

شبیه‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی عملکرد پمپ الکتریکی شناور (ESP) نصب شده در یکی از چاه‌های شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

امیر مسعود فولادگر^۱، حسن قبادی^۲، بهنام خداوردی سلمانی^۳، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

چکیده

پمپ الکتریکی شناور^۴ یکی از حساس‌ترین و پیچیده‌ترین روش‌های فراآوری مصنوعی^۵ است که کاربرد آن در میادین نفتی ایران و به ویژه در توسعه میادین فراساحلی رو به افزایش است. اما در بسیاری موارد طراحی نامناسب و عدم تناسب پارامترهای عملیاتی پمپ با شرایط طراحی شده، باعث آسیب دیدگی و از کار افتادن زودهنگام این پمپ‌ها شده است. در این مقاله طراحی اجزا و پارامترهای عملکرد فنی یکی از چاه‌های مجهز به پمپ الکتریکی شناور در مناطق نفت خیز جنوب که به دلیل از کار افتادن زودهنگام پمپ از مدار تولید خارج شده، با در نظر گرفتن اصول طراحی بهینه پمپ و انجام ارزیابی اقتصادی، بهینه‌سازی شده است. بر اساس نتایج ارزیابی فنی اقتصادی انجام شده، راه‌اندازی چاه از طریق جایگزین کردن پمپ قبلی با پمپ بهینه، سبب دستیابی به تولید پیشین با ۵۷ درصد مصرف انرژی الکتریکی کمتر و صرفه‌جویی چشمگیر در هزینه انرژی الکتریکی مصرفی این چاه خواهد شد. ضمن اینکه به دلیل طراحی نقطه عملکرد پمپ بهینه در حالت بهینه عملکرد، طول عمر کارکرد پمپ نیز افزایش خواهد یافت که نتیجه آن صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌ای در صورت استفاده درازمدت از این روش فراآوری مصنوعی خواهد بود.

واژگان کلیدی | فراآوری مصنوعی، بهینه‌سازی تولید، بهینه‌سازی عملکرد پمپ الکتریکی شناور، طراحی بهینه پمپ‌های الکتریکی شناور

مقدمه

بوده که این مسئله می‌تواند یکی از علل کاهش طول عمر کارکرد پمپ باشد. شرایط عملیاتی پمپ مورد استفاده در جدول-۲ ارائه شده است.

۳- طراحی بهینه اجزا و پارامترهای فنی پمپ جدید

به منظور طراحی بهینه پمپ، پارامترهای مدنظر از جمله فشار سرچاهی، عمق

در روش فراآوری مصنوعی با پمپ الکتریکی شناور، ظرفیت فشارافزایی، بازده، انرژی الکتریکی مصرفی و طول عمر پمپ به شدت تابع شرایط عملکرد پمپ نسبت به حالت طراحی شده هستند. از طرفی پس از نصب پمپ در داخل چاه، امکان تغییر در اجزای رشته تکمیلی بدون تعمیر چاه توسط دکل تعمیراتی وجود ندارد. بنابراین باید پیش از راندن پمپ در داخل چاه، طراحی اجزا و پارامترهای عملیاتی پمپ و چاه بهینه‌سازی شود تا از عملکرد مطلوب پمپ و تولید با نرخ طراحی شده با حداقل هزینه‌های جریانی (که بخش اعظم آن هزینه انرژی الکتریکی مصرفی است) اطمینان حاصل گردد.

۱- اطلاعات چاه

چاه مورد بررسی در این مقاله، از چاه‌های تولیدی نفت افقی در مخزن آسماری یکی از میادین جنوبی ایران است. این چاه با نصب پمپ الکتریکی شناور با نرخ تولید ۳۷۵۰ بشکه در روز در مدار تولید بود که پس از ۱۰ ماه، به دلیل از کار افتادن پمپ از سرویس خارج شد. اطلاعات چاه در جدول-۱ ارائه شده است.

