ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم های پمپاژ

مطالعه موردی (طرح انتقال آب از خلیج فارس به صنایع معدنی جنوب شرق کشور)

حمید رضا سیف، احسان کارآمد

۱- مقدمه

کشور ایران با دارا بودن حدود ۶۸ نوع ماده معدنی (غیر نفتی) با حدود ۳۷ میلیارد تن ذخایر کشف شده و حدود ۵۸ میلیارد تن ذخایر بالقوه در میان ۱۵ قدرت معدنی جهان جای گرفته است و یکی از کشورهای غنی از حیث دارایی های معدنی به حساب می آید. بخش مهمی از معادن ایران نظیر معادن سنگ آهن و مس در جنوب شرق کشور به ویژه در استان های هرمزگان ، کرمان و یزد واقع شده اند. یکی از موانع بزرگ در راه اجرای طرح های توسعه ای معدنی در این مناطق، کمبود منابع آب با کیفیت مناسب برای کاربری در کلیه فرآیند های معدنی از استخراج تا فرآوری سنگ معدن است.

یکی از منابع قابل دسترس کشور که تا کنون مورد توجه لازم قرار نگرفته، آب های شور خلیج فارس و دریای عمان است. در حال حاضر نمک زدایی از این منابع شور در سطح محدودی بصورت عمده برای مصارف آب شرب شهری در دست بهره برداری است و لکن با در نظر گرفتن افزایش هزینه های تأمین آب از منابع متعارف داخلی کشور، افزایش بهره وری کاربرد آب در مصارف شهری و صنعتی از طریق ارتقای فناوری و توسعه بازچرخانی و توسعه و بهبود روش های نمک زدایی، استفاده از این منابع آب های غیر متعارف کشور را در سطح بسیار وسیعتری توجیه پذیر و بلکه ضروری نموده است.

با توجه به رویکرد فوق ، شرکت معدنی و صنعتی سنگ آهن گل گهر ، شرکت ملی مس ایران و شرکت معدنی چادر ملو برای تأمین آب تأسیسات موجود خود و طرح های در دست توسعه ، اجرای طرح نمک زدایی، انتقال و توزیع حدود ۱۱۰ میلیون متر مکعب آب در سال از خلیج فارس را در دستور کار قرارداده اند.

۲- آشنایی با طرح

هدف این طرح، تامین آب مورد نیاز فعلی و پروژه های توسعه ای صنایع معدنی جنوب شرق کشور به شرح جدول زیر است:

جدول شماره (۱)- سهم هر یک از شرکت های سهیم در طرح

شرح	میزان آب مورد نیاز (میلیون متر مکعب در سال)	درصد از کل
شرکت معدنی و صنعتی گل گهر	۳۵	۳۱/۸

شرکت ملی صنایع مس ایران	۳۵	۳۱/۸
شرکت معدنی و صنعتی چادر ملو	۲۵	۲۲/۷
سایر مصارف	۱۵	۱۳/۷
جمع کل	۱۱۰	۱۰۰

این پروژه از سه قطعه اصلی تشکیل شده است. قطعه اول حد فاصل آب شیرین کن بند عباس تا محدوده گل گهر سیرجان، قطعه دوم حدفاصل گل گهر تا مجتمع مس سرچشمه و قطعه سوم حد فاصل مس سرچشمه تا معدن چادرملو می باشد. مشخصات کلی هر یک از قطعات به شرح جدول شماره (۲) می باشد:

جدول شماره (۱)- مشخصات قطعات طرح

شرح	طول خط انتقال (کیلومتر)	ظرفیت خط انتقال (متر مکعب بر ثانیه)	اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای مسیر (متر)
قطعه یک	۳۰۰	۴	۱۸۰۰
قطعه دو	۱۳۵	۲/۷	۹۴۵
قطعه سه	۳۱۵	۱/۵	۱۵۰۰

لازم به ذکر است که در این مقاله، فاز یک طرح (قطعه یک) و هزینه های مرتبط با آن بررسی شده است.

