون چاهی در شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب از سال ۱۳۸۲ با نصب اولین پمپ الکتریکی شناور در چاه اهواز-۲۳۱ آغاز شد و تا کنون ۱۷ حلقه از چاه‌های این شرکت به پمپ الکتریکی شناور مجهز گردیده است. میانگین طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در مناطق نفت خیز جنوب در جدول-۳ ارائه شده است.

بر این اساس طول عمر متوسط کل پمپ‌های نصب شده در مناطق نفت خیز جنوب ۷ ماه است که طبق جدول-۲ به مراتب کمتر از متوسط کشورهای دیگر در یک دهه

اخیر می‌باشد. افزایش عدد ذکر شده مستلزم اینست که علل خرابی پمپ‌های نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در مناطق نفت خیز جنوب به دقت بررسی شود.

هم چنین شاخص خرابی پمپ‌های نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در مناطق نفت خیز جنوب در سال ۱۳۹۰ برابر ۱/۵ بار خرابی در سال به ازای هر چاه مجهز به پمپ محاسبه شده است. بنابراین کاهش زمان توقف تولید در زمان خرابی پمپ‌ها، مستلزم پیش‌بینی کالا و دکل لازم برای انجام یک تعمیر در هر ۸ ماه برای هر چاه مجهز به پمپ الکتریکی شناور می‌باشد.

۴- عوامل مؤثر در کاهش طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور

مهم‌ترین تنگناها و عواملی که موجب کاهش طول عمر و خرابی زودهنگام پمپ

الکتریکی شناور می‌شوند عبارتند از: طراحی نامناسب، برق ناپایدار، افزایش دمای موتور، ناپایداری عملکرد جریان‌ی چاه، شرایط چاه و سیال (تولید شن و جامدات، تولید گاز آزاد، افزایش شدید غلظت سیال تولیدی در اثر تشکیل امولسیون، خوردگی سیال چاه و تشکیل رسوبات).

۴-۱- طراحی نامناسب پمپ

پمپ‌های الکتریکی شناور به دلیل مکانیزم کارکرد دینامیکی شان برخلاف پمپ‌های جابجایی مثبت دارای محدوده مجاز تولیدی مشخصی هستند که رعایت آن برای حفظ بازده پمپ در سطح مناسب و جلوگیری از سایش پیشرانه^{۱۴} و پخش کننده^{۱۵} پمپ در نظر گرفته شده است.

محدوده مجاز تولیدی هر پمپ در یک فرکانس مشخص روی نمودار

۲ | متوسط طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در کشورهای مختلف دنیا [۳]

سال	شرکت تولیدکننده	موقعیت میدان	تعداد پمپ‌های نصب شده	MTBF (Month)
۲۰۰۰	ANDNOC	ابوظبی	۲۹	۳۶
۲۰۰۱	PDVSA	ونزوئلا	۱۸	۲۹
۲۰۰۳	DZG	منطقه تقسیم شده	۲۵۱	۱۲
۲۰۰۳	Santos	استرالیا	۶	۱۰
۲۰۰۳	Aramco	عربستان سعودی	۱۰۰	۳۱
۲۰۰۴	PDO	عمان	۱۸۵	۱۸
۲۰۰۴	Oxy	کلمبیا	۲۷۰	۳۲
۲۰۰۵	CoP	چین	۱۲	۱۶
۲۰۰۷	Pluspetrol	پرو	۱۱۸	۳۱
۲۰۰۷	Chevron	هلند	۳۶	۶۶
۲۰۰۸	PDO	عمان	۸۰۰	۳۵
۲۰۰۸	TNK-BP	روسیه	۱۳۱۷۶	۱۴
۲۰۰۹	Aramco	عربستان سعودی	۶۲	۲۷
مجموع			۱۵۲۸۶	
میانگین طول عمر کل پمپ‌ها				۲۷

عملکرد پمپ از این محدوده در هنگام تولید، باید طراحی و انتخاب پمپ و تجهیزات دیگر آن با استفاده از اطلاعات دقیق چاه و مخزن انجام گیرد. یکی از مهم‌ترین اطلاعات که عدم‌دقت آن تأثیر زیادی در جابجایی نقطه عملکرد پمپ نسبت به طراحی اولیه داشته

$$H_2 = H_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (4)$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^3 \quad (5)$$

برای جلوگیری از خارج شدن نقطه

مشخصه عملکرد پمپ نمایش داده می‌شود (شکل-۱۰) و برای مشخص کردن حداقل و حداکثر نرخ تولیدی پمپ در فرکانس‌های دیگر می‌توان از قوانین وابستگی^{۱۶} استفاده نمود:

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (3)$$

۳ | میانگین طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب [۶]

