

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

عنوان پایان نامه

انتخاب روش کنترل گاز H_2S در تونل زاگرس با روش تصمیم گیری چند معیاره

دانشجو:

سمیرا زندی

اساتید راهنما :

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد اسماعیل جلالی

تیر ۸۹

تقدیم به بهترین‌هایم

پدرم

که آسمان بیکرانگی‌اش را از قلب او به ودیعه گرفته

مادرم

که مهربانی در چشمان او معنا پیدا کرده

و خواهرم

که شادی لحظه‌هایم را به ارمغان آورده.

سپاسگذاری

سپاس پروردگار متعال را که به من توفیق کسب علم و معرفت عطا فرمود.

بدین وسیله زحمات کلیه اساتیدی را که مرا در نوشتن این پایان نامه یاری نمودند، گرامی می‌دارم.

در پیش برد این پایان نامه، از راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی‌ام، جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی و جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی بهره‌ها بردم. بر خود لازم می‌دانم از ایشان، به خاطر زحمات بی دریغشان صمیمانه قدردانی نمایم.

از استاد گرامی‌ام آقای دکتر محمد عطایی که از رهنمودهای ارزشمندشان همواره بهره‌مند بوده‌ام، کمال تشکر را دارم.

از آقای مهندس امید فروغ که فراتر از یک استاد مشاور، از مشاوره‌شان بهره‌مند شدم، نهایت قدردانی و سپاس را دارم.

افتخار دارم از داوران این تحقیق، جناب آقای دکتر رمضان زاده و جناب آقای دکتر کارآموزیان قدردانی نمایم.

در نهایت از دوستان گرامی‌ام خانم‌ها رضایی، رنجبر، اللهیاری، فلاح پیشه، تیموری، جنتی و حمیدی تشکر می‌کنم.

دانشجو تایید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مرتبط از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

تیر ۱۳۸۹

چکیده

در هنگام حفاری تونل‌ها، بسته به اینکه تونل از چه تشکیلات سنگی عبور می‌کند، گازهای همراه با این تشکیلات یا محلول در آب زیرزمینی، در محیط تونل متصاعد خواهند شد که باید برای ترقیق آنها تا حد مجاز اقدام نمود. یکی از آلاینده‌هایی که حضور آن در هنگام حفاری برخی تونل‌های کشورمان به اثبات رسیده، گاز سولفید هیدروژن است که گازی فوق العاده سمی و خطرناک می‌باشد.

عیار مجاز این گاز طبق استاندارد ۲۰ ppm است و در عیارهای بالاتر می‌تواند سبب فلج شدن سیستم تنفسی شده و به مرگ منجر شود. سازندهای زمین شناسی مرتبط با منابع هیدروکربوری، در تشکیل و ذخیره گاز H_2S بسیار مهم می‌باشند.

H_2S به دو صورت محلول در آب و ترکیب با هوای محیط می‌تواند در محیط حضور داشته باشد. بسته به نوع حضور H_2S روش‌های گوناگونی برای ترقیق یا حذف کامل این گاز وجود دارد، که هر یک از این روش‌ها دارای شرایط اجرایی و بازده متفاوت هستند.

تونل انتقال آب زاگرس، واقع در غرب کشور، با طول کلی حدود ۴۸ کیلومتر، از تونل‌های بلند در حال حفر در غرب ایران است. حفر این تونل با دستگاه TBM صورت می‌گیرد. تهویه مکانیکی در حین اجرای تونل، به روش تهویه طولی و با دهش هوا به قسمت پشتیبانی TBM انجام می‌گیرد.

بر اساس مطالعات زمین شناسی انجام شده، حفاری قطعه یک (الف) تونل زاگرس، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، تا طولی حدود ۷۲۰۰ متر باید در شرایط گازخیزی بالا صورت گیرد.

اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل تونل نشان می‌دهد که با ورود تونل به داخل تشکیلات ایلام و پیشرفت آن داخل این سازند، جریان آب ورودی به تونل تا میزان 170 lit/s افزایش یافت. آب وارد شده به داخل تونل، حاوی گاز H_2S است و این گاز به محض ورود آب زیرزمینی به تونل، در فضای تونل منتشر می‌شود. با اندازه‌گیری‌های انجام شده، غلظت H_2S در هوای تونل زاگرس، در شرایط عملکرد سیستم تهویه، تا ۶۰-۵۰ ppm افزایش یافته است.

در این مطالعه، بعد از بررسی منشا H_2S در آب زیرزمینی وارد شده به تونل زاگرس، در ابتدا یکسری تدابیر کوتاه مدت بیان گردیده که اجرای این روش‌ها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی خواهد شد. لازم است که تمام تدابیر ذکر شده، در سریع‌ترین زمان ممکن اجرا شوند تا تأخیرهای وارد بر پروژه تا آنجا که ممکن است کاهش یابد. در ادامه روش‌هایی جهت کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالتبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر ارائه شده، که این تدابیر در جهت بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد. تصمیم‌گیری منطقی جهت انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها، نیاز به بررسی دقیق آنها

دارد. در مرحله‌ی بعد با تهیه پرسش نامه و توزیع آن بین تعدادی متخصص، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی مناسب‌ترین روش برای حل مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس انتخاب شد. در این مطالعه پارامترهایی نظیر هزینه، انعطاف پذیری، شرایط زیست محیطی، بازدهی، اجرایی بودن روش و زمان مورد نیاز هر روش در نظر گرفته شد. با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش تزریق در تونل زاگرس به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد و در فصل آخر پایان نامه، برآورد فنی و اقتصادی تزریق در طول ۷۲۰۰ کیلومتر اولیه تونل زاگرس، که با مشکل تصاعد بالای گاز H_2S مواجه است، انجام شد.

کلمات کلیدی: تونل زاگرس، H_2S ، روش تحلیل سلسله مراتبی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

Samira Zandi, Farhang Sereshk, Mohammad Esmaeel Jalali,
Selection of optimum method in order to elimination the problem of emission of H₂S gas in Zagros tunnel by using of AHP method , 10th international multidisciplinary scientific Geo-conference & EXPO SGEM 2010, Bulgaria.

فهرست مطالب

فصل اول: منابع آلاینده‌ی هوا در تونل‌ها	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- گرد و غبار	۲
۱-۲-۱- تقسیم بندی کلی گرد و غبار	۲
۲-۲-۱- حد مجاز گرد و غبار در هوای تونل‌ها	۳
۳-۲-۱- چگونگی تولید گرد و غبار در تونل‌ها	۳
۱-۴-۲-۱- جلوگیری از تولید و پخش گرد و غبار در هوا	۵
۲-۴-۲-۱- جداسازی ذرات گرد و غبار از هوا	۵
۳-۱- دود و بخار	۶
۴-۱- گازها	۶
۱-۴-۱- مونوکسید کربن	۸
۲-۴-۱- دی اکسید کربن	۹
۳-۴-۱- اکسیدهای ازت	۱۰
۴-۴-۱- متان	۱۱
۵-۴-۱- سیانید هیدروژن	۱۲
۴-۱-۶- دی اکسید گوگرد	۱۲
۱-۴-۱-۷- سولفید هیدروژن	۱۳
۵-۱- جمع بندی	۲۲
فصل دوم: روش‌های حذف و ترقیق گازها	۲۳
۱-۲- مقدمه	۲۴
۲-۲- جذب	۲۴
۳-۲- جذب سطحی	۲۵
۴-۲- میعان (چگالش)	۲۶
۵-۲- احتراق	۲۶
۲-۵-۱- احتراق شعله مستقیم	۲۷
۲-۵-۲- احتراق حرارتی	۲۷

۲۸	۲-۵-۳- احتراق کاتالیستی
۲۸	۲-۶- بیوفیلتراسیون
۳۰	فصل سوم روش‌های حذف و ترقیق سولفید هیدروژن
۳۱	۳-۱- مقدمه
۳۱	۳-۲- روش‌های حذف سولفید هیدروژن
۳۲	۳-۲-۱- روش‌های حذف H_2S محلول در آب
۳۲	۳-۲-۱-۱- روش‌های مبتنی بر کاهش ورود آب زیرزمینی حاوی H_2S به داخل تونل
۳۶	۳-۲-۱-۲- روش‌های مبتنی بر حذف محلول از آب‌های زیرزمینی
۴۵	۳-۲-۳- روش‌های حذف H_2S موجود در هوای محیط
۴۵	۳-۲-۳-۱- بیوفیلتراسیون
۴۹	۳-۲-۳-۲- روش‌های مبتنی بر حذف H_2S از گاز طبیعی
۵۱	۳-۲-۳-۳- احتراق
۵۳	۳-۲-۳-۴- روش‌های مبتنی بر ترقیق H_2S با استفاده از جاذب‌های شیمیایی
۷۱	۳-۳- جمع بندی
۷۴	فصل چهارم: معرفی تونل زاگرس قطعه یک (الف)
۷۵	۴-۱- مقدمه
۷۶	۴-۲- معرفی تونل زاگرس قطعه یک (الف)
۷۷	۴-۳- منشا H_2S در تونل زاگرس
۷۹	۴-۴- غلظت H_2S موجود در آب تشکیلات ایلام
۸۰	۴-۴-۱- غلظت H_2S در آب زهکشی شده، تحت شرایط موازنه با هوا
۸۱	۴-۴-۲- غلظت H_2S در آب ورودی به تونل
۸۵	۴-۵- تدابیر لازم برای گذر از بحران تصاعد H_2S در تونل زاگرس
۸۵	۴-۵-۱- تدابیر کوتاه مدت:
۸۶	۴-۵-۱-۱- تقویت سیستم تهویه
۹۹	۴-۵-۱-۲- حفاظت کابین‌های الکتریکی
۱۰۰	۴-۵-۱-۳- استفاده از تجهیزات حفاظت شخصی
۱۰۱	۴-۵-۱-۴- تزریق دوغاب گراول در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده

۱۰۱	۵-۱-۵-۴ - مسدود کردن کانال‌های آب
۱۰۳	۲-۵-۴ - تدابیر بلند مدت
۱۰۳	۱-۲-۵-۴ - زهکشی در کل تونل با سیستم لوله
۱۰۷	۲-۲-۵-۴ - زهکشی از سطح
۱۰۸	۳-۲-۵-۴ - پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه در پشت TBM
۱۰۸	۴-۲-۵-۴ - آببندی درزه‌های قطعات پیش ساخته
۱۱۲	۴-۲-۵-۴ - اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در داخل تونل
۱۱۷	۶-۲-۵-۴ - استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S
۱۲۱	۶-۴ - جمع بندی
۱۲۲	فصل پنجم: انتخاب روش بهینه برای رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس
۱۲۳	۱-۵ - مقدمه
۱۲۴	۲-۵ - فرایند تحلیل سلسله مراتبی
۱۲۴	۳-۵ - مراحل محاسبه وزن در روش تحلیل سلسله مراتبی
۱۲۴	۱-۳-۵ - ساختن سلسله مراتب
۱۲۵	۲-۳-۵ - محاسبه وزن
۱۲۶	۱-۲-۳-۵ - روش‌های محاسبه وزنهای نسبی
۱۲۷	۲-۲-۳-۵ - محاسبه وزن نهایی
۱۲۷	۳-۳-۵ - سازگاری سیستم
۱۲۹	۴-۵ - انتخاب روش بهینه جهت رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس
۱۴۰	۵-۵ - جمع بندی
۱۴۱	فصل ششم: تزریق در تونل زاگرس قطعه یک (الف)
۱۴۲	۱-۶ - مقدمه
۱۴۲	۲-۶ - انواع تزریق
۱۴۲	۳-۶ - تاثیرات تزریق
۱۴۴	۴-۶ - روش‌های تزریق دوغاب در گمانه
۱۴۴	۵-۶ - مصالح مورد استفاده در تزریق
۱۴۷	۶-۶ - تزریق در تونل زاگرس، قطعه یک (الف)

۱۵۳	 فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۵۴	 ۱-۷- نتیجه گیری
۱۶۰	 پیوست

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- حد مجاز گرد و غبار بر اساس استاندارد کشور روسیه ۳
- جدول ۱-۲- درصد حجمی محصولات ناشی از احتراق موتورهای دیزل ۷
- جدول ۱-۳- اثرات فیزیولوژیکی دی اکسید ازت در عیارهای مختلف ۱۰
- جدول ۱-۴- اثرات فیزیولوژیکی گاز SO_2 در غلظت‌های مختلف ۱۳
- جدول ۱-۵- اثرات فیزیولوژیکی گاز H_2S در غلظت‌های مختلف ۱۵
- جدول ۳-۱- مقایسه ویژگی‌های زئولیت و کربن فعال به عنوان جاذب H_2S ۵۹
- جدول ۱-۴- طول بخش‌های با گاز خیزی بالا و متوسط (مبنای سنجش از دهانه مره خیل) ۷۷
- جدول ۲-۴- لیست تجهیزات مورد نیاز طرح تهویه ۹۳
- جدول ۳-۴- شرح پارامترهای به کار رفته در طراحی سیستم تهویه ۹۶
- جدول ۴-۴- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) از دهانه تا متراژ ۷۳۰۰ ۹۷
- جدول ۵-۴- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) متراژ ۷۳۰۰ تا انتهای تونل ۹۸
- جدول ۶-۴- مشخصات کربن فعال مدل KS3 ۱۱۸
- جدول ۱-۵- مقادیر ترجیحات برای مقایسات زوجی ۱۲۵
- جدول ۲-۵- شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی ۱۲۸
- جدول ۳-۵- گزینه‌های در نظر گرفته شده برای رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس ۱۲۹
- جدول ۴-۵- معیارهای در نظر گرفته شده برای انتخاب بهترین روش ۱۳۰
- جدول ۵-۵- ماتریس تصمیم‌گیری ۱۳۱
- جدول ۶-۵- مقایسه‌ی زوجی معیارها نسبت به هدف اصلی ۱۳۲
- جدول ۷-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار هزینه و گزینه‌ها ۱۳۳
- جدول ۸-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار زمان و گزینه‌ها ۱۳۴
- جدول ۹-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار اجرایی بودن و گزینه‌ها ۱۳۵
- جدول ۱۰-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار بازدهی و گزینه‌ها ۱۳۶
- جدول ۱۱-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار انعطاف‌پذیری و گزینه‌ها ۱۳۷
- جدول ۱۲-۵- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار زیست‌محیطی و گزینه‌ها ۱۳۸
- جدول ۱-۶- شرح هزینه پارامترهای حفاری و تزریق در تونل ۱۴۹

جدول ۶-۲- هزینه حفر چال در تونل	۱۵۰
جدول ۶-۳- هزینه جاگذاری مسدود کننده در چال های حفر شده در تونل	۱۵۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تاثیر فیزیولوژیکی مونوکسید کربن در حالت‌های مختلف ۸
- شکل ۲-۱- غلظت H_2S ، HS^- و S^{2-} به عنوان تابعی از مقدار pH ۱۴
- شکل ۳-۱- آشکارساز سولفید هیدروژن مدل TT63ES ۱۸
- شکل ۴-۱- نمایی از ابزار اندازه‌گیری H_2S مجهز به ریزحسگر ۲۱
- شکل ۱-۲- نمایی از یک واحد احتراق کاتالیستی ۲۸
- شکل ۲-۲- نمایی از یک واحد بیوفیلتراسیون ۲۹
- شکل ۱-۳- قطعات بولت شده (اتصال طولی) ۳۵
- شکل ۲-۳- اتصال دهنده‌های میلگرد (اتصال محیطی) ۳۶
- شکل ۳-۳- نمایی از یک واحد کلریزاسیون به روش سیستم تغذیه شیمیایی ۳۸
- شکل ۷-۳- نمایی از یک واحد کلریزاسیون به روش سیستم ریزش چکه‌ای ۳۹
- شکل ۸-۳- نمایی از یک واحد تصفیه آب با استفاده از فیلتر سبز منگنزدار ۴۰
- شکل ۹-۳- اجزای دستگاه تصفیه H_2S ۴۸
- شکل ۱۰-۳- فلوچارتی از یک واحد تصفیه آمین ۵۰
- شکل ۱۱-۳- نمایی از یک واحد احتراق کاتالیستی ۵۳
- شکل ۱۲-۳- الف) نمایی از سنگ معدن زئولیت، ب) ساختار مولکولی میکروپور زئولیت ۶۴
- شکل ۱۳-۳- نمایی از سطح کربن فعال و حفرات آن، بزرگنمایی از سمت چپ به راست افزایش می‌یابد ۶۸
- شکل ۱۴-۳- تجهیزات آزمایشگاهی برای آزمایش جذب سطحی در یک بستر ثابت و فشار اتمسفر ۷۱
- شکل ۱-۴- قسمت بندی مناطق با خطر گاز خیزی در طول تونل ۷۷
- شکل ۲-۴- نمایی شماتیک از طرح تهویه تونل زاگرس ۸۶
- شکل ۳-۴- منحنی مشخصه فن‌های سری GAL ساخت شرکت کرفمن ۹۴
- شکل ۴-۴- جانمایی تجهیزات تهویه در بخش ابتدایی تونل زاگرس ۹۵
- شکل ۵-۴- مقطع عرضی تونل و نحوه جانمایی تجهیزات ۹۵
- شکل ۶-۴- جانمایی تجهیزات تهویه در بخش انتهایی تونل زاگرس ۹۸
- شکل ۷-۴- فیلتر H_2S ، قابل استفاده در ماسک‌های تنفسی، ساخت شرکت دراگر آلمان ۱۰۰
- شکل ۸-۴- مسدود کننده با غلاف بولفلکس ۱۰۲
- شکل ۹-۴- لوله تزریق با غلاف بولفلکس مجهز به لوله رهایی تنش ۱۰۳

- شکل ۴-۱۰- نمایش از لوله‌های زهکشی و اتصالات آنها..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۱- نحوه‌ی اتصال لوله‌های زهکشی به دیواره‌ی تونل..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۲- سگمنت با نوارهای آب بندی در هنگام نصب در تونل..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۳- نمایش از نوارهای منبسط شونده‌ی CEMswell..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۴- میزان جذب H_2S توسط کربن KS3، در رطوبت‌های مختلف..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱- نمایش گرافیکی برای انتخاب روش بهینه..... ۱۳۱
- شکل ۵-۲- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار هزینه..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار زمان..... ۱۳۴
- شکل ۵-۴- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار اجرایی بودن..... ۱۳۵
- شکل ۵-۵- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار بازدهی..... ۱۳۶
- شکل ۵-۶- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار انعطاف پذیری..... ۱۳۷
- شکل ۵-۷- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار زیست محیطی..... ۱۳۸
- شکل ۵-۷- امتیاز نهایی گزینه‌ها..... ۱۳۹

فصل اول

منابع آلاینده‌ی هوا در تونل‌ها

۱-۱- مقدمه

برای اینکه بتوان تهویه تونل‌ها را به خوبی انجام داد، ابتدا بایستی عوامل آلوده کننده‌ی هوای تونل‌ها را بررسی کرد. در این فصل به شرح خصوصیات آلاینده‌ها، منابع تولید و حدود مجاز آلاینده‌ها پرداخته شده است.

منابع آلاینده‌ی هوا در تونل‌ها را می‌توان به ۳ گروه عمده تقسیم کرد:

۱- گرد و غبار ۲- دود و بخار ۳- گازها

۱-۲- گرد و غبار

مسائل ناشی از گرد و غبار از جمله قدیمی‌ترین مشکلات صنعتی است که از زمان انقلاب صنعتی تا عصر حاضر به شکل‌های مختلف گریبانگیر نیروی کاری بوده است. این پدیده بخصوص در تونل‌ها و محیط‌های کاری زیرزمینی بیشتر احساس می‌شود. به همین منظور همواره سعی بر این بوده است که این عارضه از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد و سپس معیارها و قوانین مربوط به کنترل و بهبود شرایط کاری نیروی انسانی تعیین شود (مدنی، ۱۳۷۷).

۱-۲-۱- تقسیم بندی کلی گرد و غبار

ذرات گرد و غبار، با توجه به ابعاد و اثرات فیزیولوژیکی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

الف) گرد و غبارهای رشته‌ای (نظیر سیلیس، سیلیکات‌ها، کانسنگ‌های حاوی برلیوم، دود فلزات، کانسنگ‌های قلع و ...)

ب) گرد و غبارهای سرطان زا (نظیر دخترهای رادون، آزبست و مواد حاوی آرسنیک)

ج) گرد و غبارهای سمی (نظیر آرسنیک، سرب، اورانیوم، نیکل و ...)

د) گرد و غبار رادیواکتیو (نظیر پودر کانسنگ‌های اورانیوم و کانسنگ‌های توریم)

ه) گرد و غبار مزاحم (نظیر سنگ آهک، ژئوپس و کائولن) (مدنی ۱۳۷۷)

۱-۲-۲- حد مجاز گرد و غبار در هوای تونل‌ها

برای تعیین حد مجاز گرد و غبار، تحقیقات فراوانی در کشورهای مختلف انجام گرفته که به تدوین آیین‌نامه‌هایی در این زمینه منجر شده است. حد مجاز گرد و غبارهای مختلف بر اساس استاندارد کشور روسیه در جدول زیر درج شده است.

جدول ۱-۱- حد مجاز گرد و غبار بر اساس استاندارد کشور روسیه (مدنی، ۱۳۶۶)

نوع گرد و غبار	عیار مجاز بر حسب میلی گرم در مترمکعب
گرد و غبار حاوی بیش از ۷۰٪ سیلیس	۱
گرد و غبار حاوی ۱۰٪ تا ۷۰٪ سیلیس آزاد	۲
گرد زغال حاوی بیش از ۱۰٪ سیلیس آزاد	۲
گرد زغال حاوی کمتر از ۱۰٪ سیلیس آزاد	۴
گرد زغال بدون سیلیس آزاد	۱۰

۱-۲-۳- چگونگی تولید گرد و غبار در تونل‌ها

به طور کلی هرگاه سنگی تحت تاثیر ضربه، خراشیدگی، خرد شدگی، برش، سایش و یا انفجار قرار گیرد، ذرات گرد و غبار تولید می‌شوند. منابع تولید گرد و غبار در تونل‌ها را می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد.

الف) حفاری‌های مکانیزه

ماشین آلات حفاری و برش سنگ از جمله عوامل مولد گرد و غبار به شمار می‌آیند. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان ماشین‌های حفاری پیوسته، ماشین‌های بازویی، ماشین‌های حفر تونل (TBM) و دستگاه‌های حفر دوپیل را نام برد.

ب) چالزنی

چالزنی از جمله عملیاتی است که در تولید گرد و غبار نقش مهمی دارد. گرچه در روش چالزنی مرطوب تا حد زیادی از پراکندگی گرد و غبار جلوگیری می‌شود، ولی چالزنی خشک، یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد گرد و غبار در هوای تونل‌ها است.

ج) آتشباری

خرد شدن و پرتاب سنگ‌ها در اثر آتشباری باعث تولید و انتشار ذرات گرد و غبار در هوا می‌شود که میزان آن در لحظاتی پس از وقوع، نسبت به دیگر روش‌های حفاری بسیار زودگذر است.

د) بارگیری

از دیگر مسائلی که در تولید گرد و غبار نقش بسیار زیادی دارد، چگونگی بارگیری در جبهه کار و حمل مواد است. به طور کلی بارگیری به وسیله ماشین‌های خاک‌کش (LHD) و بارکننده‌های مکانیکی، باعث پخش مقداری گرد و غبار در هوا می‌شود.

ه) حمل و نقل

سیستم حمل مواد کنده شده در طول تونل‌ها نیز از جمله عوامل پخش گرد و غبار در هوای تونل‌ها است. در مواردی که برای حمل و نقل از نوار نقاله استفاده می‌شود، ارتعاش نوار در روی غلطک‌ها، عامل موثری در پخش گرد و غبار در هوا است. حمل مواد در داخل تونل به وسیله راه آهن یا کامیون‌ها نیز به هر حال مقداری گرد و غبار در هوای تونل پراکنده می‌سازد.

۱-۲-۴- کنترل گرد و غبار

به منظور کنترل گرد و غبار در جبهه کار پیشروی تونل به دو شیوه می‌توان عمل کرد، یکی تغییر کیفی در انجام کارهای مختلف (چالزنی، آتشباری، بارگیری و حمل و نقل مواد) و استفاده مطلوب‌تر از وسایل

مورد استفاده، به منظور کاهش تولید گرد و غبار و دیگری مهار مستقیم گرد و غبار در جبهه کار با روش‌هایی مثل پاشیدن آب به محل تولید و رقیق کردن از طریق تهویه

۱-۲-۴-۱- جلوگیری از تولید و پخش گرد و غبار در هوا

از آنجا که پاکسازی هوا از ذرات آلوده ساز گرد و غبار مشکل و پرهزینه است، بنابراین همواره باید سعی کرد از ورود گرد و غبار به هوا از محل اولیه آن جلوگیری شود. این خواسته با روش‌های زیر انجام می‌گیرد:

الف) مته‌های آب پاش و استفاده از فواره آب

ب) تزریق آب

ج) استفاده از عوامل شیمیایی مرطوب ساز و کف‌ها.

۱-۲-۴-۲- جداسازی ذرات گرد و غبار از هوا

در حالت کلی ذرات درشت گرد و غبار در هر سرعتی از جریان هوا ته نشین می‌شوند. خطر عمده مربوط به ذرات ریز قابل تنفس است که در هوا به صورت معلق باقی می‌مانند.

جداسازی این ذرات از هوا در شدت جریان‌های زیاد پرهزینه است. سیستم جداسازی با توجه به عواملی همچون توزیع ابعاد ذرات، غلظت ذراتی که باید جدا شوند، شدت جریان هوا و میزان غلظت مجاز ذرات گرد و غبار در موقع خروج، انتخاب می‌شود. ابعاد سیستم جداسازی با توجه به حجم هوایی که باید برای تصفیه جریان پیدا کند، انتخاب می‌شود.

هزینه‌های عملیاتی نیز با توجه به افت فشار، شدت جریان هوا و تهیه و تصفیه آب (در حالتی که سیستم مرطوب مورد استفاده قرار می‌گیرد)، تعیین می‌شود. به طور کلی، اسپری آب، غبارگیرهای مرطوب و غبارگیرهای خشک از مهم‌ترین روش‌های جداسازی ذرات گرد و غبار از هوا هستند (مدنی، ۱۳۷۷).

۱-۳- دود و بخار

دود مجموعه‌ای از ذرات جامد، مایع و گازهای منشتر شده از مواد، هنگامی که تجزیه شده یا می‌سوزند، است که این مجموعه ذرات توسط هوا منتقل می‌شوند. دود عموماً یک محصول جانبی ناخواسته است که در تونل‌ها می‌تواند در گاز خروجی از موتورهای دیزل وجود داشته باشد (A)(www.Wikipedia.com). بخار، اغلب به غبار سفید رنگ قابل مشاهده‌ای که در بالای آب در حال جوش تراکم می‌یابد، اطلاق می‌شود. این غبار شامل قطرات بسیار ریز آب است. این آلاینده نیز به مقدار متفاوت در هوای تونل‌ها مشاهده می‌شود (B)(www.Wikipedia.com).

۱-۴- گازها

گازهای موجود در تونل‌ها را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم کرد:

الف) گازهای متصاعد شده از جداره تونل (تشکیلات سنگی و آب‌های زیرزمینی)

بسته به اینکه تونل از چه تشکیلات سنگی عبور می‌کند، گازهای همراه با این تشکیلات در هنگام حفاری در محیط تونل متصاعد می‌شوند. برای مثال لایه‌های زغالی حاوی گاز متان و لایه‌های دربرگیرنده آنها حاوی گاز دی اکسید کربن هستند که در هنگام حفاری این لایه‌ها، مشکل انتشار این گازها بروز می‌نماید. علاوه بر آن آب‌های زیرزمینی که از محل درزه و شکستگی‌های به وجود آمده در هنگام حفاری، به درون تونل جریان پیدا می‌کنند، می‌توانند شامل ترکیبات خطرناکی نظیر سولفید هیدروژن باشند که حضور آنها در محیط کار سبب به وجود آمدن مشکلات بسیاری خواهد شد.

ب) گازهای حاصل از آتشباری

در مواردی که تونل‌ها با استفاده از سیستم آتشباری حفر می‌شوند، بسته به نوع ماده منفجره مصرفی، گازهای مختلفی به هنگام آتشباری تولید می‌شود که باید آنها را بررسی کرد و حد مجاز آنها را به هنگام تهویه تونل، مد نظر قرار داد.

مهم‌ترین گازهای سمی حاصل از آتشباری، اکسیدهای ازت و مونوکسید کربن هستند، اما در مورد بعضی از مواد منفجره حاوی گوگرد، سولفید هیدروژن و دی اکسید گوگرد نیز تولید می‌شود.

ج) گازهای ناشی از کارکرد ماشین آلات

در تونل‌های در حال حفر، عمدتاً از ماشین‌های دیزلی یا برقی، جهت حمل مواد حفر شده یا ابزار آلات استفاده می‌شود. در موتورهای دیزل، گازهای حاصله عمدتاً دی اکسید ازت، مونوکسید کربن و دی اکسید گوگرد است که درصد حجمی آنها در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲- درصد حجمی محصولات ناشی از احتراق موتورهای دیزل (Bickel, 1982)

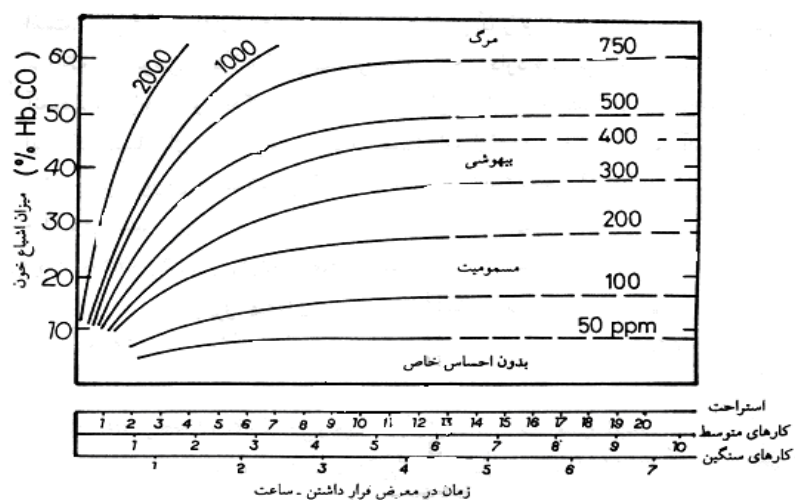
درصد حجمی	نوع محصول
۰/۱	مونوکسید کربن (ماکزیمم)
۰/۰۲	مونوکسید کربن (متوسط)
۹	دی اکسید کربن
۰/۰۴	اکسیدهای ازت
۰/۰۲	دی اکسید گوگرد
۰/۰۰۲	آلدئید
۰/۰۰۱	فرمالدئید

در ادامه به شرح مختصری از مشخصات عمومی، اثرات فیزیولوژیکی، عیار مجاز و منابع تولید گازهای رایج در فضاهای زیرزمینی پرداخته شده است.

۱-۴-۱- مونوکسید کربن

مونوکسید کربن گازی است بی رنگ، بی بو و بی مزه که چگالی آن نسبت به هوا ۰/۹۶۷ و بنابراین تقریباً هم وزن هواست. جرم مولکولی آن ۲۸/۰۱ و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال، چگالی آن $1/149 \text{ kg/m}^3$ است.

این گاز فوق العاده سمی است و در عیارهای خیلی پایین نیز موجب مرگ انسان می‌شود. اگر درصد مونوکسید کربن از ۰/۱ درصد کمتر باشد، در مدت زمان کوتاه، خطر جانی ندارد. در عیار ۰/۱ درصد، باعث سردرد و مسمومیت‌های جزئی می‌شود، اما عیار ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ درصد این گاز ممکن است مسمومیت خطرناک تولید کند. ۲۰ تا ۳۰ دقیقه تنفس در هوایی که درصد مونوکسید کربن آن در حدود ۰/۵ درصد باشد به مرگ منتهی می‌شود و بالاخره اگر عیار آن به ۱ درصد برسد، مرگ فوری را سبب خواهد شد. در شکل ۱-۱ تاثیر فیزیولوژیکی مونوکسید کربن در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- تاثیر فیزیولوژیکی مونوکسید کربن در حالت‌های مختلف (Mc Phersn, 1993)

بر اساس مقررات کشور روسیه، عیار مجاز مونوکسیدکربن در محیط‌های زیرزمینی ppm ۱۶ است اما مقررات ایالات متحده آمریکا حد مجاز آنرا ppm ۱۰۰ تعیین کرده است. مهم‌ترین منابع تولید مونوکسیدکربن، آتش سوزی، اکسیداسیون زغال، انفجار مواد منفجره و گاز لکوموتیو و موتورهای دیزلی هستند (مدنی، ۱۳۷۷).

۱-۴-۲- دی اکسید کربن

دی اکسیدکربن گازی است بی رنگ که اندکی مزه و بوی اسیدی دارد. این گاز ۱/۵۲ برابر سنگین‌تر از هواست و بدین ترتیب در قسمت‌های کف تونل قرار گرفته و در حقیقت جای هوا را می‌گیرد. دی اکسیدکربن در عیار موجود در هوای معمولی (حدود ۰/۰۴ درصد) زیان آور نیست ولی اگر عیار آن به ۱ درصد برسد، باعث تندی تنفس خواهد شد و هنگامی که میزان آن ۳ درصد شود، شدت تنفس دو برابر حالت معمولی می‌شود. عیار ۱۰ درصد آن ممکن است باعث بی‌هوشی شود و بالاخره عیار ۲۰ الی ۲۵ درصد آن به مرگ انسان منجر خواهد شد.

عیار مجاز دی اکسید کربن در هوای فضای بسته بر اساس مقررات کشور روسیه ppm ۷۵۰ و طبق قوانین ایالات متحده ppm ۱۵۰۰ تعیین شده است.

قسمت اعظم دی اکسیدکربن از لایه‌های زغال و لایه‌های طرفین آن متصاعد می‌شود. علاوه بر این، دی اکسیدکربن در نتیجه تنفس افراد، استفاده از چراغ‌های شعله دار، تجزیه مواد آلی و در نتیجه کار لکوموتیوها و سایر موتورهای دیزلی موجود در تونل نیز تولید می‌شود. انفجار گاز یا گرد زغال در معادن زغال و نیز حریق، عامل‌های دیگر در تشکیل CO_2 هستند (مدنی، ۱۳۶۶).

۱-۴-۳- اکسیدهای ازت

معمولاً در نتیجه آتشباری با مواد منفجره حاوی ازت، گاز NO تولید و این گاز در مجاورت اکسیژن به گاز NO_2 تبدیل می شود. NO_2 از هوا سنگین تر و رنگ آن خرمایی است که مشخص کننده ی آن است. این گاز هنگام انفجار مواد ناریه در فضا پراکنده می شود. بدین ترتیب در حالت کلی، در هوای محل آتشباری مجموعه ای از گازهای NO , NO_2 وجود دارند که آنها را اکسیدهای ازت می خوانند.

دی اکسید ازت که خود بسیار خطرناک است، به آسانی در آب حل می شود و اسیدهای نیترو و نیتریک را تولید می کند. رابطه ۱-۱ چگونگی واکنش این گاز با آب را نشان می دهد.



جرم مولکولی دی اکسید ازت ۴۶/۰۱ و چگالی آن نسبت به هوا ۱/۵۸۸ است.

به طور کلی اکسیدهای ازت از جمله خطرناک ترین گازهای موجود در محیط های زیرزمینی هستند و آثار مضر بر چشم، بینی، دهان و شش ها دارند. این گازها در عیارهای پایین بی خطرند اما با افزایش عیار خطرناک می شوند. به طوریکه در عیار ۰/۰۲۵ درصد باعث مرگ انسان می شوند. از جمله مشخصات این گازها آن است که اثر آنها فوری نیست، یعنی شخصی که این گازها را تنفس می کند در لحظه استنشاق آنها هیچ گونه عارضه ای حس نمی کند ولی پس از ۲۰ الی ۳۰ ساعت، ممکن است فوت کند.

اثرات فیزیولوژیکی دی اکسید ازت در عیارهای مختلف در جدول ۱-۳ درج شده است.

جدول ۱-۳- اثرات فیزیولوژیکی دی اکسید ازت در عیارهای مختلف (Mc Phersn, 1993)

عیار گاز (ppm)	اثرات فیزیولوژیکی
۴۰	در اثر بو قابل تشخیص است.
۶۰	باعث سوزش حلق می شود.
۱۰۰	ممکن است باعث سرفه شود.
۱۵۰	سبب ناراحتی جدی تنفسی می شود.
۲۵۰	احتمال مرگ وجود دارد.

عیار مجاز گاز NO در فضاهای زیرزمینی طبق مقررات ایالات متحده آمریکا ۳۵ ppm و عیار مجاز گاز NO_2 ۵ ppm است.

مهم‌ترین عامل تولیدکننده این گازها، مواد منفجره است. علاوه بر این، احتراق ناقص سوخت لکوموتیوها و سایر موتورهای دیزل نیز ممکن است مقداری از این گاز تولید کند (مدنی، ۱۳۷۷).

۱-۴-۴- متان

متان گازی است بی رنگ و بی بو که چگالی آن نسبت به هوا ۰/۵۵۴ است و بنابراین از هوا سبکتر است. با توجه به وزن مخصوص کم، این گاز در قسمت‌های فوقانی تونل جمع می‌شود و برای اندازه‌گیری آن بایستی به قسمت‌های بالای تونل توجه کرد.

گاز متان سمی نیست و از نظر تنفسی مشابه گاز ازت است، اما اگر مقدار آن زیاد شود، باعث کاهش درصد اکسیژن می‌شود و از این نظر خطرناک است.

متان اندکی در آب حل می‌شود ولی مقدار آن قابل توجه نیست.

بر اساس مقررات ایمنی کشور روسیه، عیار مجاز این گاز ۷۵۰ ppm و بر اساس استاندارد ایالات متحده ۱۰۰۰ ppm است.

هنگام تجزیه مواد گیاهی و تبدیل آنها به انواع زغال، مقدار زیادی گاز متان تشکیل می‌شود. بیشتر این گاز تولید شده در لایه‌های زغال محبوس و مقداری از آن نیز در سنگ‌های درونگیر لایه‌های زغالی جمع می‌شود و به همین خاطر، هنگام حفاری در سنگ‌های اطراف زغال نیز بایستی همیشه هوای تونل را از نظر میزان این گاز کنترل کرد (مدنی، ۱۳۶۶).

۱-۴-۵- سیانید هیدروژن

سیانید هیدروژن گازی بی رنگ با بوی تند شبیه بادام تلخ و سست کننده است. بخار سیانید هیدروژن در هوا یک مخلوط قابل انفجار را با دامنه تخریب وسیع به وجود می‌آورد. حدود اشتعال این گاز ۶ تا ۴۱ درصد است.

مقادیر بسیار کم سیانید در هوا (در حد ppm) در مدت کوتاهی صدمه وسیعی به بافت مغز و قلب وارد می‌کند. چنانچه فرد مقدار زیادی سیانید (۳ تا ۸ گرم) ببلعد، فوری قدرت تکلم را از دست داده، تنفس او قطع می‌شود و می‌میرد. در صورتی که مقدار بسیار کم سیانید وارد خون شود، اثرات ضعف، سستی در حرکت انگشتان، کندی حرکت، تاری دید، کاهش عملکرد غده تیروئید و پس از ساعتی، مرگ بر انسان عارض می‌شود.

سیانید مستقیماً سرطان‌زا نیست و جزء مواد سرطان‌زا نیز معرفی نشده است (www.ilc.ir).

غلظت مجاز سیانید در هوا بر اساس استاندارد^۱ OSHA، ۱۰ ppm است.

۱-۴-۶- دی اکسید گوگرد

دی اکسید گوگرد گاز بی رنگی است که مزه‌ی بسیار تند و بوی مشخص گوگرد در حال سوختن را دارد. چگالی آن نسبت به هوا ۲/۲ و جرم مولکولی آن ۶۴/۰۶ است.

این گاز بسیار سمی است و حضور حتی مقدار کم آن نیز باعث مختل شدن اعصاب و به ویژه اعصاب چشم می‌شود و عیار ۰/۰۵ درصد آن خطر مرگ را دربر دارد.

در جدول ۴-۱ اثرات فیزیولوژیکی این گاز در غلظت‌های مختلف درج شده است.

^۱ Occupational Safety and Health Administration

جدول ۱-۴- اثرات فیزیولوژیکی گاز SO_2 در غلظت‌های مختلف (Mc Phersn, 1993)

غلظت (ppm)	اثرات فیزیولوژیکی
۱	مزه ترش اسیدی دارد.
۳	در اثر بوی مشخص، قابل تشخیص است
۲۰	سوزش در چشم و سیستم تنفس
۵۰	احساس سوزش شدید در چشم، بینی و گلو
۴۰۰	خطر مرگ

عیار مجاز این گاز بر اساس استاندارد کشور روسیه ۷ ppm و طبق مقررات ایالات متحده آمریکا ۵ ppm است.

گاز دی اکسید گوگرد ممکن است در اثر آتش سوزی در تونل ایجاد شود. همچنین اگر مواد منفجره حاوی گوگرد باشند، در اثر آتشباری مقداری SO_2 حاصل می‌گردد. گاهی نیز همراه با گاز زغال در معادن زغال متصاعد می‌شود. در معادن گوگرد و نیز در معدنی که مقدار قابل توجهی پیریت دربردارند، ترکیبات مضر گوگرد (SO_2 و H_2S) به مقدار خطرناک ممکن است تولید شود (مدنی، ۱۳۶۶).

۱-۴-۷- سولفید هیدروژن

الف) مشخصات عمومی

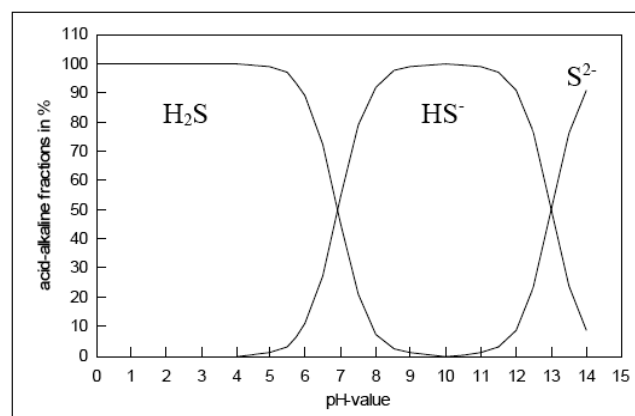
H_2S گازی بی رنگ، با بویی تند و مشخص، شبیه به تخم مرغ گندیده است. چگالی آن نسبت به هوا ۱/۱۹ و سنگین‌تر از هوا می‌باشد. جرم مولکولی آن ۳۴/۰۸ و چگالی آن در شرایط متعارفی ۱/۴۲۸ کیلوگرم بر متر مکعب است.