۲- شبیه‌سازی چاه و محاسبه پارامترهای عملکرد پمپ

چاه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار PIPESIM ۲۰۱۰ شبیه‌سازی شده و پارامترهای عملیاتی آن محاسبه و در جدول-۱ ارائه شده است. در نتیجه محاسبات حاصل از شبیه‌سازی مشخص شد در زمان تولید، نقطه عملکرد چاه خارج از بازه عملکرد پمپ^۶ بوده و بازده پمپ تنها ۲۴ درصد

اطلاعات مخزنی استفاده شده در شبیه‌سازی چاه

ویژگی	واحد	مقدار
فشار مخزن	psi	۴۶۸
دمای مخزن	°F	۹۷
عمق نهایی حفار	m	۱۴۵۱
عمق نهایی عمود	m	۹۵۴
ضریب بهره دهی چاه	STB/D/psi	۱۲۳
درجه سبکی نفت	°API	۳۸
نسبت گاز محلول به نفت	SCF/STB	۱۸۲
درصد تولید آب	%	۰/۲
وزن مخصوص آب		۱/۱۲۴
فشار مورد نیاز خط لوله	psi	۱۷۰
نرخ تولید	STB/D	۳۷۵۰



۱-۳- فشار سرچاهی بهینه

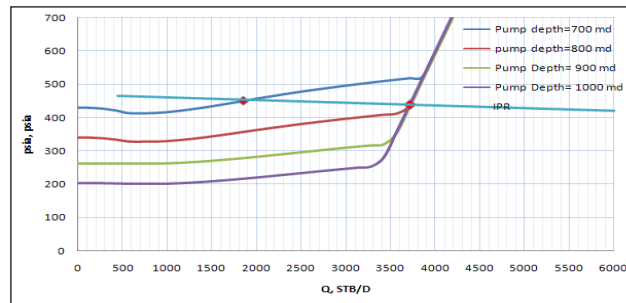
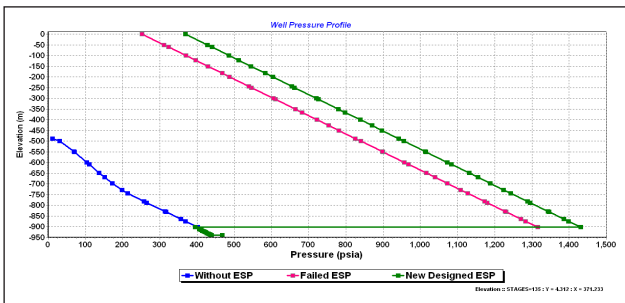
فشار سرچاهی بهینه مورد نظر برای طراحی پمپ بهینه با در نظر گرفتن حداقل فشار مورد نیاز خط لوله و ضریب بحرانی کاهنده ۵۳/۰ و ۵۰ پام حاشیه ایمنی برابر ۳۷۰ پام محاسبه شد. اضافه فشار در نظر گرفته شده، باعث تثبیت پس فشار اعمال شده روی پمپ، تثبیت شرایط عملکرد پمپ و پایداری نرخ تولیدی چاه می شود. هم چنین این فشار اضافه می تواند در صورت تغییر شرایط عملکرد مخزن و یا پمپ نسبت به حالت پیش بینی شده، برای تغییر شرایط عملکرد پمپ بدون کاهش نرخ تولید راهگشا باشد. اگرچه طراحی پمپ با فشار اضافی باعث افزایش تعداد مراحل پمپ و تا حدودی افزایش مصرف برق می شود. اما این افزایش هزینه در دراز مدت با تثبیت نرخ تولیدی و افزایش طول عمر پمپ جبران خواهد شد.

