

بررسی عوامل مؤثر در حادثه‌های خط انتقال آب گیسور- گناباد

مهدی نوری ابوذری^۱، محمد رضا جعفرزاده^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

jafarzad@um.ac.ir

چکیده- در این تحقیق عوامل مؤثر در بروز حادثه‌ها در خط انتقال آب گیسور-گناباد، مانند فشارهای دائمی و گذرا، ابزار کنترل ضربه قوچ و شیرهای هوا، اثر شرایط محیطی بر خطوط لوله و کیفیت لوله‌ها مطالعه می‌شود. سیستم انتقال آب در حالت ماندگار با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS مدل‌سازی و ضریب زبری هیزن-ویلیامز واسنجی می‌شود. با ایجاد جریان گذرا نتایج حاصل از اندازه گیری محلی با نتایج عددی نرم‌افزار Hammer مقایسه می‌شود. عملکرد رضایت‌بخش سیستم در جریان گذرا با حضور ابزار کنترل ضربه قوچ مطالعه می‌شود. شیرهای هوا در کنترل فشارهای گذرا تأثیر زیادی ندارند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که آب خورنده یا رسوب‌گذار نیست. با اطمینان یافتن از عملکرد مناسب ابزار کنترل ضربه قوچ، کیفیت پایین لوله‌های به‌کار رفته و پوسیدگی شدید، مهم‌ترین علت بروز حادثه در خط انتقال تشخیص داده می‌شود. محاسبه طول خوردگی و تنش گسیختگی مجاز مطابق استاندارد ASME-B3۱ و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نیز این مطلب را تأیید می‌کند.

کلیدواژگان: اتفاقات خطوط انتقال آب، ضربه قوچ، شیر هوا، شکست لوله، خط انتقال آبرسانی گیسور-گناباد.

۱- مقدمه

یکی از شاخص‌های اصلی در مدیریت منابع آب، طراحی، پیاده‌سازی و نگهداری از شبکه‌های انتقال و توزیع آب است. با وجود تلاش‌هایی که در جهت گسترش شبکه‌های انتقال و توزیع آب صورت گرفته، آمار حادثه‌های خطوط انتقال آب در ایران، فاصله زیادی با سطح جهانی دارد. ریشه‌یابی این حادثه‌ها در خطوط انتقال آب که تأمین‌کننده حیاتی‌ترین نیاز شهرها هستند، با توجه به هزینه‌های سنگین و مشکلات فراوان اهمیت زیادی دارد. در بسیاری از موارد از طول عمر بالای لوله‌ها

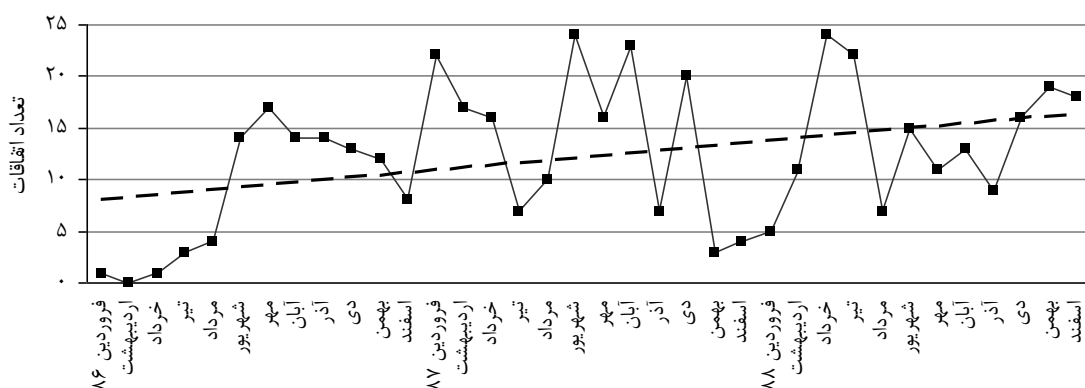
به‌عنوان مهمترین دلیل یاد می‌شود، درحالی که فقط ۲۱ درصد از لوله‌های به‌کار رفته در ایران، بیش از ۲۵ سال عمر دارند (گزارش عملکردی وزارت نیرو، ۱۳۸۸) و متوسط عمر لوله‌های چدنی و آریست خطوط انتقال در کشورهای توسعه یافته بیش از ۵۰ سال است (Larry, ۲۰۰۰). تحقیقات عملی نشان می‌دهد که کیفیت نامطلوب لوله‌ها، طراحی نامناسب، رعایت نکردن ضوابط فنی و اجرایی، پیش‌بینی نشدن ابزارهای کنترل ضربه قوچ و بهره‌برداری نادرست، از جمله دلایل مهم ایجاد اختلال در تأسیسات انتقال آب هستند. در شکل ۱ حادثه‌های

روی می‌دهد. در تحقیق حاضر، علل این حادثه‌ها، مانند اثر جریان‌های گذرا، کیفیت آب از نظر خوردگی و شکست ناشی از فرسودگی لوله‌ها مطالعه می‌شود.

۲- مشخصات خط انتقال

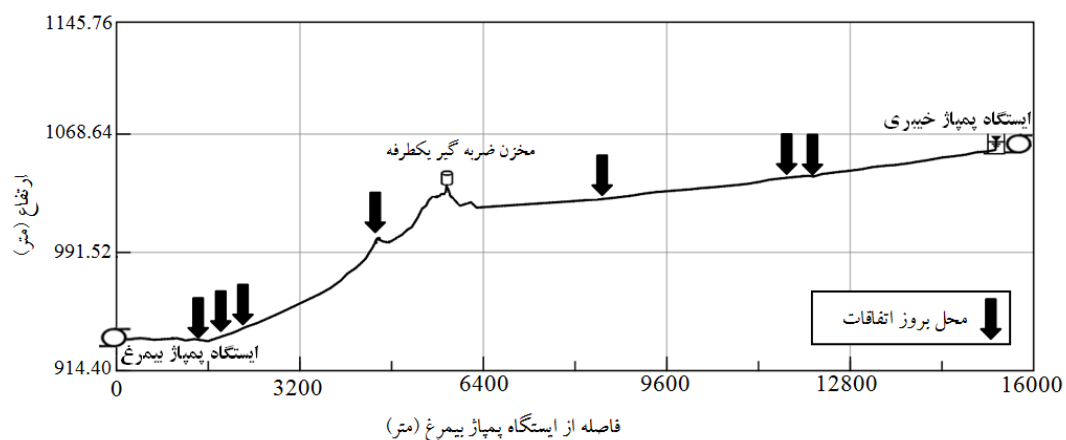
بازه‌ای از خط انتقال گیسور-گناباد با توجه به شاخص‌هایی مانند تمرکز حادثه، ارتفاع بالای پمپ‌زنی و متنوع بودن سیستم انتقال از نظر جنس و قطر لوله، انتخاب و علل بروز حادثه‌ها در آن بررسی شد. در شکل ۲ پروفیل طولی مسیر انتخاب شده و موقعیت حادثه‌ها در سه سال گذشته نشان داده شده است.

ماهنامه در خطوط انتقال آب استان خراسان رضوی در طی سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ آورده شده است. در حال حاضر، بیشتر آب مورد نیاز شهر گناباد در استان خراسان رضوی، توسط چهار حلقه چاه در شرق این شهر (منطقه گیسور) تأمین می‌شود. آب از محل استخراج توسط خط لوله‌ای به طول ۹۵ کیلومتر و به کمک سه ایستگاه پمپ‌زنی با حداکثر دبی بهره‌برداری برابر ۱۲۲ لیتر بر ثانیه به مخازن ذخیره‌سازی در شهر گناباد هدایت می‌شود. با وجود عمر کوتاه (هشت ساله) بهره‌برداری و مجهز بودن خط انتقال به تأسیسات کنترل ضربه قوچ، در بخش‌هایی از مسیر، حادثه شکستگی لوله به طور مکرر



شکل ۱ حادثه‌ها در خطوط انتقال آب استان خراسان رضوی در طی سال‌های ۸۶-۸۸

(گزارش واحد بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ۱۳۸۸)



شکل ۲ پروفیل طولی مسیر انتخاب شده و محل حادثه‌ها در بازه مورد بررسی در طی سال‌های ۸۵ تا ۸۸

(نقشه‌های ساخت خط انتقال آب گیسور-گناباد، ۱۳۸۱)

برای اندازه‌گیری دبی و سرعت از فلومتر فراصوتی مدل ۳۰۰ Micronics Portaflow با دقت ۰/۰۲ متر بر ثانیه استفاده شد. مزیت اصلی این دستگاه، نصب سنسورها بر بدنه لوله و نیاز نداشتن به دستکاری مکانیکی در خط انتقال است. فلومتر به وسیله دستگاه مبنا تنظیم شد و درستی عملکرد آن به روش حجمی در محل ایستگاه پمپ‌زنی بررسی شد.

۴- بررسی فشارهای ماندگار

۴-۱- اندازه‌گیری فشارهای ماندگار در خط

انتقال

فشارهای ماندگار خط انتقال به کمک سه دستگاه فشارسنج دیجیتالی در فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای به مدت یک هفته اندازه‌گیری شد. یکی از این فشارسنج‌ها در محل ایستگاه بیمرغ و بقیه در دو نقطه با سابقه بیشتر حادثه نصب شد (جدول ۱). نتایج نشان داد که به‌طور معمول فشار کاری مدار، کمتر از فشار نامی لوله‌های خط انتقال است.

۴-۲- واسنجی ضرایب زبری

در صنعت آب از رابطه‌ی هیزن و ویلیامز به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (Stephenson, ۱۹۸۹). ضریب زبری هیزن و ویلیامز برای لوله‌های سیمان آریست و چدن نشکن در مراجع معتبر به‌ترتیب برابر ۱۴۰ و ۱۲۰ ذکر شده است (Larock et al., ۲۰۰۰).

مسیر مورد نظر به طول ۱۵۳۵۰ متر در حد فاصل دو ایستگاه پمپ‌زنی بیمرغ در تراز ۹۴۰ متری و ایستگاه خیبری در تراز ۱۰۶۰ متری قرار دارد. این بازه از ۸۲۸۱ متر لوله چدنی نشکن با فشارهای نامی ۳۲ و ۲۵ بار و ۷۰۶۹ متر لوله سیمانی آریست با فشارهای نامی ۱۲ و ۹ بار تشکیل شده است. سایر اجزای خط انتقال عبارتند از: نه شیر هوا، هشت شیر تخلیه، چهار شیر پروانه‌ای قطع و وصل و دو مخزن ضربه‌گیر تحت فشار در ایستگاه بیمرغ. یک مخزن ضربه‌گیر یک طرفه نیز در فاصله ۵۷۸۹ متری از ایستگاه بیمرغ در تراز ۱۰۳۴ متری ساخته شده است. ایستگاه بیمرغ چهار الکتروپمپ فشار قوی مدل WKL ۱۲۵/۶۸ با قدرت الکتریکی ۱۶۰ کیلووات دارد. در وضعیت فعلی بهره‌برداری، حداکثر دو پمپ به‌طور همزمان در مدار قرار می‌گیرند (نقشه‌های ساخت خط انتقال آب گیسور-گناباد، ۱۳۸۱).

۳- ابزار اندازه‌گیری و روش واسنجی آنها

در مدار

به‌منظور واسنجی مدل عددی و ارزیابی نتایج، از تجهیزات دقیق اندازه‌گیری فشار و دبی استفاده شد. فشار خط انتقال در جریان ماندگار با استفاده از چهار فشارسنج دیجیتالی مدل RADAN M۳۱۸ به دقت ۰/۰۱ بار اندازه‌گیری شد. از دستگاه دیتالاگر مدل RADAN ۱۰۳۷ با قابلیت حداکثر ۱۶ برداشت در ثانیه برای ثبت فشارهای ضربه قوچ استفاده شد. فشارسنج‌ها برای شرایط فشارهای استاتیکی مشخص، بررسی شده‌اند.

جدول ۱ مقایسه فشار قابل تحمل لوله‌ها و فشارهای ماندگار وارد شده به خط انتقال

فشارسنج	موقعیت	نوع لوله	قطر لوله (mm)	فشار نامی لوله (bar)	حداکثر فشار وارد شده در یک هفته (bar)	حداقل فشار وارد شده در یک هفته (bar)	متوسط فشارها در یک هفته (bar)
شماره ۱	ایستگاه بیمرغ	فولادی (St)	۵۰۰	۳۲	۱۵/۲۷	۱۲/۰۴	۱۳/۶۵
شماره ۲	۱۸۶۱ متری بیمرغ	چدن نشکن (D.I)	۵۰۰	۲۵	۱۴/۸۷	۱۱/۷۳	۱۳/۳۴
شماره ۳	۱۲۰۵۳ متری بیمرغ	سیمان آریست (A.C)	۵۰۰	۹	۵/۰۱	۳/۹۵	۳/۴۶

۵- کنترل فشارهای گذرا

۵-۱- مبانی نظری و حل عددی مسأله ضربه قوچ

در سیستم های تحت فشار، روابط مومتم و پیوستگی به شرح ذیل بر حسب خصوصیات جریان استخراج می‌شوند (Larock et al., ۲۰۰۰).

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (3)$$

V سرعت سیال (متر بر ثانیه)، P فشار (نیوتن بر متر مربع)، ρ چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) و a سرعت موج در لوله (متر بر ثانیه) است. سرعت موج در لوله تابع سیال و همچنین جنس، قطر و ضخامت لوله است و معمولاً بین ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه تخمین زده میشود (Ghidaoui et al., ۲۰۰۵).

معادلات (۲) و (۳) حل تحلیلی ندارند و در حالت کلی با روش‌های عددی حل می‌شوند. یکی از روش‌های معتبر و با سابقه در حل این معادلات، روش مشخصهها^۱ است (Stephenson, ۱۹۹۷). مقایسه جواب‌های حاصل از روش‌های مختلف حل عددی مسأله ضربه قوچ با نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که روش مشخصه‌ها نتایج بسیار دقیقی دارد و برای کارهای عملی مناسب است (Hyuk and Jiin-jen, ۲۰۰۸).

نرم‌افزار Haestad Hammer به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای محاسبه ضربه قوچ در سیستم‌های آبرسانی، از روش مشخصه‌ها برای حل معادلات استفاده می‌کند. این نرم‌افزار علاوه بر دقت بالای محاسباتی، توانایی شبیه‌سازی گستره وسیعی از تجهیزات سیستم انتقال از جمله انواع شیرآلات به ویژه شیرهای هوا، مخازن و انواع تجهیزات حفاظتی ضربه قوچ را دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار Hammer برای مدل‌سازی جریانهای گذرای ناشی از ضربه قوچ استفاده شده است.

در تحقیق حاضر، ضریب زبری، با توجه به طول عمر و شرایط حاکم بر خط لوله، به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل سازی، با آزمایش‌های میدانی تعیین شد. بدین منظور بخش‌هایی از خط انتقال شامل لوله‌های چدن نشکن و آزیست با جنس و قطر ثابت انتخاب و اختلاف فشار در دو طرف لوله برای دبی‌های مختلف توسط فشارسنج دیجیتالی اندازه‌گیری شد. پس از کم کردن اختلاف تراز دو نقطه و افت های جزئی، مقدار افت هد اصطکاکی از رابطه برنولی تخمین زده شد. در هر آزمایش با قرار دادن مشخصات قطر D و طول L لوله (متر)، دبی Q (متر مکعب بر ثانیه) و افت هد اصطکاکی h_f (متر)، ضریب زبری هیزن ویلیامز C_{HW} محاسبه می‌شود (Larock et al., ۲۰۰۰).

$$C_{HW} = \left(\frac{10.68 L Q}{h_f D^{4.87}} \right)^{\frac{1}{1.852}} \quad (1)$$

در نتیجه متوسط ضریب زبری برای لوله‌های سیمان آزیست و چدن نشکن به ترتیب برابر ۱۲۳ و ۹۱ به‌دست آمد. علت زبری بیشتر لوله‌ها نسبت به مقادیر استاندارد را می‌توان عمر زیاد لوله‌ها و فرسودگی دانست.

مدل‌سازی جریان ماندگار به کمک نرم‌افزار WaterGEMS انجام شد. در این مدل، ارتفاع آب در مخزن ایستگاه بیمرغ و نحوه ورود آب به مخزن خیبری در نظر گرفته شد. در جدول ۲ نتایج فشارهای نسبی حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل سازی در موقعیت نقاط جدول ۱ با در مدار بودن دو پمپ درج شده است. در صورت تخمین خوب ضریب هیزن ویلیامز، در حد یک درصد خطا وجود دارد.

جدول ۲ فشارهای نسبی محاسباتی و اندازه گیری شده در

نقاط مختلف خط انتقال با دو پمپ در مدار

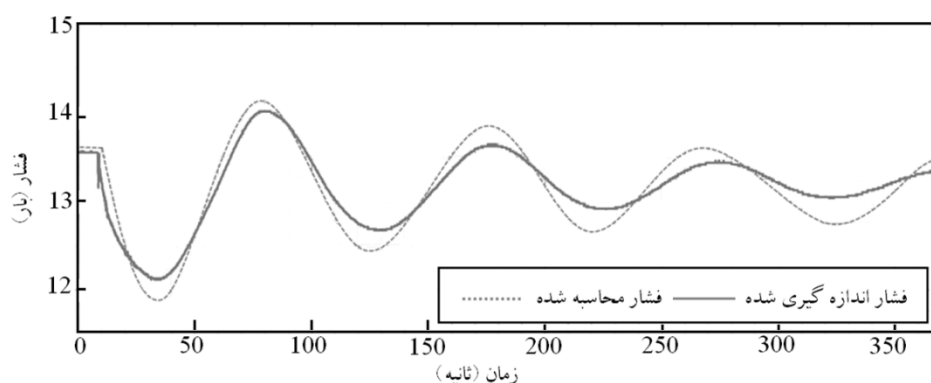
فشار سنج	فشار ثبت شده P_{meas} با دیتالاگر (bar)	فشار برآورد شده از مدل‌سازی P (bar)	درصد خطا = $\frac{P_{meas} - P}{P_{meas}} \times 100$
شماره ۱	۱۴/۶۶	۱۴/۸۱	۱/۰۲
شماره ۲	۱۴/۳۸	۱۴/۵۹	۱/۴۶
شماره ۳	۴/۶۰	۴/۶۴	۰/۸۷

۱. Method of Characteristics

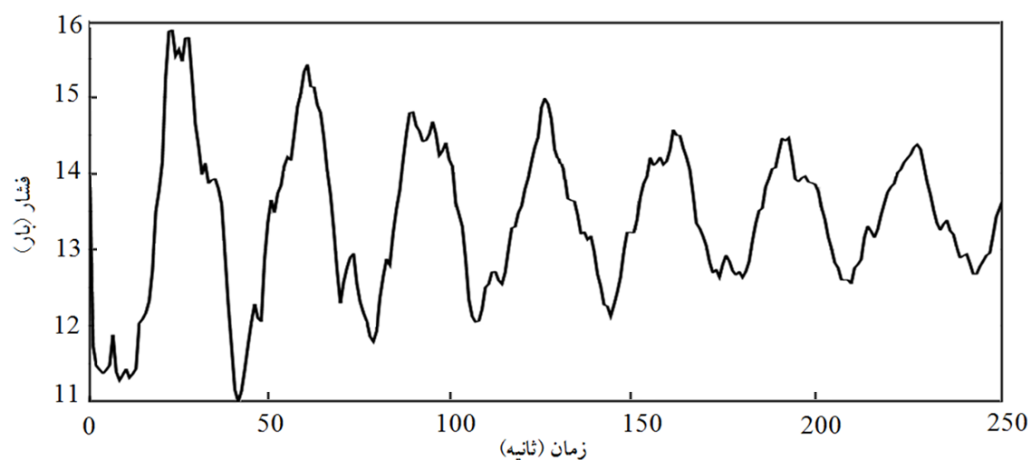
۵-۲- اندازه گیری های میدانی و نتایج عددی

به منظور بررسی عملکرد ابزار کنترل ضربه قوچ، با خاموش کردن ناگهانی یک پمپ در ایستگاه، فشارهای تولید شده در بازه های زمانی ۰/۰۶۲۵ ثانیه به وسیله دیتالاگر اندازه گیری و ثبت شد. پس از وارد کردن اطلاعات مدل جریان ماندگار به نرم افزار Hammer و تعریف مشخصات مخازن ضربه گیر تحت فشار، تانک ضربه گیر یک طرفه، اتصالات مخازن به لوله انتقال و دستور خاموش شدن پمپ، مدل جریان غیر ماندگار تهیه شد. در شکل ۳ نتایج مدل رایانه ای ضربه قوچ در حالت خاموش شدن ناگهانی پمپ در مقایسه با نتایج اندازه گیری در ایستگاه نشان داده شده است. تطابق منحنی های محاسباتی و اندازه گیری و شکل سینوسی، منظم و میرای

منحنی فشار، عملکرد مناسب مخازن ضربه گیر تحت فشار را نشان می دهد. در صورت در مدار نبودن یا عمل نکردن این مخازن، منحنی هد فشار ناشی از خاموش شدن پمپ، در محل ایستگاه بسیار نامنظم می شود (شکل ۴). مطالعات عددی نشان داد که در صورت خاموش شدن همزمان دو یا سه پمپ، مخازن ضربه گیر به خوبی فشارهای ضربه قوچ را مهار می کنند. در شکل ۵ حداکثر و حداقل فشارهای ناشی از خاموش شدن همزمان سه پمپ (حداکثر ظرفیت بهره برداری) در طول خط انتقال ترسیم شده است. نوع لوله در هر قسمت و فشار نامی آن مطابق جدول ۱ در شکل آورده شده است. فشارهای کمینه و بیشینه در محدوده مجاز هستند.



شکل ۳ فشارهای گذرای نسبی محاسباتی و اندازه گیری شده ناشی از خاموش شدن ناگهانی پمپ



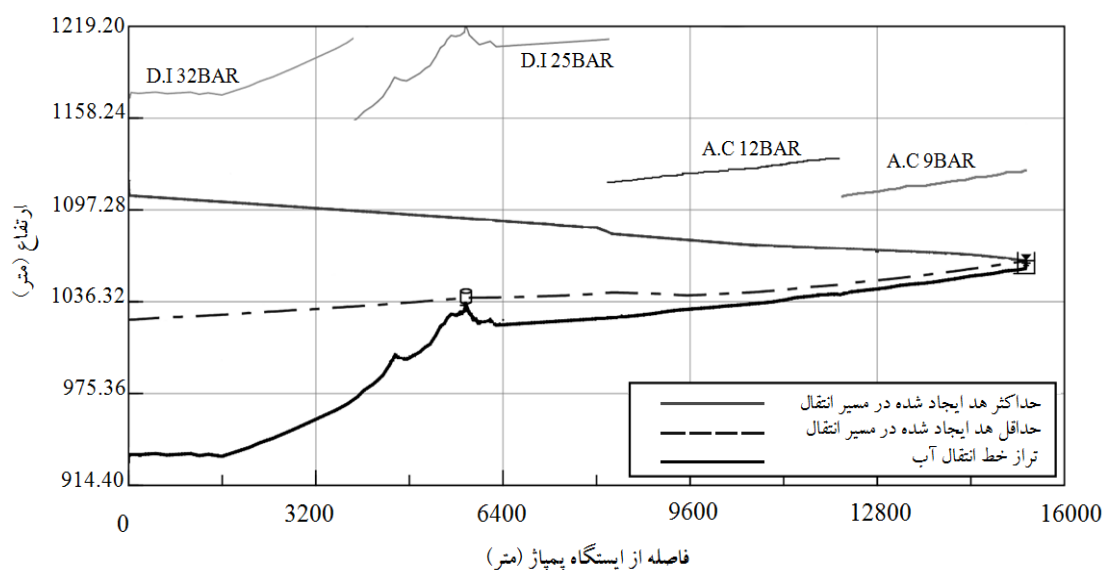
شکل ۴ منحنی فشار گذرای نسبی - زمان محاسباتی ناشی از خاموش شدن پمپ بدون عملکرد ابزار کنترل ضربه قوچ

در شکل ۶ بیشینه و کمینه هد ناشی از خاموش شدن همزمان دو پمپ (حداکثر بهره‌برداری فعلی) بدون عملکرد تاسیسات کنترل ضربه قوچ ترسیم شده است. در این حالت، فشارهای مثبت در بعضی نقاط لوله آزیست از حد مجاز تجاوز میکند و فشارهای منفی شدید، بخش وسیعی از خط انتقال را در بر می‌گیرد. این فشارها در شکل با ناحیه خاکستری رنگ مشخص شده است. بنابراین در صورت عمل نکردن سیستم‌های کنترل کننده ضربه قوچ، تاسیسات انتقال آب توانایی تحمل فشارهای مثبت و منفی ایجاد شده را ندارند.

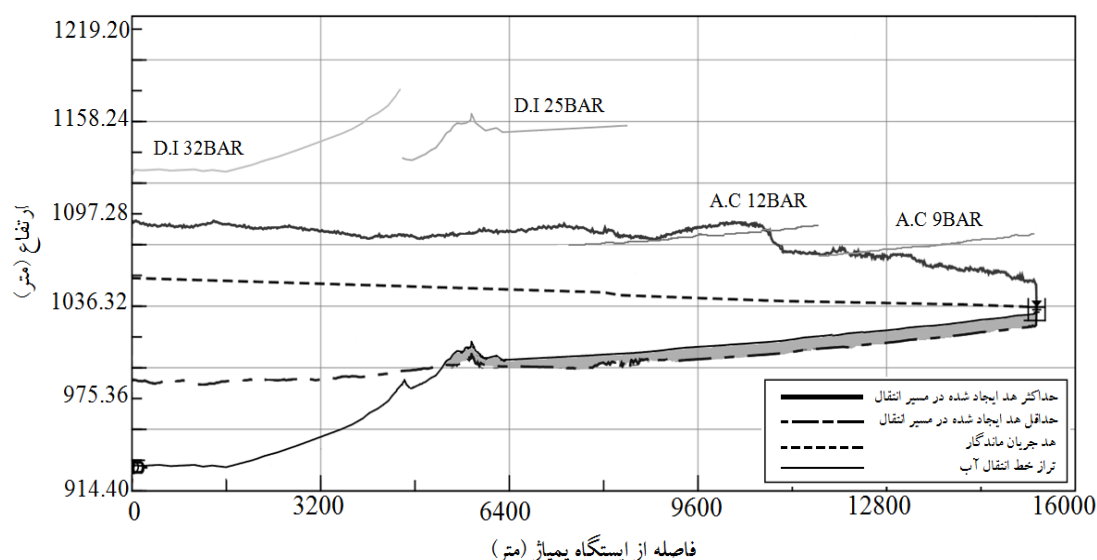
۵-۳- اثر شیرهای هوا

هنگامی که هد فشاری آب پایین‌تر از پروفیل خط لوله قرار گیرد، شیرهای هوا اجازه ورود هوا به لوله را می‌دهند و در زمان نزدیک شدن ستون‌های جدا شده آب به یکدیگر، هوا را خارج می‌کنند. پس از خروج هوا و افزایش فشار، شیر بسته می‌شود. این شیرها به‌طور خودکار با بالا و پایین رفتن شناور عمل می‌کنند (Pozos Estrada, ۲۰۰۷). در حال حاضر شیرهای هوای مورد استفاده در بیشتر خطوط انتقال آب ایران از نوع ترکیبی

(عملکرد سه‌گانه) هستند. در این شیرها، ورود هوا همواره از روزنه‌ای با قطر ثابت انجام می‌شود، اما خروج هوا نخست از طریق روزنه بزرگتر صورت گرفته و درست قبل از آن که کل هوای محبوس خارج شود، روزنه خروجی بزرگ بسته شده و هوا فقط از روزنه‌ای کوچک خارج می‌شود. هوای باقی‌مانده که با سرعت بسیار کمتری خارج می‌شود در زمان برخورد ستون‌های آب به همدیگر، نقش بالشتک مستهلک کننده فشار را بازی می‌کند. چنانچه در سیستم‌های انتقال آب، ترکیبی از شیرهای هوا و سایر ابزار حفاظتی مانند مخزن‌های تحت فشار و مخزن‌های ضربه‌گیر استفاده شود، اندازه و هزینه‌های ابزار کاهش می‌یابد (Zloczower, ۲۰۰۹). شیرهای هوای مورد استفاده در خط انتقال گیسور- گناباد عملکرد سه‌گانه دارند. قطر روزنه بزرگ این شیرها برابر ۴۹/۵ میلی‌متر و قطر روزنه کوچک آنها برابر ۱/۵۶ میلی‌متر است. با نصب شیرهای هوا در محل مناسب، انرژی صرفه‌جویی و بهره‌برداری از خط انتقال مطمئن می‌شود. نصب این شیرها در محل‌های نامناسب، مشکلات و خطرهایی را برای خط لوله و پمپ‌ها به‌وجود می‌آورد (Stephenson, ۱۹۹۷).



شکل ۵ منحنی کمینه و بیشینه هد ناشی از خاموش شدن سه پمپ در طول خط انتقال با عملکرد ابزار کنترل ضربه قوچ



شکل ۶ منحنی کمینه و بیشینه هد ناشی از خاموش شدن دو پمپ بدون عملکرد ابزار کنترل ضربه قوچ

۷- علت‌های احتمالی شکست

۷-۱- انواع شکست

شکست لوله‌های آب به چهار شکل دیده می‌شود (Rajani and Zhan, ۱۹۹۶).

الف) شکست حلقوی (محیطی): به علت تنش‌های کششی محوری بزرگ اتفاق می‌افتد. این تنش‌ها به علل مختلفی مانند انقباض و انبساط لوله، تغییر حجم بستر، یخ زدگی خاک و افزایش بار عمودی به وجود می‌آیند.

ب) شکست طولی: به علت وارد شدن تنش‌های محیطی به دیوار داخلی لوله یا بروز خمیدگی در سطح آن ایجاد می‌شود (Morris, ۱۹۶۷). در میان عوامل بروز تنش‌های محیطی می‌توان به فشارهای گذرا (ضربه قوچ) و افزایش حجم ناشی از یخ زدن آب در داخل لوله اشاره کرد.

فشارهای مثبت و منفی طولی ممکن است باعث آسیب دیدن لوله، به ویژه در نقاط ضعیف‌تر شود. شکل ۸

شکست طولی خط انتقال گیسور-گناباد را قبل از نصب ابزار کنترل ضربه قوچ در مدار نشان می‌دهد.

ج) شکست در محل اتصالات: به علت ضعف اتصالات یا عدم دقت در کارگذاری لوله به وجود می‌آید.

د) شکست ناشی از خوردگی: در نقاط پوسیده شده اتفاق می‌افتد.

به منظور بررسی اثر اندازه شیرهای هوا بر کاهش

فشارهای گذرا، مشخصات شیر هوای موجود در خط

انتقال (DN ۱۰۰ با قطر روزنه بزرگ برابر ۴۹/۵ میلی‌متر)

و شیر هوای بزرگتر (DN ۱۵۰ با قطر روزنه بزرگ برابر

۸۰ میلی‌متر) و کوچکتر (با قطر روزنه بزرگ برابر ۲۵

میلی‌متر) مطابق راهنمای شرکت تولید کننده، به نرم‌افزار

Hammer وارد شد. در تمامی حالت‌ها قطر روزنه کوچک

ثابت و برابر ۱/۵۶ میلی‌متر بود. در شکل ۷ فشارهای

گذرا برای سه نوع شیر هوا ترسیم شده است. شیر بزرگتر

(DN ۱۵۰) تأثیر چندانی بر کاهش فشارهای گذرا ندارد

اما شیر کوچکتر، بیشینه فشار وارد شده به خط انتقال را

افزایش می‌دهد. بنابراین شیرهای فعلی خط انتقال مناسب

هستند.

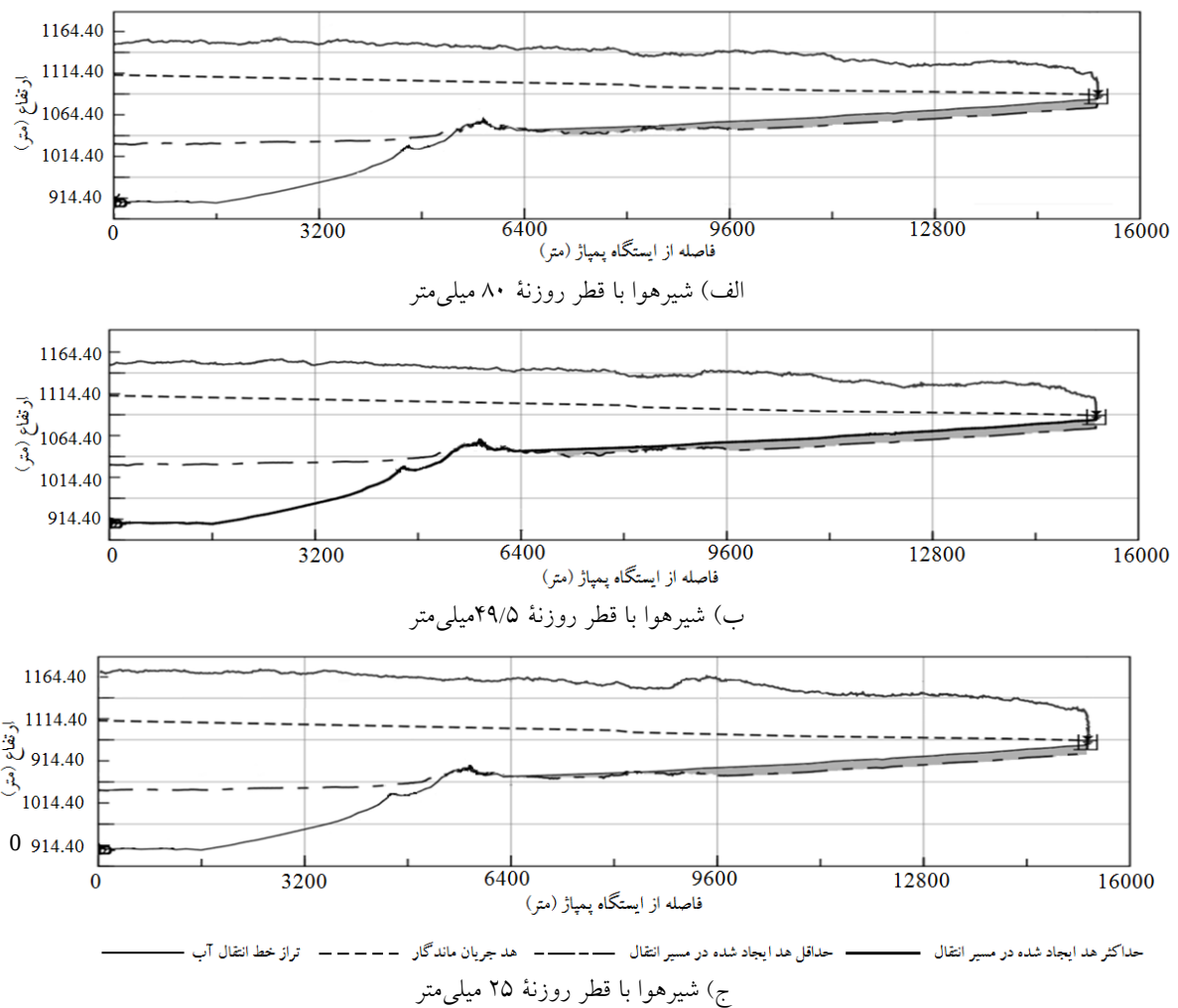
۶- اثر کیفیت آب بر لوله‌ها

برای مطالعه اثر خوردندگی یا رسوب‌گذاری آب بر لوله‌ها،

نتایج آزمایش‌های کنترل کیفی آب با استفاده از

شاخص‌های لانژلیه و رایزنر بررسی شد و نتایج نشان داد

که آب خوردندگی ندارد و رسوب‌گذار نیز نیست.



شکل ۷ تأثیر اندازه شیرهای هوا بر کاهش فشارهای گذرا

۷-۲- مشخصات لوله‌های حادثه دیده

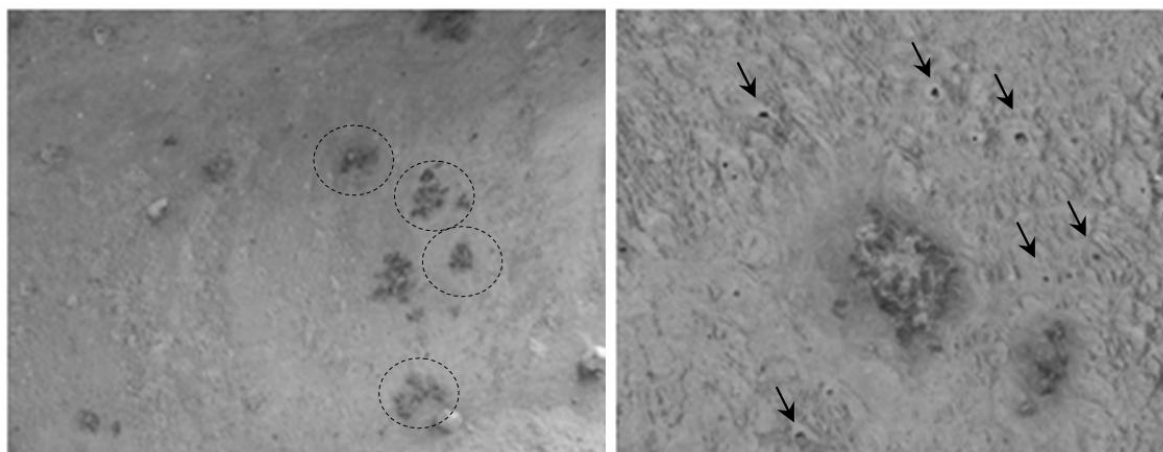
حادثه‌های خط انتقال آب گیسور-گناباد در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ در محل‌های مشخص شده در شکل ۲ در مناطقی روی داده که جنس لوله معمولاً از چدن نشکن بوده است. مطابق جدول ۱ فشارهای ماندگار در خط لوله با استاندارد معمول، بسیار کمتر از فشار کاری موجود در آن است. بررسی عملکرد ابزار کنترل ضربه قوچ نیز نشان داد که این ابزار قابلیت مهار فشارهای گذرا را در محدوده فشار کاری خط لوله دارند (شکل ۵). اما در بازدید لوله‌های حادثه دیده، زنگ‌زدگی شدید در سطوح خارجی و پوسیدگی‌های موضعی در داخل لوله مشاهده شد



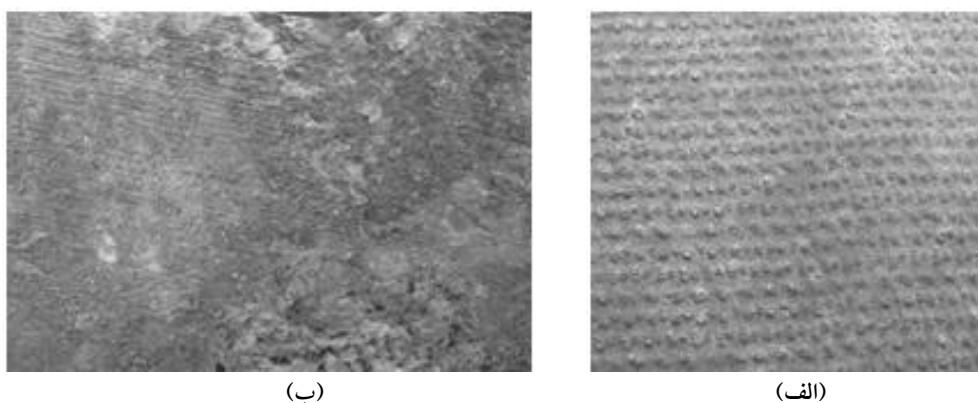
شکل ۸ شکست طولی لوله خط انتقال گیسور-گناباد ناشی از فشارهای گذرای مثبت و منفی

پوشش قیری اطراف آن کافی به نظر نمی‌رسد. بر اساس تحقیقات انجام شده، لوله‌های خریداری شده، احتمالاً از مواد بازیافتی با کیفیت نامناسب تهیه شده است. به‌منظور تخمین مقدار کاهش مقاومت لوله طول و حداکثر عمق خوردگی مطابق شکل ۱۲ بر اساس استاندارد ۲۰۰۹-ASME-B3۱ برای نمونه‌ای از لوله‌های حادثه دیده اندازه‌گیری شد و به ترتیب $L_c=305 \text{ mm}$ و $d_c=6.5 \text{ mm}$ به دست آمد. بیشینه فشار کاری خط لوله در محل بروز شکستگی برای جریان ماندگار برابر $14/87$ بار (جدول ۱) و در صورت خاموش شدن ناگهانی سه پمپ و عملکردن ابزار کنترل ضربه قوچ برابر $18/64$ بار (شکل ۵) است.

(شکل ۹). زنگ‌زدگی لوله‌های چدن نشکن، مقاومت مکانیکی آنها را در برابر فشارهای داخلی کم می‌کند (Makar, ۲۰۰۲). به‌علاوه نازک شدن دیوار و توسعه حفره‌های ریز و پراکنده در سطح لوله، از عوامل اساسی کاهش عمر به حساب می‌آیند (Yilmaz et al., ۲۰۱۰). در شکل ۱۰ لوله چدن نشکن مرغوب با نمونه زنگ زده موجود مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۱ بعضی لوله‌ها در محل بروز شکستگی نازک شده بودند. در هیچ یک از لوله‌های حادثه دیده، شکست طولی مشاهده نشد. متأسفانه در زمان لوله‌گذاری، آزمایش‌های مشخص کننده خوردگی خاک انجام نشده بود. بر اساس نظر کارشناسان جنس خاک در محل‌های حادثه مشکوک به خوردگی بالا است. به‌علاوه حفاظت لوله ضعیف بوده و ضخامت



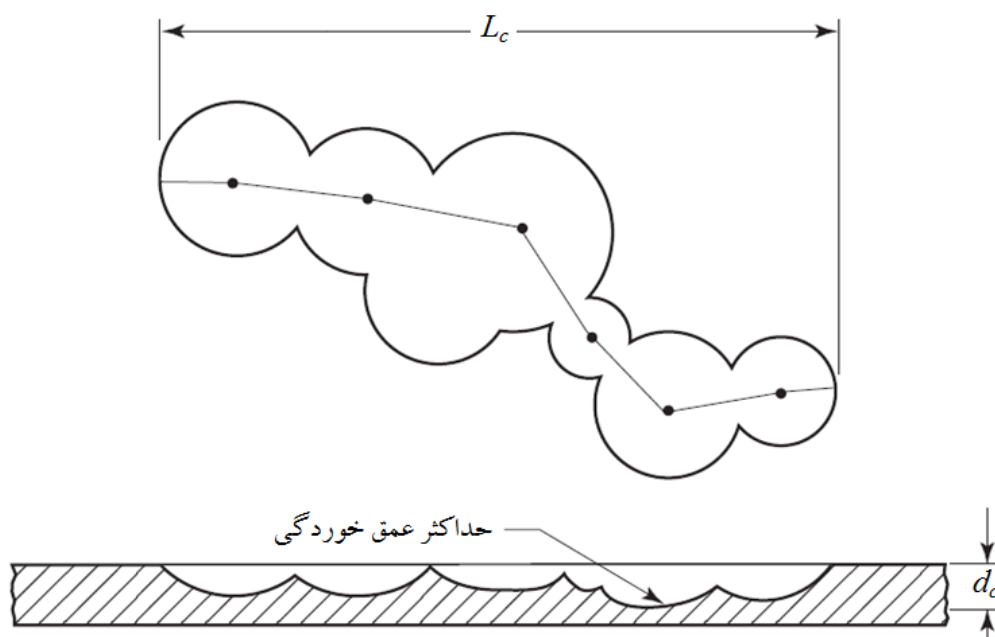
شکل ۹ زنگ‌زدگی موضعی در دیوار داخلی لوله و حفره‌های ریز در اطراف نقاط زنگ‌زدگی



شکل ۱۰ (الف) لوله چدنی با کیفیت مناسب، (ب) نمونه‌ای از لوله‌های موجود در خط انتقال



شکل ۱۱ زنگ‌زدگی شدید سطح خارجی لوله در محل بروز حادثه



شکل ۱۲ اندازه‌گیری طول (\$L_c\$) و بیشینه عمق خوردگی (\$d_c\$) لوله‌ها مطابق استاندارد (ASME-B31-2009)

۷-۳- طول مجاز خوردگی و تنش گسیختگی

در استاندارد ASME-B31-2009 چهار رده ارزیابی شکست لوله‌ها، بسته به کمیت یا کیفیت داده‌های موجود، پیشنهاد میشود (ASME, 2009). در تحقیق حاضر با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده از دو رده می‌توان استفاده کرد.

الف- رده ارزیابی صفر: در این رده طول خوردگی مجاز \$L_a\$ با داشتن بیشینه عمق خوردگی اندازه‌گیری شده، محاسبه میشود (ASME, 2009).

$$L_a = 1.12B\sqrt{D_o t} \quad (4)$$

\$D_o\$ قطر اسمی خارجی لوله و \$t\$ ضخامت دیواره است. ضریب \$B\$ از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

ضربه قوچ، کیفیت آب از نظر خوردگی و نوع شکستگی لوله‌ها مطالعه شد. نقاط حساس پروژه مشخص و سیستم انتقال آب در حالت ماندگار با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS مدل‌سازی شد. ضریب زبری هیزن-ویلیامز در مقایسه با آزمایش‌های میدانی به‌دست آمد. زبری ناشی از عمر و همچنین فرسودگی لوله‌ها بیشتر از مقادیر توصیه شده بود.

با ایجاد ضربه قوچ و در مقایسه فشارهای حاصل از اندازه‌گیری محلی با نتایج مدل عددی جریان ناماندگار حاصل از نرم‌افزار Hammer رضایت‌بخش بود. مطالعات عددی نشان داد که با خاموش شدن همزمان دو یا سه پمپ، مخازن ضربه‌گیر به‌خوبی فشارهای ضربه قوچ را مهار می‌کنند، اما در صورت عمل نکردن سیستم‌های ضربه‌گیر، لوله‌ها توانایی تحمل فشارهای مثبت و منفی ایجاد شده را ندارند. شیرهای هوای موجود تأثیر نسبتاً کمی در کاهش فشار دارند. آزمایش‌های کنترل کیفیت آب نشان داد که آب خوردگی ندارد و رسوب‌گذار نیست. اما با توجه به زنگ‌زدگی و نوع شکست لوله‌ها مشخص شد که خوردگی خاک و کیفیت پایین لوله‌های به‌کار رفته و حفاظت ناکافی مهم‌ترین علت بروز حادثه در این خط انتقال است. طول خوردگی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ای از لوله‌های حادثه دیده در حدود ۱۰ برابر و تنش حلقوی ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر مجاز مطابق استاندارد ASME-۲۰۰۹ به‌دست آمد.

۹- تقدیر و تشکر

مؤلفان از شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی و نیز دانشگاه فردوسی مشهد به سبب پشتیبانی‌های مالی و فنی در انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌کنند.

۱۰- فهرست علائم

a	سرعت موج ضربه در لوله (m/s)
D	قطر داخلی لوله (m)

$$B = \sqrt{\left(\frac{d_c/t}{1.1d_c/t - 0.15}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

با توجه به بیشینه عمق خوردگی اندازه‌گیری شده $d_c = 6.5 \text{ mm}$ طول مجاز خوردگی برای خط لوله چدن داکتیل با $D_o = 516 \text{ mm}$ و $t = 8 \text{ mm}$ برابر $31/6$ میلی‌متر به دست می‌آید. طول خوردگی اندازه‌گیری شده $L_c = 30.5 \text{ mm}$ در حدود ده برابر بیشتر از حد مجاز است. ب- رده ارزیابی یک: در این رده، مقاومت گسیختگی لوله زنگ زده تخمین زده می‌شود. در ابتدا تنش سیلان S_{flow} ده درصد بیشتر از کمینه تنش تسلیم SMYS فرض می‌شود (ASME, ۲۰۰۹):

$$S_{flow} = 1.1 \times SMYS \quad (6)$$

سپس پارامتر Z محاسبه می‌شود (ASME, ۲۰۰۹):

$$Z = \frac{D_o^2}{L_c t} \quad (7)$$

و برای $Z > 20$ تنش گسیختگی لوله S_F به‌دست می‌آید (ASME, ۲۰۰۹):

$$S_F = S_{flow} (1 - d_c/t) \quad (8)$$

سپس تنش حلقوی S_o در بیشینه فشار کاری P محاسبه می‌شود (ASME, ۲۰۰۹):

$$S_o = PD_o/2t \quad (9)$$

برای ضریب اطمینان مشخص S_F باید $S_F > S_o$ باشد تا خوردگی قابل قبول باشد.

در خط لوله گیسور-گناباد در فشار گذرای

$$P = 18.64 \text{ bar (} 1.864 \text{ MPa)}$$

به‌دست می‌آید. با احتساب تنش تسلیم $S_o = 60 \text{ MPa}$

$SMYS = 42000 \text{ psi (} 290 \text{ MPa)}$ برای چدن داکتیل، تنش

گسیختگی لوله برابر $S_F = 60 \text{ MPa}$ بوده و چنانچه ضریب

اطمینان حداقل $S_F = 1.25$ فرض شود، تنش حلقوی ۲۵

درصد بیشتر از حد مجاز آن است.

۸- نتیجه‌گیری

عوامل احتمالی ایجاد حادثه‌ها در خط انتقال گیسور-گناباد مانند فشارهای جریان دائمی و گذرا، عملکرد ابزار کنترل

ASME. (۲۰۰۹). Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines, ASME B3۱G-۲۰۰۹, Supplement to ASME B3۱ Code for Pressure Piping.

Ghidaoui M., Zhao M., McInnis D. A. and Axworthy D. H. (۲۰۰۵). "A review of water hammer theory and practice", Applied Mechanics Reviews, ASME, ۵۸(۴۹), pp. ۴۹-۷۶.

Hyuk J. K. and Jiin-Jen L. (۲۰۰۸). "Computer and experimental models of transient flow in pipe involving backflow preventers", J. of Hydraulic Eng., ۱۳۴(۴), pp. ۴۲۶-۴۳۴.

Larock B., Jeppson W. and Watters G. (۲۰۰۰). Hydraulics of pipeline systems, CRC Press.

Larry W. M. (۲۰۰۰). Water distribution system handbook. McGraw-Hill Press, USA.

Makar J. M. (۲۰۰۲). "Investigating large gray cast-iron pipe failures: a step by step approach", NRC Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, pp. ۱۲۶-۱۳۹.

Morris, R. E. (۱۹۶۷). "Principal causes and remedies of water main breaks". J. Am. Water Works Assoc., ۵۹(۷), pp ۷۸۲-۷۹۲.

Pozos Estrada O. (۲۰۰۷). "Investigation on the effects of entrained air in pipelines", PhD Thesis, Institute of Hydraulic Eng., University of Stuttgart.

Rajani B. and Zhan C. (۱۹۹۶). "Pipe-soil interaction analysis of jointed water mains", Can. Geotech. J., ۳۳(۳), pp. ۳۹۳-۴۰۴.

Stephenson D. (۱۹۸۹). Pipeline design for water engineers, Elsevier Science Publishers, The Netherlands.

Stephenson D. (۱۹۹۷). "Effect of air valves and pipework on water hammer pressures", J. Transportation Eng., ۱۲۳(۲), pp. ۱۰۱-۱۰۶.

Yilmaz F., Cevher O. and Bayraktar M. (۲۰۱۰). "Ductile iron pipe surface characterization and pinhole formation", ۵th Ankiros Foundry congress, Turkey.

D_o	قطر خارجی لوله (mm)
d_c	حداکثر عمق خوردگی (mm)
L	طول لوله (m)
L_a	طول مجاز خوردگی (mm)
L_c	طول اندازه‌گیری خوردگی (mm)
C_{HW}	ضریب زبری هیزن ویلیامز
h_f	افت هد اصطکاکی (m)
P	فشار کاری سیال (Pa)
Q	دبی (m^3/s)
V	سرعت سیال (m/s)
S_o	تنش حلقوی (MPa)
S_F	تنش گسختگی (MPa)
S_{flow}	تنش جریان (MPa)
$SMYS$	کمینه تنش تسلیم (MPa)
t	ضخامت لوله (mm)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)

۱۱- منابع

گزارش عملکردی برنامه وزارت نیرو در بخش آب و فاضلاب طی سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷، (۱۳۸۸). دفتر برنامه ریزی تلفیقی و راهبردی.

گزارش واحد بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، (۱۳۸۸). آرشیو اسناد شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی.

نقشه‌های چون ساخت خط انتقال آب گیسور-گناباد، (۱۳۸۱). آرشیو اسناد شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی.

Zloczower N. (۲۰۰۹). "Control of transient induced contaminant leakage and infiltration by implementation of air valves", A.R.I. Flow Control Accessories, pp. ۱۶۴-۱۹۲.