این گاز به صورت محلول در آب و به مقدار کم در طبیعت یافت می‌شود. تمرکز بالای این گاز، درصدهای بین ۴/۳ تا ۴۶ در هوا، می‌تواند آتش گرفته و در صورت اشتعال تولید گاز سمی دی اکسید گوگرد

می‌نماید. گاز سولفید هیدروژن پس از آزاد شدن در هوا واکنش‌های زیر را ایجاد می‌نماید که سبب آزاد شدن گاز سمی دی اکسید گوگرد می‌شود.



H_2S به حالت مولکولی در فاز گاز موجود است. در هنگام حلالیت در آب، می‌تواند هنوز به حالت مولکول H_2S باشد یا با آب واکنش داده و به صورت یون‌های HS^- و S^{2-} در بیاید. پایداری این یون‌ها در آب به شدت بستگی به pH آب دارد (www.amt-gmbh.com).



شکل ۲-۱- غلظت H_2S ، HS^- و S^{2-} به عنوان تابعی از مقدار pH (www.amt-gmbh.com)

همانطور که از شکل آشکار است، H_2S در pH بالای ۷ پایدار نیست و در آب به صورت یون‌های HS^- یا S^{2-} در می‌آید. افزایش ناگهانی در خاصیت اسیدی آب، شرایط را به سمت پایداری H_2S می‌کشاند که این امر می‌تواند سبب انتشار بیشتر H_2S در اتمسفر، نسبت به محیط‌های قلیایی شود. بنابراین لازم است که pH آب نیز همزمان با اندازه‌گیری غلظت H_2S ، اندازه‌گیری شود تا امکان محاسبه غلظت کل H_2S ، HS^- و S^{2-} فراهم شود.

گاز سولفید هیدروژن گازی است فوق العاده خطرناک و سمی که در عیار کم باعث سوزش چشم و در عیار بالا باعث فلج شدن سیستم اعصاب و مرگ می‌شود. این گاز در عیار ۰/۰۱ درصد (۱۰۰ ppm) پس از چند ساعت مسمومیت خفیف و در عیار ۰/۰۵ درصد (۵۰۰ ppm) پس از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه مسمومیت خطرناک را سبب می‌شود. اگر عیار گاز به ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ ppm) برسد سبب مرگ فوری می‌شود.

از آنجا که این گاز به میزان زیاد در آب حل می‌شود (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 گاز خیز بوده و آب راکد در آنها وجود دارد، باید با احتیاط صورت گیرد. زیرا تلاطم آب ممکن است مقدار زیادی گاز H_2S آزاد کند و باعث صدمه یا مرگ افراد شود (مدنی، ۱۳۶۶).

در جدول ۱-۵ اثرات فیزیولوژیکی این گاز در غلظت‌های مختلف درج شده است.

جدول ۱-۵- اثرات فیزیولوژیکی گاز H_2S در غلظت‌های مختلف (Mc Phersn, 1993)

غلظت (ppm)	اثرات فیزیولوژیکی
۰/۱ تا ۱	در اثر بوی مشخص قابل تشخیص است
۵	مرز سمی شدن
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 تنفس، مرگ سریع

عیار مجاز سولفید هیدروژن بر اساس استاندارد آمریکا ۲۰ ppm و بر اساس استاندارد روسیه ۶/۶ ppm است.

این گاز دارای منشاء نفت خام، مخازن گازهای طبیعی، گازهای آتشفشانی و چشمه‌های آب گرم می‌باشد و می‌تواند در اثر فرآیندهای زیر نیز تشکیل شود:

- تجزیه مواد آلی گوگردی چاه‌ها و تونل‌ها، آبریزگاه‌ها و مجاری فاضلاب شهری
- تاثیر آب‌های اسیدی معدن بر پیریت و سایر سولفیدها و در پی آن تجزیه آنها
- پوسیدن مواد آلی بخصوص چوب بست‌های سیستم نگهداری در معادن
- انفجار ناقص مواد منفجره

در معادن زغال، معمولاً مقداری H_2S نیز همراه با گاز زغال وجود دارد و همراه با آن متصاعد می‌شود. گاهی هم مقداری H_2S در داخل سنگ‌ها محبوس است که از داخل شکاف سنگ‌ها به بیرون متصاعد می‌شود (مدنی، ۱۳۶۶).

علاوه بر موارد فوق، سازندهای مربوط به منابع هیدروکربوری نیز در تشکیل و ذخیره‌ی گاز H_2S بسیار مهم می‌باشند، زیرا گوگرد موجود در سیال‌های هیدروکربوری در شرایط احیا در زیر زمین به H_2S تبدیل می‌شود. قابل به ذکر است که سازندهای مرتبط به منابع هیدروکربوری شامل سنگ منشا، سنگ مخزن و سنگ پوش می‌باشد، 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 معمولاً به صورت محلول در آب زیرزمینی می‌باشد و سنگ مخزن به علت داشتن ناپیوستگی‌های زیاد و ضریب هدایت هیدرولیکی بالا مکان مناسبی برای تشکیل و ذخیره آبخوان‌های بزرگ است و در نتیجه در مناطقی که سنگ پوش به طور کامل بر روی سنگ مخزن وجود ندارد، گازهای سنگ مخزن از طریق ناپیوستگی‌های 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 (Anthony et al, 1999) و (Day et al, 2000).

بطور کلی در صورت برخورد با موارد زیر، می‌توان پیش بینی کرد که مشکل تصاعد گاز H_2S وجود خواهد داشت (میرمحرابی، ۱۳۸۶):

- وجود چشمه‌های گوگردی در اطراف ناحیه کاری
 - آثار مواد آلی در رخنمون سنگ‌ها
 - وجود شیل‌های آلی
 - تصاعد بوی گوگرد از سطح شکسته شده تازه‌ی سنگ
 - استشمام بوی گاز در زمان حفر گمانه
 - وجود آب‌های زیرزمینی حاوی سولفید هیدروژن
- این گاز به علت داشتن بوی زننده حتی در عیارهای پایین نیز قابل تشخیص است. مثلاً هر گاه عیار این گاز در حدود 0.0001 درصد (1 ppm) باشد، بوی آن به سهولت قابل تشخیص است. اما از آنجا که اگر انسان مدتی در هوای حاوی H_2S بماند، اعصاب بینشی حساسیت خود را از دست می‌دهد و بوی آن را احساس نمی‌کند، لذا برای تعیین میزان H_2S معمولاً از کاغذهای آغشته به استات سرب استفاده می‌کنند. این کاغذ در مجاورت اندکی از گاز مزبور به رنگ سیاه در می‌آید. اگر کاغذ ظرف یکی دو دقیقه سیاه شود، نشانه‌ی آن است که عیار H_2S در حد خطرناک است (مدنی، ۱۳۶۶).
- در این مورد می‌توان از دستگاه‌های جدیدتری که در ادامه شرح داده شده، استفاده کرد.

۱- آشکارساز سولفید هیدروژن:

آشکارساز TT63ES سولفید هیدروژن یک نوع حسگر نیمه هادی، با یک حساسیت بسیار پایین نسبت به سایر گازها است. قاعده اساسی عملکرد این دستگاه، تغییرات مقاومت یک نیمه هادی از جنس اکسید قلع است. گاز کشف شده با اکسیژن جذب شده بر روی سطح نیمه هادی واکنش نشان می‌دهد و سبب می‌شود که مقاومت الکتریکی نیمه رسانا کاهش یابد.

در حالیکه سایر آشکارسازهای حاوی نیمه رسانا، نیاز دارند که هر هفته در معرض گاز مورد نظر قرار گیرند تا فعال شوند، این حسگر تنها در فواصل ۶ ماهه یا ۱ ساله به فعالسازی نیاز دارد. قطعات الکترونیکی مدرن موجود در این حسگر، این دستگاه را در مقابل تغییرات رطوبتی و درجه حرارت تطبیق پذیر کرده است. مدارهای موجود، تقویت کننده و سایر اجزا حسگر، در یک محفظه ضد احتراق قرار دارند و شرایط مناسب را برای عملکرد ردیاب فراهم کرده‌اند (www.simtronics.eu). در شکل ۱-۳- نمایشی از آشکارساز TT63ES، ساخت شرکت سیمترونیک^۱ دیده می‌شود.



شکل ۱-۳- آشکارساز سولفید هیدروژن مدل TT63ES (www.simtronics.eu)

^۱ Simtronic

۲- ابزار اندازه‌گیری H_2S مجهز به ریزحسگر^۱

این دستگاه یک ریز پردازنده^۲ است که جهت اندازه‌گیری برجای سریع و دقیق میزان H_2S محلول در آب، همزمان با اندازه‌گیری pH و دمای محیط، بدون نیاز به هیچ گونه نمونه برداری، ساخته شده است.

این ابزار برای کارهای آزمایشگاهی و اندازه‌گیری سریع و آسان در محل کار مفید است. دستگاه مجهز به یک آمپر متر، الکترودهای دارای پوششی از ریزحسگر H_2S و یک حسگر ترکیبی برای اندازه‌گیری pH و درجه حرارت است.

از طریق تعویض صفحه حسگر H_2S با یک صفحه گالوانیزه‌ی حسگر اکسیژن، این دستگاه می‌تواند به آسانی به یک ابزار اندازه‌گیری اکسیژن با کیفیت بالا تبدیل شود.

علاوه بر ریزحسگرهای اشاره شده برای اندازه‌گیری غلظت H_2S و اکسیژن، حسگرهایی نیز برای تعیین غلظت هیدروژن و ازن محلول، موجود هستند که به راحتی می‌توانند به این ابزار متصل شوند.

ابزار اندازه‌گیری درون یک پوشش چرمی قرار می‌گیرد و به آسانی قابل حمل و نقل است. در مقایسه با سایر روش‌ها و ابزارهای تجاری موجود برای اندازه‌گیری کمی غلظت، نظیر آنالیز شیمیایی به وسیله متیلن (استاندارد آلمان) یا به وسیله الکترودهای یونی، ابزار جدید اندازه‌گیری مزیت‌های زیر را دارد:

۱- اندازه‌گیری بدون نمونه‌گیری یا اضافه کردن مواد شیمیایی در pH های بین صفر تا ۸/۵

۲- حدود تشخیص خیلی پایین (کمتر از ۲ میلی گرم بر لیتر از H_2S)

۳- دقت و صحت بالا (بیشتر از ۲٪ مقدار اندازه‌گیری شده)

۴- بازدهی اقتصادی بالا

^۱ Micro sensor

^۲ Micro prossesor

- ۵- سرعت عمل زیاد (تقریباً ۵ تا ۱۰ دقیقه بعد از پلاریزاسیون باطری)
- ۶- اندازه‌گیری‌های دقیق در نمونه‌های تیره، گل آلود، رنگی و حاوی نمک
- ۷- در هنگام حضور فلزات سنگین و ترکیبات سولفور-اکسیژنه، حساسیت خود را از دست نمی‌دهد
- ۸- تفکیک پذیری بالا (بر حسب میکرومتر)
- ۹- آنالیز متناوب H_2S محلول (سولفیدهای فلزات سنگین کشف نمی‌شوند)
- ۱۰- عدم تحرک ماده تجزیه شونده^۱ و مصرف خیلی پایین ماده تجزیه شونده
- ۱۱- بازه‌های تشخیص غلظت:
- نوع ۱: ۱۰-۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر - نوع ۲: ۵۰-۰/۵ میلی‌گرم در لیتر - نوع ۳: ۳-۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر
- ۱۲- این ابزار در حضور ترکیباتی با غلظت‌های زیر، حساسیت خود را جهت تشخیص H_2S از دست نمی‌دهد:
- دی اکسید کربن (تا ۲۵/۳۸٪ حجمی)- متان (تا ۵/۷۸٪ حجمی)- هیدروژن (تا ۰/۵۴٪ حجمی)- آمونیاک (تا ۱۰۰۰ ppm)- مونوکسید کربن (تا ۹۲ ppm)- بی سولفید کربن (تا ۵٪ حجمی) و اسید استیک (تا ۱ مول بر لیتر).
- ۱۳- تداخل تشخیص خیلی پایین در هنگام حضور SO_2 و Cl_2 (در pH های کمتر از ۴)
- ۱۴- هیچ گونه تداخل سیگنالی در اثر حضور نمک تا غلظت ۴۰ گرم بر لیتر ایجاد نمی‌شود
- (www.amt-gmbh.com).

در شکل ۱-۴ نمایی از این دستگاه دیده می‌شود.

^۱ Analite



شکل ۱-۴- نمایی از ابزار اندازه‌گیری H_2S مجهز به ریزحسگر (www.amt-gmbh.com)

حضور سولفید هیدروژن در محیط کار سبب به وجود آمدن یکسری مشکلات خواهد شد که در ادامه به شرح آنها پرداخته شده است.

۱- خوردگی ابزار آلات و تجهیزات حفاری

حضور H_2S در محیط به دو صورت می‌تواند سبب وارد آمدن خسارت به تجهیزات کارگاه شود:

- واکنش با مس که سبب قطع و خرابی مدارهای الکترونیکی می‌شود.
 - سولفاته شدن آلیاژهای فولادی تجهیزات حفاری به دلیل آزاد شدن اسید سولفوریک.
- مکانیسم فرایند خوردگی فلز توسط H_2S در زیر شرح داده شده است:

گاز H_2S به میزان زیادی در آب حل می‌شود. در حجم‌های بالای آب، غلظت گاز ممکن است پایین باشد، اما در حجم‌های تقریباً پایین آب، نظیر یک لایه نازک آب بر روی یک سطح، در یک محیط مرطوب نظیر تونل، غلظت‌های بالاتری از گاز می‌تواند ایجاد شود. انحلال H_2S در آب ایجاد pH اسیدی می‌کند که سبب ایجاد خوردگی بر روی فلز و ادامه یافتن آن می‌شود. مکانیزم خوردگی آهن به این صورت است که آهن با جذب هیدروژن از مولکول H_2S ، ترد و شکننده می‌شود. گاز H_2S در تماس با اکسیژن اتمسفر

است، اکسیداسیون H_2S تولید SO_2 می‌کند که این SO_2 با آب واکنش داده و اسید سولفوریک ایجاد می‌نماید. اسید سولفوریک خاصیت خوردگی شدید بر روی فلز دارد.

۲- خطرات جانی برای نیروی کار

همانطور که اشاره شد، H_2S گازی فوق العاده سمی است و حضور آن در محیط کار، حتی در غلظت‌های پایین هم بسیار خطرناک است و بایستی تدابیر ایمنی لازم را برای مقابله با آن فراهم نمود، مانند استفاده از ماسک‌های فیلتردار.

۳- توقف عملیات کاری

حضور H_2S سبب نا ایمن شدن محیط کار برای نیروی کار شده که این موضوع توقف عملیات را در پی دارد. توقف فعالیت کاری، سبب افزایش هزینه‌های مربوط به نیروی کار و تجهیزات شده و همچنین عقب ماندن از برنامه زمانی پروژه را در پی خواهد داشت.

۱-۵- جمع بندی

آلاینده‌های موجود در هوای تونل‌ها را می‌توان به سه گروه عمده‌ی گرد و غبار، دود و بخار و گازها تقسیم کرد.

گازهای متصاعد شده در هوای تونل‌ها دارای سه منبع عمده‌ی تشکیلات سنگی و آب‌های زیرزمینی وارد شده به داخل تونل، چالزنی و آتشباری و کارکرد ماشین آلات است. این منابع می‌توانند سبب آزاد شدن گازهای آلاینده‌ای نظیر مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، سولفید هیدروژن، دی اکسید گوگرد و ... در فضای تونل شوند که مشخصات فیزیکی این گازها، حدود مجاز و تاثیرات بیولوژیکی آنها به طور مختصر در این فصل شرح داده شد.

فصل دوم

روش‌های حذف و ترقیق گازها

۲-۱- مقدمه

مهم‌ترین آلاینده‌های هوا در فضاهای زیرزمینی، گازهایی نظیر مونوکسید کربن، اکسیدهای ازت، اکسیدهای گوگرد و ترکیبات آلی فرار (VOC^۱) هستند. عموماً غلظت آلاینده‌ها در جریان هوا نسبتاً پایین است، اما انتشار همین مقدار نیز می‌تواند محدودیت‌هایی داشته باشد. حذف آلودگی‌های گازی از جریان هوا می‌تواند توسط روش‌های زیر صورت گیرد:

الف) جذب

ب) جذب سطحی

ج) میعان (چگالش)

د) احتراق

ه) بیوفیلتراسیون

۲-۲ جذب

جذب که تصفیه^۲ نیز نامیده می‌شود، شامل انتقال آلودگی‌ها از فاز گاز به یک حلال تماسی است. جذب یک پدیده انتقال جرم است که در آن گاز در یک مایع حل می‌شود. حذف گاز آلاینده در سه مرحله اتفاق می‌افتد:

- پخش گاز آلاینده در روی سطح مایع

- انتقال بر روی سطح مشترک فاز گاز- مایع (انحلال)

- توزیع گاز حل شده از روی سطح مشترک به درون مایع

^۱ Volatic Organic Compound

^۲ Scrubbing

تجهیزاتی نظیر برج‌های افشانه‌ای^۱، ستون‌های محصور^۲، تصفیه کننده‌های گردشی^۳ و تصفیه کننده‌های ونتوری^۴ برای جذب گازهای آلاینده از جریان‌های گازی استفاده می‌شود. پدیده جذب امروزه به طور گسترده برای جداسازی آلاینده‌های خطرناک و خورنده از جریان‌های گازی استفاده می‌شود (Amal Raj, 2004).

۲-۳- جذب سطحی

عموماً ماده جذب شده در جاذب حل می‌شود مانند انحلال شکر در آب، در حالیکه هنگامی که ماده جذب شده به سطح یک ماده دیگر متصل می‌شود (مانند گردو غبار روی دیوار)، این حالت دلالت بر پدیده جذب سطحی دارد. جذب سطحی^۵ نیز یک پدیده انتقال جرم است که در طی آن گاز به سطح یک جامد وصل (چسبیده) می‌شود. اتصال ذرات آلاینده به سطح جاذب می‌تواند فیزیکی یا شیمیایی باشد. هنگامی که جذب فیزیکی اتفاق می‌افتد، نیروهای الکتروستاتیک (واندروالس^۶) گاز آلاینده را بر روی سطح جاذب نگه می‌دارد، در حالیکه در جذب شیمیایی، اتصال از طریق واکنش با سطح انجام می‌گیرد. کربن فعال، غربال‌های مولکولی، سیلیکا ژل و آلومینای فعال شده رایج ترین جاذب^۷های سطحی هستند. رایج ترین خصیصه جاذب‌ها داشتن یک سطح مخصوص فعال بزرگ به ازای واحد حجم است. این جاذب‌ها برای جذب آلودگی‌های هیدروکربنی بسیار مفید هستند. فرایند جذب سطحی خصوصاً هنگامی بسیار مناسب است که آلودگی‌ها دارای خصوصیات زیر باشند (Amal Raj, 2004):

^۱ Spray towers

^۲ Packed column

^۳ Cycle scrubber

^۴ Ventury scrubber

^۵ Adsorption

^۶ Vandervalce

^۷ Adsorbent

- غیر قابل احتراق

- ناپایدار در مایع

- غلظت پایین

۲-۴- میعان (چگالش)

در یک درجه حرارت معین، اگر فشار جزئی یک ترکیب افزایش یابد و به مقداری برابر یا بزرگتر از فشار تبخیر آن ترکیب برسد، پدیده‌ی چگالش رخ می‌دهد.

اگر درجه حرارت مخلوط گاز نسبت به درجه حرارت اشباع آن کاهش یابد، فشار بخار آن با فشار جزئی آن برابر شده و میعان اتفاق می‌افتد. برای مثال با سرد کردن جریان گاز در درجه حرارت‌های پایین، بیشتر ترکیبات VOC متراکم شده و به حالت مایع و تحت نیروی وزنشان از جریان گاز خارج می‌شوند (Amal Raj, 2004).

۲-۵- احتراق

برخی آلاینده‌های هوا شامل ترکیباتی نظیر کربن، هیدروژن، اکسیژن و سولفور هستند که هنگامی که می‌سوزند، موادی با ضرر کمتر تولید می‌کنند. مثال‌هایی از چنین فرایندی عبارتند از:



تجهیزات احتراقی استفاده شده برای کنترل انتشار آلودگی، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که واکنش‌های اکسیداسیون تا آنجا که ممکن است به طور کامل انجام شوند و ترکیبات نسوخته‌ی ناچیزی باقی بماند.

برای اینکه احتراق مناسب اتفاق بیفتد، ضروری است که ۴ پارامتر اساسی اکسیژن، درجه حرارت، زمان و ترکیب، ایده‌آل باشند. بسته به نوع ترکیبی که اکسید می‌شود، روش‌های احتراق می‌تواند به صورت‌های زیر دسته بندی شوند (Amal Raj, 2004):

(۱) احتراق شعله مستقیم^۱

(۲) احتراق حرارتی

(۳) احتراق کاتالیستی

۲-۵-۱- احتراق شعله مستقیم

در این روش، جریان گاز مستقیماً درون یک کوره، با یا بدون اضافه کردن سوخت کمکی می‌سوزد. در بعضی موارد میزان درجه حرارت و محتوای اکسیژن به اندازه‌ای هست که به ترکیبات اجازه دهد تا خود اشتعالی داشته باشند. اما در سایر موارد، وارد کردن هوا و اضافه کردن مقداری اندک سوخت کمکی، مخلوط گاز را به نقطه احتراق آن خواهد رساند.

۲-۵-۲- احتراق حرارتی

هنگامی که غلظت گازهای آلاینده قابل احتراق بسیار پایین باشد، کوره‌های حرارتی استفاده می‌شوند تا احتراق مخلوط را امکان پذیر نمایند. روش کار عموماً به این گونه است که ابتدا جریان گاز آلاینده حرارت اولیه می‌بیند، سپس گاز داغ شده به داخل محفظه احتراق هدایت می‌شود. این محفظه شامل یک مشعل^۲ مجهز به سوخت کمکی است. درجه حرارت عملیات بستگی به طبیعت آلاینده‌های موجود در جریان گاز دارد.

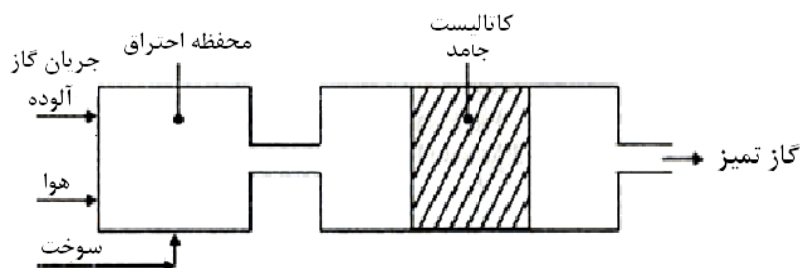
^۱ Direct flame

^۲ burner

۲-۵-۳- احتراق کاتالیستی

یک واحد احتراق کاتالیستی عموماً شامل یک بخش پیش گرمکن^۱ و یک بخش کاتالیستی است. (شکل

(۱-۲)



شکل ۱-۲- نمایی از یک واحد احتراق کاتالیستی (Amal Raj, 2004).

فرایند احتراق کاتالیستی برای کنترل NO_x ، SO_x ، HC و CO استفاده شده است. برای مثال در حذف کاتالیستی SO_2 ، ابتدا توسط یک ته نشین کننده غبار، تمام SO_2 از جریان گاز پاک شده و سپس مخلوط گازی از یک کاتالیست اکسید کننده SO_2 از جنس پنتا اکسید وانادیوم، در درجه حرارت بالا (۴۵۰ درجه سانتی گراد) عبور می کند. پروسه احتراق کاتالیستی، دارای بازدهی حدود ۹۰٪ برای حذف دی اکسید گوگرد موجود در جریان گاز است (Amal Raj, 2004).

۲-۶- بیوفیلتراسیون

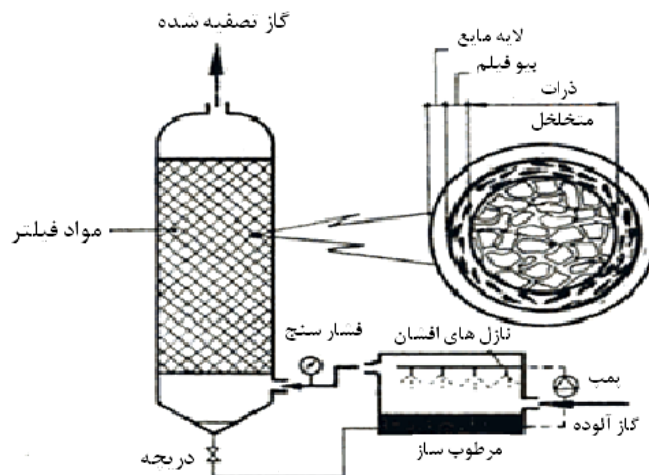
تصفیه بیولوژیکی آلاینده ها در سال های اخیر مورد توجه فزاینده ای قرار گرفته است. بیوفیلتراسیون شامل حذف و اکسیداسیون ترکیبات آلی از جریان هوای آلوده، با بسترهایی از کود آلی^۲، خاک یا زغالسنگ

^۱ Pre heating

^۲ compost

نارس است. این روش تصفیه نیز یک روش نسبتاً ارزان قیمت نظیر روش‌های رایج تصفیه هوا مثل جذب سطحی و احتراق است.

نمای شماتیک یک واحد بیوفیلتراسیون در شکل ۲-۲- دیده می‌شود.



شکل ۲-۲- نمایی از یک واحد بیوفیلتراسیون (آمال راج، ۲۰۰۴).

یک فرایند بیوفیلتراسیون، از میکرو ارگانیسم‌ها که به صورت یک لایه بسیار نازک بدون حرکت، بر روی بستر مواد جاذب قرار می‌گیرند، استفاده می‌کند. هنگامی که جریان هوای آلوده از بستر فیلتر عبور می‌کند، آلودگی‌ها از فاز گاز به لایه‌های بسیار نازک مایع (میکروارگانیسم‌ها) منتقل شده و سپس اکسید می‌شوند (Amal Raj, 2004).

فصل سوم

روش‌های حذف و ترقیق

سولفید هیدروژن

۳-۱- مقدمه

آلاینده‌ها بر حسب ترکیب شیمیایی‌شان به دو گروه آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. ترکیبات آلی حاوی کربن و هیدروژن هستند. برخی از مواد آلی که بیش از سایر ذرات آلی در اتمسفر یافت می‌شوند عبارتند از: فنل‌ها، اسیدهای آلی و الکل‌ها و معروفترین ذرات معدنی موجود در اتمسفر عبارتند از نیترات‌ها، سولفات‌ها و فلزاتی مانند آهن، سرب، روی و وانادیم.

اکسیدهای گوگرد شامل ۶ ترکیب مختلف گازی هستند: منو اکسید سولفور SO ، دی اکسید سولفور SO_2 تری اکسید سولفور SO_3 ، تترا اکسید سولفور SO_4 ، سکو اکسید سولفور SO_6 و هپتو اکسید سولفور S_2O_7 ، که در مطالعه آلودگی هوا دی اکسید سولفور حائز بیشترین اهمیت است (www.irche.com). ترکیب گوگرد با هیدروژن نیز سبب به وجود آمدن گاز بسیار خطرناک سولفید هیدروژن H_2S می‌شود که این گاز نیز جزو آلاینده‌های مهم به شمار می‌رود و روش‌های گوناگونی جهت حذف این گاز از هوا گسترش یافته است.

۳-۲- روش‌های حذف سولفید هیدروژن

همانطور که قبلاً اشاره شد، H_2S گازی فوق العاده سمی و خطرناک است و در صورت مواجهه با این گاز در حین کار، باید سریعاً برای ترقیق آن و رساندن عیار آن به درصدهای مجاز اقدام نمود.

H_2S به دو صورت می‌تواند در محیط حضور داشته باشد:

۱- به صورت محلول در آب (فاز مایع)

۲- به صورت ترکیب با هوای محیط (فاز گازی)

روش‌های گوناگونی برای ترقیق و یا حذف کامل این گاز وجود دارد. هر یک از این روش‌ها دارای شرایط اجرایی خاص بوده و بازده عملیات حذف توسط آنها متفاوت است. در ادامه به شرح این روش‌ها پرداخته شده است.

۳-۲-۱- روش‌های حذف H_2S محلول در آب

روش‌های حذف H_2S در فاز مایع را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

۱- روش‌های مبتنی بر کاهش ورود آب زیرزمینی حاوی H_2S به داخل تونل

۲- روش‌های مبتنی بر حذف H_2S محلول از آب‌های زیرزمینی

۳-۲-۱-۱- روش‌های مبتنی بر کاهش ورود آب زیرزمینی حاوی H_2S به داخل تونل

در این روش‌ها، با ممانعت از ورود آب زیرزمینی حاوی H_2S به داخل تونل، از آزاد شدن این گاز در فضای تونل جلوگیری می‌شود. با توجه به اینکه منبع عمده H_2S عموماً آب زیرزمینی است، این دسته روش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند و در قالب روش‌های زیر قابل طرح می‌باشند:

الف) زهکشی

زهکشی در معنای عام عبارتست از هدایت ایمن آب‌های (سطحی) از محیط اطراف.

عملیات پیش زهکشی به منظور کاهش فشار هیدروستاتیک می‌تواند یک راه حل فنی و عملی باشد اما کاربرد آن به دلیل اثرات منفی یا هزینه‌هایی مانند نشست سطح زمین، تخلیه منابع آبی مجاور یا تغییر رژیم جریان آب زیرزمینی منطقه، محدودیت‌هایی به همراه دارد. هزینه‌های این کار نیز در طول یک تونل بلند برای یک دوره نسبتاً طولانی می‌تواند بسیار سنگین باشد، تا حدی که سایر روش‌ها دارای ترجیح شوند. در این روش با توجه به H_2S دار بودن آب‌ها، نحوه و محل رهاسازی آنها نیز دارای محدودیت است (Naeemi et al, 2000).

ب) تزریق

تزریق فرایندی است که در طی آن ماده تزریقی به خلل و فرج، درزه و شکاف و یا حفرات تشکیلات سنگی و خاکی تزریق شده و موجب بهبود وضعیت سیستم می‌شود. به طوریکه در اثر آن، خاک با کاهش نفوذ پذیری و افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست روبرو می‌شود (صدقیانی، ۱۳۸۷).

تزریق دوغاب در درزه‌ها و شکستگی‌های آب‌بر توده سنگی، جریان را از طریق آنها کاهش می‌دهد یا با تاخیر همراه می‌سازد. این روش معمولاً در شرایط خیلی مناسب نیز جریان آب را کاملاً قطع نمی‌کند بلکه آنرا کاهش می‌دهد. دوغاب‌ها متنوع‌اند و می‌توانند ترکیبی از سیمان، سیمان و خاک، بنتونیت یا مواد شیمیایی مانند سدیم سیلیکات و رزین اپوکسی باشند. انتخاب نوع دوغاب به تخلخل سازندهای زیرزمینی، سرعت جریان آب و مقاومت فشاری سنگ بخش‌های تزریق شده بستگی دارد. به طور کلی دوغاب‌های ماسه-سیمان برای بستن حفره‌های بزرگ و شکستگی‌ها و دوغاب‌های رس و سیمان پرتلند برای بستن شکستگی‌های نسبتاً کوچک و خاک‌های دانه درشت به کار می‌رود. ژل بنتونیتی نسبتاً ارزان است و می‌تواند رسوبات ماسه‌ای را نفوذ ناپذیر نماید ولی به مقاومت آن نمی‌افزاید. دوغاب‌های شیمیایی در خاک‌های ریزدانه عاری از مقادیر زیاد رس و با اندازه موثر کمتر از یک میلی‌متر به کار می‌روند (قیامی، ۱۳۸۵).

با توجه به توانایی مناسب این روش برای جلوگیری از ورود جریان آب به داخل تونل، استفاده از آن در مکان‌هایی 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.

علاوه بر هزینه‌ی 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. مخصوصاً در حفاری با TBM هزینه تاخیرات می‌تواند به اندازه‌ای زیاد باشد که بررسی سایر روش‌های ممکن را ضروری نماید (Naeemi et al, 2000).

ج) نصب پوشش^۱

روش دیگر کاهش جریان آب ورودی به تونل، نصب پوشش نهایی آب‌بند همزمان با پیشروی است. این روش به طور گسترده‌ای در پروژه‌های عمرانی شهر نیویورک مورد استفاده قرار گرفته است (Naeemi et al, 2000).

مرسوم ترین پوشش پایدار در تونل‌های سنگی، استفاده از پوشش‌های بتنی است، که در انواع: بتن درجا، شاتکریت^۲ و بتن پیش ساخته قابل اجراست:

- بتن درجا

مزیت این نوع پوشش قابلیت انعطاف پذیری آن است. این نوع بتن درون یک قالب متحرک که در پشت منطقه کار نصب می‌شود، ریخته شده و به راحتی شکل قالب را به خود می‌گیرد و به عنوان نوعی دیوار محافظ پایدار و گاه محافظ موقت عمل می‌کند (قیامی، ۱۳۸۵).

پوشش قالبی بتنی درجا در زیر پوشش سگمنتی، در تونل‌های حمل و نقل نظیر تونل‌های راه آهن، به منظور عایق بندی هرچه بیشتر دیواره‌ی تونل در مقابل آب زیرزمینی استفاده می‌شود.

- شاتکریت

شاتکریت چه به تنهایی و چه در ترکیب با روش‌هایی مانند پیچ‌سنگ، پشت‌بندهای فلزی و آرماتورها، معمول ترین لایه محافظ زمین را تشکیل می‌دهد.

¹ lininig

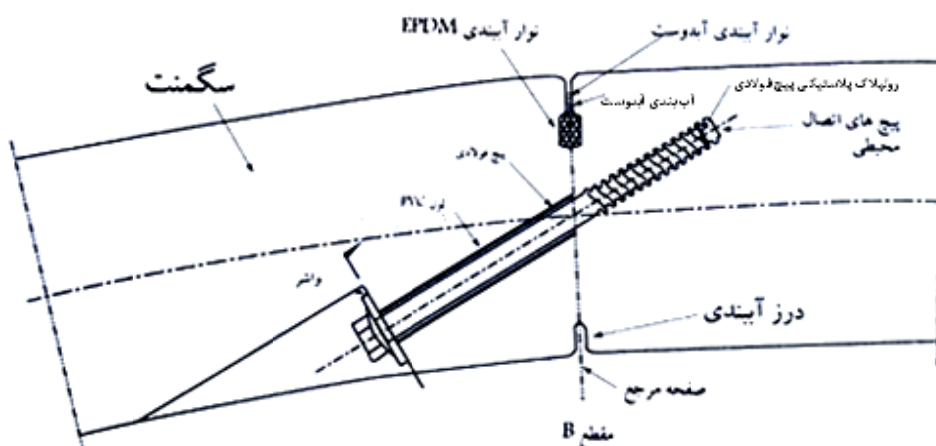
² Shotcrete

پاشش بتن در ضخامتی بین ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر، علاوه بر ایفای نقش محافظتی، می‌تواند در جهت جلوگیری از هجوم آب‌های زیر زمینی تا اندازه‌ای موثر باشد (قیامی، ۱۳۸۵).

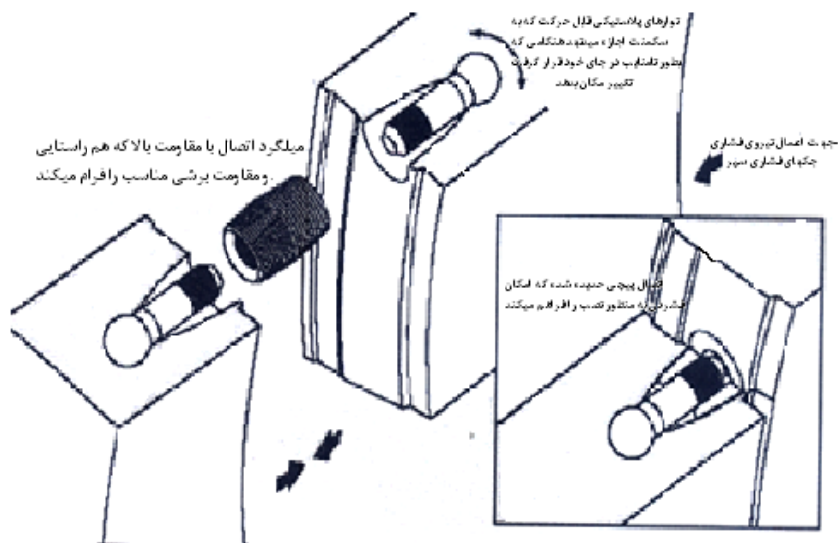
- پوشش پیش ساخته

پوشش‌های آب بندی شده‌ی پیش ساخته بتنی، سیستم نگهداری اولیه و دائم تونل را در زمانی که تونل در حال پیشروی است، تشکیل می‌دهند. پوشش‌های بتنی پیش ساخته برای نگهداری تمام بارهای ناشی از سرباره و بارهای هیدروستاتیک ناشی از حداکثر و حداقل میزان مورد انتظار سطح آب زیرزمینی طراحی می‌شوند. علاوه بر این، پوشش‌های بتنی پیش ساخته باید در مقابل بارهای موقت ناشی از حرکت TBM و فشارهای ناشی از تزریق دوغاب در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده تونل نیز مقاومت کنند. یک پوشش چند قطعه‌ای بسته به قطر تونل شامل پنج قطعه بزرگ یا بیشتر، به علاوه یک قطعه کلید برای بستن حلقه می‌باشد (جروم بی، ۱۳۸۷).

این قطعات به وسیله اتصالات شعاعی (یا اتصالات طولی) و اتصالات محیطی (یا اتصالات دایره‌ای)، در حین نصب به وسیله پیچ‌ها (شکل ۱-۳) یا ترکیبی از پیچ‌ها و میلگردها (شکل ۲-۳) نصب می‌شوند.



شکل ۱-۳- قطعات بولت شده (اتصال طولی) (جروم بی، ۱۳۸۷).



شکل ۳-۲- اتصال دهنده‌های میلگرد (اتصال محیطی) (جروم بی، ۱۳۸۷).

مهم‌ترین مزایای این روش، این است که با فاصله کمی پس از حفاری، پوشش گذاری انجام می‌شود و آب‌بندی واقعی را به وجود می‌آورد. بنابراین تلاش‌ها بر روی کاهش و کنترل سطح گاز متصاعد شده از مناطق جلوتر از پوشش، متمرکز خواهد گردید (به وسیله تزریق جریان‌های بسیار زیاد، جمع آوری آب به درون سیستم بسته در حداقل زمان ممکن و یا به وسیله سیستم تهویه). در مقایسه با مزایای ذکر شده، هزینه‌های نسبتاً بالای این روش نیز قابل توجه است (Naeemi et al, 2000).

۳-۲-۱- روش‌های مبتنی بر حذف محلول از آب‌های زیرزمینی

این دسته روش‌ها، روش‌های موثری برای حذف H_2S در غلظت‌های پایین از آب هستند. مبنای اکثر این روش‌ها بر استفاده از یکسری کاتالیست جهت اکسیداسیون H_2S و تبدیل آن به گوگرد عنصری و سپس جذب و تصفیه گوگرد از آب، توسط فیلتر است که در ادامه تشریح شده‌اند.

الف) کلریزاسیون^۱

کلریزاسیون یک روش موثر و بسیار رایج برای اکسیداسیون سولفید هیدروژن است، خصوصاً اگر pH آب بین ۶ تا ۸ باشد. این روش برای غلظت‌های H_2S متجاوز از ۶ میلی گرم بر لیتر استفاده می‌شود. در این فرایند، از کلر (یا گاهی اوقات هیپو کلریت سدیم $NaCl_2$) به عنوان ماده شیمیایی اکسیدکننده برای تبدیل گاز به سولفور نامحلول (جامد زردرنگ) استفاده می‌شود (Swistock, B, 2001). میزان تاثیر فرایند کلریزاسیون، به موارد زیر بستگی دارد (www. Excel water.com):

➤ غلظت آلاینده در آب

➤ زمان موجود برای در تماس قرار گرفتن کلر با آب (زمان تماس)

➤ درجه حرارت آب

➤ pH آب

➤ خصوصیات ماده آلاینده

غلظت کلر بستگی به نوع و غلظت آلاینده موجود و درجه حرارت و pH آب دارد. هر قدر میزان زمان تماس آب و کلر بیشتر باشد، میزان کلر استفاده شده می‌تواند کاهش یابد. در مورد حذف H_2S توسط کلر، یک مقدار پیشنهاد شده، ۲ میلی گرم بر لیتر کلر برای هر ۱ میلی گرم بر لیتر سولفید هیدروژن است. سیستم‌های کلرزی عمده^۲ شامل ۴ قسمت عمده زیر هستند:

۱- پمپ تغذیه کلر^۲

۲- مخزن فشار^۳

^۱ Chlorination

^۲ Chlorine Feeding pump

^۳ Pressure tank

۳- مخزن تماس^۱

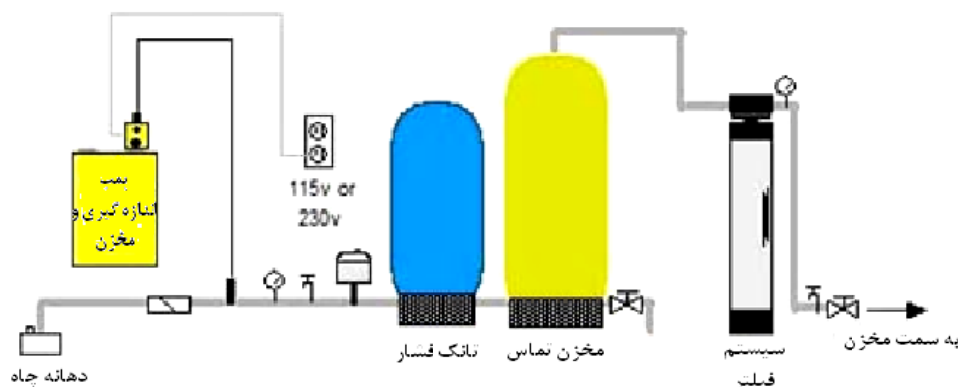
۴- فیلتر کلرزدایی^۲

دو نوع سیستم مختلف کلرزنی وجود دارد:

۱- سیستم تغذیه‌ی شیمیایی^۳

۲- سیستم ریزش چکه‌ای^۴

در سیستم اول که نمای شماتیک آن در شکل ۳-۶ نشان داده شده، در هر مرحله کلرزنی یک مقدار ثابت از محلول هیپوکلریت سدیم در هر نوبت عملکرد پمپ، وارد پمپ فشار می‌شود. محلول آب و کلر سپس وارد مخزن تماس می‌شود تا در آنجا به مدت زمان کافی (عموماً ۲۰ دقیقه)، ذرات مواد آلاینده با کلر در تماس باشند و فرصت لازم برای اکسیداسیون H_2S فراهم شود (www. Excel water.com).



