Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 79 (2022): 74-88

Applied Science

Modeling and Optimization of Operational-Energy of Petroleum Products Pipeline by Using Pressure Monitoring Equipment

Mohsen Shahabi *
Iran Oil Pipelines and Telecommunications Company, Semnan oil pump station

Received: 12 Sep 2022 **Accepted:** 21 Nov 2022

Abstract

By using satellite geographic data, the control point of the 20-inch Sabzevar-Mashhad pipeline, which is located after Imam Taghi pump station, has been identified. A pressure transmitter is installed at the entrance of Imam Taghi pump station. In this study, by using the results of hydraulic and energy modeling of the pipeline with related software, the necessary calculations for placing this transmitter as a basis for pressure control in the 20-inch Sabzevar-Mashhad line have been performed. Also, the current state of operation of the line and its difference to the optimal conditions have been investigated and the improvement potentials have been identified. In the current operation method, the pressure at the control point is performed by performing hydraulic calculations on the pipeline profile map, which has led to the existence of additional pressure at the control point due to the error in this method. With the proposed operation method of this line and by modifying the operating procedures in the form of continuous monitoring and control of the pressure at the control point of this part of the pipeline using a pressure transmitter in the Imam Taqi pump station, as an alternative solution for performing pressure calculations. According to the profile maps of the pipeline, it is possible to increase the capacity of this part of the pipeline up to 230 million liters per year with the same consumption power, and it is also possible to save up to 593000 m^3 of natural gas worth 4 billion Rial, with the same transfer volume. (Equivalent to one month's energy consumption of Sabzevar pump station's turbines). In addition to the above, using this method reduces the operating hours of Sabzevar turbo pumps by 574 hours per year.

Keyword: Oil pumping Station, Pipeline, Energy Saving, Pipeline Control Point

* mohsenshahab12@gmail.com

Please Cite This Article Using:

Shahabi, M., "Modeling and Optimization of Operational-Energy of Petroleum Products Pipeline by Using Pressure Monitoring Equipment", Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 79, pp. 74-88, In Persian, (2022).

مقاله کاربردی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملیاتی- انرژی خط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی با استفاده از تجهیزات پایش فشار

محسن شهابی*

کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران، منطقه شمال‌شرق، مرکز انتقال نفت سمنان

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

چکیده

با استفاده از داده‌های جغرافیایی ماهواره‌ای، نقطه کنترل خط ۲۰ اینچ سبزوار- مشهد که بعد از مرکز انتقال امام تقی قرار گرفته است شناسایی شده است. در ورودی این مرکز یک عدد ترانسمیتر فشار نصب شده است. در این مطالعه با استفاده از نتایج مدلسازی هیدرولیکی و انرژی خط لوله با نرم افزارهای مرتبط، محاسبات لازم برای مبنا قرار دادن این ترانسمیتر برای کنترل فشار در خط ۲۰ اینچ سبزوار- مشهد انجام شده است. همچنین وضعیت بهره‌برداری فعلی و فاصله آن تا شرایط بهینه بررسی و پتانسیل‌های بهبود شناسایی شده است. در روش فعلی بهره‌برداری، فشار در نقطه کنترل بصورت انجام محاسبات هیدرولیک در نقشه پروفیل خط لوله انجام که به علت خطای موجود در این روش، منجر به وجود فشار اضافی در نقطه کنترل شده است. با روش بهره‌برداری پیشنهادی از این خط و با اصلاح رویه‌های عملیاتی بصورت پایش و کنترل مستمر فشار در نقطه کنترل این قطعه از خط لوله با استفاده از ترانسمیتر فشار در مرکز انتقال امام تقی، به‌عنوان راهکاری جایگزین برای انجام محاسبات فشار توسط نقشه‌های پروفیل خط لوله، می‌توان با توان مصرفی مشابه تا ۲۳۰ میلیون لیتر در سال افزایش ظرفیت در این قطعه از خط لوله داشت، همچنین می‌توان با حجم انتقالی مشابه تا ۵۹۳،۰۰۰ m^3 گاز طبیعی به ارزش ۴ میلیارد ریال صرفه جویی (معادل مصرف حدود یک ماه توربین‌های مرکز انتقال سبزوار) داشت. در کنار موارد فوق، بهره‌برداری با این شیوه موجب کاهش ساعت کارکرد توربوپمپ‌های سبزوار به مقدار ۵۷۴ ساعت در سال می‌شود.

کلمات کلیدی: ایستگاه پمپاژ نفت، خط لوله، صرفه‌جویی انرژی، فشار نقطه کنترل

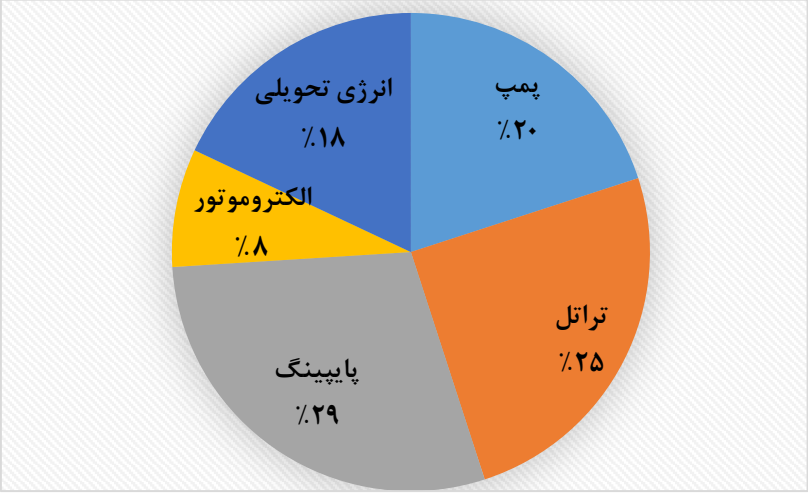
* Mohsenshahabi22@gmail.com

استناد به مقاله:

شهابی، م.، "مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملیاتی- انرژی خط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی با استفاده از تجهیزات پایش فشار"، نشریه فرآیندنو، سال هفدهم، شماره ۷۹، صص. ۸۸-۷۴، (پاییز۱۴۰۱).