سال	موقعیت میدان	شماره چاه	مدت زمان کارکرد(ماه)	علت خرابی
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	V1	۱۲	سوختن موتور
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H1	۸	بریدن شافت محافظ
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H2	۱۳	سوختن کابل
۱۳۹۱	مسجدسلیمان	H2	۱	شکستن ساب
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H3	۹/۵	سوختن موتور
۱۳۹۱	مسجدسلیمان	H3	۱	بریدن پکر
۱۳۹۱	مسجدسلیمان	H3	۴/۵	نشت لوله کنترل شیر ایمنی
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H4	۱۲/۵	نشت لوله کنترل شیر ایمنی
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H5	۸	سوختن موتور
۱۳۹۱	مسجدسلیمان	H5	۳	بریدن پکر
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H6	۱۲	نا مشخص
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H7	۱۳	خراب شدن محافظ
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H8	۱۴	بدون مشکل
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H9	۳	سوختن موتور
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H9	۳	بریدن پکر
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H9	۷	نشت لوله مغزی
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H10	۸	جام کردن پمپ
۱۳۹۰	مسجدسلیمان	H10	۱	بریدن پکر
۱۳۹۰	مسجد سلیمان	* ۲۱۲	-	آسیب دیدگی پمپ در حین نصب
۱۳۸۹	اهواز	۱۹۷	۴	اشکال در ژنراتور و روشن خاموش شدن مکرر
۱۳۸۹	اهواز	۳۷۵	۱۲	برق ناپایدار
۱۳۸۲	اهواز	۲۳۱	۰/۵	نا مشخص
۱۳۸۷	اهواز	۲۳۱	۹	برق ناپایدار
۱۳۹۰	اهواز	۲۴۸	۹	برق ناپایدار
۱۳۹۰	منصوری	۶۳	۰/۲	قطع ارتباط کابل انتقال اطلاعات فرایندی
متوسط طول عمر پمپ‌های نصب‌شده در مناطق نفتخیز جنوب توسط شرکت‌های مختلف				
شاخص خرابی پمپ‌هایی مناطق نفتخیز جنوب در سال ۱۳۹۰				

(* به دلیل عدم موفقیت در راه اندازی پمپ، طول عمر پمپ این چاه در متوسط ارائه شده لحاظ نگردیده است)



الکتریسته تغذیه شده شرط اصلی سلامت کارکرد این الکتروموتورهاست.

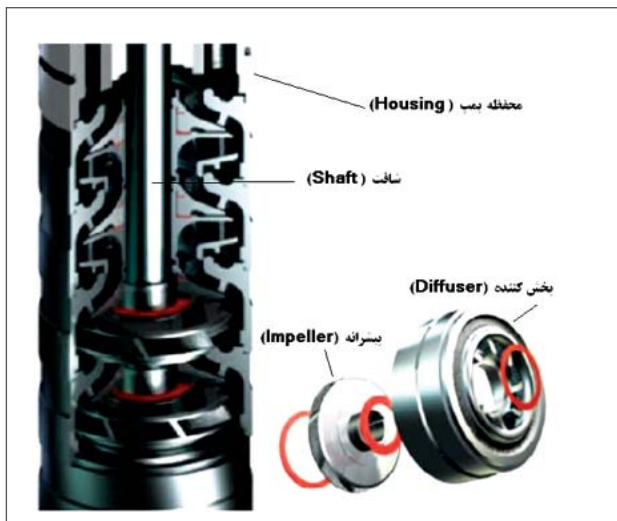
برای جلوگیری از سوختن یکباره الکتروموتور بر اثر نوسانات ولتاژ برق باید از تابلو برق مجهز به سیستم کنترل کننده سطحی استفاده کرد تا این سیستم در صورت وقوع نوسانات مخرب، به طور خودکار برق پمپ را قطع کرده آنرا خاموش کند. ولی باید دانست که هر بار خاموش شدن موتور باعث کاهش طول عمر کارکرد الکتروموتور می شود. زیرا نصب موتور درون چاه مستلزم تعادل فشاری روغن موجود در محفظه

که این بیش طراحی باعث افزایش طول عمر پمپ و انعطاف پذیری آن نسبت به تغییر شرایط طراحی شده نیز خواهد بود.

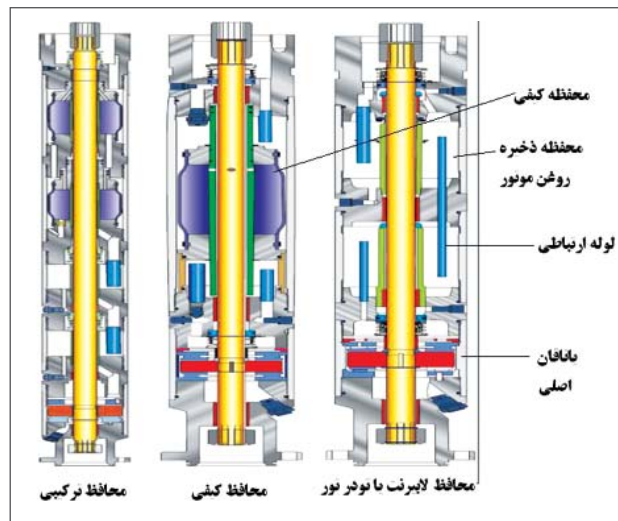
۴-۲- برق ناپایدار

مهم ترین امتیاز و در عین حال محدودیت پمپ الکتریکی شناور نسبت به انواع دیگر پمپ های درون چاهی، استفاده از الکتروموتور با قطر کم ولی بسیار پر قدرت در انتهای رشته تکمیلی است که از طرفت و تکنولوژی بالایی برخوردار است. به همین دلیل ثبات و پایداری ولتاژ و شدت جریان

