

## Methods of Prediction Sulfide Production in Sewerage

E. Azimi Ghalibaf<sup>1</sup>, S. Khodashenas<sup>2\*</sup>, E. Ghorbani<sup>3</sup>

1- PhD Student of Engineering Water, Ferdowsi University of Mashhad, Head of Wastewater Sewerage Operation Office, Mashhad Water and Wastewater CO, Iran. 2- Profesor in Dept. of water engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. 3- MSc Student in Environmental Engineering Islamic Azad University Tonekabon Branch, Iran.

\* (Corresponding Author Email: khodashenas@um.ac.ir)

Received: 6-10-2015

Accepted: 24-11-2016

## روش‌های پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب

احسان عظیمی قالیباف<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، الهام قربانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، واحد بین‌المللی دانشگاه فردوسی- شرکت آب و فاضلاب مشهد. ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد. ۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی محیط‌زیست، گروه محیط‌زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن.

\* (نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: khodashenas@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴/۷/۹۴

تاریخ پذیرش: ۴/۹/۹۵

### Abstract

Millions of dollars are being spent worldwide on the repair and maintenance of sewer networks and wastewater treatment plants every year. The production and emission of hydrogen sulfide has been identified as a major cause of corrosion and odor problems in sewer networks. Prediction of hydrogen sulfide production in the sewer system helps the engineers and manager to obtain a proper strategy for their optimal management and for an analysis of reassurance. The purpose of this study is to review the selected models of predicting sulfide generation in sewerage that in this study the Equations of predicting sulfide generation are discussed. The status of any operational sewerage can be assessed, and the critical points can be recognized by using such equations. The results of this research show that sulfide buildup in sewerage is a function of hydraulic characteristics and qualitative. In most of the proposed models in this study the density of organic materials (BOD & COD) was considered as the main parameter in determining the amount of hydrogen sulfide creation in sewerage. It is notable that ORP and pH can also be used as an index in assessing sulfide creation in sewerage systems. Real time Decision-making is of great importance in the operationalization and management of the sewerage systems; therefore, the COD-based and BOD- based models are mostly suitable for technical studies and ORP-based models are of prime importance for operationalization. Finally, a study conducted in west of Mashhad on the accurate models show that Boon, Nielsen and Hvitved models provide a better prediction as compared with other models that used in this paper.

**Keywords:** hydrogen sulfide, corrosion, sewerage, prediction models Sulfide.

### چکیده

هر ساله میلیون‌ها دلار در سراسر جهان صرف تعمیر و نگهداری شبکه‌های فاضلاب و واحدهای تصفیه فاضلاب می‌شود. اصلی‌ترین دلیل خوردگی و بوی نامطبوع شبکه‌های فاضلاب، تولید و انتشار سولفید هیدروژن شناخته شده است. پیش‌بینی دقیق تولید سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به مهندسین و مدیران کمک می‌کند تا برای مدیریت بهینه و انجام تحلیل برای کسب اطمینان، به دنبال استراتژی مناسب باشند. هدف از این مطالعه، مروری بر دستاوردهای موجود در زمینه پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب می‌باشد. در این پژوهش معادلات پیش‌بینی تولید سولفید معرفی شده و مورد بحث قرار گرفته است. با دسترسی به چنین معادلاتی می‌توان وضعیت هر شبکه در حال بهره‌برداری را ارزیابی نموده، نقاط بحرانی آن را از نظر خوردگی شناسایی کرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب تابعی از خصوصیات هیدرولیکی و مشخصات کیفی فاضلاب است. این در حالی است که در اکثر مدل‌های ارائه شده در این پژوهش غلظت مواد آلی (COD و BOD) به عنوان پارامتر اصلی در تعیین میزان تولید سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در نظر گرفته شده است. البته این نکته قابل ذکر است که شاخص ORP و pH می‌تواند به عنوان یک شاخص موثر در ارزیابی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده شود. آنچه در بهره‌برداری و مدیریت شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب اهمیت دارد، تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی در لحظه می‌باشد؛ لذا مدل‌های مبتنی بر پارامترهای COD و BOD بیشتر جنبه انجام مطالعات فنی دارد و از نظر جنبه بهره‌برداری مدل‌های مبتنی بر ORP دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. در نهایت مطالعه‌ای که به منظور صحت‌سنجی مدل‌ها در منطقه‌ی غرب مشهد انجام شد، نشان می‌دهد که به طور کلی مدل‌های Boon، Nielsen و Hvitved پیش‌بینی‌های صحیح‌تری را نسبت به دیگر مدل‌های ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سولفید هیدروژن، خوردگی، شبکه فاضلاب، مدل‌های پیش‌بینی تولید سولفید.

انجام شده محدود پتانسیل اکسیداسیون احیا (ORP)<sup>۲</sup> برای تغییرات باکتری‌های کاهش دهنده سولفات (SRB)<sup>۳</sup> بین ۵۰- تا ۳۰۰- میلی‌ولت است (جدول ۱). معمولاً دامنه‌ی مطلوب ORP برای تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب در محدوده ۵۰- تا ۲۵۰- میلی‌ولت است (Michael, ۲۰۰۷). شاخص ORP و pH به عنوان شاخصی موثر در ارزیابی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده می‌شود (Faridah و همکاران، ۲۰۱۱). محدوده مطمئن (محدوده مطلوب پیش‌گیری از تولید سولفید) مقدار پتانسیل اکسیداسیون و احیا بالاتر از ۵۰ میلی‌ولت و همچنین  $9 \leq \text{pH} \leq 8/5$  احتمال تولید سولفید را کاهش می‌دهد. بیشترین سرعت تولید سولفید در pH بین ۶ تا ۸/۵ و در ORP بین ۵۰- تا ۲۵۰- میلی‌ولت اتفاق می‌افتد.