۲-۳- انتخاب عمق بهینه نصب پمپ

به دلیل تأثیر نامطلوب گاز بر توان فشارافزایی و بازده پمپ همواره سعی بر این است که پمپ در زیر نقطه آزاد شدن گاز محلول در ستون چاه نصب شود. با توجه به شکل ۱- که حساسیت سنجی نرخ تولیدی نسبت به عمق نصب پمپ را نشان می دهد، حداقل عمق نصب پمپ جهت جلوگیری از ورود گاز آزاد

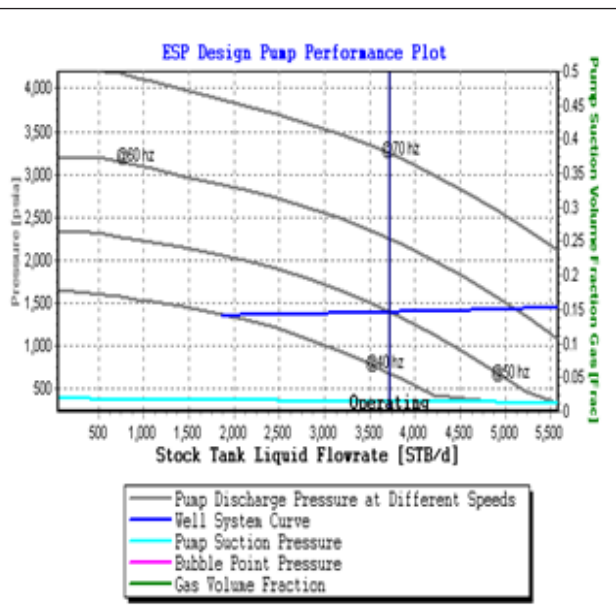
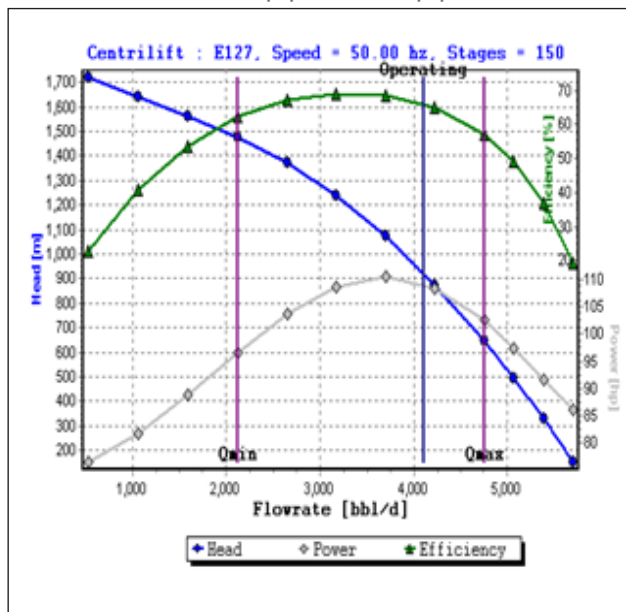
نصب پمپ، اندازه، ظرفیت و تعداد مراحل پمپ، توان، ولتاژ و آمپراژ موتور الکتریکی، اندازه کابل و لوله مغزی، محافظت کننده^۱ و ظرفیت تجهیزات سطحی به صورت بهینه فنی و اقتصادی محاسبه و انتخاب شد.

ویژگی	واحد	مقدار
نرخ تولید	STB/D	۳۷۵۰
فشار جریانی سرچاه	psia	۲۵۰
حداکثر بازده پمپ	%	۵۰
بازده عملیاتی پمپ	%	۲۴
فرکانس پمپ	Hz	۵۲
بازده عملکرد پمپ	bbl/day	۲۸۷۰-۱۵۷۰
نرخ تولیدی ته چاه	bbl/day	۴۰۹۰
شرایط عملکرد پیشترانه ^۲ پمپ		سایش از بالا ^۳



مقایسه پروفایل فشاری ستون چاه در سه حالت بدون پمپ، پیش از خرابی پمپ و بعد از نصب پمپ بهینه

۱- تحلیل گره‌ای و حساسیت سنجی نسبت به عمق پمپ



۲- نمودار عملکرد پمپ در شرایط طراحی شده (چپ) و نمودار عملکرد پمپ در فرکانس متغیر راست