و ممکن است باعث بروز سایش پیشرانه و پخش کننده پمپ از بالا^{۱۷} یا پایین^{۱۸} شود ضریب بهره دهی چاه است (شکل-۱۱). بنابراین بهتر است حتی الامکان پیش از طراحی پمپ آزمایش ضریب بهره دهی چاه به عمل آید. در صورت عدم اطمینان از ضریب بهره دهی چاه توصیه می شود ضمن در نظر گرفتن حداقل مقدار ممکن در فاز طراحی، تعداد مراحل^{۱۹} پمپ را بیش از میزان محاسبه شده در نظر گرفت. اگرچه بیش طراحی مراحل پمپ می تواند باعث افزایش قیمت آن شود، اما باید توجه کرد



شکل ۶ | پمپ الکتریکی شناور و پیشرانه و پخش کننده آن



شکل ۵ | انواع محافظ یا نشت بند



شکل ۷ | کابل با مقطع مسطح و دایره ای

مشخصی است که بستگی به ضخامت رسانا و عایق آن دارد. بنابراین برای جلوگیری از سوختن سیم پیچ موتور باید از افزایش دمای آن بیش از حد مجاز جلوگیری کرد. تنها عامل خنک کننده موتور، سیال تولیدی است که هرچه سرعت عبور آن از کنار محفظه موتور بیشتر باشد، سرعت انتقال حرارت افزایش یافته و دمای موتور بیشتر کاهش می یابد. برای اطمینان از خنک شدن موتور با سیال تولیدی باید سیستم به گونه ای طراحی شود که حداقل سرعت سیال گذرنده از

از نشانه های ناپایداری و کیفیت نامناسب منبع برق، می توان به قطع ناگهانی برق، آلام های مکرر ولتاژ زیاد، ولتاژ پایین، عدم تعادل فازها، شدت جریان زیاد و... اشاره کرد.

۴-۳- افزایش دمای الکترو موتور

الکتروموتور یک موتور الکتریکی سه فاز دوقطبی اسکروول است که به دلیل جلوگیری از اتصال کوتاه در حین روان کاری، مملو از روغن دی الکتریک شده است. سیم پیچ موتور دارای محدودیت حداکثر دمای

موتور و سیال چاه است که از طریق محافظ یا نشت بند انجام می گردد. با هربار روشن و خاموش شدن موتور مقداری از سیال چاه جایگزین روغن موتور ذخیره در محافظ شده و بسته به حجم ذخیره روغن موتور، پس از تعداد محدودی خاموش و روشن شدن، سیال ستون چاه با ورود به موتور و برقراری اتصال کوتاه موجب سوختن الکتروموتور می شود. بنابراین ثابت بودن ولتاژ و آمپراژ برق مصرفی تأثیر به سزائی در سلامت و طول عمر موتور الکتریکی درون چاهی دارد.



شکل ۸ | حسگر و صفحه نمایش پارامترهای اندازه گیری شده روی کنترل کننده یا تابلو برق



شکل ۹ | تجهیزات سطحی الکتریکی سطحی



۴-۵- شرایط چاه

مکانیزم گریز از مرکز پمپ الکتریکی شناور، وجود الکتروموتور با دور زیاد و کابل الکتریکی بلند درون چاه از ویژگی‌های منحصر به فرد پمپ الکتریکی شناور می‌باشد که با وجود افزایش چشم‌گیر ظرفیت پمپ نسبت به انواع دیگر پمپ‌های درون‌چاهی، در برخی شرایط فیزیکی چاه محدودیت‌هایی از نظر کارکرد به وجود می‌آورد که وقوع این موارد به شدت بر طول عمر اجزاء پمپ تأثیرگذار است.

۴-۵-۱- تولید شن و جامدات

با وجود تلاش‌های فراوان جهت سازگار کردن پمپ الکتریکی شناور با سیال حاوی ذرات شن و جامدات، این مسأله کماکان یکی از نقاط ضعف این نوع پمپ‌ها به حساب می‌آید. اگرچه با استفاده از آلیاژها یا غشاهای مقاوم‌تر و افزایش سایز پمپ تا حدودی مقاومت مراحل پمپ در مقابل سایش افزایش می‌یابد، اما با این روش نمی‌توان مانع از تجمع ذرات و جام کردن مراحل پمپ شد. بنابراین بهتر است در

خواهد شد.

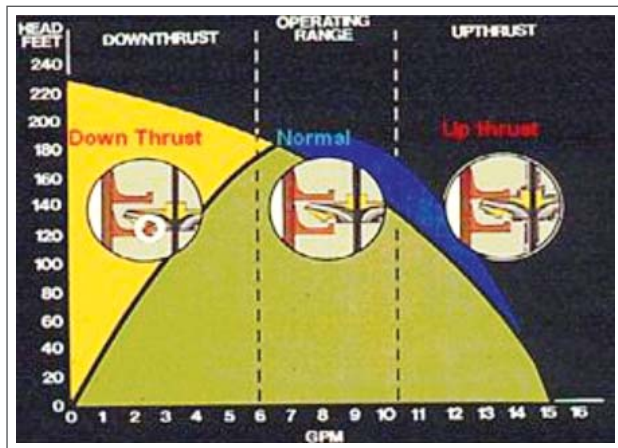
برای رفع این مشکل می‌توان با استفاده از سامانه تغییر سرعت دوران پمپ (VSD یا VFG) نقطه عملکرد پمپ را جابجا کرده و در شرایط کارکرد بهینه تنظیم نمود. به عنوان مثال شکل-۱۲ نمودار تحلیل گره‌ای یکی از چاه‌های میدان مسجدسلیمان را که توسط نرم‌افزار SUBPUMP شبیه‌سازی شده نمایش می‌دهد.