جدول ۱- محدوده مناسب ORP برای تولید  $\text{H}_2\text{S}$  توسط میکروارگانیزم در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب

منابع	محدوده ORP
محدوده مطلوب ORP برای تولید $\text{H}_2\text{S}$ توسط SRB	
Eliassen و همکاران، ۱۹۴۹	۲۰۰- تا ۳۰۰- mV
Richard، ۱۹۷۲	۲۰۰- تا ۳۰۰- mV
Boon، ۱۹۹۵	۱۰۰- تا ۲۵۰- mV
Edwards و همکاران، ۲۰۰۱	۵۰- تا ۳۰۰- mV
Michael، ۲۰۰۷	۵۰- تا ۲۵۰- mV
محدوده مطلوب پیش‌گیری از تولید سولفید توسط SRB	
Derek، ۱۹۹۵	$\geq 50 \text{ mV}$
Faridah و همکاران، ۲۰۱۱	$\geq 50 \text{ mV}$

دما یکی دیگر از عوامل مهم تولید سولفید است. در سال ۱۹۴۳، Baumgartner بیان نمود که تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب در پایین‌تر از ۷ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌شود. بالاترین نرخ تولید سولفید در ۳۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. در صورتیکه افزایش دما، افزایش حلالیت سولفید هیدروژن را به دنبال داشته باشد، در این صورت به ازای هر درجه افزایش دما، آهنگ متصاعد شدن سولفید ۷ درصد افزایش می‌یابد (Pomeroy و Bowlus، ۱۹۴۶).

مطالعات نشان می‌دهد که رسوبات موجود در فاضلاب، عامل اصلی افزایش تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب می‌باشد. افزایش رسوبات لجن در شبکه‌های فاضلاب یک محیط میکروبی مناسب برای تولید سولفید فراهم می‌کند (Beardsley، ۱۹۴۹؛ Bolus، ۱۹۴۶). با حضور مواد آلی در رسوبات، نیاز باکتری‌های کاهش دهنده سولفات برای احیاء بی‌هوازی در نتیجه پتانسیل تولید سولفید، افزایش می‌یابد (Pomeroy، ۱۹۴۶).

تولید سولفید یکی از اصلی‌ترین معضلات شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است. تولید و انتشار سولفید مهم‌ترین عامل خوردگی و بوی آزاردهنده در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب به شمار می‌رود (Kouzeli-Katsiria و همکاران، ۱۹۸۸؛ Zhao و Su، ۲۰۱۳). ثابت شده است که تخریب شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در مرحله اول به دلیل حمله اسید سولفوریک بوده که سبب تخریب شدید ساختار سیستم‌ها و در نهایت تخریب کامل می‌شود (OVS، ۲۰۰۴؛ Recio Oviedo و همکاران، ۲۰۱۲). در موارد بسیار زیادی از لوله‌های فاضلابی که با عمر ۵۰ تا ۱۰۰ سال ساخته شده، به دلیل خوردگی ناشی از سولفید هیدروژن عملاً در همان ۱۰ تا ۲۰ سال نخست دیگر قادر به سرویس‌دهی نبودند. این مشکلات اغلب به چشم نمی‌آید مگر آنکه فاجعه بزرگی در این زمینه رخ دهد. پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در ایجاد استراتژی‌های مناسب برای کنترل سولفید در نهایت انتشار سولفید هیدروژن بسیار مفید است. پیش‌بینی دقیق تشکیل سولفید در مرحله طراحی و نیز مرحله عملیاتی برای برنامه‌ریزی اندازه‌گیری‌های مهندسی در راستای کاهش مشکلات مربوط به سولفید بسیار حائز اهمیت است.

سولفید در فاضلاب به سه شکل گاز سولفید هیدروژن  $\text{H}_2\text{S}$ ، گونه‌های سولفید هیدروژن یونی  $\text{HS}^-$  و سولفید  $\text{S}^{2-}$  وجود دارد که نسبت هر سه گونه به pH وابسته است (Yongsiri و همکاران، ۲۰۰۳). زمانیکه pH در فاضلاب حدود ۷ است این دو نوع  $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$  و  $\text{HS}^-$  می‌باشند (Yang و همکاران، ۲۰۰۵). نوع  $\text{S}^{2-}$  به دلیل ناچیز بودن آن حتی در pH خیلی بالا به حساب نمی‌آید (Shen و Fu، ۱۹۹۰).

دکتر Pomeroy در سال ۱۹۷۰ میلادی در زمینه احتمال تشکیل گاز سولفید هیدروژن و پدیده خوردگی مطالعاتی را انجام داد که عواملی چون نیاز اکسیژن بیوشیمیایی (BOD)، درجه حرارت، شیب خطوط فاضلاب و نسبت ارتفاع فاضلاب به عمق لوله (H/D) و میزان جریان در آن موثر بودند. همچنین Nielsen در سال ۱۹۹۲ بیان نمود که فرآیند انتشار سولفید هیدروژن در نواحی با سرعت جریان آهسته، شرایط بی‌هوازی و دمای نسبتاً بالا مشاهده می‌شود. این عوامل توسط دیگر نویسندگان در زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی سولفید نیز در نظر گرفته شده است (Pomeroy، ۱۹۵۹؛ Nielsen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Hadjianghelou و همکاران، ۱۹۸۴؛ Boon و Lister، ۱۹۷۵؛ ATV، ۱۹۹۲).

پتانسیل اکسیداسیون احیا یک معیار تقریبی از تعادل موجود بین مواد اکسید شده و احیا شده در آب است. طبق مطالعات

آن روش‌های مناسب کنترل سولفید هیدروژن را ارائه داد.

### مکانیسم تولید سولفید هیدروژن

سولفید هیدروژن توسط باکتری‌های کاهش دهنده سولفات (SRB) از قبیل *Desulfovibrio* که از سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) به عنوان دهنده الکترون در تخریب ترکیبات آلی تخریب‌پذیر تحت شرایط بی‌هوازی استفاده می‌کنند، تولید می‌شود. حضور مواد آلی تخریب‌پذیر از قبیل استات، لاکتات، گلوکز و غیره می‌تواند تولید  $H_2S$  را بالا ببرد. بیوفیلم باکتری کاهش‌دهنده سولفات در امتداد دیواره داخلی لوله تشکیل شده و سولفید ( $S^{2-}$ )، متان و دی اکسید کربن در بیوفیلم تحت شرایط بی‌هوازی تولید و به فاضلاب منتقل می‌شود. ضخامت لایه بیوفیلم تابعی از عمق جریان و سرعت جریان خواهد بود. به طور معمول، در لوله‌هایی که میزان ارتفاع جریان فاضلاب به نسبت قطر آن کم می‌باشد، ضخامت لایه بیوفیلم تشکیل شده بیشتر است.

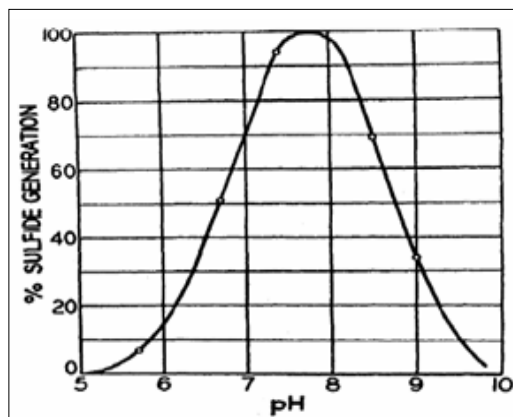
زمان ماند طولانی فاضلاب در چاهک‌های آدم‌رو یا خطوط لوله، دمای بالا و تلاطم (به عنوان مثال تخلیه فاضلاب از شبکه تحت فشار به چاهک آدم‌رو) منجر به تولید و آزاد شدن سولفید هیدروژن به فاز گاز می‌شود. باکتری‌های اکسیدکننده سولفید از قبیل *Thiobacillus thiooxidans*، *Thiobacillus neapolitanus* و *Thiobacillus intermedius* سولفید هیدروژن را به اسید سولفوریک تبدیل می‌کند. خوردگی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب بتنی در اثر واکنش اسید سولفوریک با مواد سیمانی بتن رخ می‌دهد. براساس تحقیقات انجام شده در ۳۴ شهر ایالت متحده، نرخ خوردگی ۱۰-۲/۵ میلی‌متر در هر سال گزارش شده است (Valix و همکاران، ۲۰۱۲).

۲- بتوان شبکه‌های در حال اجرا را به گونه‌ای طراحی نمود که میزان سولفید به حداقل برسد.

۳- شناسایی نقاطی که دچار خوردگی شده تا بتوان روش کنترل کننده مناسب را اجرا نمود.

مدل‌های ارائه شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:  
**مدل اول:** در سال ۱۹۷۷، Pomeroy و Parkhurst یک روش کمی برای پیش‌بینی مقدار تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب ثقلی (نیمه پر) در شهر لس‌آنجلس انجام دادند (رابطه‌ی ۱). این روش هنگامی قابل استفاده است که شرایط برای تولید، مناسب باشد و در غیر اینصورت در سایر شرایط، نتایج گمراه‌کننده‌ای به دست خواهد داد. ضمناً نتایج نشان می‌دهد هنگامی که فاضلاب حاوی مقادیر مشخص اکسیژن محلول باشد و یا مواد مغذی در حد کافی وجود نداشته باشد (مقدار BOD پایین باشد) تولید

یکی دیگر از شرایط محیطی که تولید سولفید تحت تاثیر آن قرار می‌گیرد، pH می‌باشد. Pomeroy و Bowlus در سال ۱۹۴۶ میلادی با بررسی زمان لازم برای رسیدن به غلظت سولفید یکنواخت در تغییرات مقادیر متوسط pH به شکل (۱) دست یافتند. میانگین pH مطلوب فاضلاب بین ۷/۵ تا ۸ است که اکثر شبکه‌های فاضلاب موجود در این محدوده است.



شکل ۱- سرعت نسبی تولید سولفید در مقادیر مختلف pH (Bowlus و Pomeroy، ۱۹۴۶)

با توجه به اهمیت موضوع به عنوان یک مبحث مهم در بهره‌برداری و استفاده از شبکه‌های فاضلاب از دیرباز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ها و ابعاد مختلف آن در جهان و تا حدودی در ایران صورت گرفته است. آنچه در این مقاله گردآوری و پژوهش شده بررسی چگونگی تولید گاز سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب و ارائه روش‌های پیش‌بینی سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است که با آن می‌توان میزان سولفید هیدروژن تولیدی را پیش‌بینی نمود و با توجه به

### مدل‌های ارائه شده جهت پیش‌بینی سولفید

به منظور جلوگیری از تشکیل سولفید و کنترل سولفید هیدروژن در شبکه‌های فاضلاب، ارائه یک مدل (معادله) برای پیش‌بینی تشکیل سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب لازم است. از سال ۱۹۶۰ تاکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب گسترش یافته است. این مدل‌ها به منظور طراحی شبکه و کنترل سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در نظر گرفته می‌شود که در آن‌ها پارامترهای کیفی و هیدرولیکی از قبیل سولفات، سولفید، COD، BOD، دما و سرعت جریان استفاده می‌شود. هدف از ارائه این مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱- ارزیابی شبکه‌های در حال بهره‌برداری از نظر تولید سولفید

سولفید رخ نخواهد داد. شبکه‌های جمع‌آوری فاضلابی که اکسیژن محلول در فاضلاب از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر بیشتر است شامل این فرمول نیستند.

$$\frac{d(S)}{dt} = M(EBOD)r^{-1} - N(sV)^{0.375} (S)d_m^{-1} \quad (1)$$

که در آن  $\frac{d(S)}{dt}$  سرعت تغییر غلظت سولفید بر حسب (mg/l-hour)،  $M$  ضریب جریان موثر سولفید،  $r$  شعاع هیدرولیکی جریان (m)،  $N$  ضریب ثابت تجربی،  $S$  غلظت کلی سولفید (mg/l)،  $s$  گرادیان انرژی جریان (m/m)،  $V$  سرعت جریان (m/s)،  $d_m$  عمق متوسط هیدرولیکی (m)، ضرایب  $M$  و  $N$  را می‌توان برای شرایط سیستم تحت مطالعه به دست آورد. یعنی هنگامی که غلظت اکسیژن محلول کم (کمتر از ۳-۰/۵ میلی‌گرم در لیتر) است،  $M$  در حدود  $10^{-2} \times 0/4$  متر در ساعت ( $10^{-3} \times 1/3$  فوت در ساعت) می‌باشد و با افزایش غلظت اکسیژن محلول به سمت صفر میل می‌کند. ثابت تجزیه سولفید  $N$ ، پارامتری برای افت سولفید به واسطه اکسیداسیون و خارج شدن  $H_2S$  از فاضلاب به اتمسفر است. پومروی مقدار  $M$  را برابر  $10^{-2} \times 0/32$  متر در ساعت و مقدار  $N$  را برابر  $0/64$  و یا مقدار کمتر محافظه‌کارانه  $0/96$  پیشنهاد کرده است. مطالعات علمی نشان داده است که مقدار  $N=0/96$  را می‌توان برای پیش‌بینی حداکثر مقدار سولفید در شبکه‌های فاضلاب بزرگ به طول چندین مایل (کیلومتر) به کار برد. قسمت منفی معادله فوق متناسب با غلظت سولفید می‌باشد. غلظت سولفید تا مقدار غلظت نهایی یعنی  $S_{lim}$  افزایش می‌یابد. در شرایط تعادل یعنی هنگامی که تغییرات غلظت نسبت به زمان برابر صفر و  $N$  مساوی  $0/96$  گردد، رابطه (۱) را می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$(S)_{lim} = \frac{0.33 \times 10^{-3} (EBOD)}{(sV)^{0.375}} \times \frac{d_m}{r} \quad (2)$$

برای محاسبه تولید سولفید در یک مجرای شبکه فاضلاب طویل با شیب و جریان یکنواخت می‌توان معادله زیر را که انتگرال معین از رابطه فوق می‌باشد، به کار برد:

$$S_2 = (S)_{lim} - \frac{S_{lim} - S_1}{\log^{-1} \left[ \left( \frac{(sV)^{0.375} \Delta t}{1.15 d_m} \right) \right]} \quad (3)$$

که در آن،  $\Delta t$  زمان لازم برای رسیدن جریان از بالادست مجرا به پایین دست آن،  $S_1$  غلظت سولفید در بالا دست مجرا بر حسب میلی‌گرم در لیتر،  $S_2$  غلظت سولفید در پایین دست مجرا بر حسب میلی‌گرم در لیتر است.

مدل دوم: تحقیقی در استرالیا به منظور پیش‌بینی مقدار تولید سولفید توسط Thistlethwayte در سال ۱۹۷۲ در شبکه‌های فاضلاب ثقیل انجام شد که این مدل در رابطه‌ی (۴) ارائه شده است:

$$\Delta S = \left( \frac{L}{V} \right) (G_s) \times \left[ 1 - \frac{K_{O_2 S} (O_D)}{60 \left( \frac{d}{dt} [BOD_5] + 2G_s \right)} \right] \quad (4)$$

که در آن  $\Delta S$  افزایش غلظت سولفید در طول مسیر (mg/l)،  $L$  طول شبکه فاضلاب (m)،  $V$  سرعت جریان (m/s)،  $G_s$  آهنگ تولید سولفید در شبکه فاضلاب (mg/l-second)،  $K_{O_2 S}$  آهنگ جذب اکسیژن توسط فاضلاب به ازای هر میلی‌گرم در لیتر کمبود اکسیژن (mg/l-per minute)،  $O_D$  میزان کمبود اکسیژن محلول فاضلاب (mg/l-minute) و  $d(EBOD)/dt$  اکسیژن مورد نیاز لحظه‌ای که تقریباً برابر با  $(BOD_5) (6 \times 10^{-6})$  (mg/l-second) می‌باشد. مقدار  $G_s$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G_s = (1.43 \times 10^{-7}) V_r^{F_1} [BOD_5]^{0.8} [SO_4]^{0.4} (1.139)^{(T-20)} \quad (5)$$

که در آن  $(10^{-6} \times 1/43)$  ضریب تجربی،  $V$  سرعت فاضلاب (m/s)،  $F_1$  ضریب تولید سولفید در واحد سطح جداره در شبکه ثقیل (براساس تغییرات عمق جریان) به نسبت سطح لوله که به طور پیوسته در زیر جریان فاضلاب قرار دارد، می‌باشد.  $F_1$  می‌تواند در حدود  $0/8$  باشد که به شرایط جریان بستگی دارد. برای متوسط جریان در آب و هوای خشک برابر  $0/88$  است،  $r$  شعاع هیدرولیکی جریان (m)،  $BOD_5$  اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی فاضلاب (mg/l)،  $SO_4$  غلظت سولفات (mg/l)،  $1.139^{T-20}$  ضریب تجربی برای اثرات دما و  $T$  دما ( $^{\circ}C$ ) می‌باشد. مقدار جذب اکسیژن توسط فاضلاب ( $K_{O_2 S}$ ) نیز از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_{O_2 S} = (0.121) (F_{dt}) \left( \frac{(sV)^{0.408}}{d_m (0.66)} \right) \quad (6)$$

که در آن  $0/121$  ضریب تجربی،  $F_{dt}$  ضریب میزان هوادهی در فاضلاب (با سطح-لایه فعال) به نسبت میزان هوادهی در آب تمیز ( $0/2-0/3$ ) می‌باشد،  $S$  شیب شبکه فاضلاب (m/m)،  $V$  سرعت فاضلاب (m/s) و  $d_m$  متوسط عمق هیدرولیکی جریان (m) می‌باشد (Thistlethwayte, ۱۹۷۲).

مدل سوم: Delgado و همکارانش در سال ۱۹۹۹ در مطالعه‌ای به بررسی سولفید (II)  $S$  تولید شده در شبکه فاضلاب بازسازی شده در منطقه ترنیف اسپانیا (Tenerife (Spain) پرداختند. برای انجام این تحقیق پارامترهای دما، pH،  $^{\circ}DO$ ، ORP،  $S^{2-}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $COD_T$ ،  $COD_5$ ،  $TSS$ ،  $TOC$ ،  $Turbidity$  در  $TURBIDITY$  (Reclaimed Urban Wastewater) به طول ۶۱ کیلومتر، از نوامبر سال ۱۹۹۴ تا ژوئن ۱۹۹۵ اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها هر دو هفته در ۱۲ موقعیت متفاوت در طول شبکه، گرفته شدند. هدف از بررسی انجام شده، ارائه یک معادله تجربی که نشان دهنده‌ی ارتباط بین غلظت (II)  $S$  در فاضلاب با پتانسیل اکسیداسیون احیا (ORP) و سولفات بود. که در نهایت طی تلاش‌های انجام شده توانستند یک ارتباط مستقیم طبق معادله (۷) بین ORP فاضلاب احیا شده و غلظت سولفید بیابند (Delgado, ۱۹۹۹).

$$ORP = -208 - 28.53 \log \left[ \frac{[S(II)]}{[SO_4^{2-}]} \right] \quad (7)$$

**مدل چهارم:** در مطالعه‌ای دیگری که جهت پیش‌بینی سرعت انتشار  $H_2S$  در شبکه‌های فاضلاب ثقلی توسط Ori Lahav و همکارانش در سال ۲۰۰۶ انجام شد، دریافته‌اند که تولید سولفید هیدروژن در شبکه‌های ثقلی بستگی به سرعت انتشار  $H_2S$  از فاز آبی به فاز گازی لوله دارد. در این مقاله، برای پیش‌بینی سرعت انتشار  $H_2S$  از شبکه فاضلاب ثقلی با استفاده از مفاهیمی که از نظریه آمیختگی گرفته شده است، روش متفاوتی ارائه گردید. در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت انتشار  $H_2S$  در شبکه فاضلاب ثقلی از تغییرات سرعت متوسط ( $G=ysv/\mu$ ؛ چگالی مایع،  $S$  شیب،  $\mu$  ویسکوزیته مطلق و  $V$  سرعت متوسط است) استفاده شد که نشان دهنده شرایط آمیختگی در جریان ثقلی است. طبق این روش معادله انتشار شکل گرفت. این معادله، با انجام ۲۰ آزمایش در مجرای فاضلاب ثقلی آزمایشگاهی به طول ۲۷ متر و قطر ۰/۱ متر ( $D=0.1m$ ) در شرایط هیدرولیکی مختلف تایید و تنظیم شد، نتایج به دست آمده وابستگی روشن سرعت جریان‌سازی سولفید به  $G_1$  ( $R^2=0.94$ ) را با معادله انتشار کل به صورت زیر نشان داد:

$$\frac{-d[S_T]}{dt} = 8 \times 10^{-7} \sqrt{ySV/\mu} \frac{w}{A_{cs}} 1.024^{(T-20)} \left( \frac{S_T}{1 + \frac{K_{s1}}{10^{-pH}} + \frac{K_{s1}K_{s2}}{10^{-2pH}}} - P_{PH_2S} K_H \right) \quad (\text{A})$$

که در این رابطه  $S_T$  غلظت سولفید کل در فاز آبی برحسب  $mg/l$  است،  $y$  چگالی مایع برحسب  $(Nm^{-3})$ ،  $\mu$  ویسکوزیته مطلق بر حسب  $(Nsm^{-2})$ ،  $w$  پهنای سطح جریان بر حسب  $m$ ،  $A_{cs}$  مساحت سطح مقطع برحسب  $m^2$ ،  $T$  دما بر حسب  $^{\circ}C$ ،  $K_{s1}$  و  $K_{s2}$  ثابت‌های تعادلی ترمودینامیکی،  $K_H$  ثابت هنزی بر حسب  $atm^{-1} mol$  و  $P_{PH_2S}$  فشار نسبی  $H_2S$  در اتمسفر شبکه فاضلاب برحسب  $atm$

می‌باشد (Ori Lahav و همکاران، ۲۰۰۶).

**مدل پنجم:** همچنین تحقیق دیگری در این زمینه توسط Harlina و همکارانش در سال ۲۰۱۱ بر روی شبکه فاضلاب مالزی انجام شد. هدف آن‌ها پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه فاضلاب در شرایط هوایی و بی‌هوایی بود. به این منظور، داده‌های بدست آمده از مطالعه میدانی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده رگرسیون، مدلی برای پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه فاضلاب پیشنهاد شد که به شرح زیر می‌باشد و ضرایب پیشنهادی  $a=0.265$  و  $b=0.5$  است.

$$\Delta S = 0.265 C^{0.5} 1.07^{(T-20)} t_H (A/V) \quad (9)$$

که  $\Delta S$  افزایش در مقدار  $S^2$  برحسب میلی‌گرم،  $C$  غلظت مواد آلی یا کل COD یا BOD،  $T$  دما بر حسب  $^{\circ}C$ ،  $A$  مساحت داخل لوله برحسب  $m^2$ ،  $V$  حجم کل لوله برحسب  $m^3$ ،  $t_H$  زمان ماند برحسب ساعت و  $a$  و  $b$  ضرایب هستند که در بیشتر معادلات،  $b=1$  و  $a$  بستگی به پارامتر ماده آلی استفاده شده COD و BOD<sub>5</sub> و کیفیت فاضلاب مطالعه شده، دارد.

نتایج نشان داد که تحت شرایط هوایی غلظت سولفید تحلیل یافته و در مقابل، در شرایط بی‌هوایی غلظت سولفید به بیش از حد آستانه کشنده ( $0.45 mg/l$ ) رسیده است و همچنین بیان شد که تولید سولفید در شبکه فاضلاب تابعی از مشخصات کیفیت فاضلاب و نیز خصوصیات هیدرولیکی شبکه فاضلاب است (Harlina و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین مطالعات دیگری در زمینه پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های فاضلاب انجام شده که به دلیل محدودیت معادلات حاصل از این پژوهش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مدل‌های پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب

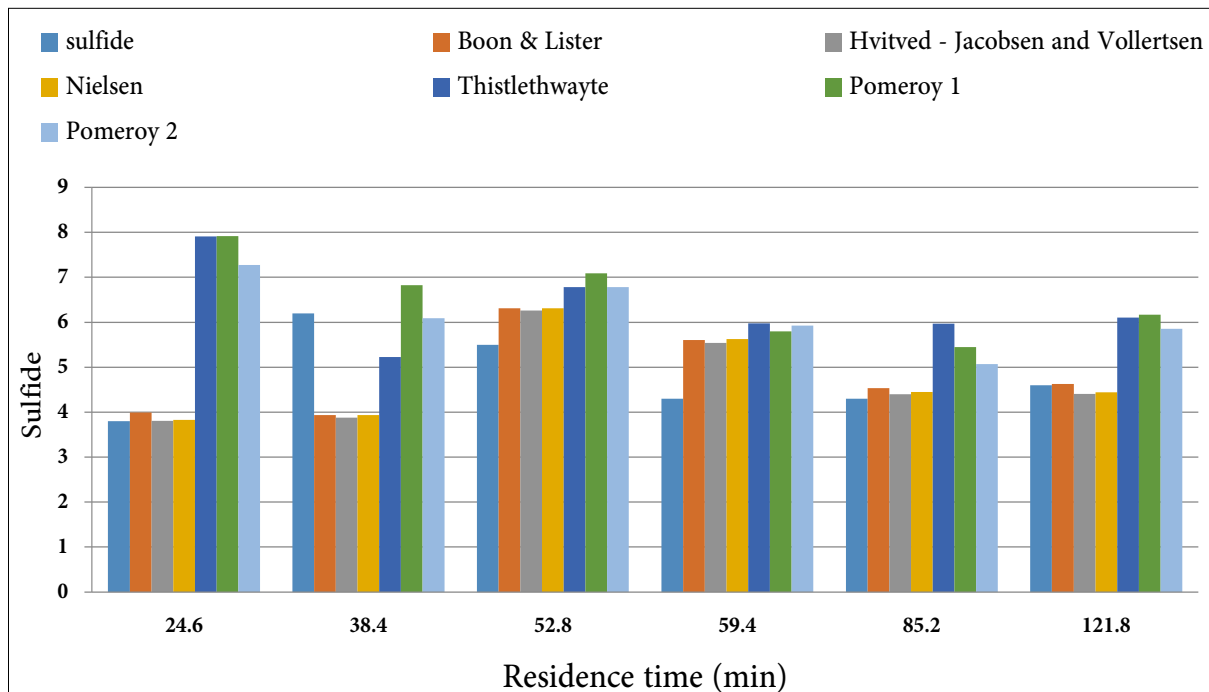
منابع	معادله و پارامترهای مدل
Thistlethwayte (۱۹۷۲)	$\Delta S = \left( \frac{L}{V} \right) (G_s) \times \left[ 1 - \frac{K_{O_2} S (O_D)}{60 \left( \frac{d}{dt} [BOD_5] + 2G_s \right)} \right]$ <p><math>L</math> طول شبکه (m)، <math>V</math> سرعت جریان (m/s)، <math>G_s</math> آهنگ تولید سولفید در شبکه فاضلاب (<math>mg/l</math>-second)، <math>K_{O_2}</math> آهنگ جذب اکسیژن توسط فاضلاب (<math>mg/l</math>-per minute)، <math>O_D</math> میزان کمبود اکسیژن محلول فاضلاب (<math>mg/l</math>-minute)، <math>d/dt [EBOD]</math> اکسیژن مورد نیاز لحظه‌ای تقریباً برابر با (<math>BOD_5</math>) (<math>5 \times 10^{-3}</math>) (<math>mg/l</math>-second)</p>
	$G_s = (1.43 \times 10^{-7}) V_r^{F_1} [BOD_5]^{0.8} [SO_4]^{0.4} (1.139)^{T-20}$ <p><math>r</math> ضریب تجربی، <math>V</math> سرعت فاضلاب (m/s)، <math>F_1</math> ضریب تولید سولفید در واحد سطح جداره شبکه ثقلی، <math>1.43 \times 10^{-7}</math> شعاع هیدرولیکی جریان (m)، <math>BOD_5</math> اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی فاضلاب (mg/l)، <math>SO_4</math> غلظت سولفات (mg/l)، <math>(1.139)^{T-20}</math> ضریب تجربی برای اثرات دما، <math>T</math> دما (<math>^{\circ}C</math>)، <math>K_{O_2} S</math> مقدار جذب اکسیژن توسط فاضلاب</p>
	$K_{O_2} S = (0.121) (F_{dt}) - \frac{(sV)^{0.408}}{d_m (0.66)}$ <p><math>0.121</math> ضریب تجربی، <math>F_{dt}</math> ضریب میزان هوادهی در فاضلاب نسبت به آب تمیز، <math>S</math> شیب شبکه فاضلاب (m/m)، <math>V</math> سرعت فاضلاب (m/s)، <math>d_m</math> متوسط عمق هیدرولیکی جریان (m)</p>

منابع	معادله و پارامترهای مدل
Thistlethwayte (۱۹۷۲)	$\frac{[ds]}{[dt]} = 0.5 \times 10^{-3} u [BOD_5^{0.8}] [SO_4^{0.4}] 1.14^{T-20} r^{-1}$ U سرعت جریان (m/s)، BOD <sub>5</sub> (mg/lit)، SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> سولفات (mg/lit)، r شعاع هیدرولیکی (m)
lister و Boon (۱۹۷۵)	$\Delta S = 0.228 \times 10^{-3} COD 1.07^{(T-20)} t_h \left(\frac{A}{V}\right)$ COD (mg/lit)، t <sub>h</sub> زمان ماند (hour)، T دما (C)، A مساحت داخلی لوله (m <sup>2</sup> )، V حجم کل لوله (m <sup>3</sup> )
Parkhurst و Pomeroy (۱۹۷۶)	$\frac{[ds]}{[dt]} = M[BOD](1.07)^{(T-20)} r^{-1} - N(SV)^{0.375} (S) d_m^{-1}$ M ضریب جریان موثر سولفید، r شعاع هیدرولیکی، N ضریب ثابت تجربی، S شیب (m/m)، V سرعت جریان (m/s)، S غلظت سولفید کل (mg/lit)، T دما (C)
Pomeroy و Parkhurst (۱۹۷۷)	$\frac{d[S_T]}{dt} = 0.32 \times 10^{-3} [BOD] (1.07)^{(T-20)} - 0.64 (SV)^{(3/8)} [S_T] d_m^{-1}$ BOD (mg/lit)، T دما (C)، S شیب (m/m)، V سرعت جریان (m/s)، S <sub>T</sub> سولفید کل (mg/lit)، d <sub>m</sub> شعاع هیدرولیکی
	$\frac{d(S)}{dt} = M(EBOD)r^{-1} - N(sV)^{0.375} (S) d_m^{-1}$ M ضریب جریان موثر سولفید، r شعاع هیدرولیکی جریان (m)، N ضریب ثابت تجربی، S غلظت کلی سولفید (mg/l)، s، گرادیان انرژی جریان (m/m)، V سرعت جریان (m/s)، d <sub>m</sub> عمق متوسط هیدرولیکی (m)، M و N ضرایب
Parkhurst و Pomeroy (۱۹۷۷)	$(S)_{lim} = \frac{0.33 \times 10^{-3} (EBOD)}{(sV)^{0.375}} \times \frac{d_m}{r}$ EBOD اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی موثر (mg/l)
	$S_2 = (S)_{lim} - \frac{S_{lim} - S_1}{\log^{-1} \left[ \left( \frac{(sV)^{0.375} \Delta t}{1.15 d_m} \right) \right]}$ t زمان لازم برای رسیدن جریان از بالادست مجرا به پایین دست آن، S <sub>1</sub> غلظت سولفید در بالا دست مجرا (mg/l)، S <sub>2</sub> غلظت سولفید در پایین دست مجرا (mg/l)
Hvitved-Jacobsen Vollertsen و (۱۹۹۸)	$\Delta S = 1.5 \times 10^{-3} (COD - 50)^{0.5} * 1.07^{(T-20)} * t_h * (A/V)$ COD (mg/lit)، t <sub>h</sub> زمان ماند (hour)، T دما (C)، A مساحت داخلی لوله (m <sup>2</sup> )، V حجم کل لوله (m <sup>3</sup> )
Delgado و همکارانش ۱۹۹۹	$ORP = -208 - 28.53 \log \frac{[S(II)]}{[SO_4^{2-}]}$ ORP پتانسیل اکسیداسیون و احیا (mV)، S(II) غلظت سولفید (mg/l)، SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> غلظت سولفات (mg/l)
Nielsen و همکاران (۱۹۹۸)	$rs = a (COD_{sol} - 50)^{0.5} 1.03^{(T-20)}$ R <sub>s</sub> نرخ تولید سولفید (gS/m <sup>2</sup> h)، a برابر ۰/۰۲۶۵، b برابر ۰/۵، COD (mg/lit)، T دما (C)
Ori Lahav و همکارانش (۲۰۰۶)	$\frac{-d[S_T]}{dt} = 8 \times 10^{-7} \sqrt{ySV} \frac{w}{A_{cs}} 1.024^{(T-20)} \left( \frac{S_T}{1 + \frac{K_{s1}}{10^{-pH}} + \frac{K_{s1}K_{s2}}{10^{-2pH}}} - P_{pH_2S} K_H \right)$ S <sub>T</sub> غلظت سولفید کل در فاز آبی (mg/l)، y چگالی مایع (Nm <sup>-3</sup> )، μ ویسکوزیته مطلق (Nsm <sup>-2</sup> )، w پهنای سطح جریان (m)، A <sub>cs</sub> مساحت سطح مقطع (m <sup>2</sup> )، T دما (C)، K <sub>s1</sub> و K <sub>s2</sub> ثابت‌های تعادلی ترمودینامیکی، K <sub>H</sub> ثابت هنری (mol <sup>-1</sup> atm <sup>-1</sup> )، PPH <sub>2S</sub> فشار نسبی H <sub>2</sub> S در اتمسفر شبکه فاضلاب (atm)
Harlina و همکارانش (۲۰۱۱)	$\Delta S = 0.265 C^{0.5} 1.07^{(T-20)} t_h \left(\frac{A}{V}\right)$ C غلظت مواد آلی یا کل COD یا BOD، T دما بر حسب C°، A مساحت داخلی لوله (m <sup>2</sup> )، V حجم کل لوله (m <sup>3</sup> )، t <sub>h</sub> زمان ماند (h)، a و b ضرایب تجربی، b برابر ۱، a بستگی به پارامتر ماده آلی و کیفیت فاضلاب

## نتایج مطالعه موردی با استفاده از مدل‌های ارائه شده در منطقه غرب مشهد

این پژوهش، از شاخص میانگین قدر مطلق انحرافات (MAD)، میانگین مجذور خطاها (MSE)، جذر میانگین خطاها (RMSE)، میانگین قدر مطلق درصد خطاها (MAPE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که مدل Boon و Lister، Hvitved-Jacobsen و Vollertsen و مدل Nielsen در مدل‌سازی تولید سولفید در این پژوهش برتری قابل توجهی نسبت به سایر مدل‌ها دارد (شکل ۲). لذا می‌توان ادعا کرد این مدل‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند برای تغییرات تولید سولفید در دیگر مناطق شهر مشهد مورد استفاده قرار گیرد. میانگین قدر مطلق انحرافات (MAD) در مدل‌های Boon و Lister، Hvitved-Jacobsen و Vollertsen و مدل Nielsen به ترتیب ۱/۰۴۵، ۱/۰۳۴ و ۱/۰۴ می‌باشد. همچنین میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) در این مدل‌ها به ترتیب ۰/۲۸۷، ۰/۲۸۶ و ۰/۲۸۷ درصد می‌باشد.

به منظور پیش‌بینی تولید سولفید و همچنین صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی تولید سولفید، پژوهشی در سال ۱۳۹۲ بر روی منطقه غرب مشهد به دلیل مشهود بودن آثار خوردگی در آن انجام شد. طی یک ماه نمونه‌برداری از ۶ ایستگاه پایش در مسیری به طول ۵۰ کیلومتر بر روی کلکتورهای این منطقه مشخصات کیفیت فاضلاب نظیر BOD، COD، DO، pH، ORP، دما، سولفید کل، سولفید محلول و سولفات تعیین مقدار شد. به منظور سنجیدن دقت مدل‌های ارائه شده، تغییرات غلظت سولفید فاضلاب در ایستگاه‌های پایش با استفاده از مدل‌های ارائه شده در این پژوهش با مقادیر اندازه‌گیری شده در شبکه فاضلاب مقایسه گردیدند. همچنین دقت هر یک از مدل‌های انتخاب شده در



شکل ۲- متوسط غلظت سولفید و بررسی مقادیر پیش‌بینی شده برای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب (منطقه غرب مشهد)

که شاخص ORP و pH می‌تواند به عنوان یک شاخص موثر در ارزیابی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده شود که دلیل آن ارتباط مستقیمی که بین سولفید و ORP وجود دارد. بیشترین نرخ سولفید تولید شده در pH بین ۶ تا ۸/۵ و ORP ۵۰- تا ۲۵۰- میلی‌ولت اتفاق می‌افتد. آنچه در بهره‌برداری و مدیریت شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب اهمیت دارد، تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی در لحظه می‌باشد. لذا مدل‌های مبتنی بر پارامترهای COD و BOD بیشتر جنبه انجام مطالعات فنی دارد و از نظر جنبه بهره‌برداری مدل‌های مبتنی بر ORP دارای اهمیت ویژه می‌باشد. بنابراین استفاده از معادلات ارائه شده در این پژوهش به منظور پیش‌بینی تولید سولفید و در نتیجه برآورد خوردگی به عنوان یک ابزار مفید در طراحی شبکه‌های فاضلاب محسوب می‌شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود با توجه به هدف مورد نظر از مدل‌های ارائه شده، استفاده گردد. همچنین نتایج مطالعه‌ای که به منظور صحت‌سنجی مدل‌ها انجام شد، نشان می‌دهد که به طور کلی مدل‌های Boon، Nielsen، Lister، و Hvitved-Jacobsen و Vollertsen پیش‌بینی‌های صحیح‌تری را در منطقه غرب مشهد نسبت به دیگر مدل‌های ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد.

مشکلات ناشی از سولفید هیدروژن (خوردگی و بوی نامطبوع) یکی از چالش‌ترین مشکلات مربوط به عملیات بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است. داشتن مدلی مناسب برای پیش‌بینی تولید سولفید در مرحله طراحی و عملیاتی در جهت برنامه‌ریزی بهینه برای استراتژی‌های تعمیر و نگهداری شبکه‌های فاضلاب بسیار مفید است. در این پژوهش به بررسی مدل‌های پیش‌بینی تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تولید سولفید در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب تابعی از خصوصیات هیدرولیکی و مشخصات کیفی فاضلاب است. این پارامترها که در اکثر مدل‌های ارائه شده به عنوان پارامتر موثر در تولید سولفید استفاده شده است عبارتند از: شیب، سرعت جریان، زمان ماند، عمق فاضلاب، ORP، دما، COD، سولفات و pH. این در حالی است که در اکثر مدل‌های ارائه شده در این پژوهش غلظت مواد آلی (COD و BOD) به عنوان پارامتر اصلی در تعیین میزان تولید سولفید هیدروژن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در نظر گرفته شده است. البته این نکته قابل ذکر است

#### پی‌نوشت

- 1- Biochemical Oxygen Demand
- 2- Oxidation Reduction Potential
- 3- Sulfate Reducing Bacteria
- 4- Chemical Oxygen Demand
- 5- Dissolved Oxygen

sulphide in rising main sewer and its prevention by injection of oxygen. *Progress in Water Technology*. 7(2):289-300.

Beardsley C. W. 1949. Suppression of sewer slimes. *Sewage Works Journal*. 21: 1-13.

Delgado S., Alvarez .M. Rodriguez-Gomez L.E. and Aguiar E. 1999. H<sub>2</sub>S generation in a reclaimed urban wastewater pipe. Case study: Tenerife (Spain). *Water Res*, 33(2): 539-547.

Derek C. W. S. 1995. The control of septicity and odors in sewerage systems and at sewage treat-

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از مساعدت شرکت آب و فاضلاب مشهد در انجام این پژوهش، خصوصاً مدیریت محترم عامل شرکت آب و فاضلاب مشهد، جناب آقای مهندس سید علیرضا طباطبائی تشکر و قدردانی می‌کنند.

#### منابع

- ATV. 1992 ATV-A 116: Besondere Entwässerungsverfahren, Unterdruckentwässerung – Druckentwässerung. GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., D-53773 Henef.
- Boon A.G. 1995. Septicity in Sewers: Causes Consequences and containment, *Water Sic Technol*, 31(7):237-253.
- Boon A. G., and Lister A. R. 1975. Formation of



1998. Sulfide production and wastewater quality in pressure mains. *Water Science and Technology*. 37(1) 97-104.
- Ori Lahav, Amitai Sagiv, Eran Friedler. 2006. A different approach for predicting H<sub>2</sub>S(g) emission rates in gravity sewers. *Science Direct*. 40:259-266.
- Office of Water Service (OWS). 2004. Maintaining water and sewerage systems in England and Wales. Our proposed approach for the 2004 periodic review. London: Office of Water Service.
- Pomeroy R. D. and Parkhurst J.D. 1977. The Forecasting of sulfide buildup rates in sewer. *Water Technol.* 9(3): 621-628.
- Pomeroy D. R. 1959. Generation and control of sulphide in filled pipes. *Sewage and Industrial Wastes* 31:1082-1095.
- Pomeroy R.D. and Bowlus F. 1946. Progress report on sulfide control research. *Sewage Works J.* 18: 597-640.
- Parkhurst J. D., and Pomeroy R. D. 1976. The Forecasting of Sulfide Build-up Rates in Sewers. Presented at Sydney Conference of international Association of Water Pollution Research.
- Richard R. D. 1972. Fundamental of odor control. *Journal Water Pollution Control Federation*. 44: 583-594.
- Recio Oviedo. E. Johnson D. and Shipley H. 2012. Evaluation of hydrogen sulphide concentration and control in a sewer system. *Environ Technol.* 33(10):1207-1215.
- Su L. Zhao Y. 2013. Chemical reduction of odour in fresh sewage sludge in the presence of ferric hydroxide. 34(2): 165-172.
- Thistlethwayte D. K. B. 1972. The control of sulphides in sewerage systems (Book style). Butterworth. Sydney, Australia.
- Valix M., Zamri D., Mineyama H., Cheung W.H., Shi J., and Bustamante H. 2012. Microbiologically induced corrosion of concrete and protective coatings in gravity sewers, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20:433-438.
- ment works operated by Anglian water service limited. *Water Science and Technology*. 31: 283-292.
- Edwards V. A., Velasco C. P. and Edwards K. J., 2001. Hydrogen sulfide – the relationship of bacteria to its formation, prevention, and elimination. Available online at: [www.alken-murray.com/h2srem2.htm](http://www.alken-murray.com/h2srem2.htm).
- Eliassen R., Heller A. N. and Kisch G. 1949. The effect of chlorinated hydrocarbons on hydrogen sulfide production. *Sewage Works Journal*. 21: 457-474.
- Faridah O., Shhahram M., Shahin G., and Soenita H. 2011. Suppressing dissolved hydrogen sulfide in a sewer network using chemical methods. *Scientific research and essays*. 6: 3601-3608.
- Fu X. Shen W. 1990. *Physical-Chemistry*. Vol. China Higher Education Publisher. 247-248.
- Hadjianghelou H., Hadjianghelou A. and Papachristou E. 1984. Über die Berechnung der zu erwartenden Sulfidbildung in Abwasserdruckleitungen. *Vom Wasser*, 62: 267-278.
- Harlina A., Mohd Omar A.K. and Noril I. 2011. Empirical prediction on sulphide generation in Malaysia sewage. *International Conference on Environment Science and Engineering IPC-BEE*. Singapore.
- Hvitved-Jacobsen T. and Vollertsen J. 1998. An intercepting sewer from Dortmund to Dinslaken. Germany–Prediction of wastewater transformations during transport, report submitted to the Emschergenossenschaft. pp35.
- Kouzeli-Katsiria. A. Kartsonasa N. Priftisa A. 1988. Assessment of the toxicity of heavy metals to anaerobic digestion of sewage sludge. *Environ Technol.* 9(4):261-270.
- Michael H. G., 2007. Oxidation-Reduction Potential and Wastewater Treatment. *Interstate Water Report*. New England Interstate Water Pollution Control Commission. 4: 15.
- Nielsen H., Raunkjaer K. and Hvitved-Jacobsen T.

- Yang W., Vollertsen J. and Hvitved-Jacobsen T. 2005. Anoxic sulfide oxidation in wastewater of sewer networks. *Water Sci. Technol.* 52(30): 191-199.
- Yongsiri C., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. and Tanaka N. 2003. Introducing the emission process of hydrogen sulfide to a sewer process model. *Water Sci. Technol.* 47(4): 85-92.