شکل ۳-۶- نمایی از یک واحد کلریزاسیون به روش سیستم تغذیه شیمیایی (www. Excel water.com)

¹ Contact tank

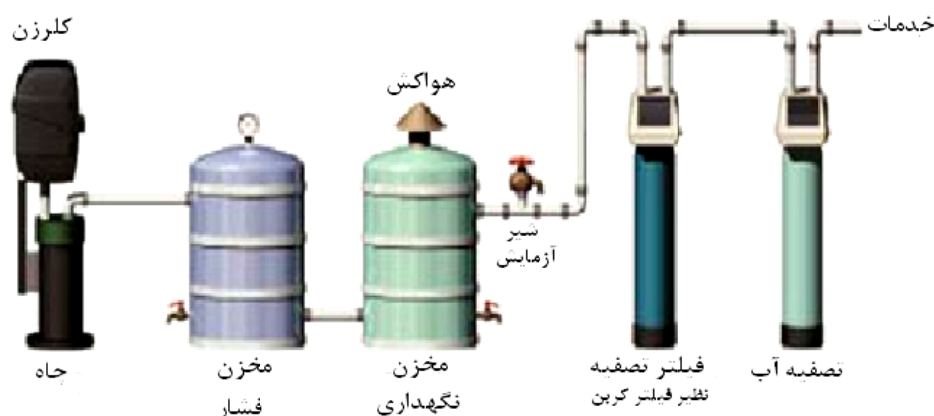
² Dechlorination filter

³ Liquid- chemical system

⁴ Pellet- drops

آب تصفیه شده معمولاً دارای بو یا طعم است که به دلیل تشکیل یکسری محصولات جانبی مشخص یا وجود کلر باقی مانده بعد از زمان تماس مورد نیاز، ایجاد می‌شود. برای حذف سولفور معلق تشکیل شده و همچنین کلر اضافی باقی مانده، آب وارد سیستم فیلتراسیون (عموماً فیلترهایی از جنس کربن فعال یا آگرگات) می‌شود و ناخالصی‌های آن توسط این سیستم جذب می‌شود.

در سیستم دوم، قرص‌های خشک کلر (از جنس هیپوکلریت کلسیم) مستقیماً داخل مخزن آب انداخته می‌شوند. نمایی از این سیستم در شکل ۷-۳ قابل مشاهده است. تعبیه مخزن تماس عموماً الزامی نیست زیرا مدت زمان کافی برای تماس کلر با آب داخل وجود دارد (www. Excel water.com).



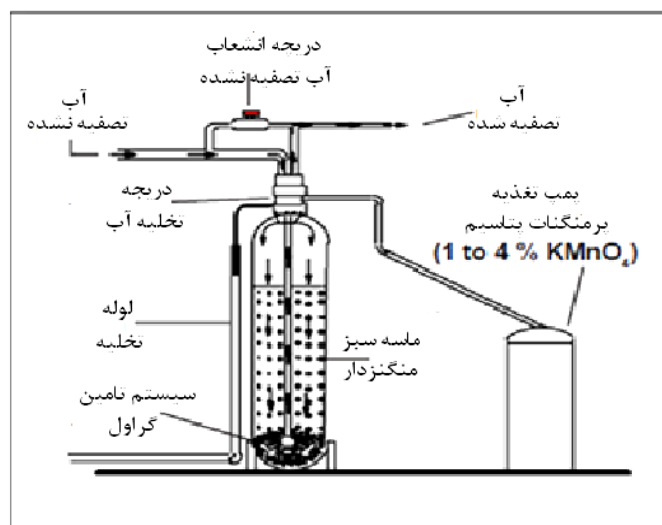
شکل ۷-۳- نمایی از یک واحد کلریزاسیون به روش سیستم ریزش چکهای (www. Excel water.com)

استفاده از روش کلریزاسیون جهت حذف H_2S از آب زیرزمینی ورودی به تونل، به دلیل نیاز این روش به فضای زیاد جهت نصب واحد کلریزاسیون در داخل تونل، امکان پذیر نمی‌باشد.

ب) فیلتر ماسه سبز منگن‌دار

استفاده از ماسه سبز منگن‌دار یک روش دیگر برای جذب H_2S از آب است. این روش عموماً برای آب‌های حاوی H_2S با غلظت بین ۱ میلی‌گرم بر لیتر تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر توصیه می‌شود. فیلتر سبز منگیزی

دارای یک آستر (پوشش) ویژه از دی اکسید منگنز است که قادر است گاز H_2S را به ذرات سولفور جامد اکسید کند و سپس این ذرات توسط فیلتر شنی جذب و پالایش شود. مدت زمان توصیه شده برای تماس آب با فیلتر منگنزی عموماً ۱۵ دقیقه است. هنگامی که تمام اکسید منگنز مصرف شد، ماسه سبز با تزریق محلول پرمنگنات پتاسیم مجدداً احیا می‌شود و بدیهی است که برای تصفیه مقادیر بالای سولفید هیدروژن، تعداد دفعات احیای بیشتری مورد نیاز است (Swistock, B, 2001).



شکل ۳-۸- نمایی از یک واحد تصفیه آب با استفاده از فیلتر سبز منگنزدار (Swistock, B, 2001)

از آنجا که استفاده از فیلترهای ماسه‌ای منگنزدار، جهت حذف H_2S با غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر در آب مناسب است، در شرایط تونل‌هایی که غلظت H_2S موجود در آب بالا است، استفاده از این روش موثر نخواهد بود.

ج) فیلتر کربن فعال

هنگامی که آب حاوی مقادیر اندکی از H_2S باشد (کمتر از حدود ۱ میلی‌گرم بر لیتر)، فیلتر کربن فعال می‌تواند مفید باشد. کربن فعال با جذب سطحی در تصفیه آب مشارکت می‌کند. در طی فرایند تصفیه،

کربن فعال نخست سولفور را به سطح کربن جذب می‌کند، سپس در حضور اکسیژن محلول، این فیلتر سولفید را اکسید می‌کند و آنرا به ذرات گوگرد جامد تبدیل می‌کند.

یک سطح بزرگ از کربن فعال (معمولاً ۱ تا ۱/۵ فوت مربع)، برای تصفیه کامل آلودگی‌های آب مورد نیاز است. هزینه اولیه و شرایط نگهداری این سیستم پایین است، اما ضروری است که فیلترهای کربنی مرتباً تعویض شوند (Swistock, B, 2001).

با توجه به ظرفیت جذب بسیار پایین این فیلترها، استفاده از آنها به منظور حذف مقادیر متوسط و بالای H_2S از جریان آب ورودی به تونل‌ها موثر نخواهد بود.

(د) هوادهی

یک روش رایج دیگر برای تصفیه آب‌های حاوی سولفور، هوادهی است. هنگامی که غلظت H_2S کمتر از ۲ میلی‌گرم بر لیتر باشد، این روش بسیار موثر است ولی در غلظت‌های بالاتر این روش توانایی زدودن کامل H_2S را ندارد.

اساس این روش بر واکنش اکسیژن موجود در هوا با H_2S محلول در آب و در نتیجه تشکیل ذرات جامد گوگرد، سپس حذف و پالایش این ذرات توسط واحد فیلتراسیون استوار است.

در مرحله اول عملیات، هوا با فشار زیاد به درون خطوط لوله آب دمیده می‌شود. مخلوط آب و هوای تزریق شده، با عبور از مخزن مخلوط‌کن (مخزن تماس) فرصت تماس پیدا خواهند کرد و در این مرحله H_2S محلول در آب اکسید شده و به ذرات جامد گوگرد تبدیل خواهد شد. جریان آب سپس وارد مخزن فیلتر می‌شود. در این مخزن‌ها، بسترهایی با فرمول ویژه وجود دارند که ذرات گوگرد و سایر آلاینده‌های موجود در آب را جذب کرده و سبب تصفیه آب خواهند شد. این بسترها در دوره‌های زمانی مشخص شسته شده و ذرات آلاینده موجود در آنها جدا می‌شود (www. Excel water.com).

استفاده از روش هوادهی جهت حذف H_2S محلول در آب زیرزمینی وارد شده به تونل، به دلایل زیر امکان پذیر نمی‌باشد:

- فضای کافی برای نصب تاسیسات هوادهی و فیلتراسیون احتمالی در داخل تونل وجود ندارد.
- این روش برای آب‌های حاوی H_2S با غلظت کمتر از ۲ میلی‌گرم بر لیتر موثر بوده ولی در غلظت‌های بالاتر، توانایی زدودن کامل H_2S را ندارد.

ه) اکسیدکننده‌ها

مواد شیمیایی اکسیدکننده خاص مانند پراکسید هیدروژن یا هیپو کلریت سدیم می‌توانند با H_2S واکنش داده و موادی با سمیت کمتر یا غیر سمی تولید نمایند. سایر مواد شیمیایی مانند هیدروکسید سدیم pH آب را افزایش داده و در نتیجه آزاد سازی سولفید هیدروژن را کاهش می‌دهند یا متوقف می‌سازند (محیط های اسیدی به نسبت محیط‌های قلیایی قابلیت بیشتری برای آزادسازی H_2S دارند). با اینحال این مواد نیازمند استفاده در مقادیر نسبتاً زیاد هستند تا موثر واقع شوند. بنابراین این روش می‌تواند پرهزینه بوده و همچنین بسته به نوع مواد شیمیایی مورد استفاده، آب ممکن است به خاطر رنگ یا کدورت زیاد برای تخلیه نامناسب گردد. همچنین کار با این مواد در محیط یک تونل و در مواجهه با هجوم آب به درون آن مشکل و پیچیده خواهد بود. با توجه به سه دلیل فوق این روش تنها در جایی اجرایی می‌باشد که غلظت گاز زیاد اما جریان آب نسبتاً کم باشد. موارد کمی وجود دارد که این روش برای حل مشکل فوق استفاده شده باشد، اما بعضی مواقع استفاده ترکیبی از مواد کاهش دهنده pH و مواد اکسید کننده ممکن است نتایج بهتری در پی داشته باشد. قابل ذکر است که این روش در تونل دربرن^۱ در میشیگان آمریکا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مناسبی به همراه داشته است (Naeemi et al, 2000).

¹ dearborn

در ادامه به شرح تعدادی از این اکسیدکننده‌ها پرداخته شده است (www.Alken-murray.com)

- اکسیژن

در حال حاضر، تصفیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی از H_2S ، اغلب با اکسیداسیون با گاز اکسیژن صورت می‌گیرد.



دی اکسید گوگرد به سرعت با آب واکنش داده و تولید اسید سولفوریک می‌نماید که غلظت آن خیلی پایین است.

- پراکسید هیدروژن

پراکسید هیدروژن تزریق شده به محلول، با H_2S واکنش داده و سبب تشکیل آب و سولفور می‌شود. علاوه بر این، با تجزیه پراکسید هیدروژن غلظت اکسیژن نامحلول در جریان افزایش می‌یابد که این امر نیز به تجزیه H_2S کمک خواهد کرد.

به طور کلی ۹۰٪ واکنش بین پراکسید هیدروژن و H_2S در طی ۱۰ الی ۳۰ دقیقه انجام خواهد شد. استفاده از این ماده برای تاسیسات کوچک موجه‌تر است ولی در مورد تاسیسات بزرگ، از آنجا که پراکسید هیدروژن باید در مقیاس وسیع خریداری و ذخیره شود، رعایت قوانین ایمنی خاص در هنگام حمل و نقل و انبار کردن این ماده الزامی است.

واکنش‌های انجام شده در مجاورت پراکسید هیدروژن به شرح زیر است:



- نمک‌های فلز

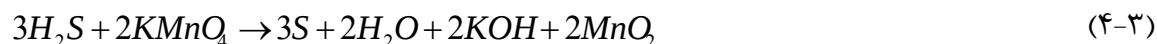
با واکنش نمک‌های فلزی نظیر فروسولفات با H_2S ، یک سولفید آهنی غیر قابل حل تشکیل شده و رسوب می‌کند. این روش عموماً ارزان‌تر از استفاده از پراکسید هیدروژن است.

استفاده از این ماده ممکن است سبب تشکیل مقدار زیادی اسید آزاد شود که این امر موجب تغییرات زیان آور در خواص اسیدی یا قلیایی جریان می‌شود.

- پرمنگنات پتاسیم

پرمنگنات پتاسیم یک عامل اکسیدکننده قوی است که بسته به اینکه جریان اسیدی باشد یا قلیایی، می‌تواند با H_2S از راه‌های گوناگونی واکنش نشان دهد.

در شرایط اسیدی، واکنش زیر اتفاق می‌افتد:



در شرایط قلیایی، واکنش زیر اتفاق می‌افتد:



در شرایط pH بین اسیدی و بازی، واکنش‌های گوناگونی اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل سولفور عنصری، سولفات، تیوسولفات، دی تیوسولفات و سولفید منگنز می‌شود.

پیش‌بینی و کنترل میزان پرمنگنات پتاسیم استفاده شده عموماً بسیار مشکل است. همچنین هزینه بالا و

میزان ماده مصرفی زیاد (۶ یا ۷ قسمت پرمنگنات پتاسیم به ازای هر قسمت H_2S) انگیزه استفاده از این

ماده را برای جذب H_2S از آب ورودی به تونل کاهش می‌دهد (www.Alken-murray.com).

۳-۲-۳- روش‌های حذف H_2S موجود در هوای محیط

روش‌های مورد استفاده برای حذف H_2S از هوای محیط به چهار گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱- بیوفیلتراسیون

۲- روش‌های مبتنی بر حذف H_2S از گاز طبیعی

۳- احتراق

۴- استفاده از جاذب‌های شیمیایی

۳-۲-۳-۱- بیوفیلتراسیون^۱

بیوفیلتراسیون یکی از روش‌های رایج و پر استفاده برای تصفیه گازهای آلوده است. در حال حاضر این روش به عنوان یک تکنولوژی اقتصادی (هزینه‌های اجرایی، سرمایه‌گذاری و نگهداری این روش پایین است)، جهت تصفیه جریان‌های گازی حاوی مقادیر پایینی از ترکیبات فرار ارگانیک و غیر ارگانیک، یک مقبولیت جهانی گسترده کسب کرده است

اساس این روش بر عبور دادن هوای حاوی ناخالصی از روی یکسری بسترهای حاوی مواد متخلخل که بر روی آنها لایه‌ای نازک از مواد ارگانیک وجود دارد، استوار است. با عبور گاز از این مواد، ناخالصی‌های موجود در گاز توسط لایه مواد ارگانیک (یکسری باکتری‌های ویژه) جذب شده و به ترکیبات پایدار و بی خطر تبدیل می‌شود.

کانون اصلی توجهات انجام شده در این روش، نوع و میزان مواد استفاده شده به عنوان بستر است که باید یک محیط مناسب و مساعد را در زمینه رطوبت، درجه حرارت، pH، جذب مواد تلقیح شونده و تامین اکسیژن فراهم آورد (Dumont, et al, 2008).

^۱ Biofiltration

یک بستر مناسب باید خصوصیات زیر را داشته باشد:

۱- حاوی ذرات با اندازه مناسب و عاری از هرگونه شکستگی و دارای سطح مخصوص در دسترس برای اتصال مواد.

۲- ظرفیت جذب بالای مواد تلقیح شونده

۳- ظرفیت نگهداری بالای رطوبت

۴- ظرفیت خنثی کردن بالا که از نوسانات بالای pH جلوگیری می‌کند.

۵- مقاومت مکانیکی و ثبات شیمیایی

رایج ترین بسترها، زغال سنگ، خاک و کود مخلوط شده با پوسته درختان، تفاله نیشکر، صدف جانداران دریایی، کربن فعال و یا ترکیبی از اینهاست. این گونه محیط‌های ارگانیک نیاز است که بعد از ۳ الی ۵ هفته تعویض شوند و احیای مجدد این محیط‌ها بسیار مشکل است.

یکسری مواد غیر ارگانیک نیز برای استفاده به منظور بستر، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اکسیدهای فلزی نظیر سرامیک متخلخل، کریستوبالیت کلسینه و یا پرلیت. قیمت این مواد بالاست و هیچگونه مواد مغذی را برای توده فراهم نمی‌کنند.

از جهت خصوصیات هندسی نیز، ثابت شده که بهترین بستر حامل مواد تلقیحی، باید شکل سیلندری داشته باشد (Dumont, et al, 2008).

- شرح مختصری از روش بیوفیلتراسیون استفاده شده جهت حذف H_2S از جریان‌های گازی

برای حذف H_2S با غلظت‌های پایین از جریان‌های گازی، ابتدا تعدادی ستون (با ارتفاعی حدود ۰/۵ تا ۱ متر) که معمولاً از جنس پلکسی گلاس هستند، آماده کرده و سپس آنها را با یک بستر مناسب، به میزان مقتضی پر می‌کنند. برای حذف H_2S ، این بستر می‌تواند از جنس صدف جانداران دریایی، پوسته درختان،

زغال سنگ و ... باشد. مطالعات نشان داده که کربن فعال گرانوله یا شکسته می‌تواند یک بستر ایده آل برای حذف H_2S باشد.

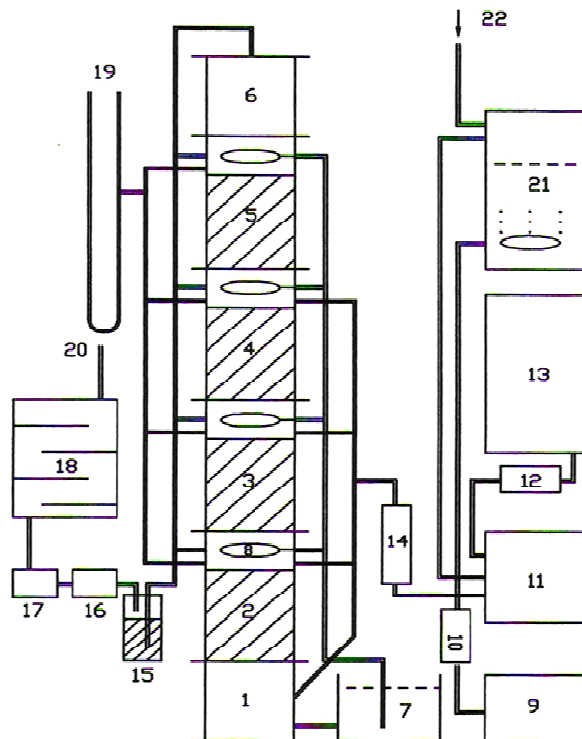
در مرحله بعد یک میکروارگانیسم مناسب را به داخل ستون تلقیح می‌کنند. باکتری تیوباسیلوس^۱ اولین و مفیدترین باکتری مورد استفاده جهت حذف H_2S از جریان‌های گازی است. باکتری تلقیح شده به داخل ستون (که از نوع باکتری‌های رشته‌ای است)، به کمک جریان‌های هوای پاک و مواد مغذی باز پروری می‌شود و یک لایه بسیار نازک را بر روی مواد بستر تشکیل می‌دهد. در فضای بالای هر ستون، چندین ورودی جهت تزریق هوا، قرائت نمونه خروجی از هر ستون و تزریق مواد مغذی تعبیه شده است.

برای برقراری جریان گاز یکنواخت ورودی، در کف هر ستون تعدادی روزنه با قطر کم تعبیه شده است. جریان گاز حاوی H_2S از روزنه‌های موجود در کف هر ستون، وارد آن شده و با عبور از محیط بستر، توسط میکروارگانیسم‌های موجود، H_2S موجود در گاز، بسته به شرایط عملیات و همچنین میکروارگانیسم‌های موجود، به سولفات، تیوسولفات و یا سایر محصولات سولفور تبدیل می‌شود و سرانجام گاز تصفیه شده از خروجی‌های تعبیه شده در بالای ستون خارج می‌شود.

راندمان عملیات بیوفیلتراسیون عموماً بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد گزارش شده است (مسعودی نژاد، ۱۳۸۷).

در شکل ۳-۹ نمایی از تجهیزات روش بیوفیلتراسیون مشاهده می‌شود.

^۱Thiobacillus



شکل ۳-۹- اجزای دستگاه تصفیه H_2S (مسعودی نژاد، ۱۳۸۷)

- | | |
|-------------------------------------|---|
| ۱- مخزن جمع آوری شیرابه | ۳و۲- بستر پر شده با کربن اکتیو گرانوله |
| ۴و۵- بستر پر شده با کربن اکتیو شکست | ۶- محل جمع آوری خروجی گاز |
| ۷- مخزن آب جهت ابیاری مخزن ها | ۸- آبپاش |
| ۹- کمپرسور هوای فشرده | ۱۰- فیلتر از جنس فایبر گلاس |
| ۱۱- مخزن اختلاط | ۱۲- تنظیم کننده جریان گاز H_2S |
| ۱۳- مخزن تولید H_2S | ۱۴- جریان سنج |
| ۱۵- رطوبت گیر | ۱۶- دستگاه تعیین مقدار H_2S بر حسب میلی گرم بر متر مکعب |
| ۱۷- پمپ مکنده هوا | ۱۸- دستگاه حذف H_2S اضافی از سیستم |
| ۱۹- مانومتر جهت تعیین افت فشار | ۲۰- خروجی هوای پاک |
| ۲۱- دستگاه تولید هوای گرم و مرطوب | ۲۲- ورودی جریان آب |

مهم ترین مشکل این روش برای تصفیه جریان هوای حاوی H_2S ، سرعت پایین آن در حذف H_2S است. از آنجا که در شرایطی مانند یک تونل در حال حفر، که با مشکل تصاعد گاز H_2S روبرو است، به تصفیه سریع H_2S متصاعد شده در اتمسفر نیاز است، استفاده از این روش کاربردی نمی باشد. همچنین تاسیسات

روش بیوفیلتراسیون فضای زیادی را در قسمت پشتیبانی دستگاه TBM اشغال خواهد کرد که این امر مسلماً در انجام سایر فعالیت‌های تونل سازی اخلاص به وجود خواهد آورد.

۳-۲-۳- روش‌های مبتنی بر حذف H_2S از گاز طبیعی

سولفور موجود در گاز طبیعی به علت دارا بودن بوی زننده و تنفس‌های مرگ آور و عامل فرساینده‌گی خطوط لوله انتقال، گاز را غیر مطلوب و انتقال آن را پر هزینه می‌سازد. روش مورد استفاده در فرایند شیرین سازی گاز ترش «فرایند آمین» است. مواد مورد استفاده در این فرایند انواع محلول‌های آمین می‌باشد که دارای خاصیت بازی هستند. در این نوع فرایندها اغلب از دو محلول آمین به اسمی "مونو اتانول آمین (MEA) و دی اتانول آمین (DEA)" استفاده می‌شود.

مونو اتانول آمین یک باز قوی است که با گازهای اسیدی به طور همزمان واکنش داده و جذب H_2S توسط آن از دی اتانول آمین بیشتر است. عوامل موثر در انتخاب نوع آمین در فرایند، تابعی از نوع و مقدار ناخالصی‌های موجود در گاز ترش، جداسازی انتخابی گازهای اسیدی، دما و فشار جریان ورودی به فرایند شیرین سازی است.

آمین‌ها با گازهای اسیدی مانند CO_2 و H_2S در گاز ترش، به صورت برگشت پذیر واکنش می‌دهند. در برج تماس، عمل جذب در فشار بالا و دمای پایین انجام می‌گیرد در حالیکه در برج بازیابی، عمل دفع در فشار پایین و دمای بالا صورت می‌گیرد.

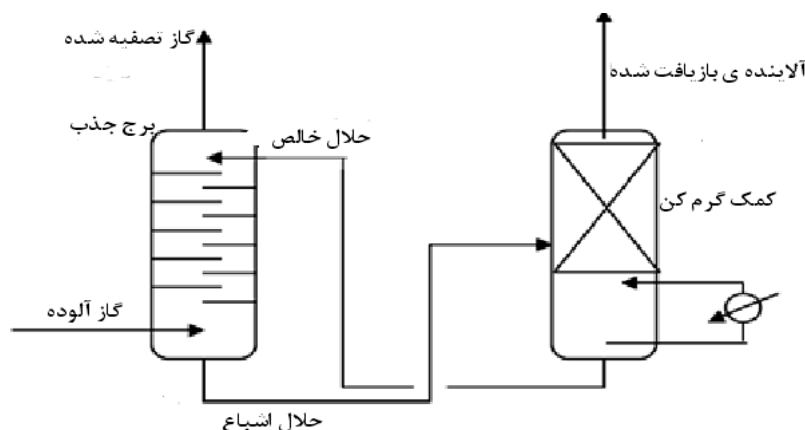
خلاصه‌ای از این فرایند به شرح زیر است:

گاز ترش از میان برجی که با محلول آمین پر شده است عبور داده می‌شود. تشابه خواص مولکولی محلول آمین با سولفور موجود در سولفید هیدروژن باعث می‌شود تا بخش عمده‌ای از مواد سولفوره جذب محلول شود و سپس این محلول با شرکت در فرایند ثانوی، در برج بازیابی، ضمن جداسازی از سولفید هیدروژن

جذب شده، مجدداً قابل بهره‌برداری در فرایند ابتدایی می‌شود. غلظت H_2S باقی مانده در گاز تصفیه شده، زیر ۲ تا ۵ ppm است. در مرحله‌ی بعد سولفید هیدروژن حاصل از فرایند قبل، پس از انتقال به واحد گوگردسازی با شرکت در فرایندی کاتالیستی و با واکنش‌های گرمایی به نام "فرایند کلاوس"، سولفور موجود را به صورت مایع آزاد می‌کند.

مایع حاصل بعد از انتقال به واحد دیگری و بعد از عملیات انجماد، دانه بندی و انبار می‌شود. این فرایند تا ۹۷ درصد سولفور موجود در گاز طبیعی را بازیافت می‌کند. این ماده که سولفور پایه نامیده می‌شود به شکل پودر زرد رنگ بوده و می‌توان آنرا داخل محوطه پالایشگاه یا خارج از آن مشاهده کرد (www.Aftab.ir).

در شکل ۳-۱۰ یک فلوچارت کلی از این فرایند دیده می‌شود.



شکل ۳-۱۰ - فلوچارتی از یک واحد تصفیه آمین (Guido et al, 2003)

فرایندهایی غیر از فرایند آمین نیز می‌توانند برای بازیافت H_2S از گاز طبیعی و تبدیل آن به سولفور عنصری مورد توجه قرار گیرند. روش‌هایی نظیر میعان یا جداسازی غشایی چند لایه‌ای^۱، که البته کاربرد آنها به طور گسترده مورد توجه قرار نگرفته است.

همانطور که ذکر شد، برای استفاده از ترکیبات آمین برای حذف H_2S از جریان گاز یا هوا، به تاسیساتی نظیر برج‌های جذب و بازیابی و همچنین برقراری شرایط محیطی نظیر فشار بالا، نیاز است و طبعاً احداث این تاسیسات برای حذف H_2S از جریان هوای یک تونل در حال حفر، به هیچ عنوان اقتصادی و کاربردی نخواهد بود.

۳-۲-۳-۳- احتراق

تکنیک سوزاندن H_2S موجود در جریان‌های گازی و تبدیل آن به ترکیب کم خطرتر SO_2 نیز یکی از روش‌های متداول برای حذف H_2S از جریان‌های گازی است که به دو صورت انجام می‌گیرد:

الف) احتراق حرارتی

روش اکسیداسیون حرارتی عموماً برای تصفیه جریان‌های حاوی مقادیر اندک از گازهای قابل احتراق به کار می‌رود. در این روش اغلب نیاز به اضافه کردن سوخت کمکی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین مشکلات این روش، تشکیل ترکیبات NO_x به دلیل حرارت بالای واکنش بین نیتروژن و اکسیژن هوا است. همچنین احتراق حرارتی مواد آلی مقداری CO تولید می‌کند که میزان آن به ترکیب سوخت، درجه حرارت واکنش و مدت زمانی که قطرات سوخت در محفظه احتراق توربین گاز می‌مانند بستگی دارد.

^۱ Polymetric membrane separation

H_2S و سولفیدهای آلی، مولکول‌هایی قابل احتراق هستند و بنابراین می‌توانند در درجه حرارت بالای ۱۰۰۰ درجه کلوین در هوا بسوزند. در این حالت انهدام اتم سولفور برای تشکیل SO_2 ضروری است. محصول احتراق حرارتی H_2S یعنی SO_2 نیز یک ترکیب سمی است ولی نسبت به H_2S بوی تحریک کننده‌ی کمتری دارد و همچنین آستانه‌ی تشخیص بسیار بزرگتری نسبت به H_2S دارد. با اینحال SO_2 مهم‌ترین عامل باران‌های اسیدی است و انتشار آن باید کنترل شود، بنابراین استفاده از تکنیک احتراق حرارتی برای سوزاندن ترکیبات گوگردی تا هنگامی که غلظت SO_2 در محیط، پایین‌تر از حد مجاز انتشار آن باشد، مطلوب است (Guido et al, 2003).

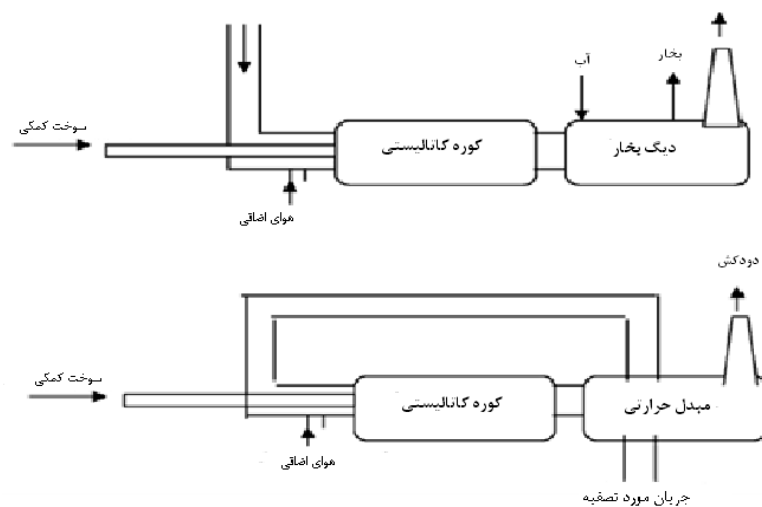
ب) احتراق کاتالیستی

احتراق کاتالیستی فرایندی برای اکسیداسیون H_2S در حضور یک کاتالیست است. از مزایای این فرایند می‌توان به میزان انتشار پائین‌تر SO_2 و میزان سوخت کمکی اضافه شده‌ی کمتر نسبت به احتراق حرارتی اشاره کرد. هر دوی این خصیصه‌ها به دلیل درجه حرارت سوختن پائین‌تر (۶۰۰-۸۰۰ درجه کلوین) در حضور کاتالیست فراهم می‌شود. از مشکلات احتراق‌های کاتالیستی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: نیاز به راکتور با طراحی‌های پیچیده‌تر، هزینه‌های بالای کاتالیست‌ها و عمر نسبتاً کوتاه آنها. کاتالیست‌ها عموماً از فلزات نجیب به عنوان ترکیبات فعال استفاده می‌کنند. اگر در جریان گاز ورودی ترکیبات گوگردی، نیتروژن و کلر وجود داشته باشد، کاتالیست‌ها به زودی غیر فعال می‌شوند و احیای مجدد آنها باید در بازه‌های زمانی کوتاه‌تری صورت بگیرد.

در مورد گازهایی که حاوی سولفور هستند دو مشکل اصلی وجود دارد:

مورد اول تشکیل SO_2 در نتیجه اکسیداسیون اتم سولفور است و بنابراین احتراق حرارتی تنها برای جریان‌های گازی استفاده می‌شود که دارای مقادیر نسبتاً پایین سولفور باشند.

مورد دوم مربوط به سمی شدن احتمالی کاتالیست‌ها توسط اتم‌های سولفور است و به همین علت تولید کنندگان کاتالیست، استفاده از کاتالیست‌هایی که به طور مخصوص برای احتراق گازهای حاوی ترکیبات گوگردی طراحی شده‌اند را پیشنهاد می‌کنند. نمایی از یک واحد احتراق کاتالیستی در شکل ۳-۱۱ دیده می‌شود (Guido et al, 2003).



شکل ۳-۱۱- نمایی از یک واحد احتراق کاتالیستی (Guido et al, 2003)

همانطور که در بالا اشاره شد، محصول اکسیداسیون (حرارتی یا کاتالیستی) H_2S ، گاز SO_2 است که این گاز نیز به نوبه خود سمی است و حضور آن در فضای بسته‌ای مثل تونل خطرناک بوده و باید نسبت به ترقیق سریع آن تا حد مجاز به سرعت اقدام نمود. به همین علت استفاده از این روش، جهت حذف گاز H_2S در فضای تونل توصیه نمی‌شود. علاوه بر این، برقراری تاسیساتی نظیر کوره‌های اکسیداسیون در داخل تونل بسیار مشکل و هزینه‌بر خواهد بود.

۳-۲-۳- روش‌های مبتنی بر ترقیق H_2S با استفاده از جاذب‌های شیمیایی

استفاده از جاذب‌های شیمیایی برای تصفیه هوای تونل‌ها و ترقیق آلودگی‌های موجود در هوا، می‌تواند به عنوان یک گزینه‌ی مکمل تهویه توسط فن‌ها، مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از این فیلترها، سبب حذف

مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلاینده‌ی هوای محیط شده، که این فرایند کمک فراوانی به سیستم تهویه، جهت کاهش جریان هوای ارسالی به داخل تونل می‌کند.

طبق رابطه ۳-۶ افت فشاری که باید توسط فن‌های تونل تامین شود، با مجذور شدت جریان تولید شده توسط این فن‌ها نسبت مستقیم دارد.

$$\Delta P = RQ^2 \quad (۳-۶)$$

که در آن:

ΔP : افت فشاری که باید توسط سیستم تهویه جبران گردد،

R : مقاومت معادل تونل و

Q : شدت جریانی که توسط فن‌ها تولید می‌شود.

بنابراین کاهش میزان شدت جریان تولید شده، سبب کاهش شدید افت فشاری می‌شود که باید توسط فن سیستم تهویه، تامین شود و این موضوع سبب کاهش قابل توجه در میزان انرژی مصرفی سیستم تهویه و بالطبع هزینه‌های وارده بر پروژه خواهد شد.

اساس این روش بر این استوار است که هوای دارای ناخالصی از سطح جاذب‌ها یا غربال‌های مولکولی عبور داده می‌شود و ناخالصی‌های موجود در آن، جذب خلل و فرج موجود بر سطح این جاذب‌ها می‌شود. این فرایند جذب سطحی نام دارد (مک کیپ و همکاران، ۱۳۷۹). جاذب‌ها در حقیقت هم در جذب H_2S از جریان‌های گازی فعال هستند و هم در تبدیل کاتالیستی H_2S به SO_2 یا سولفور عنصری و این موضوع، فرایند جذب H_2S توسط جاذب‌ها را مطلوب می‌نماید.

الف) فرایند جذب سطحی

در عملیات جذب سطحی، انتقال یک جز از فاز گاز یا مایع به سطح جامد صورت می‌گیرد. واژه جذب سطحی برای تشریح این حقیقت به کار می‌رود که غلظت مولکول‌های جذب شده در سطح تماس جامد،

بیشتر از فاز گاز یا محلول است. جذب روی یک سطح جامد به علت نیروی جاذبه اتم‌ها یا مولکول‌ها، در سطح آن جامد است. در عمل جذب سطحی نیروهای مختلفی اعم از فیزیکی و شیمیایی موثرند و مقدار آن بستگی به طبیعت ماده جذب شده و جسم جاذب دارد.

درفرايندهای جداسازی گازی، در رطوبت زدائی هوا و ديگر گازها، بوزدائی و جداسازی ناخالصی‌ها از گازهای صنعتی مثل دی اکسید کربن، بازیابی حلال‌های پرازش از مخلوط رقیق آنها و جداسازی مخلوطی از هیدروکربن‌های گازی، از فرایند جذب سطحی استفاده می‌شود.

از جذب سطحی روی کربن فعال، برای حذف آلاینده‌هایی مثل H_2S, CS_2 و سایر اجزای بودار از هوایی که در سیستم‌های تهویه گردش می‌کند نیز استفاده می‌شود.

از فرایندهای جداسازی مایع، می‌توان رطوبت زدائی بنزین، رنگ زدائی محصولات نفتی و محلول‌های آبی قندی، بوزدائی و طعم زدائی آب را نام برد، که هرکدام از این موارد در صنعت کاربرد وسیعی داشته و بنا به مورد و شرایط محدوده‌ی کاری از آن استفاده می‌شود (مک کیپ و همکاران، ۱۳۷۹).

ب) انواع جذب سطحی

انواع جذب سطحی را می‌توان در دو دسته‌ی جذب سطحی فیزیکی و جذب سطحی شیمیایی جا داد:

- جذب فیزیکی^۱:

جذب فیزیکی یا جذب واندروالس یک پدیده‌ی برگشت پذیر است که نتیجه نیروهای جاذبه بین مولکول‌های جامد و ماده جذب شده می‌باشد. برای مثال وقتی که نیروهای جاذبه بین یک جامد و یک گاز بیشتر از نیروهای بین مولکول‌های گاز باشد، گاز روی سطح جامد جمع و متراکم می‌شود. حتی اگر فشار گاز از فشار بخار آن جامد در همان دما کمتر شود. این حالت تراکم با تولید حرارت همراه است که

^۱ Adsorb

کمی بیشتر از حرارت نهان تبخیر و در حدود حرارت تصعید گاز است. ماده‌ی جذب شده در شبکه کریستالی جامد نفوذ نمی‌کند و در آن حل نمی‌شود، بلکه در سطح باقی خواهد ماند. در هر حال اگر جامد دارای تخلخل و لوله‌های موئین زیادی باشد، ماده جذب شده به داخل این شکاف‌ها نفوذ می‌نماید. در هر حالت در تعادل فشار جزئی ماده جذب شده برابر فاز گاز تماس یافته با آن است و با کاهش فشار فاز گازی یا با افزایش دما، گاز جذب شده به راحتی دفع شده و از سطح جدا می‌شود (تری بال، ۱۳۷۷).

- جذب شیمیایی^۱:

جذب شیمیایی یا جذب سطحی فعال شده، نتیجه فعل و انفعال شیمیایی جامد و ماده جذب شده است. قدرت پیوند شیمیایی حاصل به طور قابل توجهی در حالات مختلف تغییر می‌کند و شناسایی ترکیبات شیمیایی عملاً مشکل است، ولی نیروهای چسبندگی معمولاً بیشتر از آن چیزی است که در جذب فیزیکی وجود دارد. حرارت آزاد شده در عمل جذب شیمیایی معمولاً زیاد است و در حدود حرارت یک واکنش شیمیایی است. فرایند عموماً برگشت ناپذیر است و با دفع و جداسازی ماده اولیه جذب شده، تغییر شیمیایی در آن مشاهده می‌شود. برای یک ماده، در دمای کم ممکن است جذب فیزیکی رخ دهد و در دمای زیاد جذب شیمیایی، و هر دو پدیده نیز ممکن است در یک زمان اتفاق بیافتد.

در جذب سطحی مقدار گاز جذب شده در دمای ثابت تابعی از فشار گاز می‌باشد. اگر میزان جذب گاز را نسبت به فشار در دمای ثابت رسم کنیم، نمودار حاصل را هم‌دمای جذب سطحی می‌نامند (تری بال، ۱۳۷۷).

با توجه به مطالب ذکر شده، هفت اختلاف بین جذب سطحی شیمیایی و فیزیکی می‌توان ذکر کرد که عبارتند از:

^۱ Adsorption

- ۱- در جذب سطحی فیزیکی نیروهای ضعیف واندروالس باعث جذب می‌شوند ولی در جذب سطحی شیمیایی، پیوندهای شیمیایی موجب انجام عمل جذب می‌شوند.
- ۲- آنتالپی جذب سطحی فیزیکی کمتر از آنتالپی جذب سطحی شیمیایی است.
- ۳- جذب سطحی فیزیکی در پایین‌تر از نقطه‌ی جوش جذب شونده اتفاق می‌افتد ولی در جذب سطحی شیمیایی، جذب در دماهای بالاتر نیز می‌تواند اتفاق افتد.
- ۴- در جذب سطحی فیزیکی با افزایش فشار جسم جذب شونده، مقدار جذب در واحد سطح افزایش می‌یابد ولی در جذب سطحی شیمیایی با افزایش فشار جسم جذب شونده، مقدار جذب در واحد سطح کاهش می‌یابد.
- ۵- در جذب سطحی فیزیکی، میزان جذب از خصوصیات جسم جذب شونده است، در صورتی که در جذب سطحی شیمیایی میزان جذب از خصوصیات هر دو جسم است.
- ۶- انرژی فعالسازی در جذب سطحی فیزیکی چندان دخیل نیست، درحالی‌که در جذب سطحی شیمیایی ممکن است دخیل باشد.
- ۷- جذب سطحی فیزیکی به صورت چندلایه صورت می‌گیرد ولی جذب سطحی شیمیایی حداکثر به یک لایه منتهی می‌شود (تری بال، ۱۳۷۷).

ج) جاذب

جاذب‌های سطحی مواد بسیار متخلخلی هستند که جذب سطحی عمدتاً در دیواره منفذها یا در مواضع خاصی داخل ذره‌های آن روی می‌دهد، چون منفذها معمولاً خیلی کوچک‌اند. سطح داخلی این مواد ده‌ها برابر سطح خارجی، و اغلب ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر مربع بر گرم است (مک کیپ و همکاران، ۱۳۷۹).

جداسازی به این دلیل روی می‌دهد که اختلاف جرم مولکولی، اختلاف شکل، یا اختلاف پولاریته (قطبیت) باعث می‌شود بعضی مولکول‌ها محکم‌تر از سایر مولکول‌ها روی سطح نگه داشته شوند.

در اغلب موارد جزء جذب شده با استحکام کافی نگه داشته می‌شود، و در حالیکه سایر اجزا خیلی کم جذب سطحی شده‌اند، کاملاً از سیال حذف می‌شوند. سپس می‌توان جاذب را احیا و ماده جذب شده را به صورت غلیظ یا تقریباً خالص بدست آورد.

قدرت جذب یک جاذب، تابع عوامل زیر است:

سطح تماس: با افزایش سطح تماس مقدار جذب افزایش می‌یابد، بهترین جذب کننده‌ها موادی هستند که ذرات ریزتری داشته باشند و به عبارت دیگر سطح تماس آنها بیشتر باشد.

غلظت: مقدار ماده جذب شده برای واحد جرم جذب کننده تابعی از غلظت ماده حل شده می‌باشد. بررسی این دو کمیت در دمای ثابت، منجر به بدست آوردن کمیت "ایزوترم"^۱ جذب سطحی می‌شود. این ایزوترم‌ها توسط افراد مختلفی بررسی شده است که مهم‌ترین آنها ایزوترم فرنرندلیش^۲ می‌باشد.

دما: افزایش دما اصولاً باعث کاهش جذب سطحی می‌شود مگر در مواردی که جذب سطحی همراه با واکنش شیمیایی باشد.

نوع ماده جذب شده و جاذب: نوع ماده جذب شده و جاذب در جذب سطحی تاثیر گذار است، به طوری که بعضی از مواد جاذب قدرت جذب زیاد نسبت به ماده به خصوصی از خود نشان می‌دهند، در حالیکه نسبت به ماده دیگر قدرت جذب کمتری دارند (مک کیپ و همکاران، ۱۳۷۹).

از بین صدها نوع جاذب سطحی، استفاده از زئولیت، بنتونیت، کربن فعال و جامداتی نظیر اکسید روی و کمپلکس آهن و روی برای جذب سولفید هیدروژن از جریان‌های گازی مرسوم است که از این میان، استفاده از زئولیت و کربن فعال در فرایندهای صنعتی فراگیرتر است.

^۱ Isotherm

^۲ Freundliche

بر اساس مطالعات انجام شده، می‌توان به تفاوت‌های زیر بین زئولیت و کربن فعال، به عنوان جاذب H_2S اشاره کرد:

- ۱- زئولیت‌های طبیعی (به جز کلینوپتیولیت و مقدار اندکی شابزیت)، جاذب H_2S نیستند و انواع زئولیت‌های طبیعی به نسبت انواع مصنوعی، قدرت جذب بسیار کمتری دارند.
- ۲- میزان جذب سطحی زئولیت‌های طبیعی به شدت متغیر است و بسته به ناحیه‌ی تشکیل زئولیت، این میزان فرق خواهد کرد.
- ۳- زئولیت‌های مصنوعی $13X$ و $10X$ جاذب H_2S است، که در مقایسه با کربن فعال، میزان جذب سطحی آن پایین‌تر است.
- ۴- در فشارهای نزدیک به اتمسفر، کربن فعال جاذب مناسب‌تری برای H_2S به نسبت زئولیت است (Boki, et al, 1980).
- ۵- زئولیت قابل بازیابی نیست، در صورتی که برخی از کربن‌های فعال بعد از اشباع شدن، قابلیت فعالسازی مجدد دارند که این امر هزینه‌ی کربن مصرفی را کاهش خواهد داد.
- ۶- قیمت زئولیت‌ها نسبت به کربن فعال بسیار پایین‌تر است.

در جدول ۳-۱، برخی ویژگی‌های کربن فعال و زئولیت به عنوان جاذب H_2S ، مقایسه شده‌اند.

جدول ۳-۱- مقایسه ویژگی‌های زئولیت و کربن فعال به عنوان جاذب H_2S

ویژگی	کربن فعال	زئولیت
سرعت جذب	بالا	متوسط
قدرت جذب	بالا	متوسط - پایین
قیمت	بالا	پایین
قابلیت بازیابی مجدد	اکثراً دارد	ندارد
تأثیرات زیست محیطی	ندارد	ندارد

(د) زئولیت

زئولیت‌ها در اصل مواد آلومینو سیلیکاتی^۱ هستند که دارای ساختار بلوری می‌باشند. این مواد جزو سیلیکات‌های آبدار نوع داربستی به شمار می‌روند. پیوند آبدار در آنها بسیار سست است، بطوری که در دمای پایین، آب خود را از دست می‌دهند. شناسایی زئولیت‌ها برای نخستین بار توسط کرونستد^۲ کانی شناس سوئدی صورت گرفت.

از لحاظ شیمیایی زئولیت‌ها به کمک نسبت Si/Al موجود در چارچوب آنیونی آنها از یکدیگر متمایز می‌شوند. این نسبت بین یک و بی نهایت در زئولیت سیلیکالیت (یک نوع زئولیت اصلاح شده‌ی سیلیکات بلوری عاری از آلومینیم) متغیر است. مقاومت اسیدی و پایداری گرمایی زئولیت‌ها با افزایش نسبت Si/Al افزایش می‌یابد.

زئولیت‌ها در ساختارهای متعددی وجود دارند. واحدهای پایه معمولاً چهاروجهی‌های SiO_4 , AlO_4 هستند که توسط اتم‌های اکسیژن اشتراکی به هم متصل شده‌اند. ماهیت زئولیت‌ها از روی سیستم حفرات موجود در چارچوب آنها مشخص می‌شود، به طوری که حجم این حفرات مشخصه‌ی نوع زئولیت خواهد بود. این حفرات توسط منافذی به هم مرتبط شده‌اند و قطر این منافذ نیز نوع زئولیت را تعیین خواهد کرد. زئولیت‌ها بسیار متنوع هستند. انواع گوناگون آنها را با توجه به شکل بلوری به سه دسته زئولیت‌های رشته‌ای، زئولیت‌های تیغه‌ای و زئولیت‌های مکعبی تقسیم می‌کنند (کریم پور، ۱۳۷۸).

^۱ Alomina silicate

^۲ Krownsted

- کانی‌های مهم زئولیت

از کانی‌های مهم زئولیت‌ها می‌توان کلینوپتیلولیت (clinoptilolite)، موردنیت (Mordenite)، آنالسیم (Analcime)، هیولاندیت (Heulandite)، لامونیت (Laumonite)، شابازیت (Chabazite)، ناترولیت (Natrolite)، تامسونیت (Thamsonite) و فوجاسیت (Faujasite) را نام برد (کریم پور، ۱۳۷۸).

- نحوه تشکیل زئولیت

۱- تشکیل زئولیت‌ها به روش طبیعی

• دریاچه‌های قلیایی و نمکی

دریاچه‌های قلیایی و یا نمکی واقع در مناطق گرم و خشک در بخشی از آب اسیدیته که pH آن به حدود ۹/۵ می‌رسد، محیط مناسبی برای تشکیل زئولیت‌هاست. موادی که در این دریاچه‌ها می‌توانند به زئولیت تبدیل شوند، عبارتند از: شیشه‌های طبیعی، توف‌ها، کائولینیت، مونتموریونیت و پلاژیوکلاز.

• آلتراسیون

از تاثیر محلول‌های گرمایی در شرایط مناسب، زئولیت‌ها تشکیل می‌شوند. معمولاً کلینوپتیلولیت و موردنیت در اعماق کمتر (دمای کمتر) و آنالیت، هیولاندیت، لامونیت و واراکتیت در اعماق بیشتر (دمای بالاتر) تشکیل می‌شوند.

• مناطق با سیستم آب‌های باز

خاکستر و دیگر مواد پیروپلاستیکی اسیدی - حد واسط سخت نشده، تحت تاثیر آب‌های سطحی و زیرزمینی قرار گرفته و تغییراتی از سطح به عمق در آنها ایجاد می‌شود. از هیدرولیز شیشه و سایر مواد در نزدیکی سطح زمین، کانی‌های رسی بویژه اسمکتیت تشکیل می‌شود. با ورود مواد به اعماق بیشتر ضمن افزایش pH شرایط برای تبدیل شیشه به زئولیت‌ها فراهم می‌شود.

● خاک‌های محیط‌های قلیایی

در محیط‌های خشک و نیمه خشک به دلیل تبخیر زیاد، کربنات و بی کربنات سدیم در افق سطحی خاک افزایش یافته و با افزایش pH، محیط برای تشکیل زئولیت‌ها مناسب می‌شود. محدوده تشکیل زئولیت‌ها از سطح آب‌های زیرزمینی به طرف سطح زمین است.

● رسوبات عمیق دریا

توف‌ها و رسوبات عمیق دریایی تحت تاثیر چرخه‌های آب‌های گرم قرار گرفته در شرایط مناسب می‌توانند به زئولیت آلتره شوند (کریم پور، ۱۳۷۸).

۲- تولید زئولیت به روش مصنوعی

ابتدا Al_2O_3, H_2O را در محلول داغ سود ($NaOH$) حل و سپس با سیلیکات سدیم مختلط می‌نمایند، مخلوط حاصل به مخازن ویژه تشکیل ژل منتقل می‌شود. بلورهای زئولیت در دمای حدود ۹۴ درجه سانتی‌گراد از محلول ژل شروع به تبلور می‌نمایند.

از آلتراسیون کائولین نیز می‌توان زئولیت تولید کرد، بدین صورت که ابتدا کائولین حرارت داده می‌شود تا به متاکائولین تبدیل شود، بعد آن را کلسینه نموده و سپس با استفاده از محلول اسیدی مقداری از سیلیس آنرا آزاد نموده و محصول را با محلول سود شستشو می‌دهند (کریم پور، ۱۳۷۸).

- کاربرد زئولیت به عنوان فیلتر (غربال مولکولی)

چنانچه زئولیت‌ها در دمای ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای چند ساعت حرارت داده شوند، آب موجود در مجاری و فضای کانال مانند آنها آزاد می‌شود و زئولیت‌های بی آب بدست می‌آیند. قطر فضاهای کانال مانند، مشخص و تابع ترکیب شیمیایی زئولیت‌ها است. قطر این فضاها در زئولیت‌های پتاسیم دار، سدیم دار و کلسیم دار به ترتیب ۳، ۴ و ۵ آنگستروم است.

موادی که ابعاد مولکولی آنها کمتر از قطر فضای زئولیت باشد، جذب آن می‌شوند و آنهایی که بزرگتر هستند، دفع خواهند شد. به عنوان مثال، زئولیتی که قطر کانال آن $4/5$ آنگستروم است می‌تواند هیدروکربوری مانند اکتان و پنتان را که قطر آنها حدود $4/3$ آنگستروم است، جذب کند و هیدروکربورهای ایزواکتان و ایزوپنتان را که قطر آن 5 آنگستروم است، دفع می‌کند. بنابراین با استفاده از زئولیت‌ها می‌توان این مواد هیدروکربوری را از یکدیگر جدا کرد.

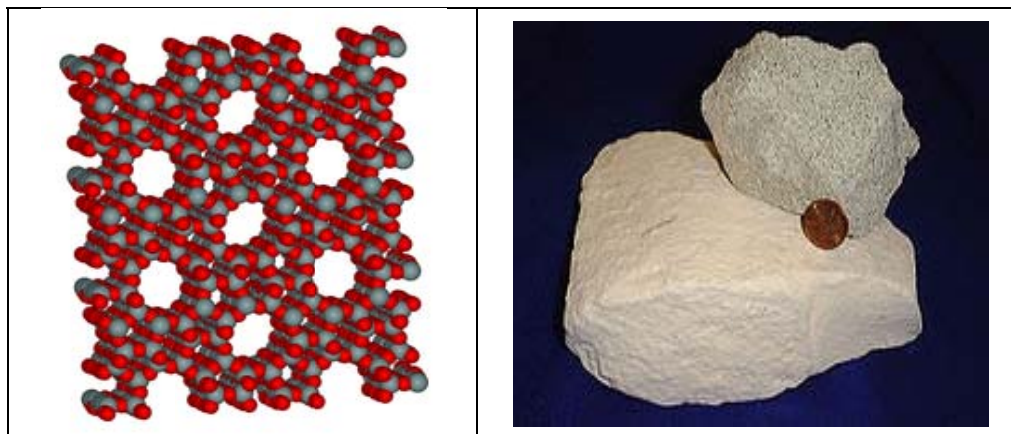
قابلیت جذب سطحی بعضی از زئولیت‌ها تا 30 درصد وزن آنها است. جانشینی کلسیم به جای سدیم به میزان 30 درصد قطر کانال‌های زئولیت را افزایش می‌دهد و جانشینی پتاسیم به جای سدیم موجب کاهش قطر کانال می‌شود.

قابلیت انتخاب یک یا چند نوع از مخلوط‌های مایع و یا گازی را نسبت به سایر انواع، الک کردن یا غربال کردن مولکولی می‌نامند.

از آنجا که ریز منفذهای زئولیت یکنواخت هستند، از آن می‌توان برای غربال کردن مولکولی براساس اندازه استفاده کرد. همه زئولیت‌ها غربال‌های مولکولی هستند ولی همه غربال‌های مولکولی، زئولیت نیستند. زئولیت‌هایی مانند موردنایت می‌توانند به عنوان غربال مولکول‌های گازی عمل کنند و گازهایی مانند آمونیاک سولفید هیدروژن، منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، بخار آب، اکسیژن، نیتروژن و فرمالدهید را جدا کنند که از این خاصیت در صنایع مختلف از جمله مهندسی شیمی، تصفیه آب و هوا استفاده می‌شود (www.ngdir.com (A)).

در شکل ۳-۱۲ نمایی از سنگ معدن و ساختار مولکولی میکروپور^۱ زئولیت دیده می‌شود.

¹ Micro pore



ب

الف

شکل ۳-۱۲- الف) نمایی از سنگ معدن زئولیت. ب) ساختار مولکولی میکروپور زئولیت (www.Wikipedia.com(C))

د) کربن فعال

کربن فعال به گروهی از مواد اطلاق می‌شود که مساحت سطح داخلی بالا، تخلخل زیاد و قابلیت جذب گازها و مایعات شیمیایی را دارند. کربن‌های فعال به‌عنوان جاذب‌هایی مهم در صنایع شناخته شده‌اند و کاربردهای گسترده‌ای، از جهت قابلیت جذب گازها و مایعات مزاحم، تصفیه و پاکسازی و حتی بازیافت مواد شیمیایی دارند. کربن فعال شده به‌دلیل مساحت گسترده، ساختار منفذی، ظرفیت جذب بالا، قیمت مناسب در مقایسه با جاذب‌های غیرآلی مانند زئولیت قابلیت فعال‌سازی مجدد سطح، یک ماده منحصر به فرد می‌باشد.

کربن‌های فعال‌شده محصولات پیچیده‌ای می‌باشند و در نتیجه طبقه‌بندی آنها بر اساس رفتار، مشخصات سطح و روش آماده‌سازی مشکل است، هر چند یک‌سری طبقه‌بندی براساس مشخصات فیزیکی آنها به شرح زیر انجام شده است:

۱. کربن فعال پودری (دارای اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتو و میانگین قطری بین ۱۵ تا ۲۵ میکرومتر)

۲. کربن فعال گرانولی (دارای اندازه‌ای بزرگتر از کربن فعال شده پودری)

۳. کربن فعال کروی

۴. کربن تزریق شده

۵. کربن روکش شده با پلیمرها

استاندارد جذب برای کربن فعال مورد استفاده این است که بتواند تا حدود ۲۰٪ وزنی گاز GB و یا سیانژن کلراید جذب نماید. (GB گازی است بی رنگ، بی بو، بسیار سمی و با نام شیمیایی متیل ایزو پروپرکسی). اگر کربن فعال تازه باشد و در معرض رطوبت قرار نگرفته باشد خواهد توانست تا ۴۰٪ وزنی GB جذب نماید (www.chemistmag.com).

- مراحل تولید کربن فعال

از نظر اقتصادی، ترجیحاً موادی با کربن بالا و مواد آلی کم، برای تولید کربن فعال انتخاب می‌شود. مواد خام مورد استفاده به ترتیب اهمیت آنها از نظر ظرفیت تولید کربن متخلخل، مشخصات نهائی و مقدار مصرف عبارتند از: چوب، کربن سنگ، سیگمنت (نوعی کربن سنگ)، پوست نارگیل، تورب و یا پلیمرهای مصنوعی از قبیل ریون^۱، پلی‌اکریلونیتریل^۲ یا فنولیک^۳ (www.chemistmag.com).

۱- کربونیزاسیون^۴

در حین کربونیزاسیون، اجزاء غیرکربنی از قبیل هیدروژن و اکسیژن به صورت گاز از مواد اولیه خارج می‌شوند و کربن‌های آزاد نیز بصورت گروهی، بلورهای گرافیت تشکیل می‌دهند. به دلیل وجود منافذ در بین بلورها آرایش یافتگی بلورها از دو طرف بصورت نامنظم می‌باشد. این فرآیند معمولاً در درجه حرارتی زیر ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک محیط حاوی یک جریان ورودی از اتمسفر صورت می‌گیرد.

¹ Rayon

² Poly acrylonitrile

³ Phenolic

⁴ Carbonization

ساختار ریز منافذ کربن در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرد. بعضی از این منافذ به وسیله ماده‌ی قیری آزاد شده در حین فرآیند پیرولیز^۱ مسدود می‌شود که می‌توان با حرارت دادن مجدد در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دوباره این منافذ را ایجاد کرد. جسم تولیدشده، به علت آزاد سازی گازهای فرار دارای تعداد زیادی حفره‌های بزرگ و دارای سطح ویژه‌ای در حد چندین مترمربع بر گرم می‌باشد.

(پیرولیز= تجزیه شیمیایی ماده بر اثر حرارت) جامد حاصل از عملیات پیرولیز باید چگالی بالا داشته و همچنین حاوی گازهای فرار کافی باشد. چگالی بالا باعث می‌شود کربن از استحکام و ساختار محکمی برخوردار گردد (www.chemistmag.com).

۲ - فعال سازی

کربن‌ها را با توجه به آرایش‌یافتگی بلورهای آن به صورت گرافیت یا غیرگرافیت تعریف کرده‌اند. کربن‌های گرافیتی دارای بلورهائی با سه بعد یکسان هستند، در صورتی که در کربن‌های غیرگرافیتی اینگونه نمی‌باشد. براساس توضیحات داده شده، در حین کربونیزاسیون سه فضای خالی در کربن ایجاد می‌شود که در حین کربونیزاسیون به وسیله کربن‌های غیرآرایش‌یافته^۲ "بی شکل" مسدود می‌شود.

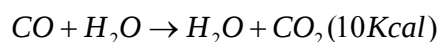
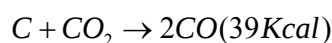
محصولات مرحله کربونیزاسیون دارای ظرفیت جذب خیلی کمی می‌باشند و احتمالاً این مسئله به دلیل کربونیزاسیون در دمای پائین و وجود ماده قیری باقیمانده در منافذ بین بلورها و روی سطح آنها می‌باشد. عمل فعال سازی باعث بزرگ شدن قطر حفره‌هایی می‌شود که در حین فرآیند کربونیزاسیون ایجاد شده‌اند و همچنین باعث ایجاد یکسری حفره ریز نیز خواهد شد و بدین گونه می‌توان به یک ساختار حفره‌ای با مساحت سطح داخلی بالا دست پیدا کرد. پدیده فعال سازی به دو روش انجام می‌شود (www.chemistmag.com):

^۱ Pyrolyze

^۲ Amorph

- فعال سازی شیمیائی: در ابتدا ماده خام با یک محلول غلیظ از مواد فعال کننده اشباع می شود و با این عمل، مواد سلولزی از بین می روند و تحت عملیات حرارتی در دمای بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرند. مواد پرولیز شده سرد می شوند و به منظور خارج ساختن مواد فعال کننده، تحت عملیات شستشو قرار می گیرند. مواد فعال کننده عبارتند از: اسید فسفریک، کلرید روی، اسید سولفوریک و یدید پتاسیم.

- فعال سازی فیزیکی: در این فرآیند به کمک محصولات کربونیزه شده، ابعاد و ساختار مولکولی منافذ گسترش می یابد و مساحت سطحی آنها افزایش می یابد. این عملیات در دمائی بین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد با حضور مواد گازی اکسید کننده مناسب مانند دی اکسید کربن و هوا انجام می گیرد. برای تبدیل مواد کربونیزه شده به گاز، به وسیله بخار و دی اکسید کربن از واکنش های زیر استفاده می شود:



- ویژگی های جذبی و فیزیکی

گونه های مختلفی از کربن های فعال شده با ویژگی های مشخص وجود دارند که خصوصیات هر یک از آنها به مواد اولیه و روش های به کار رفته در تولید آنها بستگی دارد. در انتخاب یک گونه کربن فعال شده، نیاز به شناخت دقیق ویژگی های فیزیکی و جذبی مواد وجود دارد.

ویژگی های جذبی

ویژگی های جذبی کربن فعال را می توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- سطح: با استفاده از N_2 حدود منافذ سطحی کربن فعال شده را اندازه می گیرند. هر چه سطح کربن فعال شده بیشتر باشد، قسمت های جاذب نیز بیشترند.

۲- اندازه منافذ: تعیین اندازه منافذ کربن فعال شده می‌تواند راهی مناسب برای تشخیص خصوصیات آن باشد. در^۱ IUPAC منافذ بر اساس اندازه به صورت زیر دسته بندی شده‌اند :

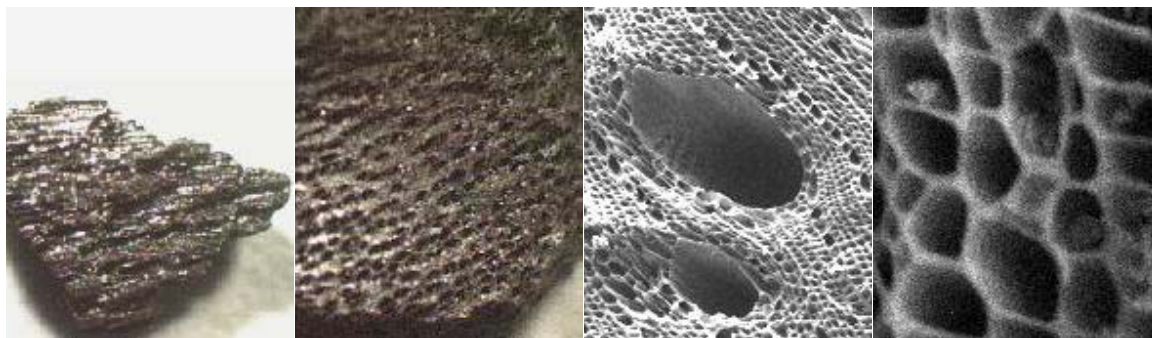
Micropores $r < 1\text{nm}$

Mesopores $r = 1\text{-}25\text{nm}$

Macropores $r > 25\text{nm}$

که Micropore ها برای جذب مواد به کار می‌روند.

۳- تخلخل: یکی از راه‌های اندازه‌گیری میزان تخلخل در توده‌ای از کربن فعال شده، استفاده از میزان جذب تترا کلرید کربن (CCl_4) خالص در حالت گازی می‌باشد ([\(www.ngdir.com\(B\)\)](http://www.ngdir.com(B))). در شکل ۳-۱۳ نمایی از سطح کربن فعال و حفرات آن دیده می‌شود.



شکل ۳-۱۳- نمایی از سطح کربن فعال و حفرات آن. بزرگنمایی از سمت چپ به راست افزایش می‌یابد (www.cee.vt.edu)

ویژگی‌های فیزیکی

از ویژگی‌های فیزیکی کربن فعال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- سختی و مقاومت در برابر حرارت و فشار: کربن‌های فعال شده دارای سختی‌های متفاوتی هستند که مربوط به مواد اولیه و شیوه تهیه آنها می‌باشد. بنا به درجه سختی، هر یک از آنها کاربردهای متفاوتی دارند.

¹ International Union of Pure and Applied Chemistry

۲- چگالی: کربن‌های فعال به دلیل چگالی بالا، از استحکام بالا و ساختاری محکم برخوردار هستند.

۳- اندازه ذرات: هر چقدرکه اندازه ذرات کربن فعال شده کوچکتر باشد، سرعت جذب آن بیشتر است

(www.ngdir.com(B)).

- چگونگی عملکرد کربن فعال

کربن فعال شده مواد اورگانیک را از محیط اطرافش جذب می‌کند و بدین ترتیب عمل انتقال آلاینده از فاز مایع (آب) یا فاز گاز (هوا) به فاز جامد (کربن) صورت می‌گیرد. نیروی جاذبه بین مولکولی باعث تشکیل یک پیوند بین آلاینده و کربن، و چسبیدن آنها به هم می‌شود. علاوه بر این، باکتری‌هایی به سطح خارجی کربن فعال شده می‌چسبند و بخشی از آلاینده‌ها را جذب و مصرف می‌کنند.

جذب در کربن فعال شده دارای ۳ مرحله است:

- ۱- تماس ذرات آلاینده محلول در مایع (آب) با ذرات کربن فعال شده
 - ۲- پخش شدن ذرات آلاینده در شبکه متخلخل کربن فعال شده
 - ۳- جذب ذرات آلاینده به کربن فعال شده و بوجود آمدن یک پیوند برگشت ناپذیر
- این ۳ مرحله همزمان رخ می‌دهد (www.ngdir.com(B)).

ه) آزمایش جذب سطحی H_2S در یک بستر ثابت

در شکل ۳-۱۴ طرحی از تجهیزات جذب در یک بستر ثابت از جاذب دیده می‌شود. تجهیزات آزمایش شامل یک رآکتور^۱ (لوله‌ای شیشه‌ای پیرکس) برای انجام واکنش جذب، یک گرم کن^۲، یک جریان سنج^۳ ورودی و یک نمونه‌گیر خروجی است. رآکتور جذب دارای قطر داخلی ۲۶/۵mm، قطر خارجی ۲۸mm و ارتفاع ۴۵۰mm است که در وسط گرم‌کن نصب شده است. یک توزیع کننده در وسط رآکتور جذب جاسازی شده و دانه‌های کربن فعال (یا هر جاذب دیگر) بر روی این توزیع کننده قرار می‌گیرند. درجه حرارت بستر توسط یک ترموکوپل که در میانه‌ی محور رآکتور نصب شده، به طور مداوم اندازه‌گیری و کنترل می‌شود.

هنگامی که درجه حرارت بستر به یک میزان ثابت رسید، مخلوطی شبیه سازی شده از جریان گاز، با غلظتی مشخص و دلخواه از H_2S به بالای رآکتور جذب تامین می‌شود و جریان گاز در طی جریان رو به پایین در رآکتور، در تماس با کربن فعال قرار می‌گیرد. گاز خروجی از کف رآکتور به طور مداوم نمونه گیری می‌شود و نمونه‌ها توسط یک دستگاه کروماتوگراف گاز^۴ مجهز به آشکارگر^۵ FPD آنالیز شده و میزان گوگرد موجود در آنها مشخص می‌شود.

با اطلاع از میزان گوگرد در نمونه‌های گاز خروجی و مشخص بودن میزان گوگرد در جریان گاز ورودی، میزان H_2S جذب شده بر روی واحد وزن جاذب مشخص می‌شود (Itaya, et al, 2009).

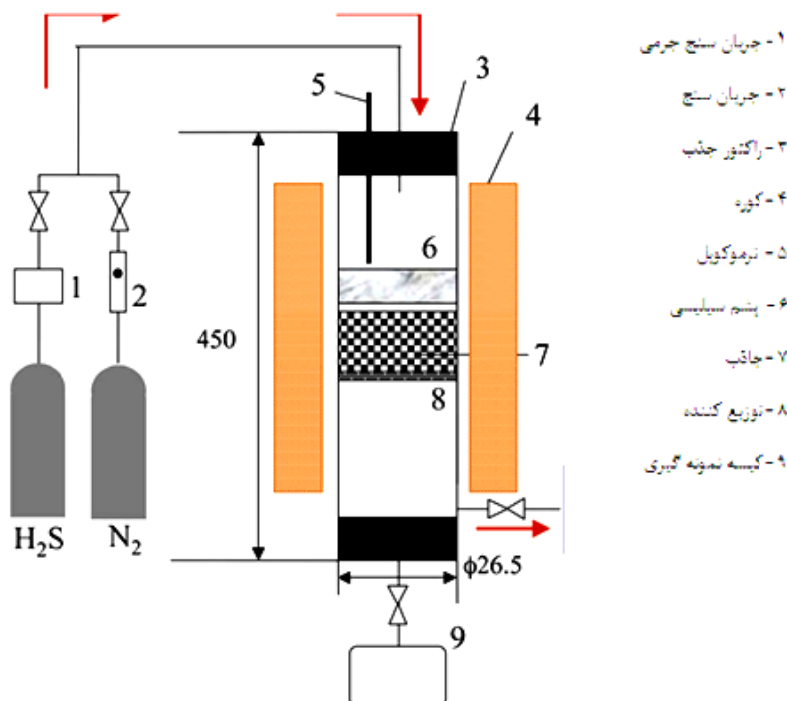
^۱ Reactor

^۲ Furnace

^۳ Flow meter

^۴ Gas chromatography

^۵ Detector



شکل ۳-۱۴- تجهیزات آزمایشگاهی برای آزمایش جذب سطحی در یک بستر ثابت و فشار اتمسفر (Itaya, et al, 2009)

۳-۳- جمع بندی

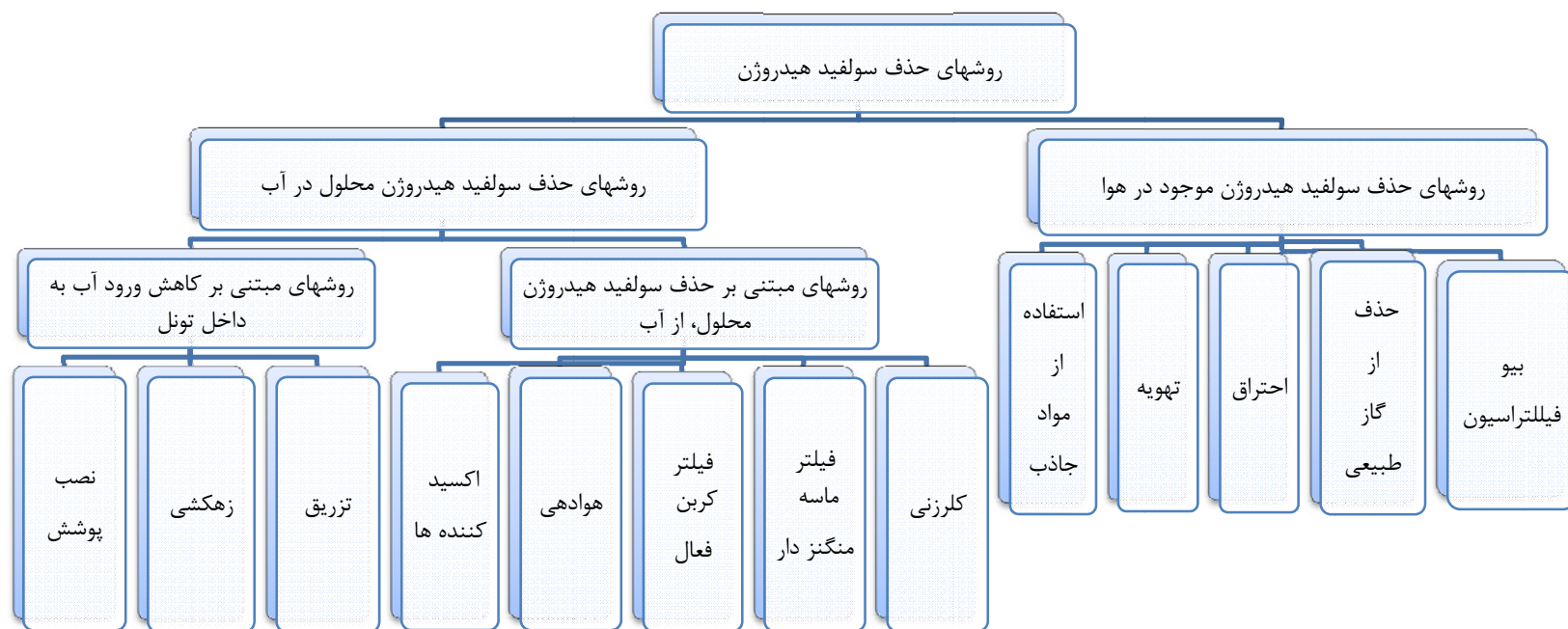
در این فصل در رابطه با روش‌های مقابله با ورود گاز سولفید هیدروژن به داخل یک فضای زیرزمینی و همچنین راهکارهای موجود جهت ترقیق H_2S وارد شده به فضا بحث شد. از آنجا که منشأ گاز H_2S ، آب زیرزمینی وارد شده به تونل است، روش‌های موجود جهت مقابله با ورود H_2S به داخل تونل، بر جلوگیری از ورود آب زیرزمینی به داخل تونل تکیه دارند. این دسته روش‌ها، روش‌هایی نظیر زهکشی، تزریق و نصب پوشش را شامل می‌شوند که در صورت عملی بودن این روش‌ها در شرایط تونل یا هر فضای زیرزمینی دیگر، حتی الامکان باید بر روش‌های مبتنی بر ترقیق H_2S ترجیح داده شوند.

روش‌های موجود جهت ترقیق H_2S ، سولفید هیدروژن را در دو فاز می‌توانند تصفیه کنند؛ از میان روش‌هایی که H_2S را در فاز مایع (به صورت محلول در آب) تصفیه می‌کنند، تنها روش استفاده از اکسید

کننده‌ها برای استفاده در یک فضای محصور مناسب است. سایر روش‌ها به دلیل وجود محدودیت‌هایی نظیر نبود فضای کافی و یا بازدهی پایین، از کارایی لازم برخوردار نیستند.

دسته‌ی دوم روش‌هایی که بر تصفیه‌ی H_2S استوار هستند، H_2S را در فاز گاز (ترکیب با هوای محیط) ترقیق می‌کنند. از بین این روش‌ها، تنها روش استفاده از مواد جاذب، کارایی و سرعت عمل کافی را جهت استفاده در فضای یک تونل برخوردار است و می‌توانند به عنوان یک گزینه مناسب جهت رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل مطرح باشند.

در شکل ۳-۱۵ روش‌های موجود جهت حذف سولفید هیدروژن به طور خلاصه آورده شده‌اند.



شکل ۳-۱۵- روش‌های حذف سولفید هیدروژن

فصل چہارم

معرفی تونل زاگرس

قطعه یک (الف)

۴-۱- مقدمه

تونل انتقال آب زاگرس، واقع در غرب کشور، با طول کلی حدود ۴۸ کیلومتر، از تونل‌های بلند در حال حفر در ایران است. حفر این تونل با دو دستگاه TBM صورت می‌گیرد. تهویه مکانیکی در حین اجرای تونل، به روش تهویه طولی و با دهش هوا به قسمت پشتیبانی TBM انجام می‌گیرد.

در هنگام حفاری این تونل، در نواحی خاصی، مشکل تصاعد گاز H_2S از آب وارد شده به تونل وجود دارد. از آنجا که سولفید هیدروژن گازی فوق العاده سمی، خطرناک و خورنده است، حضور آن در محیط کار سبب به وجود آمدن مشکلاتی نظیر خطرات جانی برای نیروی کار، خوردگی ابزار آلات و تجهیزات حفاری، توقف عملیات کاری و واردن آمدن خسارات سنگین به علت تاخیرهای وارد بر پروژه، شده است و بنابراین باید سریعاً برای حذف یا ترقیق آن اقدام نمود.

در این فصل، بعد از بررسی منشا H_2S در آب زیرزمینی وارد شده به تونل زاگرس، در ابتدا یکسری تدابیر کوتاه مدت بیان گردیده که اجرای این روش‌ها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی خواهد شد. لازم است که تمام تدابیر ذکر شده، در سریع‌ترین زمان ممکن اجرا شوند تا تاخیرهای وارد بر پروژه تا آنجا که ممکن است کاهش یابد. در ادامه روش‌هایی جهت کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالطبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر و یا تصفیه H_2S وارد شده به داخل تونل (در فاز مایع یا گاز) ارائه شده، که این تدابیر در راستای بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد. تصمیم‌گیری منطقی برای انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها، می‌تواند بر اساس تخمین هزینه‌ها، شرایط اجرایی این روش‌ها، میزان بازدهی روش‌ها، سرعت اجرای هر روش و یکسری پارامترهای دیگر صورت گیرد، که این امر نیاز به بررسی دقیق این روش‌ها دارد.

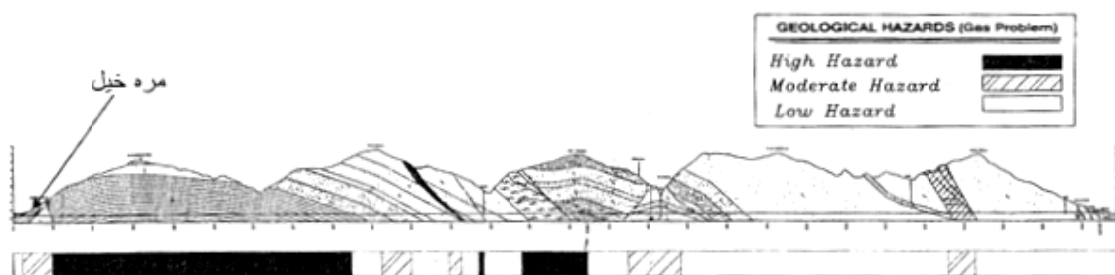
۴-۲- معرفی تونل زاگرس قطعه یک (الف)

تونل انتقال آب زاگرس قطعه یک (الف) با طولی بالغ بر ۱۴ کیلومتر و قطر تمام شده‌ی ۶ متر در استان کرمانشاه واقع گردیده، که ورودی تونل از لحاظ جغرافیایی در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان پاوه و در مجاورت روستای هیروی و خروجی آن در مجاورت روستای ازگله در ۶۰ کیلومتری شهرستان سرپل ذهاب قرار گرفته است.

تونل زاگرس بخشی از طرح تامین آب دشت‌های گرمسیری غرب کشور است که نیل به اجرای آن امکان انحراف آب رودخانه سیروان (پنجمین رودخانه پر آب کشور)، به داخل کشور را فراهم می‌سازد. طرح مذکور کنترل و تنظیم آب‌های سطحی منطقه‌ای وسیع از غرب کشور و انتقال آب تنظیم شده به دشت‌های زراعی منطقه را ممکن می‌سازد. این تونل قادر به انتقال آب تا دبی ۷۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (کیانی، ۱۳۸۴).

بر اساس مطالعات زمین شناسی انجام شده، این تونل در هنگام عبور از تشکیلات زمین شناسی مختلف (به خصوص سازند ایلام) با مشکل تصاعد گاز H_2S در هنگام حفاری روبرو است. منشا این گاز، آب زیرزمینی وارد شده به داخل تونل است که شدت جریان ورودی آن در بعضی نقاط حداکثر به 170 lit/s نیز رسیده است. با اندازه‌گیری‌های انجام شده، غلظت H_2S در هوای تونل زاگرس، در شرایط عملکرد سیستم تهویه، تا ۵۰ ppm افزایش می‌یابد.

در شکل ۴-۱ قسمت بندی مناطق تونل، با خطر گاز خیزی متفاوت دیده می‌شود.



شکل ۴-۱- قسمت بندی مناطق با خطر گاز خیزی در طول تونل (گزارش زمین شناسی تونل زاگرس)

در جدول ۴-۱ طول و محدوده مترائیهایی که احتمال نفوذ گاز در آنها بالا و متوسط می باشد، درج شده است.

جدول ۴-۱- طول بخش های با گاز خیزی بالا و متوسط (مبنای سنجش از دهانه مره خیل) (گزارش زمین شناسی تونل

زاگرس)

وضعیت گاز خیزی	از مترائ	تا مترائ	طول قطعه (m)
خطر گاز خیزی بالا	۴۸۷	۴۲۳۲	۳۷۴۵
	۵۸۴۸	۵۹۰۸	۶۰
	۶۴۰۷	۷۲۲۹	۸۲۲
خطر گاز خیزی متوسط	۱۱۶	۴۸۷	۳۷۱
	۴۶۲۶	۵۰۰۸	۳۸۲
	۵۴۷۷	۵۶۴۰	۱۶۳
	۷۷۴۶	۸۴۲۸	۶۸۲
	۱۱۷۹۴	۱۲۱۴۴	۳۵۰

۴-۳- منشا H_2S در تونل زاگرس

در ناحیه لرستان، در زاگرس چین خورده، مهم ترین سنگ های منشا نفت و گاز در سازندهای کژدمی و گورپی با سن کرتاسه میانی و سازند پایده با سن اواخر ترشیاری هستند. سنگ های مخزن نیز سنگ های آهکی سازند ایلام و گرو، متعلق به دوره ی کرتاسه و سازند آسماری متعلق به اواخر دوره ترشیاری

می‌باشند. از لحاظ تطابق زمانی، سازند گورپی متشکل از مارن و شیل‌های رسی، سنگ منشاء سازند ایلام است و در بالای آن قرار دارد. تشکیلات ایلام عمدتاً متشکل از سنگ‌های آهکی است. همچنین سازند کژدمی متشکل از شیل‌های قیری، سنگ منشاء سازند گرو است و دقیقاً در بالای آن قرار دارد. آهک‌های رسی واحدهای غالب در سازند گرو هستند (آقانباتی، ۱۳۸۳). همانطور که اشاره شد، لایه‌های منشاء و مخزن، حاوی ترکیبات شیلی و سنگ‌های سولفات‌ه نظیر ژئپس و انیدریت و پیریت هستند.

بنابراین منشاء احتمالی H_2S در تشکیلات ایلام، می‌تواند اکسیداسیون پیریت یا احیای ژئپس باشد. پیریت به طور گسترده در توده سنگ تشکیلات ایلام موجود است، اکسیداسیون پیریت یک واکنش شناخته شده در معادن و فضاهای زیرزمینی است. پیریت‌های موجود در نزدیک سطح، به دلیل هوازدگی اکسید می‌شوند. در تشکیلات ایلام، در روی سطوح سنگ‌ها، حفرات نودول‌های پیریتی خالی (به دلیل اکسیداسیون) می‌تواند دیده شود. اما در شرایط تونل زاگرس، امکان حضور اکسیژن در لایه‌های عمیق وجود ندارد و در عمقی که تونل حفر شده، پیریت هیچ اکسیداسیونی را نشان نمی‌دهند. بنابراین در محل تونل زاگرس، اکسیداسیون پیریت نمی‌تواند به عنوان منشاء H_2S در نظر گرفته شود.

منشا دیگر H_2S ، می‌تواند احیای ژئپس در ترکیب با متان بر اساس واکنش زیر باشد (Doyle, 2000):



واکنش احیا به دو حالت مختلف امکان پذیر است:

۱- احیای حرارتی: احیای حرارتی در درجه حرارت های بالای $140^{\circ}C$ آغاز می‌شود. این فرایند

می‌تواند یک گزینه‌ی احتمالی برای تشکیل H_2S در ذخایر عمیق هیدروکربنی باشد.

۲- احیای بیولوژیکی: احیای بیولوژیکی ژئوپس توسط یک باکتری ویژه انجام می‌شود، اما این فرایند محدود به درجه حرارتی با میزان ماکزیمم 80°C است. این باکتری به گروه باکتری‌های هیپرترموفیل^۱ تعلق دارد (Widdel, 1988).

به عبارت دیگر، مطالب ذکر شده در بالا اثبات می‌کند که H_2S در تشکیلات ایلام، در مکانی که در حال حاضر با آن مواجه هستیم، تشکیل نمی‌شود. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که مقداری از آب‌های تشکیلات ایلام آلوده به H_2S است، در حالیکه سایر چشمه‌ها و چاه‌ها، آلوده نیستند و می‌توانند به عنوان آب آشامیدنی به مصرف برسند. مدل ارائه شده در زیر، می‌تواند این مشاهدات را توجیه کند:

H_2S در تشکیلات ایلام در عمق‌های زیاد، در اثر احیای حرارتی ژئوپس، در یکسری نقاط مشخص تشکیل می‌شود. این گاز از عمق به سمت بالا حرکت می‌کند. در طی این جریان رو به بالا، H_2S در تله‌هایی نظیر گسل‌ها و درزه‌های بزرگ متمرکز می‌شود. سایر لایه‌هایی که دچار خوردگی و اغتشاش نشده‌اند، اجازه عبور H_2S به سمت بالا را نمی‌دهند. بنابراین، در موقعیت‌های مشخص، H_2S متمرکز شده در این تله‌ها وارد آب زیرزمینی شده و در نتیجه، در بعضی مناطق و به صورت محلی، غلظت H_2S در آب زیرزمینی تشکیلات ایلام افزایش می‌یابد.

۴-۴- غلظت H_2S موجود در آب تشکیلات ایلام

همانطور که اشاره شد، منشاء H_2S در تونل زاگرس، فقط آب زیرزمینی خارج شده از تشکیلات سنگی است. با ورود این آب به داخل تونل، H_2S محلول در آن در هوای تونل متصاعد می‌شود. در محل TBM و قسمت پشتیبانی، که آب زیرزمینی وارد تونل می‌شود، در اثر تلاطم آب، غلظت H_2S وارد شده به اتمسفر، بالا است. با حرکت به سمت دهانه تونل، غلظت کاهش یافته تا به میزان 50 ppm می‌رسد و در بخش‌های

^۱ Hyperthermophil

ابتدایی تونل، این غلظت ثابت می‌ماند. این امر نشان می‌دهد که غلظت H_2S در هوای تونل با غلظت آن در آب به تعادل رسیده است. با فرض تعادل غلظت‌ها و اطلاع از شدت جریان آب و هوا در تونل می‌توان مقادیر زیر را محاسبه کرد:

۴-۴-۱- غلظت H_2S در آب زهکشی شده، تحت شرایط موازنه با هوا:

بر اساس اندازه‌گیری‌های بعمل آمده، خیلی دورتر از انتهای قسمت پشتیبانی، که غلظت H_2S در هوای تونل با غلظت آن در آب در موازنه است، غلظت H_2S در هوا ۵۰ ppm است.

در مورد گازها، غلظت حجمی آنها هم ارز با فشار جزئی آن گاز است، بنابراین فشار جزئی گاز H_2S در هوای تونل تقریباً برابر با ۰/۰۰۰۰۵۰ atm خواهد بود.

قانون هنری، غلظت یک گاز در آب را به عنوان تابعی از فشار جزئی آن گاز در اتمسفر، تحت شرایط تعادل به دست می‌دهد:

$$X_{H_2S(aq)} = \frac{P_{H_2S}}{H_{H_2S}} \quad (۲-۴)$$

که در آن:

$$X_{H_2S(aq)} = \text{غلظت } H_2S \text{ در آب (بر حسب } \frac{molH_2S}{molH_2O} \text{)}$$

$$P_{H_2S} = \text{فشار جزئی } H_2S \text{ در هوا (بر حسب atm)}$$

H_{H_2S} = ثابت هنری برای H_2S (۴۸۳ atm) در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱ atm (Doyle, 2000)

$$X_{H_2S(aq)} = \frac{P_{H_2S}}{H_{H_2S}} = \frac{0.000050 \text{ atm}}{483 \text{ atm}} = 1.035 \times 10^{-7} \left(\frac{molH_2S}{molH_2O} \right)$$

در نتیجه غلظت H_2S در آب در شرایط تعادلی برابر با $1.035 \times 10^{-7} \left(\frac{molH_2S}{molH_2O} \right)$ است. از آنجا که جرم

مولی آب ۱۸ و جرم مولی H_2S برابر با ۳۴ است، غلظت H_2S در یک لیتر آب (X) برابر است با:

$$x = 1.035 \times 10^{-7} \left(\frac{\text{molH}_2\text{S}}{\text{molH}_2\text{O}} \right) \div 18 \left(\frac{\text{gr}}{\text{molH}_2\text{O}} \right) \times 1000 \left(\frac{\text{gr}}{\text{litH}_2\text{O}} \right)$$

$$= 5.76 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{molH}_2\text{S}}{\text{litH}_2\text{O}} \right) = 1.96 \times 10^{-4} \frac{\text{grH}_2\text{S}}{\text{litH}_2\text{O}}$$

بنابراین غلظت H_2S در آب زهکشی شده در زیر TBM، $1.96 \times 10^{-4} \frac{\text{grH}_2\text{S}}{\text{litH}_2\text{O}}$ است که این مقدار معادل

با غلظت ۵۰ ppm از H_2S در هوا است (مهار گاز H_2S در تونل سازی، گزارش مهندسین مشاور رهاب).

۴-۲- غلظت H_2S در آب ورودی به تونل

با این فرض که کل میزان H_2S منتقل شده توسط آب و هوا به پشت قسمت پشتیبانی TBM، تنها به

صورت محلول در آب زیرزمینی وارد تونل می شود، مقادیر زیر محاسبه شده است:

الف) شدت جریان جرمی H_2S در هوای تونل:

شدت جریان هوا در پشت قسمت پشتیبانی حدود $28.3 \text{ m}^3/\text{s}$ است.

همانطور که ذکر شد، غلظت H_2S در هوای تونل نیز برابر با $50 \left(\frac{\text{mlitH}_2\text{S}}{\text{m}^3\text{air}} \right)$ است.

بنابراین:

$$28.3 \text{ m}^3/\text{s} \times 50 \left(\frac{\text{mlitH}_2\text{S}}{\text{m}^3\text{air}} \right) = 1.415 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{s}}$$

شدت جریان حجمی H_2S در هوای تونل در دمای تقریباً 20°C (معادل 293°K) و ارتفاع ۷۰۰ متر از

سطح دریا، $1/415 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{s}}$ است.

در ادامه شدت جریان حجمی H_2S در هوای تونل، در دمای استاندارد (0°C ، معادل 273°K) و در سطح

دریا محاسبه شده است.

- تصحیح ارتفاع:

در این قسمت، در ابتدا با استفاده از فرمول ارتفاع بارومتریک، فشار در ارتفاع محل احداث تونل محاسبه شده است.

فرمول ارتفاع بارومتریک:

$$P_{h_1} = P_{h_0} \left[1 - \frac{0.0065 \Delta h}{T(h_0)} \right]^{5.255} \quad (3-4)$$

که در آن:

P_{h_1} = فشار در ارتفاع h_1 (محل احداث تونل = ۷۰۰ m) بر حسب kPa

P_{h_0} = فشار در ارتفاع h_0 (سطح دریا) بر حسب kPa (۱۰۱۳/۲۵ کیلو پاسکال).

Δh = اختلاف ارتفاع بر حسب متر = ۷۰۰ متر

$T(h_0)$ = درجه حرارت در h_0 بر حسب درجه کلوین

$$\Delta t = 0.65 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m} = \text{شیب زمین گرمایی}$$

$$T(h_0) = 293 + 7(0.65) = 297.55^\circ\text{C}$$

$$P_{h_1} = 1013.25 \left[1 - \frac{0.0065(700)}{297.55} \right]^{5.255} = 934 \text{ kPa}$$

در نتیجه فشار استاندارد در سایت ۹۳۴ kPa است. همانطور که در بخش قبل ذکر شد، حجم H_2S در

محل احداث تونل، $\frac{lit H_2S}{s}$ ۱/۴۱۵ است. در ادامه با استفاده از قانون بویل و با این فرض که فشار در سطح

استاندارد (سطح دریا)، ۱۰۱۳/۲۵ کیلو پاسکال است، حجم H_2S در سطح استاندارد محاسبه گردیده است.

قانون بویل:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (4-4)$$

$$(934 \text{ KPa}) \left(1.415 \frac{\text{lit } H_2S}{s} \right) = (1013.25 \text{ KPa}) \left(x \frac{\text{lit } H_2S}{s} \right)$$

$$\Rightarrow x = 1.034 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$$

بنابراین حجم H_2S در سطح استاندارد (سطح دریا) برابر با $\frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$ ۱/۰۳۴ است.

- تصحیح درجه حرارت:

در قسمت قبل حجم H_2S در سطح استاندارد و در دمای 297°K محاسبه شد و برابر با $\frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$ ۱/۰۳۴

بدست آمد. در این قسمت، با استفاده از قانون شارل حجم H_2S در سطح دریا و در دمای استاندارد

(273°K) بدست آمده است.

قانون شارل:

$$V_1 T_1 = V_2 T_2 \quad (5-4)$$

$$\left(1.034 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}\right) (297.55) = \left(x \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}\right) (273)$$

$$\Rightarrow x = 1.96 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$$

در نتیجه شدت جریان حجمی $\frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$ ۱/۴۱۵ در سطح محل احداث تونل (ارتفاع ۷۰۰ متر از سطح دریا)

و در دمای تونل (20°C درجه سانتی گراد)، متناظر با شدت جریان حجمی $\frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}}$ ۱/۱۹۶ در سطح

استاندارد و دمای استاندارد (273°K) است.

$$1\text{mol H}_2\text{S} = 34\text{gr} = 22.4\text{ lit}$$

$$\Rightarrow 1.196 \frac{\text{litH}_2\text{S}}{\text{S}} = 1.815 \frac{\text{gr H}_2\text{S}}{\text{S}}$$

در نتیجه شدت جریان جرمی H_2S در هوای تونل $\frac{\text{gr H}_2\text{S}}{\text{S}}$ ۱/۸۱۵ است.

ب) شدت جریان جرمی H_2S در آب زهکشی شده:

همانطور که ذکر شد، شدت جریان آب ورودی به تونل 170 lit/s است. غلظت H_2S در آب زهکشی شده

در زیر TBM، بر اساس محاسبات بخش ۲-۳-۳، $1.96 \times 10^{-4} \frac{gr H_2S}{lit H_2O}$ است.

$$170 \frac{lit H_2O}{s} \times 1.96 \times 10^{-4} \frac{gr H_2S}{lit H_2O} = 0.033 \frac{gr H_2S}{s}$$

در نتیجه شدت جریان جرمی H_2S در آب زهکشی شده تونل $0.033 \frac{gr H_2S}{s}$ است.

بر اساس نتایج بدست آمده در بندهای الف و ب، شدت جریان جرمی H_2S (آب+ هوا) در تونل برابر است

با:

$$1.815 + 0.033 = 1.848 \frac{gr}{s}$$

از آنجا که فرض شد که تمام H_2S وارد شده به تونل، محلول در آب زیرزمینی است، در نتیجه غلظت

اولیه H_2S $1/848 \frac{gr}{s}$ در آب به ازای 170 lit/s آب تونل است، بنابراین:

$$1.848 \frac{g H_2S}{s} \div 170 \text{ lit/s} = 0.011 \frac{g H_2S}{lit H_2O}$$

در نتیجه غلظت H_2S در آبی که وارد تونل می‌شود، 11 mgr/lit است (مهار گاز H_2S در تونل‌سازی،

گزارش مهندسين مشاور رهاب).

اطلاع از میزان دقیق غلظت H_2S موجود در آب ورودی به تونل، در صورت استفاده از مواد اکسید کننده

برای تصفیه H_2S موجود در آب زهکشی شده در تونل، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

۴-۵- تدابیر لازم برای گذر از بحران تصاعد H_2S در تونل زاگرس

همانطور که بیان شد، سولفید هیدروژن گازی فوق العاده خطرناک است و در صورت مواجهه با این گاز در محل کار، باید سریعاً برای ترقیق و رساندن عیار آن به درصدهای مجاز اقدام نمود. در این قسمت در ابتدا یکسری تدابیر کوتاه مدت بیان گردیده که اجرای این روش‌ها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی آن خواهد شد. لازم است که تمام تدابیر ذکر شده، در کوتاه‌ترین زمان ممکن اجرا شوند تا تاخیرهای وارد بر پروژه تا آنجا که ممکن است کاهش یابد. مسلماً هزینه‌ی سرمایه‌گذاری‌های همزمان بر روی روش‌های مختلف و اجرای آنها، خیلی کمتر از هزینه‌های وارده بر پروژه به دلیل توقف عملیات است.

در ادامه، روش‌هایی برای کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالطبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر و یا تصفیه گاز وارد شده به تونل ارائه شده، که این تدابیر در جهت بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد. تصمیم‌گیری منطقی به منظور انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها، می‌تواند بر اساس تخمین هزینه‌ها، شرایط اجرایی این روش‌ها، میزان بازدهی روش‌ها، سرعت اجرای هر روش و یک سری پارامتر دیگر صورت گیرد که این امر نیاز به بررسی دقیق این روش‌ها دارد.

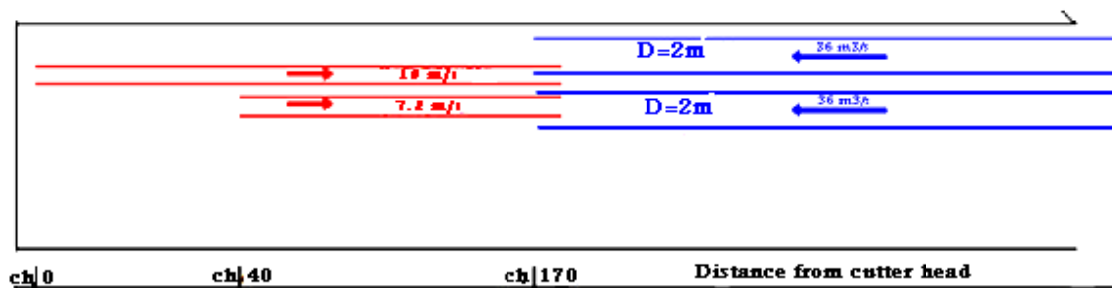
۴-۵-۱- تدابیر کوتاه مدت:

در این بخش، یک سری تدابیر معرفی گردیده که این روش‌ها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی آن خواهد شد. اجرای این روش‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن، تا حد زیادی تاخیرهای وارد بر پروژه را کاهش خواهد داد.

۴-۵-۱-۱- تقویت سیستم تهویه

تقویت سیستم تهویه تونل، به عنوان راهکاری مفید می‌تواند شرایط کاری را در محل TBM، قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به تونل بهبود بخشد. با اینکه برقراری شدت جریان کافی از هوا در محل تونل، جهت فراهم کردن یک محیط کار ایمن، امری اجتناب ناپذیر است، اما تقویت سیستم تهویه به تنهایی نمی‌تواند ابزاری مناسب جهت فائق آمدن بر مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل باشد و این گزینه باید به صورت مکمل سایر روش‌ها به کار رود.

سیستم تهویه تونل به طور شماتیک در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. این سیستم شامل یک داکت هوای تازه (آبی) و دو داکت مکنده، مجهز به فیلتر غبار زدایی (قرمز) با قطرهای و حجم‌های هوای ذکر شده می‌باشد. (خطوط پیوسته، نشان دهنده‌ی جریان درون داکت‌ها است).



شکل ۴-۲- نمایی شماتیک از طرح تهویه‌ی تونل زاگرس

برای ایجاد شرایط کاری مطلوب در قسمت TBM و پشتیبانی، نیاز است که شدت جریان هوای تازه در این قسمت‌ها افزایش یابد. در حال حاضر، هوای تازه تنها از طریق تهویه مکشی در قسمت جبهه کار تامین می‌شود. گزینه‌های زیر می‌توانند جهت افزایش میزان هوای تازه در جبهه کار مفید باشند:

۱- افزایش ظرفیت مکشی سیستم تهویه: اگر هوای آلوده‌ی بیشتری از محل جبهه کار تونل مکیده شود، هوای تازه بیشتری به این قسمت جریان پیدا می‌کند. این امر می‌تواند از طریق قرار دادن فن بر روی سرعت زیاد و یا دستکاری پره‌های فن توسط یک متخصص انجام شود.

۲- یک طراحی برای تقویت هوای تازه در طول قسمت پشتیبانی، استفاده از یک داکت تامین کننده هوای تازه، با قطر ۱۲۰۰ mm است که از انتهای قسمت پشتیبانی در ناحیه ch-۱۷۰ (شکل ۴-۲) شروع شده و در ناحیه ch-۴۰ خاتمه یابد. (یعنی طولی حدود ۱۳۰ متر)

با اجرای این طرح و فرستادن هوا به نقطه ch-۴۰ ، هوای تازه مستقیماً در ناحیه حضور کارگران تامین می‌شود و این یک تاثیر مثبت است. از طرفی در این پیشنهاد، داکت‌های مکشی را در نظر نگرفته نشده است. اگر هوای تازه توسط یک داکت به جلو آورده شود و همزمان داکت‌های مکشی هم کار کنند، بیشتر هوای تازه مستقیماً به درون داکت‌های مکشی کشیده می‌شود و بنابراین میزان هوای تازه‌ی کمتری در قسمت پشتیبانی جریان پیدا می‌کند و حرکت هوا در این قسمت کندتر می‌شود. بنابراین اجرای این طرح نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

- طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف)

مراحل طراحی سیستم تهویه تونل‌ها در مرحله‌ی حفاری را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

الف) انتخاب روش تهویه

ب) محاسبه مقدار هوای لازم

ج) محاسبه نشت هوا

د) محاسبه افت فشار در طول لوله

ه) انتخاب فن و لوله تهویه

و) محاسبات تهویه و نحوه جانمایی فن‌ها

الف) انتخاب روش تهویه

روش معمول برای تهویه تونل‌های در حین ساخت در تمام دنیا، به کارگیری فن‌های محوری کوچک تا متوسط در ابتدای پیشروی تونل است که هوا را از طریق کانال‌های تهویه و عمدتاً به صورت دهشی وارد تونل کرده و به سمت جبهه کار هدایت می‌کند.

ب) محاسبه حجم هوای مورد نیاز در جبهه کار

حجم هوای مورد نیاز بر اساس حداکثر تعداد نفرات در سینه کار تونل، حداقل سرعت هوا در سینه کار و محدوده فعالیت دستگاه، آلودگی‌های ناشی از سیستم حمل و نقل، کاهش گرمای الکتروموتورها و ترقیق گازهای آلاینده در محدوده‌ی TBM و پشتیبانی و ... تعیین می‌شود. پس از محاسبه مقدار هوا از روش‌های مختلف، از بین آنها حداکثر مقدار هوای محاسبه شده به عنوان هوای مورد نیاز طرح در نظر گرفته می‌شود.

- تعیین حجم هوا بر اساس حداکثر تعداد نفرات در سینه کار تونل

بر اساس استاندارد روسیه، به ازای هر نفر از افراد در هر دقیقه، باید ۶ متر مکعب هوای تازه در نظر گرفته شود. در تونل زاگرس تعداد نفرات در حال کار در سینه کار تونل ۳۰ نفر می‌باشد (مدنی، ۱۳۷۷)

$$Q = 6n(m^3/min) \quad (۴-۶)$$

که در آن n حداکثر تعداد نفراتی است که ممکن است همزمان با هم در طول تونل کار کنند.

$$Q = 6 \times 30 m^3/min = 180 m^3/min = 3 m^3/s$$

بنابراین حجم هوای مورد نیاز $3 m^3/s$ پیش بینی می‌شود.

- تعیین حجم هوا بر اساس حداقل سرعت هوا در سینه کار و محدوده فعالیت دستگاه

حداقل سرعت هوا در تونل باید 0.3 متر در ثانیه باشد (مدنی، ۱۳۷۷). بر این اساس در محدوده TBM و پشتیبانی، حداقل حجم هوا به منظور تامین شرط مذکور به صورت زیر می‌باشد:

$$28.3 \times 0.3 = 8.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

- تعیین حجم هوای لازم جهت خنک نمودن گرمای الکتروموتورها و غبارگیرها

با توجه به تمرکز الکتروموتورها و عمده‌ی فعالیت‌های اجرایی در محدوده‌ی دستگاه حفاری TBM و قسمت پشتیبانی، حجم هوای لازم جهت خنک نمودن موتورها با توان 2880 کیلووات، برابر $7/2$ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. همچنین با توجه به وضعیت سنگ‌های دربرگیرنده‌ی تونل و میزان گرد و غبار تولیدی در زمان حفاری و بارگیری و تخلیه در طول مسیر انتقال، ظرفیت هوای مکش شده توسط غبارگیر برابر 5 متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌گردد. بر این اساس کل حجم هوای لازم جهت خنک نمودن الکتروموتورها و هوای مورد نیاز سیستم غبارگیری، برابر $12/2 \text{ m}^3/\text{s}$ است (طراحی سیستم تهویه تونل، گزارش مهندسین مشاور ساحل):

- تعیین حجم هوا بر اساس آلودگی‌های ناشی از فعالیت سیستم حمل و نقل

برای رقیق نمودن گازهای ناشی از فعالیت لکوموتیوها، به $3 \text{ m}^3/\text{min}$ هوا به ازای هر کیلووات توان موتور نیاز است. مطابق برنامه سیستم بارگیری و حمل و نقل، در بیشتر اوقات دو دستگاه لکوموتیو دیزلی توان طراحی 190 کیلووات در محدوده پشتیبانی مستقر می‌باشند. این دو دستگاه لکوموتیو به طور همزمان فعال نبوده و لکوموتیو دوم در هنگام فعال بودن لکوموتیو اول با نیمی از توان فعالیت می‌کند، در نتیجه حجم هوای مورد نیاز برای رقیق آلودگی‌های ناشی از فعالیت سیستم حمل و نقل در محدوده‌ی قسمت پشتیبانی برابر خواهد بود با (طراحی سیستم تهویه تونل، گزارش مهندسین مشاور ساحل):

$$(190 + 95) \times 3 = 855 \text{ m}^3/\text{min} = 14.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

- تعیین حجم هوای لازم جهت رقیق نمودن گاز H_2S در محدوده TBM و پشتیبانی

براساس اندازه گیری‌های انجام شده از شرایط تونل زاگرس، مقدار گاز محلول در آب (که با دبی ۱۷۰ لیتر بر ثانیه وارد تونل می‌شود) در محل ورود به تونل برابر ۱۱ میلی گرم بر لیتر می‌باشد. بنابراین میزان گاز آزاد شده در تونل برابر خواهد بود با:

$$170 \text{ lit/s} \times 11 \text{ mg/lit} = 1870 \text{ mg/s}$$

از آنجا که جرم مخصوص سولفید هیدروژن $\frac{kg}{m^3}$ ۱/۴۲۸ است، خواهیم داشت:

$$18.7 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \times \frac{1}{1.428} \text{ m}^3/\text{kg} = 13.095 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

بنابراین حجم گاز آزاد شده در تونل برابر با $0.0013095 \text{ m}^3/\text{s}$ است.

اگر حجم گاز متصاعد شده در تونل معادل q متر مکعب در ثانیه باشد و نیز لازم باشد که این گاز تا حد p درصد رقیق شود، شدت جریان لازم هوا را بر اساس رابطه ۴-۷ بدست می‌آید (مدنی، ۱۳۶۶):

$$Q = \frac{100q}{p} (\text{m}^3/\text{s}) \quad (۷-۴)$$

بر اساس استاندارد ایالات متحده، عیار مجاز گاز سولفید هیدروژن در هوا، 20 ppm یا 0.002% درصد می‌باشد. بنابراین حجم هوای لازم برای ترقیق سولفید هیدروژن متصاعد شده برابر خواهد شد با:

$$Q = \frac{100(13.095 \times 10^{-4})}{0.002} = 65.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

طولی از تونل که طراحی تهویه آن برای شرایط با گازخیزی بالا انجام گرفته و نیاز به $65/5$ مترمکعب در ثانیه هوا در سینه کار نیاز می‌باشد، بر اساس گزارش "زمین شناسی مهندسی مسیر تونل" تا متر ۷۲۲۹ می‌باشد.

- برآورد کلی حجم هوای مورد نیاز در سینه کار تونل

بر اساس محاسبات انجام شده از روش‌های مختلف، حداکثر حجم هوای مورد نیاز تونل، برای شرایط احتمال حضور گاز در تونل، ۶۵/۵ متر مکعب در ثانیه پیش بینی می‌شود.

این مقدار جریان هوا، شرط سرعت مجاز هوا در تونل را رعایت نموده، هوای مورد نیاز خنک کردن الکتروموتورها، هوای مورد نیاز سیستم غبارگیر و هوای مورد نیاز لکوموتیو دیزلی را نیز فراهم می‌نماید. پس از عبور از مناطق گازخیز حجم هوای مورد نیاز در سینه کار برابر حجم هوای مورد نیاز جهت کاهش آلودگی‌های ناشی از فعالیت سیستم حمل و نقل (بیشترین حجم هوا در شرایط معمولی) می‌گردد که مقدار آن ۱۴/۲۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

ج) محاسبه درصد نشت هوا

میزان نشت هوا در لوله‌های تهویه را می‌توان از رابطه تجربی ۴-۸ محاسبه کرد (مدنی، ۱۳۷۷):

$$\frac{Q_f}{Q_o} = \left(\frac{KD}{3} \frac{L}{l} \sqrt{R} \times 10^{-6} + 1 \right)^2 \quad (۸-۴)$$

که در این رابطه:

L طول تهویه (m)، l طول قطعات لوله تهویه (m)، D قطر لوله (m)، K ضریب نفوذ پذیری اتصالات قطعات، (برای لوله‌های برزنتی با روکش PVC، ۱۵۷۰ در نظر گرفته می‌شود)، Q_o شدت جریان در انتهای لوله تهویه (m^3/s) و Q_f شدت جریان تولید شده توسط بادبزن (m^3/s) است.

R مقاومت لوله است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\alpha LP}{S^3} \quad (۹-۴)$$

α ضریب اصطکاک لوله، P محیط لوله تهویه و S مساحت مقطع لوله تهویه است.

د) محاسبه افت فشار انتقال هوا در طول لوله تهویه

هوای تولیدی فن در طول مسیر انتقال دچار افت های اصطکاکی، موضعی و ... می گردد. فن تهویه باید بتواند ضمن تامین فشار هوای مورد نیاز در سینه کار، بر افت های مختلف در طول مسیر انتقال هوا غلبه نماید.

افت فشارهای استاتیکی و دینامیکی در لوله های انتقال هوا از روابط ۴-۱۰ و ۴-۱۱ تعیین می گردند (مدنی، ۱۳۷۷):

$$\Delta P_s = \frac{\alpha L P}{S^3} Q_m^2 \quad (4-10)$$

$$\Delta P_v = \gamma \frac{V^2}{2g} \quad (4-11)$$

که در این روابط:

ΔP_s افت فشار استاتیکی، ΔP_v افت فشار دینامیکی، α ضریب اصطکاک لوله تهویه، L طول مسیر انتقال هوا، P محیط لوله، S مساحت لوله تهویه، V سرعت هوای تولیدی فن، Q_m شدت جریان متوسط تولید شده توسط فن، g شتاب جاذبه زمین و γ وزن مخصوص هوا است.

بر اساس روابط فوق، افت فشار استاتیکی و دینامیکی به حجم هوای تولیدی، مشخصات هندسی لوله تهویه و فواصل بین آنها بستگی دارد.

ه) انتخاب فن و لوله تهویه

تجهیزات مورد نیاز طرح تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) به شرح جدول ۴-۲ است.

جدول ۴-۲- لیست تجهیزات مورد نیاز طرح تهویه

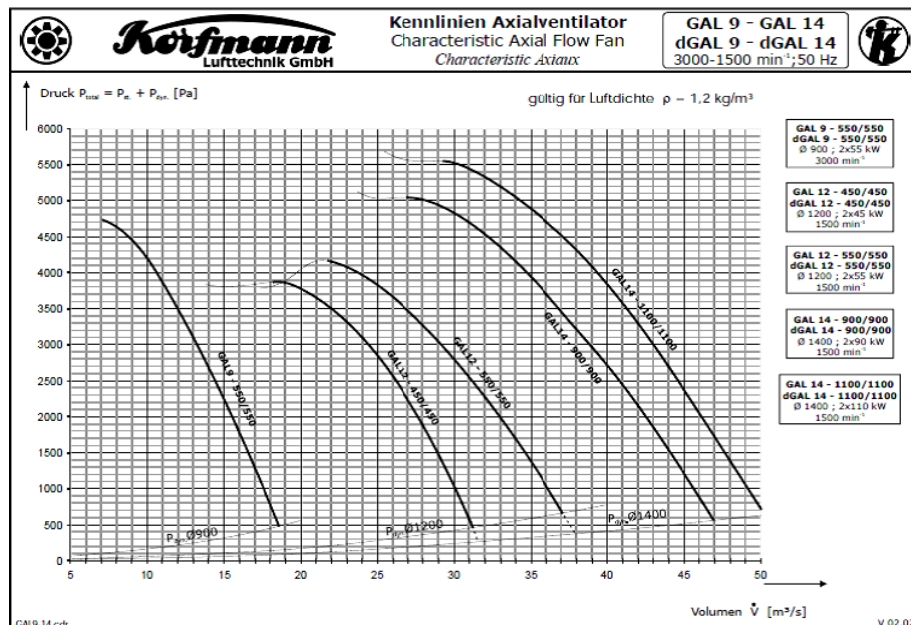
تجهیزات	مشخصات	مقدار	واحد
فن‌های تهویه	فن محوری مدل GAL14-1100/1100 محصول شرکت کرفمن ^۱ ، با دبی ۴۰ متر مکعب و فشار کل ۳۸۰۰ پاسکال.	۴	دستگاه
	فن محوری مدل GAL12- 450/450 محصول شرکت کرفمن، با دبی ۲۰ متر مکعب و فشار کل ۳۷۵۰ پاسکال.	۱	دستگاه
مبدل فرکانس	با توان موتورهای دستگاه و با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۴۰۰ ولت.	۱	دستگاه
لوله تهویه اصلی تونل	لوله تهویه به قطر ۲ متر و با مشخصات زیر: از جنس پلی استر با روکش دو طرف PVC و تار و پود بهم بافته شده ضریب اصطکاک لوله ۰/۰۰۰۳ طول قطعات لوله تهویه ۱۰۰ متر نحوه اتصال لوله‌ها به یکدیگر از نوع اتصال زیپی ^۲ لوله‌های آنتی استاتیک و مقاومت آنتی استاتیکی کمتر از 1×10^8 اهم لوله‌های تهویه با مقاومت در مقابل پاره شدگی تا فشار ۷۵۰ میلیمتر آب (۷۵۰۰ پاسکال) لوله‌های مقاوم در مقابل نفوذ آب، عدم جذب آب	۱۴۶۰۰	متر
کاست ^۳	با قطر داخلی ۲ متر و طول آنها بر اساس طول تهویه در قطعات ۱۰۰ متری	۲	عدد

همانطور که اشاره شد، در طراحی از فن‌های سری GAL شرکت کرفمن استفاده شده، که منحنی مشخصه آنها در شکل ۴-۳ دیده می‌شود.

^۱ Korfmann

^۲ Zip joint

^۳ Cassette



شکل ۴-۳- منحنی مشخصه فن‌های سری GAL ساخت شرکت کرفمن (www.hpcproducts.com)

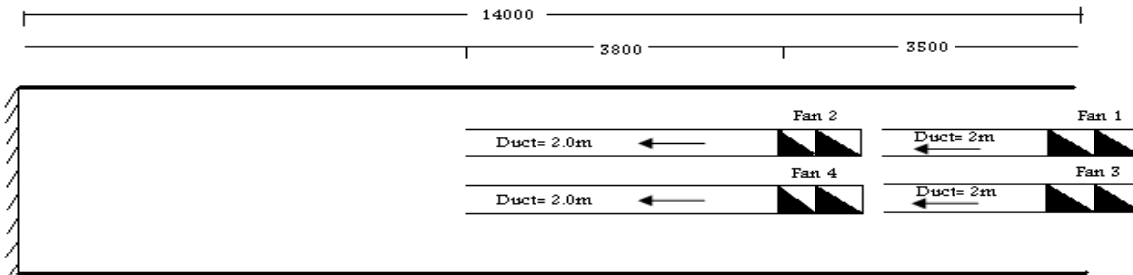
و) محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس

پس از انتخاب فن و لوله تهویه مورد نیاز، برای تعیین محل جانمایی فن‌ها یکسری محاسبات انجام شده که در ادامه آورده شده است.

بخش اول- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) از دهانه تا متر ۷۳۰۰

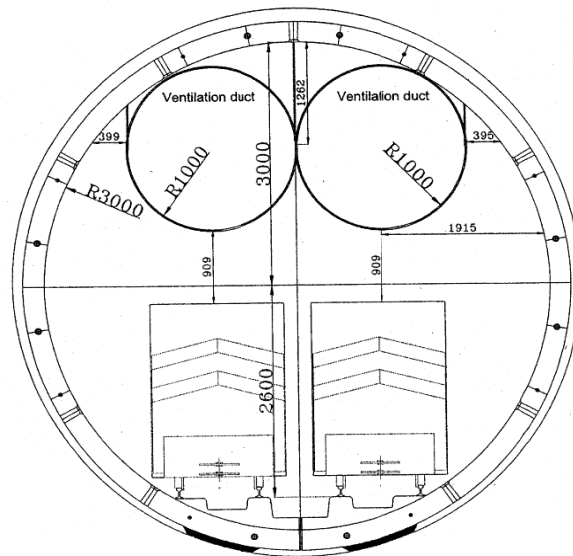
محاسبات سیستم تهویه تونل زاگرس در طول ۷۳۰۰ متر ابتدایی تونل بر اساس حجم گاز مورد نیاز جهت ترقیق گاز H_2S متصاعد شده در محدوده TBM و قسمت پشتیبانی تا حد مجاز، صورت گرفته است. در این قسمت، با توجه به محاسبات بخش قبل، به ۶۵/۵ متر مکعب در ثانیه هوا در سینه کار مورد نیاز است. با توجه به رابطه ۴-۸، به دلیل افت فشار هوا در طول لوله تهویه، میزان شدت جریان تولیدی فن (Q_f) نبایستی از ۷۲/۳ متر مکعب در ثانیه کمتر باشد. همانطور که از شکل ۴-۴ آشکار است، برای تامین ۶۵/۵ متر مکعب گاز در سینه کار (Q_0)، ۲ لوله تهویه، متصل به دو فن محوری با شدت جریان ۴۰ متر مکعب و فشار کل ۳۸۰۰ پاسکال، هوا را تا طول ۳۵۰۰ متر تونل جلو می‌آورند. در این محل، با توجه با اینکه

فشار تولیدی فن‌ها برابر با افت فشار ایجاد شده در طول لوله تهویه می‌شود، نیاز است که ۲ عدد فن محوری دیگر (با همان مشخصات) در این محل از تونل جاسازی شوند تا شدت جریان مورد نیاز را به انتهای متراژ ۷۳۰۰ تونل برسانند.



شکل ۴-۴- جانمایی تجهیزات تهویه در بخش ابتدایی تونل زاگرس

مقطعی عرضی از نحوه جانمایی تجهیزات تهویه در شکل ۴-۵ دیده می‌شود.



شکل ۴-۵- مقطع عرضی تونل و نحوه جانمایی تجهیزات

شرح پارامترهای به کار رفته در طراحی در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴- شرح پارامترهای به کار رفته در طراحی سیستم تهویه

پارامتر	شرح
L	طول بخش تهویه
D	قطر لوله تهویه، ۲ متر
R	مقاومت لوله تهویه در طول ۵۰۰ متر که از رابطه زیر بدست می‌آید: $R = \frac{\alpha LP}{S^3} = \frac{0.0003 \times 500 \times 2\pi(1)}{(\pi(1)^2)^3} = 0.03$
V	سرعت هوا در طول‌های متفاوت لوله تهویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود. $v = \frac{Q_f}{S_{duct}}$
	شدت جریان در انتهای لوله تهویه
	شدت جریان در ابتدای لوله (تولید شده توسط فن) که طبق رابطه زیر با Q_0 مرتبط است. $\frac{Q_f}{Q_o} = \left(\frac{KD}{3} \frac{L}{l} \sqrt{R} \times 10^{-6} + 1 \right)^2$
	شدت جریان متوسط در طول لوله $Q_m = 0.5(Q_f + Q_0)$
	افت فشار استاتیکی محاسبه شده از رابطه $\Delta P_s = \frac{\alpha LP}{S^3} Q_m^2$
	افت فشار دینامیکی محاسبه شده از رابطه $\Delta P_v = \gamma \frac{V^2}{2g}$
	افت فشار کل $\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_v$

در جدول ۴-۴ نتیجه محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس، قطعه یک (الف) تا متر ۷۳۰۰

آورده شده است.

جدول ۴-۴- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) از دهانه تا متر ۷۳۰۰

L	R	V	Q_f	Q_0	Q_m	ΔP_s	ΔP_v	ΔP_{tot}	P_{tot} تجمعی
۰-۵۰۰	۰/۰۳	۱۲/۷۳	۴۰	۳۹	۳۹/۵	۴۶/۸۰	۹/۹۲	۵۶/۷۳	
۵۰۰-۱۰۰۰	۰/۰۳	۱۲/۴۱	۳۹	۳۸/۰۳	۳۸/۵۱	۴۴/۵۰	۹/۴۳	۵۳/۹۳	
۱۰۰۰-۱۵۰۰	۰/۰۳	۱۲/۱۰	۳۸/۰۳	۳۷/۰۸	۳۷/۵۵	۴۲/۳۱	۸/۹۷	۵۱/۲۸	
۱۵۰۰-۲۰۰۰	۰/۰۳	۱۱/۸۰	۳۷/۰۸	۳۶/۱۶	۳۶/۶۲	۴۰/۲۳	۸/۵۲	۴۸/۷۶	
۲۰۰۰-۲۵۰۰	۰/۰۳	۱۱/۵۱	۳۶/۱۶	۳۵/۲۶	۳۵/۷۱	۳۸/۲۵	۸/۱۱	۴۶/۳۶	
۲۵۰۰-۳۰۰۰	۰/۰۳	۱۱/۲۲	۳۵/۲۶	۳۴/۳۸	۳۴/۸۲	۳۶/۳۷	۷/۷۱	۴۴/۰۸	
۳۰۰۰-۳۵۰۰	۰/۰۳	۱۰/۹۴	۳۴/۳۸	۳۳/۵۳	۳۳/۹۵	۳۴/۵۸	۷/۳۳	۴۱/۹۲	۳۴۳/۰۸
۳۵۰۰-۴۰۰۰	۰/۰۳	۱۲/۷۳	۴۰	۳۹	۳۹/۵	۴۶/۸۰	۹/۹۲	۵۶/۷۳	
۴۰۰۰-۴۵۰۰	۰/۰۳	۱۲/۴۱	۳۹	۳۸/۰۳	۳۸/۵۱	۴۴/۵۰	۹/۴۳	۵۳/۹۳	
۴۵۰۰-۵۰۰۰	۰/۰۳	۱۲/۱۰	۳۸/۰۳	۳۷/۰۸	۳۷/۵۵	۴۲/۳۱	۸/۹۷	۵۱/۲۸	
۵۰۰۰-۵۵۰۰	۰/۰۳	۱۱/۸۰	۳۷/۰۸	۳۶/۱۶	۳۶/۶۲	۴۰/۲۳	۸/۵۲	۴۸/۷۶	
۵۵۰۰-۶۰۰۰	۰/۰۳	۱۱/۵۱	۳۶/۱۶	۳۵/۲۶	۳۵/۷۱	۳۸/۲۵	۸/۱۱	۴۶/۳۶	
۶۰۰۰-۶۵۰۰	۰/۰۳	۱۱/۲۲	۳۵/۲۶	۳۴/۳۸	۳۴/۸۲	۳۶/۳۷	۷/۷۱	۴۴/۰۸	
۶۵۰۰-۷۳۰۰	۰/۰۴۸	۱۰/۹۴	۳۴/۳۸	۳۳/۵۳	۳۳/۹۵	۵۵/۳۴	۷/۳۳	۶۲/۶۷	۳۶۳/۸۴

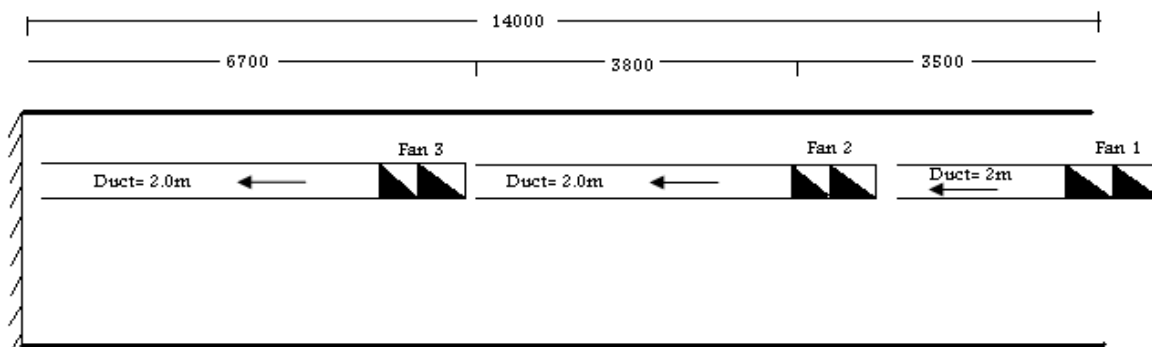
بخش دوم- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) از متر ۷۳۰۰ تا انتهای تونل پس از تهویه‌ی بخش‌های گازدار تونل، از متر ۷۳۰۰ تا انتهای تونل، تهویه بر اساس شرایط عادی انجام می‌شود. در شرایط عادی باید ۱۴/۲۵ متر مکعب بر ثانیه هوا در سینه کار تامین شود. بدین منظور، بر اساس رابطه ۴-۸، میزان شدت جریان تولیدی فن نباید از ۱۵/۵ متر مکعب در ثانیه کمتر شود.

طرح پیشنهادی برای اجرای تهویه بخش دوم تونل زاگرس به صورت زیر است:

در ابتدا یک خط از لوله‌های تهویه نصب شده در بخش ۷۳۰۰ متر ابتدایی تونل و دو فن نصب شده در مسیر آن، جمع شده و تهویه این قسمت در این مرحله با دو فن نصب شده در ورودی تونل و طول ۳۵۰۰ متری تونل انجام می‌شود. خط لوله‌ی دمونتاژ شده از بخش اول، در ۶۳۰۰ متر انتهایی تونل نصب می‌شود

و تهویه بخش دوم از تونل تنها با یک خط لوله به قطر ۲ متر انجام می‌گیرد. این عمل در کاهش میزان هزینه‌های وارده بر پروژه نقش به سزایی دارد. تهویه بخش انتهایی تونل با استفاده از یک فن محوری با شدت جریان ۲۰ متر مکعب در ثانیه و فشار کل ۳۷۵۰ پاسکال انجام می‌گیرد.

نحوه‌ی جانمایی تجهیزات تهویه در بخش دوم تونل در شکل ۴-۶ دیده می‌شود.



شکل ۴-۶- جانمایی تجهیزات تهویه در بخش انتهایی تونل زاگرس

در جدول ۴-۵ نتیجه محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) متراژ ۷۳۰۰ تا انتهای تونل دیده می‌شود.

جدول ۴-۵- محاسبات طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف) متراژ ۷۳۰۰ تا انتهای تونل

L	R	V	Q_f	Q_0	Q_m	ΔP_s	ΔP_v	ΔP_{tot}	P_{tot} تجمعی
۷۳۰۰-۷۸۰۰	۰/۰۳	۶/۳۶	۲۰	۱۹/۵	۱۹/۷۵	۱۱/۷۰	۲/۴۸	۱۴/۱۸	
۷۸۰۰-۸۳۰۰	۰/۰۳	۶/۲۰	۱۹/۵	۱۹/۰۱	۱۹/۲۵	۱۱/۱۲	۲/۳۵	۱۳/۴۸	
۸۳۰۰-۸۸۰۰	۰/۰۳	۶/۰۵	۱۹/۰۱	۱۸/۵۴	۱۸/۷۷	۱۰/۵۷	۲/۲۴	۱۲/۸۱	
۸۸۰۰-۹۳۰۰	۰/۰۳	۵/۹۰	۱۸/۵۴	۱۸/۰۸	۱۸/۳۱	۱۰/۰۵	۲/۱۳	۱۲/۱۹	
۹۳۰۰-۹۸۰۰	۰/۰۳	۵/۷۵	۱۸/۰۸	۱۷/۶۳	۱۷/۸۵	۹/۵۶	۲/۰۲	۱۱/۵۹	
۹۸۰۰-۱۰۳۰۰	۰/۰۳	۵/۶۱	۱۷/۶۳	۱۷/۱۹	۱۷/۴۱	۹/۰۹	۱/۹۲	۱۱/۰۲	
۱۰۳۰۰-۱۰۸۰۰	۰/۰۳	۵/۴۷	۱۷/۱۹	۱۶/۷۶	۱۶/۹۷	۸/۶۴	۱/۸۳	۱۰/۴۷	
۱۰۸۰۰-۱۱۳۰۰	۰/۰۳	۵/۳۳	۱۶/۷۶	۱۶/۳۴	۱۶/۵۵	۸/۲۱	۱/۷۴	۹/۹۵	
۱۱۳۰۰-۱۱۸۰۰	۰/۰۳	۵/۲۰	۱۶/۳۴	۱۵/۹۳	۱۶/۱۳	۷/۸۱	۱/۶۵	۹/۴۶	
۱۱۸۰۰-۱۲۳۰۰	۰/۰۳	۵/۰۷	۱۵/۹۳	۱۵/۵۳	۱۵/۷۳	۷/۴۲	۱/۵۷	۸/۹۹	
۱۲۳۰۰-۱۲۸۰۰	۰/۰۳	۴/۹۴	۱۵/۵۳	۱۵/۱۴	۱۵/۳۳	۷/۰۵	۱/۴۹	۸/۵۵	
۱۲۸۰۰-۱۳۳۰۰	۰/۰۳	۴/۸۱	۱۵/۱۴	۱۴/۷۶	۱۴/۹۵	۶/۷۰	۱/۴۲	۸/۱۲	
۱۳۳۰۰-۱۴۰۰۰	۰/۰۴۲	۴/۶۹	۱۴/۷۶	۱۴/۳۸	۱۴/۵۷	۶/۳۸	۱/۳۵	۷/۷۲	۱۳۸/۵۸

۴-۵-۱-۲- حفاظت کابین‌های الکتریکی

وجود H_2S در اتمسفر تونل سبب ایجاد خوردگی بر روی ریل‌های مسی و قطعات موجود در کابین‌های الکتریکی می‌شود. همچنین خوردگی‌هایی نیز بر روی کارت‌های^۱ PLC دستگاه ایجاد می‌کند که کارکرد آنها را دچار مشکل کرده و خسارات سنگینی را به پروژه تحمیل می‌کند.

حفاظت کابین‌ها از این خوردگی، تنها از طریق قرار دادن آنها تحت فشار مثبتی از هوای تمیز امکان پذیر است. برای کاهش مصرف هوا، کابین‌ها باید تا حد امکان، غیر قابل نفوذ توسط هوا ساخته شود.

فشار مثبت هوا باید توسط هوایی که آلوده به H_2S نیست، تولید شود. بنابراین هوای فشرده مکش شده از قسمت پشتیبانی نمی‌تواند بلافاصله مورد استفاده قرار گیرد. یک گزینه ممکن، فیلتر کردن هوای مکش شده، قبل از جاری شدن آن بر روی کابین‌ها است. اما این روش بسیار پرهزینه است. ساده‌ترین راه، استفاده از هوای تمیزی است که توسط داکت هوای تازه به انتهای قسمت پشتیبانی آورده می‌شود. یک سیستم لوله PVC نصب شده در طول قسمت پشتیبانی و تعدادی فن کمکی برای تقویت جریان هوا می‌تواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد.

این سیستم تنها در حالتی که تهویه تونل در حال کار باشد، می‌تواند حفاظت کابین‌های الکتریکی را فراهم نماید. اگر حفاظت کابین‌ها در حالتی که سیستم تهویه خاموش است نیز مورد نیاز باشد، ضروری است که یک لوله هوای فشرده‌ی مجزا در طول تونل نصب شود تا هوای تازه را از بیرون تونل به لوله کشی برساند؛ مستقل از اینکه سیستم تهویه در حال کار است یا خیر.

به منظور کنترل و اندازه‌گیری مداوم میزان گازهای انفجاری مانند متان و همچنین گازهای سمی مانند اکسیدهای کربن و سولفید هیدروژن، باید تعدادی حسگر^۲ در محل‌های مناسبی از دستگاه حفاری نصب

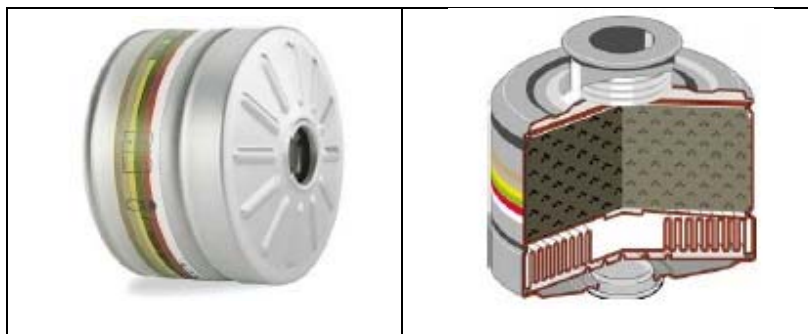
^۱ Program logic control

^۲ Sensor

گردد؛ به طور مثال در پیشانی حفار، مجاورت اتاقک اپراتور TBM و در محدوده‌ی خروج هوا از لوله تهویه اصلی. این حسگرها باید به مدار فرمان اصلی متصل باشند تا در صورت مواجه با شرایط خطرناک، امکان از مدار خارج کردن الکتروموتورهای دستگاه TBM را داشته باشند.

۴-۵-۱-۳- استفاده از تجهیزات حفاظت شخصی

استفاده از ماسک‌های فیلتردار برای کار در تونل در مواقعی که حضور H_2S توسط حسگرها به اثبات رسیده، ضروری و اجتناب ناپذیر است. بازه زمانی که فیلترها عمل حفاظتی را انجام می‌دهند، به آسانی قابل تعیین کردن نیست. این مدت زمان نه تنها به غلظت H_2S ، بلکه به سرعت جریان هوا، رطوبت هوا و سایر موارد نیز بستگی دارد. در کل فیلترها تا زمانی قابل استفاده هستند که گاز H_2S را از خود عبور ندهند. روند نفوذ H_2S به داخل فیلتر به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد، اما علامت مشخصه‌ی آن، استشمام بوی H_2S توسط استفاده کننده‌ی ماسک است. در این هنگام فیلتر منقضی شده و باید تعویض شوند. در شکل ۴-۷ نمونه‌ای از فیلترهای H_2S ، قابل استفاده در ماسک‌های تنفسی، ساخت شرکت دراگر^۱، دیده می‌شود.



شکل ۴-۷- فیلتر H_2S ، قابل استفاده در ماسک‌های تنفسی، ساخت شرکت دراگر آلمان (www.draeger-safety.com)

^۱ Draeger

۴-۵-۱-۴- تزریق دوغاب گراول در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده

هنگامی که حفاری تونل به وسیله یک TBM و پوشش آن توسط قطعات بتنی پیش ساخته انجام می‌گیرد، قطر کله‌ی حفار ماشین کمی بزرگتر از قطر پوشش در نظر گرفته می‌شود. اختلاف این دو مقدار، برای فراهم کردن امکان نصب پوشش در انتهای سپر TBM لازم است. همچنین وجود مقداری فضای خالی بین پوشش تونل و دیواره حفاری، جهت هدایت TBM در طول قوس‌ها، بدون اینکه پوشش بتنی و سپر با هم تداخل پیدا کنند، مورد نیاز و ضروری است. تزریق فوری دوغاب گراول در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده تونل، برای کاهش نشست تونل، کاهش ورود آب زیر زمینی و پایداری حلقه پوشش بتنی مورد نیاز است (جروم، ۱۳۸۷).

۴-۵-۱-۵- مسدود کردن کانال‌های آب

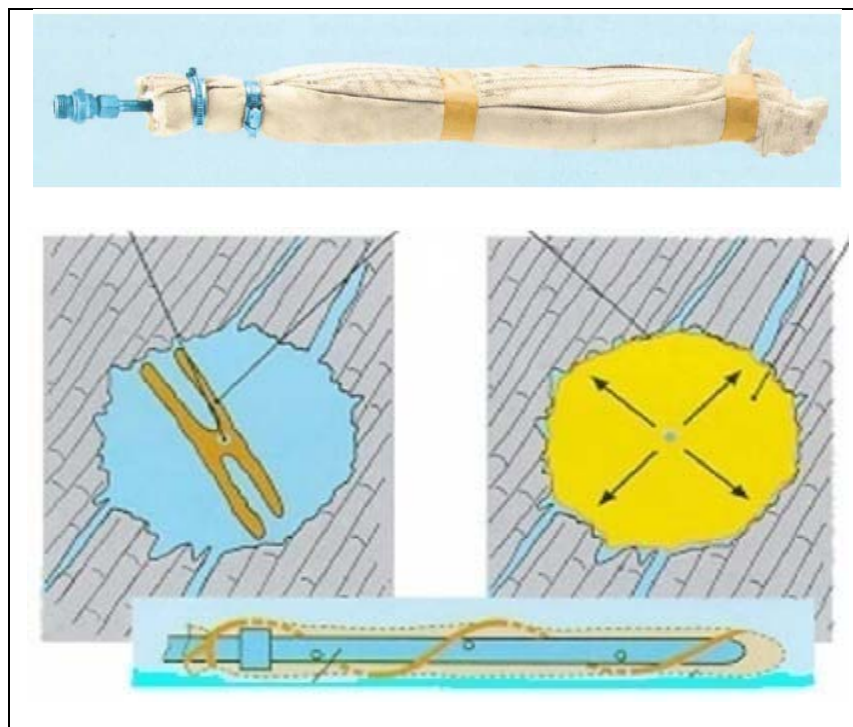
قابلیت انتقال آب در تشکیلات ایلام از طریق جریان در کانال‌های کارستی و سایر پدیده‌های کارستی به اثبات رسیده است. کانال‌های کارستی حفراتی هستند که در اثر شسته شده آهک به وجود می‌آیند. در صورت مواجهه با یک کانال جریان با قطر بیشتر از حدود ۲۰ سانتی متر، یک راهکار این است که از ابزاری با نام لوله تزریق با غلاف بولفلکس^۱ جهت مسدود کردن کانال استفاده کرد. ساختمان این پرکننده مشتمل بر یک لوله‌ی تزریق است که یک غلاف ویژه در اطرافش پیچیده شده است. این غلاف در دو انتها توسط حلقه به لوله تزریق ثابت شده است و این حلقه‌ها از لغزیدن غلاف بر روی لوله جلوگیری می‌کنند.

لوله تزریق در قسمت انتهایی یک رابط دارد که از این طریق به شلنگ مخزن تزریق متصل می‌شود.

^۱ bullflex

در هنگام مواجه شدن با کانال کارستی، لوله داخل کانال قرار می‌گیرد. سپس شلنگ تزریق از محل رابط به لوله وصل می‌شود و ملات سیمان یا فوم منبسط شونده^۱ به درون لوله تزریق می‌شود. با تزریق ملات، پوشش بولفلکس پیچیده شده به دور لوله منبسط می‌شود، تا اندازه‌ای که تمام کانال را می‌پوشاند و با به وجود آوردن یک مانع در مقابل دیواره‌های کانال، از ورود آب از کانال به درون تونل جلوگیری می‌کند (www.bullflex.de).

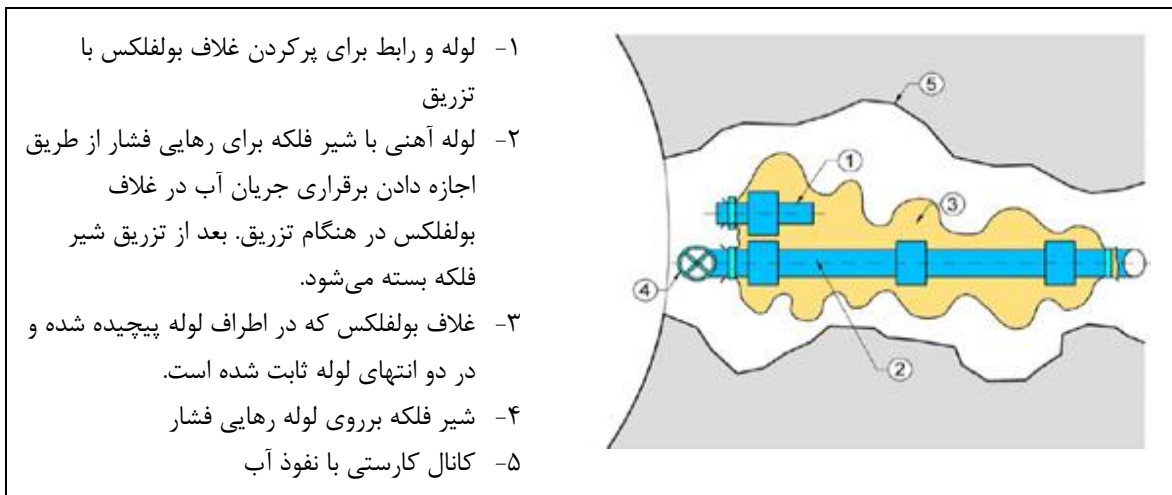
در شکل ۸-۴ نمایی از لوله تزریق با غلاف بولفلکس دیده می‌شود.



شکل ۸-۴- مسدود کننده با غلاف بولفلکس (www.bullflex.de).

اگر فشار آب خیلی بالا باشد، یک لوله آهنی مجهز به شیر فلکه، جهت رهاسازی فشار، ممکن است به لوله تزریق اضافه شود. در شکل ۹-۴ نمایی از پرکن بولفلکس مجهز به لوله رهایی فشار دیده می‌شود.

² Expansive foam



شکل ۴-۹- لوله تزریق با غلاف بولفلکس مجهز به لوله رهایی تنش (www.bullflex.de).

۴-۵-۲- تدابیر بلند مدت

در این بخش روش‌هایی برای کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالطبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر و یا تصفیه گاز وارد شده به تونل ارائه شده، که این تدابیر در جهت بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد.

۴-۵-۲-۱- زهکشی در کل تونل با سیستم لوله

زهکشی کلید بهبود شرایط کاری در تونل است. آب آلوده به H_2S باید تا آنجا که ممکن است به سرعت جمع آوری شده و درون یک سیستم لوله بسته پمپ شود، در این صورت H_2S در اتمسفر تونل منتشر نمی‌شود. سه حالت ممکن جهت زهکشی آب ورودی به تونل وجود دارد:

الف) زهکشی آب از محل ورود به تونل:

نقاط زیادی در محل سینه کار وجود دارند که در هنگام حفاری، آب زیرزمینی از آنها خارج می‌شود. بیشترین آب از محل سوراخ‌های تزریق گراول وارد تونل می‌شود. در هنگامی که شدت جریان آب ورودی به تونل افزایش می‌یابد، سوراخ‌های ورودی آب باید توسط لوله‌هایی با قطر مناسب بسته شده و آب خارج

شونده از این سوراخ‌ها توسط لوله به سیستم زهکشی تونل وارد شود. جمع آوری بیشتر آب وارد شونده به تونل به این روش باید در بالاترین درجه اولویت قرار داشته باشد. از آنجا که آب زهکشی شده در تونل حاوی H_2S است و این گاز به شدت خورنده می‌باشد، بایستی از لوله‌هایی از جنس PVC به منظور زهکشی در تونل استفاده کرد، زیرا این لوله‌ها در مقابل خوردگی مقاوم هستند.

ب) زهکشی از طریق حفر گمانه‌های زهکشی و پمپ کردن آب:

حفر گمانه‌های زهکشی در محل تونل و زهکشی آب توسط پمپ، یک روش رایج برای زهکشی تونل‌ها می‌باشد. نکته قابل توجه در اینجا، امتداد حفاری گمانه‌ها است. اگر امتداد گمانه‌ها به موازات لایه‌های سنگی دربرگیرنده تونل باشد، خارج کردن آب لایه‌ها توسط این گمانه‌ها موفقیتی به همراه نخواهد داشت. گمانه‌های زهکشی باید عمود بر امتداد صفحات لایه بندی و درزه‌ها حفر شوند.

اگر حفر این گمانه‌ها جهت خارج کردن آب لایه‌ها کافی نباشد، حفر یکسری گمانه عمودی در کف تونل، می‌تواند کمک فراوانی جهت خارج کردن آب تشکیلات سنگی انجام دهد.

در شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نمونه‌ای از این لوله‌های زهکشی، و نحوه‌ی نصب آنها بر روی دیواره‌ی تونل دیده می‌شود.



شکل ۴-۱۰- نمایی از لوله‌های زهکشی و اتصالات آنها (www.minova-ag.ch)



شکل ۴-۱۱- نحوه‌ی اتصال لوله‌های زهکشی به دیواره‌ی تونل (www.minova-ag.ch)

فرایند حفر گمانه و زهکشی به طور کلی شامل مراحل زیر است:

۱- حفاری چال قائم داخل سگمنت کف تونل

قطر چال باید در حدود ۳ اینچ باشد. عمق نهایی گمانه‌ها ۳ متر خواهد بود.

۲- تمیز کردن سوراخ‌ها توسط یک لوله پلاستیکی حاوی هوای فشرده و سپس تعبیه یک لوله پلاستیکی شیاردار در داخل سوراخ

هدف از تعبیه‌ی لوله، جلوگیری از ورود ذرات سنگ و خاک به داخل گمانه و آسیب رساندن به پمپ است. قطر خارجی لوله باید حدود ۲/۵ اینچ یا کمتر باشد تا بتواند داخل گمانه نصب شود.

۳- تمیز کردن مجدد لوله پلاستیکی نصب شده، توسط هوای فشرده

۴- نصب یک پمپ الکتریکی کوچک و اتصال آن به لوله پلاستیکی

۵- زهکشی آب وارد شده به داخل گمانه توسط پمپ (Frankline, et al, 1989).

بعد از عبور TBM و قسمت پشتیبانی از این محل، پمپ متصل به گمانه جدا شده و همین عملیات چند متر جلوتر، در محل جدید حضور TBM تکرار خواهد شد. فاصله‌ی بین گمانه‌های زهکشی عموماً به اندازه‌ی عرض دو سگمنت در نظر گرفته می‌شود. البته این فاصله به میزان موفقیت روش نیز بستگی دارد. از معایب این روش می‌توان به مشکل بودن حفر گمانه داخل سگمنت کف تونل اشاره کرد، تا آنجا که گاهی عملیات حفاری تنها در محل اتصالات سگمنت‌ها امکان‌پذیر است. برای اجتناب از به وجود آمدن چنین مشکلی در داخل تونل، می‌توان حفاری درون سگمنت کف را در بیرون از تونل انجام داد.

جمع آوری آب به این روش باید در درجه دوم اولویت باشد، زیرا این روش اجازه نمی‌دهد که آب H_2S خود را وارد اتمسفر تونل کند. برای اینکه آب ورودی در کف تونل تجمع پیدا نکند، پمپ‌های زهکشی باید مرتباً کار کنند و آب وارد شونده را وارد سیستم زهکشی تونل کنند.

پ) زهکشی از کانال‌های روباز آب:

هر آبی که قبل از ورود به تونل وارد سیستم زهکشی نشود، سرانجام به کف تونل راه پیدا خواهد کرد. عموماً بیشترین حجم آب ورودی در محل جبهه کار و دیواره‌های حفاظت نشده در پشت سپر مشاهده می‌شود. این آب داخل یک مجرا در کف تونل جریان می‌یابد. آب جاری در کف تونل بایستی توسط پمپ

به درون لوله‌های زهکشی فرستاده شود. برای پمپ کردن آب به درون لوله، نیاز است که جریان آب به طور موضعی مسدود شود تا بتوان آنرا جمع آوری و پمپ کرد. جمع آوری آب به این طریق (پمپاژ از کانال های روباز) باید در درجه آخر اولویت باشد، زیرا این روش به آب اجازه می‌دهد که H_2S خود را در فضای تونل منتشر کند.

روش‌های شرح داده شده در بالا، تنها آب آلوده موجود در محل TBM و قسمت پشتیبانی را منتقل می‌کند، اما در نهایت این آب آلوده را در پشت قسمت پشتیبانی رها می‌کند. در نتیجه شرایط کاری تنها در محل TBM بهبود خواهد یافت، اما راه دسترسی به TBM از ورودی تونل همچنان آلوده خواهد بود. برای رفع این مشکل، یک گزینه ممکن می‌تواند زهکشی آب در یک سیستم لوله بسته باشد. این عملیات می‌تواند از طریق پمپ کردن آب آلوده به سمت ورودی تونل، درون یک لوله انجام شود. از آنجا که میزان آب آلوده اغلب نامشخص است، انتخاب قطر لوله کار مشکلی است. همچنین با افزایش طول تونل، عملیات پمپ کردن و لوله گذاری گرانتر خواهد شد.

۴-۵-۲-۲- زهکشی از سطح

با حفاری گمانه‌های زهکشی از سطح به سمت تونل، ممکن است بتوان فشار آب را در سطح تونل کاهش داده و در نتیجه جریان آب را به سمت داخل تونل کم کرد. این روش تنها در مورد تونل‌هایی با روباره‌ی کم امکان پذیر است. علاوه بر این، استفاده از این روش برای مدت زمان طولانی مناسب نیست، زیرا زهکشی آب توسط این گمانه‌ها سبب به وجود آمدن مشکلاتی مهم برای روستاهای اطراف که از آب زیرزمینی این ناحیه توسط چاه‌ها و چشمه‌ها تغذیه می‌کنند، خواهد.

۴-۵-۲-۳- پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه در پشت TBM

هدف از پیش تزریق، بهسازی جبهه کار است، اگر این گزینه با موفقیت انجام شود، می‌تواند حجم آب ورودی به تونل را به صفر رسانده و در نتیجه مشکل تصاعد گاز H_2S را کاملاً حل کند. اما با توجه به روش حفاری مکانیزه تونل، اجرای عملیات پیش تزریق بسیار سخت می‌باشد.

هرنوع تزریق نیازمند این است که زمین قابل تزریق باشد. همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، قابلیت انتقال آب در تشکیلات ایلام، از طرق جریان در کانال‌های کارستی به اثبات رسیده است. وجود این کانال‌ها بازدهی عملیات تزریق را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

تزریق ثانویه پس از عبور TBM نیز راهکاری مفید برای جلوگیری از ورود آب زیر زمینی به داخل تونل است.

۴-۵-۲-۴- آب‌بندی درزه‌های قطعات پیش ساخته:

الف) نوارهای آب‌بندی EPDM^۱

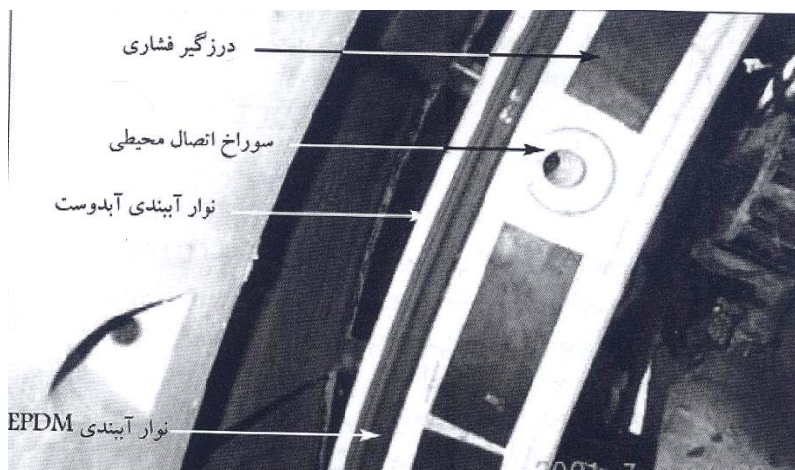
قطعات پیش ساخته بتنی عموماً همراه با EPDM، که یک نوار آب‌بندی از جنس پلاستیک مصنوعی الاستومتری است، تهیه می‌شوند. این نوارها در یک شیار تعبیه شده نزدیک قوس بیرونی قطعه پیش ساخته، روی تمام سطوحی از قطعات پیش ساخته که در مقابل هم قرار می‌گیرند، نصب می‌شوند. عملکرد این نوار آب‌بندی یکی از موارد مهمی است که مشخص می‌کند آیا پوشش اولیه به طور رضایت بخش در تشکیل یک لایه ضد آب عمل می‌کند یا خیر. نوار آب‌بندی EPDM باید قادر به فراهم کردن یک آب‌بندی کامل باشد، حتی هنگامی که به هم بستن کامل قطعات بتنی پوشش تونل به خاطر تفرانس‌های هنگام تولید و هنگام نصب امکان پذیر نباشد.

^۱ Ethylene diene propylin monomer

مشخصات مهم یک نوار آب‌بند عبارتند از (جروم، ۱۳۸۷):

- قابلیت آب‌بندی موثر تحت فشار هیدروستاتیک حداکثر، همراه با حداکثر جا به جایی مجاز سگمنت.

- توانایی به حداقل رساندن مقدار خزش و اتلاف فشار پس از احداث حلقه پیشروی نوارهای آب‌بندی EPDM که به طور صحیح در جای خود در شیارهای از پیش تعبیه شده قرار گرفته‌اند، سطوح به هم چسبیده هر قطعه پیش ساخته را محصور می‌نمایند، که این فرایند یک عایق بندی ضد آب لاستیک به لاستیک را فراهم می‌کند، به طوریکه قطعات پیش ساخته بدون نیاز به نوارهای آب‌بندی جاذب آب به یکدیگر متصل می‌شوند. برای تونل‌هایی که آب‌بندی در آنها یک نگرانی اصلی است، همانند تونل زاگرس، یک نوار اضافی جاذب آب چسبانده شده به سطح اتصال، در مجاورت EPDM می‌تواند برای فراهم نمودن یک مانع ضد آب اضافی مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۴-۱۲). این نوارهای آب دوست در هنگام مرطوب شدن تا ۴۰۰٪ منبسط می‌شوند (جروم، ۱۳۸۷).



شکل ۴-۱۲ - سگمنت با نوارهای آب‌بندی در هنگام نصب در تونل (جروم، ۱۳۸۷).

آب‌بندی درزه‌های سگمنت، عموماً قبل از عملیات تزریق گراول صورت می‌گیرد.

نکته دیگری که در اینجا باید به آن اشاره کرد، این است که نوارهای EPDM همراه با قطعات پیش ساخته‌ی شش ضلعی قابل استفاده نیستند و تنها می‌توانند برای قطعات پیش ساخته‌ی حلقه‌ای^۱ به کار روند، زیرا دامنه تغییرات خطا در عملیات نصب قطعات پیش ساخته‌ی حلقه‌ای، مقدار بسیار کوچکتري نسبت به نوع شش ضلعی خواهد بود و این امر استفاده از نوارهای آب‌بند را امکان پذیر می‌سازد.

ب) نوارهای منبسط شونده CEMswell

CEMswell یک نوار منبسط شونده است که می‌تواند به طور موفقیت آمیزی جهت آب بندی درزها در تونل‌ها و چاه‌هایی با شرایط فشار بیش از ۵bar استفاده شود. این نوار ترکیبی از پلاستیک بوتیل، رزین هیدروفیلیک، پلی اتیلن، سیلیکون و مخلوط کننده‌های ویژه است. این محصول در ارتباط با آب و تحت شرایط محبوس بودن، قادر است تا ۴ برابر حجمش منبسط شود و به سطوح احاطه کننده‌اش فشار وارد کند. حتی هنگامی که این سطوح زیر، ناهنجار و دارای شکاف هستند. این خصیصه، یک آب‌بندی مناسب را بدون نیاز به اعمال هرگونه نیروی فشاری بالا فراهم می‌کند.

CEMswell در سایزها و شکل‌های استاندارد گوناگونی موجود است و همچنین می‌تواند در شکل‌های غیر استاندارد، متناظر با درخواست مشتری نیز تولید شود. مهم‌ترین سایزهای تولید این محصول:

۱۲ × ۱۹, ۲۰ × ۹, ۲۰ × ۶ (با قطر ۲۳ میلی‌متر می‌باشد).

وزن مخصوص نوار $\frac{g}{cm^3} = 1.45 \pm 0.03$ است و در درجه حرارت‌های ۳۰- تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد

قابل استفاده می‌باشد (www.cemproof.ch).

در شکل ۴-۱۳ نمایی از نوارهای منبسط شونده‌ی CEMswell دیده می‌شود.

^۱ Universal



شکل ۴-۱۳- نمایی از نوارهای منبسط شونده ی CEMswell (www.cemproof.ch).

برای استفاده از این نوارها، نوار باید به شکل مستطیل پهن شود. سائز استاندارد ۶ × ۲۰ در شرایط تونل زاگرس قابل استفاده است.

استفاده از نوارهای CEMswell جهت آببندی درزه های قطعات پیش ساخته، توسط شرکت ایمن سازان مورد بررسی قرار گرفت. طول مورد نیاز آببندی، حدود ۲۷ متر عایق در ازای هر متر طول تونل می باشد که متناظر است با ۱۳۸۱۶۰۰ ریال برای آببندی هر متر طول تونل. (هر متر عایق، ۴۷۱۰۰ ریال هزینه دارد).

به علت هزینه ی بالای عملیات، استفاده از این نوارها ممکن است اقتصادی نباشد.

ب) درزگیر فشاری

درزگیر فشاری درزگیری از نوع تخته چوبی پوشانده شده با قیر است که به سطوح اتصال محیطی چسبانده می شود (شکل ۴-۱۲)، تا از فشار بیش از حد و خرابی سگمنت و نوارهای آب بند، ناشی از بارهای فشاری و بارهای گذرنده از اتصالات مکانیکی جلوگیری نماید.

همچنین درزگیر فشاری به اطمینان از جفت شدگی سطوح اتصالات روبروی هم، در جاییکه سطوح سگمنت دارای نقص بوده و ممکن است تاثیر معکوس بر عملکرد اتصال داشته باشد، کمک می نماید. این

اتصالات باید طوری طراحی شوند که انسداد کامل نوارهای آببند با درزگیر فشاری در محل را امکان پذیر نمایند (جروم، ۱۳۸۷).

۴-۵-۲-۴- اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در داخل تونل

H_2S در صنایع شیمیایی نیز به عنوان یک آلاینده شناخته می‌شود. در فرایندهای تصفیه فاضلاب، یکی از گزینه‌های رایج برای حذف H_2S ، هوادهی داخل آب، برای وارد کردن اکسیژن به داخل آب و انتقال H_2S موجود در آب، به فرم SO_2 به اتمسفر است. این روش در فضاهای سرپوشیده کاربردی نیست. علاوه بر این H_2S می‌تواند به کمک H_2O_2 نیز به SO_2 اکسید شود. همچنین می‌توان با اضافه کردن نمک‌های آهن ($FeSO_4$)، H_2S موجود در آب را ته نشین کرد که محصول واکنش سولفید هیدروژن با این نمک، یک جامد کلوئیدی می‌باشد. در ادامه جزئیات بیشتری در رابطه با تصفیه شیمیایی H_2S آورده شده است.

الف) اکسیداسیون با پراکسید هیدروژن

در هنگام اجرای یک تونل مترو در بوفالوی آمریکا در سال ۱۹۸۰، عملیات با مشکل تصاعد گاز H_2S با غلظت بالای ۷ میلی‌گرم در لیتر آب زهکشی شده‌ی تونل مواجه شد. در آن تونل از پراکسید هیدروژن جهت تصفیه‌ی H_2S موجود در آب استفاده شد (Ball, et al, 1985).

بر اساس محاسبات انجام شده در بخش قبل، غلظت H_2S در آب زیرزمینی منبع در تونل زاگرس را می‌توان ۱۱ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفت. برای تخلیه آب آلوده به محیط، ابتدا آب باید تصفیه شود که این کار می‌تواند از طریق اضافه کردن پراکسید هیدروژن به آب انجام شود. لازم است که این عملیات در داخل تونل انجام شود. پراکسید هیدروژن طبق رابطه ۴-۱۱ با H_2S واکنش می‌دهد:



SO_2 به سرعت با آب واکنش نشان داده و تشکیل اسید سولفوریک می‌دهد، اما غلظت اسید خیلی پایین است.

محصولات واکنش بستگی به pH محیط دارد. در pH قلیایی، یون سولفات SO_4^{2-} تشکیل خواهد شد و در شرایط pH خنثی، با وارد کردن میزان کمتری H_2O_2 ، سولفور عنصری ممکن است تشکیل شود.

برای بدست آوردن میزان H_2O_2 مورد نیاز، یکسری محاسبات در ادامه انجام شده است:

بر اساس نتایج بخش ۴-۳، ۱/۸۵ گرم از H_2S در هر ثانیه در lit/s ۱۷۰ آب وارد تونل خواهد شد. این عدد متناظر خواهد بود با ۰/۰۵۴ مول از H_2S در هر ثانیه. بر اساس رابطه ۴-۱۱، هر مول H_2S به سه مول H_2O_2 نیاز خواهد داشت، بنابراین ۰/۱۶۲ مول از H_2O_2 در هر ثانیه مورد نیاز خواهد بود (معادل با g/s ۵/۵ از H_2O_2 با غلظت ۱۰۰٪).

H_2O_2 با غلظت ۵۰٪ در آب موجود است، بنابراین میزان g/s ۱۱ یا lit/day ۹۵۰ از H_2O_2 مورد نیاز خواهد بود. با قیمت تقریبی ۹۶۶۰ ریال (۰/۹۲ دلار) برای هر لیتر H_2O_2 ، این روش تقریباً ۹۱۷۷۰۰۰ ریال در روز، تنها برای H_2O_2 (بدون در نظر گرفتن هزینه‌ی تجهیزات و سایر هزینه‌ها) هزینه دارد.

(www.h2o2.com)

علاوه بر قیمت تمام شده‌ی بالا، این روش معایب دیگری نیز دارد که در ادامه به آنها اشاره شده است:

- حجم‌های بالا از پراکسید هیدروژن ممکن است در ایران در دسترس نباشد و مشکلات

واردات این ماده نیز باید در نظر گرفته شود

- H_2O_2 آتش‌زاست و بنابراین حضور آن در تونل ناخوشایند خواهد بود.

- حمل و نقل این ماده نیاز به تجربه کافی خواهد داشت، زیرا تماس آن با پوست بدن سبب

سوختگی خواهد شد.

- مدت زمان واکنش ناشناخته است اما حدود ۱ تا ۳۰ دقیقه فرض می‌شود.

در مقابل، مزیت این روش این است که محصولات حاصل، به فرم مایع تشکیل شده و همراه آب شسته می‌شوند و نیاز به تصفیه‌ی بیشتر نخواهد بود.

طرح این سیستم شامل یک مخزن H_2O_2 ، یک جریان سنج و یک حسگر^۱ H_2S است. جریان سنج، میزان ورودی پمپ، که H_2O_2 را از مخزن به داخل لوله آب زیرزمینی تخلیه می‌کند، کنترل می‌کند. واکنش بین H_2O_2 و آب زیرزمینی در داخل مجرای آب داخل تونل اتفاق می‌افتد. سیستم می‌تواند در قسمت پشتیبانی نصب شود و همزمان با TBM حرکت کند.

ب) اکسیداسیون با اکسیژن

تصفیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی از H_2S ، در حال حاضر اغلب با اکسیداسیون با گاز اکسیژن صورت می‌گیرد. اکسیژن طبق رابطه ۴-۱۲ با H_2S واکنش می‌دهد:



دی اکسید گوگرد به سرعت با آب واکنش داده و تولید اسید سولفوریک می‌نماید که غلظت آن خیلی پایین است.

یکسری محاسبات ساده، نتایج زیر را در رابطه با میزان اکسیژن مصرفی ارائه می‌دهد:

با حضور ۰/۰۱۱ گرم از H_2S در هر لیتر از آب زیرزمینی و ۱۷۰ lit/s از آب، ۱۶۰ kg از H_2S در هر روز در تونل وجود خواهد داشت. مصرف اکسیژن با توجه به اطلاعات دریافت شده از شرکت گاز لیند^۲، برابر با $۱/۵$ تا $۲/۵$ کیلوگرم اکسیژن به ازای هر کیلوگرم H_2S است. در نتیجه، میزان اکسیژن مورد نیاز در هر روز، حداکثر ۴۰۰ کیلوگرم است (www.lindeltd.com).

^۲ Sensor

^۳ Linde

قیمت اکسیژن مایع، به شدت به میزان خرید، تعداد دفعات خرید و هزینه حمل و نقل آن بستگی دارد.

این قیمت در اروپای مرکزی برابر با ۰/۱ تا ۰/۵ یورو برای هر کیلو اکسیژن می‌باشد.

با فرض ۶۹۰۰ ریال (۰/۵ یورو) به ازای هر کیلو، هزینه‌ی گاز مصرفی برای تصفیه با اکسیژن حدود

۲۷۶۰۰۰۰ ریال در روز خواهد بود. زمان واکنش ناشناخته است، ولی عموماً کندتر از واکنش H_2O_2 انجام

می‌گیرد. طرح این سیستم، به یک مخزن اکسیژن مایع، مستقر در دهانه ورودی تونل و لوله حاوی

اکسیژن مایع با فشار پایین در طول تونل، که به قسمت پشتیبانی متصل است نیاز دارد.

با توجه به اطلاعات کسب شده از شرکت لیند، تصفیه روباز آب، در کانال آب داخل تونل امکان پذیر

نخواهد بود، زیرا گاز اکسیژن داخل اتمسفر ناپدید می‌شود. عملیات تصفیه یا باید داخل یک مخزن با

حداقل ارتفاع ۵ متر صورت گیرد (که این امر داخل تونل امکان پذیر نخواهد بود)، یا داخل یک لوله بسته

با طول مشخص، تا اینکه اکسیژن نتواند وارد اتمسفر شود. اگر لوله واکنش تحت فشار کار کند، مقدار

بیشتری اکسیژن می‌تواند در آب حل شود و این امر زمان واکنش را تسریع می‌بخشد. همانطور که قبلاً نیز

اشاره شد، آب وارد شده به تونل، می‌تواند توسط یک پمپ جمع آوری شده و در یک سیستم لوله از میان

TBM به پشت قسمت پشتیبانی هدایت شود.

عملیات تصفیه با اکسیژن، می‌تواند همزمان با انتقال آب به انتهای قسمت پشتیبانی در داخل لوله انجام

گیرد. مزیت روش اکسیداسیون با اکسیژن این است که محصولات حاصل به فرم مایع هستند و همراه با

آب شسته شده و نیاز به تصفیه‌ی مجدد وجود ندارد.

پ) ته نشینی سولفید هیدروژن با $FeSO_4$

ته نشینی H_2S با اضافه کردن محلول $FeSO_4$ به آب، یک فرایند رایج برای تصفیه فاضلاب‌ها و سایر

آب‌های آلوده است. واکنش H_2S با $FeSO_4$ به صورت رابطه ۴-۱۳ است:



در این واکنش، FeS به فرم یک جامد کلوئیدی تشکیل می‌شود که داخل آب در جریان در کف تونل معلق می‌شود. بنابراین نیاز خواهد بود که این ماده فیلتر شده و از آب خارج شود و یا اینکه توسط عوامل رسوب دهنده، تصفیه شده و ته نشین شود.

با حضور ۰/۰۱۱ گرم از H_2S در هر لیتر از آب زیرزمینی و ۱۷۰lit/s از آب، ۱۶۰kg از H_2S در هر روز در تونل وجود خواهد داشت. مصرف $FeSO_4$ با توجه به اطلاعات دریافت شده از شرکت کرنوس^۱، محصولی از این شرکت با نام کوئیک فلاک^۲ جهت حذف سولفید هیدروژن از آب به کار می‌رود. میزان مصرف کوئیک فلاک برابر با ۱۰ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم H_2S است. در نتیجه، میزان $FeSO_4$ مورد نیاز در هر روز، ۱۶۰۰ کیلوگرم است. با قیمت تقریبی ۳۸۴۰۰۰ ریال به ازای هر تن، این روش روزانه ۶۱۴۴۰۰ ریال برای $FeSO_4$ هزینه در بر خواهد داشت که این مقدار در مقایسه با هزینه تصفیه با H_2O_2 بسیار کمتر خواهد بود (www.kronosecochem.com).

از مزایای این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- در دسترس بودن $FeSO_4$ به عنوان یک نمک مرطوب در ایران
 - قیمت پایین روش در مقایسه با استفاده از H_2O_2
 - نداشتن مشکل آتش زایی و ایمن بودن نگهداری این ماده در تونل
- در مقابل، نیاز این روش به عملیات تصفیه ثانویه در محل ورودی تونل برای خارج کردن FeS ، از معایب بزرگ این روش به شمار می‌رود.
- طرح این سیستم به صورت زیر است:

^۱ Kronos

^۲ Quickflok

یک مخزن نمک $FeSO_4$ ، در دهانه ورودی تونل تعبیه می‌شود که در آنجا نمک جامد تبدیل به محلول می‌شود. سپس این محلول توسط یک مخزن به داخل تونل منتقل می‌شود. یک جریان سنج، میزان ورودی پمپ، که $FeSO_4$ را از مخزن به داخل لوله حاوی آب زیرزمینی تخلیه می‌کند را کنترل می‌کند. واکنش در مجرای آب داخل تونل اتفاق می‌افتد. سیستم می‌تواند در قسمت پشتیبانی نصب شود و همزمان با TBM حرکت کند.

۴-۵-۲-۶- استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S

استفاده از فیلترها، سبب حذف مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلاینده‌ی هوای محیط شده، که این فرایند کمک فراوانی به سیستم تهویه، جهت کاهش جریان هوای ارسالی به داخل تونل می‌کند. در شرایط تونل زاگرس، با توجه به تصاعد گاز H_2S ، استفاده از فیلترهای کربن فعال، می‌تواند گزینه‌ی مناسبی جهت جذب H_2S موجود در اتمسفر تونل باشد و بدین ترتیب غلظت H_2S متصاعد شده در محدوده‌ی TBM تا حد مجاز کاهش خواهد یافت.

کربن فعال SOLCARB KS3، تولید کمپانی CHEMVIRON، یک کربن فعال دانه‌ای تلقیح شده با بازدهی بالا است، که به طور خاص برای جذب و محبوس کردن سولفید هیدروژن، مرکاپتن و تعدادی سولفید آلی از جریان هوا یا گاز طبیعی در حضور اکسیژن طراحی شده است.

از مزایای این محصول می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (www.chemvironcarbon.com).

- دانه بندی با حدود اندازه‌ی ۳mm، که سبب افت فشار کمتر و انرژی مورد نیاز کمتر در مقایسه با سایر محصولات دانه‌ای متداول می‌شود.
- داشتن چگالی بالا همراه با قدرت جذب زیاد، که سبب می‌شود تعداد دفعات تعویض کمتری در نظر گرفته شود.
- واکنش‌های جذب پیشرفته که سبب ماکزیمم بهره برداری از بستر کربن خواهد شد.

- داشتن سختی بالا، که مقاومتی عالی را در برابر تنش‌های مکانیکی یا حرارتی فراهم می‌کند و همچنین سبب تولید گرد و غبار کمتر می‌شود.
 - عملکرد موثر در شرایط رطوبت بسیار بالا و پایین.
 - میزان جذب بسیار بالا.
- مشخصات این مدل کربن فعال در جدول ۴-۶ آورده شده است:

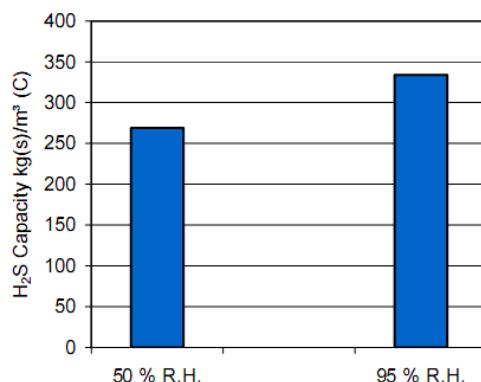
جدول ۴-۶- مشخصات کربن فعال مدل KS3 (www.chemviron carbon.com).

مشخصه	میزان
قطر متوسط دانه‌ها	۲/۷ تا ۳/۳ میلی‌متر
سختی (حداقل)	۹۰
چگالی بستر	600 kg/m^3
طول دانه‌ها	۷mm
درجه حرارت اشتعال (حداقل)	۲۶۰°C
شاخص گرد و غبار (حداکثر)	۵

پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده برای فیلترهای KS3، جهت حذف H_2S از جریان هوا به شرح زیر است [۴۵]:

زمان تماس با بستر	۲ تا ۵ ثانیه
عمق بستر	۰/۰۲ تا ۳ متر
سرعت خطی	بیشتر از ۰/۴ متر بر ثانیه

ظرفیت جذب H_2S این محصول در رطوبت‌های نسبی متفاوت در درجه حرارت ۲۰°C و فشار اتمسفر مطابق نمودار شکل ۴-۱۴ است:



شکل ۴-۱۴- میزان جذب H_2S توسط کربن KS3، در رطوبت‌های مختلف (www.chemviron carbon.com).

همانطور که مشاهده می‌شود، میزان جذب H_2S در رطوبت نسبی ۵۰٪، حدود $270 \frac{kg.s(H_2S)}{m^3(A.C)}$ است.

در شرایط تونل زاگرس، میزان گاز محلول در آب (که با دبی ۱۷۰ لیتر در ثانیه وارد تونل می‌شود)، برابر

با ۱۱ میلی گرم در لیتر است. در نتیجه نرخ تصاعد H_2S برابر است با:

$$\frac{de}{dt} = 170 \text{ lit/s} \times 11 \text{ mg/lit} = 1870 \text{ mg/s}$$

بر اساس اندازه گیری ها غلظت گاز H_2S در هوا، ۵۰ ppm است. از آنجا که غلظت مجاز H_2S بر اساس

استاندارد امریکا ۲۰ ppm است، هدف از استفاده از جاذب در اینجا، کاهش غلظت H_2S موجود در هوا از

۵۰ ppm به ۲۰ ppm است. با فرض یک رابطه خطی بین میزان غلظت و نرخ تصاعد، نرخ تصاعد H_2S در

غلظت ۲۰ ppm، 750 mg/s است. بنابراین باید میزان 1120 mg/s گاز H_2S توسط جاذب جذب شود.

با توجه به نمودار شکل ۴-۱۴، هر متر مکعب از کربن فعال KS3، در هر ثانیه ۲۷۰ کیلوگرم H_2S جذب

می‌کند، بنابراین حجم کربن فعال مورد نیاز (V) برای جذب 1120 mg/s از H_2S برابر خواهد بود با:

$$v = \frac{1.120 \times 10^{-3} \text{ kg}}{270 \text{ kg.s}} = 0.004148 \times 10^{-3} \text{ m}^3.s(A.C)$$

در هر ثانیه به 0.004148×10^{-3} متر مکعب کربن فعال در تونل نیاز است. از آنجا که چگالی این

محصول 600 kg/m^3 است، میزان کربن فعال مورد نیاز (m) برای جذب این مقدار H_2S برابر خواهد بود با:

$$m = 600 \times 0.004148 \times 10^{-3} = 0.002488 \text{ kg(A.C).S}$$

$$0.002488 \times 24 \times 3600 = 215 \text{ kg/day}$$

بنابراین، روزانه به ۲۱۵ کیلوگرم کربن فعال KS3، جهت ترفیق H_2S متصاعد شده در فضای تونل زاگرس نیاز است.

از آنجا که این محصول در بسته‌های ۲۵ کیلوگرمی تهیه و توزیع می‌شود، می‌توان روزانه ۹ بسته از این جاذب را در نقاط بحرانی از تونل (در محل TBM و قسمت پشتیبانی)، که در آن نقاط احتمال ورود آب به تونل و در نتیجه تصاعد گاز H_2S بیشتر است، قرار داد. آرایش پیشنهاد شده جهت قرارگیری این بسته‌های جاذب، به این شرح است:

۴ بسته جاذب در موقعیت ۶-ch، در محل سپر

۲ بسته جاذب در موقعیت ۱۲-ch، در محل نصب سگمنت

۲ بسته جاذب در موقعیت ۳۰-ch، در محل ریل گذاری

۱ بسته جاذب در موقعیت ۴۲-ch، در محل کابین اپراتور

از مزایای استفاده از این محصول می‌توان به این موارد اشاره کرد:

➤ استفاده از این جاذب نیاز به طراحی سیستم فیلتر ندارد و می‌تواند مستقیماً در فضای تونل قرار

گرفته و عملیات جذب را انجام دهد.

➤ عملیات تصفیه با این جاذب‌ها، هیچ گونه محصول ثانویه‌ای که نیاز به تصفیه مجدد داشته باشد،

تولید نمی‌کند.

➤ این محصول، برخلاف اکثر کربن‌های فعال تجاری موجود، نیاز به بازیابی مجدد ندارد و عدم نیاز

به برقراری یک واحد بازیابی در بیرون تونل و هزینه‌های مربوط به آن، از مزایای مهم این

محصول به شمار می‌رود.

در مقابل، هزینه‌ی بالای این جاذب، در دسترس نبودن آن در ایران و مشکلات مربوط به وارد کردن آن، از معایب عمده‌ی استفاده از این محصول به شمار می‌رود.

۴-۶- جمع بندی

در این فصل در ابتدا موقعیت تونل زاگرس قطعه یک (الف) بیان شد و منشا H_2S متصاعد شده در اتمسفر تونل در هنگام حفاری مورد بررسی قرار گرفت. غلظت H_2S موجود در آب زهکشی شده، تحت شرایط موازنه با هوا و همچنین در آب ورودی به تونل محاسبه گردید. در ادامه تدابیر لازم برای گذر از بحران تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس به دو دسته تقسیم شد. دسته اول، تدابیر کوتاه مدتی بودند که اجرای آنها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی آن خواهد شد.

این دسته تدابیر، روش‌هایی نظیر تقویت سیستم تهویه، حفاظت کابین‌های الکتریکی، استفاده از تجهیزات حفاظت شخصی و ... را شامل می‌شوند که لازم است تمامی این روش‌ها در کوتاهترین زمان ممکن اجرا شوند تا تاخیرها و خسارات وارد بر پروژه تا آنجا که ممکن است کاهش یابد.

دسته دوم روش‌های ذکر شده، تدابیر بلند مدتی هستند که اجرای آنها سبب کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالتبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر تونل و یا تصفیه گاز وارد شده به آن می‌شود.

این تدابیر شامل روش‌هایی نظیر زهکشی در کل تونل، زهکشی از سطح، تزریق، استفاده از فیلتر کربن فعال و ... هستند که در این فصل به طور کامل تشریح شده‌اند. تصمیم‌گیری منطقی به منظور انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها می‌تواند بر اساس تخمین هزینه‌ی روش‌ها، شرایط اجرایی، بازدهی، سرعت آنها و ... صورت گیرد که این امر نیاز به بررسی دقیق این روش‌ها و استفاده از یک ابزار تصمیم‌گیری مناسب دارد که در فصل بعد مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل پنجم

انتخاب روش بهینه برای رفع مشکل

تصادد گاز H_2S در تونل زاگرس

۵-۱- مقدمه

دنیای اطراف ما مملو از مسائل چند معیاره است و انسان‌ها همیشه مجبور به تصمیم‌گیری در این زمینه‌ها هستند. در زندگی روزمره مثال‌های فراوانی از تصمیم‌گیری با معیارهای چند گانه^۱ وجود دارد. در بعضی موارد نتیجه تصمیم‌گیری به حدی مهم است که بروز خطا ممکن است ضررهای جبران‌ناپذیری را بر ما تحمیل کند. از اینرو لازم است که تکنیک یا تکنیک‌های مناسبی برای انتخاب بهینه و تصمیم‌گیری صحیح طراحی شود. یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۲ (AHP) است که برای اولین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. این تکنیک بر اساس مقایسه زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد (قدسی پور، ۱۳۸۱).

در فصل قبل، روش‌هایی برای کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالطبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر و یا تصفیه گاز وارد شده به تونل ارائه شد، که این تدابیر در جهت بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد. همچنین ذکر شد که تصمیم‌گیری منطقی به منظور انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها، می‌تواند بر اساس تخمین هزینه‌ها، شرایط اجرایی روش، میزان بازدهی روش، سرعت اجرای هر روش و یکسری پارامترهای دیگر صورت گیرد، که این امر نیاز به بررسی دقیق این روش‌ها دارد.

در این فصل، با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مناسب‌ترین روش جهت حل مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس انتخاب شده است.

^۱ Multicriteria decision making

^۲ Analytical Hierarchy Process

۵-۲- فرایند تحلیل سلسله مراتبی

این روش بر اساس تحلیل مغز انسان برای مسائل پیچیده ارائه شده است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی توسط محقق به نام توماس - ل - ساعتی در سال ۱۹۸۰ ارائه شد، به طوری که کاربردهای متعددی از آن زمان تاکنون برای این روش مورد بحث قرار گرفته است (اصغر پور، ۱۳۸۷).

AHP و کاربرد آن بر سه اصل زیر استوار است:

- برپایی یک ساختار و قالب رده‌ای برای مسئله
- برقراری ترجیحات از طریق مقایسه زوجی
- برقراری سازگاری منطقی از اندازه‌گیری‌ها

۵-۳- مراحل محاسبه وزن در روش تحلیل سلسله مراتبی

برای بدست آوردن گزینه مناسب در روش تحلیل سلسله مراتبی باید مراحل زیر را به ترتیب انجام داد:

- ساختن سلسله مراتب
- محاسبه وزن
- سازگاری سیستم

۵-۳-۱- ساختن سلسله مراتب

اولین قدم در فرایند تحلیل سلسله مراتبی ایجاد یک نمایش گرافیکی از مساله می‌باشد که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. سطح یک در سلسله مراتبی هدف را نشان می‌دهد. در سطح دوم معیارهای مساله مطرح شده و در سطح آخر، گزینه‌ها نشان داده شده‌اند (قدسی پور، ۱۳۸۱).

۵-۳-۲- محاسبه وزن

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوطه خود سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و وزن آنها محاسبه می‌گردد. که این وزن‌ها را وزن نسبی می‌نامیم. سپس با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن‌های نهایی هر گزینه مشخص می‌گردد که آنرا وزن مطلق می‌نامیم.

کلیه مقایسات در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به صورت زوجی انجام می‌گیرد.

در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند کرد، به گونه‌ای که اگر عنصر i با عنصر j مقایسه شود تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت i بر j یکی از حالات زیر است:

- کاملاً مرجح یا کاملاً مطلوبتر

- ترجیح یا مطلوبیت خیلی قوی

- ترجیح یا مطلوبیت قوی

- کمی مرجح یا کمی مطلوبتر

- اهمیت یا مطلوبیت یکسان

این قضاوت‌ها توسط ساعتی به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شده‌اند که در جدول (۵-۱) مشخص گردیده‌اند (Saati, 2000).

جدول ۵-۱- مقادیر ترجیحات برای مقایسات زوجی (Saati, 2000).

مقدار عددی	مطلوبیت
۹	کاملاً مرجح یا کاملاً مطلوبتر
۷	ترجیح یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	ترجیح یا مطلوبیت قوی
۳	-کمی مرجح یا کمی مطلوبتر
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۲ و ۴ و ۶ و ۸	ترجيحات بين فواصل

در نهایت بر اساس قضاوت‌های انجام گرفته، ماتریس تصمیم‌گیری مساله تشکیل می‌شود. در این ماتریس هرگزینه نسبت به هر معیار مشخص شده است.

۵-۳-۱- روش‌های محاسبه وزن‌های نسبی

همانطور که قبلاً گفته شد در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی ابتدا عناصر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌گردد. سپس با استفاده از این ماتریس وزن نسبی عناصر محاسبه می‌گردد. به طور کلی یک ماتریس مقایسه‌ی زوجی به صورت زیر نشان داده شده که در آن a_{ij} ترجیح عنصر i ام نسبت به عنصر j ام است. حال با مشخص بودن a_{ij} ها وزن عناصر w_i ها به دست می‌آید (قدسی پور، ۱۳۸۱).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

چنانچه یک ماتریس سازگار باشد محاسبه وزن ساده بوده و با استفاده از نرمالایز کردن تک تک ستون‌ها به دست می‌آید اما در حالتی که ماتریس ناسازگار باشد محاسبه وزن ساده نمی‌باشد.

جهت محاسبه وزن هر گزینه از ماتریس مقایسه زوجی (وزن نسبی) چندین روش پیشنهاد شده است که اهم آنها عبارتند از:

-روش حداقل مربعات معمولی

-روش حداقل مربعات لگاریتمی

-روش بردار ویژه

-روش‌های تقریبی (مشمول بر روش‌های مجموع سطری، مجموع ستونی، میانگین حسابی و میانگین هندسی) (Saati, 1980).

از آنجایی که در این مطالعه از روش میانگین هندسی برای وزن دهی استفاده شده، این روش در ادامه شرح داده شده است.

روش میانگین هندسی: در این روش میانگین هندسی عناصر هر سطر از رابطه ۵-۱ محاسبه شده و سپس بردار حاصل نرمالایز می شود تا بردار وزن به دست آید.

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$$

$$g.m = \sqrt[n]{a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n} \quad (۱-۵)$$

۵-۳-۲- محاسبه وزن نهایی

وزن نهایی هر گزینه در یک فرآیند سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن گزینه‌ها به دست می‌آید (Saati, 1980).

۵-۳-۳- سازگاری سیستم

یکی از مزایای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کنترل سازگاری تصمیم است که به عبارت دیگر همواره در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌توان سازگاری تصمیم را محاسبه نمود و نسبت به خوب و بد بودن و یا قابل قبول و مردود بودن آن قضاوت کرد.

یک ماتریس ممکن است سازگار و یا ناسازگار باشد. در ماتریس سازگار، محاسبه وزن ساده بوده و با استفاده از نرمالایز کردن تک تک ستون‌ها به دست می‌آید. در حالی که برای محاسبه وزن در ماتریس‌های ناسازگار چندین روش ذکر گردید. علاوه بر محاسبه وزن در ماتریس‌های ناسازگار که قبلاً مورد بحث واقع شد، محاسبه مقدار ناسازگاری نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در حالت کلی می‌توان گفت که میزان قابل قبول ناسازگاری یک ماتریس یا سیستم بستگی به تصمیم گیرنده دارد. اما ساعتی عدد ۰/۱ را به

عنوان حد قابل قبول ارائه می‌نماید و معتقد است چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد، بهتر است در قضاوت‌ها تجدیدنظر گردد (Saati, 1980).

ساعتی شاخص ناسازگاری (I.I) را به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$I.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (2-5)$$

که در این رابطه:

n: بعد ماتریس و

$\lambda_{\max}$ بزرگترین مقدار ویژه‌ی ماتریس است که مقدار آن از رابطه ۳-۵ بدست می‌آید:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \times w_j}{w_i} \right\} \quad (3-5)$$

a_{ij} : یک عنصر از ماتریس مقایسه زوجی

w_i و w_j : ژامین و ژامین عنصر از مقادیر ویژه

(قضیه: بزرگترین مقدار ویژه ($\lambda_{\max}$) همواره بزرگتر یا مساوی n است و در صورتی که مقدار آن کمتر از

n بدست آید، برابر با n در نظر گرفته می‌شود).

مقادیر شاخص ناسازگاری (I.I) را برای ماتریس‌هایی که اعداد آن‌ها کاملاً تصادفی اختیار شده باشند

محاسبه کرده‌اند و آنرا شاخص ناسازگاری تصادفی ماتریس (I.I.R)^۱ نام نهاده‌اند که مقادیر آن‌ها برای

ماتریس‌های n بعدی مطابق جدول ۲-۵ است.

جدول ۲-۵- شاخص ناسازگاری تصادفی ماتریس (Saati, 1980).

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
I.I.R	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۵

^۱ Inconsistency Index Random

برای هر ماتریس حاصل تقسیم شاخص ناسازگاری (I.I) بر شاخص ناسازگاری تصادفی ماتریس (I.I.R) هم بعدش معیار مناسبی برای قضاوت در مورد ناسازگاری می باشد که آن را نرخ ناسازگاری (I.R)^۱ نامیده اند:

$$IR = \frac{I.I}{I.I.R} \quad (3-5)$$

چنانچه این عدد کوچکتر یا مساوی ۰/۱ باشد سازگاری سیستم قابل قبول است و گرنه باید در قضاوتها تجدید نظر نمود (Saati, 1980).

۴-۵- انتخاب روش بهینه جهت رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس

در این بخش، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی مناسبترین روش جهت رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس انتخاب شده است. در اولین قدم، گزینه های ممکن، معیارهای مرتبط با این گزینه ها و نمایش گرافیکی صورت مساله آورده شده است. روش های بررسی شده در جدول ۳-۵ آورده شده اند.

جدول ۳-۵- گزینه های در نظر گرفته شده برای رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس

گزینه	شرح
A	زهکشی در کل تونل با سیستم لوله
B	زهکشی از سطح
C	پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه در پشت TBM
D	آب بندی درزه های قطعات پیش ساخته
E	اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در داخل تونل
F	استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S

¹ Inconsistency Rate

بر اساس روش‌های ذکر شده، یک سری معیار C_i در نظر گرفته شده‌اند که هر یک از این روش‌ها، در مراحل بعد نسبت به این معیارها سنجیده شده‌اند. معیارهای در نظر گرفته شده در جدول ۴-۵ آورده شده‌اند:

جدول ۴-۵- معیارهای در نظر گرفته شده برای انتخاب بهترین روش

معیار	شرح
C_1	هزینه ^۱
C_2	زمان ^۲
C_3	اجرایی بودن ^۳
C_4	بازدهی ^۴
C_5	انعطاف پذیری ^۵
C_6	شرایط زیست محیطی ^۶

گام‌های روش تحلیل سلسله مراتبی به شرح زیر است:

گام اول: رسم نمودار سلسله مراتبی

در شکل ۱-۵ یک نمایش گرافیکی از صورت مساله آورده شده است:

¹ Cost

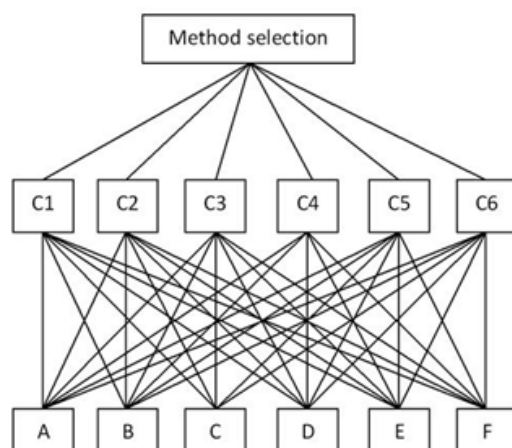
² Time

³ Applicability

⁴ Efficiency

⁵ Felexibility

⁶ Environmental condition



شکل ۵-۱- نمایش گرافیکی برای انتخاب روش بهینه

گام دوم: تشکیل ماتریس تصمیم گیری

نظر سنجی جهت انتخاب مناسب‌ترین روش، با تحویل فرم پرسش نامه به ۸ متخصص و استخراج نظرات آنها صورت گرفته است و در نهایت ماتریس تصمیم گیری مساله تعریف شده است. (جدول ۵-۵) در این ماتریس امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار آورده شده است. (نمونه‌ای از فرم پرسش نامه در پیوست ضمیمه شده است).

جدول ۵-۵- ماتریس تصمیم گیری

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A	۴۳	۴۲	۴۷	۴۴	۵۱	۳۳
B	۲۷	۳۴	۲۸	۳۳	۶۵	۲۱
C	۴۴	۴۲	۴۴	۴۵	۲۰	۵۱
D	۴۴	۴۰	۳۷	۴۴	۴۵	۵۱
E	۴۰	۴۰	۳۶	۳۷	۴۶	۳۸
F	۴۴	۴۵	۴۲	۴۰	۵۰	۴۵

گام سوم: تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی

در ابتدا معیارهایی که انتخاب روش مناسب را تحت تاثیر قرار می‌دهند با یکدیگر مقایسه‌ی زوجی شده‌اند و نتایج در جدول ۵-۶ آورده شده است.

وزن هر گزینه از روش میانگین هندسی محاسبه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود معیار هزینه (C_1) بیشترین وزن را بدست آورده است.

جدول ۵-۶- مقایسه‌ی زوجی معیارها نسبت به هدف اصلی

وزن	میانگین هندسی	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
۰/۲۲۲	۱/۳۷۹	۲/۲۳۱	۱/۵۴۷	۱/۲۵	۱/۱۸۱	۱/۳	۱
۰/۱۶۹	۱/۰۴۸	۱/۷۸۵	۱/۱۱۱	۰/۹۶۱	۰/۹۰۹	۱	۰/۷۶۹
۰/۱۸۶	۱/۱۵۳	۱/۹۶۴	۱/۲۲۲	۱/۰۵۷	۱	۱/۱	۰/۸۴۶
۰/۱۷۶	۱/۰۹	۱/۸۷۵	۱/۱۵۵	۱	۰/۹۴۵	۱/۰۴	۰/۸
۰/۱۵۲	۰/۹۴۴	۱/۶۰۷	۱	۰/۸۶۵	۰/۸۱۸	۰/۹	۰/۶۹۲
۰/۰۹۴	۰/۵۸۷	۱	۰/۶۲۲	۰/۵۳۸	۰/۵۰۹	۰/۵۶	۰/۴۳
$\lambda_{max}=6/0.119$ $I.I.=0.0239$ $I.I.R.=1/24$ $I.R.=0.019$							

در مرحله‌ی بعد، روش‌های مختلف نسبت به هر معیار، دو به دو با هم مقایسه شده و ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی تشکیل شده‌اند. جهت محاسبه‌ی وزن هر گزینه از ماتریس مقایسه زوجی (وزن نسبی)، از روش میانگین هندسی استفاده شده است.

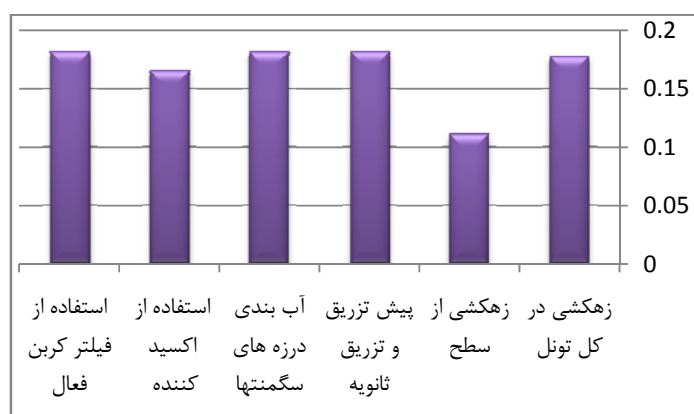
گام چهارم: محاسبه نرخ ناسازگاری

برای محاسبه نرخ ناسازگاری، مقدار λ_{max} از معادله ۳-۵ محاسبه گردیده و سپس مقدار شاخص ناسازگاری (I.I) برای هر ماتریس از رابطه ۵-۲ محاسبه شده است. از آنجا که مقدار شاخص ناسازگاری در تمام ماتریس‌ها صفر است، میزان نرخ ناسازگاری (I.R) در تمام ماتریس‌ها بر اساس رابطه ۵-۴ برابر با صفر بدست می‌آید و این نشان دهنده‌ی این است که سازگاری سیستم قابل قبول است و قضاوت‌ها درست انجام شده است.

جدول‌های ۵-۷ تا ۵-۱۲ ماتریس‌های مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیارهای مختلف را نشان می‌دهند. همچنین در اشکال ۲-۵ تا ۲-۷ امتیاز گزینه‌ها نسبت به معیارهای مختلف مشخص شده است.

جدول ۵-۷- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار هزینه و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۱/۵۹۲	۰/۹۷۷	۰/۹۷۷	۱/۰۷۵	۰/۹۷۷	۱/۰۸۱۰	۰/۱۷۷۷
B	۰/۶۲۷	۱	۰/۶۱۳	۰/۶۱۳	۰/۶۷۵	۰/۶۱۳	۰/۶۷۷۸	۰/۱۱۱۴
C	۱/۰۲۳	۱/۶۲۹	۱	۱	۱/۱	۱	۱/۱۰۶۰	۰/۱۸۱۸
D	۱/۰۲۳	۱/۶۲۹	۱	۱	۱/۱	۱	۱/۱۰۵۸	۰/۱۸۱۸
E	۰/۹۳	۱/۴۸۱	۰/۹۰۹	۰/۹۰۹	۱	۰/۹۰۹	۱/۰۰۵۵	۰/۱۶۵۳
F	۱/۰۲۳	۱/۶۲۹	۱	۱	۱/۱	۱	۱/۱۰۵۹	۰/۱۸۱۸
$\lambda_{max}=5/9985$	I.I = ۰	I.I.R = ۱/۲۴	IR = ۰					

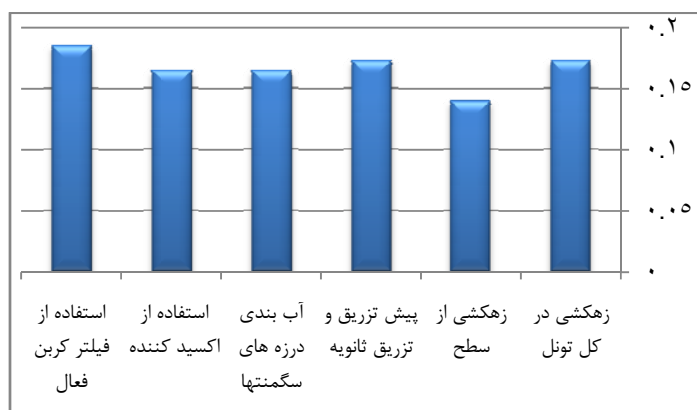


شکل ۵-۲- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار هزینه

همانطور که ملاحظه می‌شود گزینه‌های استفاده از فیلتر کربن فعال، تزریق و آب بندی درزه‌های قطعات پیش ساخته از لحاظ معیار هزینه بالاترین امتیاز را کسب کرده‌اند.

جدول ۵-۸- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار زمان و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۱/۲۳۵	۱	۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۹۳۳	۱/۰۴۰۶	۰/۱۷۲۸
B	۰/۸۰۹	۱	۰/۸۰۹	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۷۵۵	۰/۸۴۲۲	۰/۱۳۹۹
C	۱	۱/۲۳۲	۱	۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۹۳۳	۱/۰۴۰۲	۰/۱۷۲۸
D	۰/۹۵۲	۱/۱۷۶	۰/۹۵۲	۱	۱	۰/۸۸۸	۰/۹۹۰۷	۰/۱۶۴۵
E	۰/۹۵۲	۱/۱۷۶	۰/۹۵۲	۱	۱	۰/۸۸۸	۰/۹۹۰۷	۰/۱۶۴۵
F	۱/۰۷۱	۱/۳۲۳	۱/۰۷۱	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	۱	۱/۱۱۴۸	۰/۱۸۵۲
$\lambda_{max}=5/9981$	I.I.=۰	I.I.R= ۱/۲۴	IR=۰					

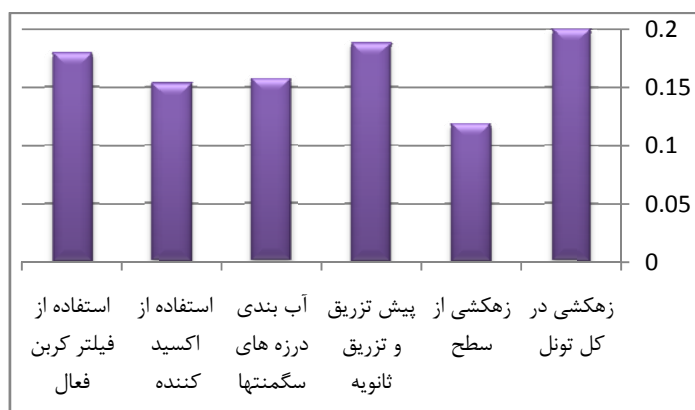


شکل ۵-۳- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار زمان

گزینه‌ی استفاده از فیلتر کربن فعال از لحاظ معیار زمان بالاترین امتیاز را کسب کرده است. گزینه‌ی زهکشی در کل تونل الویت بعدی را دارد.

جدول ۵-۹- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار اجرایی بودن و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۱/۶۷۸	۱/۰۶۸	۱/۲۷	۱/۳۰۵	۱/۱۱۹	۱/۲۲۱۵	۰/۲۰۰۹
B	۰/۵۹۵	۱	۰/۶۳۶	۰/۷۵۶	۰/۷۷۷	۰/۶۶۶	۰/۷۲۷۲	۰/۱۱۹۶
C	۰/۹۳۶	۱/۵۷۱	۱	۱/۱۸۹	۱/۲۲۲	۱/۰۷۴	۱/۱۴۳۵	۰/۱۸۸۰
D	۰/۷۸۷	۱/۳۲۱	۰/۸۴۰	۱	۱/۰۲۷	۰/۸۸	۰/۹۶۱۲	۰/۱۵۸۰
E	۰/۷۶۵	۱/۲۸۵	۰/۸۱۸	۰/۹۷۲	۱	۰/۸۵۷	۰/۹۳۵۲	۰/۱۵۳۸
F	۰/۸۹۳	۱/۵	۰/۹۵۴	۱/۱۳۵	۱/۱۶۶	۱	۱/۰۹۱۵	۰/۱۷۹۵
$\lambda_{max}=6/0016$	I.I =0/0032	I.I.R =1/24	IR=0/0025					

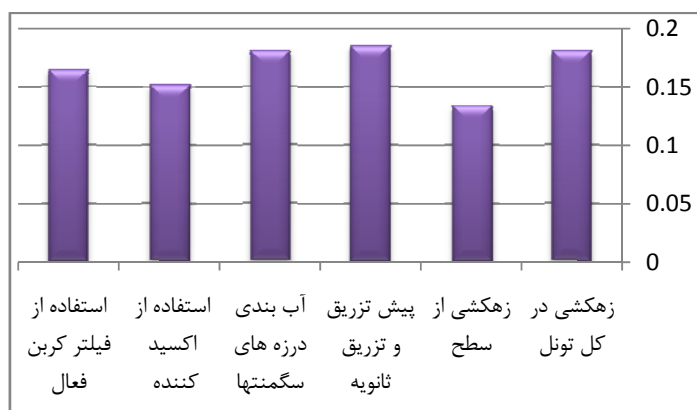


شکل ۵-۴- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار اجرایی بودن

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود گزینه‌ی زهکشی در کل تونل از لحاظ معیار اجرایی بودن بالاترین امتیاز را کسب کرده است. گزینه‌ی تزریق الویت بعدی را دارد.

جدول ۵-۱۰- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار بازدهی و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۱/۳۳۳	۰/۹۷۷	۱	۱/۱۸۹	۱/۱	۱/۰۹۲۸	۰/۱۸۱۳
B	۰/۷۰۵	۱	۰/۷۳۳	۰/۷۵	۰/۸۹۱	۰/۸۲۵	۰/۸۱۱۱	۰/۱۳۴۶
C	۱/۰۲۲	۱/۳۶۳	۱	۱/۰۲۲	۱/۲۱۶	۱/۲۱۶	۱/۱۱۷۴	۰/۱۸۵۴
D	۱	۱/۳۳۳	۰/۹۷۷	۱	۱/۱۸۹	۱/۱	۱/۰۹۲۸	۰/۱۸۱۳
E	۰/۸۴	۱/۱۲۱	۰/۸۲۲	۰/۸۴	۱	۰/۹۲۵	۰/۹۱۸۷	۰/۱۵۲۴
F	۰/۹۰۹	۱/۲۱۲	۰/۸۸۸	۰/۹۰۹	۱/۰۸۱	۱	۰/۹۹۳۴	۰/۱۶۴۸
$\lambda_{max}=5/9883$	I.I = ۰	I.I.R = ۱/۲۴	IR = ۰					

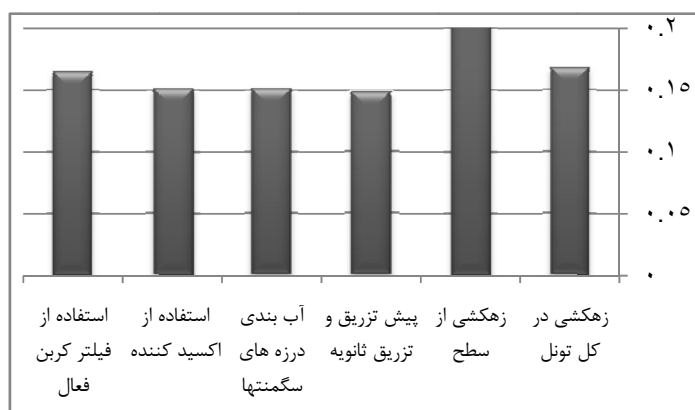


شکل ۵-۵- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار بازدهی

همانطور که ملاحظه می‌شود، از لحاظ معیار بازدهی گزینه‌ی تزریق بالاترین امتیاز را کسب کرده است.

جدول ۵-۱۱- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار انعطاف پذیری و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۰/۷۸۵	۱/۱۳۳	۱/۱۰۸	۱/۱۰۸	۱/۰۲	۱/۰۱۷۸	۰/۱۶۸۳
B	۱/۲۷۴	۱	۱/۴۴۴	۱/۴۱۳	۱/۴۱۳	۱/۳	۱/۲۹۷۶	۰/۲۱۴۵
C	۰/۸۸۲	۰/۶۹۲	۱	۰/۹۷۸	۰/۹۷۸	۰/۹	۰/۸۹۸۲	۰/۱۴۸۵
D	۰/۹۰۱	۰/۷۰۷	۱/۰۲۲	۱	۱	۰/۹۲	۰/۹۱۸۱	۰/۱۵۱۸
E	۰/۹۰۱	۰/۷۰۷	۱/۰۲۲	۱	۱	۰/۹۲	۰/۹۱۸۱	۰/۱۵۱۸
F	۰/۹۸	۰/۷۶۹	۱/۱۱۱	۱/۰۸۶	۱/۰۸۶	۱	۰/۹۹۷۹	۰/۱۶۴۹
$\lambda_{max}=5/9980$	I.I = ۰	I.I.R = ۱/۲۴	IR = ۰					

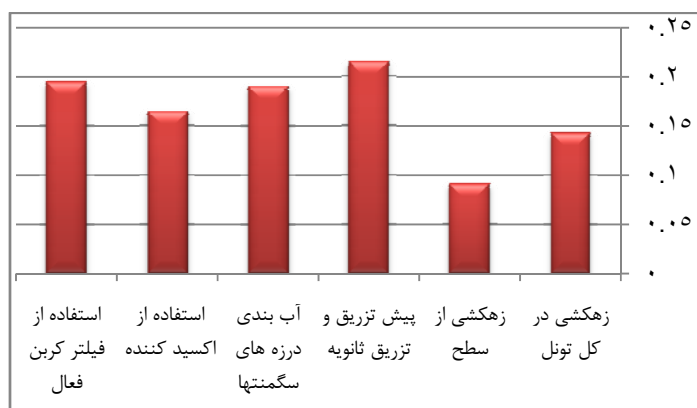


شکل ۵-۶- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار انعطاف پذیری

از نمودار آشکار است که گزینه‌ی زهکشی از سطح از لحاظ انعطاف پذیری بالاترین امتیاز را کسب کرده است. گزینه‌ی زهکشی در کل تونل الویت بعدی را دارد.

جدول ۵-۱۲- ماتریس مقایسه زوجی بین معیار زیست محیطی و گزینه‌ها

	A	B	C	D	E	F	میانگین هندسی	وزن
A	۱	۱/۵۷۱	۰/۶۴۷	۰/۷۵	۰/۸۶۶	۰/۷۳۳	۰/۸۸۵	۰/۱۴۲۹
B	۰/۶۳۶	۱	۰/۴۱۱	۰/۴۷۷	۰/۵۵۲	۰/۴۶۶	۰/۵۶۳	۰/۰۹۰۹
C	۱/۵۴۵	۲/۴۲۸	۱	۱/۱۵۹	۱/۱۴۲	۱/۳۳۳	۱/۳۳۳	۰/۲۱۵۳
D	۱/۳۳۳	۲/۰۹۵	۰/۸۶۲	۱	۱/۱۵۷	۰/۹۷۷	۱/۱۸۱	۰/۱۹۰۷
E	۱/۱۵۱	۱/۸۰۹	۰/۷۴۵	۰/۸۶۳	۱	۰/۸۴۴	۱/۰۲	۰/۱۶۴۷
F	۱/۳۶۳	۲/۱۴۲	۰/۸۸۲	۱/۰۲۲	۱/۱۸۴	۱	۱/۲۰۸	۰/۱۹۵۱
$\lambda_{max}=5/9721$	I.I = ۰	I.I.R = ۱/۲۴	IR = ۰					



شکل ۵-۷- امتیاز گزینه‌های مختلف نسبت به معیار زیست محیطی

همانطور که ملاحظه می‌شود گزینه‌ی پیش تزریق از سطح از لحاظ زیست محیطی بالاترین امتیاز را کسب کرده است. گزینه‌ی استفاده از فیلتر کربن فعال الویت بعدی را دارد.

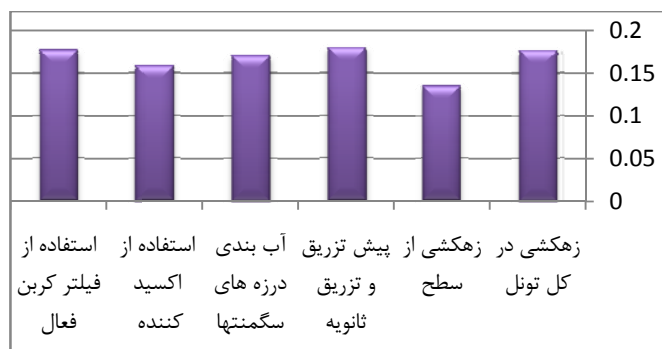
گام پنجم: محاسبه وزن نهایی

وزن نهایی هر گزینه در فرآیند سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب وزن معیارها در وزن گزینه‌ها نسبت هر معیار به دست می‌آید. در جدول ۵-۱۳ وزن گزینه‌ها نسبت به هر معیار، وزن معیارها و نتیجه نهایی آورده شده است. برای مثال امتیاز نهایی گزینه‌ی A به صورت زیر محاسبه شده است:

$$(0/222 \times 0/177) + (0/169 \times 0/176) + (0/186 \times 0/209) + (0/176 \times 0/187) + (0/152 \times 0/183) + (0/094 \times 0/143) = 0/1843$$

جدول ۵-۱۳ - نتایج نهایی

نتیجه نهایی	وزن معیار	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
A	۰/۲۲۲	۰/۱۴۲۹	۰/۱۶۸۳	۰/۱۸۱۳	۰/۲۰۰۹	۰/۱۷۲۸	۰/۱۷۷۷
B	۰/۱۶۹	۰/۰۹۰۹	۰/۲۱۴۵	۰/۱۳۴۶	۰/۱۱۹۶	۰/۱۳۹۹	۰/۱۱۱۴
C	۰/۱۸۶	۰/۲۱۵۳	۰/۱۴۸۵	۰/۱۸۵۴	۰/۱۸۸۰	۰/۱۷۲۸	۰/۱۸۱۸
D	۰/۱۷۶	۰/۱۹۰۷	۰/۱۵۱۸	۰/۱۸۱۳	۰/۱۵۸۰	۰/۱۶۴۵	۰/۱۸۱۸
E	۰/۱۵۲	۰/۱۶۴۷	۰/۱۵۱۸	۰/۱۵۲۴	۰/۱۵۳۸	۰/۱۶۴۵	۰/۱۶۵۳
F	۰/۰۹۴	۰/۱۹۵۱	۰/۱۶۴۹	۰/۱۶۴۸	۰/۱۷۹۵	۰/۱۸۵۲	۰/۱۸۱۸



شکل ۵-۷ - امتیاز نهایی گزینه‌ها

همانطور که ملاحظه می‌شود، بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی، گزینه‌ی C، یعنی روش پیش تزریق بیشترین امتیاز را کسب کرد و به عنوان مناسبترین روش برای رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس انتخاب شد.

۵-۵- جمع بندی

در این فصل با استفاده از یک ابزار مدیریتی به نام فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، سعی شد تا گزینه‌های مطرح شده به منظور فائق آمدن بر مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس، از لحاظ معیارهای مختلفی نظیر زمان، هزینه، بازدهی و ... مورد قیاس واقع شوند و در نهایت با اعمال ضریب اهمیت هر گزینه نسبت به هر معیار و همچنین ضریب اهمیت هر معیار نسبت به هدف اصلی، مناسبترین روش با توجه به نظر و امتیاز گروهی متخصص انتخاب شود.

با توجه به ماتریس نهایی، گزینه‌ی تزریق در تونل زاگرس بیشترین امتیاز را کسب کرد و پس از آن روش‌هایی نظیر استفاده از فیلتر کربن فعال و زهکشی در کل تونل امتیازهای بعدی را کسب کردند. این سه روش دارای امتیازاتی تقریباً نزدیک به هم هستند، اما از آنجا که روش تزریق روشی شناخته شده و کار شده در پروژه‌های تونل سازی است، انتخاب و اجرای آن برای عوامل اجرایی تونل مطلوبیت بیشتری خواهد داشت.

فصل ششم

تزریق در تونل زاگرس

قطعه یک (الف)

۶-۱- مقدمه

تزریق روشی است که توسط آن ماده‌ی تزریق به خلل و فرج و درز و شکاف یا حفره‌های تشکیلات سنگی و تزریق شده و موجب بهبود مشخصات تشکیلات می‌گردد، به طوری که در اثر آن نفوذ پذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و شکل پذیری تشکیلات کم می‌شود (نان وایلر، ۱۳۷۵).

در این فصل به نحوه‌ی اجرای تزریق در تونل زاگرس، مصالح مورد نیاز و هزینه‌ی تمام شده جهت انجام تزریق در طول ۷۳۰۰ متر از تونل که با مشکل تصاعد بالای گاز H_2S مواجه است، پرداخته شده است.

۶-۲- انواع تزریق

با توجه به اهداف تعیین شده در عملیات تزریق و نیز بر اساس مشخصات و روش اجرا، می‌توان انواع تزریقات را به طور کلی به پنج دسته تقسیم کرد (خوش برش، ۱۳۸۳):
تزریقات پرده آب بند^۱، تزریقات تحکیمی^۲، تزریقات تماسی^۳، تزریقات اتصالی^۴، تزریقات درزه‌های انقباضی^۵ (ژوئن).

۶-۳- تاثیرات تزریق

تزریق دوغاب سبب تغییر در خاصیت سنگ به صورت تغییر در RMR و طبقه بندی Q می‌گردد. در صورتیکه بتوان این مقادیر را قبل و بعد از تزریق محاسبه کرد، می‌توان زمان و سود حاصل از تزریق را تخمین زد (روستا و همکاران، ۱۳۸۶).

^۱ Grout curtain

^۲ Consolidation grouting

^۳ Contact grouting

^۴ Connection grouting

^۵ Contraction joint grouting

الف) تاثیر بر روی کیفیت سنگ

علاوه بر زهکشی، کنترل و حفظ محیط، تزریق می‌تواند یک عمل مهم دیگر که همان افزایش مقاومت سنگ می‌باشد را انجام دهد.

بطور کلی با انجام عمل تزریق، پارامترهای طبقه بندی Q نظیر J_w ، J_r و RQD افزایش و پارامترهای J_n ، J_a و SRF کاهش می‌یابد، که سبب افزایش تک به تک هر کدام از پارامترهای J_r/J_a ، J_w/SRF و RQD/ J_n می‌گردد. هریک از این کسر ها شاید کوچک باشند، اما مجموع آنها قابل توجه خواهد بود و نتایج زیر را در برخواهد داشت:

✓ در شرایط خشک، پیش تزریق ممکن است تا یک رده شاخص سنگ را بهبود بخشد.

✓ در شرایط تر، پیش تزریق ممکن است دو تا سه رده شاخص سنگ را بهبود بخشد.

بطور کلی پیش تزریق سبب کاهش نفوذ توده سنگ و جابجائی تونل و در نتیجه کاهش تجهیزات نگهدارنده شده و نتیجتاً می‌توان بیان کرد که اصلاح توسط تزریق با افزایش میزان طبقه بندی Q رابطه مستقیم پیدا می‌کند.

ب) تأثیر بر هزینه‌ها و زمان بندی:

جنس سنگ بر روی زمان لازم جهت حفاری و نگهداری بسیار موثر است. یک سنگ ضعیف نه تنها زمان برای هر دوره عملیات خود نگهداری را افزایش می‌دهد، بلکه طول پیشروی در هر دوره را نیز کاهش می‌دهد.

هزینه‌ی حفاری رابطه مستقیم با کیفیت سنگ دارد. آنالیز قیمت‌ها نشان می‌دهد که بهبود کیفیت توده سنگ سبب کاهش در هزینه‌ها می‌شود. همان طور که عنوان شد، با پیش تزریق ممکن است تا دو رتبه

کلاس سنگ بالاتر رود، بنابراین در سنگ‌های ضعیف نه تنها هزینه‌ی تزریق به سرعت بازگردانده می‌شود، بلکه سبب کاهش هزینه‌های حفاری و نگهداری نیز می‌شود (روستا و همکاران، ۱۳۸۶).

۴-۶- روش‌های تزریق دوغاب در گمانه

الف) تزریق قطعه قطعه رو به پایین

عبارتست از فرایند حفر یک گمانه تا عمق معین، شستشوی گمانه، کار گذاشتن مسدود کننده در ابتدای قطعه حفاری شده، آزمایش فشار آب و تزریق در زیر مسدود کننده، فرصت دادن به دوغاب تزریق شده در اطراف گمانه تا حصول گیرش کافی تا پس از تمیز کردن گمانه دوغاب به داخل آن باز نگردد، تمیز کردن گمانه، حفر قطعه پایینی، شستشوی گمانه، کار گذاشتن یک مسدود کننده در انتهای قطعه تزریق شده‌ی قبلی یا محل دیگر با راهنمایی دستگاه نظارت، آزمایش و تزریق قطعه جدید و ادامه کار به همین ترتیب به دفعاتی که حفاری و تزریق مورد نیاز باشد (خوش برش، ۱۳۸۳).

ب) تزریق قطعه به قطعه رو به بالا

عبارت است از فرایند حفر یک گمانه تا عمق نهایی، شست و شو، آزمایش فشار آب در صورت درخواست دستگاه نظارت و تزریق قطعات متوالی از پایین به بالا همراه با جاگذاری مسدود کننده در ترازهای مشخص شده (خوش برش، ۱۳۸۳).

۴-۵- مصالح مورد استفاده در تزریق

مصالح براساس سختی، شرایط منطقه و زمین شناسی آن و مشخصات آب در توده سنگ انتخاب می‌شوند. برای انتخاب مصالح صحیح باید موارد زیادی را مد نظر قرار داد نظیر:

دانه بندی مصالح سنگی، نفوذپذیری، لزجت، مقاومت فشاری و جاری شدن.

مصالح مورد استفاده در تزریق به چند دسته تقسیم می‌شوند (weaer, et al, 2007):

مصالح دسته اول: ملات‌های دانه‌ای

این مصالح مواد زیر را شامل می‌شوند:

سیمان‌ها^۱، پوزولان‌ها^۲، رس‌ها^۳

در بسیاری موارد، از سیمان برای تزریق استفاده می‌شود. خواص سیمان به خوبی شناخته شده است و نسبتاً ارزان می‌باشد. کارائی سیمان به راحتی با تغییر نسبت آب به سیمان، اضافه کردن افزودنی‌ها و پوزولان‌ها و انتخاب مصالح مناسب ایجاد می‌شود.

مصالح دسته دوم: محلول‌های کلوئیدی^۴

مصالح این دسته شامل مخلوطی از سیلیکات سدیم و محلول‌های واکنشگر هستند. پس از ترکیب این دو ماده، ویسکوزیته مخلوط با گذشت زمان بالا می‌رود، مخلوط به صورت ژل در می‌آید (weaer, et al, 2007).

مصالح دسته سوم: محلول‌های واقعی^۵

دسته سوم ملات‌ها شامل رزین‌های متفاوتی هستند. این رزین‌ها محلول‌هایی از مواد ارگانیک در آب یا یک محلول نانو هستند. ترکیب این مواد، در درجه حرارت اتاق و در یک محیط بسته سبب تشکیل یک ژل با خواص مکانیکی ویژه می‌شود. این دسته مصالح مواد زیر را شامل می‌شوند (weaer, et al, 2007):

رزین‌های آکریلیک^۶، رزین‌های فنولیک^۷

¹ Cements

² Pozzolans

³ Clays

⁴ Colloidal solutions

⁵ True solutions

⁶ Acrylic resins

⁷ Phenolic resins

مصالح دسته چهارم: مصالح متفرقه

این دسته از مصالح شامل ترکیبات ارگانیک یا رزین‌هایی هستند که علاوه بر آب دوست بودن و قدرت بالا، خواص ویژه‌ی دیگری نظیر انعطاف پذیری و مقاومت در مقابل فرسایش یا خوردگی نیز دارند. از مصالح این دسته می‌توان مواد زیر را نام برد (weaer, et al, 2007):

پلی استرها^۱، اپکسی‌ها^۲

در یک تقسیم بندی کلی، مصالح دسته دوم، سوم و چهارم را تحت عنوان مصالح شیمیایی می‌شناسند. برای استفاده از این نوع مصالح باید تأثیرات آنها را مورد بررسی قرار داد و همچنین به نکات زیر نیز توجه نمود:

- ✓ ملات‌های شیمیایی از ملات‌های سیمانی بسیار گران‌تر هستند.
- ✓ بعضی از این تولیدات (پیش تولید و محصول نهائی) ممکن است باخطر ایمنی همراه باشند (مثلاً برای پوست حساسیت ایجاد می‌کنند وغیره).
- ✓ برای استفاده از آنها معمولاً به تجهیزات ویژه‌ای جهت حمل و نقل و تزریق نیاز است.
- ✓ از لحاظ تأثیر نفوذ پذیری، ملات شیمیایی بسیار سریع‌تر از ملات سیمانی می‌باشد.
- ✓ ملات‌های شیمیایی به راحتی منبسط شده و کمتر پخش می‌شوند.
- ✓ ملات‌های شیمیایی به دلیل سمی بودن از لحاظ زیست محیطی از مطلوبیت بالایی برخوردار نیستند (روستا و همکاران، ۱۳۸۶).

^۱ Polyesters

^۲ Epoxies

۶-۶- تزریق در تونل زاگرس، قطعه یک (الف)

بر اساس نتایج فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، که در فصل قبل بحث شد، روش تزریق (پیش تزریق و تزریق ثانویه) در تونل زاگرس، به عنوان مناسب‌ترین گزینه جهت جلوگیری از ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل انتخاب شد.

در این بخش به نحوه‌ی اجرای تزریق در تونل، مصالح مورد نیاز و هزینه‌ی تمام شده جهت انجام تزریق در طول ۷۲۰۰ متر از تونل که با مشکل تصاعد بالای گاز H_2S مواجه است، پرداخته شده است.

از آنجا که حفاری این تونل بلند به صورت مکانیزه و با TBM انجام می‌گیرد، انجام عملیات پیش تزریق در جلوی کله حفار TBM امکان پذیر نیست زیرا به دلیل نبودن فضای کافی، امکان برپایی تجهیزات حفاری و تزریق در جلوی کله حفار وجود ندارد. همچنین امکان حفر چاه تزریق از سطح، به دلیل زیاد بودن ارتفاع روباره‌ی تونل (۳۰۰-۵۰۰ متر) وجود ندارد.

بنابراین باید از گزینه‌ی تزریق ثانویه جهت جلوگیری از ورود آب تشکیلات در برگیرنده‌ی تونل به داخل آن استفاده کرد. بر اساس مذاکرات شفاهی با کارشناس شرکت سنگ- خاک- پی، که مسئولیت تزریق آزمایشی در این تونل را بر عهده داشته، عملیات تزریق ثانویه در این تونل با موفقیت روبرو بوده و عدد لوژان از بالای ۱۰۰، بعد از انجام عمل تزریق به کمتر از ۲ رسیده است.

پارامترهای تزریق در این تونل را می‌توان به شرح زیر در نظر گرفت:

- طول چال‌های حفر شده ۶ متر است.
- فاصله داری چال‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد ۲۵ عدد چال با زاویه ۱۴ درجه باید در محیط تونل حفر شود.

- با توجه به جنس سنگ مورد تزریق، خورند سیمان هر چال متغیر بوده، اما به طور متوسط می‌تواند ۷۰ کیلوگرم در هر متر چال در نظر گرفته شود. بنابراین میزان سیمان مورد استفاده در هر نوبت تزریق برابر است با:

$$25 \times 6 \times 70 = 10500 \text{ kg}$$

- فاصله بین دو سیکل حفاری و تزریق ۱/۵ متر است.

بر اساس فرضیات بالا، هزینه تمام شده برای حفاری و تزریق در یک نوبت به شرح جدول ۶-۱ است:

جدول ۶-۱- شرح هزینه پارامترهای حفاری و تزریق در تونل (فهرست بهای سدسازی، ۱۳۸۸)

فعالیت	واحد	بهای واحد (ریال)	بهای کل
استقرار دستگاه چالزنی در محل چال.	دفعه	۲۳۲۰۰۰	۲۳۲۰۰۰
چالزنی در زمین سنگی به روش دورانی به قطر تا ۵۶ میلیمتر و عمق تا ۱۰ متر	متر طول	۱۳۹۵۰۰	بر اساس جدول ۲
اضافه بها به ردیف بالا در صورتی که زاویه حفاری چال نسبت به شاقول بیش از ۵ و تا ۱۸۰ درجه باشد و به ازای هر درجه مازاد بر ۵	درصد	۰/۸	۳۵۵۵۴۰۸۶
آماده سازی چال با عمق‌های گوناگون برای تزریق.	چال	۱۲۱۰۰۰	$۲۵ \times ۱۲۱۰۰۰ = ۳۰۲۵۰۰۰۰$
جا گذاری مسدود کننده ساده، برای تزریق سیمان.	دفعه	۳۴۸۰۰	بر اساس جدول ۳
اضافه بها به ردیف بالا در صورتی که زاویه حفاری چال نسبت به شاقول بیش از ۵ و تا ۱۸۰ درجه باشد و به ازای هر درجه افزایش	درصد	۱	۱۶۷۱۷۹۲
تزریق هر قطعه چال به روش از بالا به پایین در عمق‌های گوناگون و با هر زاویه انحراف	ساعت	۱۷۲۵۰۰	$۲۵ \times ۱ \times ۷۲۵۰۰ = ۴۳۱۲۵۰۰$
مجموع هزینه‌های حفاری و تزریق			۷۴۱۰۸۳۷۸
اضافه بها به ردیف‌های انجام عملیات برای عملیاتی که در فضای بسته انجام می‌شود و برای عملیاتی که در فاصله مازاد بر ۱۵۰ متر از نزدیکترین ورودی انجام می‌شود.	درصد	۲۵	$۷۴۱۰۸۳۷۸ \times ۱/۲۵ = ۹۲۶۳۵۴۷۲$
خرید، حمل، نگهداری و باراندازی سیمان در محل	تن	۱۰۰۰۰۰۰	$۱۰/۵ \times ۸۰۰۰۰۰ = ۸۴۰۰۰۰۰$
هزینه کل			$۸۴۰۰۰۰۰ + ۹۲۶۳۵۴۷۲ = ۱۷۶۶۳۵۴۷۲$

جدول ۶-۲- هزینه حفر چال در تونل

شماره چال	زاویه نسبت به امتداد شاقول	میزان انحراف، مازاد بر ۵درجه (درجه)	اضافه بها به ازای هر درجه انحراف (درصد)	بهای حفر چال
۱	۰	۰	۰/۸	$۶ \times ۱۳۹۵۰۰ = ۸۳۷۰۰۰۰$
۲	۱۴	۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۰۷۲ = ۸۹۷۲۶۴$
۳	۲۸	۲۴	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۱۹۲ = ۹۹۷۷۰۴$
۴	۴۲	۳۸	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۳۰۴ = ۱۰۹۱۴۴۸$
۵	۵۶	۵۱	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۴۰۸ = ۱۱۷۸۴۹۶$
۶	۷۰	۶۵	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۵۲ = ۱۲۷۲۲۴۰$
۷	۸۴	۷۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۶۳۲ = ۱۳۶۵۹۸۴$
۸	۹۸	۹۳	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۷۴۴ = ۱۴۵۷۷۲۸$
۹	۱۱۲	۱۰۷	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۸۵۶ = ۱۵۵۳۴۷۲$
۱۰	۱۲۶	۱۲۱	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۹۶۸ = ۱۶۴۷۲۱۶$
۱۱	۱۴۰	۱۳۵	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۰۸ = ۱۷۴۰۹۶۰$
۱۲	۱۵۴	۱۴۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۱۹۲ = ۱۸۳۴۷۰۴$
۱۳	۱۶۸	۱۶۳	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۳۰ = ۱۹۲۵۱۰۰$
۱۴	۱۸۲	۱۷۳	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۳۸۴ = ۱۹۹۵۴۰۸$
۱۵	۱۹۶	۱۵۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۲۷۲ = ۱۹۰۱۶۶۴$
۱۶	۲۱۰	۱۴۵	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۱۶ = ۱۸۰۷۹۲۰$
۱۷	۲۲۴	۱۳۱	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۲/۰۴۸ = ۱۷۱۴۱۷۶$
۱۸	۲۳۸	۱۱۷	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۹۳ = ۱۶۱۵۴۱۰$
۱۹	۲۵۲	۱۰۳	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۸۲۴ = ۱۵۲۶۶۸۸$
۲۰	۲۶۶	۸۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۷۱۲ = ۱۴۳۲۹۴۴$
۲۱	۲۸۰	۷۵	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۶۰ = ۱۳۹۲۰۰$
۲۲	۲۹۴	۶۱	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۴۸۸ = ۱۲۴۵۴۵۶$
۲۳	۳۰۸	۴۷	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۳۷۶ = ۱۱۵۱۷۱۲$
۲۴	۳۲۲	۳۳	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۲۶۴ = ۱۰۵۷۹۶۸$
۲۵	۳۳۶	۱۹	۰/۸	$۸۳۷۰۰۰۰ \times ۱/۱۵۲ = ۹۶۴۲۲۴$

جدول ۶-۳- هزینه جاگذاری مسدود کننده در چال‌های حفر شده در تونل

شماره چال	زاویه نسبت به امتداد شاقول	میزان انحراف، (درجه)	اضافه بها به ازای هر درجه انحراف (درصد)	بهای جاگذاری مسدود کننده
۱	۰	۰	۱	۳۴۸۰۰
۲	۱۴	۱۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۱۴ = ۳۹۶۷۲$
۳	۲۸	۲۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۲۸ = ۴۴۵۴۴$
۴	۴۲	۴۲	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۴۲ = ۴۹۴۱۶$
۵	۵۶	۵۶	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۵۶ = ۵۴۲۸۸$
۶	۷۰	۷۰	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۷۰ = ۵۹۱۶۰$
۷	۸۴	۸۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۸۴ = ۶۴۰۳۲$
۸	۹۸	۹۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۹۸ = ۶۸۹۰۴$
۹	۱۱۲	۱۱۲	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۱۲ = ۷۳۷۷۶$
۱۰	۱۲۶	۱۲۶	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۲۶ = ۷۸۶۴۸$
۱۱	۱۴۰	۱۴۰	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۴۰ = ۸۳۵۲۰$
۱۲	۱۵۴	۱۵۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۵۴ = ۸۸۳۹۲$
۱۳	۱۶۸	۱۶۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۶۸ = ۹۳۲۶۴$
۱۴	۱۸۲	۱۷۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۷۸ = ۹۶۷۴۴$
۱۵	۱۹۶	۱۶۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۶۴ = ۹۱۸۷۲$
۱۶	۲۱۰	۱۵۰	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۵۰ = ۸۷۰۰۰$
۱۷	۲۲۴	۱۳۶	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۳۶ = ۸۲۱۲۸$
۱۸	۲۳۸	۱۲۲	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۲۲ = ۷۷۲۵۶$
۱۹	۲۵۲	۱۰۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۲/۰۸ = ۷۲۳۸۴$
۲۰	۲۶۶	۹۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۹۴ = ۶۷۵۱۲$
۲۱	۲۸۰	۸۰	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۸۰ = ۶۲۴۰۰$
۲۲	۲۹۴	۶۶	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۶۶ = ۵۷۷۶۸$
۲۳	۳۰۸	۵۲	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۵۲ = ۵۲۸۹۶$
۲۴	۳۲۲	۳۸	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۳۸ = ۴۸۰۲۴$
۲۵	۳۳۶	۲۴	۱	$۳۴۸۰۰ \times ۱/۲۴ = ۴۳۱۵۲$

همانطور که در جدول ۶-۱ مشاهده می‌شود، مجموع هزینه‌های حفاری، تزریق و مواد تزریق در هر سیکل در تونل زاگرس (۱/۵ متر از طول تونل) حدوداً ۱۰۱۰۰۰۰۰۰ ریال برآورد شد. از آنجا که فاصله داری چال‌های تزریق (با توجه به جنس سنگ‌ها و شرایط زمین شناسی محل حفر سازه)، ۱/۵ متر در نظر گرفته شد، در ۷۲۰۰ متر طول تونل زاگرس که با خطر گازخیزی بالا مواجه است، نیاز به ۴۸۰۰ سیکل تزریق می‌باشد و بنابراین هزینه تمام شده برای حفاری و تزریق در کل طول گازخیز تونل، ۴۸۴۸۰۰۰۰۰۰۰ ریال خواهد بود.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

در فصل پنجم با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش پیش تزریق مناسب‌ترین روش برای رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس انتخاب شد. هدف از روش پیش تزریق، تقویت جبهه کار تونل است و از لحاظ فنی اگر با بازدهی بالا انجام شود، به طور یقین بهترین روش جهت جلوگیری از ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و در نتیجه عدم تصاعد گاز H_2S است. برای مثال می‌توان از تونل راه آهن عابدلاجیز^۱ نام برد. در این تونل نیز که در جنوب اسپانیا حفر شده و در هنگام حفاری با مشکل تصاعد گاز H_2S مواجه بوده، از عملیات تزریق برای رفع این مشکل استفاده شد. با توجه به محاسبات انجام شده، تزریق در طولی از تونل زاگرس قطعه یک (الف) که با مشکل تصاعد بالای گاز H_2S مواجه است (۷۲۰۰ متر اولیه تونل)، هزینه‌ای نسبتاً بالا در بر خواهد داشت. علاوه بر این هزینه، باید هزینه‌ی متحمل شده به پروژه در طول هر سیکل عملیات تزریق (حدوداً ۵-۴ روز)، از بابت عدم استفاده از TBM نیز محاسبه شود که این هزینه نیز مسلماً مقدار قابل توجهی خواهد بود و باید در نظر گرفته شود. در صورت داشتن توجه اقتصادی برای پیمانکار تونل، توصیه می‌شود که عملیات تزریق در تونل اجرا شود.

^۱ Del Abdalajis

فهرست منابع

- اصغرپور، م.ج، (۱۳۸۷)، *تصمیم‌گیری‌های چند معیاره*، انتشارات دانشگاه تهران.
- آقا نباتی، ع. (۱۳۸۳) *زمین شناسی ایران*. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- تری بال، ر. (۱۳۷۷) *عملیات واحد (جلد دوم)*، ترجمه زینی، پریسا. انتشارات دانشگاه هرمزگان.
- جروم بی، او. (۱۳۸۷)، *راهنمای طراحی، ساخت و نظارت و تونلسازی با ماشین TBM از نوع متعادل کننده فشار زمین*. ترجمه: دکتر مرتضی اسماعیلی، مهندس علیرضا بابایی، مهندس پیمان یوسفی مجیر. انتشارات پلیکان.
- خوش برش، امیر، (۱۳۸۳)، *سد و نیروگاه کارون سه-حفاری و تزریق*، انتشارات جام اندیشه.
- روستا، روزبه، مغفوری، مهدی، (۱۳۸۶)، *حفاری در تونل و کیفیت تزریق ملات*، سیزدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.
- صدقیانی، م.ح. نصر، م. (۱۳۸۷)، *بررسی اثر غلظت بر نفوذ پذیری و رفتار مکانیکی و فیزیکی ماسه تزریق شده با دوغاب سیلیکاتی*. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- فهرست بهای رشته سدسازی، ۱۳۸۸
- قدسی پور، ح، (۱۳۸۱)، *فرایند تحلیل سلسله مراتبی*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- قیامی، ر. (۱۳۸۵)، *بررسی روش‌های کنترل آب در تونل‌ها و انجام مقایسه فنی، اقتصادی و کاربردی مابین دو نوع پوشش آب بند ژئوممبران پلی اتیلنی VFPE و ورق‌های PVC مرسوم*، پایان نامه کارشناسی، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۰۷ صفحه.
- کریم پور، م.ح، (۱۳۷۸)، *کانی‌ها و سنگ‌های صنعتی*، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

کیانی، م، (۱۳۸۴)، بررسی ویژگی‌ها و دامنه کاربرد روش طرح و ساخت با نگرشی بر قرارداد طرح و ساخت پروژه تونل زاگرس. دومین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه.

گزارش زمین شناسی تونل زاگرس به شماره SCE 8510445 UNGR TUN EG RP 002 D0

مدنی، حسن (۱۳۷۷)، *تونلسازی (جلد دوم- خدمات فنی)*، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مدنی، حسن (۱۳۶۶)، *تهویه در معادن (جلد اول)*، چاپ سوم، مرکز نشر دانشگاهی.

مسعودی نژاد، م. ر، (۱۳۸۷)، *حذف آلاینده‌های گازی از معادن توسط فیلترهای کربن اکتیو*، هشتمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط زیست معدن و صنایع معدنی.

مک کیپ، و. اسمیت، ج. هریت، پ. (۱۳۷۹)، *عملیات واحد در مهندسی شیمی*، ترجمه امینی، عطا ا...، صالحی، بهرام، نشر کتب دانشگاهی.

مهندسین مشاور ساحل، *گزارش طراحی سیستم تهویه تونل زاگرس قطعه یک (الف)*، مهر ۱۳۸۶

میرمحرابی، ح، طریق ازلی، ص، (۱۳۸۶)، *حفر تونل در محیط‌های حاوی گاز H_2S* ، کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.

نان وایلر، ای، (۱۳۷۵)، *عملیات مهندسی تزریق*، ترجمه مهندسین مشاور زاینده آب، نشر مهندسین مشاور زاینده آب با همکاری انتشارات صنعت سرا.

Amal Raj, S., (2004), *Introduction to environmental science & technology*, gbook.

Ball, J.P., Corwin, A.B, (1985), *Dewatering and pressure relief for tunnel construction*, Rapid Excavation and Tunneling Conference

Bickel, J.O, (1982), *Tunnel Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co.

Boki, K. Tanada, S., (1980), *Adsorption of hydrogen sulfide on activated carbon*.

Day, D.A, Marsh, T.P, Kwiatkowski, P.E, 2000, *Benefits of underground construction on two sewer projects*, North American Tunneling, Balkema, Rotterdam.

Dumont, E., Andrès, Y., Le Cloirec, P., Gaudin, F., (2008), *Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration*.

Doyle, BR. *Hazardous gases underground application to tunnel engineering*, gbook.

Franklin,J.A, Dusseault,M,B,(1989), *Rock Engineering*, Mc Graw Hill publishing company

Guido.p, Chiara.p,(2003), *Technologies for the abatement of sulphide compounds from gaseous streams: a comparative overview*.

Itaya,Y., Kawahara,K., Lee,ch., Kobayashi,J.,(2009), *Dry gas cleaning process by adsorption of H₂S into activated cokes in gasification of carbon resources*, fuel journal.

Mc Pherson, Malcolm,J, (1993), *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, Chapman and Hall

Naeemi, a.h., Essex, r.j., Giberson, k.a.,(2000), *The effect of hydrogen sulfide during underground construction*, North American tunneling, Balkema, Rotterdam.

Saaty, T.L., (1980), *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill Publications.

Saaty, T.L., (2000), *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications

Stirbys,A.F, Radwanski,Z.R, Proctor, Z.R Escandon,R.F, (1999), *Los Angeles metro rail project- geologic and geotechnical design and construction constraints Engineering geology*.

Swistock, B., Sharpe, W., Robillard, P.,(2001), *Hydrogen Sulfide (Rotten Egg Odor) in Pennsylvania Groundwater Wells*.

Weaver, D.K, Bruce, D.A,(2007), *Dam Foundation Grouting*, ASCE Press.

Widdel,F.(1988).Microbiology and ecology of sulfate-and sulfur-reducing bacteria. In *Biology of an aerobic micro organisms*. JohnWiley&Sons.

www.Aftab.ir

www.aftab.ir/articles/science_education/other/c3c1150708405_gas_p2.php

www.Aiken-murray.com
(www.alken-murray.com/H2SREM5.HTM)

(www.amt-gmbh.com)

www.bullflex.de
www.bullflex.de/scripts/english/download/dl_sp.pdf

www.cee.vt.edu
www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html

www.cemproof.ch

www.chemistmag.com
www.chemistmag.com/modules/news/article.php?storyid=296)

www.chemviron-carbon.com

www.draeger-safety.com

www.Excel-water.com
www.excelwater.com/eng/b2c/chlorination.php

www.ilc.ir
www.ilc.ir/?lang=fa&page=showbody_news&row_id=1784

www.irche.com (Iranian chemical engineer)
www.irche.com/article/Chemical_air_pollution.asp

www.hpcproducts.com
www.hpcproducts.com/korfmann_products.html

www.h2o2.com
(<http://www.h2o2.com/municipal-applications/wastewater-treatment.aspx?pid=146&name=Article-H2S-Control-Headworks-Odor-Control>)

www.kronosecochem.com

www.lindeltd.com

www.minova-ag.ch

www.ngdir.com(A)
(www.ngdir.ir/PDEFAULT.ASP)

www.ngdir.com(B)
www.ngdir.ir/faq/PFAQDetail.asp?Pid=18315&View=0

www.simtronics.eu
(http://www.directindustry.com/industrial-anufacturer/hydrogensulfide-detector-77178.htm)

www.Wikipedia.com
http://en.wikipedia.org/wiki/Smoke

www.Wikipedia.com
http://en.wikipedia.org/wiki/Steam

www.Wikipedia.com
http://en.wikipedia.org/wiki/Zeolite

پیوست

فرم نظرخواهی به منظور انتخاب روش مناسب جهت رفع مشکل تصاعد گاز H_2S در تونل زاگرس، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

تونل انتقال آب زاگرس، واقع در غرب کشور، با طول کلی حدود ۴۸ کیلومتر، از تونل‌های بلند در حال حفر در ایران است. حفر این تونل با دستگاه TBM صورت می‌گیرد. تهویه مکانیکی در حین اجرای تونل، به روش تهویه طولی و با دهش هوا به قسمت پشتیبانی TBM انجام می‌گیرد. از مشکلات موجود در هنگام حفاری، تصاعد گاز سولفید هیدروژن از تشکیلات سنگی دیواره تونل است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده از شرایط تونل زاگرس، مقدار گاز محلول در آب (که با دبی ۱۷۰ لیتر بر ثانیه وارد تونل می‌شود) در محل ورود به تونل، برابر ۱۱ میلی گرم بر لیتر می‌باشد. خیلی دورتر از انتهای قسمت پشتیبانی TBM، که غلظت H_2S در هوای تونل با غلظت آن در آب در موازنه است، غلظت H_2S در هوا ۵۰ ppm است (ppm معادل با غلظت حجمی ml/m^3). گاز هیدروژن سولفور گازبست فوق‌العاده خطرناک و سمی که در عیار کم باعث سوزش چشم و در عیار بالا باعث فلج شدن سیستم اعصاب و مرگ می‌شود. این گاز در عیار ۰/۱ درصد (۱۰۰ ppm) پس از چند ساعت مسمومیت خفیف و در عیار ۰/۵ درصد (۵۰۰ ppm) پس از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه مسمومیت خطرناک را سبب می‌شود. اگر عیار گاز به ۰/۱ درصد (۱۰۰۰ ppm) برسد سبب مرگ فوری می‌شود. حضور سولفید هیدروژن در محیط کار سبب به وجود آمدن یکسری مشکلات خواهد شد، نظیر:

۱- خوردگی ابزار آلات و تجهیزات حفاری

حضور H_2S در محیط به دو صورت می‌تواند سبب وارد آمدن خسارت به تجهیزات کارگاه شود: واکنش با مس که سبب قطع و خرابی مدارهای الکترونیکی می‌شود و سولفات شدن آلیاژهای فولادی TBM و سایر تجهیزات حفاری به دلیل آزاد شدن اسید سولفوریک.

۲- خطرات جانی برای نیروی کار

همانطور که اشاره شد، H_2S گازی فوق‌العاده سمی است و حضور آن در محیط کار، حتی در غلظت‌های پایین هم بسیار خطرناک است و بایستی تدابیر ایمنی لازم را برای مقابله با آن فراهم نمود، مانند استفاده از ماسک‌های فیلتردار.

۳- توقف عملیات کاری

حضور H_2S سبب نا ایمن شدن محیط کار برای نیروی کار شده که این موضوع توقف عملیات را در پی دارد. توقف فعالیت کاری، سبب افزایش هزینه‌های مربوط به نیروی کار و تجهیزات شده و همچنین عقب ماندن از برنامه زمانی پروژه را در پی خواهد داشت.

با توجه به مطالب ذکر شده، در صورت مواجهه با این گاز در محل کار، باید سریعاً برای ترقیق و رساندن عیار آن به درصدهای مجاز اقدام نمود. بدین منظور، در ابتدا یکسری تدابیر کوتاه مدت اندیشیده شده است که این روش‌ها سبب بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی خواهد شد. لازم است که تمام تدابیر ذکر شده، در سریع‌ترین زمان ممکن اجرا شوند تا تاخیرهای وارد بر پروژه تا آنجا که ممکن است کاهش یابد. مسلماً هزینه‌ی سرمایه‌گذاری‌های همزمان بر روی روش‌های مختلف و اجرای آنها، خیلی کمتر از هزینه‌های وارده بر پروژه به دلیل توقف عملیات است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به زهکشی در محل TBM و قسمت پشتیبانی، تقویت سیستم تهویه، حفاظت کابین‌های الکتریکی، استفاده از تجهیزات حفاظت شخصی، تزریق دوغاب گراول نخودی در فضای بین پوشش تونل و دیواره حفاری شده و مسدود کردن کانال‌های آب اشاره کرد.

در ادامه روش‌هایی جهت کاهش ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و بالطبع کاهش انتشار H_2S در اتمسفر و یا تصفیه‌ی H_2S وارد شده به تونل، ارائه شده که این تدابیر در جهت بهبود شرایط کاری در محل TBM و قسمت پشتیبانی و همچنین راه دسترسی به TBM نقش عمده‌ای را ایفا خواهند کرد. تصمیم‌گیری منطقی و عقلانی جهت انتخاب یک یا تعدادی از این روش‌ها، می‌تواند بر اساس تخمین هزینه‌ها، شرایط اجرایی این روش‌ها، میزان بازدهی روش‌ها و یکسری پارامترهای دیگر صورت گیرد، که این امر نیاز به بررسی دقیق این روش‌ها دارد.

روش‌های در نظر گرفته شده عبارتند از:

- زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته

- زهکشی از سطح

- پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه در پشت TBM

- آبنبدی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و نوارهای منبسط شونده

- اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در داخل تونل با اکسید کننده‌هایی نظیر اکسیژن، پراکسید هیدروژن و سولفات آهن

- استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S

معیارهای انتخاب روش مناسب جهت حل مشکل پروژه تونل زاگرس، به صورت سوال مطرح شده است. امتیاز اختصاص داده شده به هر روش (بین حداقل ۱ و حداکثر ۹) نشان دهنده مطلوبیت آن روش در معیار در نظر گرفته شده می‌باشد.

۱- با توجه به هزینه‌های سرمایه گذاری و اجرا، اولویت استفاده از هر روش چقدر است؟

روش / امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته									
زهکشی از سطح									
پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...									
آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...									
اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...									
استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S									

۲- از لحاظ مدت زمان اجرا مطلوبیت هر روش چقدر است؟

روش / امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته									
زهکشی از سطح									
پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...									
آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...									
اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...									
استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S									

۳- از لحاظ اجرایی بودن روش، امتیاز هر روش چقدر است؟

روش / امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته									
زهکشی از سطح									
پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...									
آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...									
اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...									
استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S									

۴- از لحاظ بازدهی عملیات مطلوبیت هر روش چقدر است؟

روش / امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته									
زهکشی از سطح									
پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...									
آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...									
اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...									
استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S									

۵- میزان انعطاف پذیری هر روش با روش حفاری تونل چقدر است؟

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	روش / امتیاز
									زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته
									زهکشی از سطح
									پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...
									آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...
									اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...
									استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S

۶- از لحاظ شرایط زیست محیطی اطراف تونل، مطلوبیت هر روش چقدر است؟

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	روش / امتیاز
									زهکشی در کل تونل با سیستم لوله بسته
									زهکشی از سطح
									پیش تزریق در جلوی صفحه حفار و تزریق ثانویه...
									آببندی درزه‌های سگمنت با نوارهای EPDM و...
									اکسیداسیون یا ته نشست شیمیایی H_2S در تونل...
									استفاده از فیلتر کربن فعال جهت جذب سطحی H_2S

به نظر شما اولویت هر کدام از معیارهای بیان شده (سئولات ۱ تا ۶) در انتخاب روش مناسب چقدر است؟

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	معیار (شماره سوال) / امتیاز
									۱
									۲
									۳
									۴
									۵
									۶

- در پایان از متخصص محترم تقاضا داریم، اگر روش پیشنهادی دیگری جهت حل مشکل تونل زاگرس در نظر دارید، بیان کنید.

Abstract

During the excavation of tunnels, depending on the type of rock formation which tunnels pass towards them, some gases may release from these formation to tunnel atmosphere which must dilute to allowable limit. One of the gases which its presence has been demonstrated in some Iranian tunnels, is hydrogen sulfide gas. H₂S is a very dangerous gas. Allowable level of this gas is 20 ppm. In upper levels, it can causes respiratory paralysis leading to death. Geological formation related to hydrocarbon resources are very important information and reservation of H₂S gas. H₂S can exist in tunnel in two ways, solved in water and/or as a part of the air environment. Depending on the type of its presence, there are different methods for its dilution or removal with different efficiency.

Zagros tunnel, with overall length, 14 km, is a long drilling stage tunnel in Iran. This tunnel is drilling with a TBM machine. during drilling, tunnel mechanical ventilation is done by Longitudinal ventilation. Release of H₂S from rock formation of wall tunnel, is a big problem in this tunnel. Based on the measurements, amount of solution H₂S gas is 11mg/lit in water intake tunnel. Flow of entering water is 170 lit/s. dencity of H₂S in tunnel atmosphere is 50-60 ppm.

In this study, after the perusing of H₂S source in Zagros tunnel, In the firs step, some methods has been given which are requirement to establish better working condition in the TBM and the backup section and can be implemented quickly. Then number of methods has been given either for decrees of water intake tunnel and so reduction of H₂S release in tunnel atmosphere, or filtration of entered H₂S in tunnel. These measures have major rule to establish better working condition in the TBM and the backup section and also in the access to the TBM from the portal. Logical decision making for selection of one or more method need to Accurate study of them.

the AHP method was incorporated to evaluate the optimum option for elimination of H₂S emission in tunnel, according to the pre-determined criteria. These criteria are operation time, current and capital cost, efficiency, felexibility, environmental conditions and application of method.

Using the AHP method, the grouting method was the most convenient method in Zagros tunnel when the alternatives were evaluated according to the considered criteria.

In the last section the technical and economical evaluation of grouting in 7200 Km of Zagros tunnel, with high emission of H₂S gas, has been done.