علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره شانزدهم، شماره ویژه ۹۳

مخاطرات حفر تونل در زمین های حاوی گاز H_2S

(مطالعه موردی تونل انتقال آب اسپر)

حسین میرمحرابی [۱]

محمد غفوری [۲*]

Ghafoori@ferdowsi.um.ac.ir

غلامرضا لشکری پور [۳]

جعفر حسن پور [٤]

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۸ **تاریخ پذیرش:۸۹/۷/۲۸**

چکیده

زمینه و هدف: یکی از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی و زیست محیطی در حفر تونل ها، مواجه شدن با برخی گازهای طبیعی مانند سولفید هیدروژن (H_2S) در زمان حفاری می‌باشد. حل مخاطرات و چالش‌های مربوط به ورود این گاز به تونل ها بسیار دشوار و پرهزینه است. یکی از وظایف مهم در این شرایط، پیش بینی و برآورد میزان خطر گاز H_2S در فضاهای زیرزمینی و تعیین روش مناسب جهت مقابله با مشکلات مهندسی و زیست محیطی آن است. تونل انتقال آب اسپر در سازندهای حاوی منابع هیدروکربوری حفاری شده و از نمونه هایی است که در طی احداث آن با نشت گاز H_2S مواجه شده‌اند. دراین مقاله مخاطرات، ویژگی ها، قوانین ایمنی، منشا زمین شناسی و پیش بینی خطر گاز H_2S و راهکارهای کاهش خطرات و مشکلات حفاری تونل، با توجه به تجربیات به دست آمده از تونل اسپر ارایه شده است.

روش بررسی: برای بررسی منشا گاز H_2S و انتخاب بهترین روش ها جهت مقابله با خطرات و مشکلات آن، علاوه بر بررسی تجارب موجود میزان غلظت این گاز در هوا به‌طور پیوسته در سه زمان شروع، وسط و پایان هر شیفت کاری اندازه گیری گردید. هم‌چنین نسبت به نمونه گیری از آب و هوای آلوده و ارسال آن به آزمایشگاه های مخصوص جهت آنالیز شیمیایی نمونه ها اقدام گردید. در همان موقع غلظت گاز مذکور به صورت هم‌زمان در آب و هوای تونل به صورت صحرایی اندازه گیری شد.

یافته ها: تجربیات حاصل از این پروژه نشان داد که میزان گاز موجود در تونل شرایط غیر قابل قبولی را برای کارگران ایجاد نموده است. به منظور پیش بینی خطر گاز H_2S در فضاهای زیرزمینی، می‌توان از شواهدی همانند چشمه‌های گوگردی، آثار مواد آلی در رخنمون‌های سنگی، شیل های آلی، تصاعد بوی گوگرد از سطح شکسته شده تازه سنگ و استشمام بوی گاز در زمان حفاری گمانه‌ها استفاده نمود. نتایج آنالیزهای صورت گرفته بیانگر اینست که گاز سولفید هیدروژن غالبا به همراه آب زیرزمینی وارد تونل می‌گردد و میزان قابل توجهی از آن در همان لحظات اولیه از آب آزاد می‌شود. منشا این گاز با توجه به بررسی ها مرتبط با تشکیلات نفتی منطقه است.

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد *(مسئول مکاتبات).

۳- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- استادیار دانشکده علوم، دانشگاه تهران، مهندسین مشاور ساحل، تهران.

نتیجه گیری: همواره مواجهه با این گاز را در محیط های زمین شناسی مرتبط با میدان های نفتی باید جدی گرفت. هم‌چنین با توجه به این‌که این گـاز به صورت محلول در آب وارد تونل می‌شود و به محض ورود از آن آزاد می‌گردد برای کاهش خطرات و مشکلات حفاری، ناچـار از روش‌هـای کنتـرل ورود آب زیرزمینی به داخل تونل، رقیق‌سازی غلظت گاز و آموزش کارکنان و تجهیزات کمکی استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی: زمین‌های گازدار، مخاطرات زمین‌شناسی، حفاری مکانیزه، سولفید هیدروژن

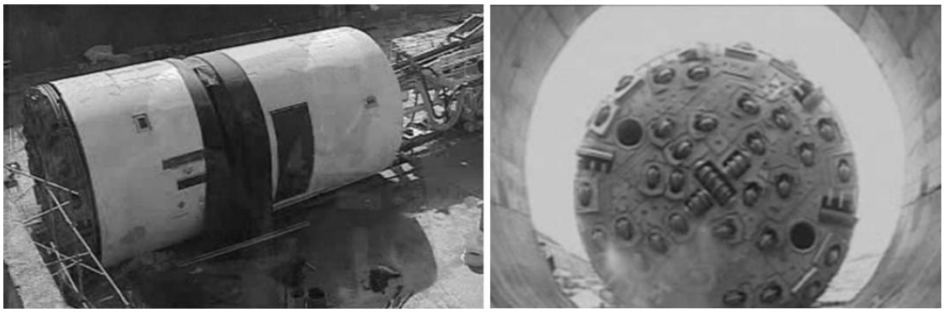
مقدمه

ورود گاز H_2S به فضاهای زیرزمینـی یکـی از مخـاطرات مهـم زمین‌شناسی در پروژه‌های تونل‌سازی می‌باشـد (۱). تونـل‌سـازی در مناطق مرتبط با هیدروکربن‌ها نیازمند شـیوه‌هـا و ملاحظـات خاصـی است (۲). برخورد با گاز سـولفید هیـدروژن در محـیط هـای شـغلی و عمـومی مـی توانـد ناشـی از بسـیاری از صـنایع شـامل پتروشـیمی، کشاورزی و تصفیه فاضـلاب باشـد (۳). سـولفید هیـدروژن در غلظـت های بالا (تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) در آب‌های زیرزمینی شهر کویـت و حومه آن در عمق های نسبتا کـم گـزارش شـده اسـت (۴). دومـین نگرانی مهم پروژه خط آهن متـروی لـس آنجلـس مربـوط بـه حضـور طبیعی گازهای زیرسطحی مخصوصا متـان و سـولفید هیـدروژن بـوده است (۱). شماری از پروژه هـای تونـل سـازی در ایـالات متحـده نیـز موضوعات مرتبط با مواجهـه بـا گـاز H_2S در زمـان سـاخت را اعـلام نموده اند (۵). در حفاری تونل های آزاد راه تهران- شـمال وجـود گـاز H_2S به دو صورت انتشار از توده سنگ خشـک و تصـاعد از آب هـای ورودی به تونل گزارش شده است (۶). به‌طور تجربی ثابت شـده اسـت که اگر مقدار گـاز H_2S در تونـل بـیش از ۱۰ ppm باشـد، مشـکلات عدیده‌ای را برای کارکنان و ماشین‌آلات (به‌دلیل خورندگی) موجود در تونل، ایجاد می‌نماید. در این مقاله مشکلات حفاری تونل اسـپر کـه در طی ساخت آن با مشکل نشت گاز H_2S مواجه شده‌اند، مـورد بحـث و بررسی قرار گرفته است. در این تونل نشـت گـاز مـذکور سـبب توقـف عملیات حفاری به مدت چندین ماه و صرف هزینه بسیار سنگین بـرای سازندگان تونل گردید. تجربیات به دست آمده از تونل فوق ثابت نمـود که اگر قبل از حفاری تونل، خطر وجـود گـاز H_2S در طـی مطالعـات زمین‌شناسی مهندسی شناسایی و راهکارهـای مناسـب بـرای کـاهش خطرات و مشکلات حفاری در محیط H_2S لحاظ می‌شـد، ایـن عمـل سبب پایین آمدن خطرها و کاهش هزینه‌هـای تونـل‌سـازی بـه مقـدار قابل ملاحظه‌ای می‌گردید.

در این مطالعه ابتدا مشخصات زمین شناسی تونل مورد بررسـی قرار گرفته و در ادامه به منظور آشنایی بیشتر با گاز H_2S، مشخصات، منشا زمین شناسـی، اثـرات آن بـر سـلامتی و قـوانین و اسـتانداردهای ایمنی کار در محیط گاز H_2S به‌طور خلاصه ارایه شـده اسـت. سـپس برنامه مطالعات زمین شناسی مهندسی به منظور شناسـایی خطـر گـاز مذکور و راهکارهای عملی برای کـاهش خطـرات و مشـکلات حفـاری تونل در محیط H_2S به اختصار تشریح شده است.