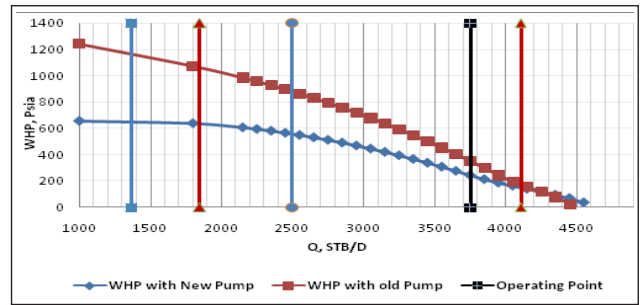
۳-۳- انتخاب اندازه و مدل بهینه برای پمپ

پمپ‌های با اندازه بزرگ، با وجود بازده و قدرت فشارافزایی بیشتر، قیمت کمتری دارند. لذا با توجه به محدودیت قطر داخلی آستری ۷ اینچ برای این چاه، بزرگ‌ترین پمپ قابل نصب از نظر عملیاتی، پمپی با اندازه ۵/۱۳ اینچ (سری ۵۱۳) خواهد بود. پس از بررسی پمپ‌های مختلف، مدل Centrilift E-127 که در نرخ تولیدی طراحی شده بیشترین بازده عملیاتی را دارد انتخاب شد. پارامترهای عملیاتی پمپ در نرخ مورد نظر در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

۳-۴- جداکننده گاز درون چاهی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی چاه و پمپ طراحی شده، فشار جریانی ورودی پمپ ۳۹۵ پام پیش‌بینی شده که بالاتر از فشار حباب نفت در این چاه بوده و احتمال جدایش گاز محلول در نفت و ورود آن به پمپ در طول عمر کارکرد آن (که حداکثر دو سال در نظر گرفته می‌شود)، وجود ندارد. اما با توجه به زیاد بودن نرخ تولیدی این چاه و احتمال تولید گاز همراه آن در آینده نزدیک، نصب جداکننده گازی برای این چاه پیشنهاد شد.

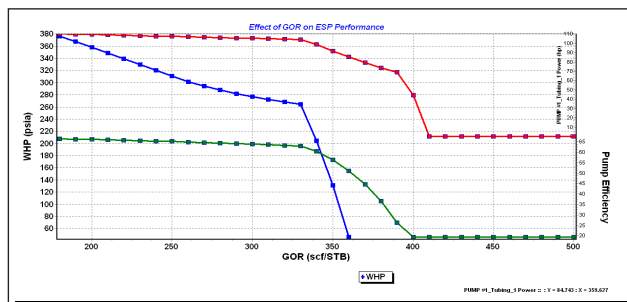
به آن ۸۰۰ متر بوده و با در نظر گرفتن افت فشار مخزن در آینده و احتمال عدم قطعیت در فشار حباب مد نظر، بهتر است پمپ تا حد امکان پایین‌تر از این عمق نصب شود. اما با توجه به افقی بودن چاه و محدودیت حداکثر زاویه ۶۰ درجه برای نصب این پمپ‌ها، عمق بهینه نصب، ۱۰۱۵ متر حفار (در زاویه ۶۰ درجه چاه) در نظر گرفته شد.



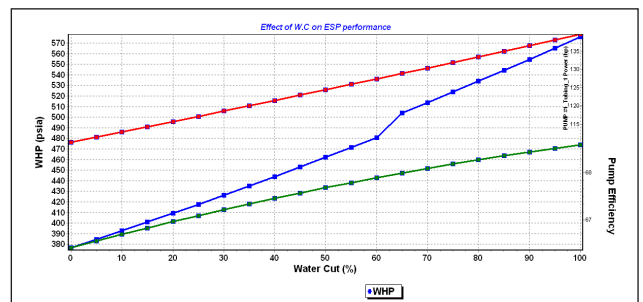
شکل ۱۴ | مقایسه عملکرد فشار سرچاهی پمپ قبلی با پمپ بهینه جدید

جدول ۱۴ مشخصات و عملکرد موتور الکتریکی بهینه انتخاب شده		
مقدار	واحد	ویژگی
Centrilift544 single		مدل موتور
۵/۴۴	inch	قطر خارجی موتور
۵۰	Hz	فرکانس کارکرد
۱۸۸	#	توان اسمی
۱۸۳۳	Volt	ولتاژ اسمی
۶۵	Amp	آمپراژ اسمی
۶۰	%	بار عملیاتی موتور
۵۰	Amp	شدت جریان عملیاتی
۱۰۰	Kwh	انرژی الکتریکی مصرفی

جدول ۱۳ مشخصات و عملکرد پمپ بهینه انتخاب شده		
مقدار	واحد	ویژگی
Centrilift E-127		مدل پمپ
۵/۱۳	inch	قطر خارجی پمپ
۱۵۰	#	تعداد مراحل پمپ
۷۲	%	حداکثر بازده پمپ
۶۶	%	بازده عملیاتی پمپ
۴۷۲۲-۲۱۲۳	bbbl/day	بازده عملکرد پمپ
۴۰۹۰	hp	توان مورد نیاز (۵۰ هرتز)
۱۴۴۶	psi	فشار تخلیه
۳۹۵	psi	فشار ورودی
۹۲۷	m	هد تولیدی
۰	%	گاز آزاد در ورودی پمپ



شکل ۱۵ | تأثیر نسبت گاز به نفت تولیدی بر فشار سرچاهی، بازده و توان مورد نیاز پمپ بهینه جدید



شکل ۱۶ | تأثیر درصد آب تولیدی بر فشار سرچاهی، بازده و توان مورد نیاز پمپ بهینه جدید



۳-۵- انتخاب موتور الکتریکی بهینه

با افزایش اندازه موتور الکتریکی، توان این موتور افزایش و هزینه خرید آن کاهش می‌یابد؛ لذا بزرگ‌ترین موتور که قطر خارجی آن (با در نظر گرفتن فضای لازم برای راندن کابل) کمتر از قطر داخلی جداری باشد، برای این چاه انتخاب شد. از طرفی با در نظر گرفتن حداکثر ولتاژ در دسترس، موتوری با بیشترین ولتاژ و کمترین آمپراژ انتخاب شد تا هرزروی انرژی الکتریکی کاهش یابد. با توجه به پیش‌بینی تجهیز سیستم پمپ به سامانه فرکانس متغیر^{۱۲} و در نظر گرفتن حداکثر فرکانس ۶۵ هرتز برای این چاه باید حداقل توان موتور انتخابی ۱۸۵ hp در فرکانس ۵۰ هرتز باشد تا در صورت افزایش فرکانس تا ۶۵ هرتز دچار اضافه بار^{۱۳} نشود. مشخصات و پارامترهای عملیاتی موتور بهینه شده در جدول-۴ ارائه شده است.

۳-۶- محافظت کننده بهینه

با توجه به زاویه انحراف حدود ۶۰ درجه این چاه، محافظت کننده کیسه‌ای^{۱۴} با حداقل دو محفظه برای آن انتخاب شد.

۳-۷- بهینه‌سازی اقتصادی اندازه کابل و لوله مغزی

افزایش اندازه لوله مغزی و کابل پمپ، باعث کاهش هرزروی انرژی هیدرولیکی و الکتریکی در لوله مغزی و کابل و در نتیجه کاهش انرژی

الکتریکی مصرفی کل سیستم می‌شود. اما در مقابل، هزینه خرید کابل و لوله مغزی افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب اندازه بهینه کابل و لوله مغزی نیازمند انجام ارزیابی اقتصادی است؛ به نحوی که کاهش هزینه برق مصرفی در طول عمر کارکرد پمپ (حداکثر ۲ سال)، جبران کننده افزایش هزینه خرید کابل و لوله مغزی با اندازه‌های بزرگ‌تر باشد [۱].

بر اساس ارزیابی اقتصادی انجام شده برای این چاه، لوله مغزی ۴۱/۱ اینچ و کابل شماره ۲- به عنوان اندازه بهینه فنی و اقتصادی برای کابل و لوله مغزی انتخاب شد.

۳-۸- تابلوی برق^{۱۵} و مبدل^{۱۶}

ظرفیت ظاهری^{۱۷} تابلوی برق و مبدل برای شرایط طراحی شده، حداقل KVA ۱۶۳ محاسبه شد. در صورت نصب سیستم فرکانس متغیر با بیشینه فرکانس ۶۵ هرتز، ظرفیت ظاهری مبدل و تابلوی برق باید حداقل KVA ۳۵۰ در نظر گرفته شود [۲].