بررسی‌های حاصل از شبیه‌سازی مشخص کرد که نقطه عملکرد پمپ در ابتدای راه‌اندازی با فرکانس ۵۲ هرتز خارج از محدوده عملکرد مجاز پمپ بوده و با کاهش سرعت دوران پمپ از طریق کاهش فرکانس به ۴۶ هرتز، نقطه عملکرد پمپ به درون محدوده مجاز باز خواهد گشت (منحنی سبز رنگ در شکل-۱۳). این تغییر ساده اگرچه باعث کاهش نرخ تولیدی چاه می‌شود اما با تولید در محدوده ظرفیت مجاز پمپ، از بروز سایش در مراحل پمپ، افزایش بار موتور، لرزش پمپ و در نتیجه خراب شدن زود هنگام آن جلوگیری می‌کند.

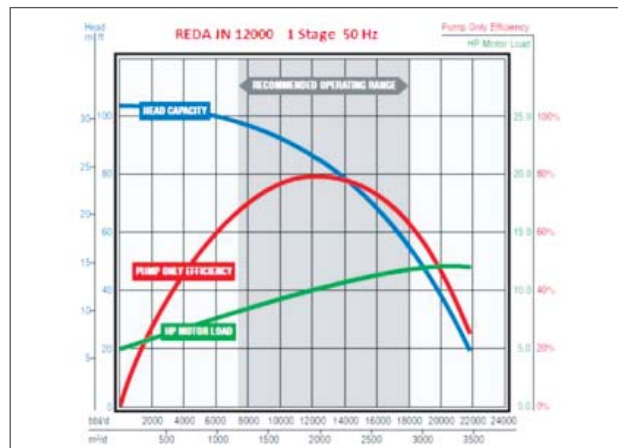
اطراف موتور یک فوت بر ثانیه باشد [۴]. از جمله عواملی که باعث افزایش دمای موتور می‌شوند می‌توان به افزایش درصد گاز آزاد، افزایش بار موتور در اثر تولید سیال سنگین یا تشکیل امولسیون، تشکیل رسوب روی پوسته موتور، سوراخ شدن لوله مغزی، تشکیل مانع در لوله مغزی و ... اشاره کرد.

۴-۴- ناپایداری عملکرد مخزن و چاه

به دلیل طبیعت دینامیک چاه‌های نفتی، میزان تولید و بهره‌دهی یک چاه در طول زمان بر اثر مواردی از جمله تغییر نسبت گاز به نفت تولیدی، تغییر تراوایی نسبی و تحرک پذیری سنگ مخزن در اثر تغییر فاز ناشی از مخروط‌شدگی یا تغییر سطوح تماس، ایجاد افت فشار پوسته، تجمع مایعات در دهانه چاه، تشکیل مانع در ستون چاه، نشست جداره‌ها و لوله مغزی، رسوب آسفالتین و ... دچار تغییر شده و این تغییرات باعث تغییر نقطه عملکرد پمپ و احتمالاً تجاوز نرخ تولیدی چاه از محدوده مجاز و بروز مشکلاتی مشابه طراحی نامناسب پمپ



سایش پیش‌رانه و پخش‌کننده پمپ در صورت عملکرد پمپ در خارج از محدوده مجاز



نمونه‌ای از نمودار مشخصه عملکرد پمپ الکتریکی شناور



چاه‌هایی که سابقه تولید شن یا جامدات دارند از پمپ الکتریکی شناور استفاده نشود. استفاده از پمپ‌های خلاء پشرو یا سیستم فراآوری با گاز برای این‌گونه چاه‌ها بسیار مفیدتر و موفقیت‌آمیزتر خواهد بود.

۴-۵-۲- تولید گاز آزاد

ورود گاز آزاد به پمپ الکتریکی شناور باعث کاهش میزان فشارافزایی پمپ و ناپایداری عملکرد آن شده و در صورتی که میزان گاز آزاد بیش از ۲۵ درصد کل حجم سیال تولیدی باشد، احتمال بروز پدیده انسداد گازی که می‌تواند منجر به سوختن الکترو موتور شود، وجود خواهد داشت. برای جلوگیری از این پدیده باید در زیر پمپ، تفکیک‌گر درون‌چاهی یا پمپ چندفازی نصب گردد.

شکل ۱۴- نمودار تغییرات شدت جریان مصرفی موتور یک پمپ الکتریکی شناور قبل و بعد از نصب تفکیک‌گر درون‌چاهی را نمایش می‌دهد. تفکیک‌گر دورانی گریز از مرکز با استفاده از اختلاف چگالی گاز و

نفت، درصد قابل ملاحظه‌ای (۹۰-۶۰ درصد) از گاز آزاد همراه نفت را تفکیک و به فضای حلقوی اطراف لوله مغزی هدایت می‌کند (شکل-۱۵).