تونل انتقال آب اسـپر بـه طـول بـیش از ۲۰ کیلـومتر، یکـی از پروژه‌های بـزرگ آب‌رسـانی کشـور اسـت کـه در محـدوده سـاختاری زاگرس در حال حفاری می‌باشد. روش انتخاب شده جهت حفاری ایـن تونل طویـل، ماشـین تونـل‌زنـی[1] یـا TBM از نـوع سـپر دوبـل یـا تلسکوپی می‌باشد که در شـکل شـماره (۱) نمـایی از ایـن ماشـین در تونل مذکور نشان داده شده است. این ماشین‌ها می‌توانند به‌طور هـم-زمان عملیات حفاری و نصب پوشـش بتنـی را انجـام داده و در نتیجـه سرعت پیشرفت عملیـات اجرایـی را افـزایش دهنـد. مشـکلات اصـلی استفاده از این ماشین ها هزینه بالای آن و نیاز به سرمایه گذاری اولیه نسبتا بالا می باشد. ولی این مساله با توجه بـه سـرعت بـالای حفـاری این روش (مخصوصا برای تونل های بلند) قابـل توجیـه بـوده و امکـان دستیابی به قیمت های تمام شده پایین تونل را میسـر مـی‌نمایـد. امـا چنان‌چه به هر دلیلی(مانند مخاطرات زمین‌شناسی و سـایر مشـکلات) پیشروی ماشین دچار کنـدی زیـاد یـا توقـف گـردد، اقتصـادی بـودن استفاده از آن توجیه پذیر نمی‌باشـد. لـذا شناسـایی مخـاطرات زمـین شناسی محتمل در مسیر تونل مانند خطر برخورد به سازندهای گازدار بـرای جلـوگیری از توقـف حفـاری تونـل و کـاهش مشـکلات زیسـت محیطی و هزینه های تونل‌سازی بسیار مهم و تعیین‌کننده می‌باشد.

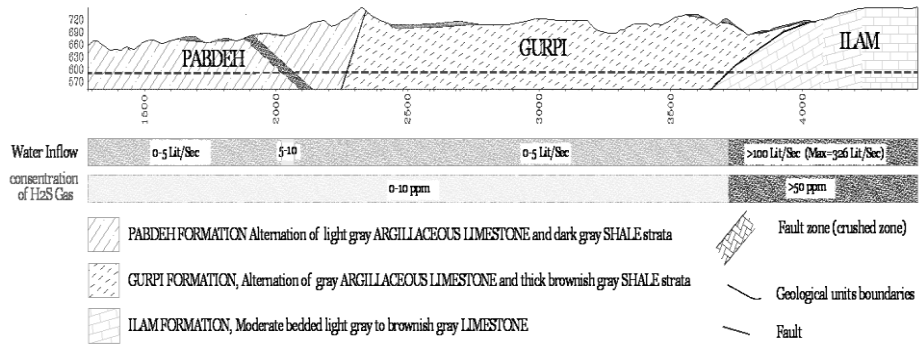
1-Tunnel Boring Machine



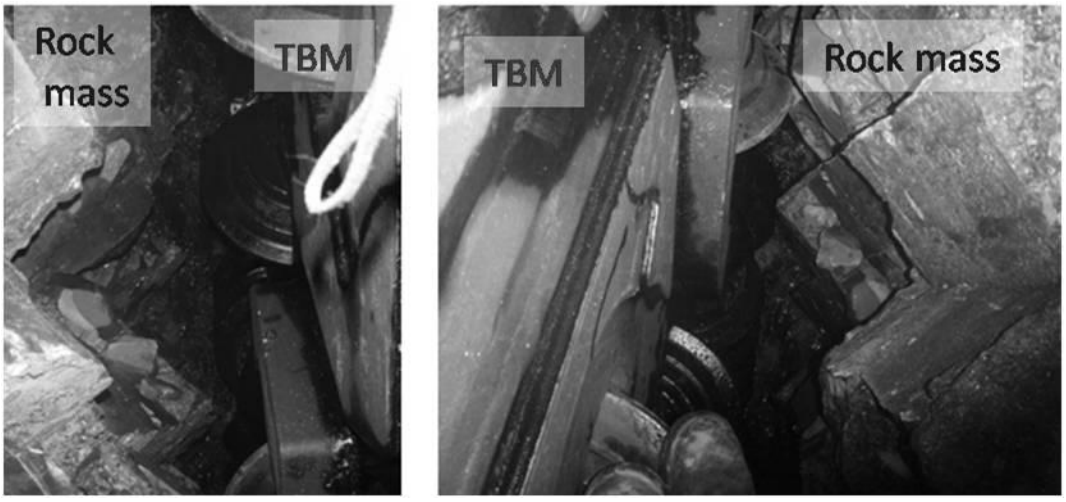
شکل ۱- نمایی از ماشین حفاری TBM استفاده شده در تونل

مشخصات و ویژگی‌های زمین شناسی

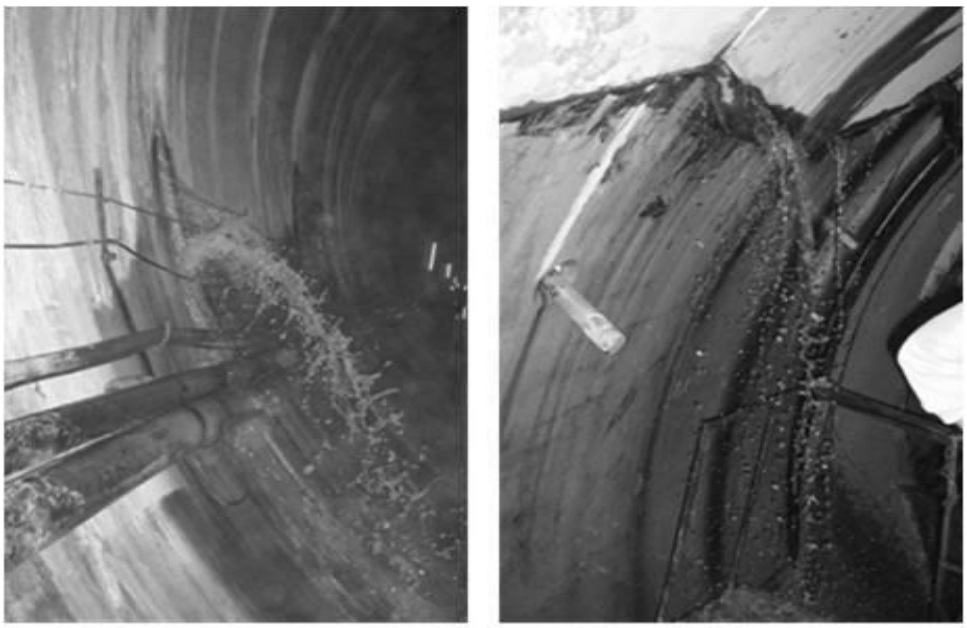
تونل در محدوده ساختاری زاگرس در حال حفاری می‌باشد. در این مطالعه ۴/۵ کیلومتر ابتدایی آن که تا زمان نگارش این مقاله حفاری شده، مورد بررسی قرار گرفته است. برش زمین شناسی ۴/۵ کیلومتر ابتدایی تونل در شکل ۲ ارایه شده است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، توده سنگ‌های تشکیل دهنده مسیر تونل از سازندهای پابده و گورپی (توده سنگ‌های شیلی و شیل آهکی) و سازند ایلام (توده سنگ‌های آهکی) تشکیل شده است (۷). بر اساس مشاهدات انجام شده در طی حفاری تونل، مقدار آب و گاز ورودی به تونل در توده سنگ‌های شیلی (سازندهای گورپی و پابده) بسیار ناچیز و موضعی بوده (مقدار آن ها در شکل ۲ نشان داده شده است)، اما در سنگ‌های آهکی سازند ایلام، هجوم آب و گاز محلول در آن (H_2S) به مقدار زیادی مشاهده گردید (با توجه به اهمیت سازند ایلام در افزایش آب و گاز ورودی به تونل در شکل شماره ۳ نمایی از توده سنگ‌های آهکی سازند ایلام در سینه کار تونل نشان داده شده است). همان طور که در شکل ۲ مشخص است، حداکثر مقدار آب و گاز ورودی به تونل به ترتیب بیشتر از ۳۰۰ لیتر بر ثانیه (در شکل ۴ نمایی از ورود آب از بین درزهای پوشش بتنی نشان داده شده است) و بیشتر از ppm۱۰۰ بوده است و مشکلات عدیده‌ای برای حفاری تونل ایجاد نموده است. از جمله این مشکلات می‌توان به توقف حفاری به مدت چندین ماه و از کار افتادن وسایل الکترونیکی دستگاه TBM به‌دلیل خاصیت خورندگی گاز و نامساعد نمودن محیط کار برای کارکنان حفاری و لزوم استفاده از تجهیزات زیاد و محدود کننده ایمنی (مانند ماسک و کپسول هوا) و نیز افزایش قابل توجه هزینه حفاری، اشاره نمود.



شکل ۲- برش زمین شناسی و مقدار آب و گاز ورودی به تونل در هر یک از سازند های مسیر تونل



شکل ۳- نمایی از توده سنگ‌های آهکی سازند ایلام در سینه کار تونل در جلوی کاترهد TBM



شکل ۴- نمایی از ورود آب حاوی گاز H_2S از بین پوشش بتنی تونل

مشخصات کلی گاز H_2S: گاز H_2S گازی است بی‌رنگ با بویی تند و مشخص، شبیه به تخم مرغ گندیده که چگالی آن نسبت به هوا ۱/۱۹ و سنگین تر از هوا می باشد. جرم مولکولی آن ۳۴/۰۸ و چگالی آن در شرایط متعارف ۱/۳۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب است (۸).

این گاز یک گاز خورنده و اسیدی ضعیف است که ترکیبی از کاتیون $H+$ و آنیون HS می باشد. زمانی که H_2S به صورت گاز در هوا آزاد باشد با فلز مس واکنش داده و باعث قطع و خرابی مدارها و تجهیزات الکترونیکی می شود. زمانی که این گاز به صورت اسیدسولفوریک باشد، با آلیاژهای فولادی واکنش ایجاد کرده و باعث سولفاته شدن آن ها می‌گردد. به‌عنوان مثال می‌توان به سولفاته شدن تجهیزات الکترونیکی دستگاه TBM تونل مورد نظر اشاره نمود که به مقدار قابل ملاحظه‌ای باعث پایین آمدن مقدار بهره‌وری دستگاه گردید. بنابراین مخاطرات این گاز شامل سمی بودن و تاثیر آن بر فلزات در پروژه‌های تونل‌سازی است.

محلول آب و گاز H_2S مانند هر محلول دیگری با آشفته کردن و تلاطم آب (ریختن، هم زدن یا تکان دادن به‌وسیله افراد و ابزار)، می‌تواند به افزایش سرعت آزاد شدن این گاز کمک کند. pH آب نقش مهمی در قابلیت انحلال و سرعت رها شدن آن دارد. محیط‌هایی با pH پایین (اسیدی) برای افزایش سرعت آزادسازی آن نسبت به محیط‌های با pH بالا (قلیایی) مساعدترند (۵).

منشا زمین شناسی گاز H_2S: این ماده به صورت طبیعی به شکل گاز است. گاز H_2S به‌طور طبیعی در نفت خام، مخازن گاز، گازهای آتشفشان و چشمه های آب گرم وجود دارد (۹). این گاز معمولا از تجزیه مواد آلی (به عنوان مثال مواد فسیل شده داخل سنگ ها) به‌وجود می‌آید. از جمله منابع مهم تولید گاز H_2S می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- سنگ‌های پیریت دار
- فاضلاب‌ها و مرداب‌ها
- سازندهای هیدروکربوری

یکی از مواردی که در آن گاز H_2S تولید می‌شود، اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت است. پیریت یا سولفید آهن (FeS_2) در محیط احیا ته نشین می‌گردد و با حفاری تونل و قرار گیری در مجاورت هوا، اکسید شده و گاز سولفید هیدروژن را آزاد می‌نماید. هم‌چنین از تجزیه مواد آلی گوگرددار، در چاه ها، آبریزگاه ها، مجاری فاضلاب ها، مرداب ها و غیره نیز گاز H_2S تولید می‌شود. علاوه بر موارد فوق، سازندهای مرتبط با منابع هیدروکربوری نیز در تشکیل و ذخیره گاز H_2S بسیار مهم می‌باشند (۱۰)، زیرا گوگرد موجود در سیال‌های هیدروکربوری در شرایط احیاء در زیرزمین به H_2S تبدیل می‌گردد. قابل ذکر است که سازندهای مرتبط با منابع هیدروکربوری شامل سنگ منشا، سنگ مخزن و سنگ پوش می باشد، که در این میان سنگ مخزن نسبت به سنگ منشا و سنگ پوش قابلیت بیشتری برای ذخیره این گاز در مقادیر زیاد دارد، زیرا گاز H_2S معمولا به صورت محلول در آب زیرزمینی می باشد و سنگ مخزن به علت داشتن ناپیوستگی‌های زیاد و ضریب هدایت هیدرولیکی بالا مکان مناسبی برای تشکیل و ذخیره آبخوان‌های بزرگ است. در نتیجه در مناطقی که سنگ پوش به طور کامل بر روی سنگ مخزن وجود ندارد، گازهای سنگ مخزن از طریق ناپیوستگی های موجود به مرور خارج می‌شوند ولی در صورت وجود آبخوان در سنگ مخزن، گاز H_2S در آبخوان باقی می‌ماند و آب را گوگردی می‌کند.

لازم به ذکر است که سنگ منشا و سنگ پوش با توجه به ویژگی های لیتولوژیکی و ساختاری خاص خود قابلیت ذخیره گاز H_2S به مقدار زیاد را ندارند.

در طی حفاری تونل اسپر در سازند گورپی، نشت مواد هیدروکربوری از فاصله بین قطعات پیش ساخته بتنی به داخل تونل مشاهده گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است (۱۱). علاوه بر آن، تراشه‌های سنگی حاصل از حفاری در سازندهای پابده و ایلام نیز آغشته به مواد آلی بوده است. با توجه به نشانه‌های مذکور به نظر می‌رسد که تونل فوق در سازندهای هیدروکربوری زاگرس در حال حفاری است و منشا گاز H_2S آن به احتمال زیاد ناشی از منابع هیدروکربوری سازندهای مذکور می‌باشد.

شکل ۵- نشت مواد هیدروکربوری از فاصله بین قطعات پوشش بتنی به داخل تونل

اثرات بر سلامتی: سولفید هیدروژن می‌تواند با حس بویایی (بوی شبیه تخم مرغ گندیده) حتی در غلظت‌های خیلی کم (۰/۰۰۱ تا ۰/۱ قسمت در میلیون) در هوا شناسایی شود، با این‌حال احساس بویایی اشخاص، ظرف ۲ تا ۲۵ دقیقه از بین می‌رود و بعد از آن نمی‌توان حضور آن را تشخیص داد. اثرات فیزیولوژیکی این گاز به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارایه شده است. سولفید هیدروژن نه تنها به‌وسیله تنفس بلکه بوسیله تماس پوستی با آب‌های حاوی آن نیز جذب می‌شود.. این گاز بین غلظت‌های ۴/۳٪(LEL) و ۴۵٪(UEL) حجمی قابل انفجار است، هم‌چنین در زمان سوختن آن گاز بسیار سمی دیگری که دی-اکسید گوگرد (SO_2) است تولید می‌شود (۵).

جدول ۱- اثرات فیزیولوژیکی گاز H_2S در غلظت‌های مختلف (۱۲)

غلظت(ppm)	اثرات فیزیولوژیکی
۰/۱ تا ۱	در اثر بوی مشخص قابل تشخیص است
۵	مرز مسمومیت
۵ تا ۱۰۰	سوزش مختصر در چشم و سیستم تنفسی، سردرد، پس از ۱۵ دقیقه تنفس احساس بویایی نسبت به این گاز از بین می‌رود
۲۰۰	سوزش شدید بینی و گلو
۵۰۰	التهاب شدید چشم، ترشح بینی، سرفه، تپش قلب، غش
۶۰۰	سینه درد در اثر خراش سیستم تنفسی، امکان مرگ
۷۰۰	افسردگی، اغما، احتمال مرگ
۱۰۰۰	فلج شدن سیستم عصبی، مرگ سریع

استانداردها و قوانین ایمنی کار در محیط H_2S

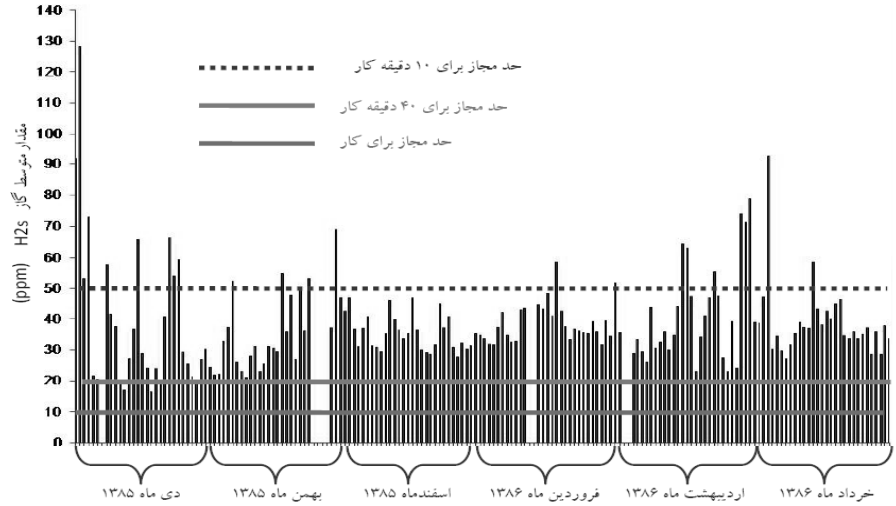
قوانین ایمنی، کار کردن در محیط‌هایی با مقدار بیش از ppm ۱۰(۳۱۵mg/m) را در طول شیفت کاری ۸ ساعته (از یک هفته کاری ۴۰ ساعته) قابل قبول نمی داند. اگر غلظت به ۲۰ppm برسد، لوازم اضافی مانند کپسول‌های هوا و افزایش تهویه یا تخلیه ضروری خواهد بود. این استانداردها هم‌چنین حداکثر لحظه ای ppm ۵۰را در کمتر از ۱۰ دقیقه برای یک‌بار مجاز می‌دانند به شرط این‌که سایر حدود غیر مجاز قبلی رخ ندهد (۵).

حد مجاز H_2S در هوای معادن و تونل ها بر اساس استاندارد شوروی سابق ۰/۰۰۰۶۶ درصد (۶/۶ ppm) و بر اساس استاندارد آمریکا ۰/۰۰۲ درصد (۲۰ppm) است. بر اساس

استاندارد سوئیس نیز حد مجاز آن همواره کمتر از ۱۰ppm و حداکثر ۴۰ دقیقه برای ۲۰ppm است. بر اساس قوانین ایمنی در معادن ایران، مقدار استاندارد این گاز همواره کمتر از ۱۰ppm و برای کوتاه مدت حداکثر ۱۵ppm است. از آنجا که این گاز به میزان زیاد در آب حل می شود (هر لیتر آب در دمای ۱۵ درجه و فشار یک اتمسفر قادر است ۳/۲ لیتر از آن را در خود حل کند)، لذا رفت و آمد در محل‌هایی که گازخیز بوده و آب راکد در آن‌ها وجود دارد باید با احتیاط صورت گیرد. زیرا افتادن چوب یا سنگ در این گونه آب‌ها باعث تلاطم آن شده و در نتیجه ممکن است مقدار زیادی گاز H_2S از آب آزاد و باعث صدمه یا مرگ افراد شود (۱۳).

روش‌ها و یافته‌ها

شکل شماره (۶) نمودار مقادیر گاز H_2S در تونل مورد مطالعه را در یک بازه زمانی ۶ ماهه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مندرج در شکل مذکور در طی مدت فوق همواره مقدار گاز بیشتر از ۱۰ ppm بوده و به‌جز ماه اول در بقیه ماه‌ها مقدار گاز بیشتر از ۲۰ ppm گزارش شده است. هم‌چنین در بسیاری از روزها مقدار گاز از ppm ۵۰ نیز بیشتر بوده است. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که شرایط مناسب برای کار وجود نداشته و به ناچار ساعات شیفت کاری کاهش پیدا نموده و کارکنان تونل از ماسک‌های ضد گاز استفاده می‌کردند. در شکل شماره (۷) نمایی از شرایط سخت کار همراه با ماسک نشان داده شده است. به‌طور کلی تا ppm ۱۰۰ غلظت گاز مذکور می‌توان از ماسک‌های اشاره شده استفاده نمود، ولی برای غلظت‌های بالاتر باید ماسک‌های دارای فشار مثبت هوا (با کمک مخزن هوا و شیلنگ مخصوص) را به‌کار برد.



شکل ۶- نتایج اندازه‌گیری مقادیر گاز H_2S در تونل در یک بازه ۶ ماهه

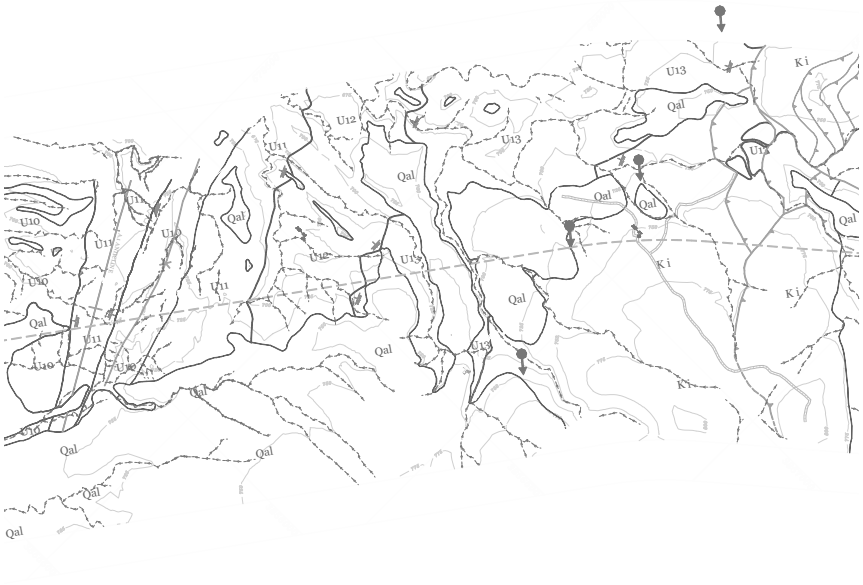
شکل ۷- شرایط دشوار کاری برای کارکنان تونل

بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در طی مطالعات: یکی از وظایف اصلی زمین‌شناسان مهندس در طی مطالعات در پروژه‌های تونل‌سازی، شناسایی و برآورد مخاطرات زمین‌شناسی محتمل ازجمله خطر وجود زمین های گازدار می‌باشد. چنان‌چه پتانسیل برخورد با سولفید هیدروژن در یک پروژه وجود داشته باشد، انجام مطالعات مذکور در طول مرحله طراحی ضروری است. در این رابطه وضعیت سازندهای زمین‌شناسی (مرتبط به منابع هیدروکربوری) و شرایط آب-های زیرزمینی مشخص می‌شوند و نمونه‌های کافی تحت آزمایش قرار می‌گیرند تا میزان احتمال برخورد به گاز فوق تخمین زده شود.

این ارزیابی ها می تواند تا حد زیادی در طراحی پروژه، جزییات طرح، روش‌های جایگزین برای ساخت و پتانسیل استفاده از آب‌های زیرزمینی یا اصلاح آن، تاثیرگذار باشد. برنامه مطالعات می تواند شامل نمونه برداری از آب زیرزمینی، تعیین وضعیت ناپیوستگی ها، پتانسیل رهایی تنش، شسته شدن پرشدگی ها و تخمین نفوذپذیری باشد (۵).

در طی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی تکمیلی تونل مذکور، گمانه‌ای در سازند ایلام حفاری گردید که در طی حفاری این گمانه، تصاعد بوی سولفید هیدروژن کاملا احساس می‌شد.