۴- ارزیابی و مقایسه فنی اقتصادی

پارامترهای فنی و اقتصادی عملکرد چاه و پمپ بهینه جدید محاسبه و با پمپ پیشین مقایسه شد.

۴-۱- مقایسه عملکرد جریانی چاه

عملکرد جریانی چاه مورد نظر در سه حالت بدون پمپ، تولید با پمپ پیشین و تولید با پمپ بهینه جدید مقایسه و در شکل‌های ۳- و ۴- ارائه شده است.

۴-۲- حساسیت سنجی نسبت به تولید گاز و آب اضافی

یکی از مزایای پمپ‌های الکتریکی شناور نسبت به روش‌های دیگر فرازآوری مصنوعی این است که تولید آب، سبب افزایش بازده و قدرت فشارافزایی پمپ می‌شود.

۴-۳- مقایسه پارامترهای عملیاتی پمپ

پارامترهای عملکرد فنی پمپ قبلی و پمپ بهینه جدید در نرخ تولیدی یکسان (۳۷۵۰ بشکه در روز) محاسبه و در جدول-۵ ارائه شده است.

۴-۴- مقایسه هزینه‌های جریانی پروژه

بر اساس ارزیابی فنی اقتصادی انجام شده، مصرف انرژی الکتریکی کل سیستم پمپ بهینه به میزان ۵۷ درصد کمتر از پمپ پیشین خواهد بود که نتیجه آن ۱۲۲۶۸۸ دلار صرفه‌جویی در هزینه انرژی الکتریکی مصرفی این چاه به ازای یک سال کارکرد پمپ می‌باشد. (جدول-۶)

نتیجه‌گیری

- در حالت طراحی بهینه، بازده عملیاتی پمپ ۴۲ درصد و بازده کل سیستم ۱۹ درصد بیش از پمپ نصب شده پیشین است که این افزایش بازده، منجر به کاهش شدید هزینه‌های جریانی فرازآوری مصنوعی و درعین حال افزایش عمر کارکرد پمپ الکتریکی شناور (کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای در درازمدت) خواهد شد.
- فشار سرچاهی بهینه، سبب تثبیت شرایط تولید چاه و افزایش

مقایسه پارامترهای عملکرد فنی پمپ پیشین با پمپ بهینه جدید

مشخصات	واحد	پمپ پیشین	پمپ بهینه جدید
فشار سرچاهی	psia	۲۵۰	۳۷۰
عمق نصب پمپ	m	۹۶۰	۱۰۱۵
شرایط جریان کاهنده		زیر بحرانی	بحرانی
شرایط تولید		ناپایدار	پایدار
فرکانس کارکرد	Hz	۵۲	۵۰
بازده پمپ	%	۲۴	۶۶
شرایط عملیاتی پیش‌رانده پمپ		سایش از بالا	بدون سایش
میزان فشار افزایشی پمپ	psia	۹۳۱	۱۰۵۲
برق مصرفی موتور الکتریکی	Kwh	۲۳۵	۱۰۰
بازده موتور	%	۸۰	۸۸
بار موتور	%	۱۳۰	۶۰
برق مصرفی کل سیستم	Kwh	۲۴۵	۱۰۳
بازده کل سیستم	%	۱۲	۳۱

افزایش تولید آب اضافی باعث افزایش بازده، میزان فشارافزایی پمپ بهینه و افزایش فشار سرچاه در نرخ ثابت تولید خواهد شد. (شکل-۵) در صورت افزایش نسبت گاز به نفت تولیدی تا SCF/STB ۳۳۰ از طریق کاهش فشار سرچاهی، امکان تثبیت شرایط تولید در نرخ و بازده عملیاتی پمپ بهینه جدید طراحی شده وجود دارد. (شکل-۶) میزان صرفه جویی ۱۲۲۶۸۸ دلار در هزینه یک سال مصرف برق پمپ برای فقط یک چاه، نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر بهینه‌سازی طراحی پمپ‌های الکتریکی شناور بر هزینه‌های فراآوری مصنوعی با این روش بوده و به طور قطع با افزایش زمان پروژه و در نظر گرفتن همه چاه‌های میدان، میزان صرفه جویی حاصل چند برابر خواهد شد.

پیشنهادها

- طراحی ارائه شده توسط شرکت‌های پیمانکار پیش از اجرای پروژه بررسی شده و در صورت نیاز، بازنگری و بهینه‌سازی گردد.
- جهت افزایش طول عمر پمپ و کاهش هزینه‌های جریانی و سرمایه‌ای پروژه فراآوری مصنوعی توسط پمپ‌های الکتریکی شناور، شرایط فنی عملکرد پمپ‌ها به صورت مداوم شبیه‌سازی، بررسی و بهینه‌سازی شود.

- انعطاف‌پذیری این روش فراآوری مصنوعی نسبت به تغییر عملکرد چاه و مخزن در آینده خواهد شد.
- اندازه کابل و لوله مغزی انتخاب شده برای پمپ پیشین از نظر فنی و اقتصادی بهینه نبوده و باعث افزایش انرژی الکتریکی مصرفی کل سیستم می‌شد.
- انتخاب بهینه موتور الکتریکی، باعث کاهش بار موتور از ۱۳۰ درصد به ۶۰ درصد و افزایش بازده آن از ۸۰ درصد به ۸۸ درصد و کاهش برق مصرفی آن از ۲۳۵ Kwh به ۱۰۰ Kwh شد.

۶ | مقایسه هزینه‌های جریانی پمپ موجود با پمپ جدید

هزینه	واحد	پمپ قبلی	پمپ بهینه جدید
هزینه ماهانه برق مصرفی پمپ	\$	۱۷۶۴۰	۷۴۱۶
درصد کاهش مصرف برق پمپ	%		۵۷
صرفه‌جویی سالانه	\$		۱۲۲۶۸۸

۷ | ارزیابی اقتصادی برای انتخاب اندازه بهینه کابل مغزی از نظر فنی و اقتصادی

اندازه لوله مغزی (inch)						واحد	ارزیابی
۲۷/۸	۲۷/۸	۲۷/۸	۳۱/۲	۳۱/۲	۴۱/۲		
۶	۴	۲	۴	۲	۲	AWG	شماره کابل
۱۶۷	۱۶۲	۱۶۰	۱۵۵	۱۵۲	۱۴۹	Kwh	توان مصرفی
	۳۷۴۸	۶۰۷۶	۱۰۱۴۷	۱۲۳۶۹	۱۵۵۱۶	\$/year	کاهش هزینه برق مصرفی در سال
	۵۱۷۴	۱۱۳۸۲	۱۵۲۹۳	۲۱۵۰۱	۳۱۶۲۱	\$	افزایش هزینه خرید کابل و لوله مغزی بزرگتر
	۱/۴	۱/۹	۱/۵	۱/۷	۲/۰۰	year	زمان جبران افزایش هزینه
X	X	X	X	X	√		ترکیب بهینه کابل و لوله مغزی
			√				سایز کابل و لوله مغزی پیشین

پانویس‌ها

- | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1. fooladgar.a@nisoc.ir | 6 pump operating range | 12 variable frequency drive |
| 2. gobadi.h@nisoc.ir | 7. impeller | 13. over load |
| 3. samani.b@nisoc.ir | 8. up-thrust | 14. bag type protector |
| 4. Electrical Submersible Pumps (ESP) | 9. stage | 15. swith board |
| 5. artificial lift | 10. protector | 16. transformer |
| | 11. downhole gas separator | 17. apparent power |

منابع

- [1] Powers, M. L.: "Economic Considerations for Sizing Tubing and Power Cable for Electric Submersible Pumps." Paper SPE 15423 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, October 5-8, 1986.
- [2] "Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations." API RP II S4, 3rd Ed., American Petroleum Institute, 2002.