۱- مقدمه

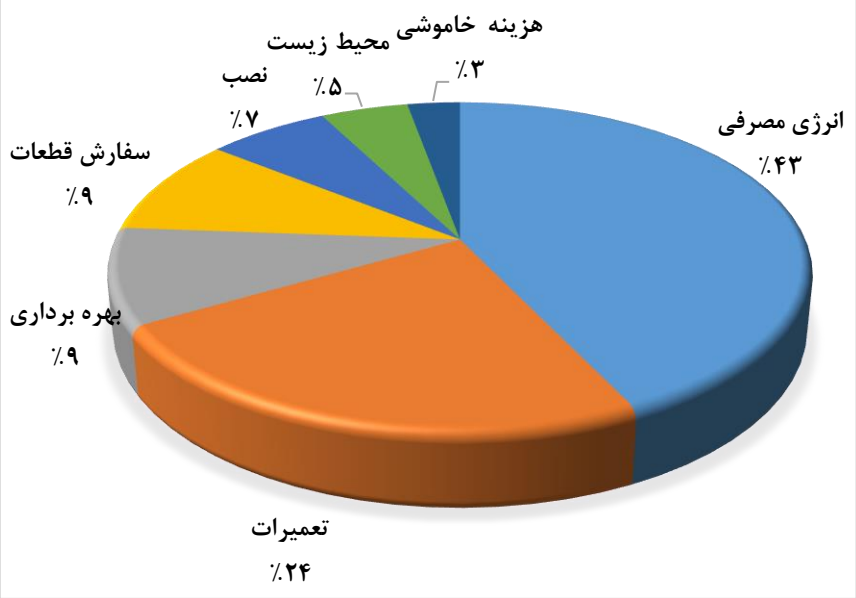
سیستم‌های پمپاژ و زیرساخت‌های مرتبط با آن یکی از بزرگترین مصرف کننده‌های انرژی می‌باشند. آمار برق مصرفی سیستم‌های پمپاژ متنوع است اما در مطالعه‌ای سیستم‌های پمپاژ سهم ۲۷ درصدی مصرف از کل برق تولیدی در دنیا را بر عهده دارند [۱]. در شکل ۱ سهم هر کدام از عوامل تلف کننده انرژی در سیستم های پمپاژ نشان داده شده است، الکتروموتورها تنها ۸ درصد از سهم تلفات را بر عهده دارند، پتانسیل صرفه جویی اصلی ٪۹۲ تنها با یافتن یک سیستم پمپاژ بهینه با حداقل تلفات هیدرولیک، سایز مناسب و کنترل کارآمد انرژی سیستم پمپاژ، قابل استحصال است [۲].



شکل ۱- سهم هر کدام از عوامل تلف کننده انرژی در سیستم‌های پمپاژ [۲]

تجزیه و تحلیل LCC[۱] یک ابزار مدیریتی است که می‌تواند به شرکت‌ها در به حداقل رساندن ضایعات و افزایش بازده انرژی برای بسیاری از انواع سیستم‌ها از جمله سیستم‌های پمپاژ کمک کند. با این ابزار می‌توان درک کاملی از اجزایی داشت که کل هزینه یک سیستم را در طول عمر آن تشکیل می‌دهند، این ابزار فرصتی را برای کاهش چشمگیر هزینه‌های انرژی، عملیاتی و نگهداری فراهم می‌کند که منجر به مزایای زیست‌محیطی نیز می‌شود. شکل ۲، نمودار هزینه در چرخه عمر یک سیستم عمومی پمپاژ را نشان می‌دهد، نکته جالب توجه در این نمودار سهم ۴۵ درصدی هزینه انرژی از کل هزینه‌های چرخه عمر است [۳].

[۱] Life cycle cost analysis



شکل ۲- نمودار هزینه در چرخه عمر یک سیستم عمومی پمپاژ [۳]

در حال حاضر حاضر پتانسیل صرفه جوئی انرژی در خطوط انتقال نفت ۰/۱۶ میلیون بشکه نفت خام در سال است که معادل با کاهش ۰/۰۶ میلیون تن CO_2 در سال می‌باشد [۴]. گستردگی خطوط لوله انتقال نفت در کشور به طول ۱۴۰۰۰ کیلومتر و بهره‌مندی از ۱۸۶ ایستگاه مرکز انتقال نفت، فشارشکن و تاسیسات انتهایی [۵]، شبکه انتقال نفت کشور را به یکی از صنایع پرمصرف در موضوع انرژی تبدیل کرده است، این شبکه انتقال، ظرفیت صرفه‌جویی قابل توجهی دارد که با استفاده از سیستم‌های کنترل دقیق‌تر و بهره‌مندی از تکنولوژی‌های جدید قابل استحصال خواهد بود.

برای تامین نیروی کافی برای انتقال نفت در لوله، در فواصل مشخص بسته به دبی و موقعیت جغرافیایی خط انتقال، ایستگاه‌های پمپاژ قرار گرفته‌اند، این ایستگاه‌ها بر دو نوع عمده الکتروپمپ یا توربوپمپ تقسیم بندی می‌شوند.

بخش خط لوله نفت و گاز یکی از موارد پر مصرف در حوزه انرژی است که نیاز به مدیریت بیشتر برای بهبود راندمان انرژی و کاهش سطح انتشار را دارد. یکی از فرصت‌های بالقوه مناسب برای بهبود مدیریت انرژی، کنترل بهینه فشار کاری خطوط لوله انتقال مایعات حین عملیات پمپاژ است.

عوامل تعیین کننده فشار کاری خط لوله از دو دیدگاه قابل بررسی است یکی حداقل فشار کاری در نقطه کنترل و دیگری حداکثر فشار کاری خط لوله، حداکثر فشار کاری بر اساس مشخصات متریالی لوله و ضخامت جداره آن مشخص می شود و برای حفاظت از لوله در برابر نیروهای حاصل از ازدیاد فشار در شرایط کاری تعریف می‌شود، اما حداقل فشار کاری در نقطه کنترل، برای حفاظت از لوله در برابر پدیده کاویتاسیون تعریف می‌شود.

تا امروزه اهمیت کنترل فشار در خطوط لوله برای بهره‌برداران خطوط لوله صرفا از دیدگاه جلوگیری از پدیده کاویتاسیون و به تبع آن خوردگی‌های داخلی لوله و جلوگیری از بروز تنش‌های فشاری اهمیت داشته است. اما دیدگاه سومی که هدف از این مطالعه نیز می‌باشد، تاثیر پایش و کنترل صحیح فشار خطوط انتقال مایعات بر مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ و ظرفیت حمل خط لوله است که در ادامه مطالعه به شرح آن خواهیم پرداخت.

تا امروز نقاط کنترلی در خطوط لوله انتقال نفت به‌علت عبور از مناطق صعب العبور و بیابانی فاقد تجهیزات ابزاردقیقی برای پایش فشار هستند، از طرفی با توجه به نبود تحقیقات علمی در خصوص پیامدهای پایش ناصحیح فشار در نقطه کنترل بر پارامترهای عملیاتی و انرژی خط لوله، الزامی برای نصب این تجهیزات نیز دیده نمی‌شد، روش مرسوم برای پایش فشار در خطوط لوله استفاده از خط تراز هیدرولیکی در نقشه‌های پروفیل خطوط لوله است. که در مطالعه‌ای تحت عنوان کاهش مصرف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ نفت با استفاده از مکانیزم کنترل فشار عملیاتی خطوط انتقال [۶] مشخص شده است که این روش بویژه در خطوط انتقال نفت طولانی با چند سیال کاری با اختلاف هد زیاد خطای قابل ملاحظه‌ای دارد که منجر به افزایش یا کاهش فشار در نقاط کنترلی می‌شود. در مطالعات دیگر در مقالات داخلی و خارجی به خطای محاسباتی فوق در محاسبه فشار در نقطه کنترل اشاره نشده و پیامدهای آن مورد مطالعه قرار نگرفته است.

تحقیق پیش رو ضمن شناسایی عوامل مورد نیاز در تعیین فشار کاری خطوط لوله و بررسی روش فعلی پایش فشار خطوط، تاثیر پایش صحیح فشار در نقاط کنترل خط لوله انتقال مایعات بر مصرف انرژی و ظرفیت حمل را مورد بررسی قرار می‌دهد و به امکان‌سنجی استفاده از ترانسمیتر فشار ورودی مرکز انتقال امام تقی برای کنترل فشار خط سبزوار-مشهد می‌پردازد.

۲- ساختار سیستم

یکی از مراکز اصلی در خط لوله انتقال نفت تهران - مشهد، مرکز انتقال نفت سبزوار است، این مرکز انواع فرآورده‌های نفتی شامل نفت‌گاز و نفت‌گاز یورو، نفت سفید، بنزین و بنزین یورو، سوخت جت، را از طریق ۲۱۶ کیلومتر لوله با قطر ۲۰ اینچ حمل می‌کند. این مرکز دارای سه پمپ اصلی با محرک توربین گاز از نوع روستون TB-۴۰۰۰ است که در دو وضعیت عمده عملیاتی یک پمپ و یا دو پمپ در سرویس (دبی حداقل و دبی حداکثر) بهره‌برداری می‌شود. طرح توسعه این مرکز با سه دستگاه الکتروپمپ در حال حاضر در حال ساخت است تا بتواند ضمن پایداری انتقال موجب بهبود راندمان انرژی با جایگزینی استفاده از الکتروپمپ‌ها بجای توربوپمپ‌های فعلی شود.

۲-۱- نقطه کنترل

نقطه‌ای که کمترین فشار حین کارکرد خط انتقال دارد را نقطه کنترل می‌گویند [۷]. دربهره‌برداری از خط لوله، برای جلوگیری از بروز کاویتاسیون و پیامدهای خوردگی در لوله، وقوع جدایی جریان و اختلاط سیالات در خطوط انتقال حاوی چند فرآورده نفتی، همواره فشار در این نقطه بایستی بیشتر از فشار بخار سیال در آن دما باشد. موقعیت نقطه کنترل خط لوله سبزوار-مشهد با استفاده از نقشه‌های پروفیل خط لوله بدست آمده است. در خطوط لوله انتقال مایعات، احتمال اینکه در نقاطی از سیستم فشار بقدری کاهش یابد که مساوی فشار بخار یا کمتر از آن شود وجود دارد. این موضوع سبب می‌شود که مایع به سرعت تبخیر شده و پدیده‌ای به نام کاویتاسیون مشاهده شود. [۸]
فشار بخار تابعی از دما است بنابراین ممکن است یک سیستم سیالاتی در طول زمستان بدون کاویتاسیون کار کند اما همان سیستم در طول تابستان با گرم شدن هوا با مشکل کاویتاسیون مواجه شود. [۹]

۲-۲- محاسبه حداقل فشار نقطه کنترل

فشار نقطه کنترل با توجه به فشار بخار سیال عبوری در دمای کاری خط لوله و با درصدی ضریب اطمینان تعریف می‌شود. مقایسه فشار بخار رید[۲](RVP) فرآورده‌های عبوری از خط لوله نشان می‌دهد که بیشترین فشار بخار رید متعلق به بنزین موتور می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- فشار بخار فراورده‌های نفتی

سیال	فشار بخار (مطلق)
نفت سفید	۰/۵-۵ kpa
نفت گاز	۱۰-۱kpa
بنزین (ایران) [۱۰]	۶۹-۵۵ kpa

مطالعه مشابهی توسط نگارنده در خصوص محاسبه حداقل فشار در نقطه کنترل در قطعه خط لوله سمنان- شاهرود انجام گرفته است که در آن با استفاده از داده‌های هواشناسی در موقعیت جغرافیایی نقطه کنترل آن قطعه از خط لوله، حداکثر دمای جغرافیایی نقطه کنترل و با استفاده از روابط و جداول مربوط به تبدیل فشار بخار رید به فشار بخار حقیقی، حداکثر فشار بخار حقیقی[۳] (TVP) سیال بنزین مشخص شده است. نتایج محاسبه در آن مطالعه نشان داد که حداقل فشار در نقطه کنترل در صورتی که ۳۰psi باشد سیستم پمپاژ به اندازه کافی از بروز کاویتاسیون فاصله دارد و هم در صورت وقوع نشتی در شرایط فعال بودن یا توقف خط‌لوله در محدوده نقطه کنترل با توجه به تجربه بهره‌برداران قابل شناسایی است. روش محاسبات بصورت زیر بوده است [۱۱]:

برای محاسبه حداقل فشار نقطه کنترل بایستی ابتدا حداکثر فشار بخار واقعی سیال عبوری محاسبه شود لذا با استفاده از روابط ۱ و ۲:

$$Max\ TVP: f\ (RVP, Temprature) \quad (1)$$

$$55 < RVP < 69\ (kpa)$$

$$T \leq 42\ °C$$

با استفاده از روابط و جداول تبدیل RVP به TVP:

$$Max\ TVP = 87.62\ kpa\ (12.7\ psi)\ (\text{مطلق})$$

$$Min\ P_{cp}[4] = Max\ f\ (TVP, lfp[5]) \quad (2)$$

$$TVP < 11.1\ kpa\ (1.6\ psi)\ (\text{مطلق})$$

$$Lfp \geq 103\ kpa\ (15\ psi),\ (\text{مطلق})$$

$$s.f[۶] = 2$$

$$Min\ P_{cp} = 206\ kpa\ (30\ psi)\ (\text{نسبی})$$

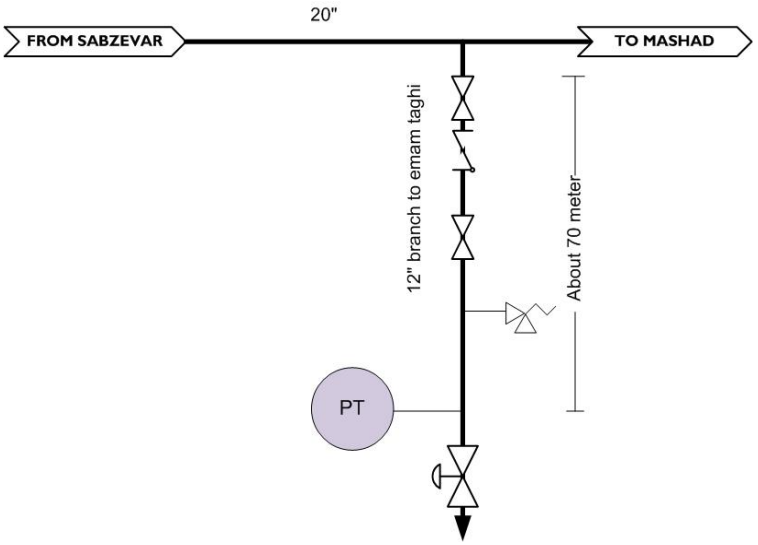
---

[2] Reid vapor pressure
[3] True vapor pressure
[4] Pressure of control point
[5] leak find pressure
Lfp بر اساس تجربه بهره‌برداران و برای تشخیص بروز نشتی حین بهره‌برداری از خط لوله انتخاب شده است. در واقع حداقل فشاری است که در صورت وقوع نشتی از لوله در نقطه کنترل و تغییرات فشار در لوله توسط اوپراتور قابل تشخیص است.
[۶] safety factor

۳-۲- خط لوله ۲۰ اینچ انتقال فرآورده‌های نفتی سبزوار مشهد

در بخش مطالعه موردی، تاثیر فشار اضافی بر مصرف انرژی و عملیات خط لوله سبزوار مشهد مورد بررسی قرار گرفته است. قطعه خط لوله مورد مطالعه شامل مرکز انتقال نفت سبزوار، تاسیسات نیشابور، انشعاب مرکز انتقال امام تقی و تاسیسات انتهایی مشهد است.

انشعاب مرکز امام تقی از خط لوله ۲۰ اینچ سبزوار-مشهد گرفته شده است، بسته به شرایط عملیاتی خط و برنامه-ریزی‌های مربوط در تمام حالت‌های بهره‌برداری، شیر کنترلی تاسیسات مشهد به گونه‌ای بهره‌برداری می‌شود که فشار در ورودی مرکز امام تقی بین اعداد psi ۱۷۰ الی ۲۲۵ متغیر است. فشار ورودی این مرکز توسط یک ترانسمیتر که موقعیت آن در شکل ۳ نشان داده شده است پایش می‌شود. موقعیت ارتفاعی مرکز امام تقی و خط ۲۰ اینچ با استفاده از داده‌های جغرافیایی استخراج شده است. با توجه به اینکه نقطه کنترل خط سبزوار به مشهد در فاصله نزدیکی از این مرکز قرار گرفته است هدف از این مطالعه پاسخ به این پرسش است که چگونه می‌توان از این ترانسمیتر برای کنترل فشار در نقطه کنترل آن خط لوله استفاده کرد و تاثیر آن چه خواهد بود.



شکل ۳- شماتیک موقعیت ترانسمیتر فشار در مرکز امام تقی

۳- نتایج و بحث

هدف اصلی از این مطالعه ارائه راهکاری برای کنترل فشار خط ۲۰ اینچ سبزوار-مشهد با استفاده از تجهیزات پایش فشار (ترانسمیتر فشار) در مرکز انتقال نفت امام تقی است که بتواند جایگزین روش محاسبه سنتی فشار نقطه کنترل این خط لوله شود و در ادامه ارائه فشار بهینه بهره‌برداری این خط با هدف افزایش ظرفیت و بهینه‌سازی انرژی است.

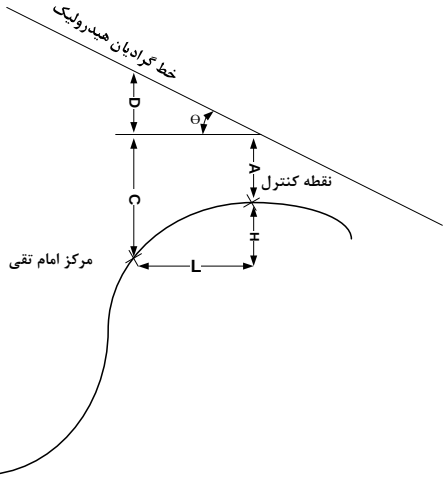
۳-۱- مدل‌سازی و بررسی پروفیل

خط لوله سبزوار-مشهد و تجهیزات اصلی خط شامل توربوپمپ‌ها و شیرهای کنترلی، توسط نرم‌افزار PipelineStudio(TL.Net) مدل‌سازی شده است، برای اطمینان از دیتای خروجی نرم افزار و انجام تنظیمات متناسب با شرایط واقعی چند نمونه از خروجی‌های نرم افزار با اطلاعات واقعی عملیاتی در جدول ۳ مقایسه شده است.

جدول ۲- کالیبراسیون نرم افزار

	سبزوار				نیشابور	امام تقی		مشهد	
	سیال	فشار ورودی psi	فشار خروجی psi	دبی m^3/hr	سیال	سیال	فشار psi	سیال	فشار ورودی psi
شرایط عملیاتی در تاریخ ۱۴۰۰/۷/۴	نفت‌گاز	۱۹۵	۱۰۹۵	۷۲۵	نفت جت	نفت سفید	۲۰۰	نفت‌گاز	۵۸۰
نتایج مدلسازی	نفت‌گاز	۱۹۵	۱۱۲۷	۷۲۵	نفت‌گاز	نفت‌گاز	۲۰۰	نفت‌گاز	۵۷۶
شرایط عملیاتی در تاریخ ۱۳۹۸/۶/۷	نفت‌گاز	۳۹۰	۱۰۲۵	۶۰۰	نفت‌گاز یورو	نفت‌گاز یورو	۲۰۲	نفت سفید	۶۰۰
نتایج مدلسازی	نفت‌گاز	۳۹۰	۱۰۱۷	۶۰۰	نفت‌گاز	نفت‌گاز	۱۹۸	نفت‌گاز	۶۰۶

نمودار ساده پروفیل خط لوله و گرادیان هیدرولیک در شکل ۴ نشان داده شده است. L، فاصله افقی موقعیت ترانسمیتر فشار با نقطه کنترل، A، هد مورد نیاز در نقطه کنترل، C هد متناظر نقطه کنترل در موقعیت ترانسمیتر، D اختلاف هد در موقعیت ترانسمیتر و نقطه کنترل است. در شرایط فعال بودن خط لوله، شیب خط گرادیان هیدرولیک که نشان‌دهنده مقدار هد در هر نقطه از خط لوله است متناسب با شرایط عملیاتی خط تغییر می‌کند، با افزایش دبی در خط لوله شیب خط گرادیان (زاویه Θ) بیشتر می‌شود و بالعکس، بنابراین می‌توان ابتدا حداکثر دبی عبوری خط و سپس و حداکثر زاویه Θ را محاسبه نمود. در این شرایط بیشترین تلفات اصطکاکی در خط وجود دارد.



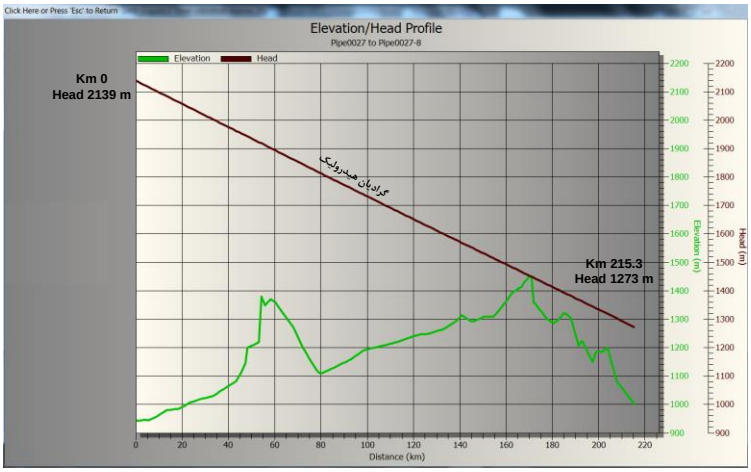
شکل ۴- نمودار ساده پروفیل خط در وضعیت دینامیک (فعال بودن خط لوله و ایستگاه پمپاژ)

برای محاسبه شرایط حداکثر دبی، حالت بدبینانه‌ای فرض شده است که مرکز سبزوار در شرایط حداکثر دور و تا مرز سوئیچ حفاظتی حداکثر فشار خروجی (۱۴۰۰ psi) و دبی معادل ۱۱۰۰ m^3/hr که به علت محدودیت دور پمپ‌ها، رسیدن به این دبی برای خط امکان پذیر نیست) کار کند و شیر کنترلی تاسیسات مشهد تا حد امکان باز شود تا فشار در نقطه کنترل به صفر برسد. بدین ترتیب بدون وقوع جدایی جریان در نقطه کنترل حداکثر دبی و حداکثر شیب گرادیان هیدرولیک بدست می‌آید. مدل نرم‌افزاری با در نظر گرفتن این حالت با سیال نفت‌گاز اجرا و دیاگرام هیدرولیک متناسب با این شرایط در شکل ۵ رسم شده است، در شرایط طراحی، حداکثر دبی عبوری از این خط ۸۵۰ m^3/hr است، برای مقایسه، اطلاعات بهره‌برداری این وضعیت نیز در جدول ۳ آورده شده است. نتایج مدل‌سازی

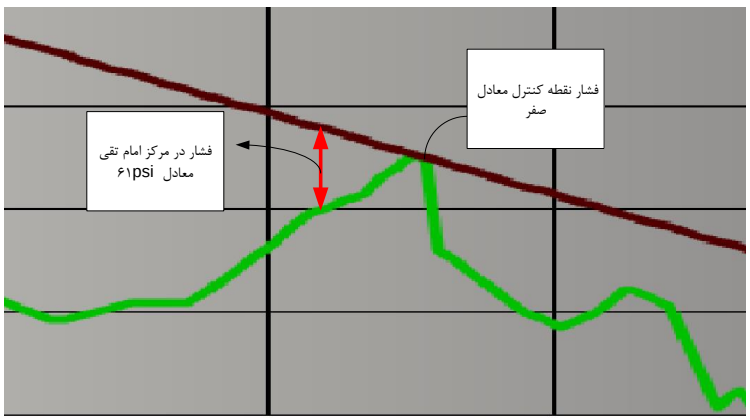
نشان داد که در شرایط حداکثر دبی، حداکثر اختلاف فشار محاسبه شده مابین ترانسمیتر مرکز امام تقی و نقطه کنترل ۶۱ psi است. برای صحت سنجی محاسبات، یک عدد گیج فشار در نقطه کنترل خط لوله بصورت موقت نصب شد، در شرایط مختلف عملیاتی حداکثر اختلاف فشار نشان‌داده شده توسط گیج در نقطه کنترل و ترانسمیتر فشار در مرکز امام تقی ۵۰ psi قرائت شد که صحت محاسبات توسط مدل‌سازی را تائید می‌کند.

جدول ۳- اطلاعات خروجی از مدل سازی و مقایسه شرایط حداکثری طراحی با شرایط حداکثری بدبینانه

	مدل‌سازی شرایط حداکثری بدبینانه	مدل‌سازی شرایط حداکثری بر اساس دبی طراحی
فشار خروجی مرکز سبزوار	۱۴۰۰psi	۱۱۵۵ psi
دبی خط سبزوار- مشهد	۱۱۰۰ m^3/hr	۸۵۰ m^3/hr
فشار در ورودی امام تقی	۶۱psi	۱۰۳psi
فشار در نقطه کنترل (قله بعد از امام تقی)	صفر	۵۰ psi
دور توربین‌ها	متناسب با فشار ورودی از ۳۵۰۰rpm الی ۳۷۰۰rpm	هر دو توربین ۳۱۰۰ rpm
اختلاف فشار مرکز امام تقی با نقطه کنترل	۶۱psi	۵۳ psi



شکل ۵- دیاگرام هیدرولیک خط لوله متناسب با شرایط بدبینانه



شکل ۶- دیاگرام هیدرولیک متناسب با شرایط بدبینانه (محدوده مرکز انتقال امام تقی)

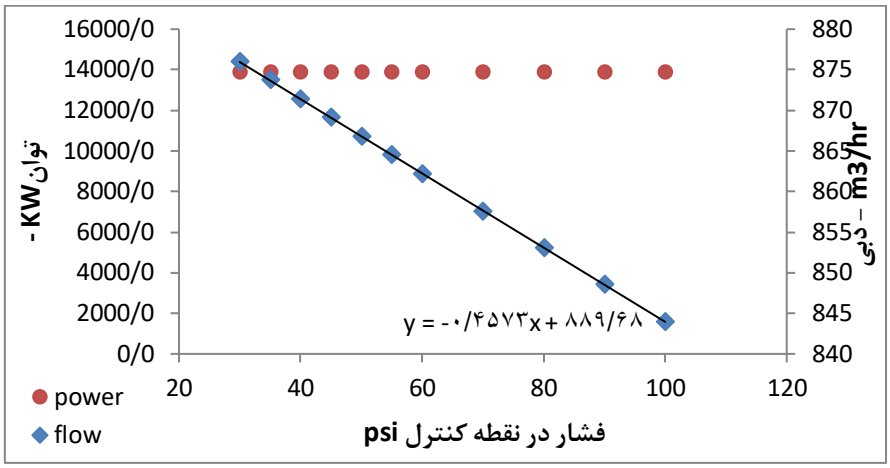
۳-۲- تاثیر فشار بر مولفه‌های بهره‌برداری

در ادامه با استفاده از مدل نرم افزاری خط لوله سبزوار-مشهد و تجهیزات اصلی مراکز و تاسیسات‌ها، تاثیر افزایش فشار در نقطه کنترل بر مصرف انرژی و پاسخ به تقاضای مصرف مورد بررسی قرار گرفته است، مدل نرم‌افزاری با در نظرگرفتن سناریوهای زیرقابل اجرا بوده است:

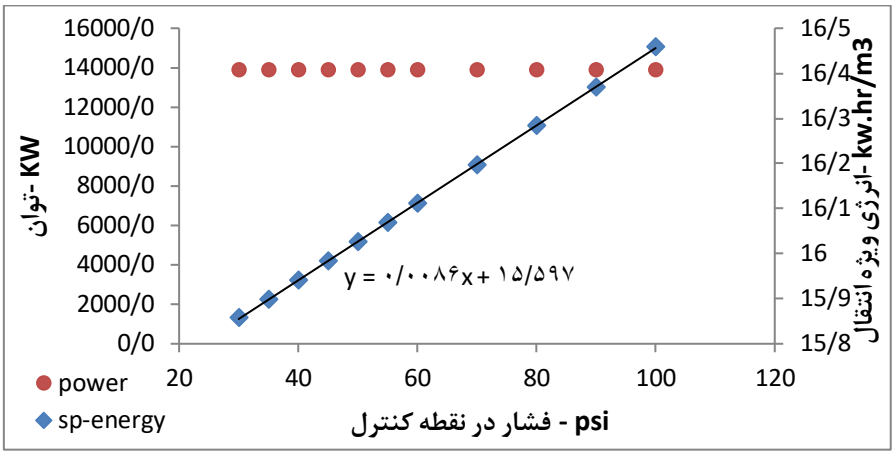
- افزایش فشار خط لوله در دبی ثابت پمپها
- افزایش فشار خط لوله در دور ثابت پمپها
- افزایش فشار خط لوله در توان مصرفی ثابت پمپ‌ها

با توجه به رویه بهره‌برداری از مراکز انتقال نفت کشور در شرایط حداکثری، سناریوی افزایش فشار خط لوله در توان مصرفی ثابت پمپ‌ها ملاک انجام محاسبات قرار داده شده است. بنابراین در کلیه حالت‌های شبیه‌سازی، پارامتر توان مصرفی پمپ در مرکز انتقال نفت سبزوار ثابت در نظر گرفته شده و شیر کنترل تاسیسات مشهد به‌گونه‌ای تنظیم شده تا فشار در نقطه کنترل تا psi ۳۰، مرحله به مرحله کم شود.

خروجی‌های مدل در شکل ۶ و شکل ۷ تغییرات دبی و انرژی ویژه انتقال را برحسب افزایش فشار در نقطه کنترل نشان می‌دهند.



شکل ۷- نمودار تغییرات دبی برحسب افزایش فشار در نقطه کنترل



شکل ۸- نمودار تغییرات انرژی ویژه برحسب افزایش فشار در نقطه کنترل

همانطور که مشاهده می‌شود افزایش فشار در نقطه کنترل، موجب کاهش دبی و افزایش انرژی ویژه انتقال شده است. برای جبران کاهش دبی و پاسخ به تقاضای شبکه مصرف یا همان دیماند بایستی ساعت کارکرد توربوپمپ‌های سبزوار افزایش یابد، از طرف دیگر افزایش انرژی ویژه نیز موجب مصرف سوخت بیشتر توربین‌ها می‌شود.

برای محاسبه تغییرات انرژی مصرفی به ازای افزایش فشار در نقطه کنترل به مقدار ۱ psi در طی یک سال روابط ۳ و ۴ تعریف شده‌اند:

$$\Delta SE_{average} = [(t_1 \times \Delta SE_1) + (t_2 \times \Delta SE_2)] / (t_1 + t_2) \quad (۳)$$

t_1 - زمان بهره برداری با یک پمپ (ساعت)

t_2 - زمان بهره برداری با دو پمپ (ساعت)

ΔSE_1 - تغییرات انرژی ویژه در بهره برداری با یک پمپ - $kw.hr/m^3$

ΔSE_2 - تغییرات انرژی ویژه در بهره‌برداری با دو پمپ - $kw.hr/m^3$

$\Delta SE_{average}$ - تغییرات انرژی ویژه متوسط به ازاء افزایش ۱ psi فشار نقطه کنترل - $kw.hr/m^3$

$$\Delta E = Q \times \Delta SE_{average} \quad (۴)$$

Q- فرآورده نفتی پمپاژ شده در یک سال - m^3

ΔE- تغییرات انرژی مورد نیاز پمپاژ در یک سال در اثر تغییر ۱ psi فشار در نقطه کنترل -kw.hr

خروجی‌های مدل در سناریوی توان ثابت نشان داد که افزایش ۱ psi فشار در نقطه کنترل در وضعیت بهره‌برداری با دبی حداقل از مرکز انتقال سبزوار موجب افزایش انرژی ویژه به مقدار ۰/۰۰۸۲ $kw.hr/m^3$ می‌شود. همچنین موجب کاهش دبی به مقدار ۰/۳۸ m^3/hr می‌شود.

در وضعیت بهره‌برداری با دبی حداکثر (دو پمپ) از ایستگاه، افزایش ۱ psi فشار نقطه کنترل، موجب افزایش ۰/۰۰۸۶ $kw.hr/m^3$ انرژی ویژه و کاهش دبی به مقدار ۰/۴۵۷ m^3/hr شده است.

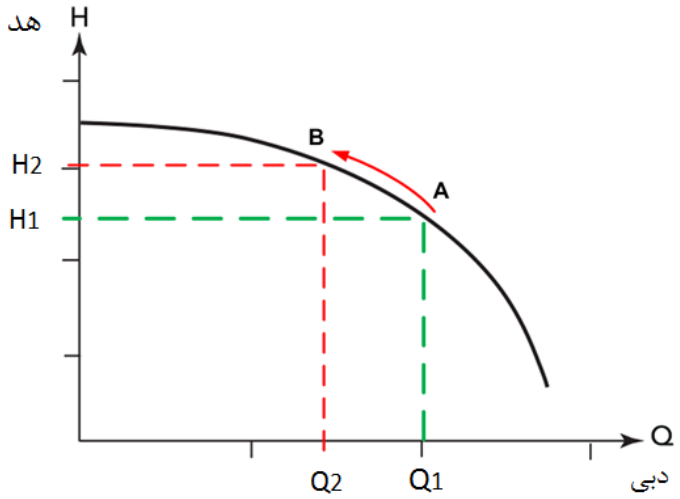
با استفاده از رابطه ۳ مقدار متوسط تغییرات انرژی ویژه $kw.hr/m^3$ ۰/۰۰۸۳۱۵ محاسبه شده است و با توجه حجم فراورده‌های پمپاژ شده در یک سال (۵۷۳۴ میلیون لیتر)[۷] و رابطه ۴، مقدار افزایش مصرف انرژی به ازای افزایش ۱ psi فشار در نقطه کنترل، ۴۷۶۸۰ kwhr محاسبه شده، همچنین موجب کاهش $۳۲۸۶m^3$ انتقال فرآورده‌های نفتی در یک سال می‌شود.

برای جبران $۳۲۸۶\ m^3$ کاهش حمل خط لوله نیاز به کارکرد بیشتر پمپ‌ها به مقدار ۸/۲ ساعت در سال است، این کارکرد اضافه پمپ‌ها معادل افزایش مصرف انرژی به مقدار۴۴۶۲۳ kwhr در سال است.

بنابراین افزایش ۱ psi فشار در نقطه کنترل موجب افزایش ۹۲۳۰۰ kwhr مصرف انرژی به علت تغییرات انرژی ویژه و کاهش دبی پمپاژ در یک سال می‌شود.

۳-۳- توان مصرفی در پمپ‌ها

در منحنی عملکردی شکل ۹ نقطه عملکرد A را در نظر بگیرید که در دبی Q_1 و هد H_1 کار می‌کند، به‌دلیل افزایش فشار در سمت پائین دست پمپ، نقطه A به سمت B میل میکند که نتیجه آن Q_2 و H_2 خواهد بود (دبی کمتر در مقابل هد بیشتر).



شکل ۹- نمودار دیاگرام عملکردی پمپ

توان مصرفی پمپ‌ها به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$power(kw) = \frac{QH(sp.qr)}{367.46E} \qquad (۵)$$

H - (اختلاف هد) ، متر – Q (دبی) $\frac{m^3}{hr}$

E- راندمان (۱=٪۱۰۰) – Specefic Gravity - sp.gr

از رابطه بالا مشخص است که توان پمپ با دبی و اختلاف هد تولیدی در آن رابطه مستقیم دارد، رابطه ۶:

$$Power = K\,.\,Q\,.\,H \qquad (۶)$$

[۷] از بهمن ۱۳۹۹ الی بهمن ۱۴۰۰

بنابراین در سناریوی توان ثابت که برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است کاهش فشار منجر به افزایش دبی در توان ثابت خواهد شد.

۳-۴- بررسی وضعیت فعلی بهره‌برداری و پتانسیل‌های بهبود

متوسط کارکرد خط ۸ اینچ امام تقی-تربت در سال ۱۴۰۰ معادل ۴۸۸ ساعت در ماه بوده است، با توجه به مقدار کارکرد مرکز امام تقی در سال و انواع فرآیندهای عملیاتی ۲۶۴ ساعت در ماه نقطه کنترل خط لوله سبزوار-مشهد دارای psi ۲۲ فشار اضافی است، همچنین ۴۱۷ ساعت در ماه نیز دارای psi ۱۰۱ فشار اضافی است. با استفاده از نتایج بخش قبلی که در آن مقدار افزایش مصرف انرژی به ازای افزایش psi ۱ فشار در نقطه کنترل محاسبه شد، پتانسیل‌های حاصل از کاهش این مقدار فشار اضافی بر ظرفیت حمل خط لوله سبزوار مشهد و یا کاهش مصرف انرژی در مرکز انتقال نفت سبزوار در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۴- پتانسل صرفه جویی خط ۲۰ اینچ

افزایش ظرفیت خط در توان مصرفی ثابت	۲۳۰ میلیون لیتر در سال
کاهش مصرف انرژی در دبی ثابت	۶،۴۶۱،۰۰۰ kwhr در سال معادل با m^3 ۵۹۳،۰۰۰ گاز طبیعی در توربین‌های سبزوار، (معادل مصرف سوخت یک ماه مرکز سبزوار)
کاهش هزینه سوخت (قیمت گاز طبیعی در ایران)	۴ میلیارد ریال
کاهش هزینه سوخت (قیمت گاز طبیعی در ترکیه)	۱۵۶،۰۰۰ دلار (معادل ۴۲ میلیارد ریال)
کاهش ساعت کارکرد پمپ‌ها	۵۷۴ ساعت در سال

۳-۵- علت وجود فشار اضافی در نقطه کنترل خط لوله

به طور کلی دو روش برای پایش فشار در نقطه کنترل وجود دارد:

- استفاده از ترانسمیتر فشار در نقطه کنترل
- استفاده از خط تراز هیدرولیکی

در خطوط لوله‌ای که امکان ارسال و دریافت داده وجود داشته باشد با استفاده از ترانسمیتر فشار، اطلاعات لحظه به لحظه فشار قابل پایش است، در حال حاضر این روش در خطوط انتقال نفت مرسوم نیست. روش دیگر، محاسبه فشار با استفاده از خط تراز هیدرولیکی است. برای رسم خط تراز هیدرولیکی با تبدیل فشار به متر هد سیال در ایستگاه مبدا و مقصد خط تراز هیدرولیکی رسم می‌شود، سپس با اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بین خط تراز و نقطه کنترل و تبدیل آن با توجه به وزن مخصوص سیال، فشار به دست می‌آید. در مطالعه‌ای مشخص شده است که بین مقادیر فشار قرائت شده توسط ترانسمیتر در نقطه کنترل و محاسبه فشار توسط خط تراز هیدرولیکی بسته به نوع خط لوله تا ۳۷ درصد اختلاف وجود دارد [۱۱]، وجود خطا در روش محاسبه خط تراز هیدرولیکی به دلایل زیر است:

- وجود سیالات نفتی مختلف در طول خط لوله که موجب تغییرات ویسکوزیته و افت هد متفاوت می‌شود.
- تغییرات دمایی مختلف در طول خط و به تبع آن تغییرات وزن مخصوص.
- تغییرات دمایی مختلف در طول خط لوله به علت شرایط آب و هوائی و به تبع آن تغییرات لزجت.

- وجود ضخامت‌های متعدد جداره لوله. این موضوع موجب تغییر قطر داخلی لوله و تغییرات هد و سرعت می‌شود.
- اثرات تراکم پذیری سیال
- احتمال وجود هوا در برخی خطوط
- خطای احتمالی در موقعیت های ارتفاعی و جغرافیایی لوله‌ها در مستندات
- فرض کردن خط مستقیم برای گرادیان هیدرولیک

موارد اشاره شده در بالا موجب بروز خطا در محاسبه فشار در نقطه کنترل می‌شود که در موضوع مورد بحث این مطالعه منجر به ازدیاد فشار شده است.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه نشان داده شد که برای پایش دقیق‌تر فشار در نقطه کنترل خط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی سبزوار-مشهد بجای استفاده از خط تراز هیدرولیکی می‌توان از ترانسمیتر فشار ورودی مرکز امام تقی و ضریب تبدیل محاسبه شده توسط مدل‌سازی استفاده کرد. بدین ترتیب با تنظیم فشار در نقطه کنترل می‌توان از خط لوله به گونه‌ای بهره‌برداری کرد که هم به اندازه کافی از کاویتاسیون دور باشد و هم از لحاظ مصرف انرژی در شرایط بهینه قرار داشته باشد. با توجه به شرایط عملیاتی فعلی پتانسیل‌های بهبود نیز محاسبه شده است. بنابراین با اصلاح رویه‌های عملیاتی به صورت پایش و کنترل مستمر فشار در نقطه کنترل این قطعه از خط لوله با استفاده از ترانسمیتر فشار در مرکز انتقال امام تقی به عنوان راهکاری جایگزین برای انجام محاسبات فشار توسط نقشه‌های پروفیل خط لوله، می‌توان:

- با توان مصرفی مشابه تا ۲۳۰ میلیون لیتر در سال افزایش ظرفیت در این قطعه از خط داشت.
- می‌توان با حجم انتقالی مشابه تا m^3 ۵۹۳،۰۰۰ گاز طبیعی به ارزش ۴ میلیارد ریال صرفه جویی داشت.
- ارزش سوخت صرفه جویی شده به قیمت گاز طبیعی در کشور ترکیه برابر با ۱۵۶،۰۰۰ دلار (معادل ۴۲ میلیارد ریال) است.
- در کنار موارد فوق، بهره‌برداری با این شیوه موجب کاهش ساعت کارکرد توربوپمپ‌های سبزوار به مقدار ۵۷۴ ساعت در سال شده که خود موجب کاهش هزینه تعمیر و نگهداری و تعمیرات اساسی و تامین قطعات یدکی آن‌ها با توجه به محدودیت‌های موجود می‌شود.

از نتایج این مطالعه می‌توان در سایر خطوط لوله انتقال مایعات در کشور برای افزایش ظرفیت انتقال و مصرف بهینه انرژی بهره برد.

۵- منابع

[1] Department of Energy’s Industrial Technologies Program (ITP), Improving pumping system performance, department of energy efficiency, may 2006.

[2] Brent Ross, Pumping Systems – Low Hanging Fruit in Saving Energy, Armstrong Ltd, 2006.

[3] Identifying life cycle cost is key for maintenance, www.worldpumps.com, nov 2017.

[4] F. Sojdei, M. Eslami and N. Sayfi, “Potentials of energy conservation in the industry sector of Iran”, *eceee industrial summer study proceedings*, 2015.

[۵] سایت شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران، فروردین ۱۳۹۶، www.ioptc.ir.

[۶] محسن شهابی، عباس اکبرنیا، حسنعلی ازگلی، کاهش مصرف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ نفت با استفاده از مکانیزم کنترل فشار عملیاتی خطوط انتقال، کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی، چهارمین کنفرانس انجمن علمی انرژی ایران، ۱۳۹۶.

[۷] شیبه عیانی، اصول بهره‌برداری در خطوط لوله، اسناد فنی شرکت ملی نفت ایران.

[۸] استریتر، وایلی و بدفورد، ترجمه‌ی ملک زاده،کاشانی و معتمدی، ، مکانیک سیالات، ویرایش نهم، ۱۳۷۵، مشهد، نشر نما.

[9] E.W.Mcallister ,2002, pipeline rule of tumb handbook, fifth edition, printed in united state of America.

[۱۰] سایت شرکت ملی پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران، اردیبهشت ۱۳۹۶.

[۱۱] محسن شهابی، مدل‌سازی و بررسی راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در مرکز انتقال نفت سمنان، پایان نامه دانشگاهی دفاع از کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ۱۳۹۶.

[12] E. Shashi Menon, *Liquid Pipeline Hydraulics*, 1st Edition Columbus Division, Battelle Memorial Institute , and Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University Columbus, Ohio, 2004.