۴-۵-۳- تشکیل امولسیون و افزایش شدید

گرانروی سیال

تولید نفت با درصد بالای آب همراه توسط پمپ الکتریکی شناور با سرعت دوران زیاد، احتمال تشکیل امولسیون در طول مراحل پمپ را افزایش می‌دهد. تشکیل امولسیون باعث افزایش شدید گرانروی سیال خواهد شد. با افزایش غلظت سیال، چگالی نیز افزایش یافته و توان مورد نیاز پمپ و بار موتور افزایش می‌یابد. هم‌چنین غلظت سیال تولیدی با افت فشار اصطکاکی نیز نسبت مستقیم داشته و افزایش غلظت سیال باعث افزایش فشار مورد نیاز چاه و کاهش نرخ تولید می‌گردد. بنابراین بهتر است از به‌کارگیری پمپ الکتریکی شناور در چاه‌هایی که سابقه تشکیل امولسیون دارد خودداری کرد و در هنگام طراحی

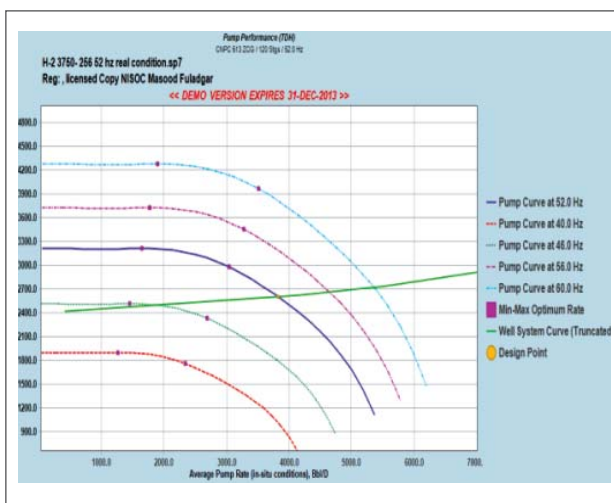
پمپ برای چاه‌هایی که سیال غلیظ دارند تأثیر غلظت سیال بر عملکرد پمپ تصحیح شود. هم‌چنین در صورت تشکیل امولسیون در حین تولید با پمپ بهتر است پس از خاموش کردن پمپ و تزریق مواد شکننده امولسیون، تولید از چاه با حداقل نرخ تولیدی (کاهش فرکانس) صورت گیرد.

۴-۵-۴- خوردگی سیال چاه

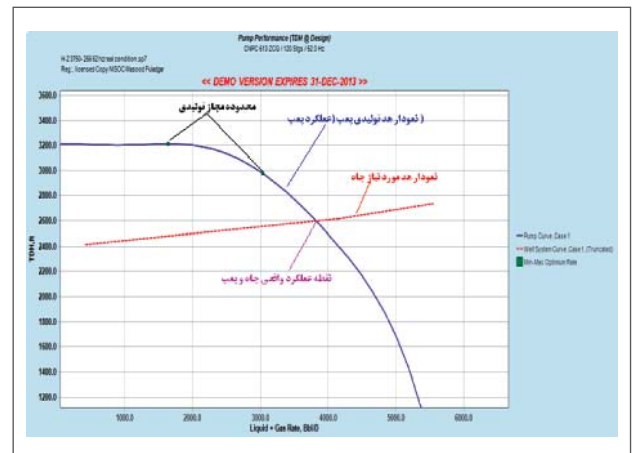
به‌طور کلی خوردگی سیال کلیه تجهیزات درون‌چاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما موتور و محفظه پمپ آسیب‌پذیری بیشتری دارند. بنابراین در صورت خوردنه بودن سیال تولیدی باید تجهیزاتی که از آلیاژهای ویژه ضد خوردگی ساخته شده باشد مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۵-۵- تشکیل رسوبات

تشکیل رسوب به دو صورت می‌تواند باعث آسیب پمپ شود؛ تشکیل رسوب روی محفظه موتور انتقال حرارت را کاهش داده و باعث داغ شدن موتور می‌شود. هم‌چنین تشکیل رسوب درون مراحل پمپ باعث کاهش نرخ



نمودار تحلیل گره‌ای عملکرد پمپ پس از نصب سیستم فرکانس متغیر و کاهش فرکانس به ۴۶ هرتز



نمودار تحلیل گره‌ای نشان‌دهنده عملکرد پمپ خارج بازه عملکرد مجاز (خط قرمز نمودار عملکرد چاه و مخزن و خط آبی نمودار عملکرد پمپ در فرکانس ۵۰ هرتز)



تولیدی و حتی گرفتگی کامل پمپ می‌گردد.