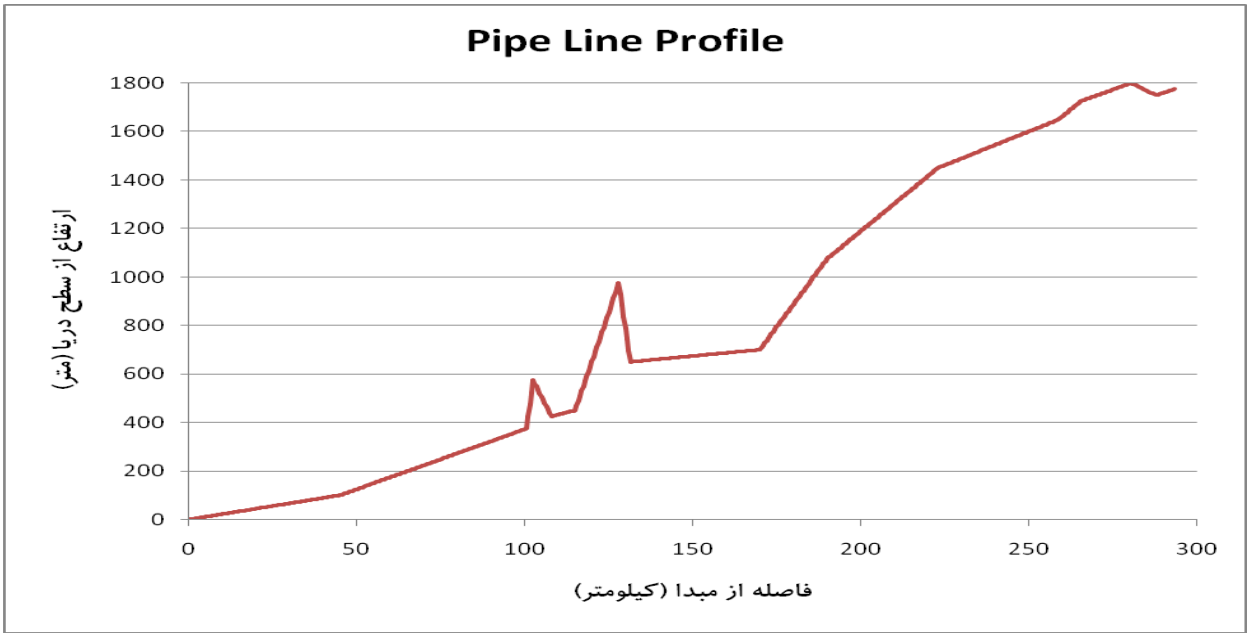
۳- هدف این مطالعه

هدف از این مطالعه، یافتن گزینه بهینه جهت انتقال آب تصفیه شده به میزان سالانه ۱۱۰ میلیون متر مکعب آب از خلیج فارس به مرکز ایران می باشد. به طور مشخص هدف عبارتست از تعیین قطر اقتصادی خط انتقال آب و همچنین تعیین تعداد مراحل پمپاژ (ایستگاه های پمپاژ). بدین منظور چندین گزینه مختلف بررسی و بهینه ترین و مناسب ترین آن ها مشخص خواهد شد.

۴- مدل مورد استفاده برای تحلیل

برای تحلیل مسیر خط انتقال، ابتدا کلیه نقاطی از مسیر که نسبت به نقاط مجاورشان در گودی یا ارتفاع قرار دارند، مشخص شده و سپس این نقاط توسط خط مستقیم به یکدیگر متصل شده اند. در نهایت ۵۸۸ گره در طول مسیر با فواصل ۰/۵ کیلومتری مورد مطالعه قرار گرفته اند. نتایج به دست آمده از این پروفیل با توجه به تعداد زیاد نقاط آن از دقت بالایی برخوردار خواهد بود.

شکل (۱) پروفیل حاصل از این مدل سازی را نشان می دهد.



شکل (۱)- پروفیل خط انتقال

با پیشرفت مطالعات و انجام کارهای بیشتر ممکن است احداث تونل جهت حذف مسیرهای پر شیب نیز مد نظر قرار گیرد و یا بخشی از آن به صورت ثقلی انجام شود ولی در هر حال پروفیل مورد استفاده در این بخش از مطالعات دقت بسیار خوبی خواهد داشت و حتی با تغییر بخش کوچکی از آن به واسطه ایجاد تونل یا خط ثقلی، نتایج مطالعات تغییر چندانی نخواهند داشت و همچنان معتبر خواهد بود.

همچنین لازم به ذکر است که این پروفیل با توجه به مسیری از پیش تعیین شده از خلیج فارس تا گل گهر به دست آمده است و بررسی مسیرهای مختلف در محدوده کاری این مطالعات نمی باشد.

۵- تعیین قطر اقتصادی خط لوله و تعداد ایستگاه های پمپاژ

روش کار شامل بررسی گزینه های مختلف از نظر تعداد ایستگاه ها و قطر خط انتقال و سپس محاسبه مجموع کل هزینه های سرمایه گذاری (Capex) و بهره برداری (Opex) در کل دوره عمر برای هر گزینه می باشد. گزینه منتخب، گزینه ای است که مجموع این هزینه ها برای آن، کمترین مقدار در بین گزینه های مختلف باشد. در این مطالعه، ۴۲ گزینه مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند.

لازم به ذکر است که جانمایی ایستگاه های پمپاژ به گونه ای انجام شده است که مشخصات هیدرولیکی آن ها مشابه یکدیگر باشد. انجام این کار باعث همسان شدن تجهیزات ایستگاه های مختلف و سهولت اجرا و بهره برداری خواهد شد. اما در عمل ممکن است به دلیل محدودیت های مکانی در جانمایی ایستگاه ها، مشخصات تجهیزات در ایستگاه های مختلف، تفاوت اندکی داشته باشند.

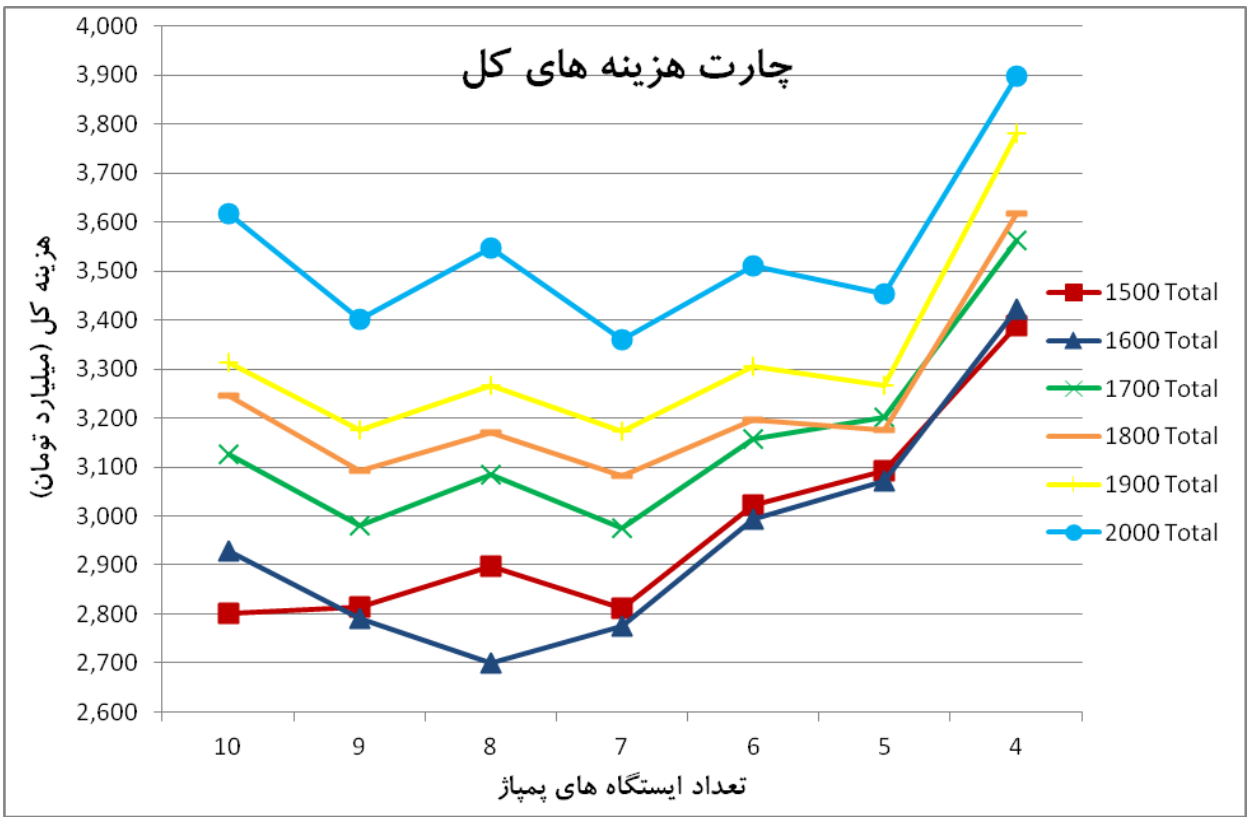
۵-۱- فرضیات

فرضیاتی که این بررسی بر مبنای آن انجام شده است، به شرح زیر می باشد:

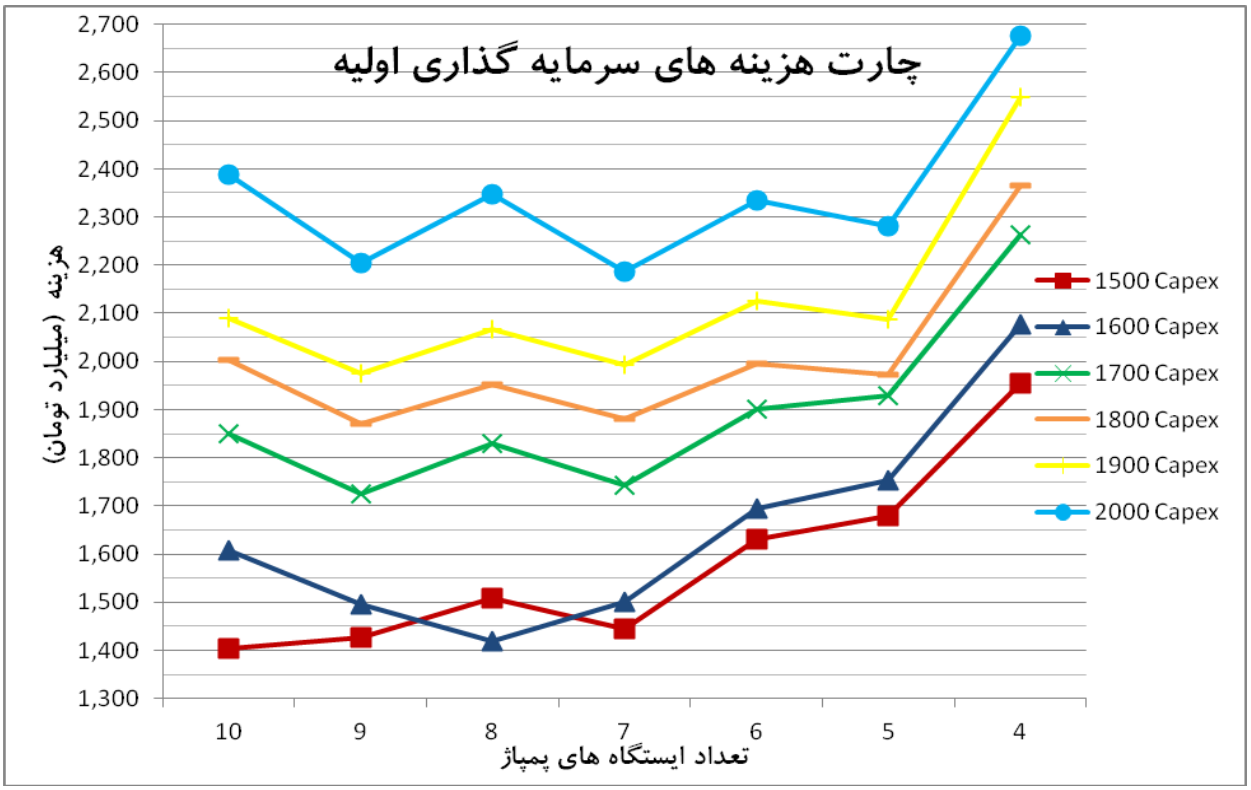
- قطرهای مختلف خط لوله انتقال که در این مطالعه بررسی شده اند عبارتند از ۱۵۰۰، ۱۶۰۰، ۱۷۰۰، ۱۸۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۰۰۰ میلیمتر
- برای هر یک از قطرهای فوق، پمپاژ ۴ مرحله ای، ۵ مرحله ای، ۶ مرحله ای، ۷ مرحله ای، ۸ مرحله ای، ۹ مرحله ای و ۱۰ مرحله ای در نظر گرفته شده است.
- دبی خط انتقال ۴ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.
- برای محاسبه افت فشار در لوله ها از فرمول هایزن ویلیامز با ضریب C معادل ۱۲۰ استفاده شده است.
- به منظور لحاظ نمودن افت های موضعی خط انتقال، ۵ درصد به طول لوله ها اضافه شده است.
- فشار مبناء برای محاسبه ضخامت لوله، فشار کارکرد داخلی بوده اما ضخامت به دست آمده جهت تحمل فشار ضربه نیز کنترل شده است.
- برای محاسبه ضخامت لوله از استاندارد AWWA M11 استفاده شده است.
- جنس لوله های انتخابی از نوع St 52 می باشد.
- میزان تنش مجاز برابر ۵۰ درصد تنش تسلیم جنس ورق در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم ورق St 52 برابر با ۳۵۹ مگاپاسکال می باشد.
- با توجه به ضخامت به دست آمده از محاسبات، نزدیکترین ضخامت استاندارد موجود به این مقدار انتخاب شده است.
- راندمان کلی سیستم پمپاژ، ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- هزینه هر کیلووات ساعت برق مصرفی، ۱۰۰۰ ریال محاسبه شده است.
- نرخ تنزیل در محاسبات، ۸ درصد در نظر گرفته شده است.

۵-۲- نتایج

شکل های (۲) و (۳) به ترتیب ارزش فعلی هزینه های کل دوره عمر و هزینه های سرمایه گذاری اولیه گزینه های مختلف را نشان می دهند. همانگونه که از شکل (۲) بر می آید، استفاده از قطر خط انتقال ۱۶۰۰ میلیمتر و تعداد ۸ ایستگاه پمپاژ،کمترین هزینه در بین گزینه های مختلف دارد و در صورت برآورده کردن سایر الزامات و قیود می تواند به عنوان گزینه انتخابی پیشنهاد شود اما، بررسی های بیشتر نشان می دهد که محل قرارگیری برخی از ایستگاه های پمپاژ در این گزینه، نا مناسب و در محل های صعب العبور می باشد. بنابراین گزینه بعدی که دارای کمترین هزینه می باشد، استفاده از قطر خط انتقال ۱۶۰۰ میلیمتر و تعداد ۷ ایستگاه پمپاژ است و این گزینه به عنوان گزینه انتخابی پیشنهاد می گردد.



