

# Optimizing the dimensions of the agricultural water transfer system from the Karun 3 dam to the northeastern cities of Khuzestan province

Javad Ahadiyan <sup>1\*</sup>, Sajad Kiani <sup>2</sup>, Pouria Asiaban <sup>3</sup>, Hossein Azizi Nadian <sup>4</sup>, Monaomidvarinia <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, department of hydraulic structures, faculty of water engineering and environmental, shahid chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. graduate of Hydraulic Structures, faculty of water engineering and environmental, shahid chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. graduate of Hydraulic Structures, faculty of water engineering and environmental, shahid chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Department of civil, Environmental, architectural engineering and mathematics, Università degli Studi di Brescia, Brescia, Italy

<sup>5</sup>Ph.D. graduate of hydraulic structures, shahid chamran university of Ahvaz, khuzestan water and power authority, KWPA, Ahvaz, Iran  
Received: 30.10.2022; Accepted:25.01.2023

## Abstract

Khuzestan province has fertile plains for agriculture. In recent years, the regular supply of water in Izeh plain and Bagh Malik has been a concern, especially for agricultural purposes. With the help of a pumping station, the water of these areas reaches the heights overlooking the area from the reservoir of the Karun 3 dam and is transported by gravity to the delivery points by passing through a tunnel. The normal level of the dam in the period of operation is 840 meters, the maximum level of the reservoir is 845, and the level of its crown is 850 meters from the level of the open sea. Also, the minimum level of water intake from the lake of Karun dam is 800 meters. The purpose of this research is to optimize the agricultural water transfer system. Therefore, by conducting basic studies such as hydrological and using Watergems software, the goal of the current research is to optimize the level to which water is pumped. Calculate the cost of pipes as an objective function. According to the optimizations, the lowest price will be at the level of 970 meters if the initial plan of the tunnel level is 1000 meters.

**Keywords:** Optimization, Cost of Agricultural Pipes, Karun 3 dam, Khuzestan Province

---

\* . Corresponding author, Email: j.ahadiyan@scu.ac.ir

## بهینه‌سازی ابعاد سیستم انتقال آب کشاورزی از سد کارون ۳ به شهرهای شمال شرق خوزستان

جواد احدیان<sup>۱\*</sup>، سجاد کیانی<sup>۲</sup>، پوریا آسیابان<sup>۳</sup>، حسین عزیزی نادیان<sup>۴</sup>، منا امیدواری نیا<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> فارغ تحصیل دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> فارغ تحصیل دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، گروه عمران، محیط زیست، مهندسی معماری و ریاضیات، دانشگاه برشا، برشا، ایتالیا

<sup>۵</sup> فارغ تحصیل دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، دفتر فنی سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

### چکیده

استان خوزستان دارای دشت‌های حاصل خیز برای کشاورزی است. در سال‌های اخیر تأمین منظم آب دشت ایذه و باغ‌ملک به‌ویژه برای مصارف کشاورزی دغدغه بوده است. آب این مناطق به کمک یک ایستگاه پمپاژ از مخزن سد کارون ۳ به ارتفاعات مشرف به منطقه رسیده و با گذر از یک تونل به‌صورت ثقلی به طرف نقاط تحویل منتقل می‌شود. تراز نرمال سد در دوره بهره‌برداری ۸۴۰ متر، تراز حداکثر مخزن ۸۴۵ و تراز تاج آن ۸۵۰ متر از سطح دریای آزاد هست، همچنین حداقل تراز آگیری از دریاچه سد کارون ۳ برابر با ۸۰۰ متر هست. هدف از انجام پژوهش حاضر بهینه‌سازی سیستم انتقال آب کشاورزی هست. از این‌رو با انجام مطالعات پایه همانند هیدرولوژیکی و با استفاده از نرم‌افزار واترجمز برای دستیابی به هدف پژوهش حاضر که بهینه‌سازی تراز که آب به آن پمپاژ می‌گردد اقدام شد. محاسبه هزینه مربوط به لوله‌ها به‌عنوان تابع هدف. مطابق بهینه‌سازی‌های انجام شده کمترین هزینه در تراز ۹۷۰ متر خواهد بود در صورتی که در طرح اولیه تراز تونل ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، هزینه لوله‌های کشاورزی، سد کارون ۳، استان خوزستان

---

\*. نویسنده مسئول، Email: j.ahadiyan@scu.ac.ir

کردند (Laine and Karney (1997) با توجه به اثرات مهمی که جریان غیر ماندگار ناشی از ضربه قوچ بر سیستم-های توزیع آب دارد در نظر گرفتن اثرات آن را در بهینه-سازی این شبکه‌های لوله لازم تشخیص دادند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها در یک مطالعه موردی شامل یک سیستم ساده دارای مخزن و پمپ مورد بررسی قرار گرفت و عامل ایجادکننده ضربه قوچ، خاموش شدن پمپ فرض شد. نتایج مدل ارائه‌شده که در آن از یک روش انتخاب احتمالاتی نیز بهره گرفته‌شده پاسخ‌های بهینه مطلق بودند. Lingireddy et al (2000) یک مدل طراحی مخزن موج گیر بر اساس بهینه‌سازی ژنتیک سطح دو را تشریح نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که راه‌حل به‌دست‌آمده از این مدل، بسیار نزدیک به جواب بهینه مطلق حاصل از شمارش کامل است درحالی‌که زمان بسیار کمتر نسبت به روش شمارش کامل نیاز دارد. Jung and Karney (2004) با هدف اینکه از تحلیل غیرماندگار در طراحی بهینه شبکه لوله استفاده شود دو روش بهینه‌سازی مطلق الگوریتم ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) را برای تعیین قطرهای بهینه در یک سیستم قابل قبول برای شرایط ضربه قوچ بکار گرفتند. کاربرد هر دو روش، شیر تکاملی یکسانی را برای رسیدن به جواب‌های بهینه نشان دادند. نتایج بهینه‌سازی آن‌ها نشان داد که روش‌های قبلی که در آن‌ها فقط تحلیل ماندگار لحاظ می‌شد در سیستم‌هایی که امکان وقوع ضربه قوچ دارند کارایی کافی ندارند؛ زیرا اندازه مناسب قطرهای لوله برای جلوگیری از اثرات ضربه قوچ بسیار وابسته به شرایط ضربه قوچ رخ داده و مشخصات آن است. Jung and Karney (2006) در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کار قبلی یعنی GA و PSO، تأثیر سایز و موقعیت مخزن موج گیر که از وسایل کنترل ضربه