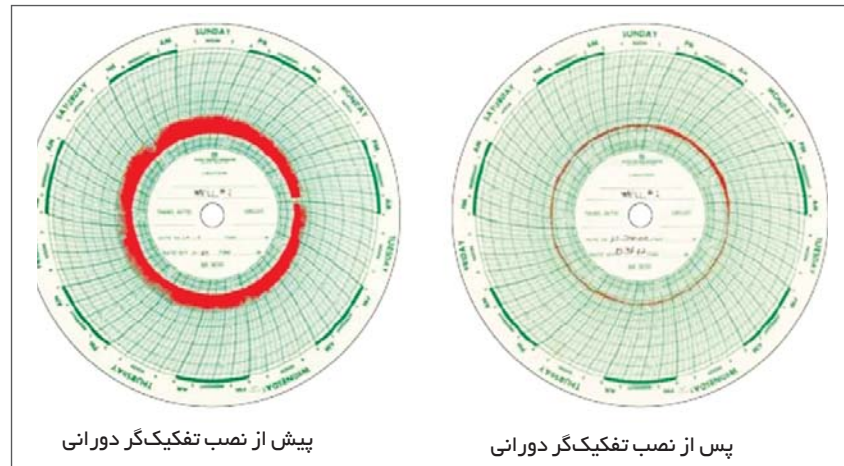
۴-۶- ایجاد لرزش در اجزاء پمپ

به دلیل دوران اکثر اجزای پمپ الکتریکی

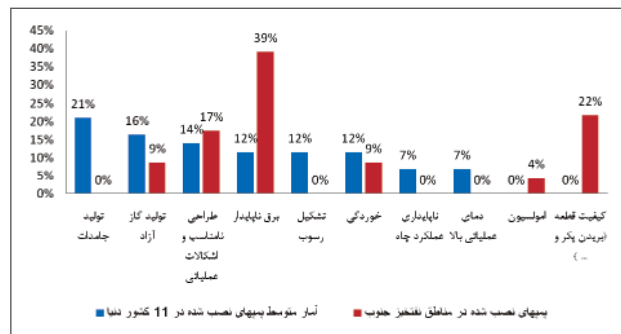
طریق محور پمپ به اجزای دیگر منتقل شده و باعث خراب شدن هر یک از اجزاء می‌شود. برخی دلایل شایع بروز لرزش در سیستم پمپ الکتریکی شناور عبارتند از:

- لرزش ناشی از نامتعادل بودن قسمت‌های دوار به دلیل یکنواخت نبودن چگالی آلیاژ یا ساختار نامتقارن یک قطعه دوار
- لرزش‌های با منشأ هیدرولیکی که معمولاً در زمان عملکرد پمپ خارج از محدوده مجاز تولیدی، تولید سیال غلیظ و یا سیال گازی اتفاق می‌افتد.
- سایش بین قسمت‌های ثابت و دوار پمپ
- لرزش‌های با منشأ الکتریکی از جمله تغییر فرکانس کارکرد موتور یا تغییر فرکانس ناپایدار جریان برق

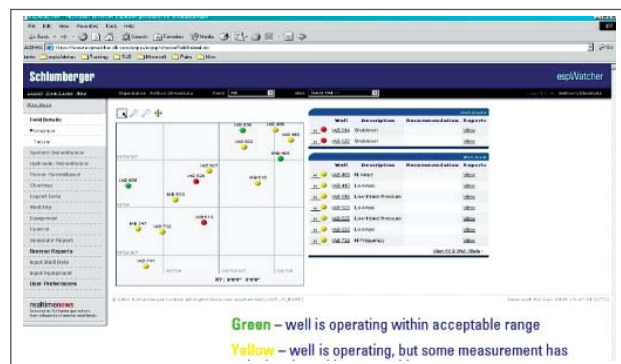
شناور با دور زیاد، بروز لرزش در اجزاء پمپ اجتناب‌ناپذیر است. فارغ از اینکه لرزش توسط کدام جزء از سیستم تولید شده این لرزش‌ها از



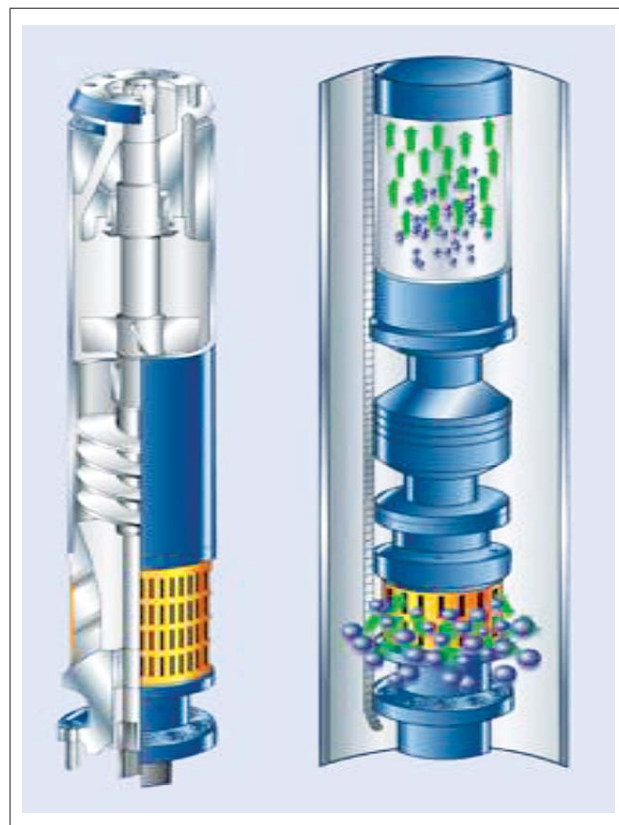
شکل ۱۴ نمودار شدت جریانی مصرفی اکتروموتور پیش و پس از نصب تفکیک‌گر دورانی برای یک چاه با تولید گاز اضافی



نمودار میله‌ای مقایسه علل متداول خرابی پمپ‌های الکتریکی شناور در مناطق نفت‌خیز جنوب و کشورهای دیگر [۳ و ۶]



نمونه‌ای از پایگاه اطلاعاتی اینترنتی پیش از راه دور عملکرد پمپ‌های الکتریکی شناور مربوط به شرکت شلمبرژه (ESP Watcher) [۵]



شکل ۱۵ تفکیک‌گر گاز دورانی

تشخیص اینکه کدامیک از موارد بالا منشاء لرزش است، از طریق اندازه‌گیری فرکانس لرزش و مقایسه با الگوهای مشخص امکان‌پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است که تشخیص این موارد نیاز به تخصص و تجربه فراوان دارد. برای نمونه، فرکانس لرزش برخی از موارد شایع وقوع لرزش در اجزاء پمپ در (جدول ۴) ارائه شده است.

۵- بررسی آماری علل شایع خرابی پمپ‌های الکتریکی شناور در دنیا و مقایسه با آمار موارد نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در مناطق نفت‌خیز جنوب

جهت بررسی علت کوتاه‌تر بودن طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب‌شده در مناطق نفت‌خیز جنوب نسبت به آمار متوسط بین‌المللی ارائه شده در جدول ۲، عوامل شایع خرابی پمپ‌ها در این کشورها و مناطق نفت‌خیز جنوب در نمودار میله‌ای شکل ۱۶ دسته‌بندی و مقایسه شده است.

مهم‌ترین عوامل خرابی پمپ‌های نصب شده توسط شرکت‌های معتبر دنیا به ترتیب تولید جامدات (۲۱ درصد)، تولید گاز آزاد (۱۶ درصد) و طراحی نامناسب (۱۴ درصد) است. در مقابل مهم‌ترین دلایل خرابی پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در مناطق نفت‌خیز، برق ناپایدار و قطع مکرر برق (۳۹

درصد)، طراحی و اشکالات عملیاتی عملکرد پمپ‌ها ناشی از تولید بیش از ظرفیت پمپ (۱۷ درصد)، بریدن پکر (۲۲ درصد) و خوردگی (نشت کنترل خط و سوراخ شدن لوله مغزی) (۱۱ درصد) ناشی از کیفیت نامطلوب قطعات می‌باشد.

۶- نصب و به‌کارگیری سامانه پایش از راه دور^{۲۰}

امروزه شرکت‌های پیشرو در زمینه فراآوری مصنوعی توانسته‌اند طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور را در پروژه‌های تحت نظارت خود به طور چشم‌گیری افزایش داده و اعتمادپذیری و سودآوری استفاده از این روش پیشرفته را افزایش دهند. یکی از عوامل اصلی این موفقیت اجرای فرآیندی به نام "پایش مداوم و ردیابی خرابی پمپ‌های الکتریکی شناور"^{۲۱} بوده است.

در این فرآیند از طریق نصب حس‌گر درون‌چاهی روی تمامی چاه‌ها و اتصال خروجی حس‌گرها به سیستم‌های انتقال ماهواره‌ای اطلاعات مانند اسکادا (SCADA)^{۲۲}، کلیه پارامترهای عملیاتی پمپ به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و به‌صورت خودکار به یک پایگاه داده اینترنتی انتقال می‌یابد و در آنجا در دسترس متخصصان مسئول کنترل عملکرد پمپ قرار گرفته و به‌صورت مداوم کنترل می‌شود. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که در

صورت تجاوز پارامترهای عملیاتی پمپ از حد مجاز، اعلام هشدار کرده و حتی دلایل و راهکارهای احتمالی پیشنهاد می‌دهد. بنابراین کوچک‌ترین نشانه‌های عملکرد نامطلوب هر یک از پمپ‌های نصب شده در میدان بلافاصله کشف و ریشه‌یابی شده و به‌سرعت تغییرات لازم جهت برطرف شدن اشکال عملکرد پمپ روی چاه اعمال می‌گردد. اجرای مداوم فرآیند پایش از راه دور بر روی چاه‌های مجهز به پمپ‌های الکتریکی شناور می‌تواند طول عمر کارکرد قطعات پمپ الکتریکی شناور را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

■ افزایش قیمت نفت در سال‌های اخیر و افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه و افزایش تولید میدین نفتی دنیا، سبب افزایش جذابیت و حجم سرمایه‌گذاری روی پمپ‌های الکتریکی شناور نسبت به سایر روش‌های فراآوری مصنوعی شده است.

■ طراحی نامناسب پمپ، برق ناپایدار، افزایش دمای موتور، ناپایداری عملکرد جریانی چاه، شرایط چاه و سیال (تولید شن و جامدات، تولید گاز آزاد، افزایش شدید غلظت سیال تولیدی در اثر تشکیل امولسیون، خوردگی سیال چاه و تشکیل رسوبات) از جمله

۴ | موارد شایع وقوع لرزش در اجزاء، پمپ

قطعه موثر	فرکانس معمول لرزش دور در گردش (RPM)	علت احتمالی
روتور و شافت	۱ - ۲	خم شدن شافت
هر یک از اجزاء دوار	۱	عدم تعادل جرمی یا هیدرولیکی یا روتور ناهم‌مرکز
کوپلینگ، شافت یا یاتاقان	۱ - ۲	فیت‌نشدن یاتاقان‌ها
موتور	۱	ناهم‌مرکز بودن روتور در موتور
دوران یاتاقان ژورنال	۱ / ۲	دوران یاتاقان ژورنال به‌همراه شافت
سایش مکانیکی	۵ / ۳ - ۵ / ۵	تماس بین قسمت‌های ثابت با دوار
یاتاقان ضد اصطکاک	بیشتر از ۵	اصطکاک بیش از حد، روانکاری ضعیف یا فیت بودن بیش از حد یاتاقان‌ها



مهم‌ترین عوامل کاهش طول عمر پمپ الکتریکی شناور است که با تشخیص به موقع آنها می‌توان از خرابی زودهنگام پمپ و تحمیل هزینه‌های تعمیر با دکل و تعویض اجزاء پمپ جلوگیری کرد.

■ تشخیص به موقع عوامل خرابی زودهنگام پمپ الکتریکی شناور مستلزم اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای عملیاتی پمپ با استفاده از فن‌آوری‌های روز از جمله حس‌گرهای پیشرفته و سیستم‌های انتقال ماهواره‌ای اطلاعات است.

■ متوسط طول عمر پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده توسط پیمانکاران مختلف در مناطق نفت‌خیز جنوب برابر ۷ ماه می‌باشد که به مراتب کمتر از متوسط جهانی (۲۷ ماه) است.

■ یکی از مهم‌ترین علل خرابی پمپ‌های الکتریکی شناور نصب شده در مناطق نفت‌خیز جنوب، برق ناپایدار و خاموش شدن مکرر

پمپ‌هاست. بنابراین در صورت تأمین برق پایدار برای پمپ‌ها می‌توان شاخص خرابی و به تبع آن هزینه‌های تعمیر و تعویض پمپ‌ها را به طور چشم‌گیری کاهش داد.

پیشنهادها

■ نصب حس‌گر درون‌چاهی و جریان‌سنج روی همه چاه‌هایی که در برنامه نصب پمپ الکتریکی شناور قرار دارند به منظور دستیابی به اطلاعات مورد نیاز برای کنترل مداوم عملکرد پمپ‌ها

■ نصب سامانه‌های پایش از راه دور روی کلیه چاه‌های مجهز به پمپ الکتریکی شناور

■ نصب سیستم تغییر سرعت دوران پمپ‌ها جهت افزایش انعطاف‌پذیری در کنترل عملکرد پمپ‌ها در موارد لازم

■ تأمین برق پایدار با استفاده از ژنراتورهای موازی و مجهز به سیستم تعویض خودکار به جای استفاده از شبکه برق فشار قوی

■ پیش‌بینی هر ۸ ماه یک تعمیر برای هر چاه مجهز به پمپ و آماده‌سازی کالا و دکل برای تعمیر و تعویض پمپ‌های نصب شده جهت کاهش زمان توقف تولید چاه‌ها در زمان خرابی پمپ

■ توجه به محدودیت‌های عملیاتی پمپ الکتریکی شناور در مطالعات غربال‌گری روش‌های فراآوری مصنوعی

کنترل محدودیت‌هایی نظیر ورود حجم زیاد گاز آزاد، شن و جامدات به پمپ در حین عملیات بسیار مشکل و تقریباً غیر ممکن بوده و در اکثر موارد کوتاه‌مدت و ناکارآمد

است. بنابراین لازم است پیش از نامزد کردن چاه‌ها برای نصب پمپ الکتریکی شناور از طریق انجام آزمایش‌های مورد نیاز، از عدم وقوع موارد مذکور (به‌ویژه تولید شن و جامدات) اطمینان حاصل نمود و چاه‌هایی که با این قبیل مشکلات مواجهند قبل از برطرف شدن این موارد، کاندیدای نصب پمپ الکتریکی شناور نشوند.

پانویس‌ها

¹ fooladgar.a@nisoc.ir

² gobadi.h@nisoc.ir

³ jafarizadeh.r@nisoc.ir

⁴ Electrical Submersible Pumps

⁵ Armais Arutunoff

⁶ protector

⁷ seal section

⁸ thrust bearing

⁹ intake

¹⁰ sensor

¹¹ transformer

¹² switch board

¹³ Mean Time Before Failure

¹⁴ impeller

¹⁵ diffuser

¹⁶ affinity laws

¹⁷ up-thrust

¹⁸ down-thrust

¹⁹ stages

²⁰ Remote Monitoring System

²¹ Continuous Monitoring & Failure Tracking System

²² Supervisory Control and Data Acquisition

منابع

[1] World oil magazine: <http://www.worldoil.com/> June-2012

[2] Spears & Associates, "Oilfield Market Report, 1999-2010," Tulsa, 2009.

[3] Joe Vandevier, "Run-time analysis assesses pump performance, 2010", Oil & Gas Journal

[4] "Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations" API RP 11S4, 3rd Ed., American Petroleum Institute, 2002.

[5] <http://www.slb.com>

[6] پرونده چاه‌های شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب