

#### Technical Note

#### مقاله ترویجی (یادداشت فنی)

### Study of the Ventilation Effect to Reducing the Corrosion of the Main Concrete Sewer Collector line in the Vicinity of Dropshaft Manhole

### بررسی تأثیر تهویه آدمروی ریزشی در کاهش خوردگی خط انتقال فاضلاب اصلی بتنی

Mahdi Godarzi Matin<sup>1</sup>, Alireza Roodbarani<sup>2\*</sup>, Saeid Sarabadani<sup>3</sup> and Mehran Mamghaninejad<sup>4</sup>

مهدی گودرزی متین<sup>۱</sup>، علیرضا رودبارانی<sup>۲\*</sup>، سعید سرآبادانی<sup>۳</sup> و  
مهران مامقانی نژاد<sup>۴</sup>

1- B.Sc. in Water Transferring Engineering, Head of Arak Sewer Network Operation Office, Markazi Water and Waste Water Company, Arak, Iran.

۱- کارشناسی مهندسی انتقال آب، رئیس اداره بهره‌برداری شبکه و خطوط انتقال فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، اراک.

2- B.Sc. in Mechanic Engineering, Sewer Network CCTV Inspection Expert, Markazi Water and Waste Water Company, Arak, Iran.

۲- کارشناسی مهندسی مکانیک، کارشناس بهره‌برداری شبکه فاضلاب و ویدئومتری، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، اراک، ایران.

3- Ph.D. Student in Civil Engineering, Manager of Arak Water and Waste Water Office, Markazi Water and Waste Water Company, Arak, Iran.

۳- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، مدیر امور آب و فاضلاب اراک، اراک، ایران.

4- M.Sc. in Management, Head of Management Developing and Research Office, Markazi Water and Waste Water Company, Arak, Iran.

۴- کارشناسی ارشد مدیریت، معاون منابع انسانی و تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، اراک، ایران.

\*Corresponding Author Email: [Alirezaroodbarani@yahoo.com](mailto:Alirezaroodbarani@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول، ایمیل: [Alirezaroodbarani@yahoo.com](mailto:Alirezaroodbarani@yahoo.com)

Received: 08/04/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

Revised: 06/01/2021

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

Accepted: 09/01/2021

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

#### Abstract

#### چکیده

Corrosion is one of the major problems in utilizing sewage networks. In some points of wastewater networks, such as drop shafts, the corrosion intensity due to hydrogen sulfide gas accumulation is significant. In Arak main concrete wastewater collector line which transfers waste water from city to wastewater treatment plant the corrosion conditions of sewage pipe in the vicinity of the dropshaft were investigated with the help of sewer CCTV inspections. The occurrence of severe corrosion defects was monitored then intensity of hydrogen sulfide gas was measured. For reduce the intensity of hydrogen sulfide gas and the moisture content of the pipe atmosphere, stack ventilation and circulation pipes, were constructed then the values of hydrogen sulfide gas were again measured. Maximum and minimum values of hydrogen sulfide were reduced 11.9 and 9.09 percent, respectively. The tensile strength test was performed on the last tie rod of ladder stairs. The yield stress of the last stair of ladder in dropshaft manhole was lower than the value of upstream and downstream manholes, that it indicates corrosion in dropshaft manhole was more severe. Due to the observation of the presence of hydrogen sulfide gas in the manholes and in order to investigate the effect of this gas on the metal of the manholes ladder, the tensile strength test of the last step of the manholes ladder and its upstream and downstream manholes was performed. Comparison of yield stress values showed the accumulation of hydrogen sulfide gas and the occurrence of Hydrogen Embrittlement in the ladder.

خوردگی یکی از مشکلات اصلی در بهره‌برداری از شبکه‌های فاضلاب است. در برخی نقاط از شبکه‌های فاضلاب مانند آدمروهای ریزشی شدت خوردگی در اثر تجمع گاز سولفید هیدروژن قابل توجه است. در فاضلاب‌رو اصلی بتنی شهر اراک که وظیفه آن انتقال فاضلاب شهر اراک به تصفیه‌خانه فاضلاب است شرایط خوردگی لوله فاضلاب‌رو در مجاورت آدمرو ریزشی خط انتقال فاضلاب صنایع با کمک یافته‌های بازرسی داخلی تلویزیونی لوله بررسی شد. با توجه به مشاهده عیوب شدید خوردگی در آن، شدت گاز سولفید هیدروژن موردسنجش قرار گرفت. به‌منظور کاهش شدت گاز سولفید هیدروژن و رطوبت تاج لوله، لوله هواکش عمودی و لوله‌های تهویه اجرا و دوباره مقادیر گاز سولفید هیدروژن اندازه‌گیری شد. مقادیر بیشینه و کمینه بعد از اجرای لوله هواکش عمودی و لوله‌های تهویه به‌ترتیب هرکدام به‌مقدار ۱۱/۹ و ۹/۰۹ درصد کاهش یافتند. با توجه به مشاهده وجود گاز سولفید هیدروژن در آدمروها و به‌منظور بررسی اثر این گاز بر روی فلز نردبان آدمروها، آزمایش استحکام کششی آخرین پله نردبان آدمرو ریزشی و آدمروهای بالادست و پایین‌دست آن انجام شد. مقایسه مقادیر تنش تسلیم نشان‌دهنده تجمع گاز سولفید هیدروژن و وقوع پدیده تردی هیدروژنی در پله نردبان آدمروها بود.

**Keywords:** Concrete Pipes Corrosion, Dropshaft Manhole, H<sub>2</sub>S, Camera Raft Robot, Tensile Strength, Hydrogen Embrittlement.

**واژه‌های کلیدی:** خوردگی لوله‌های بتنی، آدمرو ریزشی، سولفید هیدروژن، ربات بازرسی شناور، استحکام کششی، تردی هیدروژنی.

کانادا و آمریکا به منظور کاهش اثرات سولفید هیدروژن با استفاده از دمنده‌ها و به منظور تهویه اجباری شبکه<sup>۱</sup>، گازهای تهویه شده را به تأسیسات تصفیه هوا هدایت می‌کنند (Zhang et al., 2016). تهویه شبکه فاضلاب با جریان طبیعی هوا<sup>۱</sup> نیز با استفاده از لوله‌های هواکش<sup>۱</sup> عمودی متداول است. شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب با اولویت جمع‌آوری و انتقال فاضلاب طراحی شده‌اند ولی در طراحی آن‌ها به وضعیت و شرایط هوای در تماس با فاضلاب توجهی نشده است.

پژوهش‌هایی به منظور تمرکز بر روی شرایط جریان هوای در تماس با فاضلاب و تهویه طبیعی شبکه فاضلاب صورت گرفته است که در آن‌ها به پنج عامل زیر که در تهویه طبیعی فاضلاب مؤثرند اشاره شده است: ۱- تغییرات فشار بارومتریک در نقاط مختلف شبکه فاضلاب؛ ۲- اختلاف دانسیته هوای در تماس با اتمسفر فاضلاب و هوای بیرون (ناشی از تغییرات دما)؛ ۳- نیروی درگ اصطکاک هوای در تماس با فاضلاب و سطح جریان؛ ۴- تغییر ارتفاع سطح جریان فاضلاب و ۵- احتباس هوا به علت وزش باد به شاخه‌های عمودی هواکش و یا سوراخ‌های تهویه دریچه‌های آدمرو (Zhang et al., 2016).

این مقاله به بررسی و کنترل خوردگی خطوط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک می‌پردازد. این شبکه در سال ۱۳۷۵ به بهره‌برداری رسید. قطر این شبکه ۲۰۰۰ میلی‌متر و جنس آن بتن مسلح است. در سال ۱۳۹۶ حدود ۸ کیلومتر از این شبکه بازرسی ویدئومتری شد که در حین بازرسی، نقاطی با شدت خوردگی زیاد در اطراف آدمرو تقاطعی خط انتقال فاضلاب صنایع و خط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک مشاهده شد. سپس به منظور بررسی دقیق شرایط، با دستگاه آشکارساز مقادیر گاز سولفید هیدروژن اندازه‌گیری و ثبت شد. به منظور تهویه طبیعی، در آدمرو با خوردگی زیاد لوله‌های تهویه و هواکش عمودی نصب شد و دوباره مقادیر گاز سولفید هیدروژن موردسنجش قرار گرفت تا میزان تأثیرگذاری اجرای لوله‌های تهویه و هواکش بررسی شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

مسئله خوردگی فاضلاب‌روهای بتنی از اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی توجه کارشناسان و محققین صنعت آب و فاضلاب را در جهان به خود جلب کرد. پی‌بردن به نقش مهم سولفیدها در بروز پدیده خوردگی محققان را بر آن داشت تا با بهره‌جویی از مدل‌های ریاضی مقدار تولید سولفید در شبکه فاضلاب را پیش‌بینی و از سوی دیگر با استفاده از این مدل‌ها بتوانند شبکه‌های تازه تأسیس

امروزه مسئله خوردگی لوله‌های فاضلاب‌رو بتنی یکی از مشکلات اصلی پیش‌رو در بهره‌برداری از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است و سالانه هزینه‌های قابل‌توجهی صرف تعمیر و نگهداری از آن‌ها می‌شود (Parande et al., 2006). در گذشته بتن به‌عنوان ماده‌ای محکم و ارزان در ساخت لوله و سازه‌های تأسیسات فاضلاب کاربرد وسیعی داشت و خواصی از قبیل استحکام سازه‌های بتنی، افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از توسعه ترک‌ها موجب استفاده بیش‌تر بتن در شبکه‌های فاضلاب‌رو شد. تخریب لوله‌های بتنی فاضلاب به‌وسیله حمله بیولوژیکی اسیدسولفوریک در زمره رایج‌ترین سازوکارهای تخریب این‌گونه سازه‌ها است (Vollertsen et al., 2008). از آنجایی که بیش‌تر لوله‌های آسیب‌دیده در حال حاضر در مدار بهره‌برداری است و خارج کردن خطوط جمع‌آوری فاضلاب از مدار به‌منظور تعمیرات اساسی و قطع جریان تقریباً ناممکن است، بیش‌تر مطالعات به‌روز دنیا در مورد کنترل و به‌تعویق انداختن خوردگی است.

خوردگی بیولوژیک نتیجه‌ای از چرخه گوگرد است که در شبکه‌های فاضلاب‌رو رخ می‌دهد با تولید و انتشار گاز سولفید هیدروژن<sup>۱</sup> در محیط فاضلاب‌رو فرآیند خوردگی با واکنش اسیدسولفوریک و مواد سیمانی بتن رخ می‌دهد و نتیجه آن تخریب بتن و کاهش پایداری سازه‌ای آن است (Parande et al., 2006). برخی زیرساخت‌ها در شبکه فاضلاب مانند ایستگاه‌های پمپاژ فاضلاب<sup>۲</sup>، آدمروهای با جریان تقاطعی<sup>۳</sup> (آدمروهایی با ورود بیش از یک جریان)، آدمروهای با جریان ریزشی<sup>۴</sup> و سیفون معکوس<sup>۵</sup> به‌عنوان نقاط بحرانی<sup>۶</sup> شناسایی شده‌اند که در آن‌ها پتانسیل تولید گاز سولفید هیدروژن زیاد است. این نقاط از شبکه بیش‌ترین تأثیر بر روی فشار هوای موجود در اتمسفر فاضلاب‌رو را دارند و باعث حرکت هوا و تغییرات فشار اتمسفر فاضلاب‌رو می‌شوند (Zhang et al., 2016).

آدمروهای ریزشی به‌طور وسیعی در شبکه فاضلاب به‌منظور انتقال فاضلاب از یک سطح ارتفاعی بالاتر به یک سطح ارتفاعی پایین‌تر کاربرد دارند و به‌عنوان یک عامل اصلی در افزایش فشار اتمسفر فاضلاب‌رو شناخته شده‌اند (Sorensen et al., 2000). در زمان ریزش فاضلاب در آدمرو با افزایش سرعت قطرات کوچک<sup>۷</sup> فاضلاب، هوا در داخل اتمسفر فاضلاب‌رو محبوس شده و فشار هوای در تماس با فاضلاب افزایش می‌یابد. این افزایش فشار با متساعد شدن هرچه بیشتر گاز سولفید هیدروژن نیز همراه است که خوردگی قابل‌توجهی را به‌همراه دارد. در برخی کشورها مانند

قابل توجه است. به منظور بررسی این وضعیت با استفاده از روش مندرج در ضابطه شماره ۶۷۷ درجه این خطوط محاسبه شد که درجه سازه‌ای این دو مقطع ۳ به دست آمد. در ضابطه شماره ۶۷۷ به منظور محاسبه درجه فاضلاب‌رو (خط لوله بین دو آدمرو) به عیوب مشاهده شده امتیازی تخصیص داده می‌شود که بزرگی آن متناسب با شدت تأثیر منفی آن عیب در عملکرد و پایداری فاضلاب‌رو است. سپس سه شاخص بالاترین، مجموع و متوسط امتیازات محاسبه شده و مطابق معیارهای ارائه شده در ضابطه مذکور، خطوط به ۵ درجه به ترتیب شدت بحرانی بودن شرایط، از ۱ تا ۵ تقسیم‌بندی می‌شوند که خط درجه ۱ بهترین و خط درجه ۵ بدترین شرایط را دارند. تفسیر ارائه شده ضابطه مذکور درباره خط درجه ۳ بدین شرح است که فروریزش مقطع در آینده نزدیک غیرمتمثل است، اما احتمال افزایش خوردگی و بدتر شدن شرایط سازه‌ای وجود دارد (ضابطه شماره ۶۷۷).

پس از مشخص شدن گزارش اولیه بازرسی داخلی لوله، به منظور بررسی تحلیلی آسان‌تر مسئله، در دو مقطع مورد بررسی وضعیت عیوب مشاهده شده به صورت گرافیکی ترسیم شد. بدین منظور به هر عیبی که در فاصله‌ای بیش از یک متر در طول فاضلاب‌رو ادامه پیدا کرده و یا مرتباً تکرار شده باشد یک رنگ اختصاص یافت (شکل ۲). همان‌طور که در این شکل مشخص است در اطراف آدمرو شماره ۱۲ عیب S RC یعنی خوردگی تسلیحات بتن مشهود است و آدمرو شماره ۱۲ به‌عنوان کانون این عیب شناسایی شد.

جدول ۱- معرفی عیوب مشاهده شده در اثر خوردگی (ضابطه شماره ۶۷۷)

مقدار امتیاز (منفی)	توصیف	نام کامل	کد عیب
۵	حمله شیمیایی به بتن در محیط فاضلاب‌رو محصولاتی تولید می‌کند که اثرات آن بر روی جدار داخلی لوله باقی می‌ماند که مانند گرد سفیدرنگی ناشی از حمله $H_2S$ به بتن است.	محصول خوردگی <sup>۱۴</sup>	S CP
۲۰	در این عیب، سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه از سطح عمومی ماتریس بتن بیرون زده‌اند.	بیرون‌زدگی سنگ‌دانه‌ها <sup>۱۵</sup>	S AP
۱۲۰	در این عیب، خوردگی سطح بتن به اندازه‌ای شدید شده است که آرماتورها از سطح بتن بیرون زده‌اند.	بیرون‌زدگی آرماتورها <sup>۱۶</sup>	S RP
۱۲۰	این عیب، حالت تشدید شده کد S RP است که در آن آرماتورهای بیرون زده دچار خوردگی شده‌اند و قسمتی‌هایی از شبکه تسلیحات از بین رفته است.	خوردگی تسلیحات بتن <sup>۱۷</sup>	S RC

خوردگی ناشی از هیدروژن سولفات منحصر به تاج لوله نبوده بلکه طرفین دیواره لوله نیز به دلیل انتقال رطوبت اسیدی از تاج لوله به سمت پایین مورد حمله قرار می‌گیرد، به طوری که حتی در گوشه‌های مجاور با سطح فاضلاب خوردگی عمیق‌تر از خوردگی در تاج لوله است. این مورد با تصاویر بازرسی داخلی شبکه فاضلاب‌رو اصلی شهر اراک مطابقت دارد و در شکل ۳ نشان داده شده است (اشتهاردی‌ها، ۱۳۸۰).