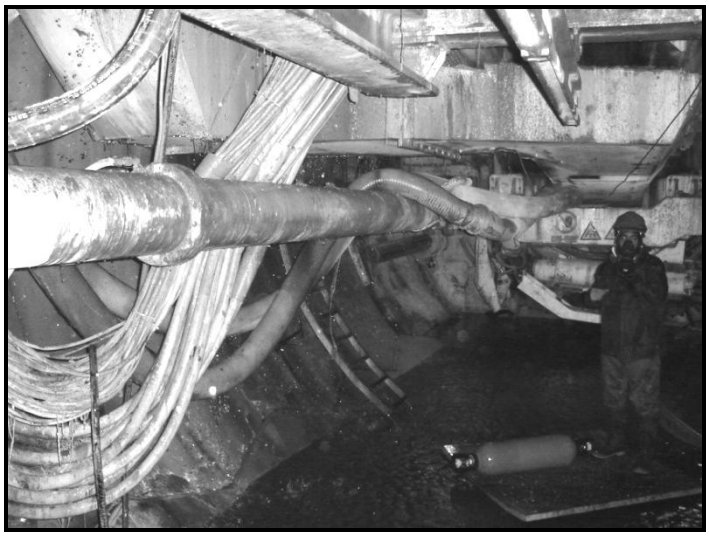
با توجه به وضعیت زمین شناسی ایران و وجود سازندهای نفتی فراوان با پتانسیل تولید و ذخیره انواع گازها و سیالات هیدروکربنی، توجه به خطر گاز H_2S (و سایر گازهای هیدروکربوری) در فضاهای زیرزمینی که قرار است در این سازندها یا سازندهای رویی آن‌ها حفر شوند (به‌دلیل احتمال رابطه از طریق ناپیوستگی ها) بسیار حایز اهمیت است. همان‌طور که قبلا ذکر گردید سازندهای مرتبط به منابع هیدروکربوری که شامل سنگ منشا، سنگ مخزن و سنگ پوش می‌باشند قابلیت ذخیره گاز H_2S را در مقادیر مختلف دارند. بر اساس تجربیات تونل‌های موجود، جهت حفاری فضاهای زیرزمینی در سازندهای هیدروکربوری باید در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی منطقه خطر وجود گاز مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. لذا زمین-شناسان مهندس جهت برآورد خطر گاز H_2S (و سایر گازهای هیدروکربوری) برای فضاهای زیرزمینی که در سازندهای هیدروکربوری حفاری می شوند، باید به شواهدی از جمله وجود آب ها و چشمه های گوگردی در منطقه، مشاهده آثار مواد آلی در رخنمون های سنگی و یا غارهای منطقه، وجود شیل های آلی، تصاعد بوی گوگرد از سطح شکسته شده تازه سنگ، استشمام بوی گاز در زمان حفاری گمانه ها و تونل های اکتشافی، وجود چشمه های نفتی و قیری در منطقه و ... توجه کافی و ویژه‌ای داشته باشند. با توجه به تجربه عملی نگارندگان، در صورت مشخص شدن وجود خطر فوق در تونل‌هایی که به‌وسیله TBM حفاری می‌شوند، قبل از انتخاب دستگاه باید تمهیدات مناسب از قبیل مقاوم بودن تجهیزات الکترونیکی دستگاه در مقابل گازهای خورنده، در نظر گرفتن سنسورهای کافی برای تعیین مقادیر انواع گازها در تونل، قابلیت دستگاه برای حفاری گمانه های پیشرو و عملیات پیش تزریق، تعبیه سیستم تهویه و آبکشی مناسب و به اندازه کافی قوی و ...، برای طراحی و ساخت دستگاه TBM لحاظ گردد. هم‌چنین لازم به ذکر است که در توده سنگ‌های آهکی دربرگیرنده تونل انتقال آب، دو چشمه گوگردی شناسایی گردید که از جمله شواهد مربوط به وجود گاز H_2S می باشد (شکل ۸).



شکل ۸- موقعیت قرارگیری چشمه های گوگردی نسبت به تونل

بررسی های حین اجرا

تعیین غلظت، نسبت و نوع گازهای نشت یافته به داخل تونل می تواند در تعیین دقیق منشأ گازها ، بسیار مفید باشد. بدین منظور با استفاده از امکانات نمونه برداری موجود در شرکت نفت، اقدام به تهیه نمونه از گازهای موجود در تونل گردید. برای نمونه برداری از کپسول های خلأ استفاده گردید (شکل ۹). در مجموع تعداد ۳ نمونه از نقاط مختلف تونل برداشت گردید. نمونه ها بعد از برداشت، برای انجام آنالیزهای شیمیایی به پژوهشکده اکتشاف و تولید (پژوهشگاه صنعت نفت) منتقل گردیدند. نتایج آنالیزها در جدول ۲ ارایه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از این آنالیزها و رایزنی های انجام شده با کارشناسان پژوهشگاه صنعت نفت، این نتایج، دلیل کافی برای اثبات منشأ هیدروکربوری گازهای داخل تونل نمی باشد (۱۴). در واقع مشابهتی از نظر ترکیب گازها با گازهای موجود در چاه‌ها و حوزه‌های نفتی وجود ندارد. البته این موضوع با توجه به پیچیده بودن پدیده مهاجرت گازها (از نظر جدا شدن گازهای مختلف در طول زمان و دخیل بودن پدیده‌های ثانوی هم‌چون دما در تغییر نسبت غلظت گازها) می‌تواند طبیعی باشد. به نظر می‌رسد داده های کافی برای مقایسه شرایط گازها در این تونل با موارد مشابه در دیگر نقاط ایران و جهان وجود ندارد.



شکل ۹- کپسول خلأ برای نمونه برداری از گازهای داخل تونل

جدول ۲- نتایج آنالیز گازهای داخل تونل (برحسب mol%)

موقعیت نمونه برداری	N_2	H_2S	O_2
محل نصب سگمنت	۷۸/۲۷	۰/۸۴	۲۰/۸۷
داخل کاترهد	۷۹/۴۸	۰/۱۶	۲۰/۳۶
اتاقک اپراتور	۷۸/۷۴	۰/۲۵	۲۱/۰۱

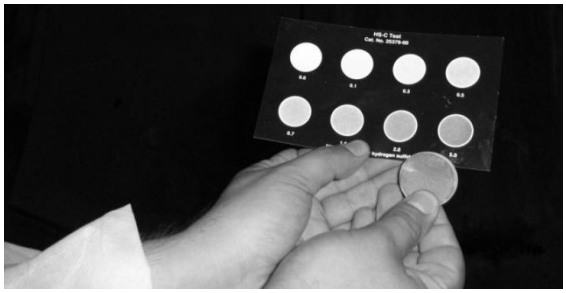
با توجه به این‌که گاز سولفید هیدروژن به صورت محلول و محمول در آب زیرزمینی بوده و پس از ورود آب به تونل، این گاز آزاد می شود، اقدام به بررسی و برآورد میزان H_2S محلول در آب ورودی به داخل تونل گردید. جهت نیل به این هدف با همکاری آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب نمونه برداری از آب ورودی به تونل انجام شد. نمونه برداری‌ها در فواصل مختلف تونل انجام شد و آزمایش در محل و آزمایشگاه صورت گرفت. نمونه برداری از گاز H_2S در پنج مکان در محل انجام گردید. نتایج این نوع نمونه برداری میزان غلظت گاز H_2S بیش از ۵ میلی گرم را نمایان نمی‌کند. متراژهای نمونه برداری در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳- نتایج نمونه برداری در محل

شماره آزمایش	موقعیت	گاز H_2S (میلی گرم در لیتر)
۱	کاترهد	بیش از ۵
۲	متراژ ۳۰۰۰	۱
۳	متراژ ۲۰۰۰	۱
۴	متراژ ۱۰۰۰	۰/۵
۵	خروجی تونل	۰/۵

نحوه انجام این آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نظر به آن‌که نتایج آزمایشات صحرایی چشمی است بنابراین نتایج حدودی می‌باشند. شکل ۱۱ آزمایش نمونه آب کاترهد را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می شود نمونه برداشت شده، تیره‌تر از ۵ میلی‌گرم در لیتر بوده و بنابراین میزان غلظت سولفیدهیدروژن در این نمونه بیش از ۵ میلی‌گرم در لیتر است.

شکل ۱۰- نمونه‌برداری از آب داخل تونل



شکل ۱۱- تشخیص مقایسه‌ای غلظت در نمونه‌برداری صحرایی (نمونه کاترهد)

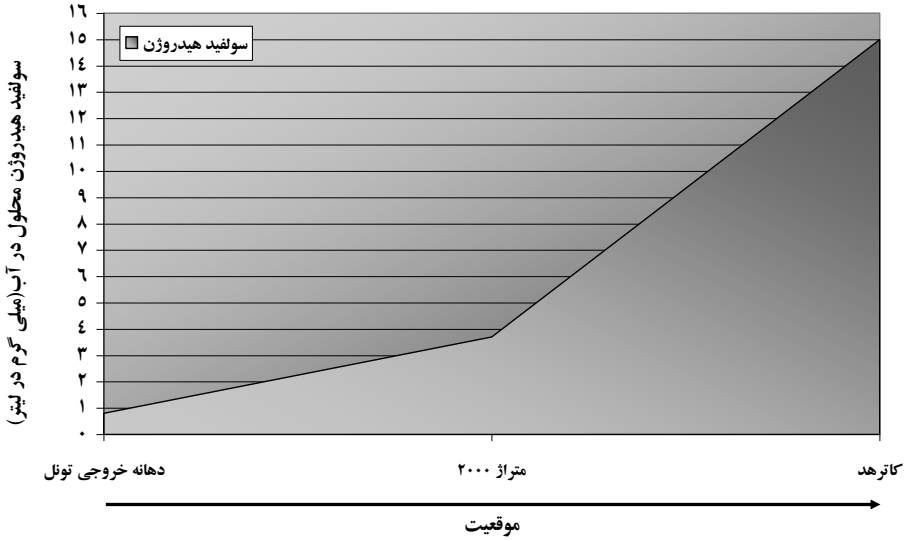
به‌علاوه، سه نمونه از آب داخل تونل در کاترهد، متراژ ۲۰۰۰ و خروجی تونل جهت انجام آزمایش آزمایشگاهی برداشته شد. نمونه ها در کمتر ۲۴ ساعت و در شرایط استاندارد به آزمایشگاه آب و فاضلاب تهران انتقال داده شدند. نتایج نمونه برداری ها به شرح جدول ۴ به دست آمد.

جدول ۴- نتایج آزمایشگاهی نمونه ها

شماره آزمایش	موقعیت	گاز H_2S (میلی گرم در لیتر)
۱	کاترهد	۱۵
۲	متراژ ۳۰۰۰	۳/۷
۳	متراژ ۲۰۰۰	۰/۸

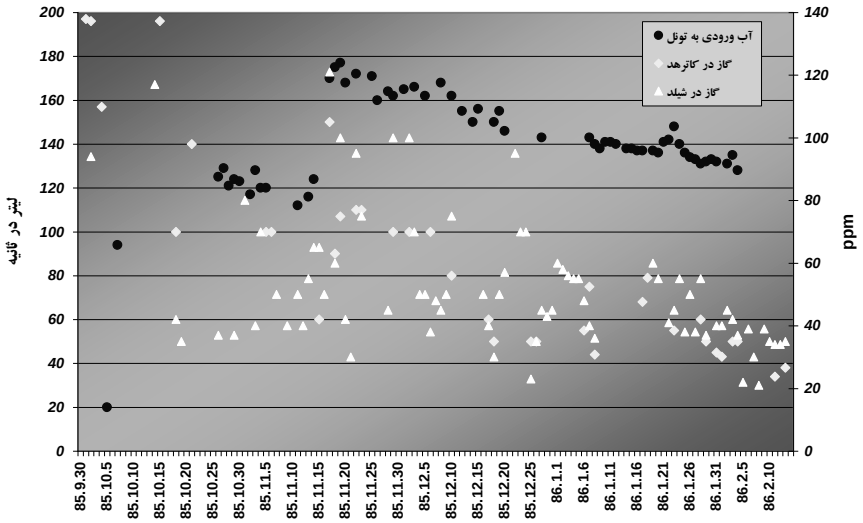
نتایج نمونه‌برداری‌های صحرایی و آزمایشگاهی با توجه به تفاوت دقت دو روش تا حد قابل قبولی با یک‌دیگر تطابق دارند. نتایج فوق خروج پیوسته گاز H_2S از آب را تصدیق نمودند.

ضمن آن که با توجه به روند خروج گاز H_2S در آب، نتیجه‌گیری می‌گردد که حجم قابل توجهی از گاز در ابتدای ورود آب به تونل از آب خارج شده و با حرکت آب به سمت خروجی تونل، میزان گاز H_2S در آب کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) تغییرات میزان سولفید هیدروژن آب در مسیر تونل را نشان می‌دهد.



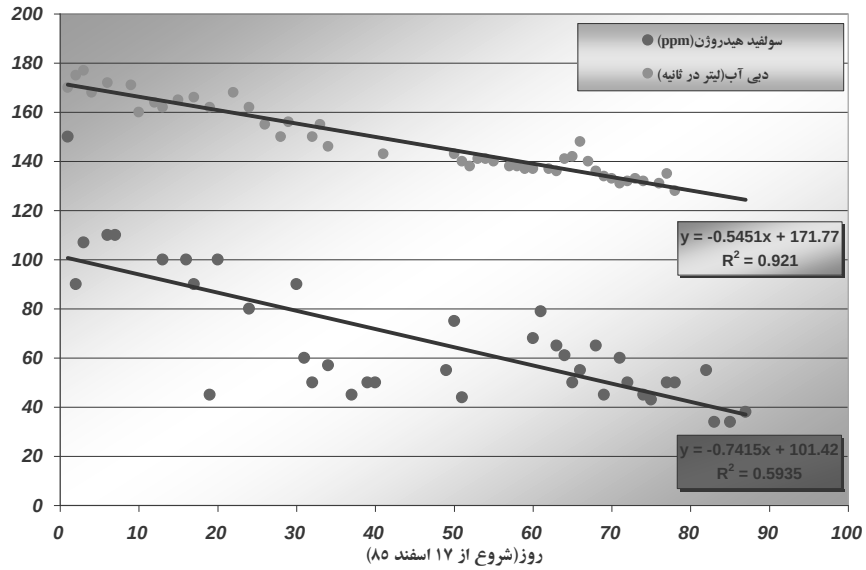
شکل ۱۲- تغییرات میزان سولفید هیدروژن در آب در موقعیت های مختلف تونل

در شکل (۱۳) میزان سولفید هیدروژن در کاترهد و شیلد بر حسب ppm و دبی آب ورودی به تونل نمایش داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود با کاهش دبی ورودی به تونل میزان غلظت گاز H_2S در هوای داخل تونل نیز کاهش می‌یابد که موید آن است که گاز H_2S همراه با آب وارد تونل می‌گردد.



شکل ۱۳- تغییرات آب خروجی از تونل و سولفید هیدروژن اندازه گیری شده در تونل نسبت به زمان

در شکل شماره (۱۴) رگرسیون خطی آب ورودی به تونل و میزان H_2S در هوا نشان داده شده است. این شکل برای بازه زمانی نیمه اسفند تا نیمه اردیبهشت ارایه شده است. داده‌های پراکنده از نیمه اسفند روندی یکسان یافته است. بنابراین جهت ترسیم رگرسیون از این تاریخ استفاده شده است. همبستگی دبی آب بالا و همبستگی H_2S کمتر می‌باشد. این مطلب می‌تواند به شرایط تهویه تونل و سایر عوامل دخیل در هنگام اندازه‌گیری مرتبط باشد. با این‌وجود روند کلی دو نمودار مشابه می‌باشد.



شکل ۱۴- روند ورود آب و گاز به تونل برای یک دوره زمانی انتخابی

غلظت گاز H_2Sدر آب ورودی به تونل ۱۵ میلی گرم در لیتر می باشد که با در نظر گرفتن ۱۰۰ لیتر در ثانیه آب ورودی به تونل، میزان ۱/۵ گرم H_2S همراه با آب وارد تونل می‌شود. اگر فرض شود تمامی گاز محلول در آب وارد هوا می‌شود. جرم مولکولی H_2S برابر با ۳۴ است. بنابراین هر یک مول گرم H_2S در شرایط متعارفی برابر با ۲۲/۴ لیتر است. از طرفی یک مول H_2S برابر ۲۲/۴ لیتر می‌باشد. بنابراین برای محاسبه حجم H_2S آزاد شده در هوای تونل به ازای دبی ۱۰۰ لیتر در ثانیه می‌توان نوشت:

$$15 \text{ milligram/liter} \times 100 \text{ liter} = 1.5 \text{ gram}$$

$$(1.5 \text{ gram} / 34 \text{ gram}) \times 22.4 \text{ liter/mol} = 0.988 \text{ liter} \approx 1 \text{ liter}$$

بنابراین به ازای ۱۰۰ لیتر بر ثانیه آب ورودی به تونل، در هر ثانیه حدود یک لیتر گاز H_2S در شرایط نرمال وارد هوای تونل می‌گردد. بدیهی است با تغییر دبی ورودی به تونل میزان حجم گاز متصاعد شده از تونل نیز تغییر می یابد. بنابراین میزان تهویه باید به حدی باشد که میزان گاز متصاعد شده را همواره در حد استانداردها نگه دارد.

راهکارهای عملی حین اجرا

علاوه بر آموزش کارکنان تونل و استفاده از تجهیزات کمکی مفید، روش‌های متعددی ممکن است جهت کاهش غلظت H_2S یا کاهش سرعت تصاعد آن در فضاهای زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد که این روش‌ها در یکی از سه شاخه کلی زیر قرار می گیرند (۵):

الف- جلوگیری از ورود آب زیرزمینی و گاز محلول در آن به داخل تونل

ب- روش های مبتنی بر رقیق سازی غلظت گاز بلافاصله پس از ورود آن به هوا

ج- روش های مبتنی بر تبدیل H_2S به مواد بی خطر

د- جلوگیری از ورود آب زیرزمینی و گاز محلول در آن به داخل تونل

همان‌طور که ذکر گردید، در اغلب موارد گاز H_2S به‌وسیله آب‌های زیرزمینی به درون فضاهای زیرزمینی راه می‌یابد. بنابراین اثرات آن را می‌توان با کاهش ورود آب کنترل نمود. چندین روش که می‌توانند منجر به دست‌یابی به هدف مذکور شوند شامل پیش-زهکشی[1]، تزریق[2]، صفحه و پوشش‌گذاری[3]، سیستم جمع‌آوری آب[4]، برقراری تعادل فشاری[5] به‌وسیله هوای فشرده و نصب پوشش[6] آب‌بند همزمان با حفاری می‌باشند. روش های مذکور به طور خلاصه در ذیل تشریح شده اند. شایان ذکر است که در تونل دسترسی البرز روش هایی از قبیل پیش زهکشی، تزریق و تقویت تهویه برای بهبود شرایط گازی H_2S استفاده شده است (۶). در تونل اسپر نیز از روش‌های تقویت تهویه، ایجاد خط هوای فشرده جدید برای قسمت های حساس به گاز(مانندکابین اپراتور و تابلوهای برق و کامپیوتر)، نصب پمپ های اضافی و خط لوله سه کیلومتری جهت جمع آوری و انتقال آب های گازدار در محیط بسته به بیرون تونل، استفاده از ترکیب مناسب شامل زودگیر برای درزگیری و بند کشی درز بین

1-predrainage
2-grouting
3-panning/sheeting
4-groundwater collection conduits
5-pressure equalization
6- lining

سگمنت ها به‌منظور جلوگیری از ورود آب به تونل و ... جهت مقابله با مشکلات موجود بهره گرفته شده است.

عملیات پیش‌زهکشی به منظور کاهش فشار هیدروستاتیک می‌تواند یک راه‌حل فنی و عملی باشد اما کاربرد آن بدلیل اثرات منفی آن یا هزینه‌هایی مانند نشست سطح زمین، تخلیه منابع آبی مجاور یا تغییر رژیم جریان آب زیرزمینی منطقه، محدودیت‌هایی به همراه دارد. هزینه‌های این‌کار نیز در طول یک تونل بلند برای یک دوره نسبتا طولانی می‌تواند بسیار سنگین باشد، تاحدی که سایر روش‌ها دارای ترجیح شوند. در این روش باتوجه به H_2S دار بودن آب‌ها، نحوه و محل رهاسازی آن‌ها نیز دارای محدودیت می‌باشد (۵).

تزریق سیمان یا مواد شیمیایی در درزها و شکستگی‌های آب‌بر توده سنگی، جریان را از طریق آن‌ها کاهش می‌دهد یا با تاخیر همراه می‌سازد. این روش معمولا در شرایط خیلی مناسب نیز جریان آب را کاملا قطع نمی‌کند، بلکه آن‌را کاهش می‌دهد. بنابراین این روش در جایی که غلظت گاز در آب کم و حجم آب ورودی به تونل زیاد است (در مقایسه با مواردی که غلظت H_2S در آب زیادتر و حجم آب کمتر است) مناسب‌تر می‌باشد. موفقیت این روش پس از حفاری تونل[1] بسیار مشکل و در بسیاری موارد ناکارآمد است. در اتخاذ این روش باید مواردی مانند رهایی تنش یا شسته شدگی ناپیوستگی‌ها پس از حفاری تونل را درنظر گرفت. در ضمن علاوه بر هزینه خود تزریق، تاخیر در پیشروی تونل نیز هزینه دیگری است که به پروژه تحمیل می‌گردد. این هزینه وابسته به روش حفاری تونل (به عنوان مثال انفجاری، TBM یا سایر روش‌های مکانیکی) است، مخصوصا در حفاری با TBM هزینه تاخیرات می‌تواند به اندازه‌ای زیاد باشد که بررسی سایر روش‌های ممکن را ضروری نماید (۵).

صفحه و پوشش‌گذاری روی سطح توده سنگ به همراه یک سیستم بسته جمع آوری و دفع آب می‌تواند تلاطم جریان آب و در نتیجه تصاعد H_2S به هوا را به‌حداقل برساند. این روش در تونل‌های کوتاه و مواردی که غلظت گاز در آب نسبتا پایین است، امکان‌پذیر می‌باشد. در تونل‌های بلند سیستم جمع‌آوری آب، طی گذشت زمان ممکن است توسط مواد جامد پمپ شده مسدود گردد.

روش دیگر کاهش جریان آب ورودی به تونل، نصب پوشش نهایی آب‌بند هم‌زمان با پیشروی است. این روش به صورت گسترده‌ای در پروژه‌های عمرانی شهر نیویورک مورد استفاده قرار گرفته است(۵). مهم‌ترین مزایای این روش، این است که با فاصله کمی پس از حفاری تونل پوشش‌گذاری انجام می‌شود و آب‌بندی واقعی را به‌وجود می‌آورد. بنابراین تلاش‌ها برروی کاهش و کنترل سطح گاز متصاعد شده از مناطق جلوتر از پوشش، متمرکز خواهد گردید (به‌وسیله تزریق در موارد جریان‌های بسیار زیاد، جمع آوری آب بدرون سیستم بسته در حداقل زمان ممکن و یا به‌وسیله سیستم تهویه).

- رقیق سازی گاز در هوای تونل

معمولا هزینه تغییرات در سیستم تهویه نسبت به کل هزینه پروژه، نسبتا کم می‌باشد. طراحی یک سیستم تهویه مناسب که قوانین و استانداردهای ایمنی را پوشش دهد، می‌تواند با استفاده از اطلاعات به دست آمده از اکتشافات زیرسطحی (یعنی مقدار گاز محلول در آب زیرزمینی) همراه با یک ارزیابی محتاطانه از پیش‌بینی مقدار جریان آب ورودی به تونل و یک تخمین منطقی از درصد آزادسازی H_2S، انجام پذیرد (۵).

کفایت یک سیستم تهویه برای حل مشکل گاز، با دو عامل محدودکننده روبه‌رو است: یکی حداکثر اندازه کیسه هوایی (داکت) که می‌تواند در داخل تونل نصب شود و دیگری حداکثر سرعت هوایی که بتواند توسط کارگران تحمل شود. در این روش باید در نظر داشت که افت هد در سیستم تهویه سرعت بالا، می‌تواند پرهزینه باشد و آن‌را ناکارآمد کند. به‌منظور کاهش دادن افت هد، کیسه هوای بزرگ‌تری مورد نیاز خواهد بود و تونل باید به اندازه کافی بزرگ باشد که کیسه هوای مذکور را در خود جای دهد و برای عبور کارکنان، تجهیزات و سیستم نخاله به اندازه کافی فضا باقی بماند. در دوره‌های هوای خیلی سرد یا گرم، حداکثر سرعت هوا که می تواند به‌راحتی از داخل تونل عبور نماید باید ۴۰۰ فوت بر دقیقه باشد. زیرا سرعت‌های بیشتر هوا می‌تواند بر کارایی کارگران تاثیر بگذارد، هرچند در موارد خاص سرعت تا ۸۰۰ فوت بر دقیقه نیز می‌تواند تحمل شود (۵). لازم به ذکر است که در پروژه فوق، پس از برخورد به گاز سولفید هیدروژن جت فن های تهویه تونل تعویض و بجای جت فن های ۱۲۰ از دو جت فن ۲۴۰ به صورت سری استفاده گردید.

- راهکار تبدیل H_2S به مواد بی خطر

مواد شیمیایی اکسیدکننده خاص مانند پراکسیدهیدروژن یا هیپرکلرید سدیم می توانند با H_2S واکنش داده و موادی با سمیت کمتر یا غیرسمی تولید نمایند. سایر مواد شیمیایی مانند هیدروکسیدسدیم ، pH آب را افزایش داده و در نتیجه آزادسازی سولفیدهیدروژن را کاهش می‌دهند یا آن‌را متوقف می‌سازند. با این‌حال این مواد نیازمند استفاده در مقادیر نسبتا زیاد هستند تا موثر واقع شوند. بنابراین، این روش می‌تواند پرهزینه بوده و هم‌چنین برحسب نوع مواد شیمیایی مورد استفاده، آب ممکن است به‌دلیل رنگ یا کدورت زیاد برای تخلیه نامناسب گردد. هم‌چنین کار با این مواد در محیط یک تونل و در مواجهه با هجوم آب به‌درون آن مشکل و پیچیده خواهد بود. با توجه به سه دلیل فوق، این روش تنها در جایی اجرایی می‌شود که غلظت گاز زیاد اما جریان آب نسبتا کم باشد. موارد کمی وجود دارد که این روش برای حل مشکل فوق

1- post grouting

استفاده شده باشد، اما بعضی مواقع اسـتفاده ترکیبـی از مـواد کـاهش دهنده pH و مواد اکسیدکننده ممکن است نتایج بهتری در پی داشته باشد. قابل ذکر است که این روش در تونـل دربـورن میشـیگان مـورد استفاده قرار گرفته و نتایج مناسبی به همراه داشته است (۵).

نتیجه گیری

وجود گاز سولفید هیدروژن در حین حفاری در تونل انتقـال آب اسپر به‌دلیل از کار انداختن وسایل الکترونیکـی دسـتگاه TBM (بـه-دلیل خاصیت خورندگی آن) و نامسـاعد نمـودن محـیط کـاری بـرای کارکنان حفاری و لزوم استفاده از تجهیزات ایمنی زیاد و محدودکننده (مانند ماسک و کپسـول اکسـیژن) و ...، هزینـه هـا و مزاحمـت هـای زیادی به وجود آورد. تجربیات حاصل از حفر این تونل در ایـران نشـان داد که وظایف زمین‌شناسان مهندس در شناخت این پدیده بسیار مهم و حساس است. لذا ضـروری اسـت کـه در مطالعـات تونـل و فضـاهای زیرزمینی در نقاط با پتانسیل تولید گـاز سـولفید هیـدروژن، مـواردی مانند وجود تشکیلات حاوی مواد آلی و وجود آثار چشمه ها و آب‌های گوگردی مورد توجه قرار گیرد. علاوه براین لازم است در حـین اجـرای پروژه نیز نشت بسیار جزئی گـاز در تونـل، شـکایت کـارگران از وجـود بوی نامطبوع گاز در قسمت های مختلف، مشـاهده آثـار جزیـی مـواد نفتی در مصالح حفاری شده و ... با دقت زیـاد بررسـی شـوند. زیـرا بـا شناسایی دقیق پروژه های تونلی که دارای این پتانسیل هستند قبل از اجرا مـی تـوان ضـمن کـاهش خطـر، از خطـرات مهندسـی و زیسـت محیطی ناشی از خروج این گاز جلوگیری نمود. با توجه به تجربه تونـل اسپر باید در حفاری تونل ها در رشته کوه های زاگرس یا سایر منـاطق دارای پتانسیل نفتی ایران از نظر وجود گازهای خطرنـاک و مـزاحم، از جمله H_2S توجه ویژه مبذول گردد. بـا شناسـایی پـروژه هـای دارای پتانسیل برخورد با مشکل این گاز می توان در زمان طراحی بـا بـرآورد مناسب از ابعاد خطر در جزییات مهمی از طراحی سـازه ازجملـه روش حفاری، قدرت و نوع تهویه، ظرفیت پمپاژ و تخلیـه آب و نـوع پوشـش تونل و زمان نصب آن تغییرات مناسب ایجاد نمود. این پیش بینـی هـا در هزینه ها و زمان اتمام پروژه نیز تاثیر شایانی خواهد داشت.

به‌طور کلی جهت مقابله با مشـکلات موجـود در تونـل اسـپر از روش های تقویت تهویه، ایجاد خط هوای فشرده جدیـد بـرای قسـمت های حساس به گاز (مانندکابین اپراتور و تابلوهـای بـرق و کـامپیوتر)، نصب پمپ های اضافی و خط لوله سه کیلومتری جهـت جمـع آوری و انتقال آب های گازدار در محـیط بسـته بـه بیـرون تونـل، اسـتفاده از ترکیب مناسب شامل زودگیر بـرای درزگیـری و بنـد کشـی درز بـین سگمنت ها به‌منظـور جلـوگیری از ورود آب وگـاز بـه تونـل و ... بهـره گیری شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقالـه بـر خـود لازم مـی‌داننـد تـا از مجموعـه مهندسین مشاور ساحل که همکاری صـمیمانه‌ای در ارایـه داده‌هـای مورد نیاز در این تحقیق داشته اند، تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

1. Proctor, R.J. & Monsees, J.E., 1985. Metro rail project design issues related to gassy ground. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, ASCE/AIME, NY, 1: 488-505.
2. Proctor, R.J., 2002. The San Fernando Tunnel explosion, California. Eng Geol, 67:1-3.
3. Lambert, TW., Goodwin, VM., Stefani, D. & Strosher, L., 2006. Hydrogen sulfide (H2S) and sour gas effects on the eye. A historical perspective. Sci Total Environ, 367:1-22.
4. Mukhopadhyay, A., Al-Haddad, A. & Al-Senafy, M., 2007. Occurrence of hydrogen sulfide in the ground water of Kuwait. Environ Geol, 52:1151-1161.
5. Naeemi, A.H., Essex, R.J. & Giberson, K.A., 2000. The effects of Hydrogen sulfide during underground construction, North American Tunneling, Balkema, Rotterdam.
6. Wenner, D. & Wannenmacher, H., 2009. Alborz Service Tunnel in Iran: TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions and its Solutions, 1st Regional and 8th Iranian Tunneling Conference.

۷. مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵. مطالعات زمـین شناسـی مهندسی پروژه دشت ذهاب.

8. Blunden, J. & Anaja, V., 2006. Characterizing ammonia & hydrogen sulfide emission from a swing waste treatment lagoon in north Carolina, North Carolina State University.
9. Government of Alberta, Imployment and Immigration, 2009. CH029-Hydrogen Sulphide, Workplace Health and Safety Bulletin.
10. Stirbys, A.F., Radwanski, Z.R., Proctor, R.J. & Escandon, R.F., 1999. Los Angeles metro rail project – geologic and geotechnical design and construction constraints. Eng Geol, 51: 203-224 .

11. Mirmehrabi, H., Hassanpour, J., Morsali, M. & Tarighazali, S., 2008. Experiences gained from gas and water inflow toward the tunnel, case study: Aspar anticline, Kermanshah, Iran, Proceedings of 5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS); Nov. 24-26, 2008; Tehran, Iran.
12. McPherson, M.J., 1993. Subsurface ventilation and environmental engineering, Chapman and Hall.

۱۳. مدنی، ح.، ۱۳۸۲. تونلسازی، جلد دوم: خدمات فنی. دانشگاه امیرکبیر.
۱۴. مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۷. گزارش مخاطرات آب و گاز پروژه دشت ذهاب.