دشت ایزه و باغ‌ملک یکی از مستعدترین مناطق استان خوزستان برای توسعه کشاورزی می‌باشند. باوجود منابع فراوان آبی و رودخانه‌های پر آب در این استان، بسیاری از شهرها و روستاهای استان خوزستان از دسترسی به آب آشامیدنی سالم و بهداشتی محروم مانده‌اند. با توجه لزوم انتقال آب کشاورزی دشت‌های ایزه و باغ‌ملک از محل سد کارون ۳، انتقال مشترک آب شرب و کشاورزی از محل سد کارون ۳ تا محدوده ایزه می‌تواند بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های مشترک مسیر سامانه انتقال شامل سازه آبگیر، استملاک اراضی مسیر سامانه، جاده سرویس و تونل را کاهش دهد. از سوی دیگر می‌توان انعطاف‌پذیری طرح را در مراحل مختلف اجرا و بهره‌برداری افزایش داد.

پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با راه‌کارهای بهینه‌سازی خطوط انتقال انجام شده است که در ادامه به مروری بر آن‌ها پرداخته خواهد شد. Alperovits and Shamir (1977) روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی را بنام برنامه-ریزی شیب‌خطی برای طراحی بهینه سیستم انتقال آب ارائه نمودند. خط لوله موردبررسی آن‌ها شامل شبکه لوله‌ای دارای مخزن، پمپ و شیر که آب را از منبع به مصرف‌کننده انتقال می‌داد. (Lansey and Mays (1989) برای طراحی سیستم انتقال و توزیع آب، روشی مبتنی بر برنامه-ریزی غیرخطی را برای بهینه‌سازی اندازه اجزای شبکه و تصمیمات عملیاتی ارائه کردند که در آن مشخصات لوله، پمپ یا ایستگاه پمپاژ، مشخصات مخزن و بهترین تنظیمات برای شیرهای کنترل فشار برای حداقل سازی هزینه به دست می‌آمد. Simpson et al (1994) برای بهینه-سازی در شبکه لوله‌ها از الگوریتم ژنتیک باینری استفاده

قوچ هستند در طرح بهینه تعدیل اثرات ضربه قوچ را مورد بررسی قرار دادند. اثبات گردید که بی‌توجهی به محل نصب و اندازه مخازن موج گیر، می‌تواند تأثیر مثبت آن‌ها در تعدیل ضربه قوچ را بسیار کاهش دهد. Jung et al. (2009) طراحی بهینه یک سیستم آبرسانی را تحت شرایط غیر ماندگار با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی کردند. (Jung et al (2011) یک روش بهینه‌سازی چندهدفه را برای تعیین قطر لوله‌ها در یک سیستم آبرسانی متأثر از ضربه قوچ مدنظر قرار دادند که در آن دو تابع هدف را حداقل‌سازی نمودند. تابع اول هزینه سیستم آبرسانی و هدف دوم مقیاسی به نام فاکتور پتانسیل خسارت سرج بود که اولین بار به‌وسیله آن‌ها معرفی گردید. نتیجه بهینه‌سازی آن‌ها نیز منحنی پاسخ‌های بهینه پارتو برای دو هدف تعریف‌شده فوق بود. Jung and Karney (2013) طراحی بهینه‌ی یک سیستم توزیع آب را برای بدترین حالت‌های جریان غیر ماندگار به‌صورت دوگامه بهینه‌سازی نمودند. در نهایت نتیجه‌گیری شد که در نظر گرفتن جریان غیر ماندگار در فاز طراحی همراه با بهینه‌سازی انجام شده می‌تواند تأسیسات آبرسانی را به یک درجه بالا از انسجام هیدرولیکی و قابلیت اطمینان برساند. and Toudeshki (2015) Fathi Moghadam به بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم انتقال آب نیروگاه برقابی پرداختند. نتایج نشان داد که بستن سریع شیر موجب وقوع فشارهای مخرب می‌گردد. Moghaddas et Jazayeri (2016) al نشان دادند که با در نظر گرفتن اثرات متقابل مشخصات لوله، محل و نوع ایستگاه پمپاژ و نوع و محل وسایل حفاظتی در فرایند بهینه‌سازی، می‌توان هزینه ساخت تجهیزات کنترل ضربه قوچ را با لحاظ نمودن قیود هیدرولیکی به حداقل رساند. Jazayeri Moghaddas

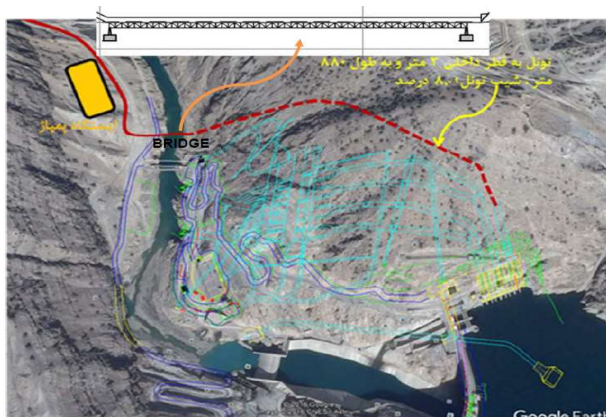
(2017) and Samani علاوه بر در نظر گرفتن اثرات متقابل مشخصات لوله، محل و نوع ایستگاه پمپاژ و نوع و محل وسایل حفاظتی در فرایند بهینه‌سازی، موضوع بهره‌وری و خدمت‌پذیری را نیز در مدل بهینه‌سازی لحاظ نمودند. نتایج نشان داد که این مدل بهینه‌سازی می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی قابل‌توجه در هزینه خطوط انتقال، طراح را در انتخاب بهترین طرح با حداقل مشکلات بهره‌برداری یاری نماید. (2021) sarkamaryan et al به استفاده از مدل جایگزین شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور کاهش محاسبات شناسایی نشت در شبکه‌های آبرسانی پرداختند و گزارش دادند که الگوریتم PS توانست با کاهش ۵۸٪ میزان تابع هدف و صرفه‌جویی زمان محاسباتی ۷۸٪ نسبت به الگوریتم GA بهترین عملکرد را به خود اختصاص دهد. (2020) Al-Khomairi et al به بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر پروژه های خط لوله پرداختند و گزارش دادند که صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های پروژه خط لوله می‌تواند با بررسی دقیق همه گزینه‌های طراحی ممکن در شرایط جریان ثابت و ناپایدار حاصل شود. (2020) Triki با انجام پژوهشی مزیت کلیدی مفاهیم خطی و انشعاب مبتنی بر تکنیک ترکیبی را نسبت به مفاهیم مبتنی بر تکنیک معمولی تأیید کرد. فقدان مطالعه پیرامون بهینه‌سازی خطوط انتقال آب کشاورزی از سد کارون ۳ به دشت ایزه باغ‌ملک منجر به انتخاب این موضوع به‌منظور بررسی چندوجهی در پژوهش حاضر شد. از این‌رو با بهره بردن از اطلاعات پژوهش‌های مختلف، در پژوهش حاضر به بررسی امکان دستیابی به تعادل و بهینه‌سازی بین هزینه خرید لوله‌های توزیع آب کشاورزی، همچنین هزینه خرید انرژی به دلیل کاهش ارتفاع پمپاژ پرداخته خواهد شد.