را به‌گونه‌ای طراحی نمایند که تشکیل سولفید در آن‌ها به حداقل برسد. از جمله این مدل‌ها مدل دیستلویت<sup>۱۱</sup> و مدل پومری<sup>۱۲</sup> است که به ترتیب براساس مطالعات انجام شده در کشور استرالیا و آمریکا به دست آمد. در ایران نیز در سال ۱۳۷۸ حداکثر سرعت خوردگی در کلکتور زینبیه شهر اصفهان به میزان ۴/۲ میلی‌متر در سال گزارش شد (اشتهاردی‌ها، ۱۳۸۰).

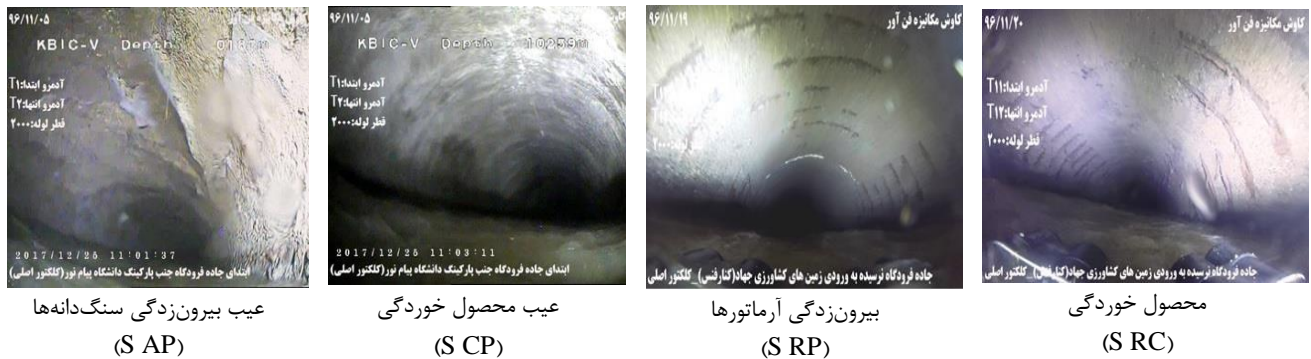
### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- بازرسی داخلی شبکه فاضلاب و بررسی تحلیلی عیوب مشاهده شده

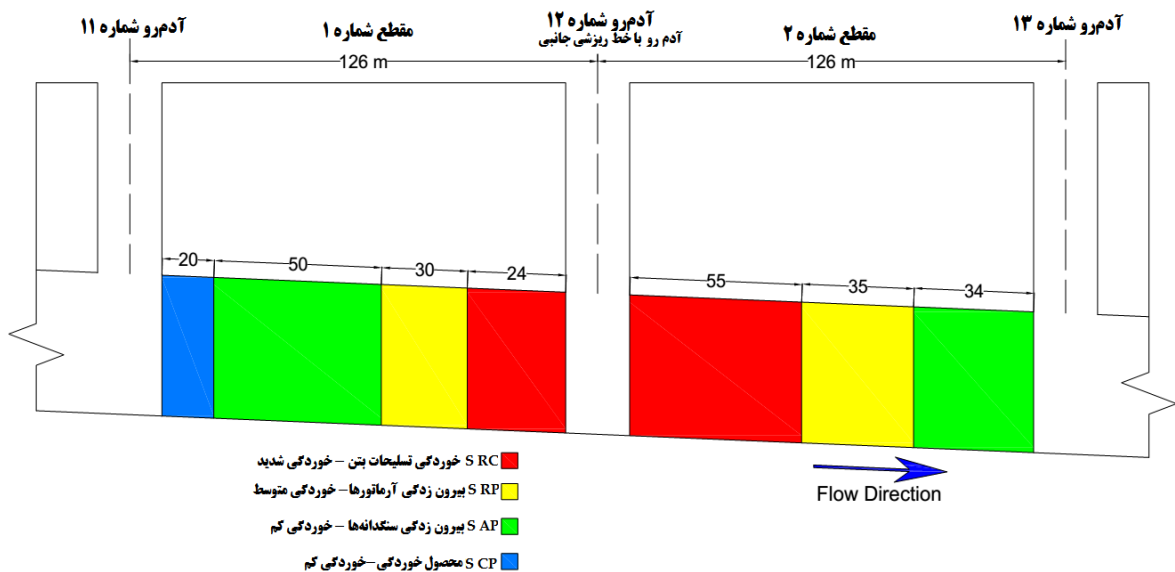
بازرسی داخلی خط انتقال فاضلاب شهر اراک با کمک ربات بازرسی شناور<sup>۱۳</sup> انجام شد. ربات شناور ویدئومتری از محل آدمرو وارد شبکه فاضلاب می‌شود و با قرار گرفتن بر روی سطح جریان فاضلاب با سرعت جریان فاضلاب و در جهت آن حرکت می‌کند. مهم‌ترین عیوب خوردگی که در بازرسی داخلی شبکه فاضلاب مشاهده شدند به ترتیب شدت اثر خوردگی (از کم به زیاد) در جدول ۱ ارائه شده است (ضابطه شماره ۶۷۷). دو عیب S و S RP با داشتن بالاترین امتیاز، بیشترین تأثیر منفی را در شرایط سازه‌ای شبکه فاضلاب دارند. در محدوده‌های مختلفی از انجام عملیات ویدئومتری شبکه، دو عیب S AP و S CP مشاهده شدند؛ اما دو عیب S RP و S RC (شکل ۱) فقط در دو مقطع طولی از محدوده بازرسی مشاهده شدند که شدت و تداوم رخداد این عیوب

#### ۳-۲- فرآیند خوردگی فاضلاب‌روهای بتنی توسط هیدروژن سولفید

مطابق مشاهدات بازرسی داخل فاضلاب‌رو بتنی، شرایط خوردگی لوله با الگوی خوردگی گاز هیدروژن سولفات مطابقت داده شد و وجود خوردگی در تاج لوله و خط تراز روزانه جریان در لوله فاضلاب‌رو مشخص شد. براساس گزارش‌های تحقیقاتی از لوله‌های فاضلاب‌رو خورده شده،



شکل ۱- عیوب خوردگی مشاهده شده در حین بازرسی خط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶



شکل ۲- بررسی گرافیکی عیوب در مقاطع ۱ و ۲ خط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

در معرض هیدروژن ممکن است بر اثر تولید گاز هیدروژن و یا واکنش‌های حاصل از خوردگی باشد. زمانی که فولاد در محیط مرطوب حاوی هیدروژن سولفید قرار می‌گیرد اتم هیدروژن بر اثر واکنش کاتدیک پروتون  $H^+$  و اکسیداسیون آندیک آهن تولید می‌شود. گاز سولفید هیدروژن دارای خاصیت خوردگی فلزاتی مانند آهن و مس و... است. شدت خوردگی آهن وابسته به میزان تفکیک مولکول‌های هیدروژن سولفید در آب است. تجزیه و نفوذ پی‌درپی هیدروژن در فولاد می‌تواند کاهش خواص مکانیکی را به همراه داشته باشد (عباس قربانی و مشهدی، ۱۳۹۳).

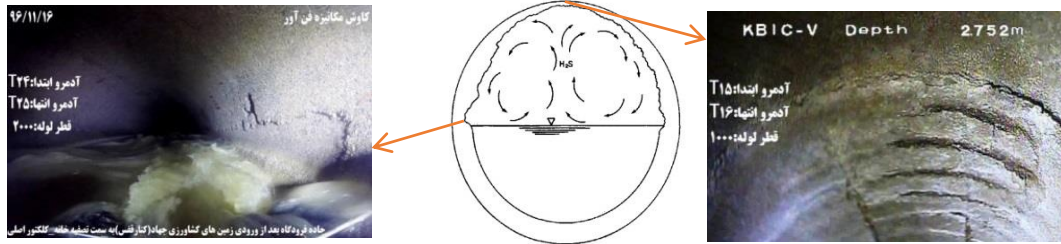
با بررسی آدم‌روها خوردگی نردبان آن‌ها مشهود بود که آخرین پله نردبان هر سه این آدم‌روها به‌منظور انجام آزمایش استحکام کششی و یافتن رابطه بین شدت گاز سولفید هیدروژن و تردی هیدروژنی فلز نردبان آدم‌روها به آزمایشگاه ارسال شد.

### ۳-۳- بررسی اثر تردی هیدروژنی ناشی از گاز سولفید هیدروژن در آدم‌رو

در یک تعریف کلی، تردی هیدروژنی<sup>۱۸</sup> عبارت است از اثر تردی ناشی از ورود هیدروژن به داخل ساختار و تخریب خواص مکانیکی قطعه تحت تأثیر شرایط سرویس‌دهی. تردی هیدروژنی در فولاد باعث شکست سریع در بارگذاری کم و در زمان کوتاه‌تر نسبت به محیط فاقد هیدروژن است. انحلال هیدروژن در شبکه کریستالی فولاد به کاهش پیوند اتمی فلز منجر می‌شود. پدیده تردی هیدروژنی بر مبنای تولید هیدروژن در دو زیرمجموعه تردی هیدروژنی داخلی<sup>۱۹</sup> و تردی هیدروژنی محیطی<sup>۲۰</sup> دسته‌بندی می‌شود.

پدیده تردی هیدروژنی داخلی بر اثر هیدروژن باقی‌مانده در ساختار فلز در مراحل تولید فولاد اتفاق می‌افتد (Zheng et al., 2012). پدیده تردی هیدروژنی خارجی بر اثر قرار گرفتن فلز در معرض هیدروژن رخ می‌دهد. قرار گرفتن فلز



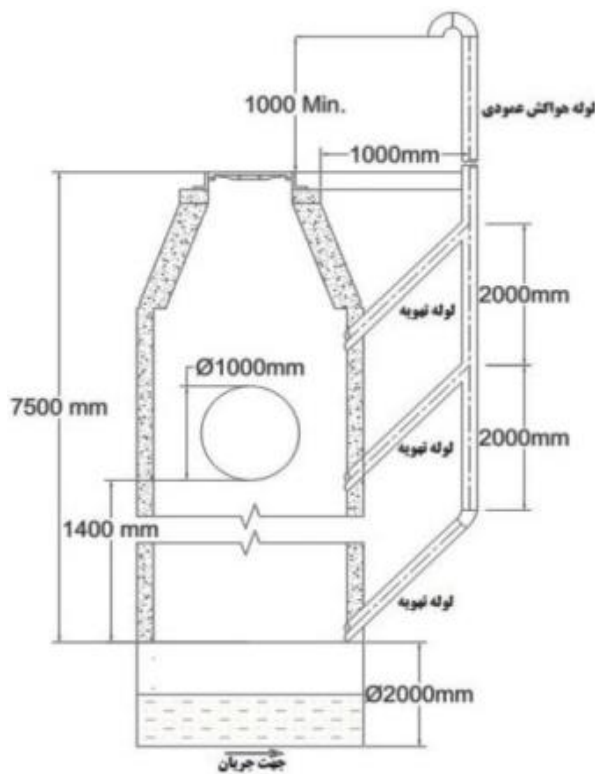


شکل ۳- تطبیق تصاویر بازرسی فاضلاب رو با الگوی خوردگی گاز سولفید هیدروژن در خط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

هوای برای اکسید نمودن سولفید هیدروژن به اسیدسولفوریک می‌شود (اشتهاردی‌ها، ۱۳۸۰). باهدف انجام تهویه لوله‌های تهویه و هواکش عمودی از جنس PVC به قطر دوپست میلی‌متر اجرا شده است. به‌منظور حفاظت لوله هواکش عمودی یک غلاف از جنس بتن در محل خروج لوله از زمین بر روی آن قرار داده شده است (شکل ۴).

### ۳-۴- نحوه اجرای لوله‌های تهویه و هواکش عمودی

عمل تهویه از دو راه موجب کاهش خوردگی ناشی از سولفید هیدروژن در فاضلاب‌روها می‌گردد که عبارت‌اند از: ۱- تهویه موجب تازه شدن هوای داخل فاضلاب‌روها و کاهش غلظت سولفید هیدروژن در فضای خالی فاضلاب‌روها می‌گردد. ۲- تهویه موجب کاهش رطوبت سطحی موجود بر روی تاج و دیواره فاضلاب‌روها شده که این امر باعث کاهش فعالیت باکتری‌های



شکل ۴- لوله تهویه و هواکش عمودی آدمرو ریزشی خط انتقال فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

بازه مقداری (۰-۲۰۰ ppm) را دارد. بخش دوم شامل اندازه‌گیری استحکام کششی پله آخر آدمروهای شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به‌منظور بررسی وضعیت خوردگی این سه آدمرو است. غلظت گاز سولفید هیدروژن قبل و بعد از اجرای لوله تهویه و هواکش عمودی فاضلاب رو با توجه به مقادیر دبی ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری گاز سولفید هیدروژن بدون باز

### ۳-۵- برداشت‌های میدانی

برداشت‌های میدانی در قالب دو بخش صورت گرفت. بخش اول شامل اندازه‌گیری غلظت گاز سولفید هیدروژن در آدمرو شماره ۱۳ به‌وسیله دستگاه آشکارساز قابل‌حمل گاز هیدروژن سولفات با نام Max Gas Alert XT II ساخت شرکت Honeywell است که قابلیت اندازه‌گیری غلظت گاز سولفید هیدروژن را در

کردن دریچه آدمرو و با کمک لوله انعطاف‌پذیر با طول استاندارد مربوط به دستگاه از سوراخ تهویه دریچه انجام شده است. فاصله انتهای لوله تا سطح فاضلاب برابر ۲۵۰ میلی‌متر تنظیم شد (Bowker et al., 1992). به‌منظور یافتن زمان حداکثر دبی به‌عنوان بحرانی‌ترین زمان در تولید سولفید هیدروژن نتایج خروجی دبی‌سنجی تصفیه‌خانه فاضلاب (دبی تجمعی برحسب مترمکعب در ساعت) به‌وسیله جریان‌سنج راداری غیرتماسی چشم‌کلاغی مدل IFQ شرکت فلوترونیک در بازه زمانی سه‌ماهه قبل از زمان آغاز اندازه‌گیری غلظت گاز سولفید هیدروژن بررسی شد. بازه زمانی بین ساعت ۱۴ تا ۱۵ به‌عنوان یک نقطه بیشینه نسبی<sup>۲۱</sup> دبی به‌منظور زمان اندازه‌گیری غلظت سولفید هیدروژن در نظر گرفته شد.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- اندازه‌گیری غلظت گاز سولفید هیدروژن

به‌منظور اندازه‌گیری غلظت گاز سولفید هیدروژن قبل و بعد

از اجرای لوله‌های تهویه و هواکش عمودی آدمرو شماره ۱۲ در ساعت ۱۴ تعداد ۳۰ مورد اندازه‌گیری انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است مقادیر بیشینه به میزان ۱۱/۹ درصد و کمینه به میزان ۹/۰۹ درصد در آدمرو شماره ۱۲ کاهش یافته‌اند. همچنین با توجه به کاهش مقدار میانگین و انحراف معیار کاهش مقادیر غلظت گاز سولفید هیدروژن بعد از اجرای لوله تهویه و هواکش عمودی مشخص است. در زمان اندازه‌گیری و بعد از اجرای لوله تهویه و هواکش عمودی برای حرکت هوا در دهانه خروجی لوله عمودی به‌وسیله آزمایش دود موردسنجش قرار گرفت که در همه موارد جهت حرکت هوا در جهت خروج از آدمرو بود.

##### ۴-۲- اندازه‌گیری استحکام کششی آخرین پله نردبان

###### آدمروها

در زمان انجام بازرسی داخلی فاضلابرو نردبان آدمروها موردبررسی قرارگرفت که دچار خوردگی شدید شده‌اند (شکل ۵).

جدول ۲- مقادیر غلظت گاز H<sub>2</sub>S برحسب ppm در آدمرو شماره ۱۲ خط اصلی انتقال فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

انحراف معیار	میانگین غلظت گاز H <sub>2</sub> S	کمینه غلظت گاز H <sub>2</sub> S	بیشینه غلظت گاز H <sub>2</sub> S	
۰/۹۵۵۰۸	۲/۵	۱/۱	۴/۲	قبل از اجرا لوله تهویه
۰/۷۱۴۵۷	۲/۵	۱	۳/۷	بعد از اجرا لوله تهویه



شکل ۵- خوردگی نردبان آدمرو خط اصلی انتقال فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

فاضلابرو و بیشتر بودن وزن حجمی سولفید هیدروژن نسبت به هوا و تجمع بیشتر آن در پاشنه آدمروی آخرین پله نردبان آدمروهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ پس از خارج کردن نردبان‌ها از داخل آدمرو، جدا و به آزمایشگاه مکانیک شرکت آذراب به‌منظور انجام آزمایش استحکام کششی ارجاع شد. نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. با مقایسه شکل ۶ و جدول ۳ مشاهده می‌شود تنش نهایی پله آدمروی شماره ۱۲ کمترین مقدار را دارد که مقدار

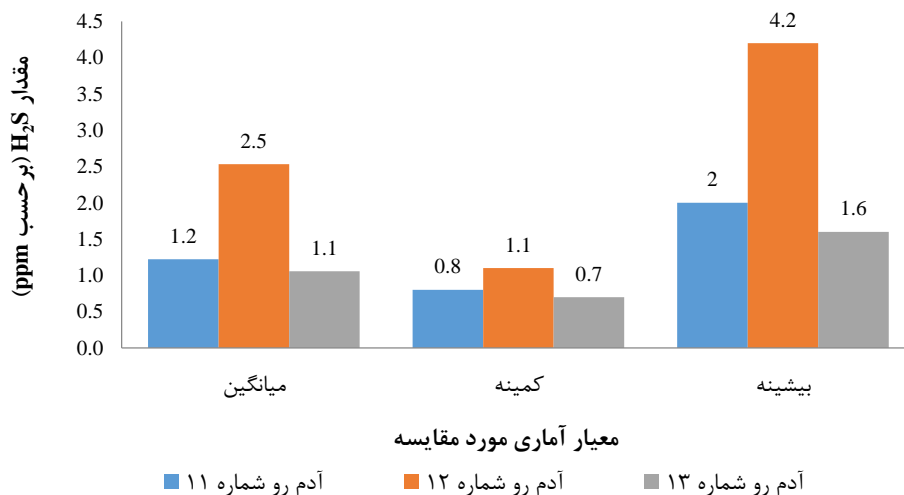
به‌منظور بررسی اثر تردی هیدروژنی و غلظت گاز سولفید هیدروژن در سه آدمروی شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ غلظت سولفید هیدروژن قبل از اجرای لوله تهویه و لوله عمودی هواکش اندازه‌گیری شد. در شکل ۶ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین در این سه آدمرو ارائه شده است. به‌منظور اندازه‌گیری بررسی تأثیر خوردگی در حضور گاز سولفید هیدروژن بر روی فلز پله نردبان آدمرو و نزدیک بودن آخرین پله به محیط اتمسفر در تماس با

محیط دارد که این مورد با دو عامل رطوبت و دما مرتبط است. بخار آب با وزن مولکولی  $18 \text{ g/mol}$  تراکم کمتری از نیتروژن ( $\text{N}_2$ )  $28 \text{ g/mol}$  و اکسیژن ( $\text{O}_2$ ,  $32 \text{ g/mol}$ ) دارد و هوای در تماس با فاضلاب، تمایل به جذب رطوبت بیشتری دارد. در زمستان هوای موجود در فاضلاب با جذب گرمای بیشتر سبک تر شده و با تأثیر نیروی شناوری چرخش هوا تحت عنوان اثر دودکشی حرکت هوا به سمت خارج از لوله اتفاق می افتد.

غلظت سولفید هیدروژن در این آدمرو از دو آدمروی دیگر بیشتر است. در نتیجه اثر تردی هیدروژنی در این آدمرو نسبت به سایر آدمروها مشهود است، مقایسه موارد مشابه در آدمروی شماره ۱۱ و ۱۳ با مقادیر تنش نهایی مطابق جدول ۳ هم خوانی دارد.

#### ۴-۳- بررسی تأثیر تغییر فصل بر روی خاصیت دودکشی لوله هواکش

هوای موجود در شبکه فاضلاب اغلب چگالی کمتری از هوای



شکل ۶- مقایسه مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین گاز سولفید هیدروژن (قبل از اجرای هواکش) در آدمروی ریزشی خط انتقال اصلی فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

جدول ۳- نتایج آزمون استحکام کششی پله آدمروهای خط اصلی انتقال فاضلاب شهر اراک در سال ۱۳۹۶

شماره نمونه	نیروی تسلیم (N)	تنش تسلیم ( $\text{N/mm}^2$ )	نیروی نهایی (N)	تنش نهایی ( $\text{N/mm}^2$ )
T <sub>1</sub> (آدمروی ۱۱)	۲۵۰۰۰	۳۱۸	۳۴۷۰۰	۴۴۲
T <sub>2</sub> (آدمروی ۱۲)	۲۴۰۰۰	۳۰۵	۳۳۸۰۰	۴۳۱
T <sub>3</sub> (آدمروی ۱۳)	۲۷۰۰۰	۳۴۴	۳۶۲۰۰	۴۶۱

#### ۵- نتیجه گیری

نیز نشان دهنده نزدیک تر بودن مقادیر برداشت شده به مقدار میانگین است. لوله عمودی هواکش با توجه به اثر دودکشی متأثر از اختلاف فشار اتمسفر فاضلاب رو و انتهای هواکش عمودی که در هوای آزاد قرار گرفته عمل می کند. در سه ارتفاع مختلف در دیواره آدمرو لوله های تهویه به چرخش هوا کمک نموده و باعث ورود هوای تازه به داخل آدمرو می شود. همین امر باعث کاهش رطوبت موجود در لوله فاضلاب رو شده و کاهش خوردگی میکروبی را به همراه دارد. با توجه به مقادیر مرجع ارائه شده در زمینه اثرات خوردگی با وجود مقادیر گاز سولفید هیدروژن بیش از  $0.5 \text{ ppm}$ ، خوردگی شدید در لوله مورد انتظار است (Apgar et al., 2008)؛ لذا مقدار کاهش ایجاد شده در مقدار گاز سولفید هیدروژن به منظور کاهش پتانسیل خوردگی شبکه کافی نیست.

در آدمروهای ریزشی شدت وجود گاز سولفید هیدروژن نسبت به سایر آدمروها بیش تر است. با در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی در آدمروهای ریزشی احتباس هوا باعث افزایش فشار در لوله فاضلاب رو پایین دست و آزاد شدن هر چه بیش تر سولفید هیدروژن می شود. استحکام کششی پایین تر پله در آدمرو ریزشی شماره ۱۲ نسبت به آدمروهای شماره ۱۱ و ۱۳ نشان دهنده بالاتر بودن مقادیر گاز سولفید هیدروژن در آدمروی شماره ۱۲ بود. مقادیر بیشینه و کمینه سولفید هیدروژن در آدمروی ریزشی بعد از اجرای لوله تهویه و لوله هواکش عمودی، هر یک به ترتیب به مقدار  $11/9$  و  $9/09$  درصد کاهش یافتند. کاهش مقدار انحراف معیار

مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.  
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۹۴)، دستورالعمل انجام  
عملیات ویدئومتری شبکه‌های فاضلاب، ضابطه شماره ۶۷۷،  
تهران، ایران.

عباس قربانی، م.، مشهدی، ا.، (۱۳۹۳)، "بررسی روش‌های مهار  
سولفید هیدروژن در صنعت نفت و گاز"، نشریه مهندسی گاز  
ایران، (۲)۱، ۲۴-۳۱

Apgar, D., Witherspoon, J., and Easter, C., (2008),  
*Minimization of odors and corrosion in collection  
systems*, Water Environment Research Foundation,  
Alexandria, VA.

Bowker, R., Audibert, G., Shah, H., and Webster, N.,  
(1992), *Detection, control, and correction of hydrogen  
sulfide corrosion in existing wastewater systems*,  
Office of Wastewater Enforcement and Compliance,  
Office of Water, Washington, DC.

Parande, A., Ramsamy, P., Ethirajan, S., Rao, C., and  
Palanisamy, N., (2006), "Deterioration of reinforced  
concrete in sewer environments", *Proceedings of the  
Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*,  
Thomas Telford Ltd, pp. 11-20.

Sorensen, H., Joyce, J., Fallara, C.T., (2000), "Odor  
control for large diameter deep sewer tunnels, The  
City of Columbus Ohio", *Proceedings of the Water  
Environment Federation*, pp. 154-179.

Vollertsen, J., Nielsen, A.H., Jensen, H.S., Wium-  
Andersen, T., and Hvitved-Jacobsen, T., (2008),  
"Corrosion of concrete sewers, the kinetics of  
hydrogen sulfide oxidation", *Science of the Total  
Environment*, 394, 162-170.

Zhang, W., Zhu, D.Z., Rajaratnam, N., Edwini-Bonsu, S.,  
Fiala, J., Pelz, W., (2016), "Use of air circulation pipes  
in deep dropshafts for reducing air induction into  
sanitary sewers", *Journal of Environmental  
Engineering*, 142, 04015092.

Zheng, S., Qi, Y., Chen, C., Li, S., (2012), "Effect of  
hydrogen and inclusions on the tensile properties and  
fracture behaviour of A350LF2 steels after exposure  
to wet H<sub>2</sub>S environments", *Corrosion Science*, 60, 59-  
68.



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

پیشنهادهای زیر برای ادامه این تحقیق می‌تواند مورد توجه  
قرار گیرد:

- استفاده از لوله تهویه با قطر بالاتر (در تهویه طبیعی) می‌تواند  
در افزایش تهویه و کاهش بیشتر مقادیر سولفید هیدروژن  
تأثیرگذار باشد. لذا در پژوهش‌های آتی اثر افزایش قطر در کاهش  
غلظت گاز سولفید هیدروژن قابل بررسی است.

- استفاده از روش‌های تهویه اجباری (مانند استفاده از فن‌های  
برقی تهویه) با در نظر گرفتن هزینه انرژی مصرفی می‌تواند در  
کاهش غلظت گاز سولفید هیدروژن مؤثر باشد.

- تغییر در اجرای آدم‌روهای ریزشی که بتواند در کاهش تلاطم  
جریان فاضلاب مؤثر باشد می‌تواند در کاهش نرخ تولید هیدروژن  
سولفید قابل تأثیر باشد.

## ۶- قدردانی

نویسندگان مقاله از واحد خدمات فنی و آزمایشگاه مکانیک  
شرکت آذراب که در انجام آزمایش‌های مورد نیاز این پژوهش  
کمال همکاری را به عمل آوردند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- H<sub>2</sub>S
- 2- Lift Stations
- 3- Cross Section Manhole
- 4- Dropshaft Manhole
- 5- Inverted Siphon
- 6- Hot Spots
- 7- Droplet
- 8- Forced Ventilation
- 9- Natural Ventilation
- 10- Ventilation Stack
- 11- Thistlethwayte
- 12- Pomeroy
- 13- Camera Raft Robot
- 14- Corrosion Products
- 15- Aggregate Projecting from Surface
- 16- Reinforcement Projecting from Surface
- 17- Corroded Reinforcement
- 18- Hydrogen Embrittlement
- 19- Internal Hydrogen Embrittlement (IHE)
- 20- Hydrogen Environment Embrittlement (HEE)
- 21- Relative Maximum

## ۸- مراجع

اشتهاردی‌ها، ح.، (۱۳۸۰)، "کنترل خوردگی فاضلاب‌روهای بتنی  
در حال بهره‌برداری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه