انتخاب حجم بهینه مخازن مکش بر اساس مدلسازی تعداد روشن و خاموش شدن الکتروپمپهای ایستگاه های پمپاژ به روش Extended Period Simulation

نادر قدیرزاد[۱]، علیرضا اتحادی نیا[۲]، زهرا اسدی کپورچالی[۳]

۱- مدیر پروژه -کارشناس ارشد مهندسی مکانیک*

۲-سرگروه تخصصی مکانیک و هیدرومکانیک- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک*

۳-معاونت مطالعات و طراحی- کارشناس مهندسی مکانیک*

***شرکت مهندسین مشاور طوس آب-مشهد-بلوار ارشاد-نبش پیام ۴**
naderghadirzad@gmail.com

خلاصه

قطعه دوم پروژه طرح خط انتقال آب خلیج فارس به صنایع جنوب شرق کشور به منظور مدلسازی حجم مورد نیاز و بهینه مخازن مکش در ایستگاه های پمپاژ و با رویکرد حفظ تعداد مجاز خاموش و روشن شدن الکتروپمپها در ساعت، به روش تحلیل بازه زمانی گسترده (Extended Period Simulation) و برنامه نویسی درون برنامه ای در نرم افزار Watergems، مورد استفاده قرار گرفته است. با حفظ بازه استاندارد تعداد استارت مجدد الکتروپمپها در ساعت و برای هر ایستگاه پمپاژ، در طول کارکرد ۲۴۰ ساعته (۱۰ روز)، حجم بهینه مخازن مکش در ایستگاه های پمپاژ و بالانس نهایی سطح آب در مخازن مذکور بدست آمده است.

کلمات کلیدی: تحلیل بازه زمانی گسترده (EPS)، خط انتقال آب، ایستگاه پمپاژ، حجم بهینه مخازن، Watergems

۱. مقدمه

در این مقاله مدلسازی هیدرولیکی خطوط پمپاژ آب در حالت ناپایدار و در بازه زمانی ۱۰ روزه به منظور بالانس هیدرولیکی سطح آب در مخازن با رویکرد حفظ تعداد مجاز خاموش و روشن شدن الکتروپمپها (Start & Stop) در ایستگاههای پمپاژ انجام شده است. محدوده مجاز تعداد خاموش و روشن شدن الکتروپمپها در ساعت، با توجه به سایز هر الکتروموتور و نوع استارت الکتروموتور (گرم یا سرد) از طرف سازنده به گونه ای مشخص می گردد که الکتروموتورها کمترین استهلاک و بیشترین عمر را داشته باشند و بنابراین نمی توان الکتروپمپهای ایستگاههای پمپاژ را بیشتر از تعداد معین شده خاموش و مجددا استارت نمود[۹]. یکی از مشکلات عمده بهره برداری در خطوط انتقال بزرگ دارای چند ایستگاه پمپاژ زمانی ایجاد می شود، که بدلیل یکسان نبودن دبی انتقالی هر ایستگاه و کم بودن حجم مخزن مکش ایستگاههای پمپاژ که سبب بالا و پایین رفتن سریعتر سطح آب در این مخازن می شود، مخازن مذکور به واسطه دبی متفاوت خط پایین دست و بالادست، پر یا خالی شده و ایستگاه پمپاژ با فرمان PLC خاموش می شود. از طرفی انتخاب حجم مخزن بیشتر از حد مورد نیاز، سبب افزایش هزینه های سرمایه گذاری و ایجاد بار مالی اضافی برای طرح می شود.

در مقاله حاضر خط انتقال آب خلیج فارس به صنایع جنوب شرق کشور در قطعه دوم آن بصورت پایلوت مورد تحلیل قرار گرفته است. طول خط انتقال در این قطعه حدود ۱۵۰ کیلومتر و ظرفیت انتقال آن ۲۷۰۰ لیتر بر ثانیه است. چهار ایستگاه پمپاژ با هد تقریبی هرکدام ۳۰ بار آب را از ارتفاع حدود ۱۸۰۵ به حدود ۲۷۵۰ متر از سطح دریا منتقل می کنند. تعداد پمپهای هر ایستگاه ۶ عدد بوده و با توان تقریبی هر الکتروپمپ ۲ مگا وات، بصورت ۱+۵ کار می کنند. اقطار لوله های فولادی مورد استفاده با توجه به دبی مورد نیاز هر بخش ۱۵۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۰۰۰ میلیمتر می باشد.

۲. مبانی طراحی هیدرولیک خط انتقال و روش محاسبه

طراحی خطوط آبرسانی به منظور تعیین قطر و فشار کار لوله صورت می گیرد. برای انتقال دبی معین باید سرعت جریان در خطوط و به تبع آن اندازه لوله ها و همچنین دوره طرح مورد محاسبه قرار بگیرند [۳]. این امر با توجه به محاسبه میزان افت فشار در درون لوله امکان پذیر می باشد. برای بدست آوردن این افت، فرمولهای مختلفی بر مبنای تجربیات و یا محاسبات علمی وجود دارند.

۱.۲. معادله دارسی وایسباخ Darcy - Weisbach

افت اصطکاکی (h) جریان سیال تراکم ناپذیر در لوله، به خواص سیال نظیر چگالی (ρ) و لزجت (μ)، خصوصیات جریان نظیر سرعت متوسط (V)، خصوصیات لوله نظیر طول (L)، قطر داخلی آن (D) و خصوصیات زبری جدار داخلی لوله نظیر اندازه، فاصله و شکل برآمدگی های زبری بستگی دارد. با به کار بردن تحلیل ابعادی[۱]، مقدار افت طولی اصطکاکی را می توان با رابطه زیر نشان داد[۴]:

$$h_f = \frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}\varphi\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{e}{D}, \frac{e'}{D}, m\right) \qquad (۱)$$

که در آن $\varphi(x)$ نشانگر تابع، e اندازه زبری ها در جدار لوله بر حسب متر، e' فاصله زبری ها (متر) و m فاکتور شکل زبریها است که بدون بعد می باشد. نظر به اینکه بررسی کمی اثر e' و m بسیار دشوار است، لذا از اثرات آنها صرفنظر شده و در مقدار e مقادیر آنها در نظر گرفته می شوند. بنابراین، معادله فوق به صورت زیر خلاصه می شود:

$$h_f = \frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}\varphi\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{e}{D}\right) \qquad (۲)$$

که در آن $VD\rho/\mu$ را عدد رینولدز (Re) خوانده و e/D پارامتر بدون بعد موسوم به زبری نسبی می باشد. بدین ترتیب با تعریف ضریب اصطکاک یا فاکتور اصطکاک (f) به صورت $\varphi(Re, e/D)$ معادله افت طولی اصطکاک بصورت زیر خواهد بود:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad (۳)$$

معادله بالا اولین بار در سال ۱۸۵۵ توسط ویسباخ[۲] ارائه شد. به خاطر تحقیقات وسیع دارسی[۳] بر روی جریان در لوله ها، نام او نیز همراه معادله آمده است و این معادله در حال حاضر به فرمول دارسی ویسباخ معروف است. در معادله دارسی ویسباخ h افت فشار بر حسب متر ستون آب، D قطر لوله (متر)، L طول لوله (متر)، V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، g شتاب ثقل(متر بر مجذور ثانیه) و f ضریب اصطکاک (بی بعد) می باشد. این فرمول بر طبق محاسبات علمی بدست آمده، دارای پیوستگی ابعادی می باشد و برای هر نوع سیال (روغن، گاز و...) قابل استفاده می باشد. در این فرمول ضریب f تنها به زبری وابسته نیست بلکه به عدد رینولدز نیز بستگی دارد و مقدار آن با توجه به رژیم جریان (آرام یا توربولانس بودن آن) از فرمولهای مربوطه مانند رابطه کلبروک بدست می آید.

۲.۲. معادله هیزن ویلیامز Hazan - Williams

شکل اصلی این فرمول در سیستم آمریکایی می باشد و در سیستم SI بصورت زیر بیان می گردد[۴]:

$$h = 10.68\left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}.D^{-4.87}.L \qquad (۴)$$

در معادله فوق D قطر لوله (متر)، L طول لوله (متر)، C ضریب زبری لوله و Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه می باشد که این فرمول یک فرمول تجربی می باشد که در ۶۰ سال اخیر کاربرد بسیار زیادی در طراحی خطوط انتقال و توزیع آب پیدا کرده است. اما دارای نقاط ضعفی می باشد. به عنوان مثال نمی توان از این فرمول درتمامی حالات مختلف جریان استفاده نمود. به عبارتی این فرمول در صورت آشفته بودن رژیم جریان‌صادق می باشد آن هم در یک بازه از قطرهای لوله و با افزایش قطر (در خطوط انتقال بزرگ) از دقت‌این فرمول کاسته می شود. همچنین برای مقادیر C کمتر از ۱۰۰ بر میزان خطای حاصل از این فرمول افزوده می گردد. در این تحقیق رابطه هیزن – ویلیامز دارای دقت موردنظر بوده و به علت متداول بودن در محاسبات خط انتقال، ملاک محاسبه افت فشار در طراحی قرار می گیرد.

۳.۲. انتخاب ضریب C

اعداد ارائه شده در مراجع و مقالات فقط مسئله نوع جنس لوله را مد نظر قرار می‌دهند. به عبارتی در اکثر مراجع فقط به جنس داخل لوله اشاره شده و اطلاعاتی در مورد سایر پارامترهای ذکر شده ارائه نمی گردد. همانگونه که اشاره گردید عدد رینولدز در میزان افت فشار مؤثر می‌باشد اما اثر فوق در ناحیه جریان با رژیم توربولانسی از بین می‌رود. خطوط مستقیم و موازی با محور عدد رینولدز(محور افقی) مربوط به ضریب e/D در ناحیه توربولانسی دیاگرام مودی نشان دهنده واقعیت فوق می‌باشد.در این ناحیه فارغ از میزان عدد رینولدز هر ضریب e/D منتج به یک ضریب f می گردد.

اما واقعیتی دیگر در قطر لوله نهفته می باشد و آن اینکه با فرض توربولانس بودن جریان درلوله هایی از یک جنس با دو قطر مختلف ضریب e/D در لوله با قطر بالاتر منتهی به ضریب f کمتر (علی رغم مستقل بودن از عدد Re) می گردد. شدت تأثیر فوق بستگی به جنس لوله و قطر آن دارد. به هر

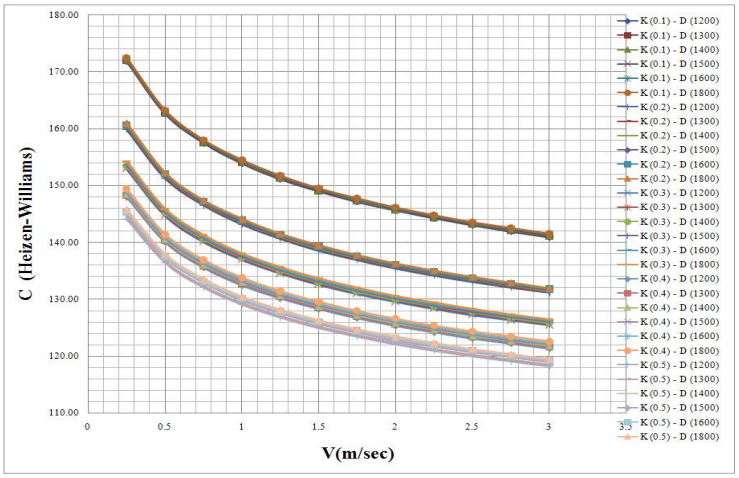
---

[۱] Dimensional analysis
[۲] Weisbach
[۳] Darcy

روی بهترین راه جهت بررسی مقدار ضریب هیزن ویلیامز و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر در این ضریب از جمله قطر و سرعت جریان، استفاده از همبستگی این ضریب و ضریب اصطکاک f در دیاگرام مودی یا معادله کلبروک می باشد. نتایج به دست آمده برای ضریب دارسی ویسباخ حاصل از به کارگیری زبری های مختلف در سرعتهای جریان و سایز لوله های مختلف از این طریق قابل محاسبه می باشد. این همبستگی به منظور محاسبه ضریب هیزن ویلیامز معادل آن با برابر قراردادن فرمول های هیزن ویلیامز و دارسی وایسباخ به صورت زیر حاصل می شود[۴]:

$$f = (\frac{1}{C^{1.852}})(\frac{134}{V^{0.148} D^{0.166}}) \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن آنچه تا کنون بیان گردید نتایج به دست آمده برای ضریب هیزن ویلیامز حاصل از فرمول بالا در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- تغییرات ضریب هیزن ویلیامز نسبت به قطر و سرعت

ضریب C برای سرعت جریان و سایز لوله های مورد استفاده در پروژه به شرح جدول (۱) محاسبه می گردد. لازم به توضیح است به جهت اطمینان از کارکرد خط لوله و همچنین خارج نشدن پمپها از بازه کاری با راندمان بالا، در سالهای بهره برداری پروژه، ضریب C برای لوله های فولادی طرح معادل ۱۲۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقدار ضریب C برای لوله های فولادی طرح

قطر لوله (mm)	دبی لحظه ای (m۳/s)	سرعت جریان (m/s)	e (mm)	مقدار C محاسبه شده
۱۰۰۰	۱/۲۷	۱/۶۲	۰/۳	۱۳۱/۱۳
۱۴۰۰	۲/۷۲	۱/۷۸	۰/۳	۱۳۱/۱۵
۱۵۰۰	۲/۷۲	۱/۵۵	۰/۳	۱۳۲/۸۰

۳. محاسبات، تهیه مدل و تحلیل هیدرولیکی خط انتقال

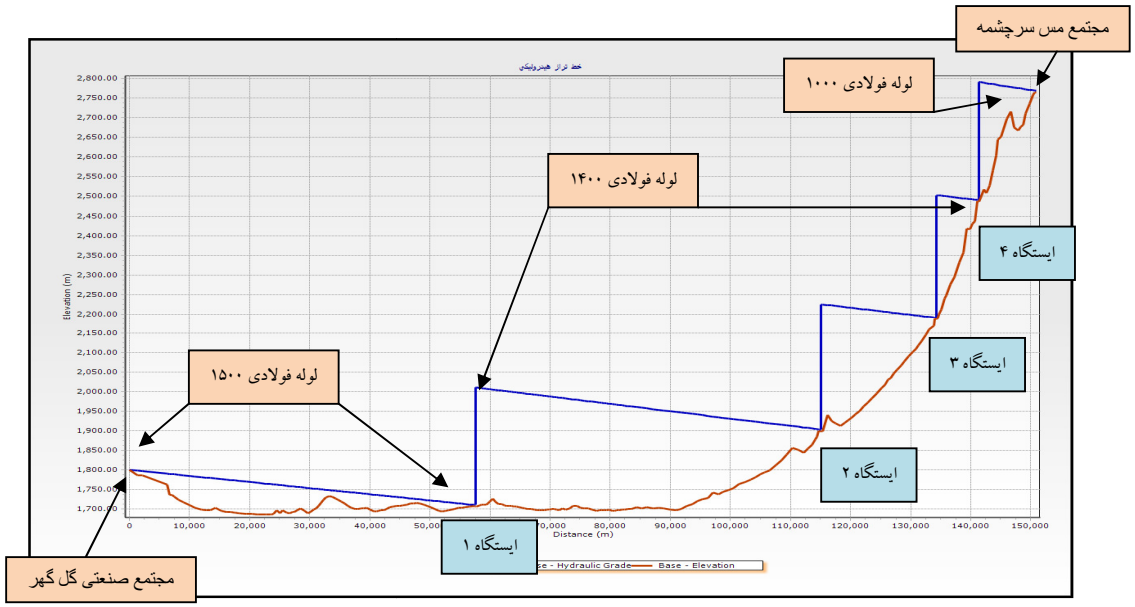
با توجه به شرایط پروژه در قطعه دوم خط انتقال آب خلیج فارس، آب از مخزن معدن گل‌گهر سیرجان تحویل گرفته شده و توسط خط انتقال فولادی با اقطار نامی ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ میلیمتر به سمت معدن مس سرچشمه کرمان پمپاژ می‌شود. انتقال آب از محل مخزن معدن گل گهر تا محل ایستگاه پمپاژ شماره ۴ با ظرفیت ۲/۷۲ متر مکعب بر ثانیه با قطر لوله ۱۴۰۰ میلیمتر در بخش های پمپاژ و ۱۵۰۰ میلیمتر در بخش های ثقلی صورت می گیرد. ظرفیت خط انتقال از محل ایستگاه شماره ۴ تا مخزن مس سرچشمه کرمان ۱/۲۷ مترمکعب بر ثانیه بوده و با لوله به قطر ۱۰۰۰ میلیمتر به سمت مخزن مس سرچشمه منتقل می‌شود.

مدل هیدرولیکی خط انتقال در نرم افزار Water Gems ساخته شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مدل مذکور بر اساس توپوگرافی منطقه و آخرین تغییرات مسیر خط ساخته شده و کدهای ارتفاعی مورد نیاز مخازن و ایستگاههای پمپاژ، مطابق آنچه که در پروژه طراحی گردیده است، برای نرم افزار تعریف می گردند[۱]. در مرحله نخست ابتدا کدهای ارتفاعی بدست آمده در تعیین موقعیت ایستگاهها در مرحله اول طراحی، به عنوان کدهای ارتفاعی

مورد نیاز در نظر گرفته می شود و بعد از تحلیل نهایی و طراحی خط لوله، کدهای ارتفاعی مذکور تدقیق می گردند. جدول (۲) مشخصات هیدرولیکی خط انتقال بعد از مدلسازی هیدرولیکی و شکل (۲) خطوط گرادیان هیدرولیکی بر روی پروفیل مسیر خط انتقال را نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی خط انتقال بعد از مدلسازی هیدرولیکی

شرح مسیر	فاصله (کیلومتر)	قطر لوله (میلیمتر)	کد ارتفاعی ابتدا (متر)	کد ارتفاعی انتها (متر)	اختلاف ارتفاع استاتیک(m)	اختلاف ارتفاع دینامیک(m)	هد پمپاژ (متر)	دبی (m۳/s)	سرعت جریان(m/s)
مخزن ابتداتا ایستگاه پمپاژ ۱	۵۷	۱۵۰۰	۱۸۰۰.۵	۱۷۱۲.۵	-۸۸	-	-	۲.۹	۱.۶۶
ایستگاه پمپاژ ۱ تا ۲	۵۸	۱۴۰۰	۱۷۰۸	۱۹۰۴.۵	۱۹۶.۵	۱۰۶	۳۰۲.۵	۲.۷۳	۱.۷۸
ایستگاه پمپاژ ۲ تا ۳	۱۹	۱۴۰۰	۱۹۰۰	۲۱۹۱.۵	۲۹۱.۵	۳۲	۳۲۳.۵	۲.۷۴	۱.۷۹
ایستگاه پمپاژ ۳ تا ۴	۷	۱۴۰۰	۲۱۸۷	۲۴۹۲.۵	۳۰۵.۵	۷.۵	۳۱۳	۲.۷۴	۱.۷۹
ایستگاه پمپاژ ۴ تا مخزن انتهایی	۹	۱۰۰۰	۲۴۸۸	۲۷۶۹.۵	۲۸۱.۵	۱۹.۵	۳۰۱	۱.۲۹	۱.۶۵



شکل ۲- خطوط گرادیان هیدرولیکی بر روی پروفیل مسیر خط انتقال

۴. انتخاب حجم بهینه مخازن مکش

با توجه به وجود ۴ عدد ایستگاه پمپاژ و با احتساب مخزن انتهای خط، تعداد ۵ عدد مخزن در کل خط موجود می باشد. محاسبه حجم مخازن مستلزم تهیه مدل هیدرولیکی بر مبنای تغییر ارتفاع آب درون مخازن و کنترل سطح آن با تغییر مدل پمپاژ و تغییر در دبی انتقالی بین هر سایت می باشد. برای منظور فوق می توان از مدل هیدرولیکی که در بخش قبل توضیح داده شد استفاده نمود با این تفاوت که در مرحله طراحی ایستگاههای پمپاژ، طراحی بر مبنای مدل Steady State صورت گرفت اما در این حالت باید مدل بصورت EPS تحلیل شود. مقوله زمان در این نوع تحلیل، میزان تغییرات پارامترهای مختلف از قبیل دبی جریان در هر سایت، هد پمپاژ، خاموش یا روشن بودن هر پمپ، میزان باز یا بسته بودن شیرهای کنترل دبی و محل نصب آنها[۲]، سطح آب در مخازن و در نهایت حجم مخزن مورد نیاز برای هر سایت به منظور بالانس شدن سیستم را مشخص می نماید. به منظور اینکه با گذشت زمان بتوان سیستم را بالانس و بهینه نمود باید دستورات کنترلی مختلفی برروی عناصر مختلف مجموعه خط انتقال قرار داد، از آن جمله می توان به زمان خاموش و روشن شدن پمپهای یک ایستگاه در شرایط مختلف اشاره نمود[۵].

لازم است حجم اولیه برای مخازن مکش ایستگاه های پمپاژ بصورت تقریبی برآورد و در نظر گرفته شود و پس از مدلسازی سیستم پمپاژ، احجام را تدقیق نمود. حجم اولیه مخازن مکش برابر با ۱۵ هزار مترمکعب در نظر گرفته شده است. دلیل تغییر حجم مخازن مکش ایستگاههای پمپاژ در هنگام

مدلسازی سیستم پمپاژ، متعادل سازی اختلاف دبی قطعات مختلف خط انتقال بدلیل تغییر هد پمپاژ و به تبع آن دبی پمپها در نقطه کاری می باشد به عبارت دیگر، با توجه به اینکه پمپهای هر ایستگاه، در محدوده کاری، دارای هد و دبی متفاوت از سایر ایستگاهها می باشند، بنابراین دبی خط انتقال در حدفاصل هر ایستگاه تا ایستگاه پمپاژ بعدی متفاوت خواهد بود و لذا این تفاوت دبی باید در حجم مخازن ذخیره هر ایستگاه پمپاژ جبران شود تا از خالی شدن مخازن مکش پایین دست و یا سرریز شدن مخازن مکش بالادست در ایستگاههای پمپاژ جلوگیری به عمل آید[۸].

دومین عامل مؤثر در برابر نبودن دبی انتقالی توسط هر ایستگاه پمپاژ، شرایط بهره برداری می باشد. در صورت نیاز به انتقال دبی های کمتر از دبی طراحی خط انتقال، این امر با خاموش کردن یک یا چند پمپ از مجموعه پمپ های در حال کار در هر ایستگاه انجام می پذیرد. پس بنابراین سیستم پمپاژ باید قادر باشد در صورت کارکرد پمپها در هر شرایط با استفاده از سیستم کنترل، و دستورات کنترلی (فلسفه کنترل ایستگاههای پمپاژ) که پمپها، شیرهای کنترل دبی و سطح آب در مخازن را کنترل می نماید، بطور اتوماتیک بالانس شود[۷].

۵. چگونگی تحلیل سیستم کنترل

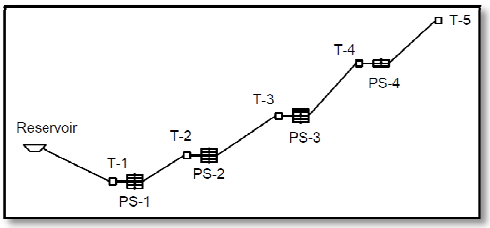
هسته اصلی سیستم کنترل وابسته به تغییرات سطح آب در مخازن می باشد. این تغییرات توسط سیستم کنترل به وسیله سنسورها درک شده و سپس در بخش نرم افزاری مورد تحلیل قرار گرفته و دستورات مقتضی توسط سخت افزارهای مرتبط به پمپها صادر می شود. تغییر سطح آب در مخازن متأثر از دبی ورودی و خروجی به مخزن می باشد. این دبی تحت تأثیر عواملی همچون تغییر سطح آب در مخازن مکش و همچنین خاموش و یا روشن شدن پمپ در ایستگاه های پمپاژ مجاور تغییر می یابد[۱].

اگر هر ایستگاه پمپاژ متشکل از مخزن مکش، مجموعه پمپ ها، خط انتقال و مخزن دهش در نظر گرفته شود، تغییرات سطح آب از دو مخزن مکش و دهش به سیستم کنترل فرستاده می شوند. حال در مجموعه ایستگاه های پمپاژ متوالی که مخزن دهش یک ایستگاه همزمان مخزن مکش ایستگاه پمپاژ بعدی می باشد، کل مجموعه به صورت یک زنجیره به هم پیوسته عمل نموده که تحلیل همزمان تمامی ایستگاه ها با هم را ضروری می سازد (دیدگاه بهره برداری جامع). بنابراین چنین وابستگی بین ۴ ایستگاه پمپاژ، ۴ قطعه خط انتقال تحت فشار، ۱ قطعه خط انتقال ثقلی، ۵ مخزن متعادل کننده و ۱۸ پمپ در حال کار تحلیل همزمان سیستم را پیچیده می‌نماید.

به منظور نوشتن فرامین کنترلی سیستم پمپاژ باید ابتدا مخزن مکش در نظر گرفته شود، با کم شدن سطح آب در مخزن مکش فرمان خاموش شدن یک پمپ از مجموعه پمپ های در حال کار صادر می‌گردد. اگر با خاموش شدن یک پمپ ارتفاع سطح آب باز هم کاهش یابد، فرمان خاموش شدن پمپ دوم نیز صادر خواهد شد. این عمل بستگی به تعداد پمپ های ایستگاه پمپاژ و شرایط کار مجموعه آنها با هم دارد. به هر روی پائین تر آمدن سطح آب از حداقل مجاز در مخزن مکش منجر به صدور فرمان خاموش شدن تمامی پمپ‌های ایستگاه می گردد[۶] . بنابراین اعلام فرمان Low از مخزن مکش به سیستم کنترل ایستگاه پمپاژ ضروری است. همچنین فرمان قطع عملکرد مجموعه پمپ‌ها نیز به منظور جلوگیری از خالی شدن مخزن الزامی می باشد. از سوی دیگر بالارفتن آب در مخزن مکش از سوی سیستم کنترل می تواند به منزله پر شدن مخزن برداشت گردد. بنابراین فرمان روشن شدن پمپ های خاموش شده را به سیستم اعلام می کند. از این فرمان می توان به فرمان Normal یاد نمود.

در مورد مخزن دهش، افزایش سطح آب موجب ارسال فرمان High به سیستم کنترل و خاموش سازی یک پمپ می شود. با کاهش سطح آب فرمان Normal جهت شروع به کار پمپ خاموش شده صادر خواهد شد. در صورت عدم کاهش سطح می توان فرمان خاموش شدن پمپ دوم را نیز صادر نمود. همچنین در صورت سرریز شدن مخزن دهش فرمان قطع عملکرد تمامی پمپ ها به ایستگاه ارسال می گردد[۵].

اولین قدم در ساخت یک مدل طرح ریزی ساختار اصلی پروژه و معرفی شرایط فیزیکی آن می باشد. به این منظور اجزای اصلی سیستم شامل قطعات خط انتقال، پمپ‌ها و مخازن دربرنامه تعریف شده است. شکل (۳) نشان دهنده شماتیک مدل فیزیکی طرح در محیط نرم افزاری و جدول (۳) معرفی کننده موارد استفاده شده در مدل می باشد. مخازن دارای سطح مقطع حدود ۳۷۵۰ مترمربع و ارتفاع مفید تقریبی ۴/۵ متر می باشند و سطح آب در هر مخزن در شرایط پر برابر ۴/۵ متر و در شرایط خالی برابر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است..



شکل ۳- شماتیک مدل فیزیکی طرح در محیط نرم افزاری

جدول ۳- تعریف پارامترهای استفاده شده در مدل نرم افزاری

شماره المان	توضیحات
T-۱	مخزن مکش ایستگاه اول
T-۲	مخزن دهش ایستگاه اول ـ مخزن مکش ایستگاه دوم
T-۳	مخزن دهش ایستگاه دوم ـ مخزن مکش ایستگاه سوم
T-۴	مخزن دهش ایستگاه سوم – مخزن مکش ایستگاه چهارم
T-۵	مخزن سایت مس سرچشمه
P-۱۱ تا P-۱۵	پمپ های ایستگاه پمپاژ شماره یک
P-۲۱ تا P-۲۵	پمپ های ایستگاه پمپاژ شماره دو
P-۳۱ تا P-۳۵	پمپ های ایستگاه پمپاژ شماره سه
P-۴۱ تا P-۴۳	پمپ های ایستگاه پمپاژ شماره چهار
FCV-۵	شیرکنترلی در انتهای خط ثقلی

۶. مدلسازی کنترلی سیستم

در نرم افزار مورد استفاده، به منظور اعمال دستورات کنترلی به مجموعه ایستگاههای پمپاژ از نوعی روش برنامه نویسی بر پایه روابط منطقی استفاده شده است که در آن بر مبنای تغییرات سطح آب مخازن، دستورات لازم به پمپهای مرتبط اعمال می شود. به عنوان مثال درصورتی که سطح آب در مخزن T-۲ (مخزن مکش ایستگاه پمپاژ شماره دو) از ۴/۲ متر بیشتر شود باید پمپ P-۱۲ از مجموعه پمپ های ایستگاه پمپاژ اول خاموش گردد. چنین دستوراتی بر پایه If A Then B استوار هستند[۶]. لازم به ذکر است که سطح Over Flow به منظور جلوگیری از سرریز مخزن در نظر گرفته شده و در صورت رسیدن آب به این سطح، فرمان قطع عملکرد کلیه پمپها به ایستگاه پمپاژ بالادست مخزن صادر خواهد شد. همچنین درصورت پایین تر آمدن تراز سطح آب مخزن از ۰/۵ متر، فرمان قطع عملکرد کلیه پمپها به ایستگاه پمپاژ مجاور مخزن صادر خواهد شد[۵]. مناسب بودن تعداد و فاصله سطوح کنترلی از هم از موارد مهم سیستم کنترل ایستگاه های پمپاژ می باشد. تعداد سطوح بستگی به تعداد فرامین لازم جهت کنترل پمپ ها دارد و فاصله سطوح کنترلی از هم تابعی از دقت اندازه گیری وسایل سنجش ارتفاع سطح و اینرسی هیدرولیکی تأسیسات ایستگاه می باشد. دو عامل که باعث می شود این اختلاف ارتفاع زیادتر شود عبارتند از [۱]:

الف) عدم دقت دستگاه اندازه گیری سطح ـ اگر این دستگاه سطح آب را با خطای مطلق T سانتیمتر نشان دهد، اختلاف بین دو سطح متوالی باید حداقل ۳T باشد تا دستور کنترلی به شکل مناسب صادر گردد. علاوه بر دقت اندازه گیری دستگاه، وجود تلاطم آب در مخزن برروی تعیین صحیح سطح آب تأثیرگذار می باشد.

ب) اینرسی هیدرولیکی تأسیسات ـ اگر فرض شود آب با دبی q از مخزن مکش ایستگاه پمپاژی منتقل می گردد و دبی Q ورودی به این مخزن کمتر از q است. در نتیجه سطح آب مخزن مکش کاهش پیدا می کند. پس از رسیدن سطح آب به سطح کنترلی L فرمان خاموش شدن یک پمپ به ایستگاه صادر می شود تا دبی پمپاژ به q´ کمتر از Q تغییر کند ولی قبل از اینکه دبی پمپاژ به q´ تقلیل یابد، مقدار معینی آب از مخزن خارج می گردد. حجم این مقدار آب به زمان خاموش شدن پمپ بستگی دارد. اگر این حجم بیشتر از حجم بین دو سطح متوالی L و LL باشد، سطح آب به LL رسیده و فرمان خاموش شدن مجموعه پمپ ها صادر می شود. عکس این امر در هنگام روشن شدن پمپ ها نیز صادق است. اگر حجم آب بین دو سطح کنترلی کمتر از حجم آبی باشد که در طی زمان روشن شدن یک پمپ به مخزن وارد می شود در اینصورت پمپ دوم نابهنگام شروع به کار می کند.

علاوه بر این بحث، تعدد سطوح کنترلی و یا فاصله کم آنها از هم فرکانس نوسانات سیستم را افزایش می دهد که به معنی خاموش و روشن شدن های متوالی پمپ ها می باشد. باتوجه به قدرت الکتروموتورهای این طرح، تعداد دفعات مجاز استارت از سوی سازندگان ۲ تا ۳ بار در ساعت بسته به شرایط کارکرد سرد یا گرم الکتروموتور اعلام شده است[۹]. برای رعایت این شرط، زمان پر و خالی شدن حجم موجود بین دو سطح کنترلی باید ۳۰ دقیقه یا بیشتر باشد. با در نظر گرفتن حدود ۰/۵۴ متر مکعب در ثانیه دبی پمپاژ برای هر پمپ، حداقل حجم بین دو سطح در صورت خاموش شدن یک پمپ حدود ۱۰۰۰ متر مکعب می گردد که معادل حدود ۳۰ سانتیمتر از ارتفاع مخزن می باشد. با در نظر داشتن اینرسی هیدورلیکی تأسیسات و تعداد سطوح مورد نیاز، فواصل سطوح کنترلی در موقع کار تمامی پمپها حداقل ۳۰ سانتی متر و در تراز های بالاتر از هم برابر ۵۰ سانتیمتر انتخاب شده است. بنابراین بعد از شبیه سازی مشخص خواهد شد که آیا می‌توان حجم برخی مخازن را از مقدار اولیه کمتر در نظر گرفت و در عین حال میزان خاموش و روشن شدن پمپ ها برای دبی های مختلف را در بازه مجاز حفظ نمود. چند نمونه از دستورات کنترلی نوشته شده برای سیستم پمپاژ در ادامه آورده شده است[۶].

Logical Control: LC۵۶۲

IF T-۴ Level < ۴.۴۰ m

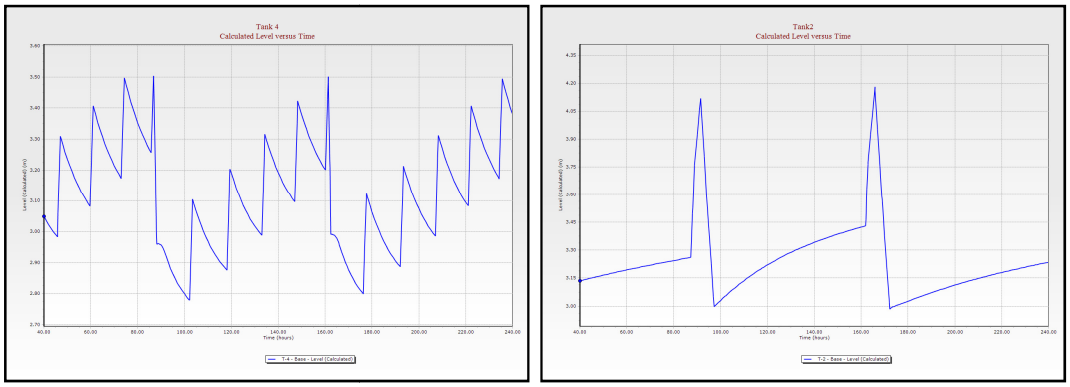
THEN "PMP-۳۳" Pump Status = Off, "PMP-۳۴" Pump Status = Off, "PMP-۳۵" Pump Status = Off

Logical Control: LC۵۵۷

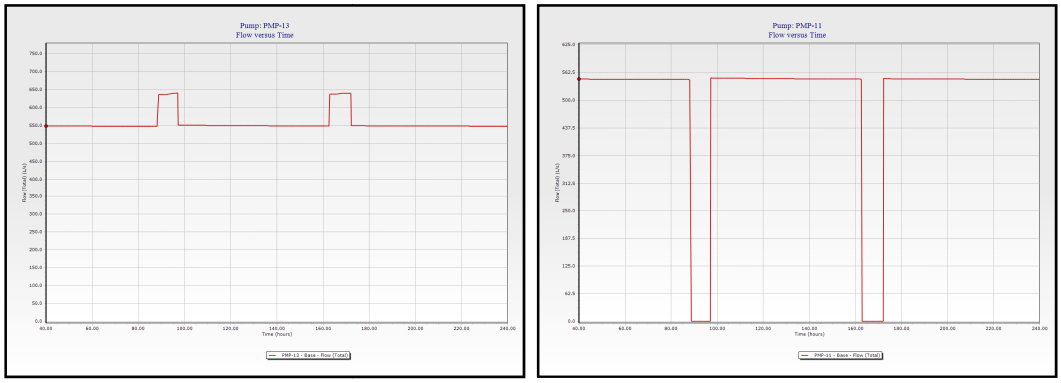
IF T-۳ Level <= ۱.۵۰ m

THEN "PMP-۳۲" Pump Status = Off

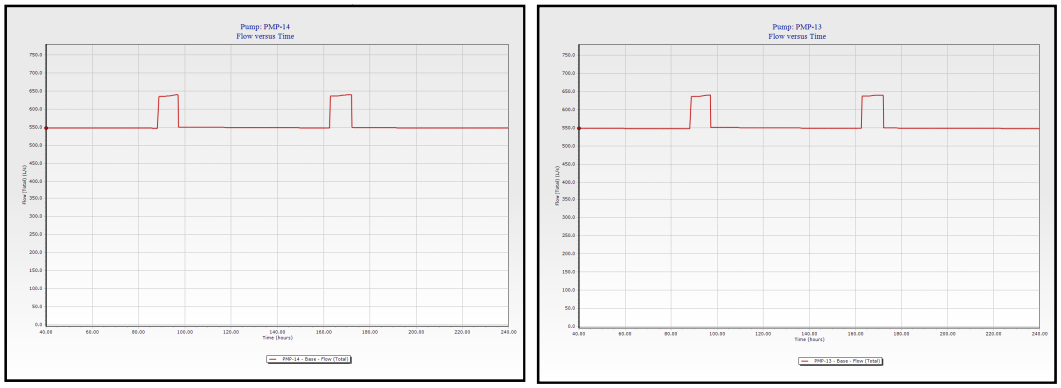
بعد از طراحی سیستم کنترل بر اساس سطح آب مخازن و دبی عبوری از شیرهای کنترلی، می توان به تعادل در جابجایی سطح آب در مخازن مکش ایستگاههای پمپاژ حدفاصل تراز بالا و پایین آب رسید. شکل (۴) نوسانات سطح آب در مخزن ایستگاه شماره ۲ و مخزن ایستگاه ۴ را بعد از بالانس هیدرولیکی خط انتقال و کاهش حجم مخازن مکش تا حجم بهینه نشان می دهد و درشکل های (۵) و (۶) به ترتیب نحوه کارکرد پمپ های ایستگاه ۱ آورده شده است. در سایر ایستگاهها و مخازن نمودارهای مشابه قابل دستیابی است که در اینجا به منظور خودداری از تکرار از ارائه تمامی نمودارها اجتناب شده است.



شکل ۴- نوسانات سطح آب در مخزن ایستگاه ۲ و ۴ در بازه زمانی ۲۴۰ ساعت



شکل ۵- منحنی کارکرد پمپ ۱۱ و ۱۲ ایستگاه پمپاژ شماره ۱ در بازه زمانی ۲۴۰ ساعت



شکل ۶- منحنی کارکرد پمپ ۱۳ و ۱۴ ایستگاه پمپاژ شماره ۱ در بازه زمانی ۲۴۰ ساعت

با بررسی این نمودارها مشخص می گردد که در ایستگاه پمپاژ شماره ۱ پمپ ۱ نقش کنترلی برای دبی جریان ایفا نموده و در بازه های مشخص خاموش و روشن میشود و سایر پمپ ها بصورت دائم در حال کار می باشند.

۷. نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدلسازی، حجم بهینه مخازن مکش ایستگاههای پمپاژ را مشخص خواهند نمود. در هر گام زمانی، بعد از بالانس هیدرولیکی خط انتقال، می توان حجم مخازن را در هر مرحله ۵۰۰ متر مکعب کاهش داد و در صورت بهم نخوردن بالانس سیستم خط انتقال، این عمل تا جایی ادامه یابد تا سایز بهینه برای کنترل بالانس سیستم بدست بیاید[۶] . بر این اساس در جدول (۴) حجم نهایی مخازن بعد از مدلسازی مشخص شده است.

جدول ۴- حجم نهایی مخازن بعد از مدلسازی

شماره مخزن	حجم مفید لازم(متر مکعب)
T-۱	۱۵.۰۰۰
T-۲	۱۵.۰۰۰
T-۳	۱۰.۵۰۰
T-۴	۱۲.۰۰۰
T-۵	۱۲.۰۰۰

با توجه به اینکه تاکنون در سیستمهای پمپاژ متوالی، انتخاب حجم بهینه مخازن مکش از قاعده و قانون خاصی پیروی نمی کرده است [۵]، با مدلسازی و انجام تحلیل های مشابه آنچه ارائه گردید، می توان به راحتی حجم بهینه مخازن مکش را محاسبه و انتخاب نمود و از مشکلات ناشی از انتخاب نامناسب حجم مخازن مکش کاست.

۸. مراجع

۱. راهنمای طراحی تلمبه خانه های آب- نشریه شماره ۴۷۰ سازمان برنامه و بودجه –وزارت نیرو دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا (۱۳۸۸)

۲.راهنمای انتخاب نوع و موقعیت شیرآلات صنعت آب و بهره برداری از آنها – نشریه شماره ۵۲۹ سازمان برنامه و بودجه- وزارت نیرو دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا (۱۳۸۹).

۳.ضوابط طراحی سامانه های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی- نشریه شماره ۳۸۰ سازمان برنامه و بودجه - وزارت نیرو دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا (۱۳۹۰).

۴.سیستمهای انتقال آب- دکتر محسن کهرم-دانشگاه فردوسی مشهد – چاپ ششم(۱۳۹۲)

۵. Pumping station Design- Second Edition- Robert L. Sanks, Phd, PE- George Tchobanoglous, Ph.D., PE (۱۹۹۸)

۶. Water Distribution Modeling and Management- BENTLEY® WATERGEMS (۲۰۰۶)

۷. Handbook of water and wastewater treatment technologies, Nicholas P. Cheremisinoff, Ph.D. (۲۰۰۲)

۸. Hydraulic Modeling and Simulation of Pumping Systems, Augusto Garcia-hernandez, proceedings of the ۲۶th international pump user's symposium, ۲۰۱۰

۹. Fluid mechanics and Hydraulic machines, Dr. R.K. Bansal, Ph.D., M.I.E. (India), ۲۰۰۵