#### مواد و روش‌ها

## حوضه مورد مطالعاتی

سد کارون ۳ از نوع بتنی دو قوسی و به ارتفاع ۲۰۵ متر و حجم مخزن ۳ میلیارد مترمکعب است که در فاصله هوایی ۱۴۰ کیلومتری اهواز و ۲۸ کیلومتری شمال شرق ایذه واقع شده است. ظرفیت نیروگاه آن ۲۰۰۰ مگاوات هست. رقوم نرمال سد در طول بهره‌برداری ۸۴۰ متر، رقوم ماکزیمم مخزن ۸۴۵ و رقوم تاج آن ۸۵۰ متر از سطح دریای آزاد هست. حداقل و حداکثر تراز آبرگیری از دریاچه سد کارون ۳ به ترتیب برابر با ۸۰۰ و ۸۴۵ متر هست. شش گزینه برای آبرگیری از دریاچه سد کارون سه در نظر گرفته شده است که از این ۶ گزینه، ۵ گزینه از آن به سناریوهای مختلف آبرگیری از تونل آبر شماره ۳ پرداخته است و در یک گزینه هم به آبرگیری به صورت مستقل از تونل آبر شماره ۳ پرداخته شده است. تونل آبر شماره ۳ به شکل دایره‌ای و به قطر داخلی ۶/۱۲ متر با تراز کف ۷۷۴ متر از سطح دریا است. این تونل که برای طرح توسعه نیروگاه کارون ۳ در نظر گرفته شده، در زمان ساخت سد به طول تقریبی ۱۶۰ متر از دهانه ورودی آبرگیر حفاری شده

است. به دلیل حذف تأسیسات آبرگیری، موجود بودن قسمتی از تونل دسترسی و تسهیل در بهره‌برداری و آبرگیری نسبت به گزینه‌های دیگر (برج آبرگیر، سیستم شناور، مستغرق، اسکله‌ای و ...)، گزینه آبرگیری از تونل آبر به عنوان گزینه برتر در کارگاه مهندسی ارزش در نظر گرفته شده است. گزینه منتخب آبرگیری از تونل آبر مشتمل بر احداث تونلی به طول تقریبی ۸۸۰ متر از انتهای تونل آبر شماره ۳ و به قطر داخلی ۳ متر و با شیب ۸/۰۱ متر با تراز کف ۷۷۴ متر از سطح دریا هست. خروجی این تونل در حوالی پل هامون و در تراز ۷۰۰ هست. این تونل به صورت تحت فشار عمل کرده و آب را به وسیله یک Y-BRANCH فلزی به داخل دو خط لوله فلزی هر یک به قطر ۲ متر هدایت و در نهایت تحویل ایستگاه پمپاژ می‌نماید. برای عبور لوله‌های فلزی از روی رودخانه کارون، یک پل خرابایی با طول و عرض تقریبی به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). ایستگاه پمپاژ این گزینه، بعد از پل هامون و در تراز ۷۴۰ متر واقع شده است.



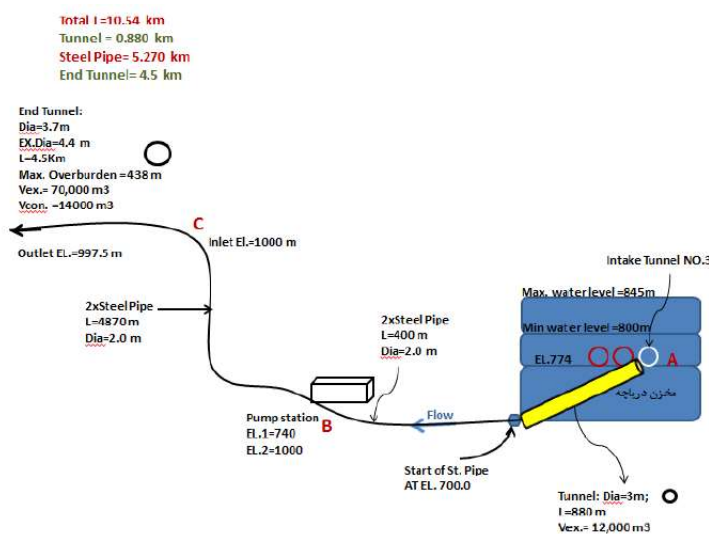
شکل ۱- جزئیات تأسیسات آبرگیر، تونل آبر شماره یک، موقعیت پل و ایستگاه پمپاژ

## ایستگاه پمپاژ

آب انتقالی از آبگیر می‌بایست به داخل تونل بلند (شماره ۲) سامانه انتقال پمپاژ گردد. بیشترین مقدار در نظر گرفته شده برای تراز کف این تونل برابر با ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد است. ایستگاه پمپاژ باید قادر به پمپاژ آب با دبی ۱۱/۱ مترمکعب بر ثانیه باشد. این دبی توسط ۸ عدد الکتروپمپ دو مکشی هر یک با آبدهی حداقل ۱/۵ مترمکعب در حداکثر ارتفاع کارکرد و با توان حدود ۴/۵ مگاوات تأمین می‌گردد. دو سری الکتروپمپ نیز به‌عنوان رزرو در نظر گرفته شده است. پمپ‌ها از نوع Axial Split Case و حداقل راندمان ۸۵٪ در نظر گرفته شده است.

تونل بلند انتقال آب (تونل شماره ۲)

تونل شماره ۲ با مقطع دایره‌ای به قطر داخلی ۳/۷ متر و طول حدود ۴/۵ کیلومتر به‌عنوان مجرای انتقال آب در نظر گرفته شده است. جریان آب در این تونل از نوع جریان ثقلی (کانال باز) هست. این تونل قادر به انتقال دبی معادل ۱۱/۱ مترمکعب آب در ثانیه برای افق طرح در سال ۱۴۲۵ هست. ماکزیمم تراز کف این تونل ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد در نظر گرفته شده است. در انتهای تونل یک حوضچه بتنی برای تقسیم میزان دبی‌های موردنیاز شرب و اراضی کشاورزی به همراه تجهیزات لازم باید در نظر گرفته شده است (Error! Reference source not found).



شکل ۲- طرح شماتیک و مشخصات سامانه انتقال آب

است و توانایی اجراشدن در محیط‌های ArcGIS، اتوکد، مایکرو استیشن و یا به‌صورت مجزا را دارد. این برنامه دارای قابلیت‌های زیادی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- محاسبه سرعت، فشار و سایر پارامترهای هیدرولیکی
- ۲- شبیه‌سازی حالت آتش‌نشانی ۳- شبیه‌سازی کیفیت آب
- ۴- محاسبات هزینه انرژی ۵- مباحث پیشرفته‌تری مانند

## نرم افزار

جهت دستیابی به اهداف پژوهش حاضر از نرم‌افزار WaterGEMS استفاده گردید.

نرم‌افزار WaterGEMS (واتر جمز) از جمله پرکاربردترین و ساده‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب

طراحی و بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۶- یافتن محل نشت آب در شبکه‌های توزیع آب شهری.

### تابع هدف و قیود مسئله

همیشه یکی از اهداف مهم در طراحی یک سیستم، رسیدن به حداقل هزینه با رعایت محدوده‌ای مجاز در معیارهای فنی و ایمنی است. لذا طبق چنین قاعده‌ای، حداقل‌سازی هزینه سیستم انتقال آب یکی از اهداف بهینه‌سازی مورد بحث در این مطالعات است.

به‌طور کلی، پارامترهایی که در هزینه لوله‌ها دخالت دارند عبارت‌اند از:

۱- هزینه لوله‌ها، ۲- هزینه حمل لوله‌ها تا محل احداث شبکه، ۳- تمیز کردن مسیر لوله‌گذاری و انجام کارهای نقشه‌برداری لازم، ۴- بارگیری و حمل لوله‌ها و اتصالات، از محل تحویل از کارفرما و باراندازی و ریسه کردن در کنار ترانشه، ۵- حفر ترانشه، ۶- تسطیح و آماده کردن کف ترانشه، ۷- قرار دادن لوله‌ها و اتصالات درون ترانشه و نصب آن‌ها، ۸- خاک‌ریزی اطراف و روی لوله درون ترانشه، با خاک سرنندی، ۹- آزمایش هیدرولیکی خط لوله، ۱۰- پخش و کوبیدن خاک سرنندی، خاک‌ریز نهایی و عملیات تکمیلی

با توجه به این هزینه‌ها، می‌توان برای هر متر طول لوله با قطر مشخص، قیمتی به دست آورد. به این ترتیب که با در نظر گرفتن یک شاخه لوله با قطر مشخص و به

دست آوردن دقیق تمام هزینه‌های مربوط به آن که شامل تمام موارد یاد شده است، قیمت کل را محاسبه نمود. سپس با تقسیم این قیمت بر طول شاخه، هزینه یک متر آن به دست می‌آید. با توجه به فهرست‌بهای ارائه شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی و قیمت‌های روز استعمال شده از کارخانه‌های سازنده لوله، هزینه کلیه موارد فوق قابل محاسبه است.

همان‌طور که گفته شد بهترین متغیری که می‌توان بر اساس آن هزینه لوله‌ها و کارگذاری آن‌ها را بیان نمود قطر لوله است. با داشتن هزینه واحد طول لوله با قطرهای مختلف، می‌توان تابع هزینه لوله‌ها را به دست آورد. مجموع حاصل‌ضرب طول لوله‌های موجود در شبکه در هزینه واحد طول آن‌ها، برابر تابع هزینه مربوط به لوله‌ها هست.

قیمت پمپ‌ها به دلیل شرایط عرضه و تقاضا بسیار متنوع هست، چراکه گاهی پمپی که تقاضای زیادی دارد با اینکه دارای قدرت کمتری نسبت به سایر پمپ‌ها است، دارای قیمت بیشتری هست. با این وجود می‌توان اظهار داشت که بر اساس تجربیات موجود اساساً کارخانه‌ها سازنده، قیمت پمپ‌ها را بر اساس مقدار قدرت آن‌ها تعیین می‌نمایند. قدرت پمپ عبارت است از حاصل ضرب ارتفاع دینامیکی کل در دبی آن، که در یک پمپ، این دو باهم نسبت عکس دارند. قدرت یک پمپ از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$(۱) \quad P = \frac{\gamma QH}{\eta}$$

که در آن:

P: قدرت پمپ بر حسب کیلوگرم متر بر ثانیه

H: ارتفاع پمپاژ بر حسب متر

Q: دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه

$\gamma$ : وزن مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

$\eta$ : بازده یا راندمان پمپ

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود قدرت یک پمپ با ارتفاعی که برای یک دبی مشخص تولید می‌کند، رابطه‌ای خطی دارد و با توجه به رابطه مستقیم بین قیمت و قدرت یک پمپ می‌توان گفت که قیمت و منحنی مشخصه پمپ، به‌طور مستقیم باهم در ارتباط‌اند.

۶-۲ روند انجام آزمایش‌ها

بهینه‌سازی شبکه‌ی لوله‌ها در سناریوهای مختلف انجام گرفت. در هر سناریو، نقطه‌ی تغذیه ثقلی یا همان خروجی تونل در یک تراز خاص در نظر گرفته شد. ترازهای مورد مطالعه عبارت هستند از: ۱۰۰۰، ۹۹۵، ۹۹۰، ۹۸۵، ۹۸۰، ۹۷۵، ۹۷۰، ۹۶۵ و ۹۶۰ متر. در هر تراز به‌عنوان نتیجه بهینه‌سازی یک ترکیب از اقطار شبکه لوله‌ها فراهم گردید به‌نحوی که اراضاکننده قیود و اهداف باشد. در گام

بعدی باید فرآیندی انجام گیرد تا این ترکیب بهینه در قالب یک عدد که همان هزینه است خود را نشان دهد تا این عدد یکتا به‌عنوان ابزاری برای مقایسه با سایر عوامل تأثیرگذار مورد استفاده قرار گیرد

جداول (۱-الف تا ۱-ت) قطر هر لوله در مقابل نام آن قرار گرفته، طول نیز از پیش مشخص و در تمام سناریوها بدون تغییر است. رده فشاری نیز همواره ثابت است زیرا در حالت استاتیک (شیر بسته) فشار وارده به لوله‌ها مستقل از قطر آن‌ها است. این رده‌های فشاری از مطالعات پایه طرح که در گزارش‌های پیشین موجود است اخذ شده. سپس ضخامت جداره لوله محاسبه شده است. برای این منظور از دو رابطه جدار نازک و  $1/120$  قطر لوله ضخامت‌هایی محاسبه شد و عدد بزرگ‌تر به‌عنوان ضخامت قابل قبول برگزیده شد.

### نتایج و بحث

با داشتن قطر، طول و ضخامت، وزن هر لوله محاسبه گردید. قیمت هر کیلوگرم لوله فولادی مطابق مطالعات پیشین ۷۷۳۳ تومان در نظر گرفته شد. با این حساب قیمت هر لوله محاسبه گردیده و برحسب میلیون تومان در جدول ۱ آورده شده است. مجموع این قیمت‌ها در انتهای ستون به‌عنوان هزینه خرید لوله در هر تراز با رنگ قرمز برجسته گردیده و نشان داده شده است.



جدول ۱- نتایج بهینه‌سازی شبکه لوله‌های کشاورزی در هر تراز تونل

جدول ۱-الف، تراز ۱۰۰۰

Elev.1000							
لوله	قطر بهینه	طول	رده فشاری	ضخامت (چدار نازک)	ضخامت (D/120)	وزن لوله	قیمت (میلیون تومان)
MP1-1	1725mm	8717m	16Bar	7.77mm	16.00mm	5930283kg	45,859
MP1-2	1725	1775	16	7.77	16.00	1207555	9,338
MP1-3	1575	733	16	7.10	14.30	406930	3,147
MP1-4	1500	19115	16	6.76	12.70	8975705	69,409
MP1-5	1350	1491	16	6.08	12.70	630107	4,873
MP1-6	1050	77	16	4.73	9.50	18932	146
MP1-7	800	8297	16	3.61	7.90	1292521	9,995
M1-PP1-1	850	583	16	3.83	7.90	96497	746
M1-PP1-2	750	1995	16	3.38	6.30	232351	1,797
M1-SP1	400	1836	16	1.80	4.00	72409	560
M1-SP2	600	4251	20	3.38	5.50	345784	2,674
M1-SP3	500	5351	20	2.82	4.50	296768	2,295
M1-SP4	600	10221	16	2.70	5.50	831394	6,429
M1-SP6	700	7683	32	6.31	6.31	836465	6,468
M1-SP7	600	5548	25	4.23	5.50	451284	3,490
MP2-1	1800	16287	16	8.11	16.00	11561998	89,409
MP2-2	1650	3852	16	7.44	14.30	2240297	17,324
MP2-3	1575	6384	20	8.87	14.30	3544123	27,407
MP2-4	1575	6508	20	8.87	14.30	3612962	27,939
MP2-5	1350	3244	16	6.08	12.70	1370937	10,601
MP2-6	1275	7113	16	5.75	11.10	2481334	19,188
MP2-7	1050	1424	16	4.73	9.50	350124	2,708
MP2-8	850	7944	25	5.99	7.90	1314875	10,168
M2-SP1	600	9003	16	2.70	5.50	732319	5,663
M2-SP2	700	5483	16	3.15	6.30	596014	4,609
M2-SP3	400	4970	20	2.25	4.00	196009	1,516
M2-SP4	700	9247	16	3.15	6.30	1005168	7,773
M2-SP5	700	6229	16	3.15	6.30	677105	5,236
M2-SP6	600	3620	16	2.70	5.50	294457	2,277
M2-SP7	900	4479	16	4.06	7.90	784964	6,070
M2-SP8	650	4467	32	5.86	5.86	419337	3,243
M2-SP9	650	3627	32	5.86	5.86	340483	2,633
M1-SP5	800	9766	16	3.61	7.90	1521364	11,765
M1-P1-SP1	450	2250	20	2.54	4.00	99828	772
M1-P1-SP2	550	3850	20	3.10	5.50	287068	2,220
M1-P1-SP3	700	7676	20	3.94	6.30	834397	6,452
							432,199

جدول ۱-ب، تراز ۹۹۰

Elev.990							
لوله	قطر بهینه	طول	رده فشاری	ضخامت (چدار نازک)	ضخامت (D/120)	وزن لوله	قیمت (میلیون تومان)
MP1-1	1600mm	8717m	16Bar	7.21mm	13.50mm	4641091kg	35,890
MP1-2	1700	1775	16	7.66	14.00	1041297	8,052
MP1-3	1500	733	16	6.76	12.70	344190	2,662
MP1-4	1600	19115	16	7.21	13.50	10177178	78,700
MP1-5	1600	1491	16	7.21	13.50	793836	6,139
MP1-6	1150	77	16	5.18	10.00	21827	169
MP1-7	750	8297	16	3.38	6.30	966323	7,473
M1-PP1-1	950	583	16	4.28	8.00	109215	845
M1-PP1-2	950	1995	16	4.28	8.00	373728	2,890
M1-SP1	350	1836	16	1.58	3.00	47518	367
M1-SP2	550	4251	20	3.10	5.50	316968	2,451
M1-SP3	550	5351	20	3.10	5.50	398988	3,085
M1-SP4	950	10221	16	4.28	8.00	1914724	14,807
M1-SP6	600	7683	32	5.41	5.50	624948	4,833
M1-SP7	550	5548	25	3.87	5.50	413677	3,199
MP2-1	1950	16287	16	8.79	16.30	12760351	98,676
MP2-2	1950	3852	16	8.79	16.30	3017921	23,338
MP2-3	1500	6384	20	8.45	12.70	2997693	23,181
MP2-4	1500	6508	20	8.45	12.70	3055919	23,631
MP2-5	1500	3244	16	6.76	12.70	1523264	11,779
MP2-6	1500	7113	16	6.76	12.70	3340005	25,828
MP2-7	1150	1424	16	5.18	10.00	403652	3,121
MP2-8	950	7944	25	6.69	8.00	1488169	11,508
M2-SP1	600	9003	16	2.70	5.50	732319	5,663
M2-SP2	650	5483	16	2.93	5.50	483163	3,736
M2-SP3	350	4970	20	1.97	3.00	128631	995
M2-SP4	950	9247	16	4.28	8.00	1732263	13,396
M2-SP5	750	6229	16	3.38	6.30	725470	5,610
M2-SP6	950	3620	16	4.28	8.00	678143	5,244
M2-SP7	850	4479	16	3.83	7.90	741355	5,733
M2-SP8	950	4467	32	8.56	8.56	895744	6,927
M2-SP9	950	3627	32	8.56	8.56	727304	5,624
M1-SP5	1000	9766	16	4.51	9.50	2286860	17,684
M1-P1-SP1	400	2250	20	2.25	4.00	88736	686
M1-P1-SP2	550	3850	20	3.10	5.50	287068	2,220
M1-P1-SP3	550	7676	20	3.10	5.50	572347	4,426
							470,568

جدول ۱-پ، تراز ۹۸۰

Elev.980							
لوله	قطر بهینه	طول	رده فشاری	ضخامت (چدار نازک)	ضخامت (D/120)	وزن لوله	قیمت (میلیون تومان)
MP1-1	1950mm	8717m	16Bar	8.78mm	16.30mm	6829494Kg	52,812
MP1-2	1600	1775	16	7.21	13.50	945043	7,308
MP1-3	1600	733	16	7.21	13.50	390263	3,018
MP1-4	1700	19115	16	7.66	14.00	11213742	86,716
MP1-5	1500	1491	16	6.76	12.70	700119	5,414
MP1-6	1000	77	16	4.51	9.50	18031	139
MP1-7	950	8297	16	4.28	8.00	1554297	12,019
M1-PP1-1	950	583	16	4.28	8.00	109215	845
M1-PP1-2	750	1995	16	3.38	6.30	232351	1,797
M1-SP1	350	1836	16	1.58	3.00	47518	367
M1-SP2	550	4251	20	3.10	5.50	316968	2,451
M1-SP3	550	5351	20	3.10	5.50	398988	3,085
M1-SP4	950	10221	16	4.28	8.00	1914724	14,807
M1-SP6	950	7683	32	8.56	8.56	1540632	11,914
M1-SP7	550	5548	25	3.87	5.50	413677	3,199
MP2-1	1950	16287	16	8.79	16.30	12760351	98,676
MP2-2	1800	3852	16	8.11	16.00	2734501	21,146
MP2-3	1700	6384	20	9.58	14.00	3745149	28,961
MP2-4	1950	6508	20	10.99	16.30	5098813	39,429
MP2-5	1700	3244	16	7.66	14.00	1903080	14,717
MP2-6	1300	7113	16	5.86	11.00	2507195	19,388
MP2-7	1050	1424	16	4.73	9.50	350124	2,708
MP2-8	950	7944	25	6.69	8.00	1488169	11,508
M2-SP1	950	9003	16	4.28	8.00	1686554	13,042
M2-SP2	950	5483	16	4.28	8.00	1027144	7,943
M2-SP3	350	4970	20	1.97	3.00	128631	995
M2-SP4	750	9247	16	3.38	6.30	1076966	8,328
M2-SP5	700	6229	16	3.15	6.30	677105	5,236
M2-SP6	950	3620	16	4.28	8.00	678143	5,244
M2-SP7	950	4479	16	4.28	8.00	839062	6,488
M2-SP8	600	4467	32	5.41	5.50	363353	2,810
M2-SP9	950	3627	32	8.56	8.56	727304	5,624
M1-SP5	900	9766	16	4.06	7.90	1711534	13,235
M1-P1-SP1	400	2250	20	2.25	4.00	88736	686
M1-P1-SP2	550	3850	20	3.10	5.50	287068	2,220
M1-P1-SP3	550	7676	20	3.10	5.50	572347	4,426
							Sum=518,701

جدول ۱-ت، تراز ۹۶۰

Elev.960							
لوله	قطر بهینه	طول	رده فشاری	ضخامت (چدار نازک)	ضخامت (D/120)	وزن لوله	قیمت (میلیون تومان)
MP1-1	2100mm	8717m	16Bar	9.46mm	17.50mm	7896300kg	61,062
MP1-2	1950	1775	16	8.79	16.30	1390657	10,754
MP1-3	1700	733	16	7.66	14.00	430012	3,325
MP1-4	1950	19115	16	8.79	16.30	14976000	115,809
MP1-5	1700	1491	16	7.66	14.00	874689	6,764
MP1-6	1600	77	16	7.21	13.50	40996	317
MP1-7	950	8297	16	4.28	8.00	1554297	12,019
M1-PP1-1	800	583	16	3.61	7.90	90821	702
M1-PP1-2	750	1995	16	3.38	6.30	232351	1,797
M1-SP1	350	1836	16	1.58	3.00	47518	367
M1-SP2	550	4251	20	3.10	5.50	316968	2,451
M1-SP3	550	5351	20	3.10	5.50	398988	3,085
M1-SP4	950	10221	16	4.28	8.00	1914724	14,807
M1-SP6	950	7683	32	8.56	8.56	1540632	11,914
M1-SP7	550	5548	25	3.87	5.50	413677	3,199
MP2-1	2300	16287	16	10.37	19.20	17728397	137,094
MP2-2	2100	3852	16	9.46	17.50	3489337	26,983
MP2-3	1950	6384	20	10.99	16.30	5001663	38,678
MP2-4	1950	6508	20	10.99	16.30	5098813	39,429
MP2-5	1500	3244	16	6.76	12.70	1523264	11,779
MP2-6	1600	7113	16	7.21	13.50	3787092	29,286
MP2-7	1150	1424	16	5.18	10.00	403652	3,121
MP2-8	950	7944	25	6.69	8.00	1488169	11,508
M2-SP1	800	9003	16	3.61	7.90	1402502	10,846
M2-SP2	1150	5483	16	5.18	10.00	1554230	12,019
M2-SP3	350	4970	20	1.97	3.00	128631	995
M2-SP4	850	9247	16	3.83	7.90	1530545	11,836
M2-SP5	950	6229	16	4.28	8.00	1166894	9,024
M2-SP6	600	3620	16	2.70	5.50	294457	2,277
M2-SP7	950	4479	16	4.28	8.00	839062	6,488
M2-SP8	600	4467	32	5.41	5.50	363353	2,810
M2-SP9	600	3627	32	5.41	5.50	295026	2,281
M1-SP5	1100	9766	16	4.96	9.50	2515546	19,453
M1-P1-SP1	400	2250	20	2.25	4.00	88736	686
M1-P1-SP2	550	3850	20	3.10	5.50	287068	2,220
M1-P1-SP3	950	7676	20	5.35	8.00	1437964	11,120
							638,305

متر بهینه‌ساز همگرا نشده و یا به عبارت دیگر امکان تأمین آب کافی تمام نواحی عمرانی به شکل ثقلی وجود نخواهد داشت.

جدول (۲) اطلاعات جداول (۱) را خلاصه کرده و ترکیب اقطار لوله‌ها را در هر رقوم ارائه می‌کند. همچنین جدول (۳) هزینه خرید لوله‌ها را در رقوم مختلف تونل ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول فوق اعلام می‌گردد که در صورت اجرای تونل در رقوم کمتر از ۹۶۰

جدول ۲- هزینه خرید لوله‌های آب کشاورزی در رقوم مختلف تونل

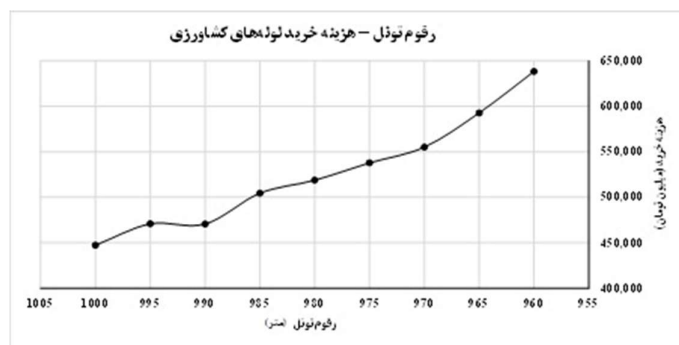
لوله	رقوم تونل (m) - قطر لوله (mm)								
	1000	995	990	985	980	975	970	965	960
MP1-1	1725	1600	1600	1800	1950	2000	1800	1900	2100
MP1-2	1725	1600	1700	1600	1600	1950	1800	1950	1950
MP1-3	1575	1500	1500	1500	1600	1600	1500	1800	1700
MP1-4	1500	1600	1600	1600	1700	1600	1800	1900	1950
MP1-5	1350	1600	1600	1400	1500	1500	1500	1600	1700
MP1-6	1050	1000	1150	1050	1000	1600	1200	1950	1600
MP1-7	800	750	750	750	950	750	750	950	950
M1-PP1-1	850	950	950	800	950	800	950	800	800
M1-PP1-2	750	750	950	750	750	750	750	750	750
M1-SP1	400	350	350	350	350	350	350	350	350
M1-SP2	600	550	550	550	550	550	550	550	550
M1-SP3	500	450	550	550	550	550	550	550	550
M1-SP4	600	950	950	750	950	950	750	950	950
M1-SP6	700	950	600	950	950	600	600	950	950
M1-SP7	600	550	550	550	550	550	550	550	550
MP2-1	1800	1800	1950	2000	1950	1950	2100	2200	2300
MP2-2	1650	1800	1950	1800	1800	1800	1900	2100	2100
MP2-3	1575	1600	1500	1950	1700	1950	1700	1800	1950
MP2-4	1575	1600	1500	1800	1950	1950	1950	1700	1950
MP2-5	1350	1500	1500	1600	1700	1600	1600	1600	1500
MP2-6	1275	1600	1500	1150	1300	1600	1600	1600	1600
MP2-7	1050	1150	1150	1150	1050	1300	1100	1150	1150
MP2-8	850	950	950	950	950	950	950	950	950
M2-SP1	600	950	600	650	950	950	750	750	800
M2-SP2	700	650	650	950	950	800	800	850	1150
M2-SP3	400	350	350	350	350	350	350	350	350
M2-SP4	700	750	950	700	750	950	800	850	850
M2-SP5	700	950	750	700	700	750	800	950	950
M2-SP6	600	550	950	950	950	950	950	600	600
M2-SP7	900	750	850	950	950	750	850	950	950
M2-SP8	650	950	950	600	600	600	600	950	600
M2-SP9	650	950	950	950	950	600	950	950	600
M1-SP5	800	950	1000	1000	900	1150	1150	1050	1100
M1-P1-SP1	450	550	400	400	400	400	400	550	400
M1-P1-SP2	550	550	550	550	550	550	550	550	550
M1-P1-SP3	700	550	550	950	550	950	950	600	950

جدول ۳- هزینه خرید لوله‌ها در رقوم مختلف تونل

هزینه خرید لوله (میلیون تومان)	رقوم تونل
447,303	1000
470,741	995
470,568	990
504,412	985
518,702	980
537,823	975
555,039	970
592,703	965
638,305	960

لوله‌ها نیز افزایش پیدا خواهد کرد. این روند تغییرات هزینه خرید لوله‌های آب کشاورزی در شکل (۳) آورده شده است.

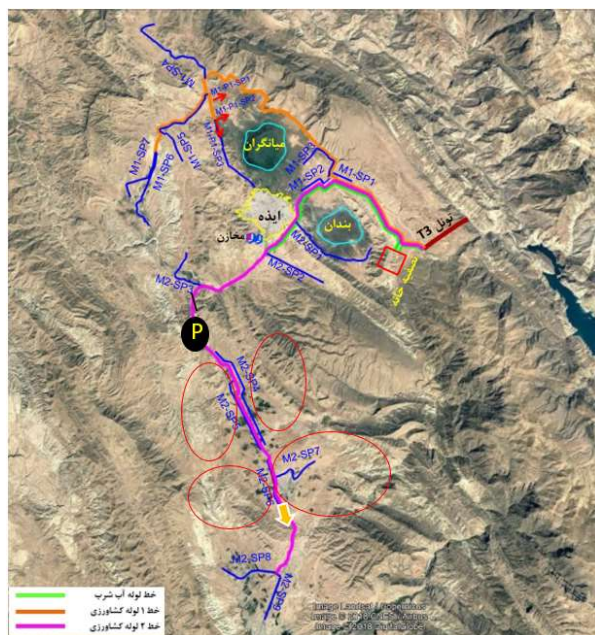
مطابق انتظار با کاهش تراز تونل و در نتیجه کاهش هد موجود قطر لوله‌ها افزایش پیدا کرده و به تبع آن هزینه خرید



شکل ۳- روند تغییرات هزینه خرید لوله‌های کشاورزی نسبت به رقوم تونل

زمین از نواحی اشاره شده بیشتر است اما خاصیت نواحی اشاره شده علاوه بر بلندی مجاورت آن‌ها با یکدیگر است. لذا قید تأمین فشار آن‌ها از فرایند بهینه‌سازی حذف شده و قطر لوله‌ها به نحوی تنظیم شده که فشار مورد نیاز تمام نواحی عمرانی به جز نواحی اشاره شده تأمین گردد. در این صورت هزینه کمتری برای افزایش قطر لوله‌ها صرف می‌گردد و با یک ایستگاه پمپاژ ثانویه فشار نواحی مورد بحث تأمین می‌گردد. برای جلوگیری از رسیدن اثر ایستگاه پمپاژ به نواحی دیگر، بعد از آبرگیری آخرین لوله درجه ۲ مذکور (M2-SP7) یک شیر کاهش فشار که فشار پایین‌دست خود را ثابت نگه می‌دارد در نظر گرفته شده است. شکل (۴) شماتیکی از این طرح، ایستگاه پمپاژ ثانویه، نواحی عمرانی تحت پوشش آن و محل نصب شیر کاهش فشار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در بخش‌های پیشین توضیح داده شد با کاهش تراز تونل قطر لوله‌ها افزایش پیدا خواهد کرد که موجب تحمیل هزینه به طرح می‌شود. در صورت عدم افزایش قطر لوله‌ها فشار لازم به نقاط تحویل‌گیرنده نمی‌رسد. در این مرحله از افزایش قطر برخی لوله‌ها جلوگیری می‌شود و برای تأمین فشار نقاط تحویل‌گیرنده پایین‌دست آن‌ها از ایستگاه پمپاژ استفاده می‌گردد. از آنجا که بهره‌برداری از این ایستگاه‌های پمپاژ مستلزم صرف هزینه و به‌کارگیری نیروی انسانی است منطقه‌ای برای پوشش ایستگاه پمپاژ ثانویه انتخاب شده که با یک ایستگاه ۴ ناحیه عمرانی پوشش داده شود. مطابق شکل (۴) نواحی عمرانی تحت پوشش M2-SP4, M2-SP5, M2-SP6 and M2-SP7 در مجاورت یکدیگر قرار دارند و دارای تراز بالایی هستند. البته در بعضی نواحی عمرانی دیگر تراز



شکل ۴- جانمایی ایستگاه پمپاژ ثانویه

#### نتیجه‌گیری

۳- در صورت کاهش تراز از ۱۰۰۰ به ۹۷۰، ۱۰۷،۷ میلیارد تومان برای خرید لوله‌های آب کشاورزی، ۱۸،۱ خواهد شد.

۴- کاهش تراز تونل از ۱۰۰۰ به ۹۷۰ باعث می‌شود ظرفیت ایستگاه پمپاژ با در نظر گرفتن دبی طرح جنوب شرق از ۴۹/۲ مگاوات به ۴۲/۳ مگاوات (۶/۹ مگاوات) کاهش پیدا کند. این مقدار کاهش در صورت عدم در نظر گرفتن دبی طرح جنوب شرق برابر ۴۰ مگاوات به ۳۴/۴ مگاوات خواهد بود

با کاهش رقوم تونل در طرح حاضر بخشی از هزینه‌ها افزایش و برخی از هزینه‌ها کاهش پیدا می‌کند که در ادامه به‌طور مختصر ارائه خواهد شد.

۱- مطابق بهینه‌سازی‌های انجام‌شده کمترین هزینه در تراز ۹۷۰ خواهد بود در صورتی‌که در طرح اولیه تراز تونل ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۲- در تراز ۹۷۰ امکان آب کافی با فشار موردنیاز برای تمام نقاط تحویل به شکل ثقلی وجود خواهد داشت.

- Al-Khomairi A., Jung B., Elsebaie I. 2020 . Lifecycle cost optimization of pipeline projects. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 69(7), 656-667.
- Alperovits E., Shamir U 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 13(6), 885-900.
- Jazayeri Moghaddas S. M., Samani H. M. V. 2017. Multi-objective optimization of transient protection for pipelines with regard to cost and serviceability, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, jws2017016.
- Jazayeri Moghaddas S. M., Samani H. M. Haghighi A. 2016. Transient protection optimization of pipelines using air-chamber and air-inlet valves, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1991-1997.
- Jung, B. S., Karney B. W. 2006. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches, *Journal of water resources planning and management*, 132(1), 44-52.
- Jung B. S., Karney B. 2004. Fluid transients and pipeline optimization using GA and PSO: the diameter connection, *Urban water journal*, 1(2), 167-176.
- Jung B. S., Muleta M., Boulos P. F. 2009. Multi-objective design of transient network models, In *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, pp. 1-10.
- Jung B., Karney B. 2013. Pipeline Optimization Accounting for Transient Conditions: Exploring the Connections between System Configuration, Operation, and Surge Protection, In *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future*, pp. 903-912.
- Jung B., Filion Y., Adams B., Karney B. 2011. Multi-Objective Design Optimization of Branched Pipeline Systems: Analytical Probabilistic Assessment of Fire Flow Failure. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability*, pp. 156-165.
- Kanani Toudeshki Z., Fathi moghadam M. 2015. Evaluation of Unsteady Friction in Hydropower Plant Transport, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*
- Laine D., Karney B. W. 1997. Transient analysis and optimization in pipelines: a numerical exploration, In *BHR Group Conference Series*, pp. 281-296.
- Lansey K. E., Mays L. W. 1989. Optimization model for water distribution system design, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(10), 1401-1418.
- Lingireddy S., Funk J. E., Wang, H. 2000. Genetic algorithms in optimizing transient suppression devices. In *Building Partnerships*, pp. 1-6.
- Sarkamaryan S., Ashrafi S. M., Highlight A., Mohammad Vali Samani H. 2021. Using Artificial Neural Network surrogate model to reduce the calculations of leak detection in water distribution networks, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) 645-648.
- Simpson A. R., Dandy G. C., Murphy L. J. 1994. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of water resources planning and management*, 120(4), 423-443.

Triki A. 2021. Comparative assessment of the inline and branching design strategies based on the compound technique. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 70(2), 155-170.