

توسعه یک روش گرافیکی جدید مبتنی بر تکنولوژی پینچ برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب از دیدگاه مصرف انرژی

مجید عمیدپور*⁺، اباذر وحدت آزاد[•]

تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده: در این مقاله یک روش گرافیکی جدید به نام پینچ هیدرولیک برای طراحی شبکه بهینه توزیع آب از دیدگاه مصرف انرژی پیشنهاد شده است. این روش در شهرها، کارخانه‌ها، منطقه‌ها و کشورهای که دارای منابع قابل ملاحظه آب برای انتقال به مصرف کننده‌ها هستند، قابل استفاده است. روش ارایه شده در این مقاله کمترین تعداد تجهیزات و کمترین میزان انرژی مورد نیاز عملیات پمپاژ را تعیین می‌نماید. در مرحله نخست روش ابداعی پینچ هیدرولیک، انتقال آب از منابع به مصرف کنندگان را با استفاده از نیروی جاذبه زمین انجام می‌دهد. سپس موقعیت بهینه پمپها و هد مورد نیاز آنها را با استفاده از تصمیم‌سازهای گرافیکی تعیین می‌نماید به طوری که کمترین میزان انرژی برای انتقال باقیمانده آب مورد نیاز مصرف کنندگان مصرف شود. در این روش اختلاف ارتفاع بین منابع و مصرف کنندگان آب، یک پارامتر مهم و کلیدی است. در پژوهش انجام شده بیش از ۸۰ درصد نیاز آب مصرف کنندگان توسط نیروی جاذبه زمین انتقال داده شده و ۲۰ درصد باقیمانده با استفاده از پمپ‌هایی که دارای موقعیت و مشخصات بهینه از دیدگاه مصرف انرژی هستند، تأمین شده است. نتیجه‌های این بررسی، روش هیدرولیک پینچ را به عنوان روشی کارآمد و مناسب برای طراحی شبکه توزیع آب از دیدگاه معرفی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تکنولوژی پینچ، بهینه‌سازی مصرف انرژی، توان مصرفی پمپ‌ها، شبکه‌های توزیع آب.

KEY WORDS: Pinch technology, Energy consumption optimization, Pumping power, Water distribution networks.

مقدمه

نام تکنولوژی پینچ را برای آن انتخاب نمودند [۲]. به دنبال آنها پژوهش‌هایی برای کمینه نمودن تعداد مبدل‌های مورد نیاز شبکه توسط Flower و Linnhoff [۳] و کمینه کردن سطح مورد نیاز شبکه مبدل‌های حرارتی توسط Linnhoff و Townsend [۴]، Ahmad و Linnhoff [۵] انجام شد. اولین گزارش‌ها از کاربرد تکنولوژی پینچ مربوط به ICI بوده که ۳۰ درصد کاهش مصرف انرژی در فرایندهای شیمیایی و پتروشیمیایی ایجاد شده بود.

نام تکنولوژی پینچ برای پژوهشگران و دانشمندان فعال در عرصه بهینه‌سازی مصرف انرژی شناخته شده و آشنا است. این تکنولوژی نخستین بار توسط Linnhoff و Turner [۱] برای تحلیل و بررسی شبکه مبدل‌های حرارتی به منظور کاهش مصرف انرژی استفاده شد. آنها به منحنی ترکیبی به عنوان ابزاری مهم در بازیافت انرژی پرداختند. تأکید آنها بر نقطه پینچ به عنوان نقطه کلیدی در بازیافت انرژی بود و به همین علت

*E-mail: amidpour@ntu.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

[•]نشانی فعلی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مکانیک

در این مقاله روش گرافیکی مبتنی بر تکنولوژی پینچ برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب از دیدگاه مصرف انرژی توسعه داده شده است.

بخش نظری

شرح مسئله

در شبکه‌های توزیع آب هزینه‌های ناشی از پمپ کردن بخش عمده‌ای از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. هزینه پمپ کردن ناشی از هزینه‌های اولیه و هزینه خرید تجهیزات مربوط به پمپ‌ها، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه‌های انرژی است. بر اساس یک پژوهش انجام شده [۳۲] بیش از ۵۰ درصد هزینه ایستگاه پمپاژ آب مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری خرید تجهیزات ایستگاه است. هزینه‌های مصرف انرژی نیز بیش از ۳۰ درصد کل هزینه‌های یک ایستگاه پمپاژ آب را در بر می‌گیرد. در نتیجه استفاده کمتر از پمپ‌ها می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب جهت کاهش هزینه پمپ‌کردن آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین کاهش مصرف انرژی پمپ‌کردن در ایستگاه‌ها، باعث کاهش بخش عمده‌ای از هزینه‌ها می‌شود. در این مقاله کاربرد جدیدی از آنالیز پینچ با عنوان پینچ هیدرولیکی^(۴) برای بهینه‌سازی هزینه پمپ‌کردن در شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد می‌شود که باعث استفاده از کمترین تعداد ممکن از ایستگاه‌های پمپ‌کردن و کاهش مصرف انرژی در هر ایستگاه با استفاده از موقعیت‌دهی مناسب ایستگاه می‌شود.

روش پینچ هیدرولیک

تمام سیالات حقیقی چسبندگی دارند. ولی حالت‌های زیادی وجود دارد که در آن‌ها، منطقی است از آثار چسبندگی صرف نظر شود. معادله‌های حرکت جریان بی‌اصطکاک به نام معادله اویلر، را از روی معادله‌های کلی حرکت می‌توان به دست آورد. از آنجا که هیچ تنش برشی نمی‌تواند در جریان بی‌اصطکاک وجود داشته باشد و تنش عمودی عبارت است از منفی فشار ترمو دینامیکی، معادله‌های حرکت جریان بی‌اصطکاک عبارتند از:

$$\rho g - \nabla p = \rho \frac{Dv}{Dt} \quad (1)$$

معادله اویلر برای جریان پایا در امتداد یک خط جریان با رابطه زیر داده می‌شود:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (2)$$

سپس Union Carbide گزارش داد که به‌طور میانگین ۵۰ درصد کاهش مصرف انرژی داشته است [۲]. تا به امروز تکنولوژی پینچ پیشرفت‌های زیادی نموده است و علاوه بر شبکه مبدل‌های حرارتی برای بهینه‌سازی برجهای تقطیر و کوره‌ها استفاده می‌شود. در راستای گسترش تکنولوژی پینچ، مشکلاتی همچون در نظر نگرفتن افت فشار در طراحی و همچنین محدودیت افت فشار در اصلاح سیستم‌های موجود مورد مطالعه قرار گرفت. برای حل این مشکل *Panjuh Shahi* و *Polley* [۸ - ۶] در اوایل دهه نود میلادی راهکارهای مناسبی را ارائه نمودند. همچنین *Panjuh Shahi* [۹] الگوریتمی را جهت بهینه‌سازی افت فشار در شبکه مبدل‌های حرارتی ارائه نمود. به منظور بهینه‌سازی انرژی در انتگراسیون فرایندها با افزایش ضریب انتقال حرارت، تکنیک افزودن وسایل افزایشنده انتقال حرارت در مبدل‌ها توسط *Polley et al.* [۱۰] و *Jafrai Nasr* [۱۱، ۱۲] مورد بررسی قرار گرفت. به‌موازات پژوهش‌های انجام شده در مورد بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی، پژوهشی نیز در مورد استفاده از این روش جهت پیشینه کردن استفاده مجدد از منابع آب توسط *Wang* و *Smith* [۱۴، ۱۳] انجام شد. در سال ۱۹۹۹ میلادی *Alves* [۱۵] و *Towler* [۱۶] روش پینچ هیدروژن را به‌منظور کاهش هیدروژن درخواستی به‌ویژه در پالایشگاه‌ها مورد توجه قرار دادند. همچنین پژوهش‌هایی در زمینه تصفیه آب توسط *Zhelev* و *Bhaw* [۱۷]، *Nthakana* و *Zhelev* [۱۸] به معرفی پینچ اکسیژن انجامید.

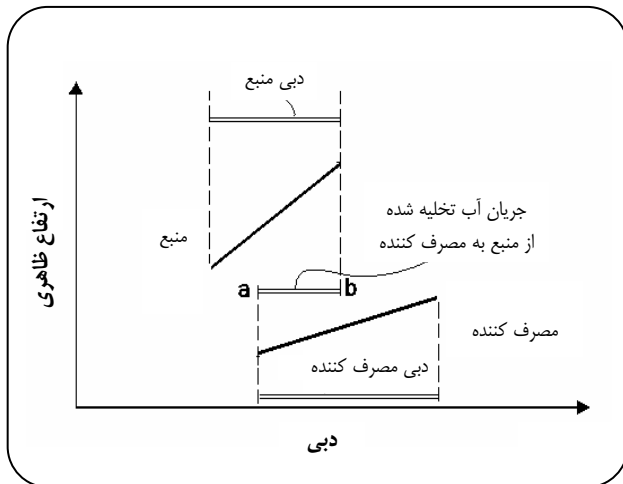
از آنجا که شبکه توزیع آب بسیار حیاتی است و به هزینه سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی نیاز دارد، بهینه‌سازی آنها در ۳۰ سال گذشته از دیدگاه‌های گوناگونی همچون کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و هزینه تعمیر و نگهداری مورد توجه قرار گرفته است. تکنیک‌های متفاوتی برای بهینه‌سازی شبکه انتقال آب استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی خطی [۲۳ - ۱۹]، برنامه‌ریزی دینامیکی [۲۴] و برنامه‌ریزی غیرخطی [۲۶، ۲۵] اشاره کرد. از بین این روش‌ها، روش‌های خطی و ساده‌سازی شده دارای کاربرد آسان‌تری هستند. روش‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون ژنتیک الگوریتم^(۱) (GA) [۲۷، ۲۸]، شبیه‌سازی تبرید^(۲) (SA) [۲۹] و کلونی مورچه‌ها^(۳) (ACO) [۳۰، ۳۱] برای مسئله‌های بهینه‌سازی استفاده شده است. اما تاکنون از روش‌های گرافیکی مثل روش پینچ برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع استفاده نشده است.

(۱) Genetic Algorithm

(۲) Simulated Annealing

(۳) Ant Colony

(۴) Hydraulic Pinch



شکل ۱- نمودار h' بر حسب Q برای یک منبع آب و یک مصرف کننده آب.

معادله (۹) بین سرعت و دبی جریان آب برقرار است.

$$V.A = Q \quad (9)$$

که Q دبی جرمی سیال، A سطح مقطع جریان و V سرعت جریان سیال است. با جایگذاری V از معادله (۹) در معادله (۷) داریم:

$$h = \frac{(Q/A)^2}{2g} \quad (10)$$

در این مقاله یک پارامتر مهم و کلیدی به نام ارتفاع ظاهری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h' = \sqrt{h} \quad (11)$$

همچنین پارامتر m با معادله (۱۲) تعریف می‌شود:

$$m = \frac{1}{A\sqrt{2g}} \quad (12)$$

در نتیجه معادله (۱۰) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$h' = m.Q \quad (13)$$

رسم کردن h' بر حسب Q برای یک منبع آب و یک مصرف کننده آب در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود منحنی مربوط به منبع آب دارای شدت جریان Q_{source} است که این دبی آب بین دو مقدار ارتفاع ظاهری با حد بالا و پائین قرار دارد. در تشریح این مورد رودخانه‌ای را به عنوان منبع در نظر بگیرید که می‌توان شدت جریان حجمی Q_{source} را از آن دریافت کرد. ارتفاع ظاهری رودخانه در بازه‌ای که

که P, v, g, z, s و ρ به ترتیب بیانگر فشار ترمودینامیکی، سرعت، شتاب جاذبه زمین، ارتفاع از سطح مبنا، مسیر جریان و چگالی سیال هستند. اگر جریان پایدار باشد معادله به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{dP}{\rho} + g dz + v dv = 0 \quad (3)$$

این معادله مبتنی بر سه فرض است.

۱- جریان بدون اصطکاک است.

۲- در امتداد خط جریان است.

۳- اگر ρ تابعی از فشار نباشد، می‌توان از معادله اویلر انتگرال گرفت. هنگامی که ρ ثابت باشد، معادله برنولی به دست می‌آید. در جریان سیالات غیر قابل تراکم رابطه برنولی به صورت زیر برقرار است.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = cte \quad (4)$$

که P, v, g, z و ρ به ترتیب بیانگر فشار ترمودینامیکی، سرعت، شتاب جاذبه زمین و ارتفاع از سطح مبنا و چگالی سیال هستند. با ساده‌سازی معادله برنولی معادله (۵) به دست می‌آید:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = cte \quad (5)$$

معادله (۵) را می‌توان برای دو نقطه متوالی روی مسیر جریان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (6)$$

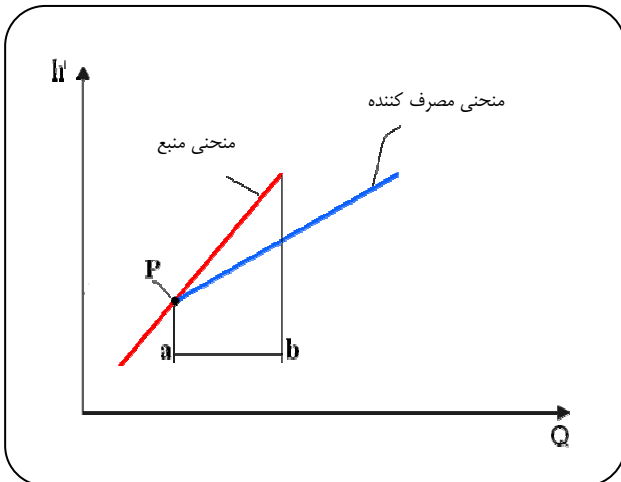
که اندیس ۱ نشان دهنده نقطه آغاز شروع جریان و اندیس ۲ نشانگر هر نقطه متوالی بعد از آن است. اگر سرعت جریان در نقطه ۱ یعنی نقطه شروع صفر در نظر گرفته شود و همچنین فشار ترمودینامیکی روی مسیر جریان ثابت باقی بماند، از معادله (۶) داریم:

$$h = z_1 - z_2 = \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

اگر افت فشار ناشی از مسیر لوله، پیچ و خمها، قطر لوله، اتصالات و غیره در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$h_t = z_1 - z_2 - h_{loss} = \frac{V_2^2}{2g} \quad (8)$$

تأثیر افت فشار (h_{loss}) در محاسبه‌ها در قسمت "کمترین اختلاف ارتفاع ظاهری مورد نیاز" تشریح شده و اعمال خواهد شد.

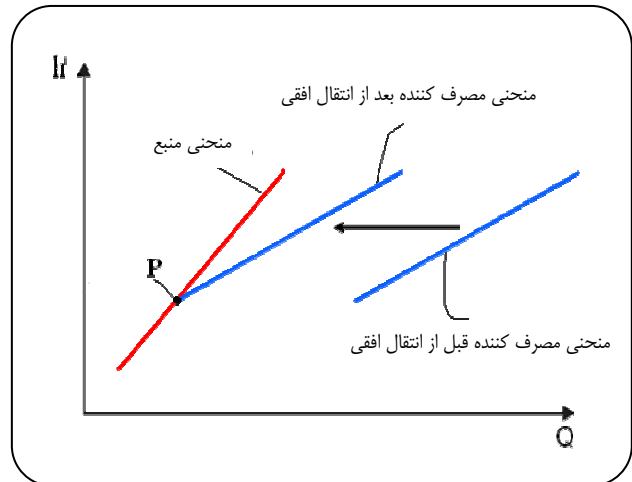


شکل ۳- تعیین میزانی از شدت جریان آب منبع که می تواند با استفاده از نیروی محرکه وزن سیال انتقال یابد.

بیانگر میزانی از شدت جریان آب است، که می تواند با استفاده از نیروی محرکه وزن سیال از منبع به مصرف کننده انتقال یابد. روشن است که افزایش طول این بخش که در آن دو منحنی مصرف کننده و منبع همدیگر را پوشش می دهند، موجب می شود تا مقدار آب انتقال داده شده توسط جاذبه زمین از منبع به مصرف کننده افزایش یابد. در این صورت نیاز کمتری برای استفاده از انرژی پمپ کردن برای انتقال آب به مصرف کننده وجود دارد. استفاده از نیروی جاذبه زمین برای انتقال آب را در اصطلاح انتقال ثقی می نامند. انتقال ثقی یکی از روش های متداول انتقال آب در شبکه های توزیع و انتقال آب بین منبع و مصرف کننده است. در این مقاله، نام نقطه P که حاصل از تقاطع دو نمودار منبع و مصرف کننده است، را نقطه پینچ می نامیم. در روش پیشنهادی سعی می کنیم تا ناحیه هم پوشانی دو نمودار منبع و مصرف کننده را افزایش دهیم.

کمترین اختلاف ارتفاع ظاهری مورد نیاز

با توجه به توضیحاتی که در مورد نقطه P یا نقطه پینچ ارائه شد نتیجه می گیریم که آب منبع با ارتفاع ظاهری برابر با ارتفاع ظاهری نقطه پینچ دارای هیچ گونه نیروی محرکه برای انتقال آب به مصرف کننده نیست. همچنین نقطه های که دارای ارتفاع ظاهری کمی بیشتر از ارتفاع ظاهری نقطه پینچ هستند، دارای نیروی محرکه بسیار کمی جهت انتقال به مصرف کننده می باشند. در صورتی که در طراحی شبکه های انتقال آب همواره یک مقدار مشخص برای سرعت و فشار مطلوب آب در محل مصرف کننده

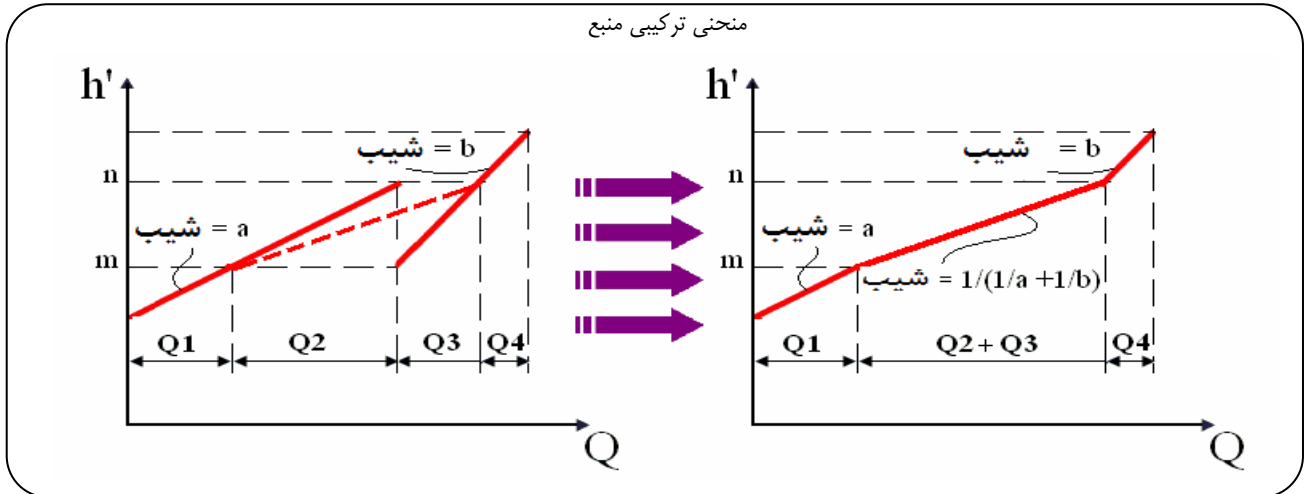


شکل ۴- انتقال منحنی مصرف کننده آب به سمت چپ و مشخص شدن نقطه Pinch.

می توان آب را برداشت کرد دارای دو حد بالا و پایین است. همین مورد درباره مصرف کننده آب نیز درست است. به عنوان مثال یک شهر را به عنوان مصرف کننده در نظر بگیرید، که شدت جریان Q_{sink} را نیاز دارد. ارتفاع ظاهری شهر از سطح دریا بین دو حد بالا و پایین قرار دارد. لذا منحنی ارتفاع ظاهری شهر از سطح دریا بین دو حد بالا و پایین قرار می گیرد.

در این مقاله انتقال آب به شیوه ثقی و استفاده از نیروی جاذبه زمین یک هدف مهم است. در مثال بالا در صورتی آب رودخانه می تواند به مصرف کننده (شهر) انتقال پیدا کند که ارتفاع آن از سطح دریا بالاتر از ارتفاع شهر از سطح دریا باشد. به عبارت دیگر بخشی از آب رودخانه را می توان به مصرف آب شهر رساند که دارای ارتفاع بیشتر از ارتفاع رودخانه باشد، تا بتوان آب را به وسیله نیروی جاذبه زمین به مصرف کننده انتقال داد. برای تشخیص میزانی از شدت جریان آب منبع که می توان آن را بدون استفاده از پمپ و فقط با استفاده از نیروی جاذبه زمین انتقال داد، دو منحنی منبع و مصرف کننده را به صورت افقی به سمت همدیگر انتقال می دهیم تا یکدیگر را در نقطه ای قطع کنند. نام این نقطه را P می خوانیم (شکل ۲). نقطه P دارای معنی و مفهوم فیزیکی است. نقطه P روی منحنی منبع نشان دهنده حدی است که اگر آب منبع دارای ارتفاع ظاهری کمتر از ارتفاع ظاهری نقطه P باشد، نمی تواند با استفاده از نیروی جاذبه زمین به سمت مصرف کننده جریان یابد.

تصویر بخشی از دو منحنی منبع و مصرف کننده که همدیگر را هم پوشانی می کنند، روی محور افقی نمودار (خط a-b در شکل ۳)



شکل ۴- تشکیل منحنی ترکیبی.

انتقال داده شده‌اند، را "نمودار منحنی انتقال داده شده^(۱)" می‌نامیم. در شرایطی که تعداد منبع یا مصرف کننده آب بیش از یک عدد باشد، از منحنی دیگری به نام منحنی ترکیبی^(۲) استفاده می‌کنیم. که منحنی (منحنی منبع یا مصرف کننده آب) به دست آمده از ترکیب تمام منحنی‌های مربوط به منابع یا مصرف کننده‌ها است. برای به‌دست آوردن منحنی ترکیبی به ترتیب زیر عمل می‌نماییم. در این جا منحنی ترکیبی مربوط به منابع توضیح داده می‌شود. منحنی ترکیبی مربوط به مصرف کننده‌ها نیز به طور همسان به‌دست می‌آید.

۱- ابتدا حدود بالا و پایین تمام منابع را به ترتیب از کوچک‌ترین مقدار تا بزرگ‌ترین مقدار چیدمان می‌نماییم. در این صورت بازه‌هایی از ارتفاع‌های ظاهری حاصل می‌شود. فرض می‌کنیم که تعداد این بازه‌های متوالی n باشد. باید در هر بازه یک منحنی ترسیم شود به‌طوری که نقطه شروع منحنی هر بازه نقطه پایان منحنی بازه قبلی باشد. مؤلفه افقی نقطه شروع و پایان منحنی هر یک از بازه‌ها همان نقطه‌های شروع و پایان بازه‌ها است. شیب خط منحنی در هر یک از بازه‌ها با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$m_j = \left(\sum 1/m_i \right)^{-1} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

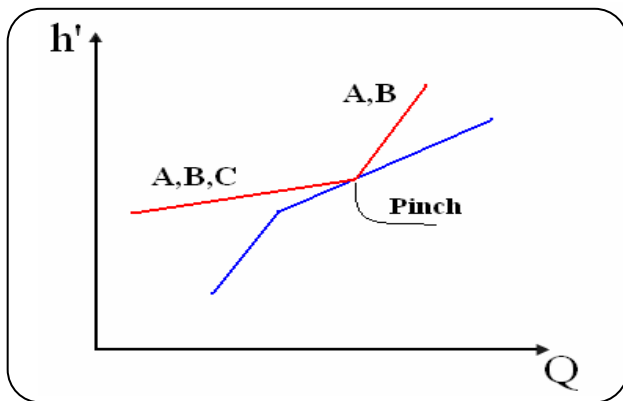
۲- در این رابطه اندیس j مربوط به هر یک از بازه‌های ۱ تا n است. و اندیس i نشانگر هر یک از منحنی‌های واقع در بازه j است. به‌عبارت دیگر شیب خط هر قسمت برابر عکس حاصل جمع معکوس شیب خط تمام منحنی‌های واقع در بازه j است. به‌عنوان مثال در شکل ۴ شیب منحنی ترکیبی منبع در بازه $m-n$ از معادله (۱۵) به‌دست می‌آید.

تعریف می‌شود. در نتیجه باید راهکار مناسبی در نظر گرفته شود تا سیال منبع دارای ارتفاع ظاهری نقطه پینچ دارای نیروی محرکه و اختلاف ارتفاع ظاهری نسبت به منحنی مصرف کننده باشد، به‌صورتی که مصرف کننده بتواند آب را با سرعت مطلوب و مناسب دریافت کند.

همچنین می‌دانیم که باید افت هد ناشی از افت‌های فشار در نظر بگیریم. برای این منظور یک اختلاف ارتفاع ظاهری بین منحنی منبع و مصرف کننده که نیروی محرکه ثقلی ناشی از آن به سرعت و فشار مطلوب در محل مصرف منجر شود، و افت هد ناشی از افت‌های فشار را جبران کند، را محاسبه و تعریف می‌کنیم. این مقدار را "حداقل اختلاف ارتفاع ظاهری مورد نیاز" می‌نامیم، و با $\Delta h'_{\min}$ یا h'_{\min} نشان می‌دهیم. برای آنکه در نقطه پینچ مقدار h'_{\min} لحاظ شود، قبل از آنکه دو منحنی را به‌صورت افقی به‌سمت یکدیگر انتقال دهیم، هر یک را به اندازه $\frac{h'_{\min}}{2}$ در راستای محور عمودی به‌سمت یکدیگر انتقال می‌دهیم. سپس با انتقال افقی آنها نقطه تقاطع دو منحنی به‌دست می‌آید. اما در واقع می‌دانیم که بین منبع و مصرف کننده آب در نقطه تقاطع دو منحنی نمودار جدید (نقطه پینچ)، اختلاف ارتفاع ظاهری h'_{\min} وجود دارد که شرایط سرعت و فشار در محل مصرف کننده متناظر با نقطه پینچ را برآورده می‌کند و نیرو محرکه لازم برای غلبه بر افت هد را نیز دربردارد. در اینجا این نمودار جدید که منحنی مربوط به منبع و مصرف کننده در راستای عمودی به سمت یکدیگر به اندازه h'_{\min}

(۱) Shifted curve

(۲) Composite curve



شکل ۵ - تعیین منبع آب بحرانی و کلیدی در نقطه Pinch.

با توجه به توضیحات ارائه شده دستورالعمل بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله موسوم به "پینچ هیدرولیک" به صورت زیر است.

۱- استخراج داده‌ها و اطلاعات مربوط به منابع و مصرف کننده‌های آب (ارتفاع ظاهری بالا و پایین، شدت جریان و افت فشار بین منابع و مصرف کننده‌ها).

۲- تعریف مقدار حداقل اختلاف ارتفاع مجاز h'_{min} با توجه به بیشترین افت فشار در جریان از منابع به مصرف کننده‌ها و سرعت و فشار مورد نیاز در مصرف کننده.

۳- تشکیل منحنی‌های ترکیبی برای منبع و مصرف کننده.

۴- ترسیم منحنی ترکیبی منابع و مصرف کننده در یک نمودار مشترک به طوری که منحنی مربوط به مصرف کننده‌ها در سمت چپ منحنی ترکیبی منابع قرار گیرد.

۵ - ترسیم نمودار منحنی‌های ترکیبی انتقال داده شده با استفاده از جابه‌جایی دو منحنی به اندازه $h'_{min}/2$ در راستای عمودی به سمت یکدیگر.

۶ - انتقال منحنی‌های به سمت یکدیگر در راستای افقی تا اینکه همدیگر را در نقطه پینچ قطع نمایند.

۷- تعیین جریان منبع یا منابع کلیدی در نقطه پینچ.

۸ - اعمال تغییرات در ارتفاع ظاهری منبع یا منابع کلیدی آب در نقطه پینچ با استفاده از عملیات پمپاژ.

با استفاده از این سناریو بیشترین استفاده از نیروی جاذبه زمین برای انتقال ثقلی آب و حداقل میزان استفاده از انرژی پمپ‌کردن و هزینه‌های ناشی از آن به دست می‌آید. در بخش بعد با آنالیز و تحلیل یک مثال، کارایی روش هیدرولیک پینچ را بررسی می‌کنیم.

$$m = \sqrt{1/a + 1/b} \quad (15)$$

این روش برای به دست آوردن منحنی ترکیبی مصرف کننده^(۱) نیز قابل استفاده است. منحنی‌های منبع و مصرف کننده را می‌توانیم به صورت منحنی‌های ترکیبی انتقال داده شده^(۲) ترسیم نماییم. برای این منظور هر یک از منحنی‌های منبع و مصرف کننده به اندازه $h'_{min}/2$ در راستای عمودی به سمت یکدیگر انتقال داده می‌شوند. در صورت انتقال افقی نمودارهای ترکیبی منبع و مصرف کننده به سمت یکدیگر نقطه پینچ که تقاطع دو منحنی است به دست می‌آید. منطقه هم پوشانی در نمودارهای منحنی‌های ترکیبی انتقال داده شده نشانگر مقداری از شدت جریان آب منبع است، که می‌تواند بدون نیاز به استفاده از پمپ و فقط با استفاده از نیروی جاذبه زمین به مصرف کننده انتقال داد. آنچه تا این مرحله بیان شد مربوط به قابلیت روش گرافیکی مبتنی بر تکنولوژی پینچ با نام پینچ هیدرولیک در انتقال آب با استفاده از نیروی جاذبه زمین است. اما هدف این روش نوین و ابتکاری در مرحله بعدی انتقال آب به محل مصرف کننده با استفاده از پمپ‌ها است، به طوری که محل قرارگیری و مشخصات مربوط به آنها به طور کامل از نظر تعداد پمپ‌ها و مصرف انرژی، بهینه است. پینچ هیدرولیک، موقعیت پمپ‌ها را به گونه‌ای مشخص می‌نماید که نیاز به استفاده از آنها حداقل میزان ممکن باشد. برای این منظور در نمودار منحنی‌های ترکیبی انتقال داده شده به نقطه پینچ به عنوان نقطه کلیدی و مهم توجه می‌شود. با بررسی نقطه پینچ در شکل ۵ می‌توان منبع یا منابعی که باعث ایجاد محدودیت در افزایش ناحیه هم پوشانی در نقطه پینچ شده‌اند را مشخص و تعیین نمود. در شکل ۵ منبع جریان A و B در سمت راست و منبع جریان A، B و C در سمت چپ نقطه پینچ قرار دارند. در این شکل نقطه پینچ مانع از حرکت افقی نمودار مصرف کننده آب به سمت چپ است. بنابراین برای افزایش ناحیه هم پوشانی دو منحنی باید موقعیت نقطه پینچ را تغییر دهیم. اگر ارتفاع نقطه پینچ افزایش داده شود، منحنی مصرف کننده می‌تواند به سمت چپ حرکت کند. افزایش ارتفاع ظاهری منبع آب C منجر به افزایش ارتفاع نقطه پینچ خواهد شد. در نتیجه منحنی منبع و مصرف کننده می‌توانند در راستای افقی به سمت یکدیگر حرکت کنند و ناحیه هم پوشانی بین آنها افزایش یابد. در واقع تصمیم‌سازهای گرافیکی و درک مشاهده‌ای روش پینچ، منبع کلیدی و محدود کننده در نقطه پینچ (منبع C) را تعیین و مشخص می‌نماید، و با معرفی بهترین نقطه و موقعیت ایستگاه پمپاژ آب کمترین میزان انرژی جهت پمپاژ را به دست می‌دهد.

(۱) Sink composite curve

(۲) Shifted composite curves

جدول ۱- مشخصات و منابع آب.

منبع آب			
نام	حد بالای هد ($m^{1/2}$)	حد پایین هد ($m^{1/2}$)	جریان (m^3/s) $\times 1000$
منبع آب	۱۰	۸	۵۷
رودخانه اول	۸	۴	۵۴
رودخانه دوم	۷	۳	۲۰۰
آبگیر	۸	۳	۱,۵۴۰.۶
دریاچه	۴,۵	۲	۴۰.۶
دریاچه	۶	۳	۵
مصرف کننده آب			
نام	حد پایین هد ($m^{1/2}$)	حد بالای هد ($m^{1/2}$)	جریان (m^3/s) $\times 1000$
مصرف کننده شهری	۲	۶	۷۰
مصرف بخش کشاورزی	۲	۵	۴۶۰
مصرف کننده روستایی	۳	۴	۲
مصرف کننده صنعتی	۲	۵	۱۲
مصرف بخش توریسم	۱	۳	۵

جدول ۲- افت هد جریان (m) بین هر یک از منابع و مصرف کننده‌ها.

	منبع ذخیره آب	رودخانه اول	رودخانه دوم	آبگیر	دریاچه	دریاچه
مصرف کننده شهری	۰,۳۶	۰,۲۸	۰,۵۹	۰,۴۴	۰,۱۶	۰,۴۲
مصرف کننده کشاورزی	۰,۴۷	۰,۲۴	۰,۳۶	۰,۳۸	۰,۳	۰,۱۵
مصرف کننده روستایی	۰,۱۲	۰,۱۷	۰,۳	۰,۲۲	۰,۳۶	۰,۴۲
مصرف کننده صنعتی	۰,۲۱	۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۵۲	۰,۴۱	۰,۱۴
مصرف بخش توریسم	۰,۲	۰,۴	۰,۲۷	۰,۴۱	۰,۲۱	۰,۱۵

همان‌گونه که در جدول ۲ دیده می‌شود بیش‌ترین مقدار افت هد جریان بین منابع و مصرف کننده‌ها در جریان از رودخانه دوم به مصرف کننده شهری اتفاق می‌افتد این مقدار برابر با 0.59 m است. در نتیجه افت هد ظاهری در این جریان برابر با $0.77\text{ m}^{1/2}$ است. کمترین سرعت دلخواه و مورد نظر در محل مصرف کننده برابر 2.7 m/s تعریف شده است. هد ظاهری متناسب با این مقدار برابر با $0.63\text{ m}^{1/2}$ می‌باشد. کمترین اختلاف ارتفاع مجاز h_{\min} به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{\min} = 0.63^2 + 0.77^2 = 1\text{ m} \Rightarrow h'_{\min} = \sqrt{h_{\min}} = \sqrt{1} = 1\text{ m}^{1/2}$$

در نتیجه هد $1\text{ m}^{1/2}$ می‌شود.

بینه‌سازی یک مثال از شبکه توزیع آب

در این قسمت یک مثال که منابع و مصرف کننده‌های متداول آب در آن وجود دارند، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهیم. اطلاعات مربوط به منابع و مصرف کننده در جدول ۱ نشان داده شده است. رودخانه شماره ۱ و ۲، دریاچه منبع ذخیره آبگیر و دریاچه منابع آب در مسئله هستند. مصرف کننده‌های آب شامل مصارف شهری، کشاورزی، شهرک صنعتی، روستا، و منطقه ویژه گردشگری است.

کمترین اختلاف ارتفاع ظاهری مجاز h'_{\min} با توجه به سرعت و فشار مناسب در مصرف کننده و افت هد محاسبه می‌شود.

جدول ۳- افت هد جریان (m) بین هر یک از منابع و مصرف کننده‌ها.

	منبع ذخیره آب	رودخانه اول	رودخانه دوم	آبگیر	دریاچه	دریاچه
مصرف کننده شهری	۰٫۳۶	۰٫۲۸	۰٫۵۹	۰٫۴۴	۰٫۱۶	۰٫۴۲
مصرف کننده کشاورزی	۰٫۴۷	۰٫۲۴	۰٫۳۶	۰٫۳۸	۰٫۳	۰٫۱۵
مصرف کننده روستایی	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۳	۰٫۲۲	۰٫۳۶	۰٫۴۲
مصرف کننده صنعتی	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۱۶	۰٫۵۲	۰٫۴۱	۰٫۱۴
مصرف بخش توریسم	۰٫۲	۰٫۴	۰٫۲۷	۰٫۴۱	۰٫۲۱	۰٫۱۵

خواهد شد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، کل نیاز مصرف کننده‌ها به آب تأمین شده است.

در مثال مورد بررسی روش پینچ هیدرولیکی ابتدا آب را با استفاده از نیروی جاذبه زمین و بدون استفاده از پمپاژ به مصرف کننده‌ها اختصاص داد. سپس با استفاده از تصمیم سازهای گرافیکی مربوط به روش پینچ هیدرولیکی موقعیت و مشخصات بهینه ایستگاه‌های پمپاژ جهت انتقال آب را تعیین نمود. همانطور که ملاحظه شد، مدیریت بهینه منابع آب از دیدگاه مصرف انرژی در روش مذکور میسر و امکان پذیر است.

بحث و بررسی

روش پینچ هیدرولیک یک روش گرافیکی مبتنی بر تکنولوژی پینچ است که از روش‌های گرافیکی و مفهومی برای طراحی شبکه بهینه توزیع آب از دیدگاه مصرف انرژی پمپاژ و هزینه‌های ناشی از آن استفاده می‌کند. در این روش مقدار کمترین نیاز به استفاده از توان و انرژی در پمپ‌ها جهت انتقال آب به دست می‌آید.

در مثال مورد بررسی این مقاله ارتفاع ظاهری منبع آب ذکر شده به اندازه $۰٫۵ m^{1/2}$ افزایش یافته که این امر موجب شده تا کل نیاز مصرف کننده آب تأمین شود. به این ترتیب کمترین استفاده از پمپ با مشخص کردن محل مناسب برای آن تعیین می‌شود. هزینه‌های ناشی از خرید تجهیزات پمپ‌ها، شیرالات و تجهیزات کنترلی و ایمنی و همچنین هزینه مصرف انرژی که بسیار قابل توجه و مهم است در این روش کمیته می‌شود. همچنین هزینه‌های عملیاتی ناشی از تعمیر و نگهداری پمپ‌ها و تجهیزات مربوط به آنها کاهش می‌یابد. روشی که در این مقاله ارائه شده روشی بسیار کارآمد و در عین حال آسان برای طراحی شبکه توزیع است. این روش موجب شده تا ۸۰ درصد آب مورد نیاز مصرف کننده‌ها

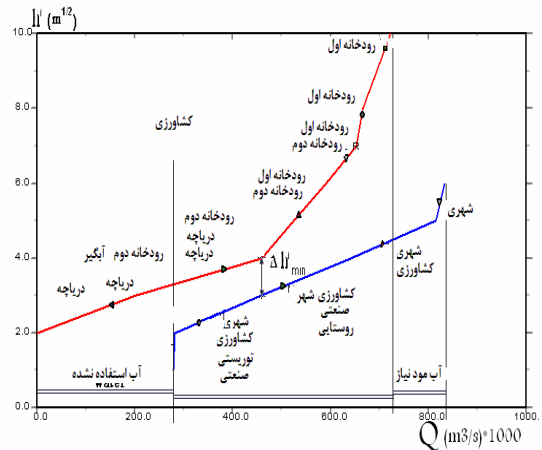
برای طراحی یک شبکه توزیع از دیدگاه مصرف انرژی پمپاژ به روش گفته شده در سناریو روش پینچ هیدرولیک عمل می‌کنیم. ابتدا نمودار ترکیبی منبع و مصرف کننده را با در نظر گرفتن کمترین ارتفاع ظاهری h_{min}^1 ترسیم می‌کنیم. هر یک از منحنی‌های منبع و مصرف کننده را به اندازه $h_{min}^1/2$ در راستای عمودی به سمت یکدیگر انتقال دهیم، تا یکدیگر را در نقطه پینچ قطع می‌نمایند (شکل ۷). همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین آب قابل انتقال از روش ثقلی برابر با تصویر افقی قسمت هم پوشانی دو منحنی منبع و مصرف کننده است، که شدت جریان آن برابر با $۱۰^۳ m^3/s$ است. به عبارت دیگر با استفاده از روش پینچ هیدرولیک میزان حداکثر شدت جریان آبی که می‌توان بدون استفاده از پمپ و فقط با استفاده از نیروی جاذبه زمین انتقال داد، مشخص گردید. باقیمانده آب مورد نیاز مصرف کننده‌ها که نمی‌توان آن را با روش ثقلی انتقال داد، برابر $۱۱۰٫۴ \times 10^3 m^3/s$ است. این مقدار باید توسط عملیات پمپ‌کردن انتقال یابد.

موقعیت بهینه ایستگاه پمپ‌کردن و مقدار هد مورد نیاز به عنوان جواب یک مسئله پیچیده در طراحی شبکه انتقال آب است، که در روش هیدرولیک پینچ می‌توانیم به آسانی آنها را بیابیم. با توجه به آنچه در بخش قبل گفته شد، اگر به نقطه پینچ توجه کنیم، متوجه می‌شویم که دریاچه منبع کلیدی و بحرانی است، که باعث به وجود آمدن نقطه پینچ شده است. بنابراین باید در ارتفاع ظاهری مربوط به این منبع تغییرات لازم داده شود، به نحوی که نقطه پینچ به عنوان نقطه محدود کننده حرکت منحنی منبع و مصرف کننده در راستای افقی حذف شود یا اینکه به سمت چپ منحنی ترکیبی منبع انتقال یابد. ارتفاع ظاهری دریاچه بین $۲ \times ۴٫۵ m^{1/2}$ است. با استفاده از عملیات پمپاژ حد بالای منبع مذکور را به $۵ m^{1/2}$ می‌رسانیم. در این صورت نمودار منحنی ترکیبی انتقال داده شده به صورت شکل ۸

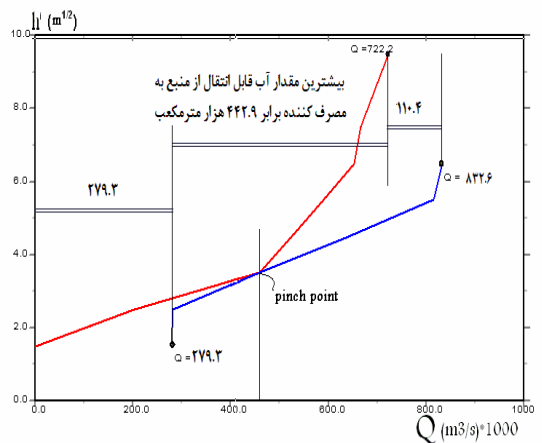
به صورت ثقلی و ۲۰ درصد باقیمانده با پمپ‌هایی که در حالت بهینه انتخاب شده‌اند انجام شود. در نتیجه با مصرف کمترین میزان انرژی در پمپ‌ها عملیات توزیع انجام می‌شود. ممکن است روش‌های دیگری نیز برای طراحی شبکه توزیع پیشنهاد شود. روش‌های ریاضیاتی مثل سوپر استراکچر^(۱) دقت بسیار بالایی دارد. اما این روش‌ها نیاز به زمان محاسباتی بسیار بالایی دارند. استفاده از این روش‌ها پیچیده تر از روش‌های گرافیکی است و به دلیل تسلط نداشتن کاربر بر روند حل مسئله ممکن است نقطه بهینه به دست آمده از این روش‌ها نقطه بهینه موضعی باشد. اما در روش‌های گرافیکی همچون روش‌های مبتنی بر تکنولوژی پینچ به دلیل مشاهده روند بهینه‌سازی از روی نمودار، کنترل و هدایت آن به سمت نقطه بهینه نهایی از طریق تصمیم‌سازهای گرافیکی میسر است و می‌توان حتی با کاربرد روش‌های گرافیکی اصلاح شده مبتنی بر پایه روش‌های جدولی^(۲) [۲۰، ۱۹] دقت روش‌های گرافیکی را افزایش داد.

نتیجه گیری

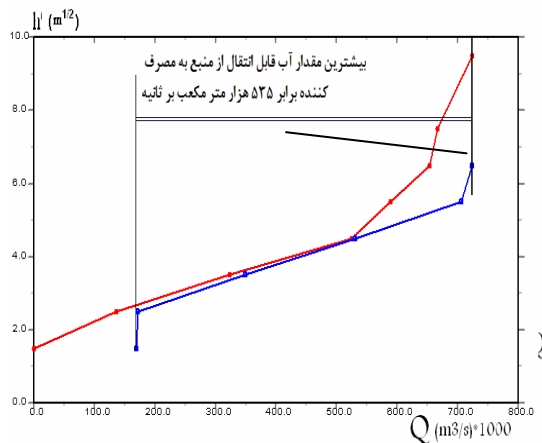
در این مقاله یک روش گرافیکی جدید مبتنی بر تکنولوژی پینچ با نام روش پینچ هیدرولیک برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب از دیدگاه مصرف انرژی پمپ‌کردن توسعه داده شد. این روش بیشترین استفاده ممکن از جاذبه زمین جهت انتقال آب از منابع به مصرف‌کننده‌ها را پیشنهاد می‌دهد. سپس از پمپ برای تامین باقیمانده آب مورد نیاز استفاده می‌کند به طوری که هزینه‌های مربوط به از پمپ‌ها و مصرف انرژی کمترین مقدار ممکن باشد. کمترین استفاده از پمپ‌ها و انرژی و توان الکتریکی در پمپ‌ها جهت انتقال آب منجر به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه مصرف انرژی می‌شود. این روش با استفاده از تصمیم‌سازهای گرافیکی راهکارهای مناسبی برای حل مسئله نسبت به روش‌های ریاضیاتی دارد. کنترل و هدایت روند بهینه‌سازی به سمت نقطه بهینه مطلق امکان‌پذیر است. این روش به عنوان روش جدید، کارآمد، قابل توسعه و ارتقاء به پژوهشگران و طراحان شبکه‌های توزیع پیشنهاد می‌شود.



شکل ۶- تنظیم h'_{min} در نمودار ترکیبی منابع و مصرف کننده‌ها.



شکل ۷- نمودار منحنی ترکیبی انتقال داده شده.



شکل ۸- افزایش هد آب دریاچه موجب تغییر نقطه پینچ و افزایش ناحیه هم پوشانی می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۳۱

(۱) Super structure

(۲) Tabular method

مراجع

- [1] Linnhoff B., Turner J.A., Pinch Technology, *Chem.E.*, p.742 (1980).
- [۲] عمیدپور، مجید؛ گوگل، مهدی؛ "تکنولوژی پینچ (بهینه‌سازی انرژی (I))"، (۱۳۸۰).
- [3] Linnhoff B., Flower J.R., "A Thermodynamic Approach To Practical Process Network Design", Aich 72nd Annual Meeting, November 25-29, San Francisco, Paper No 28b, (1979).
- [4] Towmsend D.W., Linnhoff, B., "Surface Area Targets Heat Exchanger Networks", *I Chem..e* 11th Annual Res. Metting, April, Bath, U. K, (1984).
- [5] Linnhoff B., Ahmad S., Cost Optimization Heat Exchanger Networks 1. Minimum Energy and Capital Using Simple Models Capital Cost, *Comp & Chem. Eng.*, **14**(7), p. 729 (1990).
- [6] Panjeh Shahi M.H., "Pressure Drop Consideration In Process Integration", Ph.D Thesis. University of Manchester, Institute of Science and Technology, (1992).
- [7] Polly G.T., Panjeh Shahi M.H., Jagede F.O., Pressure Drop Consideration in the Retrofit of the HEN, *Trans. I. Chem. E.*, **68A**, p. 211 (1990).
- [8] Polly G.T., Panjeh Shahi M.H., Process Integration Retrofit Subject to Pressure Drop Constraint, *Process Technology Proceedings*, **9**, p. 31 (1990).
- [۹] پنجه‌شاهی، محمدحسین؛ فلاحی، حمیدرضا؛ بهینه‌سازی افت فشار در طراحی جدید شبکه مبدل‌های حرارتی، چهارمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند (۱۳۷۷).
- [10] Polley G.T., Athie R., Gough M., Use of Heat Transfer Enhancement in Process Integration, *Heat Recovery System, Chp.*, **12**(3), p. 191 (1992).
- [11] Polley G.T., Jafari Nasr M. R., Terranova A., Determiation And Application of Benefits of Heat Transfer Enhancement, *Trans.Icheme.*, **72**, Part A, p. 616 (1994).
- [12] Jafari Nasr M.R., Polley G.T., Should You Use Enhanced Tubes?, *Chem. Eng. Prog.(CEP)*, p. 44 (2002).
- [13] Wang Y.P, Smith R., Wastewater Minimization, *Chem. Eng. Sci.*, **49** (7), 9811006 (1994).
- [14] Alves J.J., Towler G.P., Analysis of Refinery Hydrogen Distribution Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**(23), p. 5759 (2002).
- [15] Zhelev T.K., Bhaw N., Combined Water Oxygen Pinch Analysis for Better Wastewater Treatment Management, *Wastewater Manag.*, **20**(8), p. 665 (2000).
- [16] Foo DCY., Manan ZA., Tan YL., Synthesis of Maximum Water Recovery Network for Batch Process systems., *J Cleaner prod.*, **13**, 1381 (2005).
- [17] Towler GP., Menn R., Serriere AJ-L., Gabaude CMD. Refinery Hydrogen Management: Cost Analysis of Chemically Integrated Facilities, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **3**, p. 2378 (1996).
- [18] Zhelev TK., Ntlhakana JL., Energy Environment Closed-Loop Through Oxygen Pinch, *Compute Chem. Eng.*, **23**, p. S79-83 (1996).

- [19] Alperovits E., Shamir U., Design of Optimal Water Distribution Systems, *Water Resour. Res.*, **13** (6), p. 885 (1977). *Eng. Optim.*, **7**(2), p. 143 (1984).
- [20] Fujiwara O., Jenchaimahakoon B., Edirisinghe N.C.P., Modified Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks, *Water Resour. Res.*, **23** (6), p. 977 (1987).
- [21] Kessler A., Shamir U., Analysis of the Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks, *Water Resour. Res.*, **25**(7), p. 1469 (1989).
- [22] Bhave P.R., Sonak V.V., A Critical Study of the Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks, *Water Resour. Res.*,
- [23] Eiger G, Shamir U., Ben-Tal A., Optimal Design of Water Distribution Networks, *Water Resour. Res.*, **30**(9), p. 2637 (1994).
- [24] Schaake J.C., Lai D., "Linear Programming and Dynamic Programming Applied to Water Optimization Network Design", «MIT Hydrodynamics Lab Report»116, (1969).
- [25] Fujiwara O., Khang D.B., A Two-Phase Decomposition Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks, *Water Resour. Res.*, **26**(4), p. 539 (1990). **28** (6), p. 1577 (1992).
- [26] Varma K.V.K., Shankar N., Bhallamudi S.M., Optimal Design of Water Distribution Systems Using an NLP Method, *J. Environ. Eng.*, **123** (4), p. 381 (1997).
- [27] Simpson A.R., Dandy G.C., Murphy L.J., Genetic Algorithms Compared to other Techniques for Pipe Optimization, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, -ASCE, **120** (4), p. 423 (1994).
- [28] Savic D.A., Walters G.A., Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, -ASCE, **123**(2), p. 67 (1997).
- [29] Cunha M.D.C., Sousa J., Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, -ASCE, **125**(4), p. 215 (1999).
- [30] Zecchin A.C., Simpson A.R., Maier H.R., Leonard M., Roberts A.J., Berrisford M.J., Application of Two Ant Colony Optimization Algorithms to Waterdistribution System Optimization, *Math. Comput. Modeling*, **44** (5-6), p. 451 (2006).
- [31] Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y., Tan C.L., Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, -ASCE, **129** (3), p. 200 (2003).
- [32] Cieslak M., Life Cycle Costs of Pumping Stations, *J. World Pumps*, **505**, P. 30 (2008).