Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics

Technical Paper
https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.304690.1557

Alternatives of Hydraulic Design and Implementation of The Second Line of Treated Wastewater Transfer to The Varamin Plain

Hamed Naghavi[1], Atefeh Parvaresh Rizi[2*]

1- PhD student in Hydraulic Structures, Kish International Campus, University of Tehran.
2- Associate Professor, Irrigation & Reclamation Engineering Department, University of Tehran.

[*] **parvarsh@ut.ac.ir**

Received: 29 September 2021, Accepted: 25 November 2021 J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The use of treated wastewater has been common in various countries around the world for a long time. With increase in world population and the need for more water resources, the use of treated municipal wastewater for irrigation is expanding. One of the limitations of using treated wastewater for irrigation is the cost of transporting it to agricultural areas. In general, costs of water conveyance line are estimated using pricing for constructed projects that may be similar in the size, material, and depth. The water supply system for irrigation in the plains of Varamin and Pakdasht in the south of the capital has always been considered due to its size and socio-economic importance. The presence of a large treatment plant in the south of Tehran can be a reliable source of recycled water. This treatment plant with a capacity of 700,000 m^3/day produces effluent of suitable quality for agriculture from the municipal wastewater treatment process. Part of this wastewater has been transferred to the irrigation network of Varamin through a 36 km long open canal for the last 30 years. The effluent extracted from Tehran water treatment plant provides the conditions for the implementation of an efficient plan to solve the existing problems and provide safe water. Based on this, a 36 km transmission line with a water delivery structure to the downstream irrigation network was considered. After the implementation of the project, the transmission line with a discharge capacity of 9 m^3/s and the existing canal with a transfer capacity of 4 m^3/s, will perform the effluent transfer work with an integrated system. The existing canal will normally act as a substitute and complement, and in critical times and in the presence of rain and floods, it will enter the transmission circuit and operate with the main system.

Methodology: The case study is the second line of wastewater transfer near Tehran canal in the south-east of Tehran province. Tehran canal, approximately 36 km long, starts from the southern Tehran treatment plant located in the south of the Shahre'Rey and joins the main canal of the Varamin irrigation network. Then, it feeds the main canal (AB) of the Varamin irrigation network and secondary canals by a water dividing structure. In this section, different options of material and type of pipe for the second line of wastewater transmission, such as closed pipes (pipes and concrete boxes) or open canals are examined. The following is a brief description and economic estimate of the proposed options. In this study, by examining six different options and based on the material and type of transmission line and implementation feasibility, a suitable transmission line is selected technically, economically and environmentally. The considered options were as follows: building a new canal parallel

to the existing canal, constructing two concrete boxes parallel to the existing canal, constructing a concrete twin box parallel to the existing canal (in one side of the Tehran canal), compound cross-section option (correction of Tehran canal), re-lining the Tehran canal and using a pipeline parallel to it, and finally, implementing a transmission line parallel to the Tehran canal and maintaining the current operating conditions of the Tehran canal. To estimate the costs of executive operations, the proposed options are examined in detail. After selecting the appropriate option, which was to be implemented with thick polyethylene pipes, the production line of this type of pipes was imported to Iran by Mohammadian Oil and Gas Engineering and Development Company to produce pipe with diameter of 3000 mm.

Results and discussion: In this section, the transmission line flow was analyzed at different hours of the day and the design flow was obtained. Different materials were investigated for the transmission duct, the roughness coefficient proportional to the diameter and the material of the transmission pipe for the sewage was proposed, a hydraulic model was implemented to simulate the flow behavior in the duct and to determine the location of manholes. Finally, the economic analysis of the project was performed for different options and the sixth option was selected to implement.

Conclusions: Open canal option in terms of environmental issues and sedimentation problems and maintenance and operation problems (especially due to sewage, is prone to algae growth and needs regular and continuous attention, and given the short life cycle of the project) was not recommended. The cost of execution of concrete box in comparison with SRPE pipes does not show a significant difference and in terms of technical and operational issues, execution time, design safety (in terms of leakage) and difficulty of execution is not comparable to transfer using pipe. In addition, reinforced polyethylene pipe has a significant advantage over concrete box. Therefore, the sixth option was selected and implemented.

Keywords: Pipe production, Large diameter pipe, Varamin water treatment plant, Waste water transfer, SRPE pipes.

© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک

مقاله فنی (صنعت)
https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.304690.1557

گزینه‌یابی طرح هیدرولیکی و اجرای خط دوم انتقال پساب تصفیه‌شده به دشت ورامین

حامد نقوی[1]، عاطفه پرورش ریزی[2*]

۱- دانشجوی دکترای پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران و مدیر پروژه خط دوم انتقال پساب تصفیه‌خانه جنوب تهران به ورامین.
۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

* parvarsh@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این تحقیق گزینه‌های هیدرولیکی و اجرایی برای احداث خط دوم انتقال پساب تصفیه خانه جنوب تهران بررسی و تحلیل شده‌اند. این طرح از نظر حجم بالای انتقال پساب به زمین‌های کشاورزی، در کشور منحصر به فرد است و در راستای بازچرخانی و استفاده مجدد از آب و تامین آب کشاورزی دشت ورامین انجام می‌شود و توسعه خط انتقال موجود انجام می‌شود. در این بررسی محاسبات هیدرولیکی برای شش گزینه پیشنهادی انتقال پساب انجام شد. این گزینه‌ها شامل احداث کانال جدید ذوزنقه‌ای به موازات کانال (تهران) موجود، اجرای ۲ باکس بتنی به موازات کانال موجود (و اجرا در دو سمت کانال یا در یک سمت کانال موجود)، اجرای مقطع مرکب و افزایش ارتفاع کانال تهران، پوشش‌دهی مجدد کانال تهران و استفاده از یک خط لوله به قطر ۲۴۰۰ میلیمتر به موازات آن و نهایتاً اجرای یک خط لوله SRPE به قطر ۳۰۰۰ میلیمتر به موازات کانال تهران بوده‌اند. این گزینه‌ها از نظر اقتصادی، سهولت اجرا، تملیک اراضی، مسائل بهره برداری و مسائل محیط زیستی نیز مقایسه شدند. در نهایت گزینه استفاده از یک خط لوله ۳۰۰۰ میلیمتر که در اغلب موارد حامل جریان روباز است به عنوان گزینه برتر معرفی شد. این طرح با تولید لوله‌های لازم در مجاورت محل اجرا همراه است و قادر است افزایش ظرفیت تصفیه پساب تا ۲۵ درصد میزان کنونی را نیز پوشش دهد.

کلیدواژگان: تولید لوله، لوله با قطر بزرگ، تصفیه خانه ورامین، انتقال پساب، لوله‌های SRPE.

۱- مقدمه

استفاده از فاضلاب تصفیه شده در کشورهای مختلف جهان از گذشته متداول بوده است. با افزایش جمعیت جهان و نیاز به منابع آب بیشتر، استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهری برای آبیاری اراضی کشاورزی در حال گسترش است (Revitt et al., 2021; Feigin et al., 2012). بکارگیری ایمن این منابع ضمن افزایش امنیت غذایی (Ungureanu et al., 2020)، یک راهبرد تأیید شده برای استفاده کارآمد و جلوگیری از آلودگی آب است که به طور روزافزون در جهان به ویژه در کشورهایی که با کمبود آب روبه‌رو هستند در حال توسعه است (Jaramillo and Restrepo, 2017). Altinbilek (2006) در پژوهشی مدیریت آب در استانبول را ارزیابی کرد. او بیان داشت طی دهه گذشته ۳/۶ میلیارد دلار برای بهبود و گسترش سامانه‌های آب و فاضلاب در این منطقه سرمایه‌گذاری شده است. فاضلاب تصفیه شده در همان مدت از ۱۰٪ به ۹۵٪ افزایش یافته و چندین پروژه انتقال آب در مقیاس بزرگ آغاز شده است. تحقیقی در اسپانیا نشان داد که استفاده دوباره از پساب تصفیه شده و انتقال آب بین بخشی می‌تواند منجر به سودمندی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در هزینه‌های پمپاژ و کوددهی و در نهایت بهبود عملکرد و درآمد کشاورزان شود (Heinz et al., 2011). به طور کلی جابه‌جایی آب توسط سازه‌های انتقال مانند کانال‌ها، لوله‌ها، تونل‌ها،

گالری‌ها و زهکش‌ها انجام می‌شود (Toprak, 2016). انتقال آب اغلب با هدر رفت‌هایی همراه است. Mohammadi et al. (2019) با انجام مطالعه میدانی به ارزیابی انتقال آب در شبکه ورامین پرداختند. یافته‌ها نشان داد عمر بالای کانال‌ها درکنار بهره‌برداری و نگهداری نامناسب موجب هدر رفت‌های گسترده در مسیر انتقال شده است. استفاده از پوشش‌های نفوذ ناپذیر تا حد زیادی می‌تواند هدر رفت‌های انتقال را کاهش دهد. Malekpour and Dahanzadeh (2017) در تحقیقی به مقایسه هیدرولیکی انتقال آب با لوله کم فشار و مجرای روباز پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد به دلیل هدر رفت کمتر آب، سرعت عمل بالا، آسانگری در اجرا، پرت کمتر زمین و استفاده بهینه از ارتفاع هیدرولیکی آب، لوله پلی اتیلن بر مجرای روباز برتری دارد. استفاده و انتقال غیراصولی پساب تصفیه شده به دلیل وجود ذرات معلق کانی و آلی، گاهی می‌تواند موجب انتشار بوی نامناسب و آزار ساکنان منطقه‌های همجوار و همچنین کارگران شاغل در پروژه‌ها شود. برای کاستن از اثرگذاری‌های محیطی و امکان دسترسی افراد در طول مسیر به پساب انتقالی، خطوط انتقال پساب به مناطق مصرف به صورت لوله و یا کانال سر پوشیده طراحی می‌شود. با توجه به فاصله محل تولید و مصرف پساب و همچنین نوع خط انتقال که امکان دسترسی افراد و ساکنین مناطق مجاور را کمینه می‌سازد، امکان تغییر قابل توجه در کیفیت پساب و همچنین تاثیرگذاری و تاثیرپذیری از محیط امکان‌پذیر نیست (Anonymous, 2010). یکی از محدودیت‌های استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای آبیاری، هزینه انتقال آن به مناطق کشاورزی است (Jemmali and Abdel-Majid, 2002). Seyedabadi and attari (2012) در تحقیقی به بهینه‌سازی سامانه انتقال پساب تصفیه‌خانه فاضلاب به مناطق کشاورزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. در مدل توسعه یافته، قطر خطوط انتقال پساب باتوجه به تابع هدف و بر مبنای کمینه‌سازی هزینه‌ها بهینه شده است. به طور کلی، برآورد هزینه‌های خطوط انتقال آب با استفاده از قیمت‌گذاری پروژه‌های که پیشتر ساخته شده‌اند انجام می‌شود که ممکن است از نظر اندازه، جنس، عمق و مکان همانند باشند. اما همخوانی کامل عامل‌های اثرگذار بین پروژه‌های مختلف بسیار نامحتمل است. بنابراین، محققان با استفاده پایگاه داده‌ها و روش‌های رگرسیون به دنبال برآورد بهینه‌ترین روش در پروژه‌های انتقال آب هستند (Marchionni et al., 2016). تحقیق انجام شده توسط Ahmadi Kord et al. (2017) منجر به ارائه یک مدل بهینه با رویکرد فازی برای انتقال پساب به مناطق کشاورزی شد. این مدل ریاضی به صورت همزمان برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه، احداث لوله یا کانال و تخصیص پساب تصمیم‌گیری می‌کند. Chee et al. (2018) تاکید داشتند برنامه‌ریزی و طراحی سامانه‌های بزرگ انتقال آب نیاز به مدل‌های برآورد هزینه دارند. برای این منظور مدل واتر کاست[1] را معرفی کردند که برای برآورد هزینهٔ پروژه بزرگ انتقال آب در شمال شرقی آریزونا استفاده شد. این مدل به مهندسان اجازه می‌دهد تا هزینه‌های طیف گسترده‌ای از فشار و قطر و جنس لوله شامل پلی‌اتیلن، پی‌وی‌سی، فولاد و چدن نشکن را در شرایط مختلف جاسازی و عمق دفن، برآورد کنند. به طور معمول، طراحی سیستم‌های انتقال آب بر این فرض استوار است که پارامترهای موثر، در طول چرخه عمر سامانه ثابت باقی می‌مانند. در حالی که عدم قطعیت‌هایی در طی تجزیه و تحلیل و طراحی این سامانه‌ها، مانند زبری لوله معادل و قطر داخلی واقعی لوله‌ها پدیدار می‌شود (Tsakiris and Spiliotis et al., 2016). ضریب زبری لوله‌های مدفون از عامل‌هایی مانند جنس لوله، زمان سرویس، کیفیت آب، فشار و سرعت جریان آب تاثیر می‌پذیرد. قطر داخلی لوله‌ها با گذشت زمان دستخوش تغییر می‌شود و در لوله‌های قدیمی قطر واقعی داخلی، کوچک شده و گاهی شکل غیر دایره‌ای به خود می‌گیرد (Shu et al., 2009).

سامانه تأمین آب اراضی کشاورزی در محدوده دشت‌های ورامین و پاکدشت در جنوب پایتخت به علت گستره و اهمیت اجتماعی– اقتصادی آن همواره مورد توجه بوده است. با توجه به احداث سد ماملو، در شرایط کنونی استفاده از جریان آب رودخانه برای مصرف‌های کشاورزی

1 WaterCoste

دشت ورامین منتفی است و پساب خروجی از تصفیه‌خانه جنوب تهران به عنوان جایگزین جریان آب سطحی حقابه کشاورزی دشت ورامین از جاجرود در نظر گرفته شده است. وجود یک تصفیه خانه بزرگ در جنوب شهر تهران می‌تواند منبع تأمین آب بازیافتی مطمئنی باشد. این تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با ظرفیتی بالغ بر ۷۰۰ هزار مترمکعب در روز، تولید کننده پساب با کیفیت مناسب برای کشاورزی است. بخشی از این فاضلاب طی ۳۰ سال گذشته توسط یک کانال انتقال روباز به طول ۳۶ کیلومتر به شبکه آبیاری دشت ورامین منتقل شده است. ظرفیت این کانال $4\ m^3/s$ است. کانال موجود در شرایط کنونی و با افزایش روز افزون جمعیت تهران و گسترش شبکه جمع‌آوری فاضلاب در کنار مسئله حاد زیست محیطی آن، موجب کمبود ظرفیت آن برای انتقال حجم پساب تولیدی شده است. افزون بر این، گستره ۵۴ هزار هکتاری دشت ورامین و ضرورت داشتن یک منبع آبی مطمئن و پایدار برای کشاورزی، یکی از محورهای توسعه منطقه است. برای تأمین آب این شبکه استحصال از منابع آب زیرزمینی به صورت یک رویه عادی درآمده و ۲۸۴۰ حلقه چاه عمیق، مورد استفاده است. افزون بر تأمین آب از این چاه‌ها، احداث تأسیسات آبرسانی برای استفاده از آب سطحی شامل بند انحرافی و ابنیه فنی وابسته بر روی رودخانه جاجرود و کانال اصلی منشعب از آن و کانال تهران-ورامین و همچنین حوضچه‌های تغذیه مصنوعی نیز اجرا و به‌کار گرفته شده است. در حال حاضر برای آبیاری ۵۴ هزار هکتار اراضی موصوف، بر مبنای الگوی کشت فعلی، سالانه به ۶۰۵ میلیون مترمکعب آب نیاز است که ۲۳۵ میلیون مترمکعب آن از منابع آب زیرزمینی و ۲۷۰ میلیون مترمکعب از آب سطحی تأمین می‌شود. این حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی با بروز پدیده زیانبار نشست در محدوده دشت ورامین همراه است؛ نشست‌های پیاپی در محدوده‌ای که مهم‌ترین راه‌های منتهی به پایتخت از آن گذر می‌کند و مهم‌ترین محدوده کشاورزی و کسب و کارهای مرتبط در آن رشد یافته‌اند. در این شرایط، خروجی تصفیه‌خانه تهران شرایط اجرای یک طرح کارآمد برای رفع مسئله‌های موجود و تأمین آب مطمئن را فراهم می‌کند. بر این اساس یک خط انتقال ۳۶ کیلومتری با سازه‌های مختلف، سازه تحویل آب به شبکه پایین دست، تکمیل و اصلاح حوضچه‌های تغذیه مصنوعی، اصلاحاتی در کانال موجود و شبکه دشت ورامین مد نظر قرار گرفت. انتقال آب در شرایط معمول و با ظرفیت عبور دبی $9\ m^3/s$ در کنار کانال موجود با ظرفیت انتقال $4\ m^3/s$ با یک سامانه تلفیقی کار انتقال پساب را انجام خواهند داد. کانال موجود در شرایط عادی به‌عنوان جایگزین و مکمل عمل خواهد کرد و در زمان‌های بحرانی و در بارندگی‌ها و وجود سیلاب، به مدار انتقال وارد و همراه با سامانه اصلی عمل خواهد کرد. یکی از علت‌های احداث خط لوله، کانال روباز موجود و بروز مسائل زیست محیطی و انتشار بوی نامناسب (اگر در برخی بازه‌های زمانی، کیفیت پساب چندان مطلوب نباشد) در محدوده‌های مسکونی و صنعتی مجاور کانال است و مدفون بودن مجاری انتقال این مسئله را رفع می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش محدوده مطالعه معرفی شده و سپس سناریوهای متفاوت برای انتقال پساب تشریح می‌شود.

۲-۱- محدود طرح مطالعه شده

محدوده مورد مطالعه خط دوم انتقال پساب در مجاورت کانال تهران در جنوب شرقی استان تهران است. کانال تهران به طول تقریبی ۳۶ کیلومتر از تصفیه‌خانه جنوب تهران در جنوب شهرری شروع شده و به کانال اصلی شبکه ورامین می‌پیوندد و توسط یک سازه مقسم در این محل کانال اصلی شبکه ورامین (AB) و کانال‌های درجه دو AMX و AC را تغذیه می‌کند. در شکل‌های ۱ و ۲ موقعیت پروژه و موقعیت ابتدا و انتهای کانال تهران (در محل تصفیه‌خانه شهرری و در موقعیت A در محل اتصال به شبکه آبیاری دشت ورامین) و راه‌های دسترسی به محدوده طرح آمده است.

موقعیت ابتدا و انتهای بخش مورد بررسی از خط انتقال در سامانه مختصاتی UTM در جدول ۱ ارائه شده است.

Fig. 1 Project location and wastewater transmission line plan

شکل ۱ موقعیت پروژه و پلان خط انتقال پساب

جدول ۱ مختصات جغرافیایی ابتدا و انتهای محدوده مطالعه

Table 1 Geographical coordinates at the beginning and end of the study area

Location	X	Y
Start point	540554	3935954
End point	564048	3920298

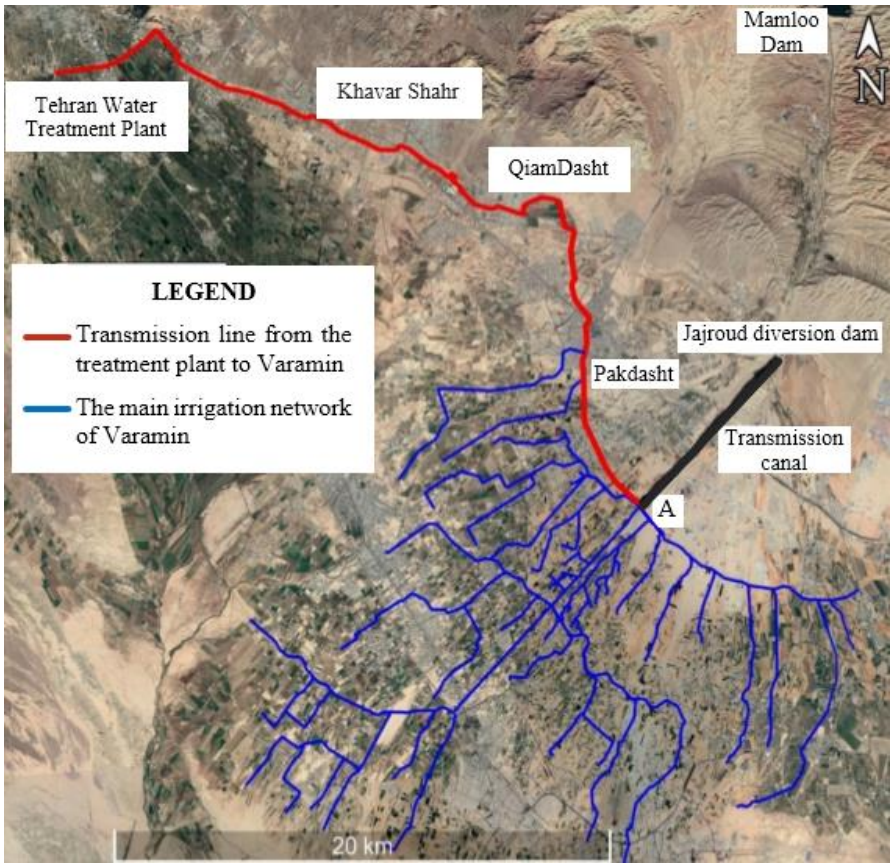

Fig. 2 Wastewater transfer path

شکل ۲ مسیر انتقال پساب

۲-۲- گزینه‌یابی برای نوع خط انتقال پساب

در این بخش گزینه‌های مختلف جنس و نوع لوله برای خط دوم انتقال پساب از جمله مجاری بسته (لوله و باکس‌های بتنی) و یا مجاری روباز بررسی شده‌اند. در ادامه شرح اجمالی و برآورد اقتصادی گزینه‌های مطرح شده آمده است. در این مطالعه با بررسی ۶ گزینه مختلف و بر مبنای جنس و نوع سامانه انتقال، قابلیت اجرا، خط انتقال مناسب از لحاظ فنی، اقتصادی و زیست محیطی انتخاب شده است. گزینه‌های بررسی شده به شرح زیر هستند:

- گزینه احداث کانال جدید به موازات کانال موجود
- گزینه اجرای دو باکس بتنی به موازات کانال موجود (اجرا در دو سمت کانال تهران)
- گزینه اجرای باکس دوقلوی بتنی به موازات کانال موجود (اجرا در یک سمت کانال تهران)
- گزینه مقطع مرکب (اصلاح کانال تهران)
- پوشش دهی دوباره کانال تهران و استفاده از یک خط

لوله به موازات آن

- اجرای یک خط انتقال به موازات کانال تهران و با حفظ شرایط کنونی بهره‌برداری کانال تهران

برای برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی، گزینه‌های مطرح شده به تفصیل بررسی می‌شوند.

۲-۲-۱- احداث کانال به موازات کانال موجود– گزینه نخست

در این گزینه، کانال دیگر با پوشش بتنی و مقطع ذوزنقه‌ای در مجاورت کانال موجود ساخته می‌شود و از خاکریز کانال موجود در یک طرف بصورت مشترک با کانال جدید استفاده می‌شود. ابعاد این کانال با عرض کف ۵ متر و ارتفاع ۲/۵ متر با شیب طولی برابر شیب طولی کانال تهران در نظر گرفته شده است. در طول مسیر کانال جدید همانند کانال تهران و در مجاورت سازه‌های کانال تهران، سازه‌های فلوم و سیفون احداث خواهد شد. از معایب این گزینه امکان رشد جلبک و علف‌های هرز و انباشته شدن رسوب در طول مسیر کانال مانند کانال تهران است و مسئله‌های کانال موجود به گونه‌ای در این گزینه نیز وجود خواهد داشت. همچنین با عبور این کانال از داخل شهرهای خاورشهر، قیام‌دشت و پاکدشت و دیگر منطقه‌های مسکونی، علاوه بر مسئله‌های محیط‌زیستی، خطرات جانی ناشی از مجاورت با مناطق مسکونی (مانند کانال موجود) تهدید سلامتی ساکنان را در پی خواهد داشت. در این گزینه نیاز به استملاک نواری به عرض حدود ۱۵ تا ۲۴ متر در سرتاسر مسیر است که افزون بر هزینه استملاک اراضی، دیگر مسئله‌های اجتماعی و زیست محیطی را به دنبال دارد. در مجموع هزینه عملیات اجرایی این گزینه با هزینه پیش‌بینی شده برای خرید اراضی بر مبنای استعلام و فهرست بهای سال ۱۳۹۸ معادل ۴۰۱۰ میلیارد ریال برآورد شده است (جدول ۲). مقطع عرضی این گزینه در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۲-۲- اجرای دو باکس بتنی به موازات کانال موجود (اجرا در دو سمت کانال تهران) – گزینه دوم

برای کاستن از مسئله‌های استملاک اراضی و همچنین سرپوشیده کردن مجاری انتقال و پرهیز از مسئله‌های

جدول ۲ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه نخست

Table 2 Estimation of operating costs- first option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	1,713,807
Water transfer	88,270
Buy pipes	--
Equipping and dismantling the site	108,124
Cost of ownership	2,100.00
Total	4,010,203

زیست محیطی، گزینه انتقال آب با استفاده از باکس بتنی مسلح بررسی شده است. این مجاری انتقال شامل دو باکس به ابعاد ۲/۵×۲/۵ متر خواهد بود که در دو طرف کانال و در حریم آن اجرا می‌شود. مزیت این گزینه، افزون بر کاهش مسئله‌های تملیک اراضی تا حد زیادی کاهش مسئله‌های زیست محیطی در شهرک‌ها و مناطق مسکونی مسیر سازه خواهد بود. گرچه جلوگیری کامل از نشت پساب در این سازه غیرممکن است، ولی به مراتب کمتر از کانال با پوشش بتنی است. از کاستی‌های این گزینه، حجم بسیار زیاد عملیات قالب‌بندی و آرماتوربندی و دراز بودن مدت اجرای طرح، نسبت به دیگر گزینه‌ها است. هزینه برآورد شده برای این گزینه، برابر با ۳۳۵۷ میلیارد ریال است (جدول ۳). مقطع تیپ اجرای این گزینه در شکل ۴ آمده است.

جدول ۳ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه دوم

Table 3 Estimation of operating costs- second option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	3,078,307
Water transfer	88,270
Buy pipes	--
Equipping and dismantling the site	189,994
Cost of ownership	--
Total	3,356,572

۲-۲-۳- اجرای باکس بتنی دوقلو به موازات کانال موجود (اجرا در یک سمت کانال تهران) – گزینه سوم

خلاصه هزینه اجرای باکس دوقلو با دو دهنه ۲/۵ × ۲/۵ متر در مجاورت یکدیگر و در یک طرف کانال در جدول ۴ و مقطع تیپ اجرای آن در شکل ۵ آورده شده است. مبلغ هزینه اجرایی این گزینه ۳۲۶۰ میلیارد ریال است که

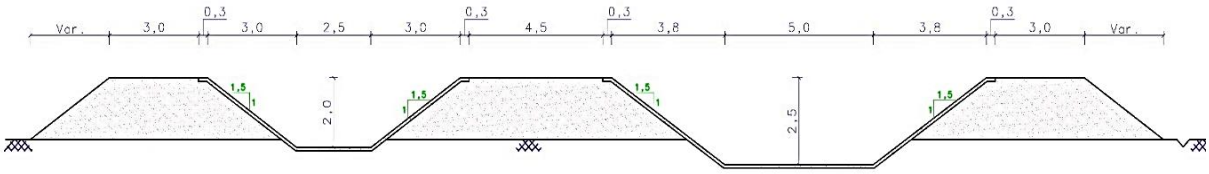

Fig. 3 Cross section- first option

شکل ۳ مقطع عرضی گزینه نخست

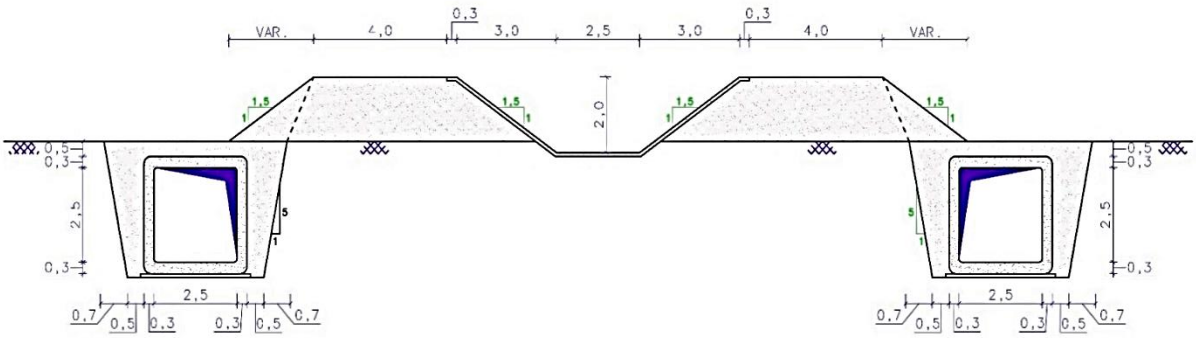

Fig. 4 Cross section- second option

شکل ۴ مقطع عرضی گزینه دوم

تفاوت معنی‌داری با گزینه دوم ندارد؛ لیکن مسئله‌های تملیک اراضی در این گزینه نسبت به گزینه پیش کمتر است.

جدول ۴ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه سوم

Table 4 Estimation of operating costs- third option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	2,986,721
Water transfer	88,270
Buy pipes	--
Equipping and dismantling the site	18,499
Cost of ownership	--
Total	3,259,492

۲-۲-۴- مقطع مرکب (اصلاح کانال تهران)- گزینه چهارم

یکی از گزینه‌های بررسی شده ایجاد تمهیدهایی برای افزایش ظرفیت کانال تهران است. ظرفیت کانال تهران در شرایط موجود در حدود ۴ مترمکعب بر ثانیه است و محدودیت عمده آن کافی نبودن ظرفیت کانال است و امکان عبور جریان طراحی اولیه کانال (۸ مترمکعب بر ثانیه) در سازه‌های مسیر کانال با ایجاد افت بیشتر در اثر برگشت آب به بالادست وجود دارد. لذا امکان افزایش ظرفیت کانال تهران از کیلومتر ۰+۰۰۰ تا کیلومتر ۲+۷۸۳ (محل اتصال کانال افسریه به کانال تهران) با ظرفیت ۸ مترمکعب بر ثانیه و از کیلومتر ۲+۷۸۳ تا کیلومتر ۵+۷۹۶ (محل انشعاب آبگیر اراضی دشت شهرری) با ظرفیت ۱۰ مترمکعب بر ثانیه و از کیلومتر ۵+۷۹۶ تا انتهای کانال با ظرفیت طراحی اولیه یعنی ۸ مترمکعب بر ثانیه بررسی شده است.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در بخش‌های عمده‌ای از مسیر کانال به افزایش ارتفاع کانال برای جلوگیری از سرریز شدن جریان آب نیاز است. در نتایج ملاحظه می‌شود که در طول ۲۷/۵ کیلومتر از مسیر کانال که عمق جریان بیشتر از ۱/۸۰ متر است، برای کنترل جریان و نیز ایجاد ارتفاع آزاد[1] باید ارتفاع مازاد بر ارتفاع کانال موجود ایجاد شود. در این گزینه ظرفیت مازاد بر ظرفیت کانال برای انتقال جریان تصفیه‌خانه شهر ری به دشت ورامین که ۵ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود، توسط یک خط لوله پلی اتیلن به قطر ۲/۴۰ متر انجام خواهد شد. برآورد هزینه‌های این گزینه در جدول ۵ و مقطع تیپ اجرای آن در شکل ۶ آمده است.

1 Freeboard

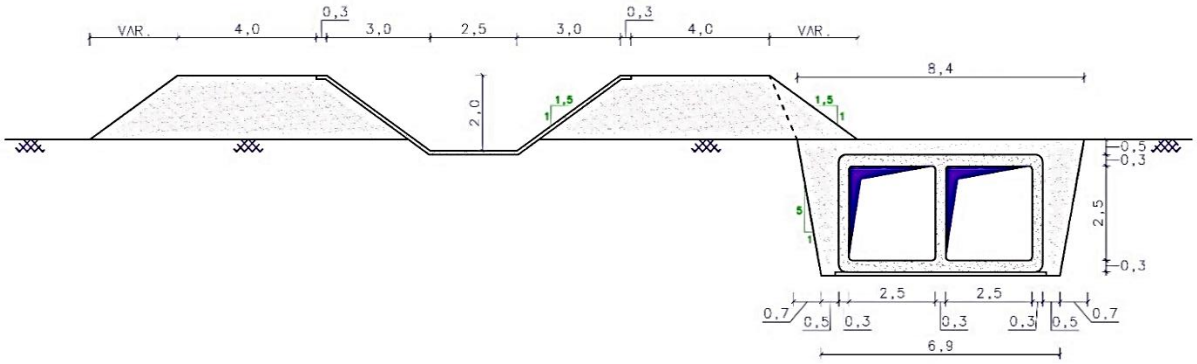

Fig. 5 Cross section- third option

شکل ۵ مقطع عرضی گزینه سوم

جدول ۵ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه چهارم

Table 5 Estimation of operating costs- fourh option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	711,994
Water transfer	422,121
Buy pipes	--
Equipping and dismantling the site	68,043
Cost of ownership	--
Total	1,202,110

از کاستی‌های اصلی این گزینه سرریز پیوسته جریان در بالادست سازه‌های سیفون و زیرگذرها بدلیل پس زدن آب در سازه‌ها (بدلیل ایجاد افت برای عبور جریان و انباشت زیاد زباله و اجسام شناور در ورودی سازه‌ها) است. این موضوع موجب سرازیر شدن فاضلاب به مکان‌های مسکونی و صنعتی و تجاری در بالادست این سازه‌ها خواهد بود. در نهایت مسئله‌های این گزینه بیش از سودمندی‌های آن است و قابل توصیه نیست.

۲-۲-۵- پوشش‌دهی دوباره کانال موجود و ایجاد یک خط لوله به موازات آن – گزینه پنجم

یکی دیگر از گزینه‌های قابل بحث، بازسازی کانال فعلی تهران با حفظ جسم موجود کانال و اصلاح شیب و پوشش بتنی دوباره آن است. در این گزینه امکان اصلاح شیب مسیر کانال و جمع‌کردن پوشش بتنی کنونی و جایگزینی با پوشش بتنی دوباره در بازه‌های مختلف بررسی شده است. بدین منظور شیب کانال در حد فاصل سازه‌های موجود کانال بررسی شده و امکان اجرای شیب مناسب برای انتقال بیشینه جریان تحلیل شده است. در طول مسیر کانال ۱۷ سازه مختلف اجرا شده است و مسیر کانال در حد فاصل سازه‌ها به ۱۷ بازه مختلف تقسیم شده است. طول هر بازه حد فاصل بین دو سازه متوالی است و با استفاده از اختلاف ارتفاع خروجی سازه ابتدایی و ورودی سازه انتهایی، شیب طولی بازه به دست آمده است. تحت این شرایط با عمق جریان برابر ۱/۸۰ متر بازه محدوده کننده با ظرفیت جریان حدود ۵/۳۸ و ۵/۷۰ مترمکعب بر ثانیه و در کیلومتر ۱۹+۳۶۸ تا ۲۴+۳۵۵ است. ولی هنگامی که این بازه‌ها به طور پیوسته و با تأثیر سازه‌ها بر هیدرولیک بازه‌های کانال بررسی می‌شود، کانال موجود با حفظ وضعیت فعلی می‌تواند حدود ۴ مترمکعب بر ثانیه آب را انتقال دهد.

این محدودیت دبی در همه بازه‌های کانال وجود ندارد، بلکه مشکل عمده کانال در فاصله کیلومتر ۱۸+۰۷۷ تا ۲۴+۳۵۵ است که موجب می‌شود دبی‌های بیشتر از ۴ مترمکعب بر ثانیه از حد مجاز ارتفاع آزاد کانال تجاوز کند. شیب کانال در این محدوده نامنظم بوده به طوری که میزان شیب در فاصله سازه‌های شماره ۶ تا ۱۲ از میزان ۰/۰۰۰۰۸ تا ۰/۰۰۰۲۵ متغیر است. با اصلاح شیب در این بازه و اجرای پوشش بتنی دوباره در این محدوده، ظرفیت کانال به میزان ۶ مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد. همچنین در محدوده کیلومتر ۵+۷۹۶ تا کیلومتر ۱۳+۵۵۳ نیز ظرفیت کانال محدود به ۵ مترمکعب بر ثانیه است. بنابراین لازم است برای افزایش دبی کانال در این محدوده نیز شیب کانال اصلاح و پوشش بتنی دوباره اجرا شود. در این حالت دبی عبوری از کانال در این بازه به ۶ مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد. اگر اجرای پوشش بتنی جدید در همه بازه‌ها انجام شود، در نهایت کانال قادر خواهد بود

دبی بیشینه ۷ مترمکعب بر ثانیه را از خود عبور دهد. در این حالت نیز با توجه به تغییر شیب کف کانال و رقوم ورودی و خروجی سازه‌ها که متناسب با رقوم بالادست و پایین دست کانال نیست، باید برای تأمین کمینه انرژی لازم برای عبور دبی یاد شده از سازه‌ها، ارتفاع پوشش کانال (در محدوده کیلومترهای ۱۰+۵۲۶ تا ۲۴+۳۵۵ و از کیلومتر ۲۹+۲۴۰ تا ۳۱+۲۷۵) بین ۰/۲ تا ۰/۵ متر افزایش یابد. با توجه به موارد فوق اگر شیب مسیرهای کانال در فاصله سازه‌های موجود اصلاح شده و پوشش آنها تخریب و تجدید شود، بیشینه دبی عبوری از کانال ۷ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود و مابقی دبی (۶ مترمکعب بر ثانیه) باید توسط مسیر جداگانه‌ای منتقل شود و نیاز به استفاده از لوله پلی‌اتیلن با قطر ۲/۶ متر خواهد بود. هزینه‌های مربوط به اصلاح کانال در این گزینه در حدود ۸۰ میلیارد ریال و هزینه تهیه و اجرای لوله با قطر ۲/۶ متر برابر ۲۷۷۶ میلیارد خواهد بود (جدول ۶). مقطع عرضی این گزینه در شکل ۷ نشان داده شده است.

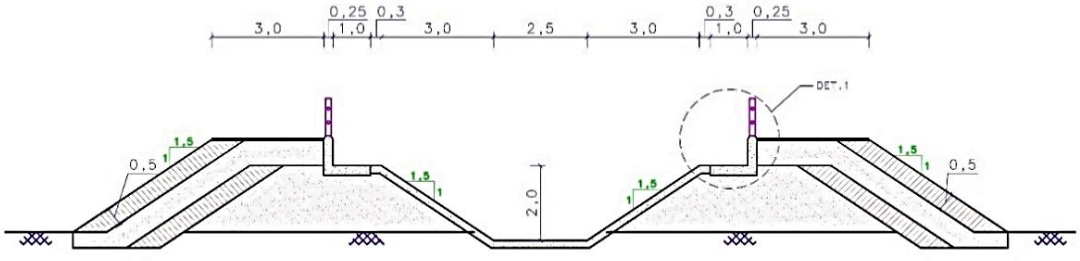

Fig. 6 Cross section- fourth option
شکل ۶ مقطع عرضی گزینه چهارم

جدول ۶ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه پنجم
Table 6 Estimation of operating costs- fifth option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	271,549
Water transfer	446,061
Buy pipes	2,340,000
Equipping and dismantling the site	43,056
Cost of ownership	--
Total	3,100,668

از معایب گزینه پنجم می‌توان به هزینه‌های نگهداری سالانه، نیاز به لایروبی مداوم کانال و امکان سرریز آب در بالادست سازه‌ها در اثر نگهداری نامناسب اشاره نمود. بدیهی است کانال بازسازی شده نیز همانند کانال موجود بدلیل عبور از مناطق مسکونی و صنعتی در معرض ورود آشغال و نخاله و دیگر مواد مازاد خواهد بود و نیاز به عملیات نگهداری مداوم دارد. عبور کانال انتقال پساب در محدوده شهرهای خاورشهر، قیام‌دشت، پاکدشت و امین‌آباد و دیگر محدوده‌های مسکونی، موجب تهدید سلامتی ساکنین و خطرات جانی و مالی خواهد بود. همچنین بدلیل روباز بودن کانال، بدیهی است با گذشت زمان امکان رشد جلبک و انباشت رسوبات در مسیر کانال و کاهش ظرفیت آن وجود خواهد داشت. بنابراین در مقایسه با گزینه حفظ وضع موجود کانال و انتقال مابقی جریان پساب با خط لوله، این گزینه توجیه فنی لازم را ندارد.

۲-۲-۶- پوشش بهره‌برداری از کانال تهران با وضعیت موجود و انتقال جریان مازاد با خط لوله

در این گزینه از کانال تهران با وضع موجود استفاده می‌شود و برای مازاد جریان آب، انتقال با استفاده از خط لوله انجام می‌شود. بنابراین لازم است گزینه‌های مختلف انتقال آب با لوله بررسی شوند. لذا در این بخش انتقال آب با استفاده از خط لوله با جنس‌های مختلف بررسی شده است.

۲-۲-۶-۱- استفاده از لوله‌های فولادی

اغلب استفاده از دو ردیف لوله نیاز به فضا و هزینه بیشتری از یک خط لوله با همان ظرفیت انتقال دارد. به منظور انتقال جریان با این ظرفیت نیاز به یک خط لوله فولادی با

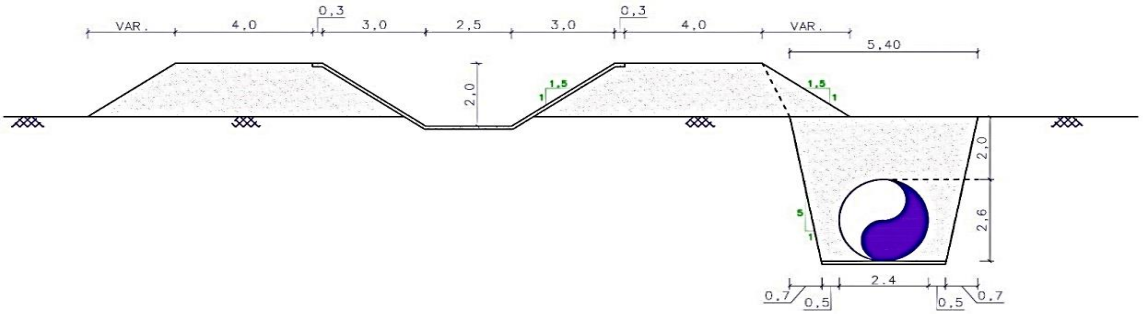

Fig. 7 Cross section- fifth option

شکل ۷ مقطع عرضی گزینه پنجم

قطر ۳/۵۰ متر یا دو خط لوله با قطر هر کدام حدود ۲/۶۰ متر است. به دلیل کاربرد سنتی لوله‌های فلزی، این لوله ها اغلب به عنوان یک گزینه مطرح هستند و چون سیال مورد نظر پساب تصفیه شده است (فاضلاب نیست)، مشکل خوردگی به دلیل نوع سیال مطرح نیست. البته مشکل خوردگی به طور عام همیشه برای لوله های فلزی وجود دارد. حفاظت این لوله‌ها هزینه گزافی داشته و در اغلب موارد نیاز به نگهداری و حفاظت منظم از سامانه‌های حفاظت از خوردگی مانند سامانه‌های حفاظت کاتودیک دارد و با اینکه استفاده از لوله‌های فولادی هزینه زیادی در مقایسه با دیگر لوله‌ها دارد، از لحاظ فنی نیز برتری خاص نسبت به دیگر لوله‌ها ندارد. برآورد هزینه خرید لوله فولادی به همراه پوشش و حفاظت کاتدیک و با استفاده از یک خط لوله اسپیرال فولادی بالغ بر ۳۴۵۶ میلیارد ریال می‌شود و عمر این لوله‌ها نیز حدود ۲۵ سال برآورد می‌شود و در مجموع از لحاظ فنی و اقتصادی، استفاده از لوله‌های با جنس فولادی در این طرح پذیرفته نیست.

۲-۲-۶-۲- استفاده از لوله‌های بتنی

لوله‌های بتنی برای حمل فاضلاب و آبرسانی تولید می‌شوند. لوله‌های آبرسانی که قابلیت تحمل فشار داخلی را دارند، در قطرهای کمتر از ۱۸۰۰ میلی‌متر تولید می‌شوند و برای استفاده در این طرح، دست‌کم به ۴ ردیف از آنها نیاز خواهد بود که از لحاظ هزینه و فضای لازم توجیه‌پذیر نیست. لوله‌های فاضلاب با وجود مسئله‌های آب‌بندی نشدن کامل و عدم امکان تحمل فشار، تا اندازه ۲۴۰۰ میلی‌متر تولید می‌شوند. بنابراین با توجه به ضریب زبری این لوله‌ها، نیاز به سه ردیف لوله خواهد بود که با توجه به ضعف این لوله‌ها در قطرهای بزرگ در مقابل تنش‌های وارده، این گزینه از نظر ایمنی و هزینه و همچنین فضای لازم توصیه نمی‌شود.

۲-۲-۶-۳- استفاده از لوله‌های پلی اتیلن – گزینه ششم

شرکت مهندسی و توسعه نفت و گاز محمدیان در زمان مناقصه طرح خط دوم انتقال پساب از تصفیه خانه جنوب تهران به دشت‌های ورامین و پاکدشت با توجه به شرایط اقتصادی کشور، رونق تولید داخلی، تولید مواد صنعتی با هدف جلوگیری از خام فروشی و قطع وابستگی به واردات در تولید و عرضه محصول‌های خاص، لوله‌های پلی‌اتیلن مسلح‌شده با ورق‌های فولادی SRPE[1] را پیشنهاد کرد که مورد موافقت کارفرما نیز قرار گرفت (شکل ۸).

Fig. 8 SRPE Pipe Manufacturing Factory

شکل ۸ کارخانه ساخت لوله‌های SRPE

پس از آن خط تولید این نوع لوله‌های پلی اتیلن توسط شرکت مهندسی و توسعه نفت و گاز محمدیان به ایران وارد شد و با احداث کارخانه‌ای متناسب و راه اندازی خط تولید، اقدام به تولید لوله‌های پلی‌اتیلن به قطر ۳۰۰۰

1 Steel Reinforced Polyethylene Pipe

میلی‌متر شد و تولید آن در زمان نگارش این مقاله نیز ادامه دارد (شکل ۹). برای ساخت کارخانه، راه اندازی خط تولید مطلوب و کارآمد و همچنین اجرای پروژه برابر برنامه طرح نیاز به تأمین نقدینگی اقلام برابر پیش‌بینی‌ها و برآوردهای اولیه بود که در سال ۱۳۹۲ انجام شد و با سرمایه‌گذاری شرکت یاد شده خط تولید نخست نصب و راه‌اندازی شد و به تولید محصول یعنی لوله‌های پلی‌اتیلن مسلح با قطر ۳ متر با کارآیی بالا رسید؛ در فاز بعدی خط تولید دوم اجرا شد و روند تولید به بالاترین سطح ممکن رسید.

Fig. 9 Reinforced Polyethylene Pipe Production Line
شکل ۹ خط تولید لوله‌های پلی‌اتیلن مسلح (SRPE)

با نصب و راه‌اندازی این دو خط، هم پروژه مورد نظر و هم طرح‌های همانند می‌توانند از این محصول استفاده کنند. مسئله‌های اقتصادی کشور و تحریم ها در این بازه زمانی باعث شد قیمت مواد اولیه تولید لوله در حدود ۳ برابر شود. برآورد هزینه گزینه ششم در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷ برآورد هزینه‌های عملیات اجرایی- گزینه ششم
Table 7 Estimation of operating costs- sixth option

Price list for 2019 and inquiry costs	Amount (million Rials)
Irrigation and drainage	--
Water transfer	468,815
Buy pipes	2,772,000
Equipping and dismantling the site	28,128
Cost of ownership	--
Total	3,268,944

بیان این نکته مهم است که بر مبنای مجوز وزارت نیرو، خط لوله جدید باید در مجاورت کانال انتقال موجود و در حریم ۱۰ متری از لبه کانال احداث شود و یک پارامتر محدودیت کننده طرح است. بنابراین استفاده از دو خط لوله به جای یک خط انتقال، به حریم کارگذاری بیشتری نیاز دارد. لذا استفاده از یک خط با قطر ۳ متر از سوی وزارت نیرو مصوب و ابلاغ شده است. مقطع تیپ اجرای گزینه ششم در شکل ۱۰ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های هیدرولیکی طرح نهایی

۳-۱-۱- دبی خط انتقال

بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده، بیشینه ظرفیت هر کدام از مدول‌های هشت گانه تصفیه‌خانه جنوب تهران برابر ۱/۳۰ مترمکعب بر ثانیه است (ظرفیت کل تصفیه‌خانه ۱۰/۴ مترمکعب بر ثانیه است). با در نظر گرفتن ۲۵ درصد افزایش ظرفیت نرمال تصفیه‌خانه در آینده، آبدهی خروجی نهایی تصفیه‌خانه ۱۳ مترمکعب بر ثانیه تعیین می‌شود. بر همین اساس هیدروگراف خروجی تصفیه‌خانه با اعمال ضریب انعطاف طوری تصحیح شده که دبی اوج هیدروگراف، ۱۳ مترمکعب بر ثانیه باشد. میزان دبی ساعتی و هیدروگراف خروجی تصفیه‌خانه در افق طرح، با و بدون اعمال ضریب انعطاف در طول شبانه روز در جدول ۸ آمده است. بررسی هیدروگراف نشان می‌دهد که دبی در شرایط اعمال ضریب انعطاف، از ۲/۸ تا ۱۳/۰ متر مکعب بر ثانیه متغیر است.

جدول ۸ هیدروگراف خروجی تصفیه‌خانه در افق طرح
Table 8 Output hydrograph of treatment on the plan target

Time (hour)	Target flow with correction factor of 13.93% (m^3/s)	Flow rate on the plan target (m^3/s)
8	3.5	3.1
10	9.0	7.9
12	12.3	10.8
14	13.0	11.4
16	12.8	11.2
18	12.2	10.7
20	12.1	10.7
22	11.7	10.3
0	10.9	9.6
2	8.2	7.2
4	4.4	3.9
6	2.8	2.5

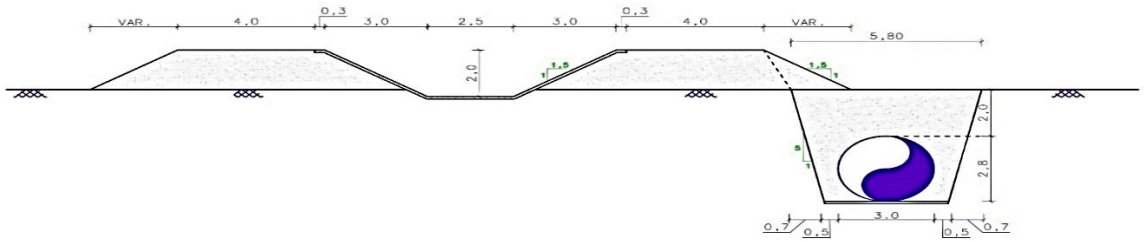

Fig. 10 Cross section- sixth option

شکل ۱۰ مقطع عرضی گزینه ششم

۳-۱-۲- دبی طرح

چون بیشینه ظرفیت خط دوم انتقال پساب ۹ m^3/s است، مازاد بر آن از هیدروگراف خروجی تصفیه‌خانه حذف شده است. هیدروگراف ورودی به خط لوله انتقال (در یک شبانه روز) در جدول ۹ نشان داده شده و مازاد بر دبی انتقالی این خط، از طریق کانال تهران به سازه مقسم در نقطه A منتقل خواهد شد.

جدول ۹ هیدروگراف ورودی خط لوله و کانال تهران با اعمال ضریب انعطاف

Table 9 Input hydrograph of pipeline and Tehran canal with application of flexibility coefficient

Time (hour)	Discharge (m^3/s)	
	Pipeline	Tehran canal
0	9	1.9
2	8.2	1
4	4.4	0.5
6	2.8	0.3
8	3.5	0.4
10	9	1.1
12	9	3.3
14	9	4
16	9	3.8
18	9	3.2
20	9	3.1
22	9	2.7

۳-۱-۳- جنس خط انتقال

به طورکلی بخشی از هزینه‌های یک پروژه آبرسانی مربوط به لوله‌های به کاررفته در شبکه توزیع یا خط انتقال است. چون خط انتقال دارای دوره طرح به نسبت زیادی است، دقت در شناسایی مشخصه‌های مناسب برای تعیین عمق حفاری بهینه زمین ضروری است. لوله‌های طرح، پلی‌اتیلن مسلح شده با ورقه‌های فولادی است که به SRPE موسوم هستند. این لوله‌ها در کارخانه شرکت مهندسی و توسعه نفت و گاز محمدیان تولید می‌شود. اندازه داخلی لوله‌های طرح ۳۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۰ سانتیمتر است. شایان یادآوری است که دوره طرح برای این پروژه ۳۰ سال منظور شده است. اما بیشینه آن برای گزینه‌های مختلف متفاوت است. برای گزینه منتخب دست‌کم ۵۰ سال است؛ ولی برای گزینه های کانال و باکس بتنی، می‌توان آن را تا ۴۰ سال در نظر گرفت. در هر صورت همه گزینه‌ها دوره طرح را پوشش می‌دهند.

نکته دیگر در انتخاب لوله ها مربوط به کیفیت سیال است. انواع پسابهای شهری و صنعتی خاصیت خورندگی دارند؛ اما این موضوع تنها در لوله‌های از جنس فولاد مطرح بوده و به‌عنوان مثال، درلوله‌های بتنی و SRPE تأثیر خوردگی نزدیک به صفر است. با توجه به اینکه گزینه استفاده از لوله‌های فولادی در بخش ۲-۲-۶-۱ بررسی شده است، با لحاظ خطرهای ناشی از خوردگی لوله¬های فولادی در افق طرح، این گزینه مردود است.

۳-۱-۴- ضریب زبری پیشنهادی طرح

لوله‌های مورد استفاده در این طرح بسیار قطور هستند و امکان تحلیل آزمایشگاهی برای تعیین ضریب زبری آنها وجود ندارد. به طور کلی با افزایش قطر لوله، ضریب زبری موثر بر جریان کاهش می‌یابد، اما این موضوع در مورد لوله‌هایی با قطر بسیار بزرگ بررسی نشده است. البته جریان موجود در لوله در این مطالعه موردی در بسیاری از موارد به صورت تحت فشار نخواهد بود و می‌توان با آن به صورت یک کانال دایره‌ای شکل برخورد کرد. لذا براساس ویژگی‌های هندسی لوله‌های تولید شده و مقایسه با جنس لوله‌های مشابه در مراجع معتبر، ضریب زبری لوله ها برآورد شد. شرایط ارتفاع زبری لوله‌های طرح، همانند

لوله‌های چدنی با پوشش داخلی است که کمینه و بیشینه ۰/۰۱ و ۰/۰۱۴ گزارش شده است (Chow, 1959). با توجه به این دامنه از ضرایب، بزرگ بودن قطر (ضریب زبری را کاهش می‌دهد) و همچنین نوع سیال که پساب فاضلاب است، ضریب زبری لوله‌های طرح میزان ۰/۰۱۲ منظور شده است. با توجه به نوسان‌های دبی در لوله که دامنه زیادی هم دارد، به نظر می‌رسد که این ضریب زبری، به عنوان یک میانگین، بتواند در دبی‌های مختلف کارایی لازم برای محاسبه سطح آب را داشته باشد. به عبارت دیگر و بر مبنای دیاگرام مودی، چون زبری نسبی بین 10^{-5} و 10^{-6} است و همچنین عدد رینولدز (در دامنه دبی‌های عبوری از مجرای انتقال) از مرتبه 10^{6} است، ضریب زبری دارسی-ویسباخ در محدوده ۰/۰۱۲ قرار می‌گیرد.

۳-۱-۵- مقایسه گزینه‌ها از نظر نشت، و مسئله‌های اجرایی و بهره برداری

همان‌گونه که در گزینه‌یابی شیوه‌های انتقال پساب آمده است؛ گزینه ها مرکب از مجاری روباز و رو بسته هستند. مجاری روباز دارای هدر رفت تبخیر و نشت بیش از مجاری بسته (در حدود ۵٪ حجم جریان) هستند ولی در مجاری رو بسته تبخیر صفر است و نشت نیز در حدود ۲٪ درصد برآورد می‌شود. نظر به اینکه میزان سطح آزاد آب در مجاری روباز در گزینه‌ها متفاوت است، در جدول ۱۰ میزان تبخیر از سطح آب برآورد شده است.

جدول ۱۰ متوسط حجم سالانه تبخیر از سطح در گزینه‌های اجرایی مختلف بر حسب متر مکعب

Table 10 Average of annual volume of evaporation from the surface in different construction options (m^3/s)

Alternative	Annual volume of evaporation from surface
1	6876
2	2700
3	2700
4	3996
5	1440

آسانگری اجرا در گزینه چهارم (افزایش ارتفاع کانال) به دلیل بی‌نیاز به ماشین‌آلات سنگین حفاری و عملیات بتنی، بالاتر از دیگر گزینه‌ها است. اجرای باکس بتنی دوقلو یک طرف یا در دو طرف کانال (گزینه‌های دوم و سوم) از نظر اجرایی کمترین امتیاز را دارد. واضح است که بهره‌برداری مجاری روباز آسان‌تر از مجاری بسته است. به همین خاطر گزینه چهارم دارای بالاترین امتیاز بهره‌برداری بوده و دیگر گزینه‌ها در رتبه بعدی قرار دارند.

۳-۲ - تحلیل هیدرولیکی

۳-۲-۱- مدل هیدرولیکی

برای تحلیل هیدرولیکی خط دوم انتقال پساب از مدل هیدرولیکی Sewer GEMS بهره گرفته شده است. نرم افزار یاد شده برای طراحی و تحلیل شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال آب و فاضلاب در شرایط هیدرولیکی جریان آزاد و تحت فشار است. با کمک این نرم‌افزار می‌توان خطوط لوله و مجاری روباز را در شرایط هیدرولیکی مختلف و در دو حال ایستا و پویا طراحی و شبیه‌سازی کرد.

۳-۲-۲- شرایط مرزی

بنا بر نقطه‌های ارتفاعی نقشه‌برداری شده، کد ارتفاعی سطح آب در خروجی تصفیه‌خانه در شرایط بیشینه ۱۰۳۵ متر است و تراز بالای کانال تهران یا جاده سرویس آن با لحاظ ارتفاع آزاد معادل ۰/۵ متر ۱۰۳۵/۵ متر است. همچنین رقوم سطح آب در سازه نقطه A برابر ۱۰۲۱ است و اختلاف تراز این دو نقطه برابر ۱۴ متر خواهد بود.

۳-۲-۳- شیب کف

در این پروژه عمق کارگذاری به شکلی اجرا می‌شود که کمینه ضخامت خاکریزی روی لوله ۱/۵ متر باشد و تعیین خط پروژه و رقوم کارگذاری مستلزم رعایت این شرط مهم است. شیب طولی مسیر لوله برابر شکل ۱۱ است. به دلیل نبودن معارض و استقرار تجهیزات و ماشین‌آلات در بخش پایین‌دست پروژه، اجرای طرح از پایین‌دست آغاز می‌شود و کیلومتر صفر، همان نقطه A یا سازه مقسم بوده و نقطه انتهایی تصفیه خانه جنوب تهران خواهد بود.

۳-۲-۴- اجرای مدل هیدرولیکی

با لحاظ همه پارامترهای هندسی و شرایط مرزی (به ویـژه سطح آب نقطه A) مـدل هیـدرولیکی تهیـه شـده اسـت. خروجـی مـدل Sewer GEMS و همچنـین مـدل HEC-RAS برای شبیه‌سازی هیدرولیکی گزینـه‌های مختلـف در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ نشان داده شده است.

در ایـن شـکل‌ها خـط گرادیـان هیـدرولیکی بـا احتسـاب بیشینه دبی انتقال پساب، همراه با خط انرژی مربوطه در

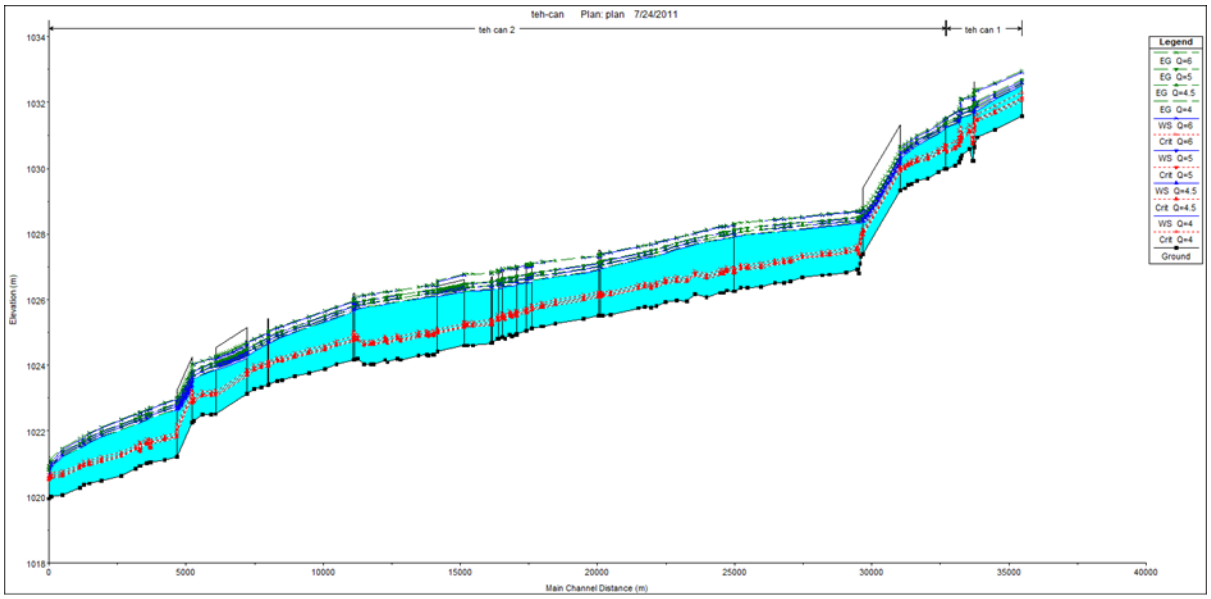

Fig. 11 Hydraulic profile and energy line- first option

شکل ۱۱ نیمرخ خط گرادیان هیدرولیکی و خط انرژی- گزینه نخست

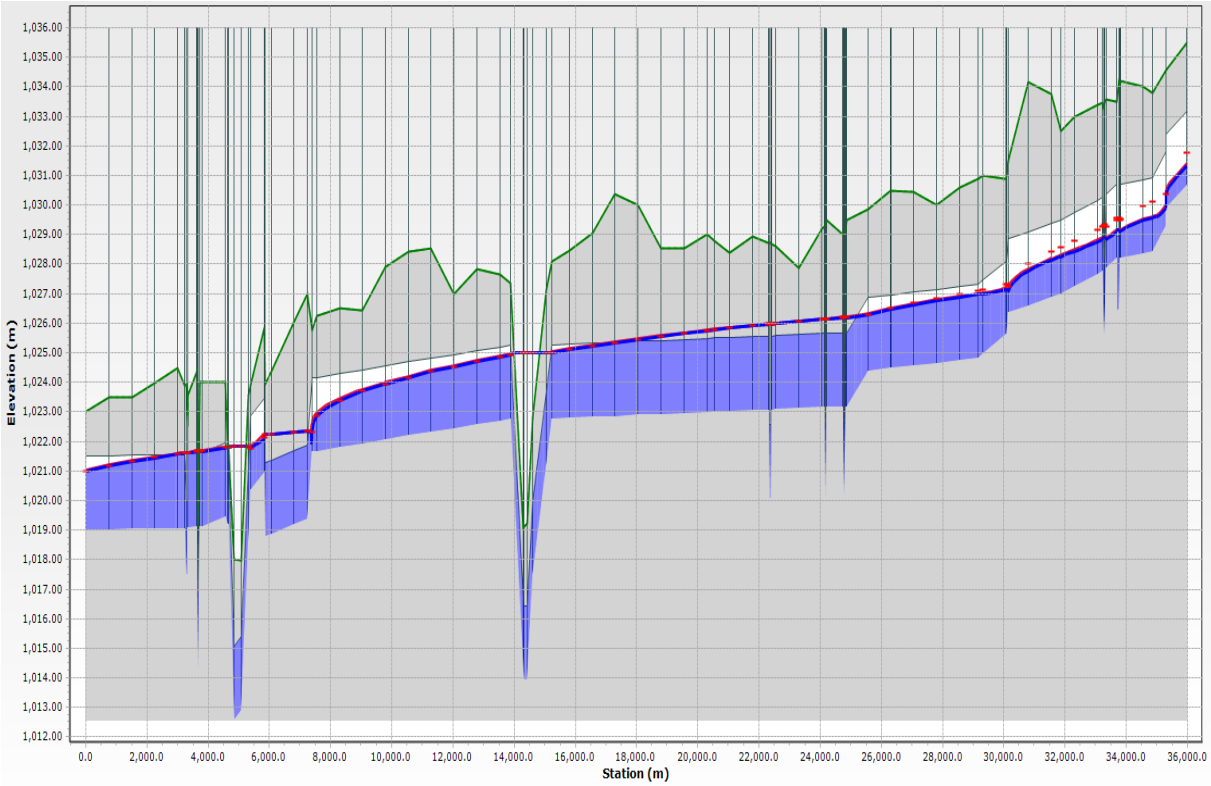

Fig. 12 Hydraulic profile and energy line- second and third option

شکل ۱۲ نیمرح خط گرادیان هیدرولیکی و خط انرژی- گزینه دوم و سوم

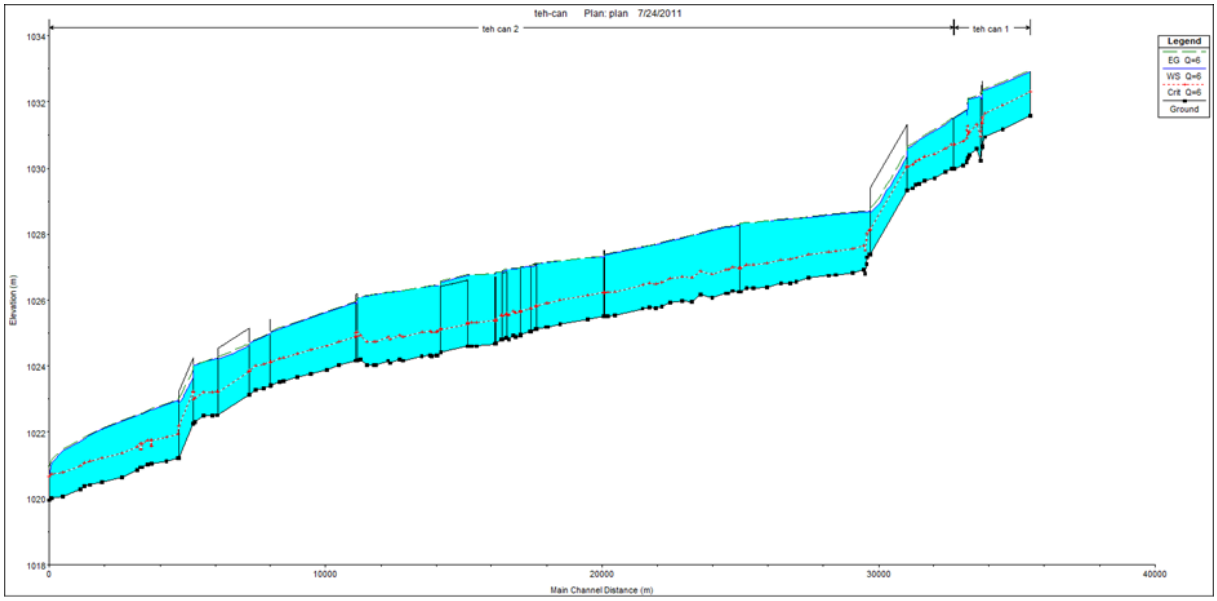

Fig. 13 Hydraulic profile and energy line- fourth option

شکل ۱۳ نیمرخ خط گرادیان هیدرولیکی و خط انرژی- گزینه چهارم

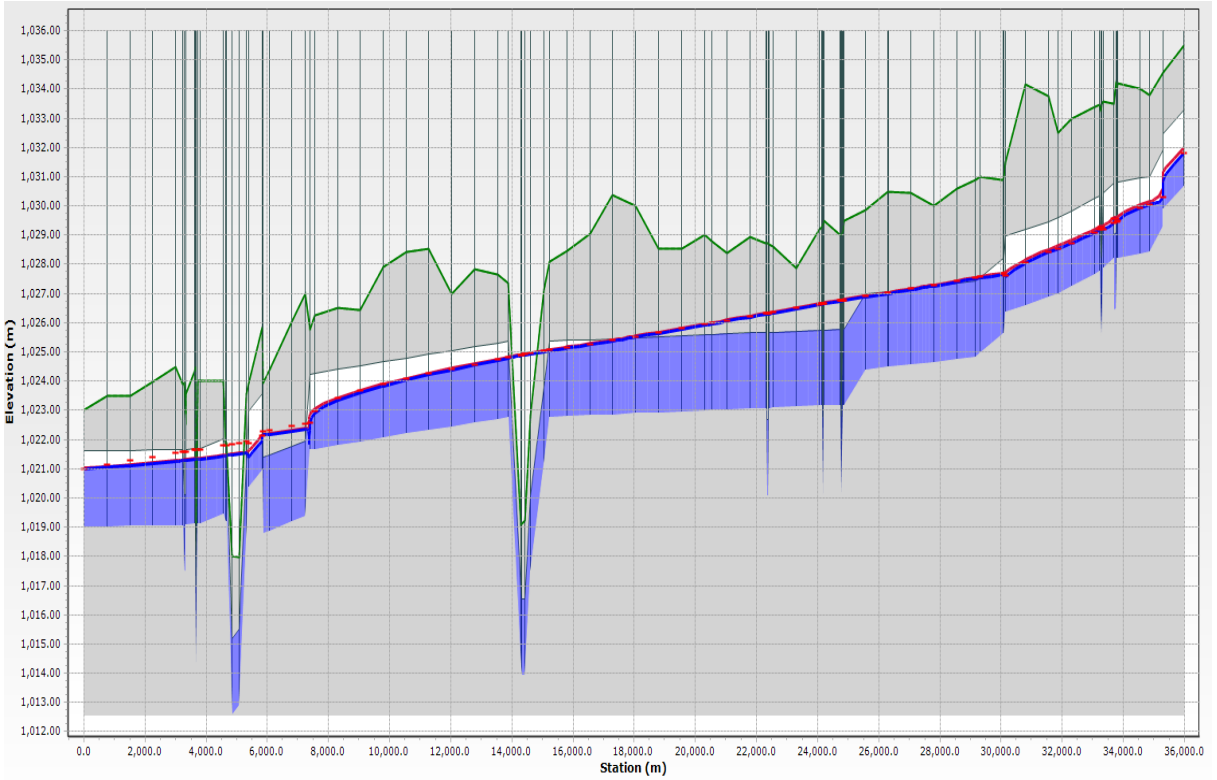

Fig. 14 Hydraulic profile and energy line- fifth option (use of a 2400 mm pipeline)

شکل ۱۴ نیمرخ هیدرولیکی و خط انرژی- گزینه پنجم (استفاده از یک خط لوله ۲۴۰۰ میلی‌متری)

طول مسیر آمده است. با توجه به متغیر بودن دبی ورودی و همچنین شیب طولی مسیر، در بازه های محدودی از مسیر جریان تحت فشار هم ایجاد می‌شود ولی در بیشتر موارد آزاد است. این موضوع توسط مدل SewerGEMs بررسی شده و نتایج برای هیدروگراف مربوطه آمده است. تحلیل صورت گرفته نشان می‌دهد خط دوم انتقال پساب هیدروگراف ورودی با دبی بیشینه ۹ m^3/s را به نقطه خروجی در مقسم انتهایی در نقطه A منتقل می‌نماید.

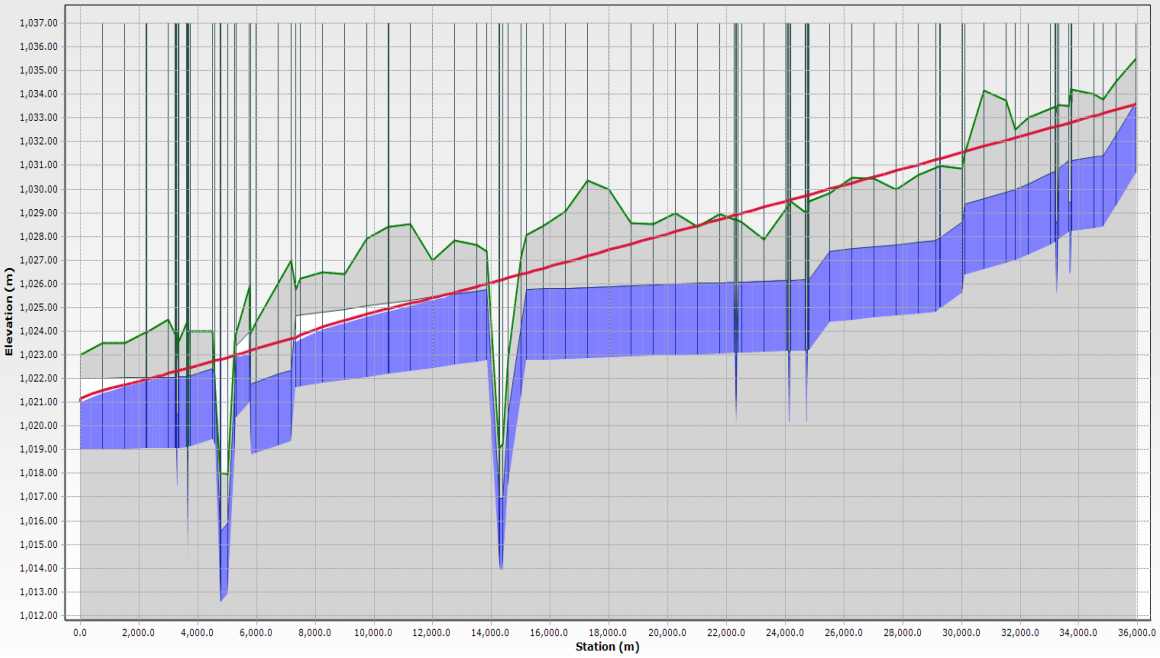

Fig. 15 Hydraulic profile and energy line- sixth option (use of a 3000 mm pipeline)

شکل ۱۵ نیمرخ خط گرادیان هیدرولیکی و خط انرژی- گزینه ششم (استفاده از یک خط لوله ۳۰۰۰ میلی‌متری)

افزون بر این با توجه به پارامترهای ورودی و شرایط مرزی که پیشتر اشاره شد خط انرژی در ابتدای مسیر ۱۰۳۳/۶۵ محاسبه شده است که دارای حاشیه امنیت مناسبی نسبت به ارتفاع آزاد موجود کانال تهران در خروجی تصفیه‌خانه است. در سامانه‌های کم‌فشار، چون شیرهای هوا در شرایط فشار پایین، عملکرد مناسبی ندارند تخلیه هوا از طریق منهول یا منفذ هوا (Vent) صورت می‌گیرد. در این طرح بر مبنای مدلسازی هیدرولیکی، بیشینه تراز انرژی در طول خط لوله محاسبه شده و موقعیت (به طور میانگین در هر ۷۵۰ متر طول) و ارتفاع منهول‌ها تعیین شده است؛ به‌طوری‌که برای اطمینان، رقوم بالای منهول از خط انرژی و یا سطح زمین کمینه ۰/۵ متر بالاتر قرار می‌گیرد. شایان یادآوری است که با توجه به ابعاد طرح و استفاده از گزینه¬های مختلف سامانه انتقال با شرایط هیدرولیکی متفاوت، برای جریان با سطح آزاد (در کانال انتقال) از نرم‌افزار HEC-RAS و برای مدل‌سازی خط لوله از نرم‌افزار Sewer GEMS استفاده شده است.

در شکل ۱۶ نمونه‌هایی از مراحل اجرایی و جاگذاری خط لوله در مجاورت کانال کنونی نشان داده شده است. در جدول ۱۱ خلاصه ویژگی‌های محاسبه شده برای گزینه‌های مختلف درج شده است.

Fig. 16 Executive process of water conveyance line

شکل ۱۶ عملیات اجرایی خط انتقال آب

جدول ۱۱ خلاصه ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی گزینه های مورد نظر که بر مبنای شرایط طرح محاسبه و طراحی شده‌اند
Table 11 Summary of the physical and hydraulic features of the considered options, calculated and designed based on the project conditions

Altrnative	Description	Discharge (m^3/s)	Avarage of longitudinal slope	The shape of the convayonce conduit	The material of the conduit	Dimensions
1	constructing a new canal parallel to the existing canal	9	0.0004	Trapezoidal	Concrete	bottom width: 5 m depth: 2.5 m side slope: (1:1.5)
2	constructing two concrete boxes parallel to the existing canal	9	0.0004	Rectangular box	Concrete	bottom width: 2.5 m height: 2.5 m
3	constructing a concrete twin box parallel to the existing canal (in one side of the Tehran canal)	9	0.0004	Rectangular box	Concrete	bottom width: 2.5 m height: 2.5 m
4	compound cross-section option, modification of Tehran canal	13	0.0004	Compound channel	Concrete	bottom width: 5 m depht: 3.5 m
5	re-lining the Tehran canal and using a pipeline parallel to it	6 (pipe line) 7 (existing canal)	0.0004	Trapezoidal + Circular	Concrete+ PE	pipe diameter: 2600 mm
6	implementing a pipe line parallel to the Tehran canal and maintaining the current operating conditions of this canal					
6-1	Steel Pipe	9	0.0004	Circular	Steel	Diameter: 3500mm
6-2	Concrete Pipe	9	0.0004	Circular	Concrete	Diameter: 3500mm
6-3	PE Pipe	9	0.0004	Circular	PE	Diameter: 3000mm

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مسئله‌های گزینه کانال روباز از نظر محیط زیستی، رسوب‌گذاری و نگهداری و بهره‌برداری، به‌ویژه اینکه کانال به دلیل حمل پساب فاضلاب مستعد رشد جلبک بوده و نیاز به توجه منظم و مداوم دارد، و همچنین با توجه به طول عمر طرح که در حدود نصف عمر مفید دیگر گزینه‌ها است، این گزینه برای اصلاح و تکمیل خط انتقال رد می‌شود. همچنین گزینه‌های اصلاح کانال موجود و مقطع مرکب نیز با توجه به مسئله‌های فنی و با توجه به مقایسه هزینه آنها با هزینه‌های گزینه حفظ کانال موجود و اجرای خط لوله با ظرفیت ۹ مترمکعب بر ثانیه و همچنین در مقایسه با گزینه باکس بتنی پذیرفته نیست و برابر روش متداول برای انتقال پساب، در این طرح نیز استفاده از مجاری بسته لوله‌ای توصیه می‌شود. دو گزینه مطرح برای انتقال آب پساب به دشت ورامین، گزینه انتقال توسط خط لوله SRPE و گزینه انتقال توسط باکس بتنی است. هزینه اجرای باکس بتنی در مقایسه با لوله‌های SRPE تفاوت معنی‌داری را نشان نمی‌دهد و از لحاظ مسائل فنی و اجرایی و طول زمان اجرا و ایمنی طرح از لحاظ نشت و سختی اجرا نیز قابل مقایسه با انتقال با استفاده از لوله نیست و لوله‌های پلی اتیلن مسلح شده با ورق فولادی دارای برتری قابل توجه نسبت به باکس بتنی است. لذا با در نظر گرفتن همه جنبه‌ها، گزینه انتقال مازاد جریان پساب تصفیه‌خانه شهرری به ورامین با استفاده از لوله‌های SRPE پیشنهاد شد. این انتخاب با نتایج محققانی چون Malekpour and Dahanzadeh (2017) هم مطابقت دارد. از آنجا که اجرای طرح نیازمند لوله هایی با قطر زیاد است (و پیشینه تولید آنها در کشور با این ویژگی‌ها وجود ندارد)، این پروژه با ایجادکارخانه‌ای در مجاورت منطقه طرح کلید خورد و در زمان تدوین این

مقاله، لوله ها به تولید رسیده و اجـرای طـرح بـیش از ۵۰ درصد پیشرفت فیزیکی داشته است.

۵- منبع‌ها

Ahmadi Kord, H., Yaghoubi, S. and Mohamadi, A. (2017). A fuzzy optimization model for network design of collection and transportation of urban wastewater for agricultural purposes under uncertainty (Case study: Tehran province). Modern Research in Decision Making, 1(4), 1-24. (in Persian)

Altinbilek, D. (2006). Water management in Istanbul. Water Resources Development. 22(2), 241-253, https://doi.org/10.1080/07900620600709563.

Anonymous. (2010). Environmental Criteria of Treated Waste Water and Return Flow Reuse (No. 535). Office of Deputy for Strategic Supervision, Ministry of Energy, Iran. (in Persian)

Anonymous. (2017). M11 Steel Pipe: A guide for design and installation (AWWA/M11). American Water Works Association, United States of America, 292p.

Chee, R., Lansey, K. and Chee, E. (2018). Estimation of water pipe installation construction costs. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 9(3), 04018008. https://doi.org/10.1061/(ASCE) PS.1949-1204.0000323

Chow, V.T. (1959). Open Channel Hydraulic, 680p.

Connell, D. (2001) Hazen-Williams C-factor Assessment in an Operational Irrigation Pipeline, Master Thesis, Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Montreal.

Feigin, A., Ravina, I. and Shalhevet, J. (2012). Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Springer Berlin. Heidelberg, 224p.

Heinz, I., Salgot, M. and Koo-Oshima, S. (2011). Water reclamation and intersectoral water transfer between agriculture and cities–a FAO economic wastewater study. Water Science and Technology, 63(5), 1067-1073. https://doi.org/10.2166/wst.2011.292.

http://www.Bentley/software/SewerGEMSV8i

http://www.engineersedge.com/fluid_flow

Jaramillo, M.F. and Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. Sustainability, 9(10), 1734. https://doi.org/10.3390/su9101734

Jemmali, A. and Abdel-Majid, K. (2002). Wastewater Reuse: The Case of Morocco. First WDM Forum on Wastewater Reuse, IDRC, Rabat, Morocco, 26–27 March.

Malekpour, M. and Dahanzadeh, B. (2017). Investigate and Compare the Performance of Channel and Low Pressure Polyethylene Pipes for Hydraulic (Case Study: Plain of Shush). Water Engineering. 5(1), 36-45. (in Persian)

Marchionni, V., Cabral, M., Amado, C. and Covas, D. (2016). Estimating water supply infrastructure cost using regression techniques. Journal of Water Resources Planning and Management. 142(4), 04016003. https://doi.org/10.1061 / (ASCE) WR. 1943-5452.0000627.

Mohammadi, A., Parvaresh Rizi, A. and Abbasi, N. (2019). Field measurement and analysis of water losses at the main and tertiary levels of irrigation canals: Varamin Irrigation Scheme, Iran. Global Ecology and Conservation, 18, e00646. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00646.

Revitt, D.M., Lundy, L. and Fatta-Kassinos, D. (2021). Development of a qualitative approach to assessing risks associated with the use of treated wastewater in agricultural irrigation. Journal of Hazardous Materials. 406, 124286. https://doi.org /10.1016/j.jhazmat.2020.124286.

Seyedabadi, R. and Attari, J. (2012). Optimization of Wastewater Treatment Plant Transfer System to Agricultural Areas Using Genetic Algorithm. National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Mashhad. (in Persian)

Shu, S., Kang, L., Zhao, M., Yu, J., Zhao, H. and Yang, K. (2009). Modified Methods on Testing Roughness Coefficient of Water Pipes in Urban Water Distribution Network. In: ICPTT 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications (pp. 114-123). https://doi.org/ 10.1061/41073(361)12.

Toprak, Z.F. (2016). Ideal Velocity: A New Concept for Open Channel Flows. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. 5(3), 116-121. DOI:10.5963/JWRHE0503005

Tsakiris, G. and Spiliotis, M. (2016). Uncertainty in the analysis of water conveyance systems. Procedia

engineering, 162, 340-348. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.073.

Ungureanu, N., Vlăduț, V. and Voicu, G. (2020). Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. Sustainability, 12(21), 9055. https://doi.org/10.3390/su12219055.