شکل (۲)- ارزش فعلی هزینه های کل دوره عمر گزینه های مختلف



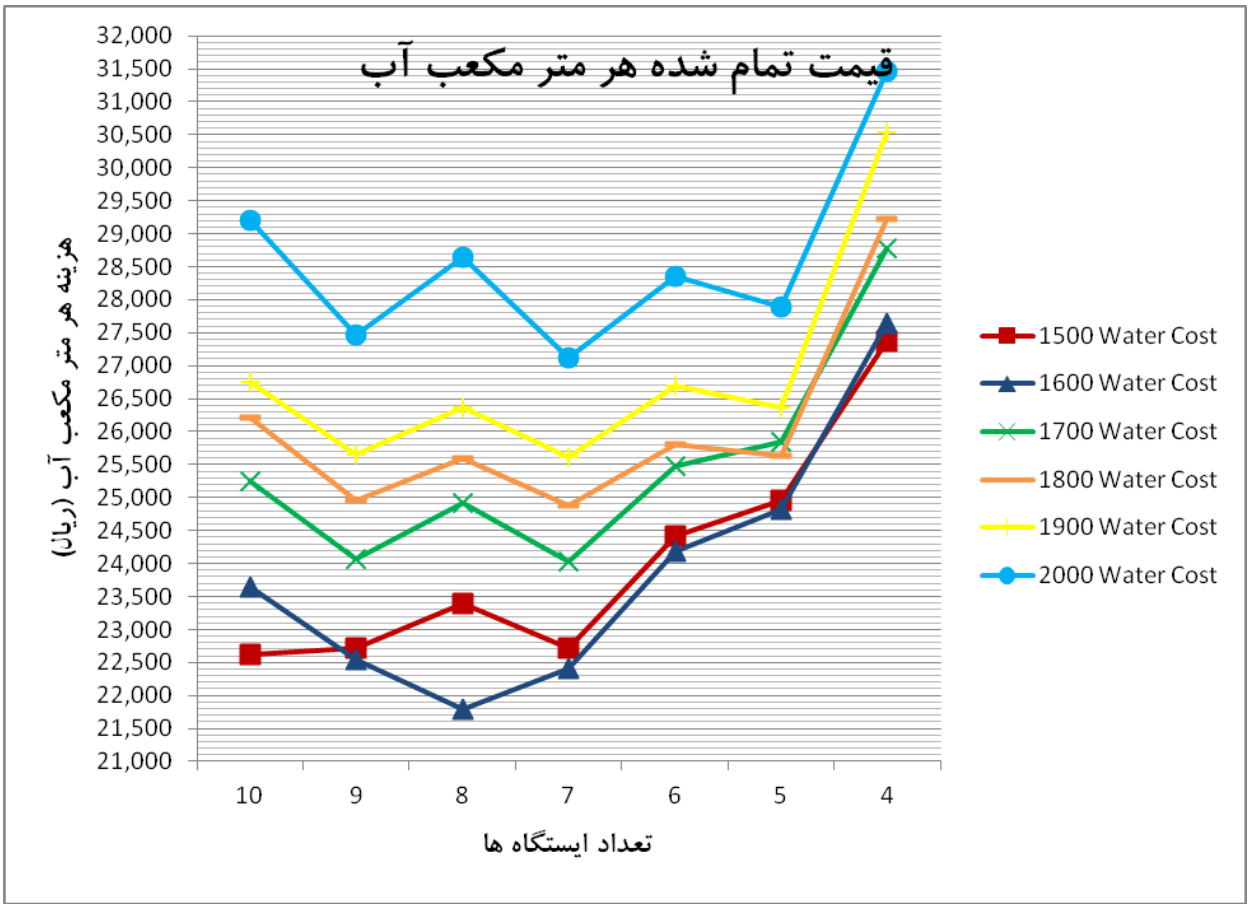
شکل (۳)- هزینه های سرمایه گذاری گزینه های مختلف

لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این بررسی (شکل ۲) نشان میدهد که گزینه های خط انتقال با قطر ۱۶۰۰ میلیمتر و تعداد ۷، ۸ و ۹ ایستگاه و همچنین قطر ۱۵۰۰ میلیمتر با تعداد ۷، ۹ و ۱۰ ایستگاه، تفاوت معناداری از نظر هزینه با هم ندارند (حداکثر ۳ درصد) و هر یک از این گزینه ها در صورت وجود معیارها، اولویت ها و الزامات خاص برای هر پروژه می تواند قابلیت انتخاب به عنوان گزینه برنده و یا حذف از میان گزینه ها را داشته باشند، همانگونه که در این پروژه، توپوگرافی منطقه امکان استفاده از قطر ۱۶۰۰ میلیمتر و ۸ ایستگاه پمپاژ را نمی دهد.

همچنین با توجه به شکل (۳)، گزینه منتخب (قطر خط انتقال ۱۶۰۰ میلیمتر و تعداد ۷ ایستگاه پمپاژ) دارای کمترین هزینه سرمایه گذاری اولیه به میزان ۱۴۰۰ میلیارد تومان می باشد.

۶- سایر نتایج حاصل از این مطالعه

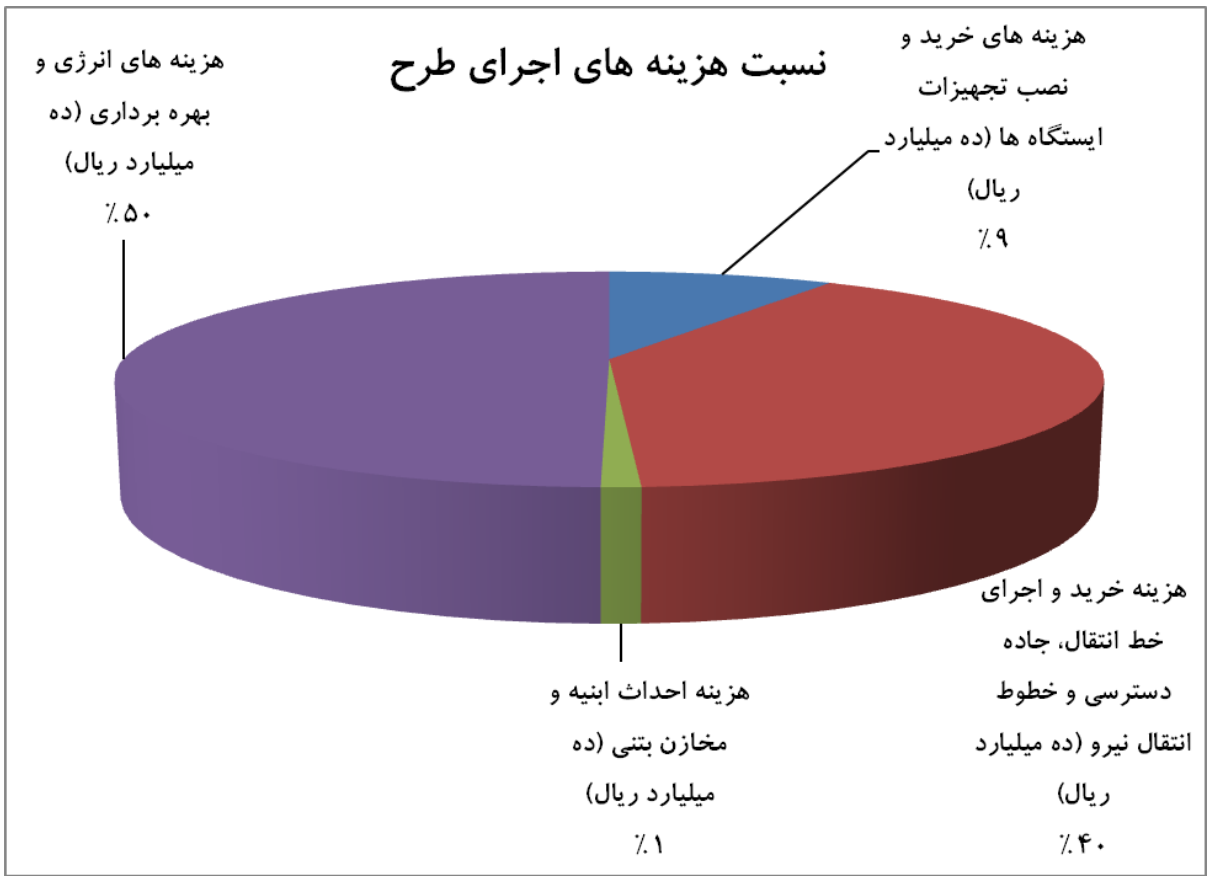
در شکل (۴) قیمت تمام شده هر متر مکعب آب برای گزینه های مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در محاسبه قیمت تمام شده، هزینه خرید آب از آب شیرین کن بندرعباس لحاظ نشده است.



شکل (۴)- قیمت تمام شده هر متر مکعب آب در گزینه های مختلف

با توجه به شکل در گزینه منتخب، قیمت تمام شده هر متر مکعب آب حدود ۲۲۴۰۰ ریال (با در نظر گرفتن هزینه های فقط مربوط به قطعه اول و بدون در نظر گرفتن هزینه خرید آب از آب شیرین کن بندر عباس) خواهد بود.

در شکل (۵)، درصد هزینه های بخش های مختلف نسبت به هزینه کل نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که هزینه های انرژی و بهره برداری بخش عمده ای از هزینه های کل سیستم را شامل می شود. لذا انتخاب مناسب الکتروپمپ ها و راندمان آن ها نقش مهمی در هزینه های کل سیستم خواهند داشت.



شکل (۵)- درصد هزینه های بخش های مختلف پروژه نسبت به هزینه کل

۷- اطلاعات اولیه و کلی در خصوص گزینه منتخب

در این بخش با توجه به بررسی های اولیه، اطلاعات کلی در خصوص مشخصات گزینه منتخب ارائه شده است. بدیهی است که این اطلاعات، اولیه بوده و در مراحل بعدی مطالعات ممکن است تغییر نمایند:

دبی خط انتقال	۴ متر مکعب بر ثانیه
قطر خط انتقال	۱۶۰۰ میلیمتر
طول تقریبی خط انتقال	۳۰۰ کیلومتر

تعداد ایستگاه های پمپاژ	۷
فشار کار هر ایستگاه	۳۴۰ متر
توان مورد نیاز پمپاژ کل (جذبی)	۱۱۷ مگاوات
توان هر ایستگاه (جذبی)	۱۷ مگاوات

۸- تعداد پمپ های مورد نیاز

در تعیین تعداد پمپ های در حال کار هر ایستگاه، روند کلی، کمینه کردن تعداد پمپ هاست. در این خصوص مساله از دیدگاه های زیر قابل بررسی است:

۸-۱- از نظر فنی

با کمتر شدن تعداد پمپ ها، مشخصات فنی پمپ های انتخابی بهتر خواهند شد. با کمتر شدن و در نتیجه بزرگ تر شدن پمپ ها، حداکثر راندمان قابل حصول توسط آن ها افزایش می یابد و این باعث می شود که راندمان کلی سیستم پمپاژ افزایش یابد. از طرفی با بزرگ تر شدن پمپ ها، سرعت دورانی آن ها کاهش می یابد و این مساله باعث کم شدن NPSHr و مشکلات ناشی از کاویتاسیون خواهد شد. ضمن اینکه، میزان استهلاک نیز در دورهای پایین تر، کمتر است.

۸-۲- از نظر اقتصادی

همانگونه که در بخش قبل بیان شد، به طور کلی با کم شدن تعداد پمپ ها و به تبع آن بزرگ شدن آن ها، راندمان افزایش یافته و دور موتور و NPSHr کاهش می یابند. افزایش راندمان به طور مستقیم، هزینه های انرژی مصرفی را کاهش می دهد. کم شدن NPSHr، باعث کم شدن هزینه های ساختمانی اجرای طرح خواهد شد چرا که در این حالت، هزینه های خاکبرداری جهت رسیدن به تراز ارتفاعی مناسب پمپ ها، کاهش خواهد یافت. کاهش دور نیز باعث کاهش استهلاک و کم شدن هزینه های نگهداری سیستم خواهد شد.

از طرف دیگر، تجارب پروژه های مشابه نشان داده است که با کمتر شدن تعداد کل پمپ های مورد نیاز برای تامین یک دبی خاص، هزینه های تامین الکتروپمپ ها و تجهیزات جانبی کمتر خواهد شد. به عنوان مثال، هزینه خرید یک دستگاه الکتروپمپ و تجهیزات جانبی آن با دبی ۱۰۰ درصد مورد نیاز، کمتر از خرید دو دستگاه الکتروپمپ که هر کدام ۵۰ درصد دبی را تامین می کنند، می باشد.

۸-۳- از نظر سهولت تعمیرات و نگهداری

به طور کلی، هر چه تعداد پمپ های در حال کار مجموعه، کمتر باشد، از نظر ریاضی، احتمال خراب شدن یک پمپ از مجموع پمپ های در حال کار کاهش یافته و به تبع آن، هزینه های تعمیرات و نگهداری کاهش خواهد یافت. این مساله، یک قاعده کلی و عمومی است و نمی توان آن را به همه حالات تعمیم داد.

نکته قابل ذکر دیگر این است که، برنامه ها و رویه های تعمیرات و نگهداری پمپ های بزرگ در مقایسه با پمپ های کوچکتر، دقیق تر و کامل تر است. همچنین جهت پایش پمپ های بزرگتر، از سنسورها و ابزارهای بیشتر و پیشرفته تری استفاده می شود و همه این موارد باعث بالا رفتن قابلیت اطمینان پمپ های بزرگتر در مقایسه با پمپ های کوچکتر و در نتیجه خرابی کمتر آن ها می شود.

۸-۴- از نظر نوع و رژیم مصرف

تنها عاملی که ما را به سمت افزایش تعداد پمپ ها و در نتیجه کوچک تر کردن آن ها می برد، دبی متغیر در مصرف کننده ها می باشد. این عامل باعث می شود که تعداد پمپ ها به گونه ای انتخاب شوند که با تغییر تعداد پمپ ها و خاموش کردن برخی از آنها حداکثر تطابق با نوسانات مصرف کننده ها ایجاد شود و این ممکن است باعث افزایش تعداد پمپ ها گردد.

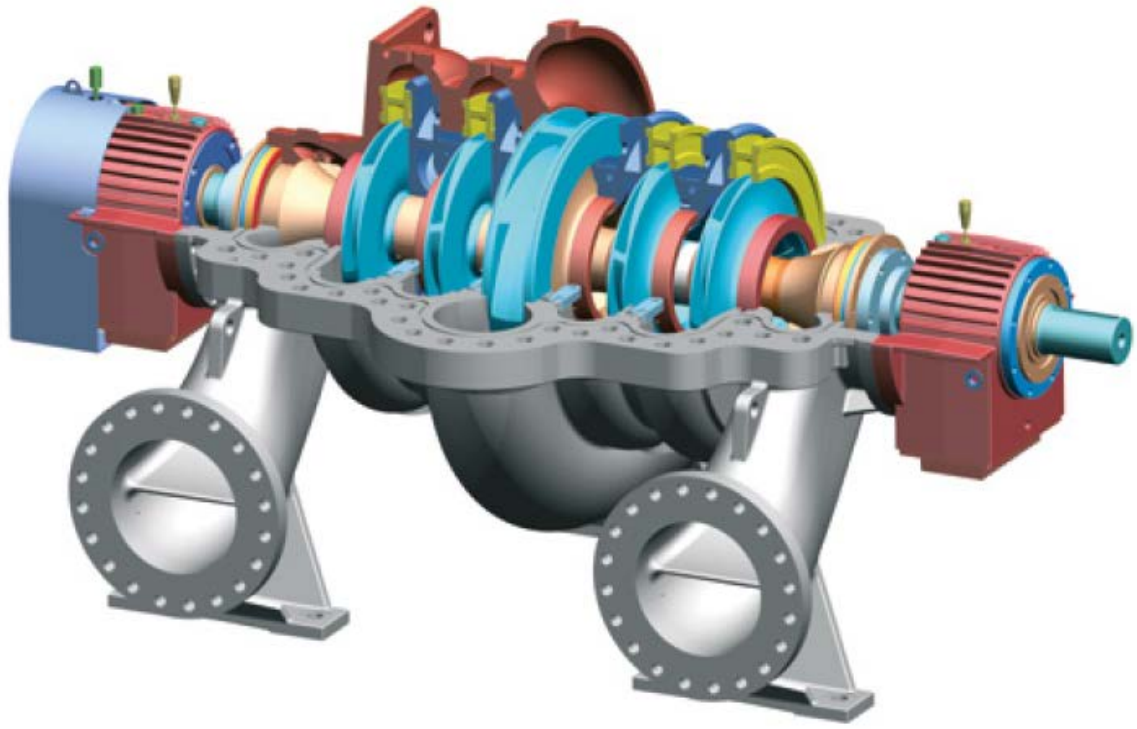
با در نظر گرفتن موارد ذکر شده در بندهای فوق، سیاست کلی در انتخاب پمپ های این پروژه، کمینه کردن تعداد آن ها تا حد ممکن می باشد. بررسی توانمندی سازندگان مختلف نشان می دهد که کمترین و مناسب ترین تعداد پمپ ممکن برای هر ایستگاه، ۳ یا ۴ دستگاه (در حال کار و بدون احتساب پمپ های رزرو) می باشد.

۹- بررسی یک نمونه الکتروپمپ قابل استفاده در پروژه

به عنوان یک جمع بندی از مباحث مطرح شده در این مقاله می توان گفت که در انتخاب تعداد و نوع الکتروپمپ های هر ایستگاه پمپاژ، موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

- با توجه به مشخصات و ابعاد پروژه، هر چه تعداد الکتروپمپ های ایستگاه کمتر باشد، هزینه های اجرای پروژه و بهره برداری کمتر خواهد بود و مشخصات فنی پمپ ها بهبود می یابد.
- موقعیت ایستگاه های پمپاژ به گونه ای در نظر گرفته می شود که مشخصات الکتروپمپ های همه ایستگاه ها یکسان و یا نزدیک به هم باشد.
- با در نظر گرفتن شرایط و ابعاد این پروژه، پمپ هایی از نوع Multistage Axially Split Casing بهترین گزینه می باشند.

شکل های (۶) و (۷) نما و مشخصات کلی یک نمونه از پمپ های قابل استفاده در پروژه را نشان می دهد.



شکل (۶)- نمای کلی یک نمونه پمپ قابل استفاده در پروژه

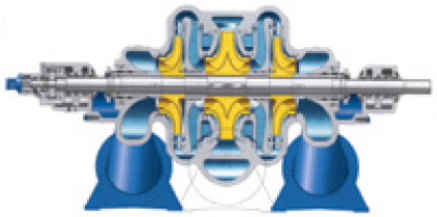
Description:
Axially split volute casing pump for horizontal installation, with one, two or three stages and double-entry radial impeller, mating flanges to DIN, ISO, BS or ANSI. Materials to DIN or ASTM in all required material combinations.

Applications:
Pumping raw, clean and service water as well as seawater. Higher flow rates and heads on request.

Higher flow rates and heads on request.

Technical data:

DN	350 – 1200 (14 – 48 in)
Q [m³/h]	18000 max. (79260 gpm)
H [m]	550 (1804 ft) max.
p [bar]	70 (1015 psi) max.
T [°C]	80 (176 °F) max.
f [Hz]	50 (4-pole max.) 60 (4-pole max.)



شکل (۷)- مشخصات کلی یک نمونه پمپ قابل استفاده در پروژه

مهمترین مزایای این نوع پمپ ها به شرح زیر می باشد:

- این نوع پمپ ها معمولا مناسب ترین گزینه برای کاربردهای این چنینی هستند. این پمپ ها علاوه بر ساده بودن ساختار آن ها، هزینه های تعمیرات و نگهداری کمتری در مقایسه با سایر پمپ ها دارند.
- برای انجام تعمیرات نیاز به جدا کردن پمپ از خط لوله وجود ندارد. با برداشتن نیمه بالایی پوسته پمپ در محل به راحتی مجموعه محور و پروانه ها در دسترس قرار گرفته و قابلیت جابجایی و تعمیر را خواهند داشت.

- به دلیل مکش از دو طرف پروانه (در پروانه دو مکشه) و در جهت عکس بودن نیروهای محوری پروانه های تک مکشه، نیروی محوری روی شفت این پمپ ها وجود ندارد و مشکلات مرتبط با آن نیز مرتفع می گردد.

۱۰-نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج به دست آمده از این گزارش را می توان به شرح زیر جمع بندی نمود:

- گزینه پیشنهادی جهت انتقال سالانه ۱۱۰ میلیون متر مکعب آب از خلیج فارس تا گل گهر، استفاده از خط لوله فولادی به قطر ۱۶۰۰ میلیمتر و تعداد ۷ باب ایستگاه پمپاژ در طول این خط می باشد.
- ارزش خالص فعلی هزینه های کل دوره عمر سیستم فوق الذکر بالغ بر ۲۸۰۰ میلیارد تومان می باشد.
- میزان سرمایه گذاری اولیه سیستم فوق الذکر بالغ بر ۱۴۰۰ میلیارد تومان می باشد.
- قیمت تمام شده هر متر مکعب آب حدود ۲۲۴۰۰ ریال (با در نظر گرفتن هزینه های فقط مربوط به قطعه اول و بدون در نظر گرفتن هزینه خرید آب از آب شیرین کن بندر عباس) خواهد بود.