



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد (گروه استخراج)

مدلسازی هیدرولیکی توده سنگ اطراف تونل به روش عددی و روش های کنترل آن جهت

تسهیل حفاری - مطالعه موردی تونل انتقال آب زاگرس (قطعه دوم)

محمد رضا مهر آوران

۸۹۰۴۵۵۴

اساتید راهنما:

دکتر احمد رمضان زاده

دکتر شکراله زارع

الله الرحمن الرحيم

تقدیم بہ پدر صبور

و

مادر مہربانم

چکیده

تراوش آب زیرزمینی به درون تونل از مشکلات اساسی در روند ساخت و بهره‌برداری این فضای زیرزمینی است. این مسئله در مرحله حفاری از توانائی عملیاتی گروه اجرایی کاسته و سبب افزایش زمان پیشروی و در نهایت به تعویق افتادن زمان بهره‌برداری و نیز تخصیص هزینه‌های از پیش تعیین نشده می‌شود. چنانچه پیش‌بینی حجم تراوش در مراحل مختلف حفر با دید واقع بینانه‌ای صورت گیرد، امکان تجهیز گروه عملیاتی برای مقابله و کنترل تراوش بیشتر خواهد شد.

قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس با طولی بالغ بر ۲۶ کیلومتر با عبور از سازندهای هیدروکربوری و توده سنگ‌های درزه‌دار بخشی از طرح انتقال آب به دشت‌های گرمسیری غرب کشور می‌باشد که به دلیل تراوش شدید آب در مراحل مختلف حفر با مشکلات عدیده‌ای روبرو می‌باشد.

تخمین تراوش آب در توده‌سنگ درزه‌دار به دلیل تاثیر ویژگی‌های درزه نظیر جهت داری و فاصله‌داری، همواره با مشکلات فراوانی همراه است. در مطالعه پیش رو اصول حرکت آب در توده‌سنگ درزه‌دار بررسی شده و سپس روش‌های متداول تحلیلی و تجربی در محاسبه نرخ تراوش آب به درون تونل ارائه می‌گردد. نتایج حاصل از این روابط نشان می‌دهد که به دلیل فرض پیوستگی در توده‌سنگ، کاربرد این روابط در محیط ناپیوسته همواره با خطای قابل ملاحظه‌ای روبروست.

در ادامه تحقیق به منظور بررسی و تخمین نرخ تراوش آب به درون تونل، به حل عددی این مسئله در محیط ناپیوسته و به روش المان مجزا پرداخته شده است. حل عددی این مسئله به کمک نرم‌افزار UDEC صورت گرفته که نتایج حاصل از آن تطابق بهتری با مقادیر تراوش مشاهده‌ای در تونل زاگرس دارد. با توجه به ویژگی مدل‌های عددی اعتبار سنجی شده، پیش‌بینی تراوش در مقاطع حفر نشده تونل مذکور صورت گرفت. ضمن اینکه به منظور بررسی میزان تاثیر ویژگی‌های درزه بر نرخ تراوش، تحلیل پارامتری انجام شد که در این تحلیل ویژگی بازشدگی، فاصله‌داری و جهت‌داری درزه و نیز تاثیر سطح آب

زیرزمینی بر تراوش مورد بررسی قرار گرفت.

در پایان تحقیق ضمن بررسی انواع روش‌های کنترل تراوش آب در تونل و با توجه به میزان تراوش پیش‌بینی شده، سیستم کنترل تراوش برای تونل بلند زاگرس ارائه و پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی: تراوش، توده‌سنگ درزه‌دار، مدلسازی عددی، UDEC، تحلیل پارامتری، کنترل تراوش

قدردانی

از زحمات اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده و جناب آقای دکتر شکراله زارع که در طول انجام این

پژوهش بیچ لطفی را از اینجانب دریغ نداشته اند و ساگرودی ایشان افتخاری بزرگ بوده، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از آقایان مهندس محسن محبی و سید محمد رضوی زادگان بهرمی و تمامی دوستانی که در طول انجام این پژوهش به اینجانب یاری رسانده اند، تشکر می‌کنم.

فهرست مطالب

ت	چکیده
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- ضرورت و سابقه انجام تحقیق
۴	۳-۱- روش انجام تحقیق
۴	۴-۱- ساختار پایان نامه
۷	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- تشکیل آب‌های زیرزمینی
۸	۳-۲- استقرار آب‌های زیرزمینی
۹	۴-۲- سفره آب زیرزمینی
۱۰	۵-۲- نحوه حرکت آب‌ها در زیرزمین
۱۲	۱-۵-۲- ویژگی‌های هیدرودینامیکی سفره آب
۱۳	۶-۲- مدل‌های تراوش آب در سنگ درزه‌دار
۱۴	۱-۶-۲- تعریف نفوذپذیری
۱۷	۲-۶-۲- رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها
۱۹	۷-۲- آزمایش‌های مرسوم در محاسبه نفوذپذیری سنگ درزه‌دار
۲۰	۱-۷-۲- آزمون پمپاژ
۲۱	۲-۷-۲- آزمون لوژان
۲۷	۸-۲- جمع بندی و نتیجه گیری
۲۹	۱-۳- مقدمه
۲۹	۲-۳- انواع تراوش به درون تونل
۳۳	۳-۳- روش‌های تحلیلی در محاسبه تراوش به درون تونل
۳۳	۱-۳-۳- روش چشمه وچاه
۳۷	۲-۳-۳- روش‌های تجربی
۴۱	۴-۳- روش‌های عددی
۴۲	۱-۴-۳- شبکه شکستگی گسسته
۴۳	۲-۴-۳- روش المان مجزا
۴۵	الگوریتم محاسبه تراوش سیال در روش المان مجزا
۴۸	۵-۳- نتیجه‌گیری

۵۱	۱-۴- مقدمه
۵۱	۲-۴- معرفی پروژه
۵۴	۳-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه
۵۴	۴-۴- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل
۵۴	۱-۴-۴- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی
۶۱	تشریح ویژگی توده‌سنگ در مسیر تونل
۶۳	۵-۴- مطالعات آب‌شناسی منطقه
۶۸	۶-۴- بحث و نتیجه‌گیری
۷۰	۱-۵- مقدمه
۷۰	۲-۵- مدلسازی عددی
۷۰	۱-۲-۵- نرم افزار UDEC
۷۱	۲-۲-۵- مدلسازی هیدرولیکی در UDEC
۷۳	۳-۲-۵- بررسی روند مدلسازی در مقطع شماره ۵
۷۵	۳-۳-۵- بررسی مدل‌های ساخته شده
۷۶	۱-۳-۵- بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی سه مقطع اول
۷۷	۲-۳-۵- بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی در سه مقطع دوم
۷۹	۴-۵- نتایج محاسبه تراوش به صورت عددی و مقایسه آن با سایر روش‌ها
۸۱	۵-۵- پیش‌بینی تراوش در ادامه حفاری
۸۵	۶-۵- تحلیل پارامتری
۸۶	۱-۶-۵- تاثیر بازشدگی درزه
۸۶	۲-۶-۵- تاثیر فاصله‌داری درزه
۸۸	۳-۶-۵- تاثیر سطح آب زیرزمینی
۸۸	۴-۶-۵- تاثیر جهت‌داری درزه
۹۲	۷-۵- بحث و نتیجه‌گیری
۹۵	۱-۶- مقدمه
۹۵	۲-۶- تحلیل شرایط زمین در حین پیشروی
۹۵	۱-۲-۶- روش‌های ژئوفیزیکی
۹۷	۲-۲-۶- حفرگمانه اکتشافی
۹۸	۳-۶- سیستم‌های کنترل آب در تونل
۹۸	۱-۳-۶- ایستگاه‌های پمپاژ

۹۹	.....	درزگیرها ۲-۳-۶
۱۰۳	.....	تزریق ۳-۳-۶
۱۰۵	.....	طبقه‌بندی مخلوط دوغاب ۴-۶
۱۰۵	.....	طبقه‌بندی کلی ۱-۴-۶
۱۰۵	.....	خصوصیات دوغاب ۲-۴-۶
۱۰۶	.....	دوغاب‌های پایه سیمانی ۳-۴-۶
۱۰۷	.....	دوغاب‌های شیمیائی ۴-۴-۶
۱۰۸	.....	سایر روش‌ها ۵-۶
۱۰۹	.....	ارائه روش پیشنهادی به منظور کنترل تراوش در تونل بلند زاگرس (قطعه ۲) ۶-۶
۱۱۲	.....	نتیجه‌گیری ۷-۶
۱۱۴	.....	مقدمه ۱-۷
۱۱۴	.....	روند مطالعات و نتایج آن ۲-۷
۱۱۷	.....	پیشنهادات ۳-۷

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- چرخه آب و تولید آب زیرزمینی ۸
- شکل ۲-۲- چاه در یک سفره آزاد ۱۰
- شکل ۳-۲- ارتباط بین نفوذپذیری و تخلخل ۱۱
- شکل ۴-۲- تراوش در توده سنگ با یک دسته درزه ۱۴
- شکل ۵-۲- شیب و امتداد صفحه درزه ۱۶
- شکل ۶-۲- تغییرات تنش نرمال موثر و بازشدگی درزه ۱۹
- شکل ۷-۲- آزمون پمپاژ- الف) سفره آب معمولی ب) سفره آب تحت فشار ۲۱
- شکل ۸-۲- طرح آزمایش لوژان ۲۳
- شکل ۱-۳- مولفه‌های جریان آب به داخل تونل ۳۰
- شکل ۲-۳- تراوش شعاعی به درون تونل ۳۱
- شکل ۳-۳- تراوش پایدار الف- جریان شعاعی ب- تراوش قائم ۳۳
- شکل ۴-۳- خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان اطراف یک تونل ۳۴
- شکل ۵-۳- بررسی تغییرات مقادیر تحلیلی با تغییرات (R/H) ۳۶
- شکل ۶-۳- نمودار تجربی هوور ۳۹
- شکل ۷-۳- الف) مدل اولیه صفحات متعامد ب) مدل هادسون و پیریست در سال ۱۹۷۶ ج) مدل دیسکی بیچر ۴۳
- شکل ۸-۳- المان‌های ساختاری در نرم افزار UDEC ۴۵
- شکل ۹-۳- جریان درون درزه که همانند جریان بین حوزه‌ها مدل شده است ۴۶
- شکل ۱۰-۳- بازشدگی هیدرولیکی و تنش نرمال درزه ۴۷
- شکل ۱-۴- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل ۵۳
- شکل ۲-۴- صفحات اصلی درزه در چهار مقطع اول ۵۹
- شکل ۳-۴- صفحات اصلی درزه در چهار مقطع دوم ۶۰

- شکل ۴-۴- صفحات اصلی درزه در سه مقطع آخر ۶۱
- شکل ۵-۱- امتداد صفحه درزه و امتداد تونل ۷۲
- شکل ۵-۲- مدل بلوکی در مقطع شماره ۵ ۷۴
- شکل ۵-۳- موقعیت تونل و خطوط تراوشی در اطراف آن ۷۵
- شکل ۵-۴- مقاطع ۲،۱ و ۳ در پروفیل طولی تونل ۷۶
- شکل ۵-۵- مقاطع ۵،۴ و ۶ در پروفیل طولی تونل ۷۸
- شکل ۵-۶- تاق‌دیس کردی قاسمان (متر از ۱۳۲۰۰-۱۶۰۰۰) ۸۱
- شکل ۵-۷- مقاطع ۱۰،۹،۸،۷ و ۱۱ در پروفیل طولی تونل ۸۲
- شکل ۵-۸- تغییرات تراوش در بازشدگی ۱ تا ۴ میلیمتر ۸۶
- شکل ۵-۹- تغییرات تراوش با فاصله داری ۸۷
- شکل ۵-۱۰- تغییرات تراوش با سطح آب زیرزمینی ۸۸
- شکل ۵-۱۱- تغییرات جهت‌داری درزه در سه مرحله (از ۹۰ تا ۳۰ درجه) ۸۹
- شکل ۵-۱۲- تغییرات جهت‌داری درزه در سه مرحله (از ۶۰ تا ۰ درجه) ۹۰
- شکل ۵-۱۳- تغییرات جهت‌داری با سه دسته درزه ۹۱
- شکل ۶-۱- بررسی اکتشافی در حفاری تونلسازی مکانیزه ۱- بررسی های اکتشافی در جلو و پشت جبهه کار و پشت سپر ۲- چالهای بررسی در فواصل ۳۰الی ۱۰۰متری ۳- چال اکتشافی در پشت سپر ۹۶
- شکل ۶-۲- محدوده اطراف ماشین سپری که در آنها امکان چالزنی وجود دارد ۹۷
- شکل ۶-۳- پوشش سگمندی همراه با درزگیر ۱۰۰
- شکل ۶-۴- درزگیر در حالات الف) باز - ب) فشرده ۱۰۰
- شکل ۶-۵- نمودار نیرو - فاصله درزگیر ۱۰۱
- شکل ۶-۶- تست فشار آب درزگیر ۱۰۲
- شکل ۶-۷- مدل بیان‌کننده تراوش آب از ناپیوستگی به درون ملات پشت سگمنت ۱۰۵
- شکل ۶-۸- به کارگیری روش انجماد زمین در حفر تونل هلندساز ۱۰۹

شکل ۶-۹- تزریق تحکیمی از تونل در توده سنگ ۱- درزه با فشار آب بالا ۲- نواحی تزریق شده ۳-

۱۱۱	جداره تونل
۱۲۰	مقطع ۱
۱۲۰	مقطع ۲
۱۲۱	مقطع ۳
۱۲۱	مقطع ۴
۱۲۲	مقطع ۵
۱۲۲	مقطع ۶
۱۲۳	مقطع ۷
۱۲۳	مقطع ۸
۱۲۴	مقطع شماره ۹
۱۲۴	مقطع ۱۰ با در نظر گرفتن گسل
۱۲۵	مقطع ۱۱
۱۲۶	خطوط تراوش در مقطع ۱
۱۲۶	خطوط تراوش در مقطع ۲
۱۲۷	خطوط تراوش در مقطع ۳
۱۲۷	خطوط تراوش در مقطع ۴
۱۲۸	خطوط تراوش در مقطع ۵
۱۲۸	خطوط تراوش در مقطع ۶
۱۲۹	خطوط تراوش در مقطع ۷
۱۲۹	خطوط تراوش در مقطع ۸
۱۳۰	خطوط تراوش در مقطع ۹
۱۳۰	خطوط تراوش در مقطع ۱۰ (بدون در نظر گرفتن گسل)
۱۳۱	خطوط تراوش در مقطع ۱۰ (با در نظر گرفتن گسل)

۱۳۱	خطوط تراوش در مقطع ۱۱
۱۳۲	مقطع ۱
۱۳۲	مقطع ۲
۱۳۳	مقطع ۳
۱۳۳	مقطع ۴
۱۳۴	مقطع ۵
۱۳۴	مقطع ۶
۱۳۵	مقطع ۷
۱۳۵	مقطع ۸
۱۳۶	مقطع ۹
۱۳۶	مقطع ۱۰ با در نظر گرفتن گسل
۱۳۷	مقطع ۱۰ بدون در نظر گرفتن گسل
۱۳۷	مقطع ۱۱
۱۳۸	مرحله شروع حفاری و مونتاژ دستگاه
۱۳۸	پوشش سگمندی هگزاگونال مورد استفاده در تونل
۱۳۹	نوع قالب و کارگاه تولید پوشش سگمندی
۱۳۹	دشواری عملیات اجرائی به دلیل تراوش شدید آب و نفوذ گاز در تونل

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- تغییرات فشار گمانه در پنج مرحله تست لوژان ۲۲
- جدول ۲-۲- نتایج تست لوژان و ویژگی‌های توده سنگ ۲۴
- جدول ۳-۲- پنج الگوی رفتاری ناپیوستگی ۲۶
- جدول ۱-۳- روابط تحلیلی به منظور تخمین تراوش پایدار به درون تونل ۳۵
- جدول ۲-۳- روابط تحلیلی و تعدیل آن به کمک رگرسیون تک متغیره ۳۷
- جدول ۱-۴- مهمترین ویژگی‌های تونل انتقال آب زاگرس- قطعه دوم ۵۲
- جدول ۲-۴- مجموعه لیتولوژیکی شناسایی شده در مسیر تونل ۵۶
- جدول ۳-۴- خصوصیات ماده سنگ در واحدهای مختلف ۵۷
- جدول ۴-۴- سیستم درزه‌داری در مقاطع مدلسازی شده ۵۸
- جدول ۵-۴- شاخصه‌های مهم هیدرولیکی با توجه به نام و مترائ زون در طول پروفیل تونل ۶۶
- جدول ۱-۵- ویژگی سیستم درزه در مقطع ۵ ۷۳
- جدول ۲-۵- جزئیات مربوط به سیستم درزه‌داری سه مقطع اول ۷۷
- جدول ۳-۵- جزئیات ناپیوستگی در سه مقطع دوم ۷۸
- جدول ۴-۵- مقایسه نرخ تراوش در روش‌های مختلف (لیتر در ثانیه) ۷۹
- جدول ۵-۵- ویژگی ساختار توده سنگ در ۶ مقطع مورد بررسی ۸۰
- جدول ۶-۵- ویژگی سیستم درزه در ۵ مقطع حفر نشده ۸۳
- جدول ۷-۵- محاسبه نرخ تراوش در مقاطع حفر نشده (لیتر در ثانیه) ۸۴
- جدول ۸-۵- شاخصه‌های تراوشی در مقطع ۵ ۸۵
- جدول ۹-۵- تغییرات فاصله‌داری سیستم درزه ۸۷
- جدول ۱۰-۵- محاسبه نرخ تراوش در سه مرحله تغییرات شیب (حالت اول) ۸۹
- جدول ۱۱-۵- محاسبه نرخ تراوش در سه مرحله تغییرات شیب (حالت دوم) ۹۰
- جدول ۱۲-۵- تغییرات تراوش در حضور سه دسته درزه ۹۱

جدول ۵-۱۳- تغییرات تراوش در مقطع ۵ با فاصله داری ثابت ۹۲

جدول ۵-۱۴- مقادیر پیش بینی تراوش بر اساس مدل سازی عددی ۹۳

جدول ۶-۱- فشار تراوش محاسبه شده در مقاطع مختلف ۱۰۳

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

جریان و فشار آب زیرزمینی از عوامل مخرب و تاثیرگذار در ناپایداری تونل و دیگر فضاهای زیرزمینی است که بایستی قبل از شروع مرحله حفر مورد شناسایی قرار گیرد. تخمین دقیق مقدار آب ورودی به تونل ممکن نیست که از دلایل آن می توان به عدم امکان بررسی دقیق ساختارهای زمین شناسی همجوار تونل اشاره کرد. به عنوان مثال، عدم تشخیص حضور حفرات ناشی از انحلال آهک کارستی می تواند باعث تراوش شدید در روند حفاری شود.

به طور کلی هر فضای زیرزمینی که در بالای سطح ایستابی حفر شود از پایداری بیشتری برخوردار است. زیرا تنها تراوش موقت و فصلی ناشی از بارش و آب های سطحی ممکن است وجود داشته باشند اما در شرایطی که تونل در زیر سطح ایستابی قرار گیرد، بسته به نوع ساختار دربرگیرنده تونل و میزان نفوذپذیری آن، تراوش آب به صورت دائمی خواهد بود.

تراوش آب زیرزمینی اثرات منفی عدیده ای را در پی خواهد داشت که مهمترین آنها شامل موارد زیر است

۱. ایجاد مزاحمت در زمان حفر تونل
۲. اعمال فشار به پوشش تونل و احتمال بروز ناپایداری
۳. شستشو و انحلال تدریجی مواد در امتداد درزه و سطوح ضعیف و در نتیجه افزایش آب دهی
۴. پایین افتادن سطح آب زیرزمینی و در نتیجه تخریب محیط زیست، خشک شدن چشمه ها و

نشست سطح زمین

۱-۲- ضرورت و سابقه انجام تحقیق

در بیشتر پروژه های حفر تونل، ماده سنگ تقریباً نفوذ ناپذیر فرض شده و جریان اصلی آب به تونل از طریق ناپیوستگی ها و درزه های موجود در توده سنگ در نظر گرفته می شود. این ساختارها را می توان به

دو دسته منفرد و توزیع شده تقسیم کرد (معماریان ۱۳۸۵).

ساختارهای منفرد در حقیقت منابع محلی، غیر معمول و نقطه‌ای تراوش شدید آب به درون تونل هستند که شامل مجاری لاوا، گسل‌ها، حفرات انحلالی و نواحی تغییر لایه می‌باشند. ساختارهای منفرد می‌توانند منبع ایجاد تراوش آب تا هزاران لیتر بر دقیقه باشند اما وجود آنها چندان معمول نیست. تخمین تراوش آب از طریق ساختارهای منفرد به راحتی ممکن نیست و بیشتر تلاش‌هایی که در زمینه تعیین نرخ تراوش آب انجام شده است شامل چنین مواردی نمی‌گردد. از سوی دیگر دسته درزه‌ها به صورت ساختارهای توزیع شده در کل توده سنگ پراکنده شده و معمولاً در دسته‌های تقریباً موازی ایجاد می‌شوند که تراوش آب در محیط درزه‌دار تابع ویژگی‌های مختلفی از آن نظیر بازشدگی، جهت‌داری و غیره می‌باشد.

محاسبه تراوش آب به درون تونل به طور معمول به سه روش تحلیلی، تجربی و عددی صورت می‌گیرد. در حل این مسئله به روش تحلیلی برای ایجاد یک ارتباط ریاضی بین پارامترهای موجود در مسئله و ارائه یک فرمول، فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که از جمله آن می‌توان به پیوستگی محیط اشاره کرد. در بسیاری از شرایط این فرض در محیط ناپیوسته باعث ایجاد خطا و پاسخ نادرست خواهد شد.

روش تجربی به کمک نمودار هوور^۱ را می‌توان به عنوان تنها روش حل تجربی بدون مسئله تراوش به درون تونل دانست. این روش وابستگی شدیدی به مقدار نفوذپذیری به دست آمده از آزمایش‌های میدانی دارد. از سوی دیگر مقادیر بیان شده در نمودار هوور مربوط به چند تونل مختلف می‌باشد که شرایط خاص و نفوذپذیری‌های شدید در آن دیده نمی‌شود (Chen 2010).

^۱ Heuer

۱-۳- روش انجام تحقیق

تونل مورد مطالعه (تونل بلند زاگرس - قطعه دوم) دارای محیطی درزه‌دار با تراوش شدید آب می‌باشد. مطالعات انجام شده به منظور تخمین تراوش آب به روش‌های تحلیلی و تجربی در مرحله پیش از حفر، باعث ایجاد دیدگاه نادرست از نظر پیش‌بینی تراوش آب در تونل شده و روند حفر را با چالش‌های گوناگون مواجه کرده است. از این منظر، مطالعه پیش رو به بررسی و مدلسازی هیدرولیکی توده‌سنگ اطراف تونل انتقال آب زاگرس (قطعه دوم) به روش المان مجزا می‌پردازد. این تحقیق بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی^۱ تکمیلی صورت گرفته توسط مشاور همکار طرح انجام می‌شود. لازم به ذکر است که فرضیات و ملاحظات در مراحل انجام تحقیق در نظر گرفته شده که مهمترین آن به شرح زیر است:

۱. میزان نفوذ آب به تونل متأثر از سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری توده سنگ درونگیر تونل است.
۲. نفوذپذیری توده سنگ تنها به درزه‌های موجود در آن بستگی داشته و از نفوذپذیری سنگ بکر صرف نظر شده است.
۳. درزه‌های موجود در سنگ متأثر از ساختارهای اصلی زمین‌شناسی منطقه است.
۴. تراوش پیش‌بینی شده در مقاطع مختلف، ناشی از درزه‌های سنگی است.
۵. جریان حاکم بر نفوذ آب به تونل پایدار در نظر گرفته شده است.

۱-۴- ساختار پایان نامه

در فصل اول این مطالعه، مسئله مورد تحقیق، ضرورت و روش انجام آن و نیز فرضیه‌های اصلی مورد استفاده در ساختار کلی پایان تشریح شده است.

^۱ Hydrogeology

فصل دوم اصول حرکت آب‌های زیرزمینی در توده‌سنگ درزه‌دار را مورد بحث قرار داده و نفوذپذیری درزه، روش محاسبه و پارامترهای موثر در آن نیز در این فصل ارائه خواهد شد. در فصل سوم ابتدا اصول تراوش آب به درون تونل بررسی و در ادامه روش‌های مرسوم در محاسبه و تخمین میزان تراوش آب به درون تونل از جنبه تحلیلی، تجربی و عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل چهارم ضمن معرفی قطعه دوم تونل بلند زاگرس، نتایج مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بدست آمده بررسی خواهد شد. در فصل پنجم با توجه به ویژگی‌های هیدرولیکی توده‌سنگ، مقادیر تراوش بر اساس روش‌های تحلیلی و تجربی محاسبه و در ادامه با مقادیر بدست آمده از روش عددی مقایسه خواهد شد. به منظور مطالعه تاثیر ویژگی‌های مختلف درزه نظیر بازشدگی، فاصله‌داری، جهت‌داری و نیز سطح آب زیرزمینی بر تراوش، تحلیل پارامتری انجام شده که نتایج آن در این فصل ارائه خواهد شد. در فصل ششم راهکارهای عملی و قابل کاربرد در پروژه مورد نظر بر اساس تحقیق و مطالعه پروژه‌های مشابه بیان می‌گردد. در این فصل جنبه‌های فنی راهکارهای مشروحه مد نظر خواهد بود و ممکن است راه حلی ارائه شود که از دید اقتصادی چندان حائز اهمیت نباشد.

در فصل هفتم نتایج مطالعات جمع بندی شده و نتیجه‌گیری کلی مباحث صورت می‌گیرد.

فصل دوم:

حرکت آب های زیر زمینی در سنگ درزه دار

۲-۱- مقدمه

بخش کوچک اما مهمی از آب‌ها، درزیر سطح زمین قرار گرفته‌اند. بحث شناخت آب‌های زیرزمینی (هیدروژئولوژی) بخشی از دانش وسیع آب‌شناسی (هیدرولوژی)^۱ است که به نحوه پیدایش، توزیع، حرکت و خصوصیات آب در زیرزمین پرداخته و روش‌های دستیابی به آن را مورد مطالعه قرار می‌دهد. به طور کلی می‌توان مطالعه آب‌های زیرزمینی را شامل بخشهای زیر دانست:

✓ نحوه تشکیل سفره آب زیرزمینی

✓ توزیع آب در زیر زمین

✓ مشخصات فیزیکی - شیمیایی آب زیرزمینی

✓ نحوه تغذیه، حرکت و تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی

✓ روشهای مطالعه، کاوش و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی

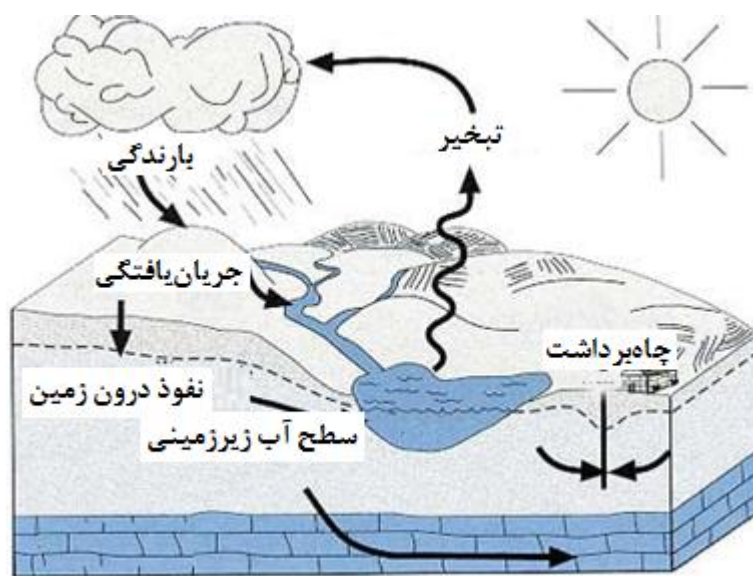
عدم توجه مهندسان به نقش مخرب آب‌های زیرزمینی و در نظر نگرفتن پارامترهای مناسب طراحی، عواقب وخیمی نظیر تخریب سدها، گسیختگی دامنه‌ها، ریزش در تونل‌ها و مانند آنرا به همراه خواهد داشت. در ادامه به منظور بررسی حرکت آب‌های زیرزمینی، نحوه تشکیل و محل قرارگیری آن مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۲- تشکیل آب‌های زیرزمینی

منشا اصلی آب زیرزمینی بارش است. آب باران ممکن است مستقیماً به زمین نفوذ کند یا آنکه ابتدا به

^۱ Hydrology

صورت رودخانه‌ای جریان یافته، یا به صورت آب ساکن و دریاچه درآمده و سپس به تدریج وارد زمین گردد. در مواردی نیز آب به صورت مصنوعی و با هدف تغذیه آب زیرزمینی و کاهش شوری آن به زمین تزریق می‌شود. در شکل ۱-۲ چرخه تولید آب زیرزمینی آورده شده است. در این شکل پس از بارندگی قسمتی از آب به درون زمین نفوذ می‌کند و قسمتی دیگر پس از جاری شدن به طور مجدد وارد چرخه تبخیر می‌گردد (Arnold and Allen, 1993; معماریان, ۱۳۸۵).



شکل ۱-۲- چرخه آب و تولید آب زیرزمینی (Arnold and Allen, 1993)

۳-۲- استقرار آب‌های زیرزمینی

آب جوی پس از ورود به زمین فضاها و منافذ موجود در خاک را اشغال می‌کند. در خاک‌ها اغلب خلل و فرج کوچک با هم در ارتباط هستند اما در سنگ‌ها، درزه و شکستگی‌ها فضای لازم برای سفره‌های زیرزمینی را فراهم می‌آورد. البته در برخی موارد نیز حرکت آب در سنگ، مربوط به حفرات سنگ و میزان ارتباط بین آنها است (Arnold and Allen, 1993; معماریان, ۱۳۸۵). به طور کلی منافذ موجود در سنگ‌ها را از نظر زمان تشکیل می‌توان به دو گروه اولیه و ثانویه تقسیم کرد:

الف) **منافذ اولیه:** منافذی که همزمان با تشکیل سنگ در آن به وجود آمده‌اند، مثل فضاهای ناشی از خروج گاز در یک سنگ آتشفشانی.

ب) **منافذ ثانویه:** بر اساس فرآیندهایی ایجاد شده‌اند که پس از بوجود آمدن سنگ موثر واقع شده است. از جمله می‌توان به درزه و شکستگی سنگ و یا فضاهای ناشی از انحلال ثانویه سنگ اشاره کرد.

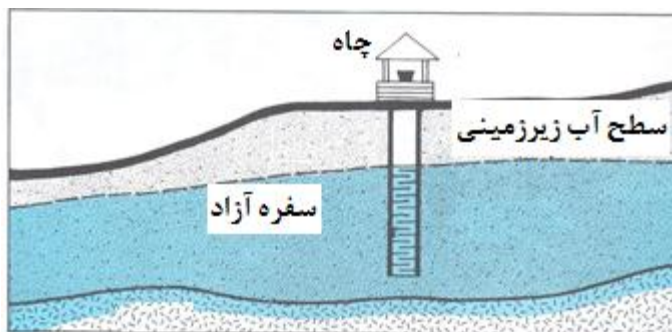
مقدار فضاهای خالی با کمیت تخلخل بیان می‌شود. بنابر تعریف، تخلخل درصد حجم فضاهای خالی موجود در سنگ و خاک، به کل حجم آن می‌باشد. مقدار تخلخل در سنگ‌ها به عوامل گوناگونی وابسته است. در سنگ‌های رسوبی دانه‌ای، تخلخل به شکل قرارگیری دانه‌ها، درجه جورشدگی، سیمان شدگی و تراکم سنگ بستگی دارد. در سنگ‌های متراکم، انحلال ثانوی قسمتی از کانیهای سنگ به وسیله آب‌های نفوذی و همچنین شکستگی‌هایی که بعداً در سنگ ایجاد می‌شود نیز در تخلخل موثرند. سنگ‌های رسی دارای تخلخل زیادی هستند اما از آن جهت که نفوذ ناپذیر به شمار می‌روند، نمی‌توانند بستر مناسبی برای ایجاد مخازن آب زیرزمینی باشند. بنابراین مواد رسوبی تخریبی، به خصوص رسوبات آبرفتی، از نظر تشکیل مخازن آب زیرزمینی بیشترین اهمیت را دارند (معماریان، ۱۳۸۵).

۲-۴- سفره آب زیرزمینی

سفره آب به لایه و یا منطقه‌ای قابل نفوذ در زیر سطح زمین گفته می‌شود که در آن آب می‌تواند جریان یابد. سفره آب همچنین باید قابلیت آبدهی خوبی داشته باشد. سطح ایستابی همواره افقی نیست و به طور طبیعی از منطقه تغذیه به طرف محل تخلیه دارای شیب است. به طور کلی شکل سطح ایستابی غالباً از شکل سطح زمین پیروی می‌کند اما برآمدگی‌های آن هموارتر است.

سفره‌های آب زیرزمینی به دو دسته سفره آزاد و سفره‌های تحت فشار تقسیم می‌شوند. در سفره‌های آزاد مقدار فشار در سطح ایستابی برابر با فشار اتمسفر است و در صورتی که در یک سفره آزاد، چاهی حفر

شود آب در چاه تا سطح ایستابی بالا خواهد آمد. شکل ۲-۲، سطح آب زیرزمینی در یک چاه آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- چاه در یک سفره آزاد (معماریان، ۱۳۸۵)

سفره تحت فشار و یا سفره آرتزین^۱ در محلی تشکیل می‌شود که آب زیرزمینی توسط لایه‌ای نسبتاً نفوذ ناپذیر از بالا محدود و در نتیجه تحت فشاری بیشتر از اتمسفر است. در این صورت اگر چاهی در میان آن حفر شود، سطح آب از محل طبیعی خود (یعنی زیر لایه نفوذ ناپذیر) بالاتر آمده و گاهی از دهانه چاه نیز فوران می‌کند. علت این مسئله آن است که محل تغذیه سفره، در ارتفاعی بالاتر از سطح فوقانی منطقه اشباع در محل حفر چاه قرار دارد. در سفره‌های تحت فشار به جای سطح ایستابی، سطح پیزومتریک^۲ را در نظر می‌گیرند. به بیان دیگر اگر چاهی در هر نقطه از سفره تحت فشار حفر شود ارتفاع صعود یا فوران آب چاه در آن نقطه بیانگر سطح پیزومتریک خواهد بود. در یک نقطه ممکن است چند سفره محصور شده با فشارهای مختلف به روی هم قرار گرفته باشد (Arnold and Allen, 1993).

۲-۵- نحوه حرکت آب‌ها در زیرزمین

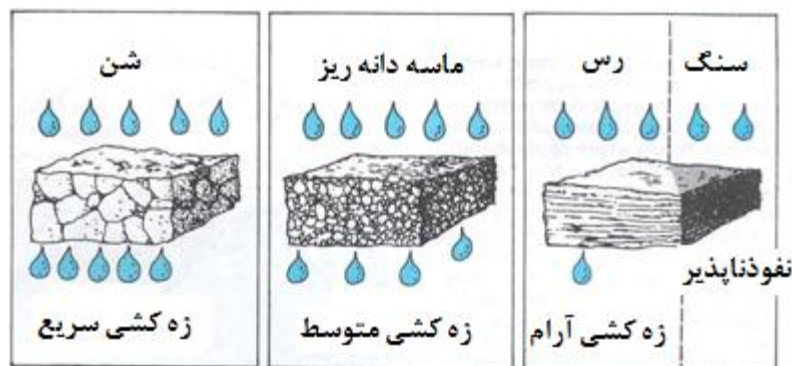
آب به طور طبیعی تحت اثر وزن خود از نقاط مرتفع به سمت نقاط پست حرکت می‌کند. حرکت افقی

¹ Artesian

² Piezometric

آبها در زیر زمین اغلب بسیار آهسته تر از رودخانه‌هاست، به نحوی که سرعت آب در رودخانه‌ها را با متر بر ثانیه می‌سنجند و این در حالی است که سرعت حرکت آبها در زیرزمین با واحدهایی نظیر سانتی متر در روز و یا حتی سال سنجیده می‌شود. البته در برخی موارد مثل سنگ‌های آهکی، غارها و مجاری زیرزمینی وسیعی ناشی از انحلال به وجود می‌آید و آب زیرزمینی با سرعتی مشابه رودخانه‌های سطحی به جریان می‌افتد (معماریان، ۱۳۷۴).

نفوذپذیری قابلیت عبور آب از زمین است که علاوه بر اندازه فضاهای خالی سنگ و خاک به ارتباط بین آن فضاها نیز بستگی دارد. سنگی که تخلخل زیاد ولی نامرتب داشته باشد، غیر قابل نفوذ خواهد بود. به عنوان مثال رسها تخلخل ۵۰ درصدی دارند اما به دلیل ساختمان خاصشان، که از پولک‌های بسیار ریز کانی‌های رسی ساخته شده است، تقریباً غیر قابل نفوذ هستند. در حالیکه رسوبات شنی و ماسه‌ای با وجود تخلخل کم دارای نفوذپذیری بالایی هستند. شکل ۲-۳ بیان کننده ارتباط بین تخلخل و نفوذپذیری می‌باشد (Arnold and Allen, 1993).



شکل ۲-۳- ارتباط بین نفوذپذیری و تخلخل (Arnold and Allen, 1993)

در اغلب شرایط، نفوذپذیری سنگها تابعی از وضعیت درزه‌ها و شکستگی‌ها می‌باشد و از آنجا که این ویژگی‌ها نامنظم و بدون تداوم‌اند، برآورد نفوذپذیری با خطای قابل ملاحظه‌ای روبروست (Chen, 2010).

در تجزیه و تحلیل حرکت آب‌های زیرزمینی، مسیر واقعی پر پیچ و خم مولکول‌های آب از خلال منافذ رسوبات و درز و شکاف سنگ‌ها را به صورت مسیرهای صافی در نظر می‌گیرند، به طوری که گوئی مولکول‌های آب مستقیماً از درون ذرات جامد عبور می‌کنند. خطوط صاف مسیر حرکت مولکول‌های آب را خط جریان می‌نامند (Chen,2010).

با استفاده از ارتفاع سطح آب در چاه‌هایی که در یک سفره حفر شده‌اند، می‌توان نقشه خطوط تراز سطح ایستابی را تهیه کرد که این نقشه‌ها در سفره‌های تحت فشار، برای سفره‌های پیزومتریک نیز قابل رسم است. خطوط تراز آب‌های زیرزمینی را خطوط هم پتانسیل می‌گویند. جهت جریان آب زیرزمینی همواره عمود بر خطوط هم پتانسیل است و می‌توان آن را توسط ردیاب نیز مشخص کرد. بدین منظور مقداری مواد رنگی، نمکی و یا رادیواکتیو را به آب چاه افزوده و زمان مشاهده آن در چند چاه مجاور مشخص می‌شود. با در دست داشتن فاصله چاه‌ها از یکدیگر جهت و سرعت حرکت آب‌های زیرزمینی با تقریب به دست می‌آید. لازم به ذکر است، جهت جریان در سازندهای سنگ سخت وابسته به سیستم درزه‌داری و ویژگی‌های آن است. از این نظر، در توده سنگ‌ها جهت جریان به صورت محلی قابل بحث است (ساحل، ۱۳۸۶).

۲-۵-۱- ویژگی‌های هیدرودینامیکی سفره آب

آب شناسان با بررسی نحوه ورود آب زیرزمینی به چاه، به ویژه با استفاده از آزمایش پمپاژ و پایین رفتن سطح آب، برخی از مهمترین ویژگی‌های سفره آب را تعیین می‌کنند که این ویژگی‌ها به ضرایب هیدرودینامیکی معروفند و برخی از آنها به شرح زیر می‌باشد (معماریان، ۱۳۸۵؛ معماریان، ۱۳۷۴).

✓ **آبدهی ویژه^۱**: برابر نسبت حجم آب خروجی توسط نیروی گرانی به حجم کل نمونه در حالت اشباع

^۱ Specific Yield

می‌باشد.

✓ ضریب ذخیره (S)^۱: بیان کننده رابطه بین پایین رفتن سطح ایستابی با برداشت آب از سفره می‌باشد. این پارامتر در یک سفره آزاد برابر با آبدهی ویژه است که بدون بعد می‌باشد و مقدار آن در سفره‌های آزاد بیشتر از سفره‌های تحت فشار است.

✓ آبدهی مجاز: حداکثر مقدار برداشت سالیانه آب از سفره که نتیجه نامطلوب به همراه ندارد.

✓ نفوذپذیری^۲: بیان کننده میزان توانایی محیط در عبوردهی سیال می‌باشد که از نظر بعد مشابه با سرعت است.

✓ ضریب قابلیت انتقال (T)^۳: حجم آب عبوری از لایه ای آبدار در مقطعی به عرض واحد و به ضخامت لایه آبدار، در واحد زمان است. این کمیت را می‌توان از حاصلضرب نفوذپذیری در ضخامت سفره آب نیز به دست آورد.

در ادامه به منظور بررسی روند حرکت آب‌ها در سنگ درزه‌دار، مدل‌های تراوشی معرفی خواهد شد.

۲-۶- مدل‌های تراوش آب در سنگ درزه‌دار

از آنجا که تراوش در توده‌سنگ درزه‌دار تنها ناشی از درزه سنگ بوده و ماده سنگ نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود، لازم است به بررسی سازوکار درزه در گذردهی سیال پرداخته شود که برای این منظور ابتدا مفهوم نفوذپذیری بررسی می‌گردد.

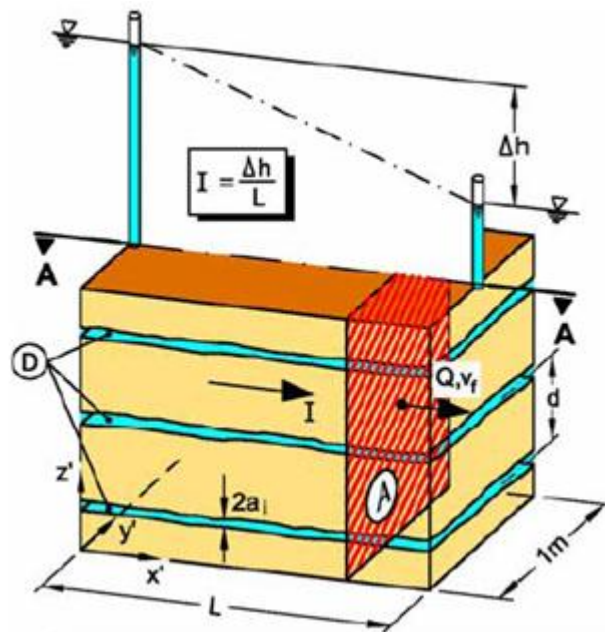
¹ Specific Retention

² Permeability

³ Transmissibility

۲-۶-۱- تعریف نفوذپذیری

با بررسی قوانین حرکت سیال در شکاف یک بعدی سنگ می‌توان نشان داد که اکثر جریان‌ها آرام بوده و شرایط جریان‌های مغشوش به طور نسبی هنگامی رخ می‌دهد که دهانه بازشدگی بزرگ و گرادیان هیدرولیکی نیز بالا باشد. به طور کلی، فرض جریان آرام در بحث مهندسی سنگ فرضی قابل قبول بوده و در اغلب اوقات قابل استناد است. برای بررسی سرعت تراوش (V_f) در سنگ درزه‌دار، با به کارگیری یک مدل همگن، بایستی میزان تخلیه (Q) را بر سطح مقطع عمود بر جهت جریان (A) تقسیم کرد. این سطح مقطع تنها دربرگیرنده ناپیوستگی نیست، بلکه شامل سنگ بکر نیز می‌شود، که به عنوان ناحیه با نفوذپذیری کم عمل می‌کند. شکل ۲-۴ بیان‌کننده حرکت سیال در توده سنگ درزه‌دار می‌باشد (Wittke and Druffel, 2006).



شکل ۲-۴- تراوش در توده سنگ با یک دسته درزه (Wittke and Druffel, 2006)

بر اساس قانون دارسی در خاک و یا سنگ سرعت وابسته به گرادیان هیدرولیکی (I) می‌باشد. ضریب این تناسب (K_d) به عنوان ضریب نفوذپذیری برای ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. هرگاه جریان در میان ناپیوستگی آرام در نظر گرفته شود، سرعت جریان متوسط در سرتاسر ناپیوستگی برابر مقداری متوسطی است که از رابطه ۱-۲ به دست می‌آید :

$$\bar{V}_f = K_d \cdot I \quad (1-2)$$

در این رابطه K_d به عنوان ضریب نفوذپذیری ناپیوستگی می‌باشد. میزان تخلیه به ازای هر متر که در میان ناپیوستگی جریان دارد به صورت ۲-۲ است :

$$Q = K_d \cdot I \cdot n \cdot 2a_i \quad (2-2)$$

در این رابطه Q میزان تخلیه از توده سنگ، K_d نفوذپذیری ناپیوستگی، $2a_i$ بازشدگی ناپیوستگی، I گرادیان هیدرولیکی و n تعداد ناپیوستگی که تخلیه آب از درون آن صورت می‌گیرد. از آنجا که سنگ بکر به صورت نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است، سطح مقطعی که تخلیه در آن صورت می‌گیرد به صورت رابطه ۳-۲ است :

$$A = n \cdot 2a_i + n \cdot (d - 2a_i) = n \cdot d \quad (3-2)$$

در این رابطه d مقدار فاصله‌داری درزه می‌باشد. با توجه به این روابط سرعت تراوش برابر مقدار ۴-۲ خواهد بود :

$$\bar{V}_f = \frac{Q}{A} = K_d \frac{2a_i}{d} I \quad (4-2)$$

و ضریب نفوذپذیری K_D برای دسته درزه به صورت رابطه ۵-۲ معرفی می‌شود:

$$K_D = K_d \frac{2a_i}{d} \quad (5-2)$$

این رابطه بیانگر ارتباط نفوذپذیری درزه و نفوذپذیری کل توده سنگ می‌باشد. چنانچه میزان بازشدگی دهانه ناپیوستگی و همینطور فاصله بین ناپیوستگی‌ها ثابت نباشد در روابط بالا مقادیر متوسط آنها

جایگزین می‌شود (Wittke and Druffel,2006).

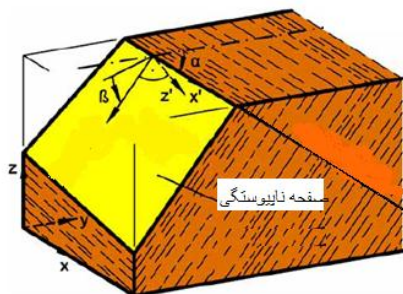
از تقسیم زبری مطلق^۱ (فاصله بین عمیق‌ترین تورفتگی و بزرگترین برجستگی در بدنه صفحه درزه) بر قطر هیدرولیکی درزه (به میزان دو برابر بازشدگی درزه) کمیتی با عنوان زبری نسبی^۲ (r) تعریف می‌شود. در شرایطی که جریان آرام باشد، رابطه ۶-۲ برای K_d بیان می‌گردد:

$$k_d = \begin{cases} \frac{g(2a_i)^2}{12\vartheta}; r \leq 0.032 \\ \frac{g(2a_i)^2}{12\vartheta} \cdot \frac{1}{1+8,8(r)^{1.5}}; r > 0.032 \end{cases} \quad (6-2)$$

در این رابطه g بیانگر شتاب ثقل با واحد متر بر مجذور ثانیه و ϑ ویسکوزیته سینماتیکی با واحد مترمربع بر ثانیه در SI است (Wittke and Druffel,2006).

نفوذپذیری در اصل یک تانسور مرتبه دو (K_{ij}) می‌باشد. با فرض همگن بودن ویژگی‌های درزه، با توجه به شکل ۵-۲ اگر α و β به ترتیب به عنوان امتداد و شیب صفحه درزه بیان شوند آنگاه تانسور نفوذپذیری به صورت رابطه ۷-۲ بیان خواهد شد:

$$K = K_D \begin{bmatrix} 1 - \cos^2\alpha \cdot \sin^2\beta & \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \sin^2\beta & -\cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta \\ \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \sin^2\beta & 1 - \sin^2\beta \cos^2\alpha & \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta \\ -\cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta & \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta & \sin^2\beta \end{bmatrix} \quad (7-2)$$



شکل ۵-۲- شیب و امتداد صفحه درزه (Wittke and Druffel,2006)

¹ Absolute Roughness

² Relative Roughness

در مواردی که m دسته ناپیوستگی وجود داشته باشد، تانسور نفوذپذیری توده سنگ از مجموع تانسورهای هردسته از ناپیوستگی‌ها محاسبه می‌گردد (رابطه ۲-۸) (Wittke and Druffel, 2006).

$$[K_D] = \sum_{i=1}^m [K_{Di}] \quad (۲-۸)$$

با توجه به اینکه تغییر بازشدگی درزه تاثیر بسیاری بر نفوذپذیری آن دارد در ادامه تاثیر فشار هیدرولیکی بر بازشدگی درزه بحث خواهد شد.

۲-۶-۲- رفتار هیدرومکانیکی درزه‌ها

شدت جریان آب در درزه وابسته به بازشدگی بوده که توسط تنش نرمال موثر در سراسر درزه کنترل شده و به فشار آب درون درزه وابسته است. وابستگی بین بازشدگی درزه و تنش نرمال موثر توصیفی غیر خطی دارد که توسط محققین بسیاری مورد بحث قرار گرفته است. ویژگی‌های تغییر شکل پذیری درزه سنگ با توجه به تاثیر محدوده تماس درزه‌ها، زبری سطح درزه، طبیعت پرکننده درزه و دیگر ویژگی‌های مکانیکی درزه شناخته می‌شود. در میان مدل‌های تجربی بین بازشدگی درزه (Δv_j) و تنش نرمال موثر (σ_n) مدل هایپربولیک که در رابطه ۲-۹ ارائه شده دارای بیشترین کاربرد است (Moon and Jeong, 2011).

$$\sigma_n = \frac{K_{in} \cdot \Delta v_j}{1 - \left(\frac{\Delta v_j}{V_{mc}} \right)} \quad (۲-۹)$$

این مدل تابعی از سختی اولیه نرمال درزه (K_{in}) که شیب اولیه نمودار (تنش نرمال موثر- بازشدگی) و بیشترین بازشدگی درزه (V_{mc}) به عنوان مجانب تابع در بیشترین مقدار تنش نرمال موثر درزه است (شکل ۲-۶).

از آنجا که سختی نرمال اولیه و بیشترین بازشدگی درزه هر دو تحت تأثیر ویژگی‌های الاستیک سنگ بکر هستند، ارتباط بین آنها توسط معادله ۲-۱۰ صورت می‌گیرد:

$$k_{in} = \frac{A}{v_{mc}^{1.33}} \quad (10-2)$$

در این رابطه A ثابتی در بازه [۵،۲۰] است. مقدار سختی اولیه نرمال بر حسب مگاپاسکال بر میکرومتر و مقدار حداکثر بازشدگی درزه با واحد میکرومتر سنجیده می‌شود (Moon and Jeong,2011).

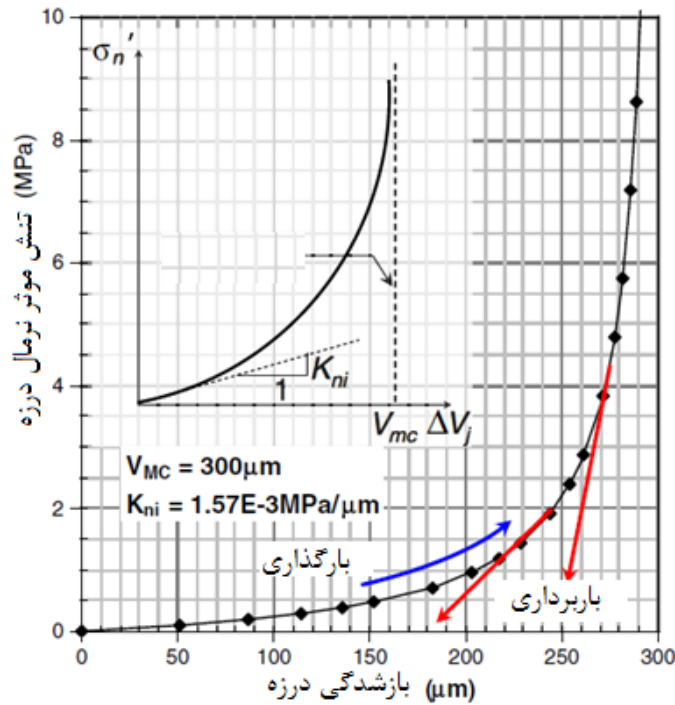
در حالت ایده‌آل، می‌توان جریان در یک درزه زیر موجدار را مانند جریان در یک درزه صاف و مسطح در نظر گرفت. اگر این بازشدگی با صفحات موازی فرض شود، چنانچه یک روزنه هیدرولیکی a_h ، به عنوان متوسط مقدار بازشدگی برای محاسبه تاثیر سطح زبری و پیچیدگی جریان معرفی شود، آنگاه نرخ جریان در بین درزه به ویژگی‌های سطح درزه وابسته است که توسط معادله ۲-۱۱ (قانون کوبیک) محاسبه می‌گردد (Fernandez and Moon,2010).

$$q_j = \frac{a_h^3 \gamma_w i}{12\mu} \quad (11-2)$$

در رابطه (۱۱-۲) i بیانگر گرادیان هیدرولیکی در جهت جریان، μ ویسکوزیته دینامیکی (با واحد پاسکال در ثانیه) و γ_w وزن واحد حجم آب می‌باشد. محاسبه روزنه هیدرولیکی (با واحد متر) و یا a_h از رابطه ۲-۱۲ بدست می‌آید.

$$a_h = a_{h0} - f \Delta v_j \quad (12-2)$$

در رابطه (۱۲-۲) f بیانگر فاکتور کاهش بازشدگی درزه و اندیس صفر برای بازشدگی بیانگر شرایط اولیه می‌باشد (Fernandez and Moon,2010).



شکل ۲-۶- تغییرات تنش نرمال موثر و بازشدگی درزه (Fernandez and Moon, 2010)

۲-۷- آزمایش‌های مرسوم در محاسبه نفوذپذیری سنگ درزه‌دار

از آنجا که امکان پیاده‌سازی شرایط صحرائی در آزمایش‌های نفوذپذیری در مقیاس آزمایشگاهی وجود ندارد، معمولاً این آزمایش‌ها تخمین‌های نادرست و دور از واقعیت ارائه می‌کنند. بنابراین، تست‌های درجای نفوذپذیری از مقبولیت بالاتری برخوردارند (Hsu and Lo, 2008).

در انجام آزمایش‌های نفوذپذیری در سنگ درزه‌دار همواره فرضیات آرام بودن جریان و همسانگردی محیط برقرار است. حضور درزه‌ها تاثیر اساسی بر تخمین نفوذپذیری سنگ دارد و در حالتی که این درزه‌ها باز و بزرگ باشد، تخمین نسبتاً درستی از نفوذپذیری بدست خواهد آمد. در ادامه به منظور بررسی روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری، دو مورد از مهمترین آزمایش‌های صحرائی مورد بحث قرار خواهد گرفت (Hsu and Lo, 2008).

۲-۷-۱- آزمون پمپاژ

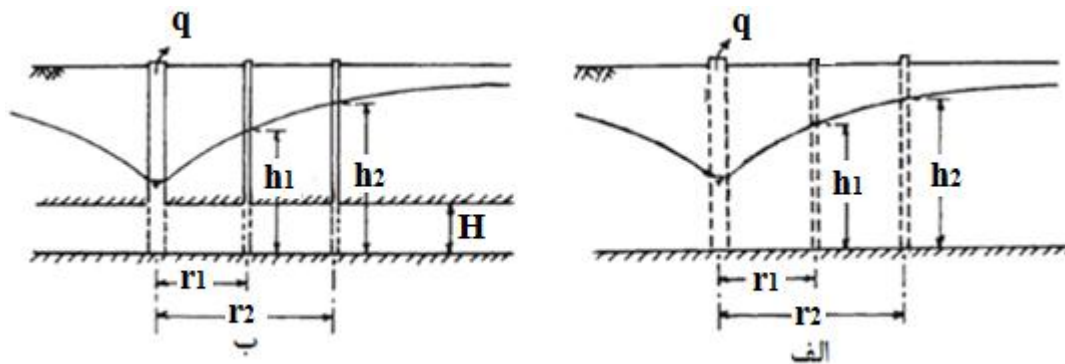
آزمون پمپاژ از جمله آزمون‌های مشترک در توده سنگ و خاک برای محاسبه نفوذپذیری می‌باشد. در این آزمایش ابتدا چاهی حفر می‌گردد و سپس با آغاز پمپاژ و استخراج آب از چاه، سطح آب زیرزمینی یا پیزومتریک، در اطراف چاه به تدریج افت می‌کند و فروافتادگی مخروطی شکلی ایجاد می‌شود. بر اثر پایین رفتن سطح آب در اطراف چاه، جریان طبیعی آب زیرزمینی تغییر می‌کند و از اطراف با سرعتی بیشتر به سمت چاه جریان می‌یابد. در هر زمان منطقه‌ای از اطراف چاه تحت تاثیر پمپاژ قرار می‌گیرد که به آن منطقه دایره تاثیر و شعاع آن را شعاع تاثیر می‌گویند. بدیهی است که اگر چاهی در منطقه تاثیر چاه دیگر قرار بگیرد از آبدهی آن کاسته می‌شود. شکل ۲-۷ نشان دهنده روند پمپاژ و تشکیل مخروط افت می‌باشد (معماریان، ۱۳۸۵).

با توجه به مشخصات هیدرولیکی سفره آب و مقدار دبی آب استخراجی از چاه، مدتی پس از آغاز پمپاژ، سطح پایین رونده آب درون چاه ثابت می‌شود. در این حالت سطح آب درون چاه سطح دینامیک و فاصله عمودی بین سطح ایستابی اولیه (سطح استاتیک) و کف مخروط افت تثبیت شده (سطح دینامیک) افت کلی نامیده می‌شود. در صورتی که مقدار پایین رفتن سطح ایستابی در فواصل زمانی مشخص اندازه گرفته شود، آنگاه در زمان مشخصی سطح ایستابی تقریباً ثابت می‌گردد. در این حالت، مقدار آب ورودی به چاه (قدرت آبدهی) برابر با مقدار آب پمپاژ شده است. با قرار دادن نتایج آزمایش‌های پمپاژ در رابطه ۲-۱۳ و ۲-۱۴ مقدار متوسط نفوذپذیری محاسبه خواهد شد. با توجه به شکل ۲-۷ (الف)، چنانچه چاه برداشت در سفره آب معمولی حفر شود و میزان برداشت آب از آن به طور متوسط برابر q باشد و سطح آب در دو گمانه مشاهده‌ای با فواصل r_1 و r_2 نسبت به چاه برداشت به ترتیب برابر با h_1 و h_2 باشد، آنگاه متوسط نفوذپذیری توده سنگ اطراف چاه با رابطه ۲-۱۳ بیان خواهد شد (Craig, 1984).

$$k = \frac{2.3q \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (13-2)$$

چنانچه همانند شکل ۷-۲ (ب)، چنانچه حفر چاه در یک سفره تحت فشار به ضخامت H صورت بگیرد آنگاه نفوذپذیری با رابطه ۱۴-۲ بیان خواهد شد .

$$k = \frac{2.3q \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi H(h_2 - h_1)} \quad (14-2)$$



شکل ۷-۲-آزمون پمپاژ- الف) سفره آب معمولی ب) سفره آب تحت فشار (Craig,1984)

۲-۷-۲- آزمون لوژان^۱

تغییرات تنش در توده سنگ و ناپیوستگی آن تاثیر بسزایی در تغییرات نفوذپذیری خواهد داشت. آزمون لوژان که به آزمون پکر^۲ نیز معروف است، از متداولترین آزمون‌های محاسبه نفوذپذیری در توده‌سنگ بوده که نتایج آن وابسته به میزان بازشدگی درزه‌ها و در نتیجه تغییرات تنش در توده سنگ است. در این آزمون پس از حفر گمانه در توده سنگ، آب با فشاری ثابت به درون محدوده‌ای مجزا از توده سنگ تزریق می‌شود. این جدایش توسط پکر صورت می‌گیرد که ابزاری لاستیکی است و قابلیت تورم

¹ Lugeon

² Packer

توسط آب یا هوا را داشته و امکان انسداد گمانه را فراهم می‌کند. قبل از شروع آزمایش ابتدا مقدار فشار ماکزیمم (P_{max}) تعریف می‌شود و سپس آزمون به صورت مرحله‌ای در پنج نوبت انجام می‌شود. در هر مرحله پمپاژ آب برای ۱۰ دقیقه با فشار ثابت صورت می‌گیرد. جدول ۱-۲ بیانگر مراحل تغییر فشار در پنج مرحله آزمایش لوژان است (Adams and Roberts,2010;Gattinoni and Scesi,2009;Hsu and Lo,2008).

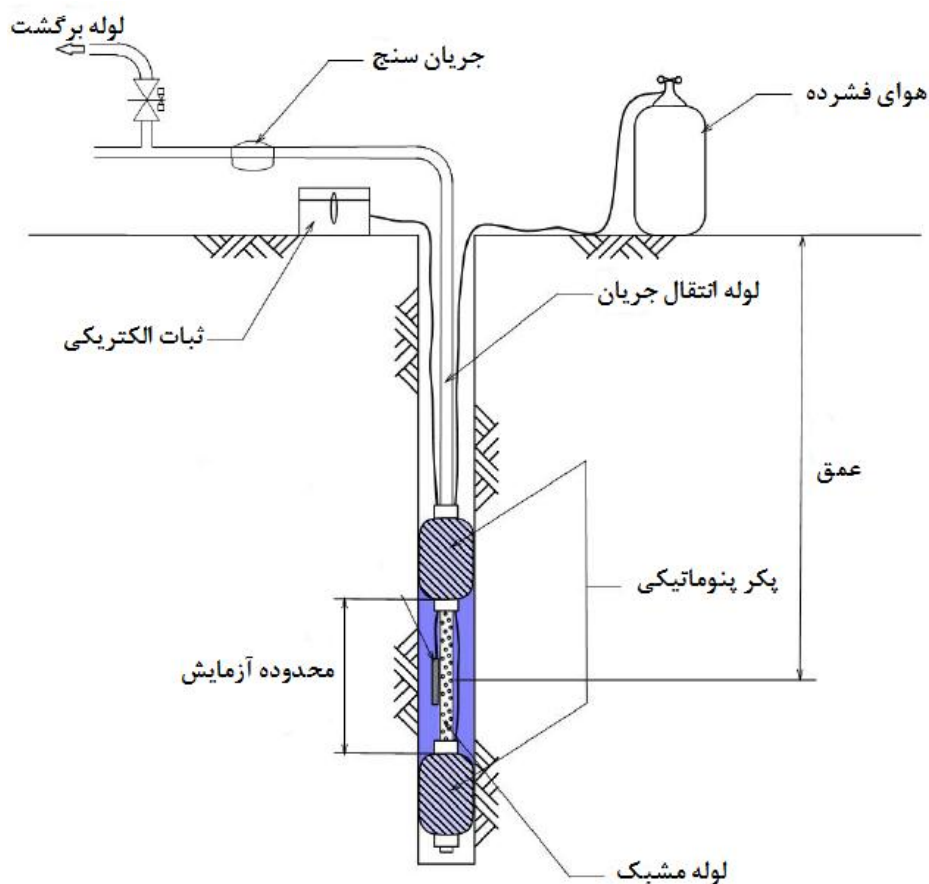
جدول ۱-۲- تغییرات فشار گمانه در پنج مرحله تست لوژان (Adams and Roberts,2010)

مرحله	فشار	شرح
۱	$0.5p_{max}$	کم
۲	$0.75p_{max}$	متوسط
۳	P_{max}	حداکثر
۴	$0.75p_{max}$	متوسط
۵	$0.5p_{max}$	کم

در فرآیند انجام آزمایش، در هر مرحله مقدار فشار آب و نرخ جریان در هر دقیقه ثبت می‌شود و سپس مقادیر متوسط این دو کمیت برای هر مرحله محاسبه شده و برای محاسبه نفوذپذیری آن مرحله به کار می‌رود. مقدار فشار حداکثر و رژیم فشار اعمالی در این آزمایش با توجه به تجربه افراد و شرایط محل تعیین می‌گردد. فشار حداکثر بایستی به گونه ای انتخاب شود تا موجب شکست هیدرولیکی^۱ در سنگ

^۱ Hydraulic Fracture

نشود. به طور معمول این مقدار فشار معادل یک مگاپاسکال بوده هرچند در مورد آزمایش‌های مربوط به فضاهای زیرزمینی فشار بالاتر از آن نیز لحاظ می‌گردد. طول مقطع این آزمایش به طور معمول پنج متر است. اما در صورت تغییرات شدید مشخصات هیدرولیکی سنگ به سه و حتی یک متر نیز کاهش خواهد یافت. شکل ۸-۲ طرح آزمایش لوژان را نشان می‌دهد (Adams and Roberts, 2010).



شکل ۸-۲- طرح آزمایش لوژان (Adams and Roberts, 2010)

با توجه به اطلاعات بدست آمده مقدار لوژان از رابطه ۱۵-۲ بدست خواهد آمد :

$$Lu = \alpha \times \frac{q}{l} \times \frac{p_0}{p} \quad (15-2)$$

در این رابطه مقدار α ثابت است و به سیستم اندازه‌گیری دیگر پارامترها وابسته است. به طوریکه اگر

سیستم اندازه‌گیری آنها متریک باشد این ثابت برابر با یک و در صورتی که سیستم انگلیسی لحاظ شود این ثابت برابر ۱۲/۴۲ خواهد بود. مقدار فشار مبنا p_0 و برابر یک مگاپاسکال خواهد بود. p , q و l به ترتیب معرف شدت جریان، فشار آب و طول محدوده آزمایش هستند. جدول ۲-۲ شرایط توده سنگ و مقادیر لوژان متناظر آن را بیان می‌کند (Adams and Roberts,2010).

جدول ۲-۲- نتایج تست لوژان و ویژگی‌های توده سنگ (Hsu and Lo,2008)

خطا در محاسبه لوژان	شرایط ناپیوستگی	نفوذپذیری (10^{-5} cm/s)	شرایط نفوذپذیری	دامنه مقادیر لوژان
۱>	کاملاً بسته	۱>	خیلی کم	۱>
۱>	بسته	۶-۱	کم	۵-۱
۱	موضعی کمی باز	۲۰-۶	کمتر از متوسط	۱۵-۵
۵	عموماً باز	۶۰-۲۰	متوسط	۵۰-۱۵
۱۰	شدیدا باز	۱۰۰-۶۰	شدید	۱۰۰-۵۰
۱۰۰<	در مجاورت حفره یا بازشدگی زیرزمینی	۱۰۰<	بسیار شدید	۱۰۰<

به منظور تحلیل رفتار مشاهده شده در محاسبه مقدار لوژان در فشارهای مختلف، پنج تقسیم بندی به

شرح زیر صورت گرفته است (Adams and Roberts,2010):

۱- جریان آرام^۱ : در این حالت نفوذپذیری مستقل از فشار آب به کار گرفته شده است. این رفتار از ویژگی‌های توده سنگ‌هایی است که نفوذپذیری پایینی دارند. ($Lu < 4$)

۲- جریان آشفته^۲ : نفوذپذیری توده سنگ با افزایش فشار آب کاهش می‌یابد. این رفتار در توده سنگ‌هایی که به صورت محلی دارای ترک‌های باز تا متوسط هستند مشاهده می‌شود.

۳- اتساع^۳ : این رفتار برخی اوقات در فشار متوسط دیده می‌شود و در حالی اتفاق می‌افتد که فشار آب به کار گرفته شده بزرگتر از مقدار تنش حداقل توده سنگ باشد. این رفتار در مقاطعی که دارای شکستگی هستند باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود اما به هر حال تغییرات نفوذپذیری برگشت پذیر است.

۴- شستشو^۴ : در حین فرآیند آزمایش، نفوذپذیری بدون ارتباط با تغییرات مشاهده شده در فشار آب افزایش می‌یابد. این رفتار بیانگر آن است که نیروی تراوش یک تغییر برگشت ناپذیر را به توده سنگ وارد می‌کند که معمولاً باعث شستشوی پرکننده‌ها و جابجایی در ناپیوستگی خواهد شد.

۵- پرشدگی حفره^۵ : در این حالت بر خلاف حالت قبلی، نفوذپذیری بدون در نظر گرفتن تغییرات فشار کاهش پیدا می‌کند. این رفتار می‌تواند نشانه وقوع شرایط زیر باشد :

✓ آب به صورت تدریجی ناپیوستگی‌های غیر مقاوم و تک را پر می‌کند.

✓ آماس در ناپیوستگی‌ها رخ داده است.

✓ جریان ذرات به آرامی به درون ناپیوستگی رسوخ کرده و با ایجاد یک کیک لایه‌ای در اطراف آن باعث گرفتگی آنها شده است.

¹ Laminar Flow

² Turbulent Flow

³ Dilation

⁴ Wash Out

⁵ Void Filling

جدول ۲-۳ به طور خلاصه الگوهای رفتاری و مقادیر لوژان معرف را بیان می کند :

جدول ۲-۳- پنج الگوی رفتاری ناپیوستگی (Adams and Roberts,2010)

رفتار	مراحل فشار	الگوی لوژان	شرح	مقدار لوژان معرف
آرام			هیچیک از تمامی مقادیر لوژان با فشار آب متناسب نیستند.	متوسطی از تمامی مقادیر لوژان در هر مرحله ثبت می شود.
آشفته			با افزایش فشار آب مقدار لوژان کاهش می یابد.	مقدار لوژان متناسب با بیشترین فشار آب در نظر گرفته می شود.
اتساع			مقدار لوژان متناسب با فشار تغییر می کند.	بیشترین مقدار لوژان ثبت می شود.
شستشو			با پیشرفت فرآیند آزمایش مقدار لوژان افزایش می یابد.	مقدار لوژان آخرین مرحله ثبت می شود.
پرشدهی حفرات			با پیشرفت فرآیند آزمایش مقدار لوژان کاهش می یابد.	مقدار لوژان اولین مرحله ثبت می شود.

این آزمون به عنوان بهترین روش ارزیابی وضعیت هیدرولیکی یک مقطع سنگی شناخته شده و از مزایای اصلی آن سادگی در اجرا، اندازه گیری آسان پارامترها، عدم وجود محاسبات پیچیده و سادگی تفسیر نتایج آن است. از مهمترین معایب آن می توان به دقت کم و فقدان جزئیات در نتایج اشاره کرد. به عنوان مثال، در این آزمون مشخصات هیدرولیکی پراهمیتی چون میزان بازشدگی درزه‌ها ارائه نشده و دیگر اینکه محدوده تحت تاثیر در اطراف چاه محدود بوده و در نتیجه نفوذپذیری بدست آمده معرف کل توده سنگ نیست. علیرغم معایب مذکور، این آزمون با توجه به مزایای منحصر بفرد خود، تاکنون به عنوان پر کاربردترین آزمون برجا به منظور ارزیابی وضعیت هیدرولیکی توده سنگ در مطالعات ژئوتکنیکی، به خصوص مطالعات تزریق پذیری شناخته شده است (حسن پور، ۱۳۸۲ و مهدوی نژاد، ۱۳۹۰).

۲-۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل با بیان کلیاتی در رابطه با آب‌های زیرزمینی، به بررسی نحوه تشکیل آب‌های زیرزمینی و حرکت آن پرداخته شد. در بررسی سازوکار حرکت آب‌های زیرزمینی، نگاه ویژه به محیط سنگ درزه دار می‌باشد. میزان نفوذپذیری توده سنگ بیشتر تحت تاثیر مشخصات شکستگی‌های سنگ نظیر بازشدگی و جهت‌داری می‌باشد که وجود اطلاعات دقیق از این پارامترها امکان ایجاد یک تخمین مناسب از نفوذپذیری را فراهم خواهد کرد. آزمایش‌های لوژان و پمپاژ از معمولترین روش‌ها در محاسبه نفوذپذیری توده سنگ است که در این فصل به روش انجام و بررسی نتایج آنها اشاره شده است.

فصل سوم:

روش های متداول محاسبه تراوش

آب ورودی به تونل

۳-۱- مقدمه

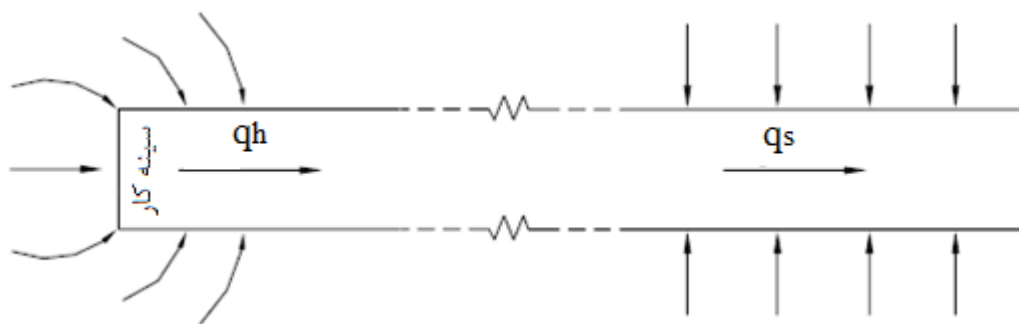
در این فصل ضمن بررسی روش‌های بیان شده به منظور تخمین میزان آب جریان یافته به درون تونل، مدل‌های مفهومی، فرضیات و معادلات حاکم بررسی خواهد شد.

پیش‌بینی میزان تراوش به درون تونل یکی از ضروری‌ترین مباحث در مهندسی فضا‌های زیرزمینی است که بر مبنای آن نوع سیستم کنترل تراوش مشخص خواهد شد. از سوی دیگر ارزیابی دقیق تراوش به درون تونل در ضمن ساخت، مسئله‌ای چالش برانگیز است چراکه ممکن است امکان تعیین تمام فاکتورهای موثر بر تراوش به طور دقیق فراهم نگردد.

در تراوش شدید چند صد تا چند هزار لیتر بر دقیقه، دشواری شرایط در محیط کار از بازدهی گروه اجرائی به شدت کاسته و نرخ پیشروی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر کاهش روند خروج باطله، باعث افزایش مدت زمان از کار افتادگی تجهیزات مکانیکی می‌گردد. بنابراین به نظر می‌رسد تخمین تراوش در مقاطع مختلف تونل به افزایش ایمنی، سرعت حفر و کاهش هزینه‌های جاری کمک کند. بدین منظور ابتدا انواع تراوش به درون تونل و سپس روش‌های تخمین تراوش بحث خواهد شد.

۳-۲- انواع تراوش به درون تونل

در تخمین نفوذ آب به درون تونل می‌توان دو مولفه جریان به سمت تونل را در نظر گرفت (شکل ۳-۱). این دو مولفه عبارتند از جریان اولیه در سینه کار با علامت (q_h) که بلافاصله بعد از حفر تونل، در سینه کار به وقوع می‌پیوندد و جریان پایدار دراز مدت با علامت (q_s) که در طی زمان اجرا و بهره برداری حاکم است (حسن پور، ۱۳۸۵).



شکل ۳-۱- مولفه‌های جریان آب به داخل تونل (q_h) جریان آب اولیه از سینه کار و q_s جریان پایدار دراز مدت (حسن پور، ۱۳۸۵)

به طور معمول تراوش اولیه از جبهه کار به دلایل ذیل بزرگتر از جریان پایدار دراز مدت می‌باشد:

(حسن پور، ۱۳۸۲)

✓ تراوش به صورت سه بعدی است (از جلو تونل همانند دیواره‌ها تراوش صورت می‌گیرد).

✓ تخلیه آب ذخیره شده در حفرات توده سنگ مجاور تونل در تراوش اولیه موثر است.

محاسبه بزرگی تراوش اولیه از جبهه کار و زمان مورد نیاز آن برای کاهش به جریان پایدار دراز مدت، مستلزم تحلیل متغیرهای پیچیده‌ای نظیر نرخ پیشروی تونل^۱، نفوذپذیری سه بعدی و ضریب ذخیره می‌باشد. هوور بزرگی جریان اولیه را نسبتی از جریان پایدار درازمدت در نظر گرفت که این نسبت به صورت مستقیم و به طور تجربی بین یک تا پنج تغییر می‌کند (Chen, 2010).

روند تغییرات تراوش به درون تونل با توجه به گذشت زمان در دو حالت کلی به صورت زیر بیان

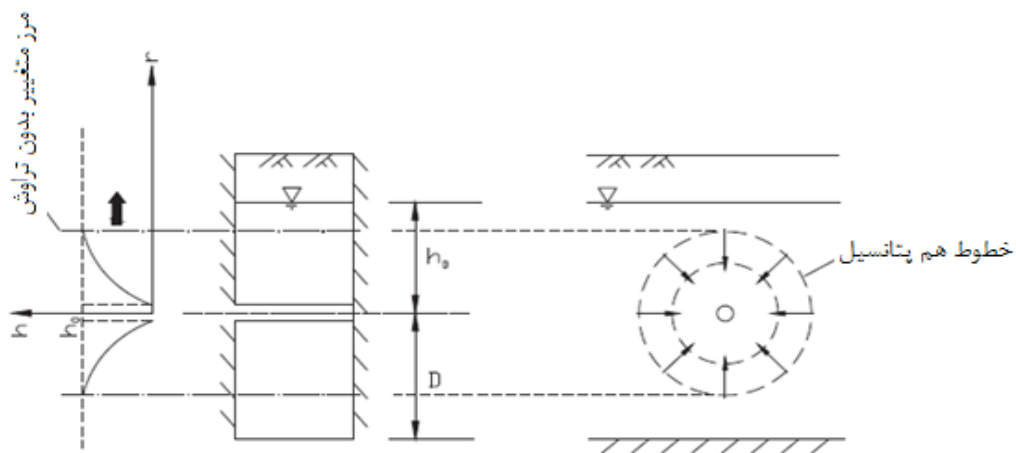
می‌گردد:

فاز اول: تراوش ناپایدار اولیه : چنانچه فرض شود که بازشدگی تونل به صورت یکباره رخ دهد و بار

آبی بر روی جداره تونل ثابت باشد، می‌توان تراوش ناشی از خطوط هم‌پتانسیل در اطراف تونل را به

^۱ Rate of Advance

صورت جریان شعاعی (شکل ۳-۲) مشاهده کرد. جاکوب و لومان^۱ در سال ۱۹۵۲ راه حلی را ارائه کردند که در آن مدل تراوشی اولیه برای تونل، با چرخش ۹۰ درجه جریان چاه بدست می‌آید. این روش حل تا هنگامی که در خطوط هم پتانسیل اغتشاشی ایجاد نشود معتبر خواهد بود. به بیان دیگر این راه حل بر فرض گسترش بینهایت سفره آب استوار است و در واقع می‌توان گفت که این راه حل فرض جریان شعاعی نامحدود دارد (Chen,2010).



شکل ۳-۲- تراوش شعاعی به درون تونل (Chen,2010)

به دلیل وجود مفروضات پیچیده و دشواری کار با این رابطه، راه حل تحلیلی دیگری توسط پروچت^۲ در سال ۲۰۰۵ ارائه شد که با روندی ساده‌تر بدست آمده و قابلیت بیشتری در مسائل عملیاتی داشت. این راه حل که اهمیت نرخ پیشرفت تونل توسط سرعت حفاری در آن قرار داده شده، در سال ۲۰۰۷ در شرایط ناهمگن نیز بسط داده شد. این راه حل به صورت رابطه ۳-۱ است:

$$Q(t) = \int_0^{vt} \frac{2\pi k s_t H(l-x)}{\ln(1 + \sqrt{\frac{\pi k}{sr^2}} (t - \frac{x}{v}))} dx \quad (1-3)$$

¹ Jacob and Lohman

² Perrochet

در روابط فوق k نفوذپذیری، l طول تونل، h بار هیدرولیکی در هر نقطه از تونل، s ضریب ذخیره، s_t افت سطح آب زیرزمینی، r شعاع تونل، t زمان حفاری، x طول محدوده نفوذپذیر، v سرعت پیشروی حفاری و $H(t)$ نشان دهنده تابع هویساید^۱ است. این تابع به صورت رابطه ۲-۳ تعریف می‌گردد (Gattinoni and Scesi,2009;Perrochet and Dematteis,2007).

$$H(n) = \begin{cases} 0; n < 1 \\ 1; n \geq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

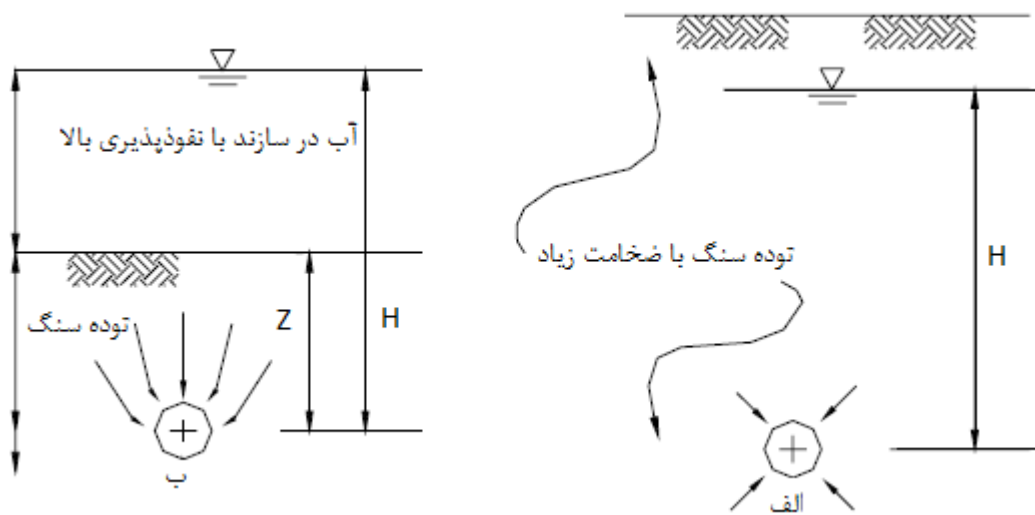
فاز دوم : تراوش بلند مدت^۲: در تراوش پایدار درازمدت، بار آبی با گذر زمان ثابت و یا با تغییرات جزئی همراه است. روابط تحلیلی ارائه شده اکثراً برای تشریح این حالت از تراوش می‌باشند که در این مسائل تونل به صورت افقی با سطح مقطع دایره‌ای در نظر گرفته شده و محیط در برگیرنده آن نیز همگن، همسانگرد و کاملاً اشباع بوده و بار هیدرولیکی نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که در تخمین جریان آب در حالت پایدار، معمولاً دو مدل جریان شعاعی و جریان قائم مانند شکل ۳-۳ در نظر گرفته می‌شود. جریان قائم هنگامی صادق است که منبع تغذیه با حجم زیادی از آب در یک تراز ثابت، نزدیک به تونل باشد و جریان شعاعی نیز در مورد تونل‌هایی که منبع تغذیه آنها ضخامت زیادی دارد، صادق است (حسن پور، ۱۳۸۵).

به دلیل پیچیدگی در بررسی شرایط جریان ناپایدار، بیشتر روابط ارائه شده و تحلیل‌های صورت گرفته به منظور محاسبه نرخ تراوش در حالت پایدار می‌باشد.

به طور کلی محاسبه جریان ورودی به درون تونل از سه دیدگاه تحلیلی، تجربی و عددی قبل بحث می‌باشد. در ادامه مطالعه به بررسی روش‌های مختلف در تعیین میزان تراوش به درون تونل پرداخته شده است.

¹ Heaviside Function

² Long Term Flow



شکل ۳-۳- تراوش پایدار الف- جریان شعاعی ب - تراوش قائم (حسن پور، ۱۳۸۵)

۳-۳- روش‌های تحلیلی در محاسبه تراوش به درون تونل

به طور کلی در حل مسئله تراوش به صورت تحلیلی هدف یافتن ارتباطی منطقی بین متغیر محیطی نظیر نفوذپذیری، سطح آب زیرزمینی با مقدار تراوش به درون تونل می‌باشد. بدیهی است که ارائه یک رابطه ریاضی برای چنین متغیرهایی نیازمند ساده‌سازی در مسئله می‌باشد (Kolymbas and Wagner, 2006). در محیط درزه‌دار فرضیاتی نظیر همسانگردی و همگنی محیط بسیار دور از واقعیت بوده و این مسئله باعث شده که کاربرد راه حل‌های تحلیلی در محیط ناپیوسته چندان مطلوب نباشد.

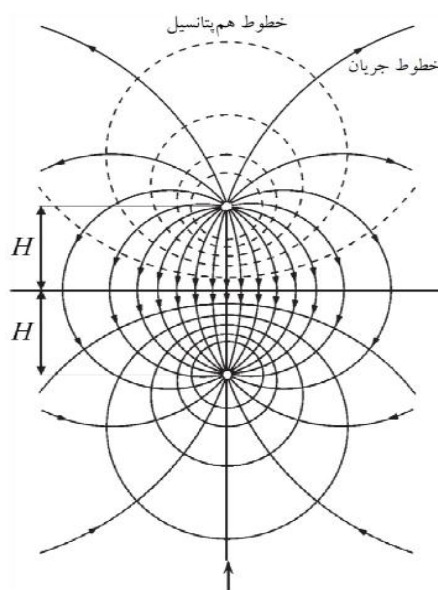
۱-۳-۳- روش چشمه وچاه^۱

اولین روش تحلیلی که برای محاسبه شدت جریان آب ورودی به یک تونل وجود دارد روش چشمه و چاه است. بر طبق قانون دارسی و قانون بقای جرم، جریان دو بعدی اطراف تونل از معادله لاپلاس^۲ پیروی می‌کند. در این روش به حل مستقیم معادله لاپلاس پرداخته نمی‌شود، بلکه فرض می‌شود که جریان و

¹ Image Tunnel Method

² Laplace

میدان پتانسیلی که در اطراف یک تونل به وجود می‌آید، مشابه جریان و میدان پتانسیلی است که در اثر کنار هم قرار گرفتن یک چشمه و چاه به وجود می‌آید. در این حالت بین این دو عنصر، یک خط صاف هم پتانسیل می‌توان یافت که معرف بار هیدرولیکی ثابت در سطح زمین می‌باشد. جریان در سمت چاه به عنوان جریان در اطراف یک تونل در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۴). از بر هم نهی میدان پتانسیل اطراف چاه و چشمه می‌توان دبی ورودی به تونل را محاسبه نمود (Fernandez and Moon,2010; کردنظیری, ۱۳۹۰).



شکل ۳-۴- خطوط هم پتانسیل و خطوط جریان اطراف یک تونل (Fernandez and Moon,2010)

نخستین رابطه‌ای که از روش چشمه و چاه بدست آمد، توسط پالوبارینوا-کوشینا^۱ در سال ۱۹۶۲ ارائه شد. گودمن^۲ سه سال بعد در مقاله خود تنها اشاره‌ای به این رابطه کرد اما این رابطه امروز به نام او یاد می‌شود. سال ۱۹۹۸ لی^۳ حل کامل‌تری از این روش را ارائه داد که در آن تونل در عمق دلخواه قرار دارد.

¹ Palubarinova koshina

² Good Man

³ Lei

سال ۱۹۹۹ ال تانی^۱ با استفاده از توابع گرین در حل معادلات لاپلاس راه حلی را ارائه داد که جملاتی از یک سری بینهایت هستند. در نتیجه این روش حل بسته‌ای برای این مسئله نمی‌باشد. مهمترین روابط تحلیلی ارائه شده در جدول ۱-۳ بیان شده است (Hwang and Lu,2007;Kolymbas and Wagner,2006).

جدول ۱-۳- روابط تحلیلی به منظور تخمین تراوش پایدار به درون تونل (Farhadian ad Aalianvari,2012;Kolymbas and Wagner,2006)

ارائه دهنده- سال ارائه	رابطه	ملاحظات
Goodman(1965)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r})}$	شرایط تراوش شعاعی و محیط همگن و ایزوتروپ
Lei(1999)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln(\frac{h}{r} + \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1})}$	بهسازی رابطه گودمن با بکارگیری شرایط واقعی
Karlsud(2001)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r} - 1)}$	در کنار روش های تجربی به منظور رفع خطای تونلهای عمیق
Lombardi(2002)	$Q = 2\pi k \frac{h}{(1 + 0.4(\frac{r}{h})^2) \ln \frac{2h}{r}}$	تعدیل روش قبل با شرایط حقیقی
El-Tani(2003)	$Q = 2\pi k \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda}$ $\lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1}$	با به کارگیری سریهای فوریه ارائه راه حلی جدید در این مبحث می پردازد.

در روابط ارائه شده در جدول ۱-۳ h مقدار بار آبی روی تونل، r شعاع تونل و k معرف متوسط نفوذپذیری توده سنگ است. روابط ارائه شده به ازای واحد طول تونل می باشند.

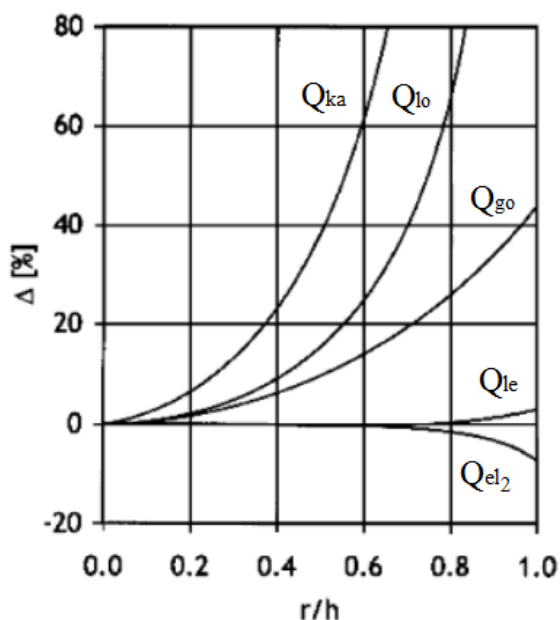
ال تانی در سال ۲۰۰۳ مقادیر واقعی تراوش از چندین تونل را با مقادیر بدست آمده از روابط تحلیلی

¹ El Tani

بالا مقایسه کرد. او نتیجه گرفت که به طور کلی، مقادیر بدست آمده از روابط فوق در حالتی که نسبت شعاع تونل به بار آبی (r/h) کمتر از $0/2$ باشد، دارای همگرایی بوده و چنانچه نسبت یاد شده از $0/2$ بیشتر شود، مقادیر تحلیلی دارای اختلاف خواهند شد. او بر اساس اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و مقایسه‌ای، شکل ۳-۵ را ارائه داد (Katibeh and Aalianvari, 2012).

در رابطه ۳-۳ مقدار تراوش مشاهده شده و Q_{ap} مقدار تراوش محاسبه‌ای و Δ بیانگر اختلاف این دو مقدار است.

$$\Delta = \frac{Q_{ap} - Q}{Q} \times 100 \quad (3-3)$$



شکل ۳-۵- بررسی تغییرات مقادیر تحلیلی با تغییرات (r/h) (Katibeh and Aalianvari, 2012)

فرهادیان و عالی انوری در سال ۲۰۱۲ با به کارگیری رگرسیون تک متغیره^۱ به تعدیل پنج رابطه فوق پرداخته و در نهایت مقادیر متوسطی از هر رابطه را به صورت جدول ۳-۲ ارائه کردند. با در نظر گرفتن این روابط رگرسیونی، همبستگی بین این روابط تحلیلی در حالتی که نسبت شعاع تونل به بارآبی بیشتر از

^۱ Single variable regression

۰/۲ باشد نیز حفظ خواهد شد (Farhadian and Aalianvari,2012).

جدول ۳-۲- روابط تحلیلی و تعدیل آن به کمک رگرسیون تک متغیره (Farhadian and Aalianvari,2012)

ارائه دهنده- سال ارائه	رابطه	مقدار متوسط به کمک رگرسیون
Goodman(1965)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	$\bar{Q} = Q_{GO}^* = 572.45Q_{GO}^2 - 67.138Q_{GO} + 2.0271$
Lei(1999)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$	$\bar{Q} = Q_I^* = -39.429Q_I^2 + 6.338Q_I - 0.1807$
Karlsud(2001)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$	$\bar{Q} = Q_{ka}^* = 7.639Q_{ka}^2 - 1.539Q_{ka} + 0.132$
Lombardi(2002)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\left(1 + 0.4\left(\frac{r}{h}\right)^2\right) \ln\frac{2h}{r}}$	$\bar{Q} = Q_{io}^* = 186.77Q_{io}^2 - 19.382Q_{io} + 0.560$
El-Tani(2003)	$Q = 2\pi k \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln\lambda}$ $\lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}$	$\bar{Q} = Q_{el}^* = 174.39Q_{el}^2 - 18.1Q_{el} - 0.527$

۳-۳-۲- روش های تجربی

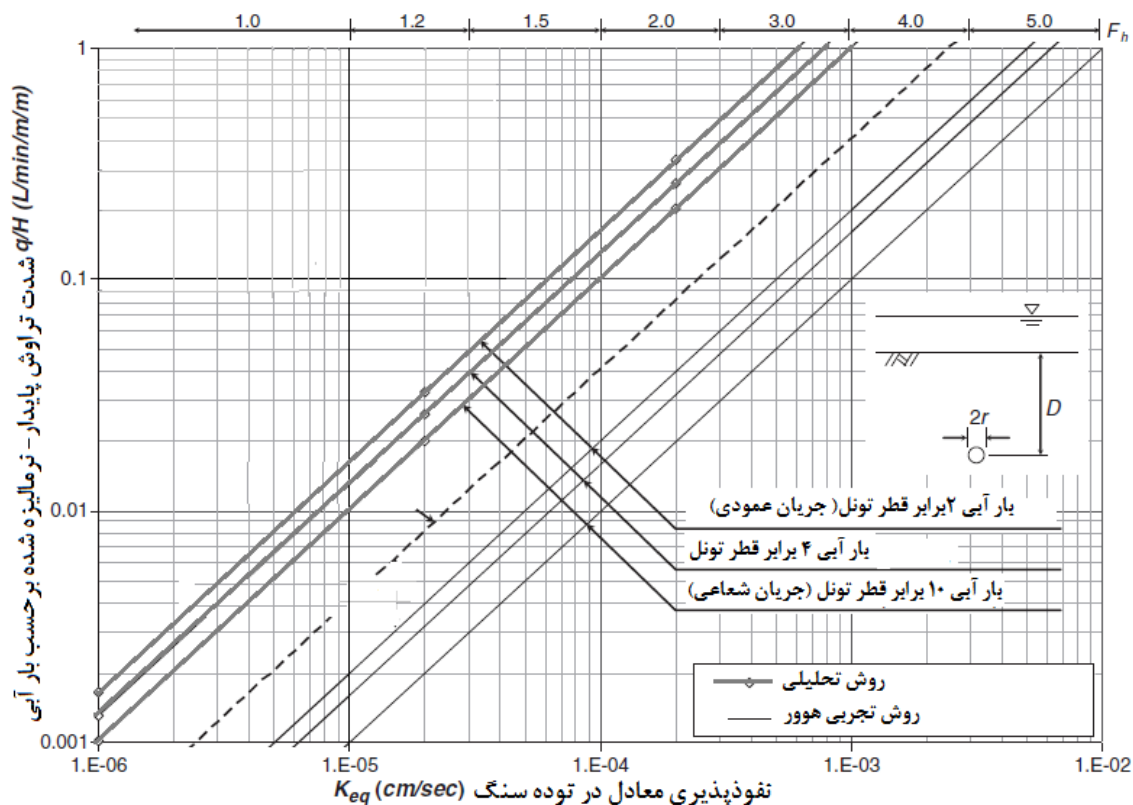
تنها روش تجربی مدونی که برای تعیین نرخ نفوذ آب به درون تونل وجود دارد روشی است که توسط

هوور در سال ۱۹۹۵ ارائه و در سال ۲۰۰۵ توسط خود وی تکمیل شد. او به کمک داده هایی که از تونل

میلواکی^۱ در دست داشت به ارائه یک رابطه بین نرخ آب ورودی به تونل و میزان نفوذپذیری پرداخت و بین نتایج حاصل از نمودار خود و داده‌های سایر پروژه‌های موجود هم مقایسه‌هایی را انجام داد (Masset and Loew, 2010). داده‌های نفوذپذیری در روش هوور نتایج آزمایش لوژان هستند. به نظر هوور مقادیر حاصل از آزمایش لوژان را نمی‌توان به راحتی در روابطی نظیر رابطه گودمن قرار داد به دلیل اینکه نفوذپذیری به دست آمده مقداری معادل از نفوذپذیری منطقه است و متغیر بودن ویژگی های توده سنگ از محلی به محل دیگر در آن لحاظ نشده است و دیگر اینکه نفوذپذیری توده سنگ در جهت افقی معمولاً بیشتر از مقدار آن در جهت عمودی است و آزمون‌های لوژان که در چالهای عمودی انجام می‌شوند بیشتر تحت تأثیر نفوذپذیری افقی است بنابراین مقادیر بدست آمده بیشتر از مقادیر حقیقی نفوذپذیری می‌باشند. از سوی دیگر، آزمایش لوژان در زمان‌های کوتاهی انجام شده و حجم محدودی از توده سنگ را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Heuer, 1995). در تونل‌های بزرگتر این نیاز احساس می‌شود که حجم بزرگتری از توده سنگ به وسیله‌ی آزمایش‌های طولانی مدت مورد بررسی قرار بگیرند. از آنجا که توده سنگ دارای خواصی متغیر است، نفوذپذیری شدیدی که در زونهای آبدار مشاهده می‌شود برای مسافت زیادی ادامه نمی‌یابند به همین دلیل نمی‌توان آنها را به کل منطقه نسبت داد (Raymer, 2001).

با توجه به دلایل فوق به نظر می‌رسد روش هوور که عوامل بسیاری را به طور ضمنی با تکیه بر داده‌های عملی در نظر می‌گیرد از نتایج بهتری نسبت به روش‌های تحلیلی برخوردار باشد. در شکل ۳-۶ نمودار تجربی هوور آورده شده است (Heuer, 1995).

¹ Milwaukee



شکل ۳-۶- نمودار تجربی هوور (Heuer, 1995)

جریان ورودی به تونل به دو صورت، پایدار از دیواره و ناپایدار از جبهه کار به درون تونل تراوش می‌یابد و معادلات ۳-۴ و ۳-۵ بیان کننده تراوش در شرایط به ترتیب پایدار و ناپایدار درون تونل هستند. (Heuer, 1995).

$$q_s = F_s \cdot k \cdot H \quad (۳-۴)$$

$$q_h = q_s \cdot F_h \quad (۳-۵)$$

در رابطه ۳-۴ مقدار q_s جریان پایدار از دیواره تونل، F_s شرایط مرزی دیواره تونل، k نفوذپذیری معادل توده سنگ و H میزان بار آبی بر روی تونل است. در رابطه ۳-۵ مقدار q_h جریان ناپایدار جبهه کار تونل و F_h شرایط مرزی جبهه کار می‌باشد.

با توجه به شکل ۳-۶ (نمودار هوور)، میزان k متوسط توده سنگ (خط افقی نمودار) و جریان پایدار

دراز مدت (خط عمودی نمودار) توسط خطوط موربی که معرف F_s هستند با یکدیگر مرتبط شده اند. در این نمودار میزان q_s بر حسب H نرمالیزه شده است. به کمک این نمودار می توان مقادیر F_s در رابطه بالا را با توجه به بار آبی تونل بدست آورد و به کمک آن جریان پایدار در دیواره را محاسبه کرد. برای این منظور ابتدا با توجه به میزان نفوذپذیری مقدار F_s مشخص شده و سپس مقدار متناظر با آن در محور عمودی معرف میزان تراوش پایدار از دیواره تونل خواهد بود. مقدار F_h در بالای نمودار قرار دارد که مقدار آن بین یک تا پنج متغیر است. با توجه به نفوذپذیری می توان مقدار این ضریب را محاسبه کرده و سپس با حاصل ضرب در مقدار تراوش دیواره تخمینی از نرخ تراوش به جبهه کار تونل به دست آورد (Heuer,1995).

به دلیل اینکه هوور داده های کافی از تونل هایی با شعاع مختلف در اختیار نداشت، دبی تراوش حاصل از کار او مستقل از ابعاد تونل می باشد که از معایب این روش است. در این روش تاثیر بسته شدگی درزه ها در اثر تمرکز تنش در اطراف تونل نیز در نظر گرفته نشده است (Raymer,2001).

تخمین تراوش توسط روش های تحلیلی و تجربی در مناطق ناپیوسته ممکن نیست و تنوع تکتونیکی و سنگ شناسی منطقه با فرض همگن و ایزوتروپ بودن این روش ها در تناقض است و از سوی دیگر در نواحی با مقادیر شدید نفوذپذیری، آزمایش لوژان دارای محدودیت ابزاری می باشد. به عنوان مثال در کیلومتر $2+119$ تونل انتقال آب سمنان، حجم آبی معادل 500 لتر بر ثانیه از یک درزه باز وارد تونل شد. بر اساس رابطه گودمن بایستی مقدار نفوذپذیری 2490 لوژان برای این منطقه در نظر گرفته شود. واضح است که این مقدار قابل اندازه گیری نیست و در نمودار هوور نیز قادر به محاسبه چنین تراوشی نمی باشد (Zarei and Uromeihy,2011).

وجود چنین شرایط پیچیده زمین شناسی زمینه به کارگیری روش های عددی را به وجود آورده است. روش های عددی قابلیت و انعطاف پذیری بیشتری در مقایسه با سایر روش ها از جهت مدلسازی و بیان

بهتر شرایط محیطی دارا می‌باشند.

۳-۴- روش‌های عددی

در مطالعات عددی بحث تراوش به درون تونل، بیشتر به بررسی نحوه تاثیرگذاری پارامترهای محیطی بر مقدار دبی تراوش پرداخته شده است. پارامترهایی که تعیین رفتار آنها به وسیله روش‌های تحلیلی بسیار پیچیده و در مواردی غیر ممکن است (Chen,2010).

روش‌های عددی به دو دسته کلی مسائل مقدار مرزی و مسائل مقدار اولیه تقسیم بندی می‌شوند.

الف) مسائل مقدار مرزی^۱: در این نوع مسئله مقدار کمیت نامشخص میدانی نظیر بار آبی در مرز

سفره آب مشخص می‌شود. مشتق مقدار متغیر نیز می‌تواند در طول مرز مشخص شود و یا در نقطه‌ای مشخص در سفره آب به عنوان منبع یا حفره تعیین شود. در این نوع مسائل شرایط مرزی و مقادیر محاسبه شده از میدان متغیر با زمان تغییر نمی‌کنند و مقادیر کمینه و بیشینه میدان متغیر همواره در مرزهای سفره آب و یا نقاط منبع و حفره اتفاق می‌افتد (Chen,2010).

ب) مسائل مقدار اولیه^۲: در این حالت علاوه بر محاسبه شرایط مرزی بایستی مقدار متغیر میدانی

برای تمام نقاط درون سفره آب نیز در زمان اولیه محاسبه گردد. این مقادیر بیانگر شرایط اولیه هستند. با ترکیب شرایط مرزی، مقادیر اولیه و معادلات پیوستگی و لاپلاس مدلی ارائه می‌شوند که مقدار متغیر میدانی درون سفره آب را در زمان خاصی نشان خواهد داد. در این نوع مسائل، شرایط مرزی و مقادیر محاسبه شده با متغیر میدانی با زمان تغییر کرده و ممکن است که مقادیر کمینه و بیشینه در هر کجای سفره آب اتفاق بیفتد (Chen,2010).

¹ Boundary Value Problems

² Initial Value Problems

در بحث تراوش به درون تونل روش های عددی نظیر اجرا محدود^۱ (FEM) و تفاضل محدود^۲ (FDM) برای محیط های پیوسته گسترش یافته است. در محیط ناپیوسته و درزه دار سنگی ابزار عددی مانند روش المان مجزا^۳ (DEM) و شبکه شکستگی گسسته^۴ (DFN) کاربرد دارند. صحت پاسخ بدست آمده در حل یک مسئله به روش عددی تابع فاکتورهای نظیر سازگاری روش انتخابی با محیط مورد مطالعه، پیچیدگی شرایط مرزی و اولیه و توانایی سیستم محاسبه گر می باشد (Chen,2010;Pan and Lee,2010).

۳-۴-۱ - شبکه شکستگی گسسته

اساس این روش بر آن است که انتقال و حرکت آب های زیرزمینی، درون شکستگی های سنگ اتفاق می افتد. این روش به شبیه سازی شکستگی های مجزا درون توده سنگ می پردازد همچنین حرکت جریان را در سیستم شکستگی های مرتبط مدل می کند (Chen,2010).

نخستین مدل در سال ۱۹۶۹ توسط درشوایتز و ایناستین^۵ ارائه شد که در آن سه دسته صفحه عمود بر هم با فاصله داری ثابت یا تصادفی وجود داشت (شکل الف ۳-۷). در مدل صفحه پواسون که در سال ۱۹۷۶ توسط هادسون و پیریست^۶ به کار گرفته شد، جهت داری صفحات به صورت تصادفی و با یک توزیع ناهمسانگرد همراه بود (شکل ب ۳-۷).

در سال ۱۹۷۷ مدلی توسط بیچر^۷ ارائه شد که تاکنون بسیار پرکاربرد بوده است. در این مدل شکستگی ها به صورت دیسکی شکل^۸ بوده و جهت داری آنها توسط قطر مشخص شده و پراکندگی آنها به

^۱ Finite Element Method

^۲ Finite Difference Method

^۳ Distinct Element Method

^۴ Discrete Fracture Network

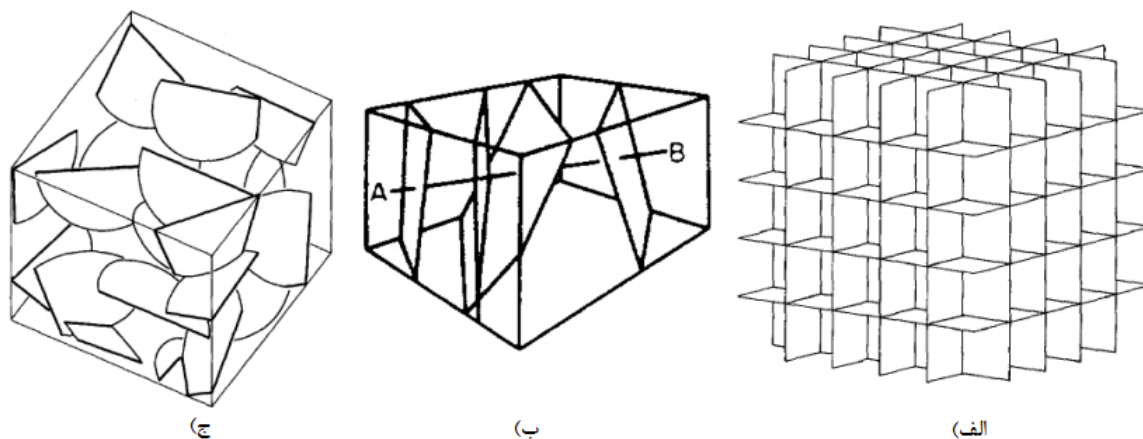
^۵ Dershowitz & Einstein

^۶ Hudson & Priest

^۷ Baecher

^۸ Disc Shaped

صورت تصادفی و با توزیع پواسون در فضا می‌باشد (شکل ج ۳-۷). چن^۱ در سال ۲۰۱۰ در رساله دکتری خود با بکارگیری روش بیچر به تولید شکستگی پرداخت، با این تفاوت که از مبحث خوشه‌بندی^۲ زمین آماری^۳ برای فاصله‌بندی شکستگی‌ها استفاده کرد. راه حل وی حد واسطی بین روش‌های پیوسته و ناپیوسته می‌باشد (Chen,2010;Pan and Lee,2010).



شکل ۳-۷- الف) مدل اولیه صفحات متعامد ب) مدل هادسون و پیریست در سال ۱۹۷۶ ج) مدل دیسکی بیچر (Chen,2010)

۳-۴-۲- روش المان مجزا

این روش در نرم افزار (UDEEC)^۴ به کار گرفته شده که این نرم افزار قابلیت تحلیل جریان سیال درون درزه‌های سیستم بلوکی نفوذناپذیر را دارد. پیش از تشریح این روش چند اصطلاح در رابطه با ساخت مدل به روش المان مجزا تشریح شده است:

✓ بلوک^۵: هندسه اصلی در روش المان مجزا را یک بلوک تشکیل می‌دهد. این بلوک با تقسیم به

3 Chen

4Clustering

5Geostatistical

4 Universal Distinct Element Code

5 Block

بلوک های کوچکتر جزئیات هندسی مسئله را خواهد ساخت.

✓ تماس^۱: هر بلوک با بلوک مجاورش توسط نقطه تماس اتصال پیدا می کند. نقطه تماس می تواند عامل انتقال نیرو به بلوک باشد.

✓ ناپیوستگی^۲: یک عارضه زمین شناسی است که توده سنگ را به دو قسمت مجزا تقسیم می کند. ناپیوستگی ها با دو یا چند تماس مشخص می شوند.

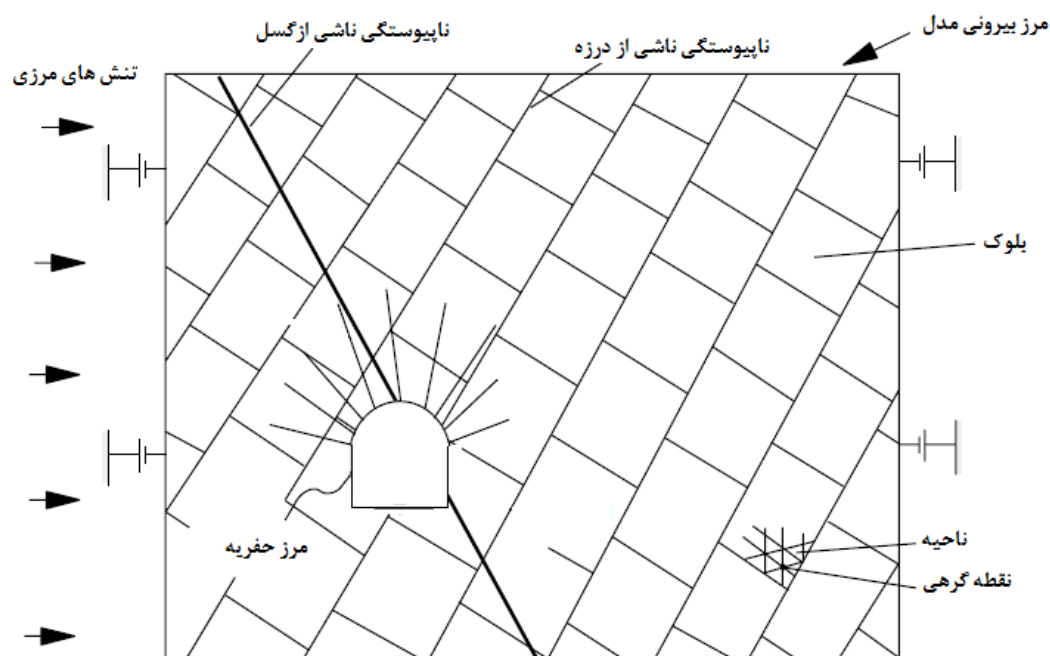
✓ ناحیه^۳: بلوک تغییر شکل پذیر از نواحی تفاضل محدود ساخته می شود. این نرم افزار از نواحی مثلثی استفاده می کند. تغییرات مکانیکی و انتقال گرما در این نواحی مثلثی صورت می گیرد.

✓ نقطه گرهی^۴: نقاط موجود در گوشه نواحی مثلثی بیانگر نقاط گرهی است. هر یک از این نقاط دارای طول و عرض بوده که مختصات ناحیه توسط آن مشخص می گردد.

✓ حوزه^۵: معرف فضائی بین بلوکی است که نقاط تماسی درون حوزه ها قرار گرفته و جریان سیال درون حوزه ها صورت می گیرد.

در شکل ۳-۸ برخی از واژگان فنی این نرم افزار بیان شده است.

-
- 1 Contact
 - 2 Discontinuity
 - 3 Zone
 - 4 Gridpoint
 - 5 Domain

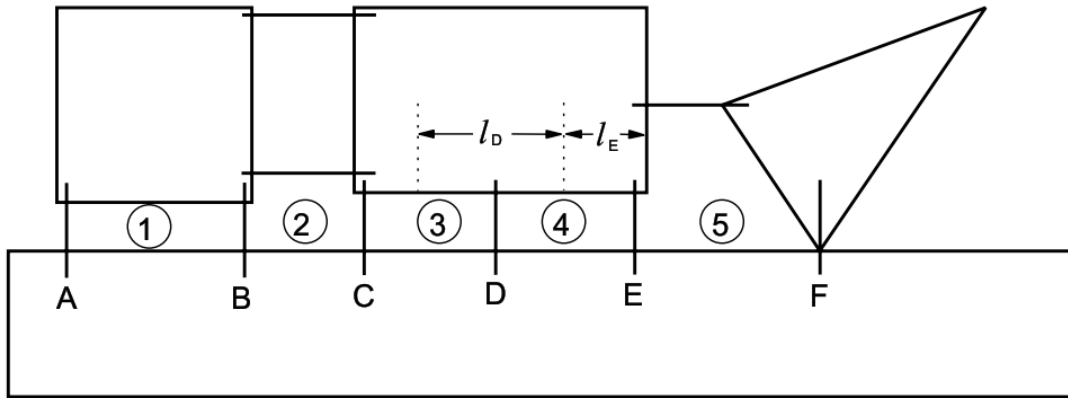


شکل ۳-۸- المان‌های ساختاری در نرم افزار UDEC (ITASCA, 2004)

الگوریتم محاسبه تراوش سیال در روش المان مجزا

درزه با تعداد زیادی از حوزه های پیوسته بیان می‌شود. در یک سیستم بسته شبکه‌ای از حوزه‌ها^۱ وجود دارد که فرض می‌شود هر یک از آنها با سیالی که دارای فشار یکسان است پر شده است و هر یک با مجاورت خود توسط نقاط تماسی در ارتباط است. بر اساس شکل ۳-۹ حوزه‌ها از شماره ۱ تا ۵ می‌باشند که در آنها حوزه ۳، ۱ و ۴ بیانگر درزه و حوزه ۲ بیانگر تقاطع دو درزه و حوزه ۵ یک فضای خالی است. این حوزه‌ها با نقاط تماسی A تا F از هم جدا می‌شوند. این نقاط، محل اثر نیروی مکانیکی بین بلوک‌ها هستند (ITASCA, 2004).

¹ Network Of Domains



شکل ۳-۹- جریان درون درزه که همانند جریان بین حوزه‌ها مدل شده است (ITASCA,2004)

با نادیده انگاشتن نیروی گرانش، در تمام حوزه‌ها فشار سیال یکدست در نظر گرفته می‌شود. در مسائل همراه با گرانی تغییرات فشار به صورت خطی و بر اساس گرادیان هیدرواستاتیک خواهد بود. ضمن اینکه فشار مرکز حوزه معرف فشار در کل حوزه است. اختلاف فشار بین دو حوزه مجاور عامل شارش جریان می‌باشد. در معادله ۳-۶ نرخ تراوش و در معادله ۳-۷ اختلاف فشار بین دو حوزه بیان شده است. در معادله ۳-۶ پارامتر q نرخ جریان با واحد متر مکعب بر ثانیه، k_c معرف فاکتور نفوذپذیری در یک نقطه تماسی با واحد متر مربع بر پاسکال ثانیه و تغییرات فشار بر حسب پاسکال می‌باشد. (ITASCA,2004;Sharifzadeh and Karegar,2011)

$$q = -k_c \Delta p \quad (۳-۶)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad (۳-۷)$$

اختلاف فشار از حوزه ای با فشار و مرکز به ترتیب p_1 و y_1 به حوزه‌ای با فشار و مرکز p_2 و y_2 به صورت ۳-۷ است و در نهایت با در نظر گرفتن قانون کویبیک برای طول تماس L (با واحد متر) بین حوزه‌ها تراوش توسط رابطه ۳-۸ محاسبه می‌شود:

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad (۳-۸)$$

در این رابطه a معرف بازشدگی هیدرولیکی درزه با واحد متر و k_j معرف نفوذپذیری درزه با واحد یک

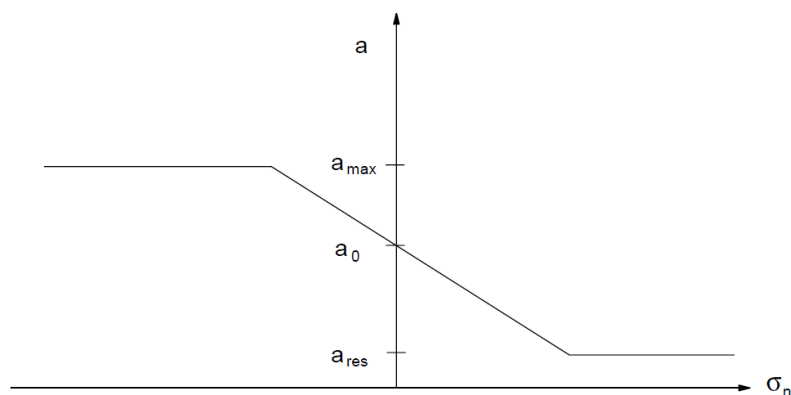
بر پاسکال ثانیه است. بازشدگی هیدرولیکی با رابطه ۳-۹ محاسبه می‌گردد:

$$a = a_0 + u_n \quad (۹-۳)$$

در رابطه ۳-۹ مقدار کمیت اول بیانگر بازشدگی درزه در حالت تنش عمودی صفر و کمیت دوم بیانگر جابجائی عمودی درزه با علامت مثبت است. در حالتی که درزه تحت تاثیر شدید تنش عمودی قرار بگیرد، یک بازشدگی به عنوان مقدار باقی مانده (a_{res}) در نظر گرفته می‌شود. مقدار بیشینه بازشدگی (a_{max}) پنج برابر بازشدگی باقی مانده است و کاربر می‌تواند مقدارش را تغییر دهد. در شکل ۳-۱۰ تاثیر متقابل تنش نرمال درزه و بازشدگی هیدرولیکی آورده شده است. در تحلیل توسط این نرم افزار با هر گام زمانی فشار درون حوزة و به تبع آن پارامترهای مرتبط نظیر میزان حجم تراوش یافته و حجم حوزة نیز تغییر خواهد کرد. مقدار فشار با هر گام زمانی توسط رابطه ۳-۱۰ تغییر خواهد کرد:

$$P = P_0 + k_w Q \frac{\Delta t}{V} - k_w \frac{\Delta V}{V_m} \quad (۱۰-۳)$$

در این رابطه P_0 ، V_m ، Q ، V ، Δt و ΔV به ترتیب بیانگر فشار اولیه، حجم متوسط حوزة دریک گام زمانی، مجموع تراوشات جریان یافته به حوزة از شکستگی های مجاور، حجم حوزة، گام زمانی، تغییر حجم در یک گام زمانی و مدول حجمی سیال است (Indraratna and Singh,1994;ITASCA,2004).



شکل ۳-۱۰- بازشدگی هیدرولیکی و تنش نرمال درزه (ITASCA,2004)

پایداری عددی الگوریتم جریان سیال نیازمند این است که گام زمانی به شرایط ۳-۱۱ محدود گردد:

$$\Delta t_f = \min \left[\frac{V}{k_w \sum_i k_i} \right] \quad (11-3)$$

که در آن V حجم حوزه و $\sum_i k_i$ مجموع تمامی فاکتور های نفوذپذیری برای تمام تماس های اطراف حوزه می باشد.

۳-۵- نتیجه گیری

این فصل نگاهی به روش های متداول تخمین آب ورودی به تونل دارد. روش های تحلیلی به ارائه یک رابطه ریاضی بر اساس پارامترهای عمل کننده و موثر بر فرآیند مسئله می پردازند. بدیهی است به دلیل آنکه بسیاری از شرایط پیچیده واقعی موجود در طبیعت به کمک روش های معمول در ریاضی قابل توصیف نیستند، کاربرد این روش ها محدود خواهد شد. از سوی دیگر معمولاً افزایش دقت در این روابط باعث پیچیدگی هر چه بیشتر آنها خواهد شد. بطوریکه در برخی شرایط محاسبه پارامترهای موثر در یک عملیات اجرائی دشوار خواهد بود.

با توجه به اینکه نفوذپذیری در توده سنگ درزه دار بسیار متغیر و به ویژگی های درزه نظیر بازشدگی، جهت داری، فاصله داری و غیره وابسته است، در بسیاری از موارد پاسخ بدست آمده از روش های تحلیلی چندان قابل استناد نیست.

در کنار روش های تحلیلی روش تجربی هوور نیز وجود دارد که به دلیل در نظر گرفتن فرض پیوستگی و نیز عدم پوشش شرایط خاص محیطی، قابلیت چندان در محیط های ناپیوسته ندارد. این روش بر اساس نتایج مشاهده شده در چندین تونل بدست آمده است.

روش های عددی امروزه با توسعه نرم افزارهای پیشرفته کاربردهای گسترده ای پیدا کرده اند. این روش ها به دلیل قابلیت مدلسازی شرایط پیچیده از مقبولیت بیشتری نسبت به سایر روش ها برخوردارند.

دقت نتایج در روش های عددی وابسته به صحت پارامترهای ورودی مسئله و شرایط حاکم بر محیط مورد مطالعه می باشد. در این فصل ضمن معرفی کلی روش های عددی، کاربرد این روش ها در محیط ناپیوسته به روش شبکه شکستگی های گسسته و المان مجزا مورد بحث قرار گرفت.

فصل چہارم:

معرفی پروژہ تونل بلند زاکرس

(قطعہ دوم)

۴-۱- مقدمه

هدف فعالیت‌های زمین‌شناسی مهندسی برآورد خصوصیات زمین جهت اجرای پروژه‌های مهندسی و ایجاد ارتباط مناسب بین اطلاعات کیفی و توصیفی زمین‌شناسی و پارامترهای کمی مورد نیاز طراحان می‌باشد.

ارتباط تنگاتنگ پروژه‌های عمرانی از جمله تونل با خصوصیات زمین، ایجاب می‌نماید تا جهت دستیابی به اطلاعات مورد نیاز طراحی و اجرای این پروژه‌ها، همچنین بررسی خطرات ناشی از پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی و اثرات آنها بر اجرای پروژه، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی دقیق در محدوده اجرای پروژه صورت پذیرد. این بررسی‌ها مبتنی بر انجام مطالعات دفتری، پیمایش‌های صحرائی و آزمایشات آزمایشگاهی و صحرائی هستند. مطالعات صورت گرفته در مسیر تونل با مقیاس ۱:۲۰۰۰ بوده و تفکیک واحدها و بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی با توجه به این مقیاس می‌باشد.

لازم به ذکر است که اطلاعات موجود در این فصل از نتایج مطالعات زمین‌شناسی و هیدرولوژی شرکت مشاور طرح گرفته شده است.

۴-۲- معرفی پروژه

تونل انتقال آب زاگرس بخشی از طرح انتقال آب به دشتهای گرمسیری غرب کشور است. تونل مذکور با طول تقریبی ۵۰ کیلومتر از حوالی هیروی تا نزدیکی ازگله ادامه می‌یابد. قطعه دوم این تونل که از رودخانه ليله شروع می‌شود و تا ازگله ادامه دارد توسط مؤسسه ایمن سازان وابسته به قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء در حال اجرا می‌باشد (ایمن-سازان، ۱۳۹۰).

طول کل مسیر انتقال آب حدود ۴۶۰ کیلومتر برآورد گردیده است که تونل زاگرس که از حوالی روستای هیروی تا ازگله ادامه دارد در حدود ۵۰ کیلومتر آن را تشکیل می‌دهد. قطعه دوم این تونل که از

رودخانه ليله تا ازگله (به طول ۲۶ كيلومتر) مي باشد، بوسيله ماشين حفاري تمام مقطع تونل (TBM) با سپر دويل در حال اجرا مي باشد. امتداد تونل در جهت شمال شرق به جنوب غرب و موازي مرز ايران و عراق بوده (شكل ۱-۴) و در مسير خود رودخانه هاي مره خيل، ليله، زيمكان و كردي قاسمان (آب زرشك) را قطع مي كند و قرار است بخشي از آب اين رودخانه ها نيز توسط تونل مذكور دريافت و منتقل گردد (ايمن - سازان، ۱۳۹۰).

در جدول ۱-۴ مهمترين مشخصات طرح بيان شده است.

جدول ۱-۴- مهمترين ويژگي هاي تونل انتقال آب زاگرس - قطعه دوم (ايمن - سازان، ۱۳۹۰)

الف) مشخصات تونل و سيستم حفاري	
طول تونل در قطعه دوم	۲۶ كيلومتر
سطح مقطع تونل	۳۵/۵ مترمربع
قطر حفاري	۶/۷۳ متر
قطر تمام شده پس از نصب سگمنت	۶ متر
سيستم حفاري و نوع دستگاه	مكانيزه تمام مقطع با سپر دويل

بر اساس گزارشات انجام شده توسط شركت مهندسين مشاور طرح، مطالعات زمين شناسي صورت گرفته با مقياس ۱:۲۰۰۰ در مسير تونل زاگرس (قطعه دو) و در راستاي دستيابي به اطلاعات مورد نياز جهت پيش بيني شرايط زمين شناسي مهندسي پيشروي دستگاه حفاري تهيه گرديده است كه شامل موارد زير است:

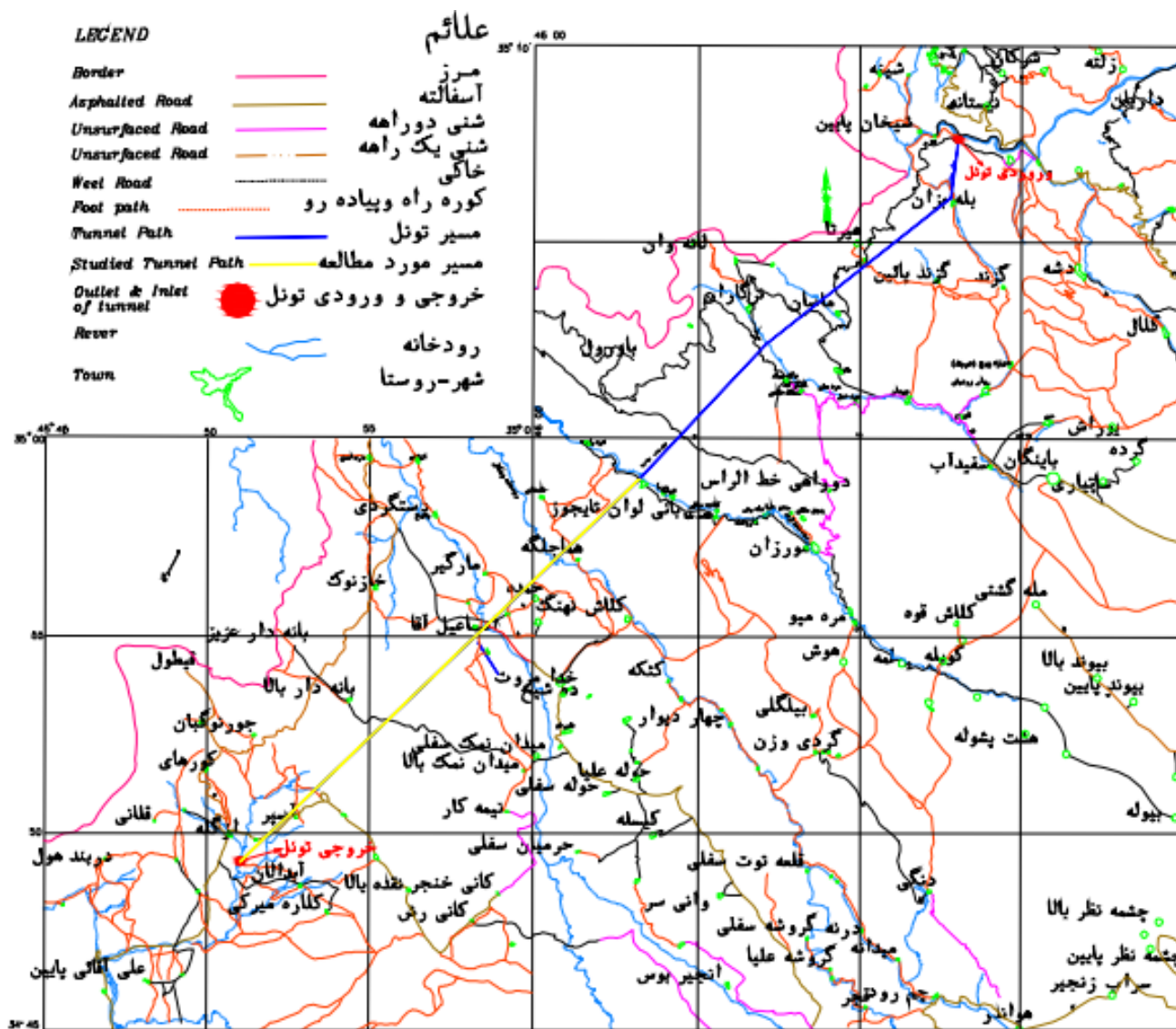
✓ برآورد خصوصيات سنگ بكر

✓ طبقه‌بندی مهندسی توده‌های سنگی

✓ برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌های سنگی

✓ تهیه برش زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل

✓ پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی مسیر تونل



شکل ۴-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل (ساحل، ۱۳۸۶)

۳-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه

از آنجا که منطقه مورد بررسی در ناحیه لرستان کمربند چین خورده - رانده زاگرس قرار گرفته است، انتظار می‌رود که واحدهای سنگ شناسی آن از جنس واحدهای سنگی این بخش از زاگرس باشد. واحدهای سنگی موجود در مسیر تونل شامل واحدهای شیلی و آهک رسی از سازندهای پابده و گورپی مربوط به زمان های کرتاسه پسین و ترسیر پیشین و لایه های عمدتاً آهکی کرتاسه می‌باشند، همچنین قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در مسیر تونل، واحدهای تبخیری ژوراسیک می‌باشند (ساحل، ۱۳۸۶).

وضعیت زمین از نظر توپوگرافی در ابتدای مسیر تونل در گروه زمین‌های تپه ماهوری قرار می‌گیرد که به تدریج به سمت انتهای تونل به ارتفاعات افزوده می‌شود. تقریباً کلیه آبراهه‌ها فصلی هستند و تنها در مواقع بارندگی و چند روز بعد از آن آب در آنها جریان دارد. آب و هوای گستره مورد بررسی گرم و نیمه خشک می‌باشد (ساحل، ۱۳۸۶).

چین خوردگی‌های موجود در منطقه شامل ۸ تاقدیس و ۹ ناودیس می‌شوند. گسل‌ها و پهنه‌های گسله گستره مورد بررسی شامل ۵ گسل امتدادلغز، ۳ گسل معکوس با جهت شیب به سمت جنوب باختر و ۱۳ گسل معکوس با جهت شیب به سمت شمال خاور و ۲ پهنه گسله معکوس می‌باشند (ساحل، ۱۳۸۶).

۴-۴- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

۴-۴-۱- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به برداشتهای صورت گرفته در مطالعات صحرایی، همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، توده‌های سنگی مسیر تونل به واحدهای مختلف تقسیم گردید. مبنای تفکیک این واحدها تفاوت

خصوصیات لیتولوژیک لایه‌ها، همچنین تفاوت‌های ساختاری و در نتیجه خصوصیات ژئومکانیکی واحدها است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مبنای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی تفاوت‌های لیتولوژیک بوده است، می‌توان این واحدها را به عنوان مجموعه‌های سنگ‌شناسی در نظر گرفت. مجموعه‌های سنگ‌شناسی دارای ترکیب، ساخت و بافت کاملاً همگن است ولی معمولاً حالت فیزیکی یکنواختی ندارد. از اینرو مرز واحدهای زمین‌شناسی مهندسی عملاً بر مرز واحدهای زمین‌شناسی منطبق می‌باشد. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش زمین‌شناسی مهندسی با علائمی مشخص می‌شوند که از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه تشکیل می‌شود. این علائم شامل: LI به عنوان نشانه SH, Limestone، نشانه MA، Shale، نشانه ML، Marl، نشانه‌دهنده Marly Limestone، LS علامت مربوط به Limy Shale، CZ نشانه Crushed Zone و FZ نشانه Fractured Zone است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته در مراحل مختلف و با در نظر گرفتن تکرار واحدها در قسمت‌های مختلف مجموعاً در محدوده مورد مطالعه ۲۱ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است. خصوصیات این واحدها در جدول شماره ۴-۲ بطور خلاصه ارائه شده است (ساحل، ۱۳۸۶).

جدول ۴-۲- مجموعه لیتولوژیکی شناسایی شده در مسیر تونل (ساحل، ۱۳۸۶)

ردیف	واحد زمین شناسی مهندسی	توصیف
۱	SH-ML1	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۲	SH-ML2	بسیار ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار
۳	SH-ML3	بسیار ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار
۴	ML-SH1	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۵	ML-SH2	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۶	ML-SH3	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۷	ML-SH4	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۸	ML-SH5	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۹	SH-LS1	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک ، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۰	SH-LS2	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۱	SH-LS3	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۲	SH-LS4	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۳	LI2	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۴	LI3	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۵	LI4	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۶	LI5	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۷	LI6	نسبتاً مقاوم ، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۸	LI-MA	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۹	LI-SH	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۲۰	CZ	زون خرد شده گسلی
۲۱	FZ	بسیار ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار

ویژگی های اصلی زمین شناسی مهندسی این پروژه به طور خلاصه و به تفکیک شرایط ماده سنگ و

توده سنگ در جداول ۳-۴ آورده شده اند.

جدول ۴-۳- خصوصیات ماده سنگ در واحدهای مختلف (ساحل، ۱۳۸۶)

شماره	واحد زمین شناسی مهندسی	مقاومت تک محوری (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	مدول دگرشکلی (Gpa)	دانسیته خشک ($\frac{g}{cm^3}$)	تخلخل (%)	هوازگی
1	SH-ML1	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۴-۶	۲.۴-۲.۵	۱۰-۱۵	نسبتاً هوازده
2	SH-ML2	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۴-۶	۲.۳-۲.۵	۱۰-۱۵	نسبتاً تا شدیداً هوازده
3	SH-ML3	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۵-۶.۵	۲.۳-۲.۵	۵-۱۵	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
4	ML-SH1	۵۰-۱۰۰ (۷۵)	۱-۳	۴-۶.۵	۲.۵-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده
5	ML-SH2	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۴-۶.۵	۲.۲-۲.۵	۵-۱۰	کمی هوازده
6	ML-SH3	۲۵-۵۰ (۳۵)	۲-۴	۵-۶	۲.۰۵-۲.۵	۵-۱۵	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
7	ML-SH4	۲۵-۵۰ (۳۵)	۲-۴	۴-۶	۲.۲-۲.۵	۵-۱۰	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
8	ML-SH5	۵۰-۱۰۰ (۷۵)	۵-۱۰	۵.۵-۷	۲.۳-۲.۶	۳-۵	کمی هوازده
9	SH-LS1	۵-۲۵ (۲۰)	۱-۳	۴-۶	۲.۴-۲.۵	۳-۱۵	نسبتاً هوازده
10	SH-LS2	۲۵-۵۰ (۳۵)	۲-۴	۵-۶	۲.۳-۲.۶	۳-۱۰	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
11	SH-LS3	۵-۲۵ (۲۰)	۱-۳	۴-۶	۲.۳-۲.۵	۵-۱۵	نسبتاً هوازده
12	SH-LS4	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۲.۵ و ۲-۵	۴-۶ و ۲-۴	۲.۳-۲.۶	۵-۱۰	نسبتاً هوازده
13	LI2	۱۰۰-۱۵۰ (۱۲۵)	۲.۵-۶	۱۵-۳۰	۲.۵-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده
14	LI3	۱۰۰-۱۵۰ (۱۲۵)	۵-۱۰	۱۵-۳۰	۲.۵-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده
15	LI4	۵۰-۱۰۰ (۷۵)	۲.۵-۶	۵-۱۰	۲.۵-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده
16	LI5	۱۰۰-۱۵۰ (۱۲۵)	۲.۵-۶	۵-۱۰	۱.۹-۲.۷	۵-۱۵	کمی هوازده
17	LI6	۱۰۰-۱۵۰ (۱۲۵)	۵-۱۰	۱۵-۳۰	۲.۵-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده
18	LI-MA	۲۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۲-۵	۲.۲-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
19	LI-SH	۵-۵۰ (۳۵)	۱-۳	۲-۵	۲.۲-۲.۶	۲-۵	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
20	CZ	۵-۱۵۰	۵-۱۰	۵-۷	۲.۵-۲.۶	۲-۵	شدیداً هوازده
21	FZ	۵-۱۵۰	۱-۳	۴-۶	۲.۳-۲.۵	۵-۱۵	نسبتاً تا شدیداً هوازده

بر اساس این مطالعات و نیز نتایج برداشت ناپیوستگی ها در محدوده اطراف تونل تعداد ۱۱ مقطع به

عنوان مقاطع مدل سازی عددی در نظر گرفته شدند که ویژگی مربوط به سیستم درزه داری این مقاطع در

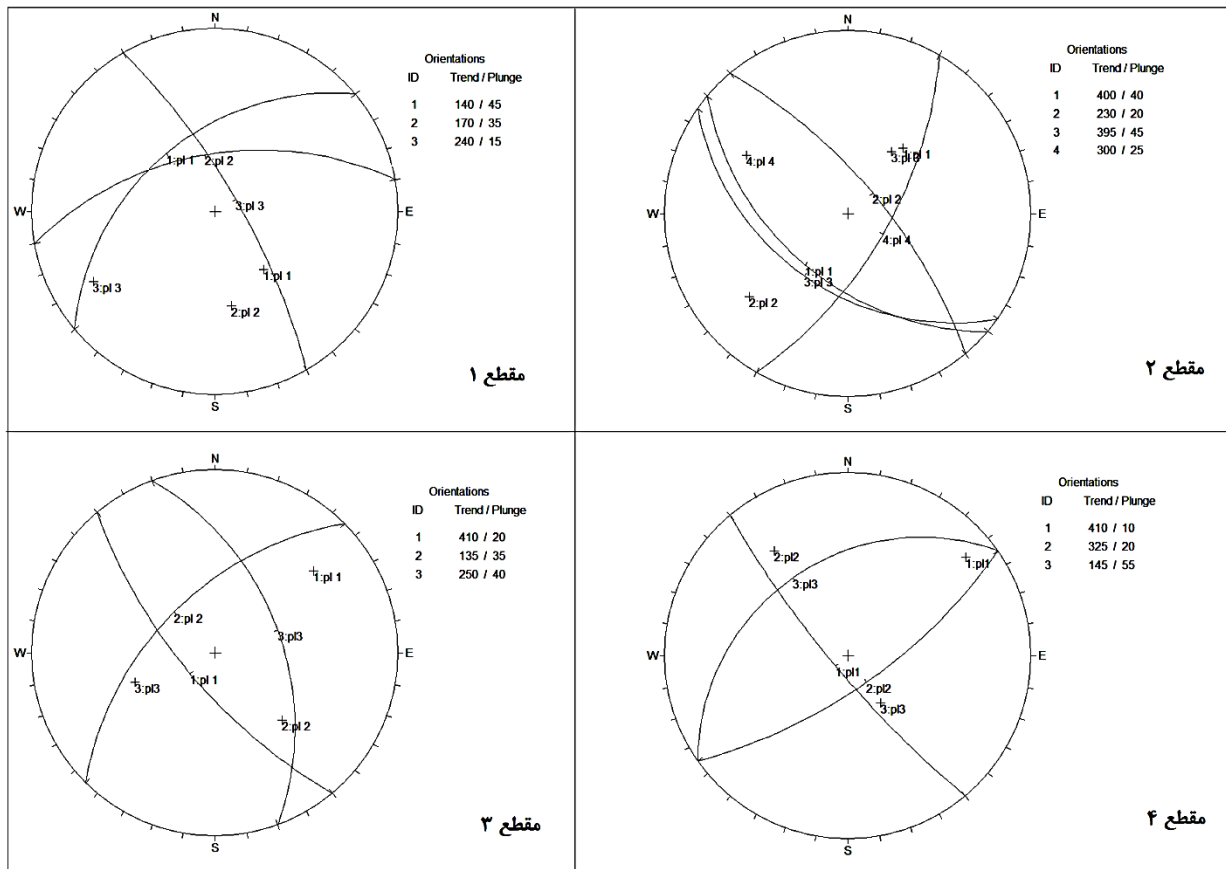
جدول ۴-۴ بیان شده است.

جدول ۴-۴- سیستم درزه‌داری در مقاطع مدلسازی شده

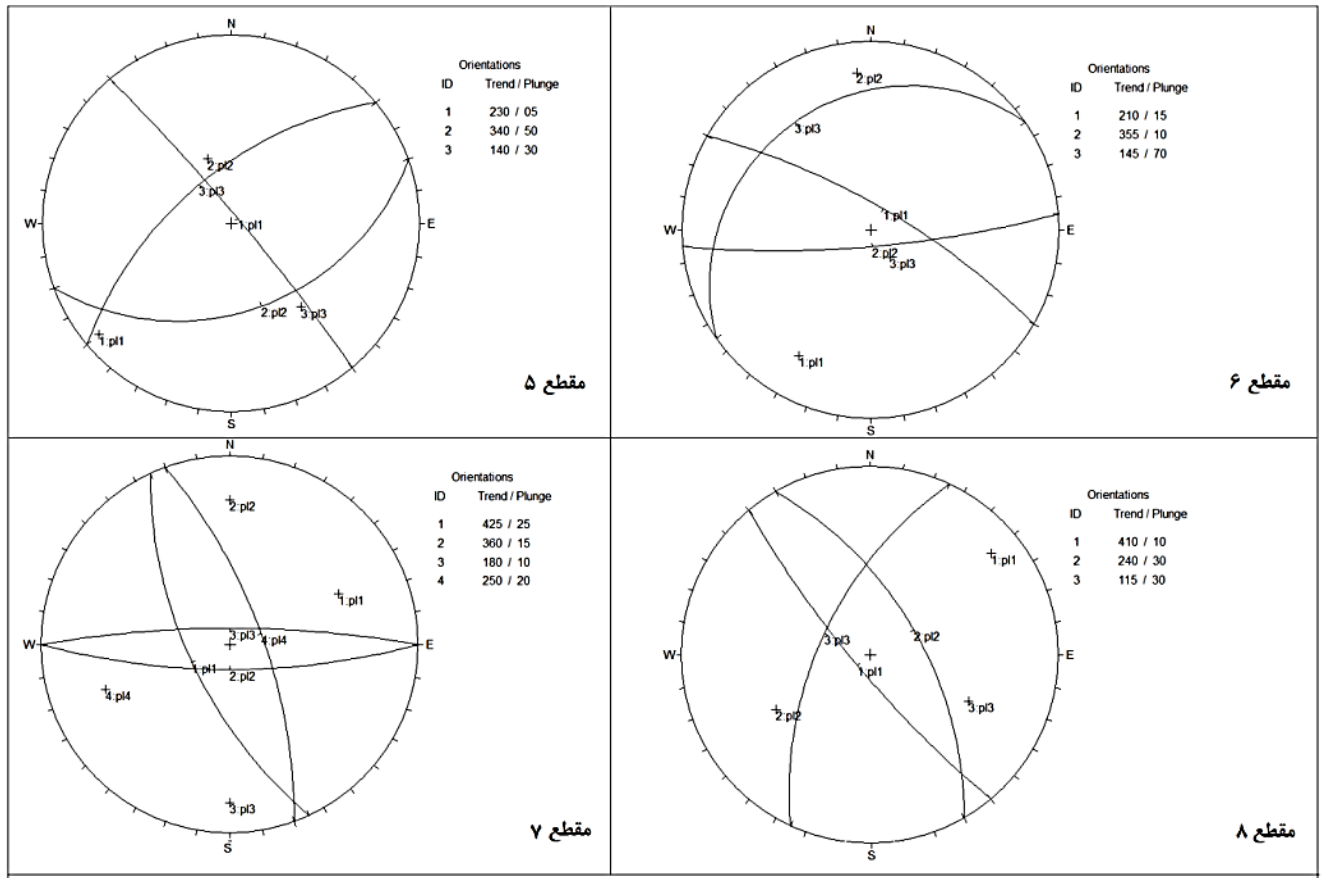
شماره مقطع	مترائز	شاخص زمین‌شناسی مهندسی	دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (حقیقی)
۱	۵۰۵۰	SH-LS4	J1	۴۵	۵۰
			J2	۵۵	۸۰
			J3	۷۵	۱۵۰
۲	۵۹۵۰	ML-SH5	J1	۵۰	۳۱۰
			J2	۷۰	۱۴۰
			J3	۴۵	۳۰۵
			J4	۶۵	۲۱۰
۳	۶۶۵۰	SH-LS3	J1	۷۰	۳۲۰
			J2	۵۵	۴۵
			J3	۵۰	۱۶۰
۴	۱۱۲۵۰	SH-LS2	J1	۸۰	۳۲۰
			J2	۷۰	۲۳۵
			J3	۳۵	۵۵
۵	۱۲۵۰۰	SH-LS1	J1	۸۵	۱۴۰
			J2	۴۰	۲۵۰
			J3	۶۰	۵۰
۶	۱۳۱۰۰	SH-LS4	J1	۷۵	۱۲۰
			J2	۸۰	۲۶۵
			J3	۲۰	۵۵
۷	۱۸۱۰۰	LI2	J1	۶۵	۳۳۵
			J2	۷۵	۲۷۰
			J3	۸۰	۹۰
			J4	۷۰	۱۶۰
۸	۱۸۷۵۰	LI3	J1	۸۰	۳۲۰
			J2	۶۰	۱۵۰
			J3	۶۰	۲۵
۹	۱۹۰۰۰	LI4	J1	۸۰	۳۲۰
			J2	۷۵	۳۰۰
			J3	۸۰	۲۵
۱۰	۲۰۴۰۰	LI4	J1	۵۰	۳۲۰
			J2	۷۰	۱۹۰
			J3	۸۰	۲۹۵
۱۱	۲۱۱۰۰	LI-SH	J1	۶۰	۳۴۵
			J2	۶۵	۱۴۵
			J3	۵۵	۳۱۰

ویژگی شیب و جهت آن در هر دسته درزه این ۱۱ مقطع، توسط دایره عظیمه در شکل‌های ۲-۴ تا

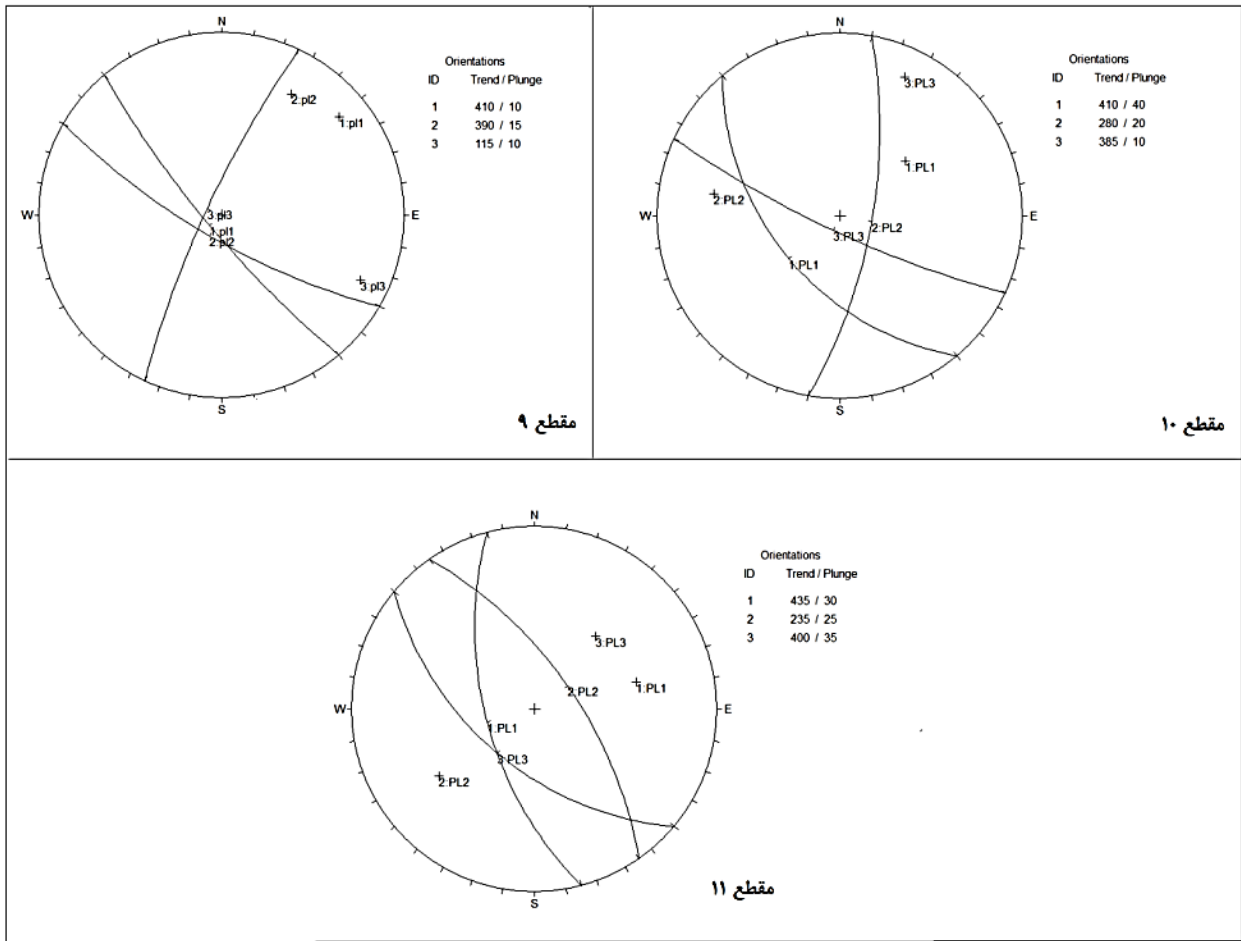
۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- صفحات اصلی درزه در چهار مقطع اول



شکل ۴-۳- صفحات اصلی درزه در چهار مقطع دوم



شکل ۴-۴- صفحات اصلی درزه در سه مقطع آخر

تشریح ویژگی توده سنگ در مسیر تونل

واحدهای تشکیل دهنده مسیر تونل عمدتاً شامل آهک، شیل، شیل‌های آهکی و آهک‌های شیلی می‌باشند که تحت تأثیر فرآیندهای زمین ساختی دچار چین خوردگی و شکستگی‌های فراوان گردیده‌اند. با توجه به گستردگی محدوده مورد مطالعه در برخی از قسمتهای مسیر تونل کمبود داده وجود دارد. به همین دلیل با توجه به تکرار برخی واحدها و همچنین شباهت‌های سنگ‌شناسی موجود بین برخی واحدها، از داده‌های موجود جهت برآورد خصوصیات سنگ بکر واحدهای دارای کمبود اطلاعات استفاده گردید (ساحل، ۱۳۸۶).

تعیین شرایط ناپیوستگی‌های توده‌های سنگی نیز مستلزم برداشت و بررسی خصوصیات ناپیوستگی‌ها در بخشها و واحدهای مختلف می‌باشد. این خصوصیات شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، تداوم، بازشدگی، جنس مواد پرکننده، درجه هوازدگی سطوح درزه‌ها، زبری و موج‌داری سطوح درزه و غیره می‌شود که در این پروژه برداشت گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (ساحل، ۱۳۸۶).

به لحاظ توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به دو بخش مشخص قابل تفکیک می‌باشد. بخش نخست به دلیل عدم مقاومت زیاد تحت تأثیر عوامل فرسایشی قرار گرفته و ریخت‌شناسی تپه ماهوری را ایجاد نموده‌است. این بخش از تونل بیشتر در واحدهای سازند پابده و گورپی واقع شده است. بخش دوم که دارای توپوگرافی خشن و نسبتاً مرتفعی می‌باشد، از واحدهای عمدتاً آهکی سازندهای کرتاسه و ژوراسیک تشکیل یافته است (ساحل، ۱۳۸۶).

در بخش کم ارتفاع و دارای توپوگرافی ملایم مسیر رخنمونهای آهکی سازند ایلام در تقدیس اسپر (مترائز ۴۲۰۰) رخنمون پیدا می‌کند. با توجه به خصوصیات مقاومتی سنگ بکر و همچنین ناپیوستگی‌های موجود در این واحدها، توده‌های سنگی این واحدها دارای وضعیت نسبتاً مناسبی هستند. با این وجود به دلیل قرارگیری این واحدها در ساختار تاقدیسی و همچنین وجود برخی گسل‌ها در این واحدها، به لحاظ وضعیت آب زیرزمینی در این بخش از تونل مشکلاتی بروز کرده است. همچنین به دلیل مجاورت این آهک‌ها که دارای نفوذپذیری خوبی هستند با شیل‌های حاوی مواد نفتی، این آهک‌ها دارای مقادیر متنابهی مواد آلی و گاز هستند که وجود این گازها از لحاظ ایمنی و اجرائی مخاطره آمیز می‌باشند (ساحل، ۱۳۸۶).

با ورود به محدوده دارای توپوگرافی خشن (مترائز ۱۶۰۰۰ به بعد)، عمده لیتولوژی تشکیل دهنده مسیر تونل شامل سنگ آهک می‌شود. براساس ضخامت لایه‌های آهکی همچنین وجود برخی ناخالصی‌ها، آهک‌های این بخش از مسیر با نام واحدهای LI2, LI3, LI4, LI5 و LI6 تفکیک گردیدند. البته در هسته

تاقدیس زیرمکان رخنمونهایی از واحدهای شیلی، مارنی و حتی تبخیری به چشم می‌خورد که این واحدها نیز بصورت واحدهای LI-MA و LI-SH جدا شدند (پیوست و) (ساحل, ۱۳۸۶).

بطور کلی واحدهای آهکی این بخش از مسیر به لحاظ پارامترهای مقاومتی دارای وضعیت مناسبی می‌باشند اما از دیدگاه تراوش آب زیرزمینی و وجود حفرات دارای پتانسیل خطر می‌باشند. همچنین در محل محور تاقدیس نیز به دلیل خرد شدگی توده‌های سنگی و وجود زونهای گسله متعدد واحدهای موجود دارای کیفیت بسیار پایینی می‌باشند. زونهای گسله مسیر تونل دارای پایین‌ترین کیفیت توده سنگ هستند. این واحدها با توجه به RQD بسیار پایین و ناپیوستگی‌های بسیار ضعیف دارای بیشترین پتانسیل ریزش، هجوم آب زیرزمینی، لهیدگی می‌باشند. همچنین با توجه به چین خورده بودن لایه‌های سنگی مسیر تونل در محل تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موجود به دلیل گسترش بیشتر شکستگی‌های سیستماتیک کیفیت توده سنگ کاهش می‌یابد. در چنین نواحی احتمال ناپایداری‌های ساختاری و هجوم آب زیرزمینی افزایش می‌یابد (ساحل, ۱۳۸۶).

۴-۵- مطالعات آب شناسی منطقه

معمولاً در حالتی که تونل در اعماق زیاد و مناطق کوهستانی حفر می‌شود، امکانات لازم برای انجام مطالعات و اکتشافات دقیق به دلیل هزینه‌های زیاد آنها به سختی امکان پذیر است. در چنین مناطقی، این مطالعات مبتنی بر بررسی‌ها و روش‌های کلاسیک هیدروژئولوژی بوده و منطقه وسیعی را به منظور کسب تمامی اطلاعات ضروری و تمامی شرایط مرزی زمین‌شناسی، تحت پوشش قرار می‌دهد. در مطالعه هیدروژئولوژیکی با چنین درجه‌ای از دقت، بایستی از برخی قضاوت‌های کارشناسی نیز بهره برد (ساحل, ۱۳۸۶).

منطقه مورد مطالعه از نظر امکان بررسی‌های دقیق دارای شرایط و محدودیت‌های خاصی بوده و به

طور حتم این محدودیت ها در جمع‌آوری مطالعات میدانی و دقت نتایج به دست آمده تاثیر گذاشته است (ساحل, ۱۳۸۶).

بر اساس گزارشات شرکت مهندسين مشاور طرح، وجود سازندهای آهکی با درز و شکافهای زیاد که بر اساس نتایج آزمایش لوژان گمانه‌ها در برخی از اعماق نفوذپذیری بالایی دارند این هشدار را می‌دهد که احتمال ورود آب زیرزمینی به تونل در مقاطع برخورد به این نقاط وجود دارد. هرچند توسعه سیستم کارستی پیشرفته دارای مجاری بزرگ در منطقه دور از انتظار است، ولی با اینحال با توجه به نتایج گمانه‌های اکتشافی منطقه و سایر مشخصات هیدروژئولوژیکی منطقه که قبلاً توصیف گردید، به نظر می‌رسد دو ناحیه از مسیر تونل با خطر نسبی بیشتری به لحاظ هجوم آب زیرزمینی مواجه هستند :

الف- تاقدیس اسپر: با توجه به مشخصات گمانه BH27 و ساختار هیدروژئولوژیکی این تاقدیس که تونل از ۱۰۰ متری زیر دماغه آن عبور خواهد کرد و آب زیرزمینی در جهت پلانچ تاقدیس و به طرف دماغه جریان دارد، احتمال هجوم آب از این سفره آب زیاد بوده و احتمالاً مشکل آفرین خواهد بود. (این گزارش مربوط به مرحله پیش از حفر می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که در زمان حفر این منطقه (مترائز ۳۵۰۰ الی ۴۸۰۰) تراوشی به میزان حداکثر ۲۵۰ لیتر بر ثانیه در تونل اتفاق افتاده است.)

ب- دره زیمکان: اطلاعات حاصل از گمانه BH19 در دره زیمکان و سایر مشخصات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی در محور تاقدیس زیمکان (بویژه گسل رانده از این محل) حاکی از وجود یک زون خرد شده در زیر دره بوده و به نظر می‌رسد یک جریان آب عمقی در زیر این دره و در طول محور این تاقدیس وجود دارد که می‌تواند به عنوان یک زون تمرکز جریان عمل کرده و از نظر هجوم آب به درون تونل مشکل آفرین باشند (ساحل, ۱۳۸۶). (در حال حاضر این مکان (مترائز ۱۹۰۰۰-۲۲۰۰۰) مورد حفر قرار نگرفته است.)

با توجه به اطلاعات موجود از جمله مشخصات گمانه ها و وضعیت هیدروژئولوژیکی به نظر می‌رسد برخی نواحی دیگر نیز بویژه تاقدیس کردی قاسمان احتمالاً با ورود آب زیرزمینی مواجه خواهند بود اما پیش‌بینی می‌شود بطور نسبی با مشکل کمتری نسبت به دو نقطه فوق‌الذکر مواجه شوند (ساحل، ۱۳۸۶).
. (ثبت تراوش در این منطقه آب خروجی ناشی از انحلال کارست را به میزان حداکثر ۱۰۵۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.) (پیوست ه)

در بقیه نواحی مسیر تونل، سطح آب مشاهده شده در گمانه‌ها، سطح ایستابی در نظر گرفته و فرض شده است که ستون آبی از این سطح تا سطح تونل بطور پیوسته امتداد دارد و فشاری برابر این ستون آب در هر نقطه به سقف تونل وارد می‌شود. به عبارت دیگر در امتداد تونل، یک سطح ایستابی فرضی برای کل منطقه در نظر گرفته شده است که از این طریق میزان دبی آب ورودی به تونل بر اساس روشهای موجود قابل محاسبه است. در جدول ۴-۵ به طور خلاصه ویژگی‌های هیدرولیکی قطعه دوم تونل به تفکیک متر از تونل آورده شده است (ساحل، ۱۳۸۶).

جدول ۴-۵- شاخصه‌های مهم هیدرولیکی با توجه به نام و مترای زون در طول پروفیل تونل (ساحل، ۱۳۸۶)

نام زون	مترای زون در طول پروفیل (متر)		نام گمانه معرف	متوسط نفوذپذیری* (m/s)	متوسط بار آبی (m)
	از	تا			
P1	۰	۷۵۵	BH-30,BH-31	1.5×10^{-8}	۴۵
P2	۷۵۵	۲۰۱۵	BH-29,BH-30-F	2.5×10^{-8}	۷۰
P3	۲۰۱۵	۲۰۷۰	-	1×10^{-6}	۸۵
P4	۲۰۷۰	۲۲۶۵	BH-29-F	1.5×10^{-8}	۱۰۰
G1	۲۲۶۵	۳۷۱۵	BH-28	1×10^{-7}	۱۱۰
Ki1	۳۷۱۵	۴۰۰۰	-	8×10^{-6}	۱۰۵
Ki2	۴۰۰۰	۴۷۱۵	BH-27	9×10^{-6}	۱۲۵
Ki3	۴۷۱۵	۴۷۳۵	-	3×10^{-5}	۱۳۰
Ki4	۴۷۳۵	۴۹۵۰	-	5×10^{-6}	۱۴۵
G2	۴۹۵۰	۵۸۵۵	BH-25,BH-A1/2	9×10^{-6}	۱۹۰
P5	۵۸۵۵	۶۱۱۰	BH-A1/3	1.5×10^{-6}	۱۸۰
G3	۶۱۱۰	۷۲۳۵	-	1×10^{-6}	۲۴۵
P6	۷۲۳۵	۷۳۵۰	BH-C	1.5×10^{-8}	۳۲۰
P7	۷۳۵۰	۷۳۷۰	-	5×10^{-7}	۳۳۰
G4	۷۳۷۰	۹۴۱۵	-	1×10^{-7}	۳۳۰
G5	۹۴۱۵	۹۹۱۰	BH-25	8×10^{-8}	۲۶۰
G6	۹۹۱۰	۱۱۷۱۵	BH-A2/4	1.5×10^{-6}	۲۹۵
P8	۱۱۷۱۵	۱۲۲۰۵	-	1.5×10^{-8}	۲۵۰
G7	۱۲۲۰۵	۱۳۲۹۰	-	1.5×10^{-6}	۲۲۵
G8	۱۳۲۹۰	۱۳۴۲۵	-	8.5×10^{-8}	۱۹۰
Ki5	۱۳۴۲۵	۱۴۲۴۰	BH-24	2×10^{-6}	۱۷۰
Ki6	۱۴۲۴۰	۱۴۲۵۰	-	3×10^{-5}	۱۵۰
Ki7	۱۴۲۵۰	۱۵۰۶۵	BH-A3/3	2×10^{-6}	۱۴۰

* نفوذپذیری به صورت تخمینی و معادل سازی شده آورده شده است.

ادامه جدول ۴-۵ شاخصه‌های مهم هیدرولیکی با توجه به نام و مترائز زون در طول نیمرخ تونل

متوسط بار آبی (m)	متوسط نفوذپذیری* (m/s)	نام گمانه معرف	مترائز ناحیه در طول نیمرخ (متر)		ناحیه
			تا	از	
۱۱۰	3×10^{-5}	-	۱۵۰۷۵	۱۵۰۶۵	Ki8
۱۰۰	2×10^{-6}	BH-23,BH-22-F	۱۵۹۱۵	۱۵۰۷۵	Ki9
۱۳۰	1×10^{-7}	BH-21-F	۱۶۳۸۰	۱۵۹۱۵	G9
۱۹۰	1×10^{-7}	-	۱۶۹۱۰	۱۶۳۸۰	G10
۲۶۰	1×10^{-7}	-	۱۷۴۰۰	۱۶۹۱۰	G11
۳۷۰	4×10^{-6}	BH-B	۱۸۰۳۰	۱۷۴۰۰	Ki10
۴۴۰	1×10^{-5}	-	۱۸۰۴۵	۱۸۰۳۰	Ki11
۴۱۰	3×10^{-6}	-	۱۸۶۴۰	۱۸۰۴۵	Ki12
۳۱۰	3×10^{-6}	-	۱۹۱۵۰	۱۸۶۴۰	Ki13
۱۶۰	4×10^{-6}	-	۱۹۹۴۰	۱۹۱۵۰	Ki14
۷۰	1×10^{-5}	BH-E,BH-18-F,BH-19,BH-20	۲۰۸۶۰	۱۹۹۴۰	Ki15
۸۰	2×10^{-5}	-	۲۰۹۴۰	۲۰۸۶۰	Ki16
۱۲۰	1×10^{-6}	-	۲۱۸۱۰	۲۰۹۴۰	J1
۲۴۰	5×10^{-6}	-	۲۳۰۵۰	۲۱۸۱۰	Ki17
۳۰۰	1×10^{-5}	-	۲۳۰۷۰	۲۳۰۵۰	Ki18
۲۸۰	5×10^{-6}	-	۲۴۱۰۰	۲۳۰۷۰	Ki19
۲۳۰	7×10^{-6}	-	۲۴۷۰۰	۲۴۱۰۰	Ki20
۸۰	7×10^{-6}	25475	۲۵۶۸۳	۲۴۷۰۰	Ki21

* نفوذپذیری به صورت تخمینی و معادل سازی شده آورده شده است.

۴-۶- بحث و نتیجه گیری

واحدهای آهکی ایلام که بخش عمده‌ای از پوشش تونل را تشکیل می‌دهند، دارای سیستم درزه داری با بازشدگی شدید و نیز پتانسیل انحلال می‌باشند. نتایج آزمایشات لوژن در گمانه BH-27، BH-A 3/3، BH-23، BH-21F و BH-B نشان می‌دهد که این گمانه‌ها در اعماق زیاد دارای نفوذپذیری زیادی هستند. با توجه به این مطلب باید انتظار داشت در زون‌های خرد شده موجود در این واحد مقادیر آب ورودی به تونل نسبت به واحدهای دیگر افزایش یابد.

بر اساس نتایج گزارشات شرکت مشاور طرح یکی دیگر از قسمت‌هایی که به لحاظ مسأله آب زیرزمینی و ورود آب به تونل مدنظر قرار داد، تاقدیس زیرمکان بوده که گمانه‌های حفر شده، نشانگر نفوذپذیری بالا در واحدهای این قسمت از مسیر تونل است. علت این امر علاوه بر وجود لیتولوژی مستعد این قسمت، خردشدگی شدید واحدها به علت عملکرد گسل‌های متعدد و چین خوردگی و گسترش شکستگی‌ها بدلیل این پدیده است. بنابراین مطالعات عددی به منظور پیش‌بینی تراوش توسط نگارنده در این مناطق صورت گرفته است.

این مطالعات بیان می‌کند که در بررسی‌های صحرایی به عمل آمده از منطقه اطراف قطعه دوم تونل زاگرس و نیز به کمک اطلاعات افراد محلی، کلیه چشمه‌های موجود در اطراف تونل شناسائی و مشخصات عمومی آنها جمع آوری شده است. محدوده مورد شناسائی در اطراف محور تونل با توجه به وضعیت زمین شناسی و هیدروژئولوژی منطقه به گونه‌ای انتخاب شده که اثر پذیر از محور تونل باشد و از سوی دیگر به دلیل مرزی و دور افتاده بودن منطقه، هیچگونه اطلاعات و آمار مدونی از آبدهی آنها در دسترس نیست. عدم وجود جاده‌های دسترسی مناسب و صعب العبور بودن منطقه مزید بر علت بوده و سبب شد تا اندازه‌گیری منظم و مداومی از مشخصات کمی و کیفی چشمه‌ها براحتی مقدور نباشد.

فصل پنجم:

مدلسازی تراوش آب به تونل

۵-۱- مقدمه

به منظور محاسبه نرخ تراوش آب به درون تونل، در این فصل به ساخت مدل‌های هیدروژئولوژیکی در نرم افزار UDEC و مقایسه آن با مقادیر مشاهده‌ای پرداخته شده و با توجه به ویژگی مدل‌های اعتبارسنجی شده تخمین تراوش برای دیگر مقاطع صورت گرفته است.

اطلاعات موجود در رابطه با میزان تراوش آب به درون تونل در زمان نگارش این تحقیق، مربوط به ۱۴ کیلومتر از حفر تونل می‌باشد (پیوست ه). با توجه به ویژگی و نتایج مدل‌های اعتبارسنجی شده^۱ در این محدوده، پیش‌بینی تراوش برای بخش‌های دیگر تونل صورت خواهد گرفت. در تمامی مراحل انجام این تحقیق، فرض پایدار بودن جریان تراوش برقرار است.

با توجه به اطلاعات موجود از میزان تراوش در حین حفر تونل، در متراژ ۴۵۰۰ الی ۷۵۰۰ و همچنین در متراژ ۱۰۵۰۰ الی ۱۳۵۰۰ یک جریان تراوش نسبتاً پایدار مشاهده می‌شود. به منظور بررسی روش به کارگرفته شده در مدلسازی عددی، در هر یک از نواحی فوق تعداد ۳ مقطع در نظر گرفته شده و نتایج آن با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شده و در ادامه حفر تعداد ۵ مقطع به منظور پیش‌بینی تراوش ارائه گردید.

۵-۲- مدلسازی عددی

به منظور بررسی مدل‌های ساخته شده در نرم افزار UDEC ابتدا کلیاتی از نرم افزار بیان شده و در ادامه روند مدلسازی ارائه خواهد شد.

۵-۲-۱- نرم افزار UDEC

نرم افزار UDEC یک برنامه دو بعدی است که بر اساس روش المان مجزا عمل می‌کند که این روش

^۱ Calibrate

به منظور بررسی رفتار تغییر شکل پذیری منفصل در توده سنگ درزه دار توسعه داده شده است. در این روش توده سنگ به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که توسط درزه‌ها تفکیک و امکان ایجاد تغییر شکل در امتداد آن وجود دارد در نظر گرفته می‌شود. تفاوت اصلی این روش با سایر روش‌ها در این است که هندسه مدل توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌ها تعریف می‌شود.

این نرم افزار قادر است جریان سیال درون ناپیوستگی‌ها و یا بخش‌های حفاری شده را شبیه سازی کند. در این حالت یک تحلیل هیدرومکانیکی صورت می‌گیرد که در آن قابلیت هدایت سیال در شکستگی‌ها به تغییر شکل مکانیکی و بازشدگی درزه‌ها بستگی دارد.

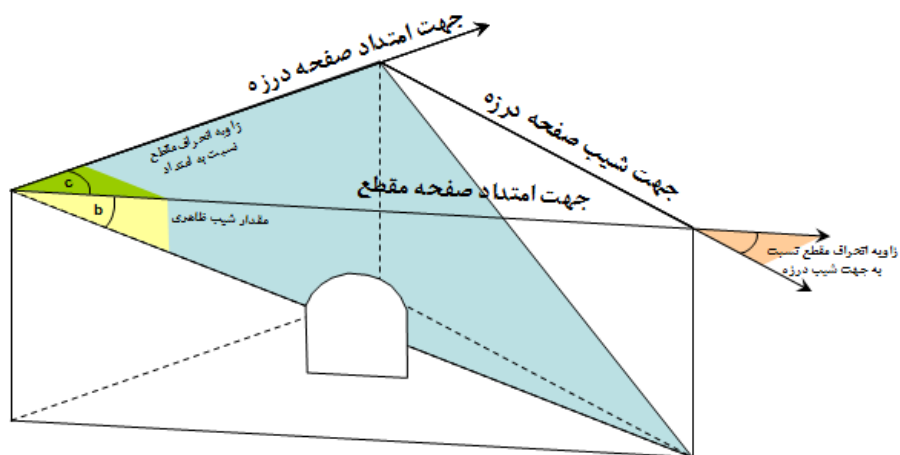
۵-۲-۲- مدل سازی هیدرولیکی در UDEC

به طور کلی مطالعه ژئومکانیکی این نرم افزار شامل مراحل زیر است:

- ✓ ساخت بلوک اولیه و اعمال ناپیوستگی‌ها
- ✓ تخصیص مواد
- ✓ اعمال شرایط مرزی و اولیه
- ✓ به تعادل رساندن مدل (در این مرحله چنانچه مدل به تعادل رسیده باشد، این فرآیند ادامه خواهد یافت در غیر این صورت بایستی شرایط مرزی را تغییر داد).
- ✓ اعمال تغییرات (ایجاد حفر)
- ✓ حل مسئله تا ایجاد نتیجه مطلوب

در ساخت یک مدل هیدروژئولوژیکی در نرم افزار UDEC پارامترهای اصلی شامل تعداد و جهت دسته درزه، شیب و امتداد و فاصله داری درزه‌ها، میزان بازشدگی درزه و سطح آب زیرزمینی در منطقه می‌باشد.

با توجه به اینکه در مطالعات زمین‌شناسی شیب و فاصله داری درزه‌ها به صورت حقیقی برداشت می‌شوند، لازم است که این مقادیر با توجه به امتداد تونل (شکل ۵-۱) به صورت ظاهری در مسئله لحاظ شوند.



شکل ۵-۱- امتداد صفحه درزه و امتداد تونل (مدنی، ۱۳۸۲)

برای این منظور کفایت که به محاسبه زاویه انحراف مقطع نسبت به امتداد صفحه درزه پرداخته شود. در این صورت با توجه به شکل ۵-۱ می‌توان روابط ۵-۱ و ۵-۲ را ارائه داد.

$$\tan b = \tan a \cdot \sin c \quad (۵-۱)$$

$$T = S \cdot \sin a \cdot \sin b \quad (۵-۲)$$

در این دو رابطه a و b به ترتیب بیانگر شیب‌های حقیقی و ظاهری، T و S فاصله داری حقیقی و ظاهری و c زاویه بین امتداد مقطع تونل و امتداد صفحه درزه است (Marjoribanks, 2010; مدنی، ۱۳۸۲).

پس از ساخت بلوک و اعمال ناپیوستگی‌ها ویژگی‌های مواد تخصیص پیدا می‌کند. شرایط مرزی با توجه به تنش‌های محیطی و بار هیدرولیکی موثر بر تونل اعمال می‌شود (ITASCA, 2004).

اندازه بلوک اولیه به ابعاد ۴۰ متر با توجه به شرایط حاکم بر مسئله و روش سعی و خطا به منظور تنظیم کردن مدل با شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. در ادامه به منظور مطالعه روند مدلسازی، مقطع شماره ۵ و ویژگی‌های ساختاری آن بیان می‌گردد.

۵-۲-۳- بررسی روند مدلسازی در مقطع شماره ۵

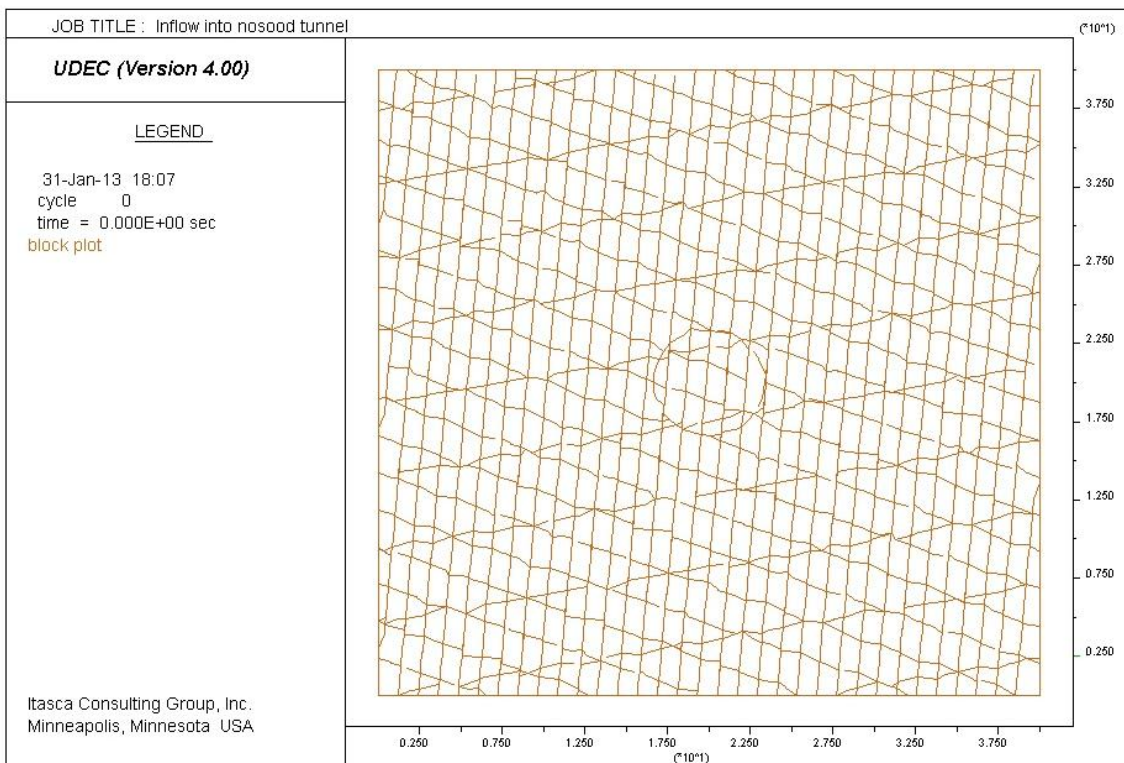
مقطع شماره ۵ در متراژ ۱۲۵۰۰ تونل قرار دارد. این مقطع دارای سه دسته درزه با ویژگی‌های جدول

۱-۵ می باشند.

جدول ۱-۵- ویژگی سیستم درزه در مقطع ۵

شماره مقطع	دسته درزه	شیب حقیقی (درجه)	جهت شیب (درجه)	شیب ظاهری (درجه)	متوسط فاصله داری ظاهری (متر)	بازشدگی (میلیمتر)
۵	J1	۸۵	۱۴۰	۸۵	۱/۲	۱-۳
	J2	۴۰	۲۵۰	-۲۰	۲/۲۷	۱-۳
	J3	۶۰	۵۰	۱۰	۴/۶	۳-۵

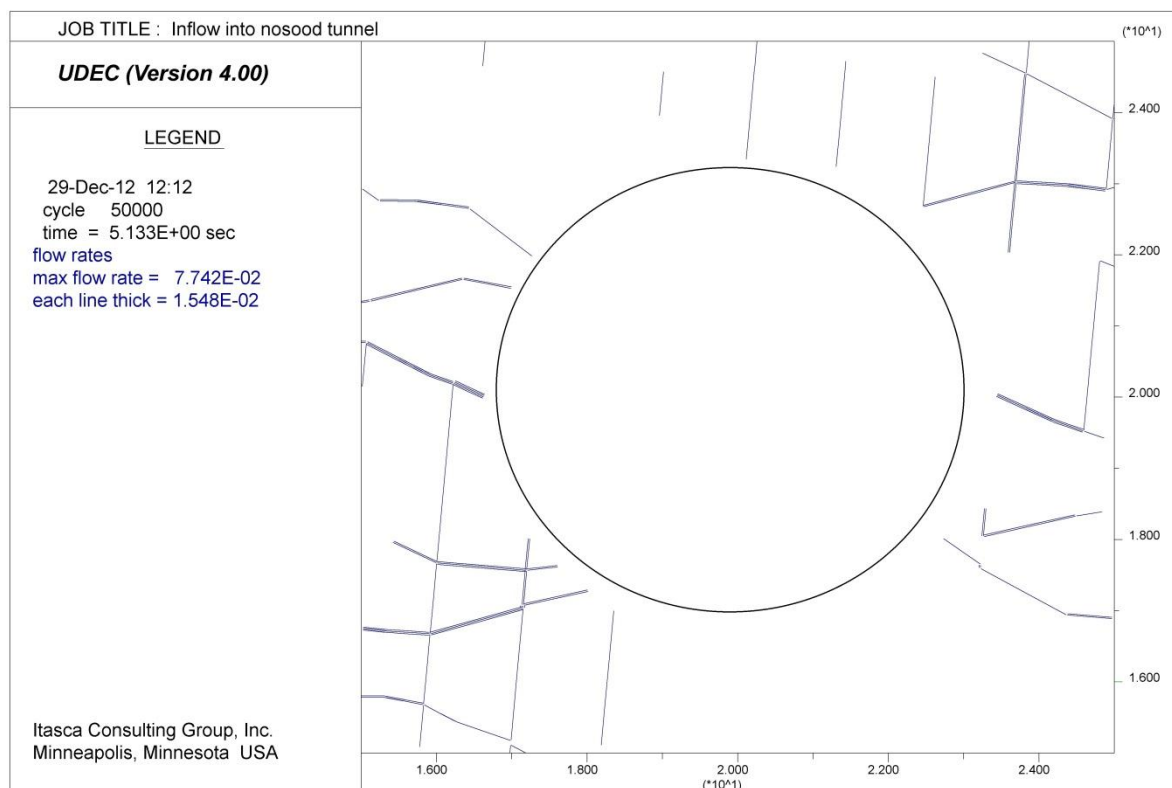
به منظور محاسبه شیب ظاهری به عنوان مثال با توجه به جدول ۱-۵ دسته درزه اول با جهت شیب ۱۴۰ درجه دارای امتداد صفحه ۵۰ درجه می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه امتداد محور تونل ۴۵ درجه نسبت به شمال است، امتداد صفحه تونل ۱۳۵ درجه بوده و در نتیجه اختلاف بین این دو مقدار ۸۵ درجه خواهد بود. این مقدار بیانگر زاویه C در رابطه ۱-۵ می باشد. با این استدلال مقادیر شیب ظاهری برای تمام مقاطع قابل محاسبه می‌باشد. در شکل ۲-۵ مدل بلوکی ساخته شده برای مقطع پنجم آورده شده است.



شکل ۵-۲- مدل بلوکی در مقطع شماره ۵

در ادامه ویژگی های مواد تشکیل دهنده بلوک با توجه به نتایج مطالعات صحرایی تخصیص پیدا می کند. این ویژگی ها شامل مشخصات مقاومتی ماده سنگ و سیال می باشد. سپس با توجه به عمق تونل و وزن روباره و نیز بار آبی روی تونل، شرایط مرزی اعمال خواهد شد.

در ادامه این مدل اولیه حل شده تا شرایط تعادل پایدار ایجاد شود سپس با ایجاد تونل در مدل، مسئله مجدداً حل شده و پس از ایجاد شرایط پایدار، مجموع خطوط جریان (شکل ۵-۳) در دیواره تونل بیانگر نرخ تراوش به درون تونل خواهد بود. (پلات خروجی مقاطع مختلف در پیوست الف تاج آورده شده است).



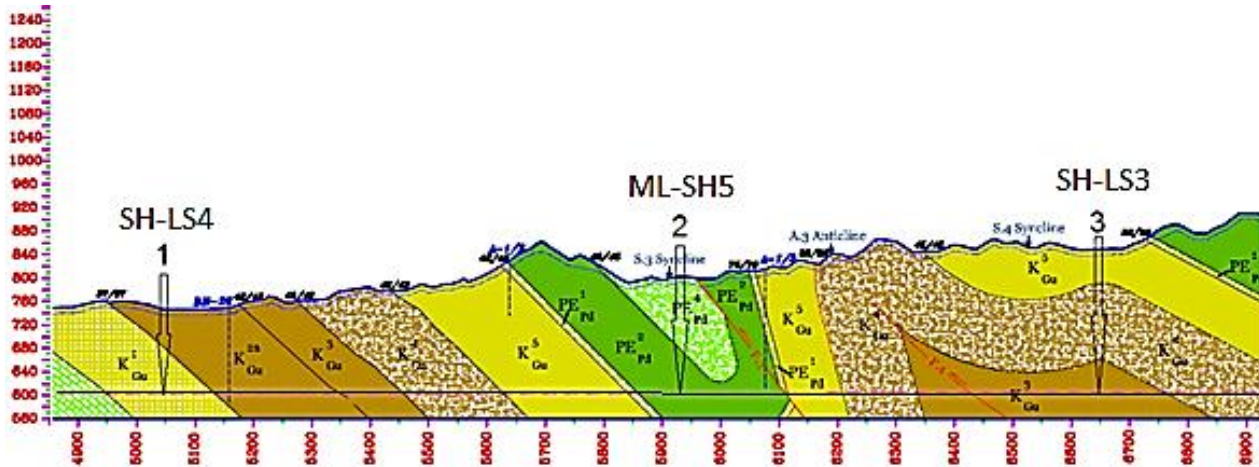
شکل ۳-۵- موقعیت تونل و خطوط تراوشی در اطراف آن

۳-۵- بررسی مدل‌های ساخته شده

نتایج تراوش آب مشاهده شده در مترژهای مختلف تونل نشان می‌دهد که میزان تراوش در برخی محدوده‌ها به طور سریع و شدید تغییر می‌کند. از سوی دیگر با توجه به کمبود گمانه و داده‌های زیرسطحی در مرحله پیش از حفر، به نظر می‌رسد که این تغییرات ناشی از یک سری ساختارهای زمین‌شناسی باشند که در مراحل اکتشافی شناخته نشده‌اند. به عنوان مثال با توجه به اینکه بیشتر ساختار تونل از سنگ آهک تشکیل شده، حفرات انحلال آهکی و چشمه‌های زیرسطحی از عوامل مهم تراوش به درون تونل هستند (ستاری، ۱۳۹۰). با توجه به پایداری نسبی تراوش آب در دو محدوده ۴۵۰۰ الی ۷۵۰۰ و ۱۰۵۰۰ تا ۱۳۵۰۰ متر، مدل‌های عددی به منظور اعتبار سنجی روش در این دو محدوده ساخته شدند (پیوست ه).

۵-۳-۱- بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی سه مقطع اول

شکل ۴-۵ نشان دهنده پروفیل تونل و موقعیت قرارگیری مقاطع در متر از ۴۵۰۰ الی ۷۵۰۰ است. خط سیاه رنگ در تصاویر معرف محور تونل می‌باشد. (پروفیل طولی کل تونل در پیوست موجود است).



شکل ۵-۴- مقاطع ۱، ۲ و ۳ در پروفیل طولی تونل (ساحل، ۱۳۸۶)

خصوصیات سنگ شناسی در سه مقطع اول

از نظر سنگ شناسی مقطع شماره ۱ درزه دار، لایه‌ای و تشکیل شده از شیل و سنگ آهک شیلی با پایداری متوسط می‌باشد. مقطع شماره ۲ درزه دار، لایه ای و چین خورده بوده و دارای ساختار سنگی سنگ آهک مارلی و شیل است. مقطع شماره ۳ به صورت درزه دار، چین خورده و لایه‌ای با ساختار شیل و سنگ آهک شیلی می‌باشد. جزئیات بیشتر در رابطه با سیستم درزه داری این مقاطع در جدول ۵-۲ ارائه شده است.

جدول ۵-۲- جزئیات مربوط به سیستم درزه‌داری سه مقطع اول

شماره مقطع	دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	شیب ظاهری (درجه)	متوسط فاصله داری (متر)	بازشدگی (میلی‌متر)
۱	J1	۴۵	۵۰	۵	۴	۱-۲
	J2	۵۵	۸۰	۴۰	۲	۱-۲
	J3	۷۵	۱۵۰	۷۵	۱	۱-۲
۲	J1	۵۰	۳۱۰	-۵۰	۱/۷	۱-۳
	J2	۷۰	۱۴۰	۷۰	۰/۸	۱-۲
	J3	۴۵	۳۰۵	-۴۵	۲	۱-۳
	J4	۶۵	۲۱۰	۳۰	۴/۴	۱-۳
۳	J1	۷۰	۳۲۰	-۷۰	۰/۸۵	۰/۱-۱
	J2	۵۵	۴۵	۵۵	۱	۰/۱-۱
	J3	۵۰	۱۶۰	۵۰	۱/۸	۱-۲

در این مقاطع تراوش حالتی نسبتاً پایدار داشته و به طور متوسط برابر با ۱۰۰ لیتر در ثانیه می باشد.

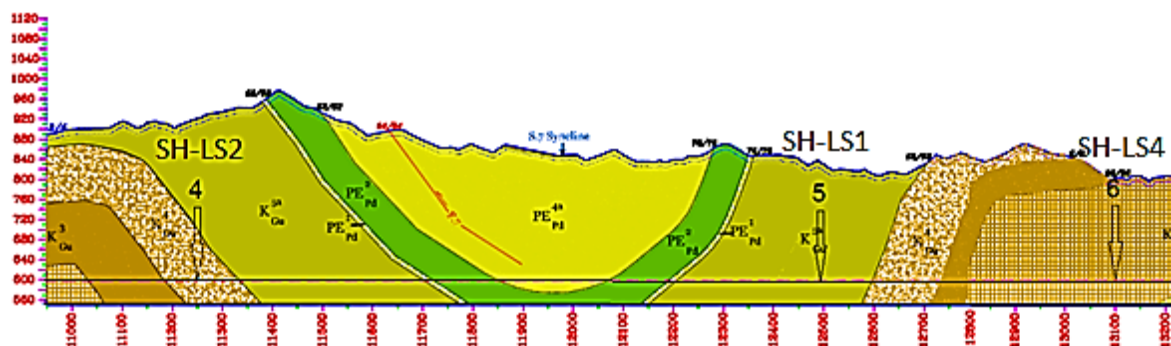
جزئیات بیشتر در رابطه با روند تراوش در این مقاطع در نمودار پیوست ه موجود می باشد.

۵-۳-۲- بررسی ویژگی های ژئوتکنیکی در سه مقطع دوم

در ادامه این مطالعه به منظور بررسی بیشتر تعداد سه مقطع دیگر در متراژ ۱۰۵۰۰ الی ۱۳۵۰۰ تونل، با

توجه به پایداری نسبی رژیم تراوش ساخته شد. شکل ۵-۵ نشان دهنده پروفیل تونل در این متراژ و

مقاطع مورد نظر می باشد.



شکل ۵-۵- مقاطع ۴، ۵ و ۶ در پروفیل طولی تونل

خصوصیات سنگ شناسی در سه مقطع دوم

از دید سنگ شناسی مقطع ۴ سنگی درزه دار بوده که متشکل از شیل سنگ آهکی و سنگ آهک شیلی همراه با شیل می باشد. مقطع ۵ لایه ای و درزه دار بوده و از شیل و آهک شیلی تشکیل شده است. مقطع ۶ نیز لایه ای و درزه دار بوده و در آن همراه با شیل و سنگ آهک، ماسه سنگ نیز دیده می شود. در جدول ۳-۵ جزئیات درزه داری این مقاطع بیان شده است.

جدول ۳-۵- جزئیات ناپیوستگی در سه مقطع دوم

شماره مقطع	دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	شیب ظاهری (درجه)	متوسط فاصله داری ظاهری (متر)	بازشدگی (میلیمتر)
۴	J1	۸۰	۳۲۰	-۸۰	۱/۴	۳-۴
	J2	۷۰	۲۳۵	-۲۵	۱	۱-۳
	J3	۳۵	۵۵	۷	۳/۷	۳-۴
۵	J1	۸۵	۱۴۰	۸۵	۱/۲	۱-۳
	J2	۴۰	۲۵۰	-۲۰	۲/۲۷	۱-۳
	J3	۶۰	۵۰	۱۰	۴/۶	۳-۵
۶	J1	۷۵	۱۲۰	۷۵	۱/۵	۱-۳
	J2	۸۰	۲۶۵	-۷۵	۱	۳-۴
	J3	۲۰	۵۵	۵	۲/۴	۱-۳

روند تراوش در این سه مقطع نسبتاً پایدار بوده و در حدود ۴۰۰ لیتر در ثانیه می باشد. جزئیات مربوط به تراوش در نمودار پیوسته موجود است.

۴-۵- نتایج محاسبه تراوش به صورت عددی و مقایسه آن با سایر روش‌ها

در جدول ۴-۵ نتایج حاصل از مدلسازی عددی و دیگر روش‌های تحلیلی و تجربی با مقادیر مشاهده‌ای بیان شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که مقادیر محاسبه شده از روش عددی نسبت به سایر روش‌ها از صحت بیشتری برخوردار بوده و به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر است. از سوی دیگر فرض همگن و پیوسته بودن محیط و نیز نبودن گمانه‌های کافی برای محاسبه نفوذپذیری باعث شده است که نتایج روش‌های تجربی و تحلیلی چندان معتبر نباشد.

جدول ۴-۵- مقایسه نرخ تراوش در روش‌های مختلف (لیتر در ثانیه)

مشاهده	UDEC	نتایج روابط تحلیلی-تجربی بر اساس ضریب نفوذپذیری تخمینی						بار آبی (m)	ضریب نفوذپذیری* (m/s)	متر از مقطع (m)	شماره مقطع
		Heuer	El-Tani	Lombardi	Karlsud	Lei	Goodman				
۹۰	۷۱/۲۸	۴/۳	۱۰/۱۳	۱۰/۱۴	۱۰/۱۸	۱۰/۱۵	۱۰/۱۴	۱۳۰	$5/4 \times 10^{-5}$	۵۰۵۰	۱
۱۰۰	۱۳۲/۵	۹	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۸۰	6×10^{-5}	۵۹۵۰	۲
۱۰۰	۱۱۷/۴۵	۹/۵	۱۴/۷	۱۴/۷	۱۴/۷	۱۴/۷	۱۴/۷	۲۳۰	5×10^{-5}	۶۶۵۰	۳
۴۵۰	۴۱۵	۱۶	۲۴/۳	۲۴/۳	۲۴/۳	۲۴/۳	۲۴/۳	۲۴۰	8×10^{-5}	۱۱۲۵۰	۴
۴۸۰	۴۴۹	۱۴	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۱۵	8×10^{-5}	۱۲۵۰۰	۵
۴۶۰	۳۴۰	۱۱	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۹۰	7×10^{-5}	۱۳۱۰۰	۶

* نفوذپذیری به صورت تخمینی و معادل آورده شده است

تحلیل و بررسی نتایج

از مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های تحلیلی و مقادیر مشاهده‌ای می‌توان دریافت که پاسخ‌های تحلیلی دارای خطای محاسباتی زیادی می‌باشند. علت ایجاد این خطا وجود مفروضاتی نظیر همگنی و پیوستگی محیط است. از سوی دیگر کمبود گمانه‌های حفاری و محاسبه نفوذپذیری به صورت تخمینی از عوامل بروز خطا در این روابط می‌باشد. لازم به ذکر است که در برخی از مطالعات مشابه که شدت نفوذپذیری توده سنگ و میزان بازشدگی درزه‌ها کمتر است این روابط دارای پاسخ معتبرتری خواهند بود زیرا با وجود درزه‌های بسته فرض پیوسته بودن محیط تقویت شده و نفوذپذیری محاسبه شده قابل کاربرد

برای کل توده سنگ خواهد بود.

با توجه به اینکه در روش عددی به مطالعه حرکت سیال در سیستم درزه پرداخته می‌شود، نتایج به دست آمده از این روش با مقادیر مشاهده‌ای مطابقت بیشتری دارند. جدول ۵-۵ ویژگی ساختاری توده سنگ در شش مقطع مورد بررسی را نشان می‌دهد. به منظور پیش‌بینی تراوش در سایر بخش‌های تونل تعداد ۵ مقطع دیگر مدلسازی شده که در ادامه مطالعه مورد بحث واقع خواهد شد. (در پیوست ه نمودار مربوط به تراوشات مشاهده شده موجود است).

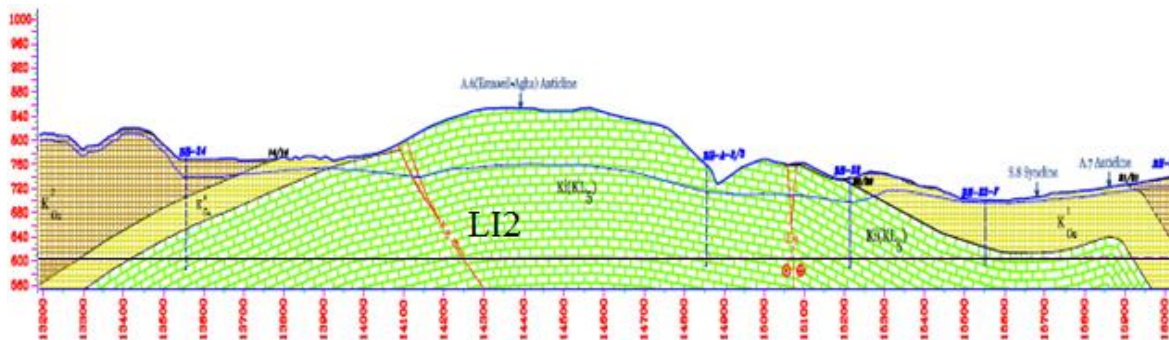
جدول ۵-۵- ویژگی ساختار توده سنگ در ۶ مقطع مورد بررسی

شماره مقطع	مترایژ	شاخص زمین شناسی مهندسی	جنس توده سنگ	ساختار توده سنگ	کیفیت توده سنگ	شدت هوازگی
۱	۵۰۵۰	SH-LS4	شیل- سنگ آهک- ماسه سنگ	لایه ای- درزه دار	نسبتا ضعیف و ناپایدار	هوازگی اندک
۲	۵۹۵۰	ML-SH5	مارل- شیل- سنگ آهک	چین خورده- لایه ای- درزه دار	نسبتا مقاوم و پایدار	هوازگی اندک
۳	۶۶۵۰	SH-LS3	شیل- شیل آهکی	لایه ای- چین خورده	نسبتا ضعیف و ناپایدار	متوسط هوازده
۴	۱۱۲۵۰	SH-LS2	شیل- شیل آهک	درزه دار	نسبتا مقاوم و پایدار	هوازگی اندک
۵	۱۲۵۰۰	SH-LS1	شیل- آهک شیل	درزه دار- لایه ای	خرد شده- ناپایدار	هوازگی نسبی تا شدید
۶	۱۳۱۰۰	SH-LS4	شیل- ماسه سنگ- شیل آهکی	لایه ای- درزه دار	نسبتا ضعیف و ناپایدار	هوازگی متوسط

۵-۵- پیش‌بینی تراوش در ادامه حفاری

میزان پیشروی تونل در زمان نگارش این تحقیق در حدود ۱۴۵۰۰ متر می‌باشد. از این جهت پیش‌بینی تراوش در ادامه این مترآژ صورت گرفت.

در ادامه حفر تونل از مترآژ ۱۷۴۰۰ تا ۱۸۸۰۰ ساختاری متشکل از سنگ آهک و سنگ آهک شیلی وجود دارد. سیستم درزه‌داری و دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی این محدوده همانند منطقه تاقدیس کردی قاسمان (شکل ۵-۶) می‌باشد. در واحد آهکی (LI_2) تاقدیس کردی قاسمان به دلیل شرایط انحلالی مساعد، تراوش شدیدی با حداکثر میزان ۱۰۵۰ لیتر در ثانیه رخ داده و در نتیجه این انتظار وجود دارد که به دلیل تشابه ساختاری و همینطور داشتن سطح آب زیرزمینی بالا، تراوشی مشابه در محدوده ۱۷۴۰۰ الی ۱۸۸۰۰ رخ دهد. از این جهت به دلیل داشتن بیشترین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در مترآژ ۱۸۰۰۰، مقطع شماره ۷ در این نقطه در نظر گرفته شده است (شکل ۵-۷).

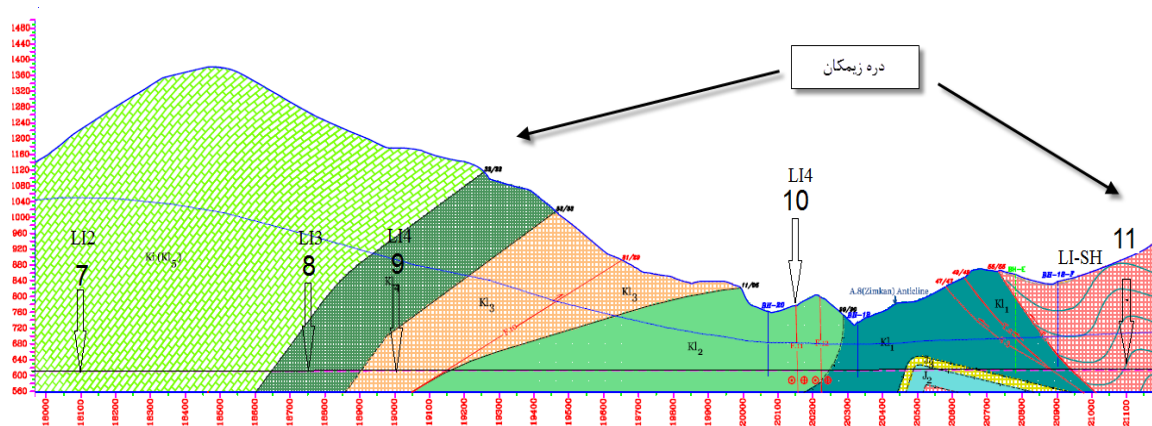


شکل ۵-۶- تاقدیس کردی قاسمان (مترآژ ۱۳۲۰۰-۱۶۰۰۰)

پس از این لایه، تونل با دو لایه مشابه (LI_4, LI_3) برخورد خواهد کرد (شکل ۵-۷). هر دو لایه از جنس سنگ آهک و شیل تشکیل شده و از جهت تعداد و شیب دسته درزه نیز شباهت‌های زیادی دارند. اما

متوسط بازشدگی ها در لایه اول (LI_3) چندین برابر لایه دوم (LI_4) است. همین مسئله باعث شد تا تراوش در لایه اول چندین برابر لایه دوم محاسبه شود. مقاطع ۸ و ۹ به ترتیب در این دو لایه در نظر گرفته شده است. در مترای ۱۹۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ تونل از ساختاری چین خورده و لایه‌ای (LI_5) عبور خواهد کرد که این ناحیه کاملاً از جنس سنگ آهک می‌باشد. با وجود پایین بودن سطح آب زیرزمینی و نیز کوچک بودن بازشدگی درزه‌ها به نظر می‌رسد تراوش شدیدی به دلیل عملکرد گسل در این منطقه پدیدار گردد. در مدلسازی تراوش در این لایه (مقطع ۱۰)، ساختاری به بزرگی ده برابر اندازه بازشدگی درزه، به عنوان گسل لحاظ گردید. البته در این مقطع میزان تراوش بدون در نظر گرفتن گسل نیز محاسبه شد که مقدار تراوش بسیار کمتر برآورد شد.

آخرین لایه مورد بررسی ($LI-SH$) از ۲۱۰۰۰ تا ۲۱۷۵۰ متری مشاهده می‌شود (مقطع شماره ۱۱). سازند تبخیری ژپس به همراه شیل و سنگ آهک ویژگی‌های سنگ‌شناسی این محدوده را تشکیل می‌دهند. به نظر می‌رسد انحلال ژپس عامل اصلی تراوش در این ناحیه باشد. از سوی دیگر این لایه دارای بازشدگی‌های بزرگی تا ۱۰ میلیمتر می‌باشد. شکل ۵-۷ مقاطع موجود در این لایه‌ها را نشان می‌دهد. ویژگی ناپیوستگی‌ها در این پنج مقطع در جدول ۵-۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷- مقاطع ۱۰، ۸، ۹، ۷ و ۱۱ در پروفیل طولی تونل (ساحل ۱۳۸۶)

جدول ۵-۶- ویژگی سیستم درزه در ۵ مقطع حفر نشده

شماره مقطع	دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	شیب ظاهری (درجه)	فاصله داری ظاهری (متر)	طول (متر)	بازشدگی (میلیمتر)
۷	J1	۶۵	۳۳۵	-۶۵	۱	۳-۱۰	۱-۳
	J2	۷۵	۲۷۰	-۷۰	۱/۵	۱-۳	۱-۳
	J3	۸۰	۹۰	۸۰	۲	۳-۱۰	۱-۳
	J4	۷۰	۱۶۰	۶۸	۲	۳-۱۰	۱
۸	J1	۸۰	۳۲۰	-۸۰	۱/۳۰	۳-۱۰	۱-۵
	J2	۶۰	۱۵۰	۶۰	۰/۹۵	۱-۳	۱-۳
	J3	۶۰	۲۵	-۳۰	۳	۳-۱۰	۳-۱۰
۹	J1	۸۰	۳۲۰	-۸۰	۱	۱-۳	۱
	J2	۷۵	۳۰۰	-۷۵	۱/۲	۱	۱-۲
	J3	۸۰	۲۵	-۶۲	۱/۴	۱	۱-۲
۱۰	J1	۵۰	۳۲۰	-۵۰	۰/۸۵	۱-۳	۱-۳
	J2	۷۰	۱۹۰	۵۷	۰/۹۵	۱-۳	۱-۳
	J3	۸۰	۲۹۵	-۸۰	۱/۳	۳-۱۰	۱-۳
۱۱	J1	۶۰	۳۴۵	-۵۶	۱/۲	۳-۱۰	۳-۱۰
	J2	۶۵	۱۴۵	۶۴	۰/۹	۱	۱-۳
	J3	۵۵	۳۱۰	-۵۳	۱/۴۵	۱-۳	۳-۱۰

جدول ۵-۷ بیانگر نرخ تراوش در مقاطع حفر نشده می باشد.

جدول ۵-۷- محاسبه نرخ تراوش در مقاطع حفر نشده (لیتر در ثانیه)

UDEC	نتایج روابط تحلیلی-تجربی بر اساس ضریب نفوذپذیری تخمینی						بار آبی (m)	ضریب نفوذپذیری** (m/s)	مترای مقطع (m)	شماره مقطع
	Heuer	El-Tani	Lombardi	Karlsud	Lei	Goodman				
۳۵۷	۲/۸۶	۴/۸۵	۴/۸۵	۴/۸۵	۴/۸۵	۴/۸۵	۴۳۰	1×10^{-5}	۱۸۱۰۰	۷
۱۱۴۰	۴/۲۶	۷/۶۶	۷/۶۶	۷/۶۶	۷/۶۶	۷/۶۶	۳۲۰	2×10^{-5}	۱۸۷۵۰	۸
۲۱	۰/۵۲	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۲۹	۲۶۰	4×10^{-6}	۱۹۰۰۰	۹
۱۲۷۷	-	-	-	-	-	-	۷۰	2×10^{-6}	۲۰۴۰۰	*۱۰
۲۲۷	۰/۰۴۶	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶	۷۰	2×10^{-6}	۲۰۴۰۰	۱۰
۱۱۳۱	۴	۵/۳	۵/۳	۵/۳	۵/۳	۵/۳	۱۲۰	3×10^{-5}	۲۱۱۰۰	۱۱

* تراوش در این مقطع با در نظر گرفتن گسل محاسبه شده است.

** نفوذپذیری این مقاطع به صورت تخمینی و معادل آورده شده است.

تحلیل و بررسی تخمین تراوش در ۵ مقطع حفر نشده

مقطع هفت: پاسخ به دست آمده می توان دریافت که تنها عامل تراوش، سطح بالای آب زیرزمینی است. زیرا بازشدگی درزه ها در این منطقه چندان زیاد نبوده و گسل نیز دیده نمی شود. اما امکان وجود حفرات انحلالی و تراوش یکباره ناشی از آن به درون تونل بسیار زیاد است.

مقطع هشت: عامل تراوش در این لایه بازشدگی نسبتا بالای درزه ها و نیز سطح بالای آب زیرزمینی می باشد.

مقطع نه: در این مقطع سطح آب زیرزمینی به نسبت کاهش یافته و درزه های لایه نیز عموما بسته می باشند بنابراین تراوش در این مقطع بسیار کم برآورد شده است.

مقطع دهم: تراوش این مقطع با حضور گسل شدت خواهد یافت. مضاف بر اینکه بدون وجود گسل نیز این منطقه تراوش نسبتا بالائی دارد.

مقطع یازده: در این مقطع سطح آب زیرزمینی کم اما میزان بازشدگی درزه ها بسیار زیاد است و دیگر

اینکه وجود ژیبس عامل مهمی در انحلال و تراوش ناگهانی در این مقطع می باشد.

۵-۶- تحلیل پارامتری^۱

در تحلیل پارامتری شرایط ذاتی توده سنگ در محدوده ممکن تغییر داده شده و تاثیر آن بر سازه زیرسطحی بررسی بررسی می شود. در این روش تحلیل هدف بررسی میزان عدم قطعیت و یا میزان تغییرپذیری این شرایط می باشد. در کنار این روش، تحلیل حساسیت^۲ به بررسی تاثیر ویژگی های ساختاری و هندسی سازه (مانند قطر، شکل سطح مقطع و ...) می پردازد. تحلیل پارامتری با هدف بررسی تاثیر ویژگی های درزه و نیز تغییر ارتفاع آب زیرزمینی بر میزان تراوش انجام شده است. برای این منظور مدل تنظیم شده در مقطع پنجم (متر از ۱۲۵۰۰) که تراوش محاسبه شده در آن با میزان تراوش مشاهده ای مطابقت بیشتری دارد انتخاب شد. جدول ۵-۸ ویژگی درزه و میزان تراوش در این مقطع را بیان می کند.

جدول ۵-۸- شاخصه های تراوشی در مقطع ۵

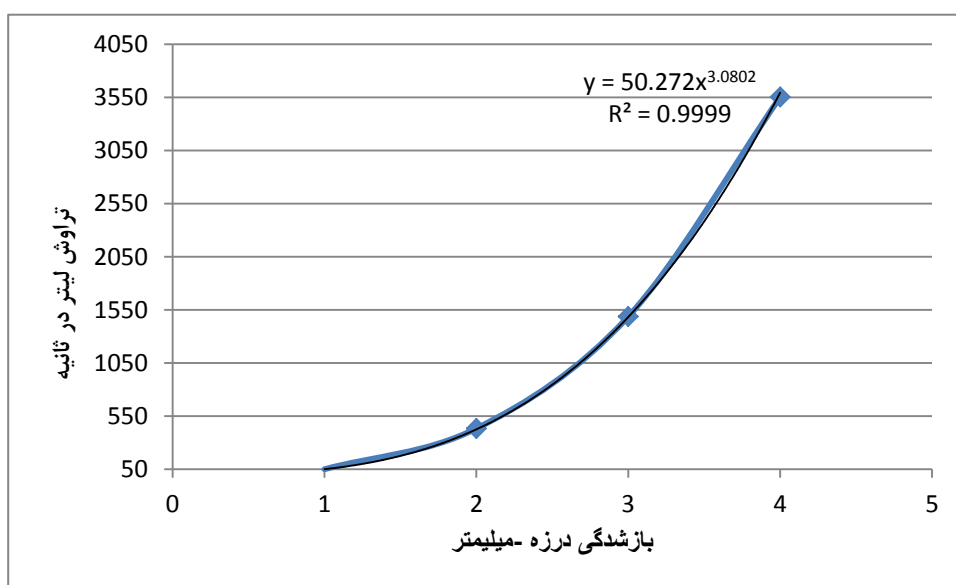
شماره مقطع	دسته درزه (درجه)	شیب ظاهری (درجه)	ارتفاع آب زیرزمینی (m)	بازشدگی (mm)	فاصله داری (m)	تراوش محاسبه شده (UDECC) (lit/s)	مشاهده (lit/s)
۵	J1	۸۵	۲۲۵	۱-۳	۱/۲	۴۵۰	۴۸۰
	J2	-۲۰		۱-۳	۲/۲۷		
	J3	۱۰		۳-۵	۴/۶		

¹ Parametric Analysis

² Sensitivity Analysis

۵-۶-۱- تاثیر بازشدگی درزه

با توجه به قانون کوبیک به نظر می‌رسد موثرترین ویژگی درزه در تغییر تراوش، بازشدگی آن باشد. تراوش با توان سوم بازشدگی نسبت مستقیم دارد (رابطه ۳-۸). به منظور بررسی این ویژگی، میزان بازشدگی مدل ۵ از یک تا چهار میلیمتر تغییر یافت که شکل ۵-۸ روند تغییرات تراوش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۸- تغییرات تراوش در بازشدگی ۱ تا ۴ میلیمتر

شکل ۵-۸ بیان می‌کند که قانون کوبیک در مدل محاسباتی جریان پایدار برقرار است.

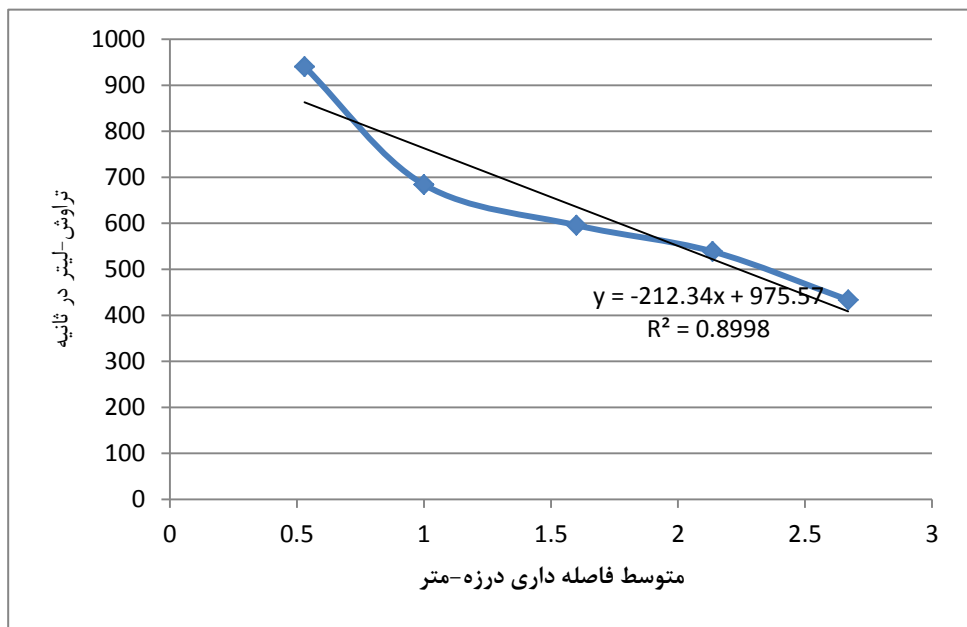
۵-۶-۲- تاثیر فاصله‌داری درزه

به طور کلی افزایش فاصله داری باعث کاهش تراوش می‌گردد (Masset and Loew, 2010). در این بررسی، فاصله داری هر یک از سه دسته درزه به طور همزمان در چهار مرحله و به میزان بیست درصد کاهش یافت که جدول ۵-۹ روند تغییرات در فاصله‌داری را بیان می‌کند.

جدول ۵-۹- تغییرات فاصله‌داری سیستم درزه

$L_5=20\%L_1$	$L_4=40\%L_1$	$L_3=60\%L_1$	$L_2=80\%L_1$	فاصله داری اولیه(متر) L_1	دسته درزه
۰/۲۴	۰/۴۸	۰/۷۲	۰/۹۶	۱/۲	J1
۰/۴۵	۰/۹	۱/۳۶	۱/۸۱	۲/۲۷	J2
۰/۹۲	۱/۸۴	۲/۷۶	۳/۶۸	۴/۶	J3
۹۴۰	۶۸۴	۵۹۶	۵۳۹	۴۳۳	تراوش(لیتردرثانیه)

شکل ۵-۹ بیانگر تغییرات نرخ تراوش با کاهش فاصله‌داری می باشد.

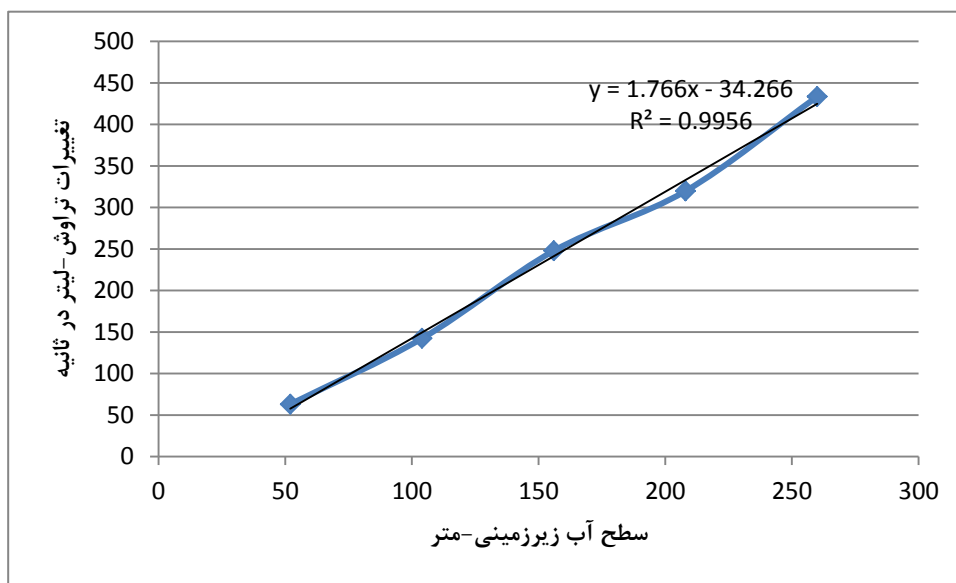


شکل ۵-۹- تغییرات تراوش با فاصله داری

با کاهش فاصله‌داری تعداد درزه های وارده به دهانه تونل افزایش یافته در نتیجه میزان تراوش به تونل افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۵-۹ تراوش در فاصله داری نزدیک به ۲ متر افزایش داشته و در فاصله‌داری کمتر از یک متر، این افزایش شدت بیشتری می‌گیرد که به نظر می‌رسد این روند تغییرات وابسته به قطر تونل باشد و در نتیجه تحلیل حساسیت نسبت به قطر تونل روند مطالعات را بهبود خواهد بخشید.

۵-۶-۳- تاثیر سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی در مدل اولیه برابر با ۲۶۰ متر در نظر گرفته شد و به منظور بررسی این متغیر، سطح آب در چهار مرحله به میزان بیست درصد از مرحله قبل کاهش یافت. نمودار ۵-۱۰ تراوش در اثر تغییرات سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. با کاهش بار آبی وارد بر تونل، فشار درون درزه‌ها کاهش یافته و بالطبع آن میزان تراوش نیز به طور خطی و بر اساس رابطه ۳-۸ کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه بررسی تراوش صرفاً به صورت هیدرولیکی صورت گرفته تغییرات خطی تراوش در کنار فشار هیدرولیکی منطقی به نظر می‌رسد.



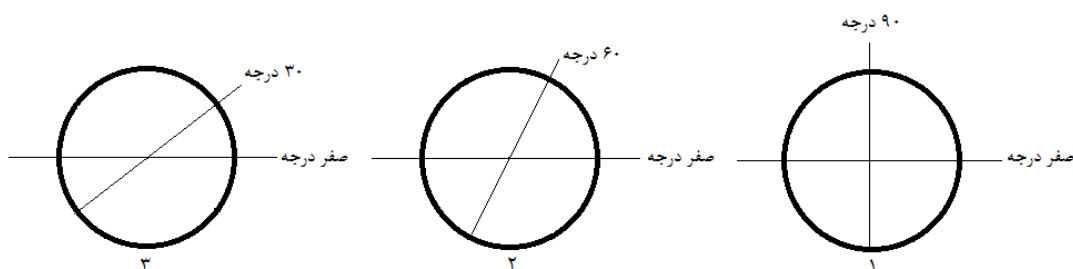
شکل ۵-۱۰- تغییرات تراوش با سطح آب زیرزمینی

۵-۶-۴- تاثیر جهت‌داری درزه

(الف) محاسبه با دو دسته درزه (حالت اول)

شیب دست درزه به عنوان یک متغیر مستقل در هر دسته درزه عمل می‌کند. به عنوان مثال در مدلی با سه دسته درزه نمی‌توان تغییرات یکسان در شیب را به صورت همزمان برای سه دسته درزه اعمال کرد.

در نتیجه، برای محاسبه تاثیر جهت‌داری بر تراوش آب، ابتدا مدلی با دو دسته درزه و فاصله‌داری ثابت ساخته شد که در آن دیگر ویژگی‌های مقطع ۵ در نظر گرفته شده است. در این مدل، شیب دسته درزه اول ثابت و برابر صفر در نظر گرفته شده و دسته درزه دوم در سه مرحله با زاویه ۳۰ درجه از ۳۰ تا ۹۰ درجه تغییر خواهد کرد. فاصله‌داری ثابت و برابر متوسط فاصله داری در سه دسته درزه مدل مقطع پنجم در نظر گرفته شده است. شکل ۵-۱۱ و جدول ۵-۱۰ به ترتیب تغییرات جهت‌داری و مقادیر تراوش در این مدل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۱- تغییرات جهت‌داری درزه در سه مرحله (از ۹۰ تا ۳۰ درجه)

جدول ۵-۱۰- محاسبه نرخ تراوش در سه مرحله تغییرات شیب (حالت اول)

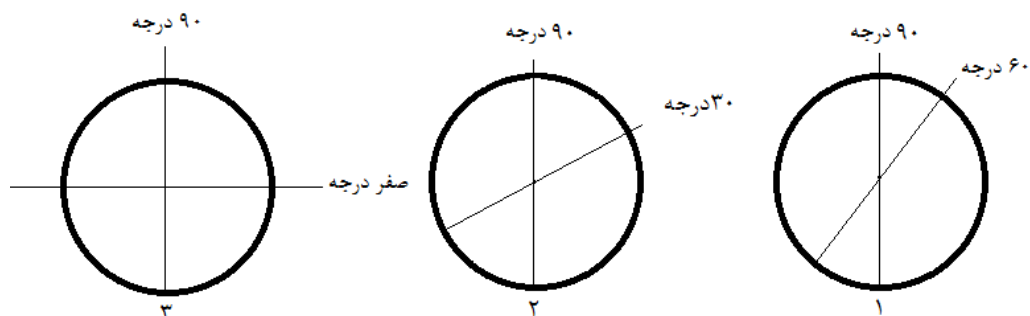
مرحله	دسته درزه	شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	تراوش (لیتر در ثانیه)
۱	J1	۰	۲/۵	۳۲۵
	J2	۹۰		
۲	J1	۰	۲/۵	۳۶۳
	J2	۶۰		
۳	J1	۰	۲/۵	۴۰۰
	J2	۳۰		

با توجه به مقادیر بدست آمده می‌توان گفت که با دو دسته درزه در حالت فاصله داری ثابت، افزایش شیب درزه باعث کاهش تراوش می‌گردد.

ب) محاسبه با دو دسته درزه (حالت دوم)

در این مرحله مدلسازی همانند حالت اول خواهد بود. با این تفاوت که شیب دسته درزه اول ثابت و

برابر ۹۰ درجه فرض می‌شود و دسته درزه دوم در سه مرحله از ۶۰ تا صفر درجه تغییر خواهد کرد. شکل ۱۲-۵ و جدول ۱۱-۵ به ترتیب، نحوه تغییرات شیب درزه مدل و نرخ تراوش را بیان می‌کند.



شکل ۱۲-۵- تغییرات جهت داری درزه در سه مرحله (از ۶۰ تا ۰ درجه)

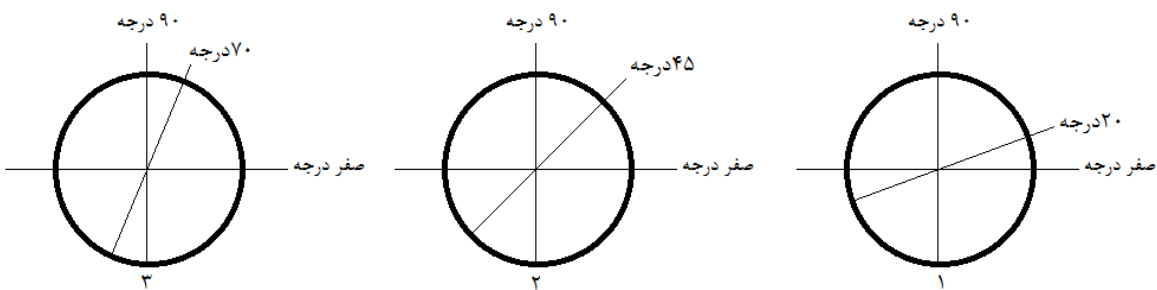
جدول ۱۱-۵- محاسبه نرخ تراوش در سه مرحله تغییرات شیب (حالت دوم)

مرحله	دسته درزه	شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	تراوش (لیتر در ثانیه)
۱	J1	۹۰	۲/۵	۴۶
	J2	۶۰		
۲	J1	۹۰	۲/۵	۲۲۷
	J2	۳۰		
۳	J1	۹۰	۲/۵	۳۲۵
	J2	۰		

نتایج این مرحله نیز تأیید کننده افزایش نرخ تراوش با کاهش شیب دسته درزه می‌باشد.

ج) محاسبه با سه دسته درزه

به منظور شبیه سازی بهتر مسئله با مدل مقطع شماره ۵، مطالعه تاثیر جهت داری با سه دسته درزه ادامه یافت. برای این منظور دو دسته درزه ثابت با شیب افقی و قائم در نظر گرفته شده و دسته درزه سوم با شیب متغیر محاسبه می‌گردد. در این مدل فاصله داری ثابت و برابر ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳-۵ و جدول ۱۲-۵ به ترتیب تغییرات زاویه داری و مقادیر تراوش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۳- تغییرات جهت داری با سه دسته درزه

جدول ۵-۱۲- تغییرات تراوش در حضور سه دسته درزه

مرحله	دسته درزه	شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	تراوش (لیتر در ثانیه)
۱	J1	۰	۲/۵	۵۱۸
	J2	۹۰		
	J3	۲۰		
۲	J1	۰	۲/۵	۴۴۲
	J2	۹۰		
	J3	۴۵		
۳	J1	۰	۲/۵	۳۶۰
	J2	۹۰		
	J3	۷۰		

در این حالت نیز با کاهش شیب درزه، نرخ تراوش آب افزایش می‌یابد. در ادامه با شیب‌های واقعی مربوط به مقطع پنجم مدل‌سازی صورت گرفت که نتایج مدل‌سازی موید نتایج بدست آمده از حالات قبل می‌باشد. در این مدل‌سازی شیب‌های ۲۰- و ۸۵ درجه ثابت نگه داشته شده و شیب ۱۰ درجه تا ۷۰ درجه تغییر می‌کند (جدول ۵-۱۳). در این حالت فاصله داری ثابت و برابر ۲/۵ متر قرار داده شد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که در محاسبه تراوش به درون تونل از چند دسته درزه، چنانچه فاصله داری ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش شیب دسته درزه نرخ تراوش به درون تونل کاهش می‌یابد. از دید محاسباتی می‌توان چنین در نظر گرفت که همواره با کاهش شیب، مقدار تانسور نفوذپذیری (رابطه ۲-۷) افزایش می‌یابد و از سوی دیگر در جریان افقی جبهه‌کار، وجود درزه‌های کم شیب روند زهکشی را تسریع کرده و باعث تراوش سریع‌تر آب به تونل می‌شوند و وجود درزه‌های عمود بر جریان این روند را

کاهش می‌دهند (Gattinoni and Scesi, 2009). مطالعه تغییرات تراوش در ازای تغییر شیب با فاصله داری‌های مختلف در چند دسته درزه، نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

جدول ۵-۱۳- تغییرات تراوش در مقطع ۵ با فاصله داری ثابت

مرحله	دسته درزه	شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	تراوش (لیتر در ثانیه)
۱	J1	۸۵	۲/۵	۳۹۲
	J2	-۲۰		
	J3	۱۰		
۲	J1	۸۵	۲/۵	۲۸۱
	J2	-۲۰		
	J3	۴۵		
۳	J1	۸۵	۲/۵	۲۴۶
	J2	-۲۰		
	J3	۷۰		

۵-۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این فصل به منظور مطالعه و تخمین تراوش آب زیرزمینی به درون تونل از مدلسازی عددی در نرم افزار UDEC استفاده گردید. در تمام مراحل انجام محاسبات فرض پایدار بودن جریان برقرار است. بر خلاف روش‌های تحلیلی و تجربی، نتایج مدلسازی عددی در شش مقطع اول، تطابق مناسبی با مقادیر مشاهده‌ای دارد. بنابراین به نظر می‌رسد در ادامه روند حفر این روش پیش‌بینی تراوش مفید واقع گردد. با توجه به اینکه در حال حاضر (دیماه ۹۱) از کل طول ۲۶ کیلومتری تونل، تنها ۱۴+۸۰۰ کیلومتر حفاری شده است، تعداد پنج مقطع به منظور پیش‌بینی تراوش در نواحی بحرانی تونل با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی پیشنهاد گردید. اشکال مربوط به نتایج مدلسازی عددی و نیز نمودار تغییرات نرخ تراوش مشاهده شده در تونل در پیوست گزارش موجود می‌باشد. در جدول ۵-۱۴ نتایج پیش‌بینی تراوش به روش عددی ذکر گردیده است.

جدول ۵-۱۴- مقادیر پیش بینی تراوش بر اساس مدل سازی عددی

شماره مقطع	۷	۸	۹	۱۰*	۱۰	۱۱
مترائز	۱۸۱۰۰	۱۸۷۵۰	۱۹۰۰۰	۲۰۴۰۰	۲۰۴۰۰	۲۱۱۰۰
تراوش (lit/s)	۳۵۷	۱۱۴۰	۲۱	۱۲۷۷	۲۲۷	۱۱۳۱

* تاثیر حضور گسل محاسبه شده است.

با توجه به نتایج تحلیل پارامتری و نتایج مربوط به پیش بینی تراوش در مقاطع مختلف، می توان گفت که در مقطع هفتم عامل اصلی تراوش بالا بودن بار آبی می باشد. در مقطع هشتم بازشدگی نسبتا بالای درزه ها و نیز بالا بودن بار آبی از عوامل اصلی تراوش هستند.

در مقطع دهم عملکرد شدید گسل و کاهش نسبی فاصله داری درزه ها باعث ایجاد تراوش خواهند شد. در مقطع آخر با توجه به بازشدگی های بزرگ ۱۰ میلیمتری درزه و نیز حضور ژئوپس روند تراوش شدت خواهد یافت.

لازم به ذکر است که با توجه به جنس لایه ها و حضور مستمر ساختارهای آهکی احتمال وجود حفرات کارستی و هجوم یکباره آب به درون تونل وجود خواهد داشت.

فصل هشتم:

انتخاب روش کنترل تراوش در

توئل بلندزاگرس

این فصل به مطالعه روش های ممکن در کنترل تراوش آب به درون تونل می پردازد. با توجه به آنکه روش های متعددی برای کنترل شرایط هیدرولیکی در فضاهاى زیرزمینی و محیط اطراف آن وجود دارد، در این تحقیق سعی بر آن است که روش های ارائه شده بر مبنای تکنیک حفر و نوع کاربری پروژه مورد بررسی قرار گیرند. لازم به ذکر است که روش های ارائه شده از جنبه اقتصادی مد نظر قرار نگرفته و بدیهی است که کاربرد هر یک از روش ها نیازمند مطالعه و بررسی کاملتر از دیدگاه های مختلف اجرائی و اقتصادی می باشند. در ادامه مطالعه به عنوان گام اول روش های پیشگیری از تراوش و سپس روش های کنترل و در نهایت سیستم کنترلی متناسب با پروژه ارائه خواهد شد.

۲-۶- تحلیل شرایط زمین در حین پیشروی

در پروژه های زیرزمینی حتی پس از تخمین و کاوش های سطحی، هنوز درصدی از عدم اطمینان وجود دارد. به عنوان مثال تشخیص مرزبندی دقیق لایه ها، میزان گسترش ناحیه گسلیده، وجود حفرات کارستی در حفاری توده سنگ و نیز وجود موانعی نظیر بولدرها^۱ و لنزهای ماسه ای پرشده از آب، در حفاریات سپری خاک ها از این دست می باشند. در بسیاری از شرایط، اکتشافات زیر سطحی در فاز ساخت از اهمیت بالائی برخوردار هستند. در حفاری تونلها از یک سری روش ها به طور مجزا و ترکیبی استفاده می شود که به طور خلاصه در زیر مورد بحث قرار می گیرند (Wittke and Druffel, 2006).

۱-۲-۶ روش های ژئوفیزیکی

روش لرزه ای یکی از کاربردی ترین روش های ممکن است. در این روش لازم است که دستگاه حفاری

^۱ Boulder

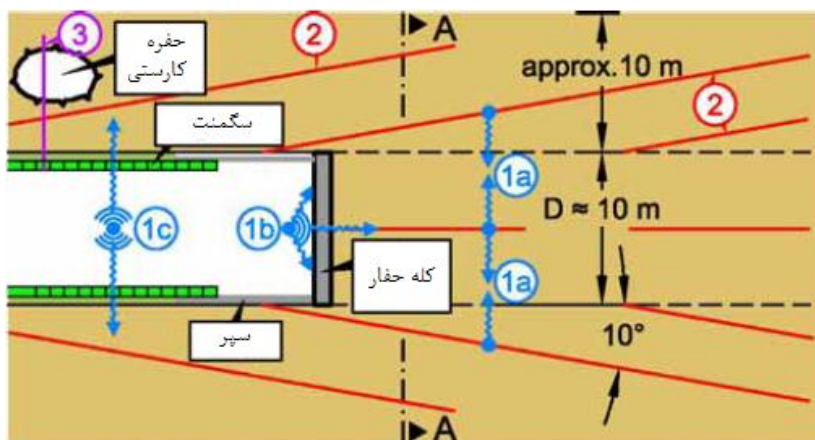
مجهز به سیستم تولید و ثبت لرزه باشد. همانند شکل ۶-۱ امواج بازگشتی اندازه گیری شده از TBM می تواند در مراحل زیر مورد تحلیل واقع شود (Wittke and Druffel,2006) :

✓ در جبهه کار موقت

✓ بیرون جبهه کار موقت

✓ در پشت سپر

هرگاه انتشار لرزه با فرکانس بالا صورت بگیرد، پاسخ بدست آمده دارای دقت بالا و فاصله تشخیص کوتاه می باشد. در انتشار لرزه فرکانس پایین، فاصله تشخیص بلند اما وضوح نتایج کمتر خواهد بود. قابلیت کاربرد این روش تا فاصله ۱۵۰ متری می باشد ضمن اینکه عوارضی تشخیص داده خواهند شد که موقعیتی عمود بر جهت انتشار موج داشته باشند (Wittke and Druffel,2006) .

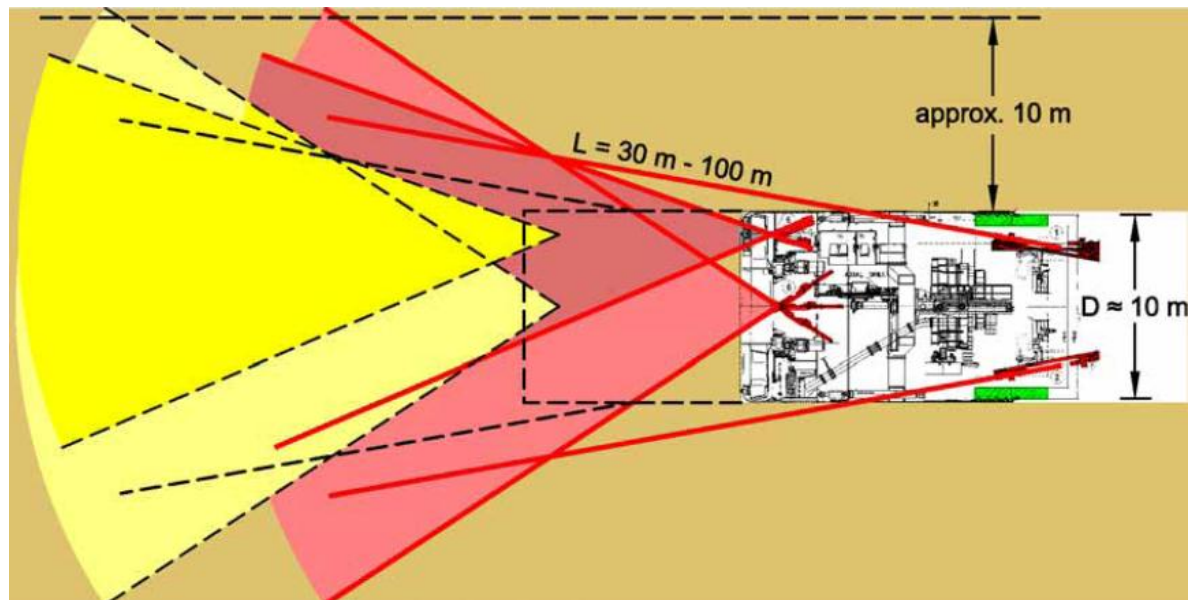


شکل ۶-۱- بررسی اکتشافی در حفاری تونلسازی مکانیزه ۱- بررسی های اکتشافی در جلو و پشت جبهه کار و پشت سپر ۲- چالهای بررسی در فواصل ۳۰الی ۱۰۰متری ۳- چال اکتشافی در پشت سپر (Wittke and Druffel,2006)

روش های ژئوفیزیکی دیگری نظیر ژئومغناطیس و ژئوالکتریک نیز وجود دارند که نتایج آنها تحت تاثیر حضور فلز در منطقه اندازه گیری است. در حال حاضر روش های ژئوفیزیکی با عدم اطمینان همراه بوده و در بسیاری از موارد، نتایج بدست آمده از آن مکمل نتایج حفاریات اکتشافی خواهد بود (Wittke and

۶-۲-۲- حفر گمانه اکتشافی^۱

نحوه حفاری اکتشافی از TBM همانند چالزنی برای نصب پیچ سنگ^۲ است. همانطور که گفته شد، نتایج آن در کنار بررسی های ژئوفیزیکی بسیار سودمند است. در انجام حفاری اکتشافی لازم است که ابتدا عملیات حفاری دستگاه متوقف شده و سپس حفاری گمانه از جبهه کار همانند شکل ۶-۲ صورت بگیرد. بررسی خرده های حفاری در کنار سایر نتایج اکتشافی بسیار مفید خواهد بود. حفاری همراه با مغزه گیری اطلاعات مفیدتری را به همراه خواهد داشت ضمن آنکه مستلزم زمان و دقت بیشتر در مرحله حفر می باشد (Wittke and Druffel,2006). در ادامه روش های کنترل تراوش ارائه و بررسی خواهند شد.



شکل ۶-۲- محدوده اطراف ماشین سبزی که در آنها امکان چالزنی وجود دارد (Wittke and Druffel,2006)

^۱ proddrilling

^۲ Rock Bolt

۳-۶- سیستم‌های کنترل آب در تونل

پس از تخمین و بررسی شرایط پیش رو نوبت به انتخاب و به کارگیری سیستم متناسب با تراوش خواهد رسید.

۱-۳-۶- ایستگاه‌های پمپاژ

در روند ساخت و ساز، به طور گسترده از پمپ‌ها به منظور تخلیه آب تونل، کاهش سطح آب در سازه‌های سطحی، تزریق دوغاب و غیره استفاده می‌شود. فاکتورهای مهمی که در انتخاب پمپ بایستی مد نظر قرار گیرد به شرح زیر است :

- ✓ قابلیت اطمینان^۱
- ✓ دسترسی به قطعات تعویضی
- ✓ سادگی در تعمیرات
- ✓ نصب آسان
- ✓ عملکرد اقتصادی مناسب بسته به توان مورد نیاز عملیات

امروزه پمپ‌هایی متنوع با مقاصد مختلف ساخته شده‌اند. بایستی با در نظر گرفتن نکاتی در رابطه با پروژه مورد نظر، سیستم پمپاژ نصب و راه‌اندازی شود. برخی از این نکات به شرح زیر می‌باشند:

- ✓ نرخی که سیستم پمپاژ بایستی آنرا تخلیه کند.
- ✓ اختلاف ارتفاع محل پمپاژ و محل تخلیه
- ✓ مشخصات لوله، شیر و فلکه و دیگر ملحقات مورد استفاده
- ✓ تغییرات ارتفاع آب و فشار در نقطه تخلیه

¹ Reliability

پس از انتخاب نوع پمپ و سیستم اتصال آنها نوبت به انتخاب ایستگاه پمپاژ می‌رسد. با توجه به آنکه حرکت سیال درون لوله‌ها، زانوئی‌ها و دیگر ملحقات سیستم تخلیه، حتی بدون وجود اختلاف ارتفاع نیز با افت فشار همراه است، برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی بایستی ایستگاه‌های پمپاژ در مناسب‌ترین نقاط تونل تعبیه شوند (Singh and Goel, 2006). از آن جهت که پروژه تونل بلند زاگرس در قطعه دوم دارای طولی بالغ بر ۲۶ کیلومتر است احداث تونل دسترسی و حفر شفت^۱ برای این منظور و مقاصدی چون تهویه تونل، در نقاط پر تراوش با توجه به تخمین تراوش انجام شده امری اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد.

۶-۳-۲- درزگیر^۲ها

درزگیرها از مواد الاستومر^۳ تشکیل شده‌اند که به طور وسیع در پوشش‌های پیش ساخته بتنی تونل (سگمنت) سگمندی کاربرد دارند. این ابزار به صورت نوارهایی هستند که به منظور آب‌بندی، اطراف قسمت داخلی پوشش سگمنت قرار گرفته و درون شیارهای بر روی آن متصل می‌شوند شکل (۶-۳). در مرحله نصب سگمنت، درزگیرها بر روی هم قرار گرفته و برای جلوگیری از ورود آب فشرده می‌شوند (Schurch, 2006).

^۱ Shaft

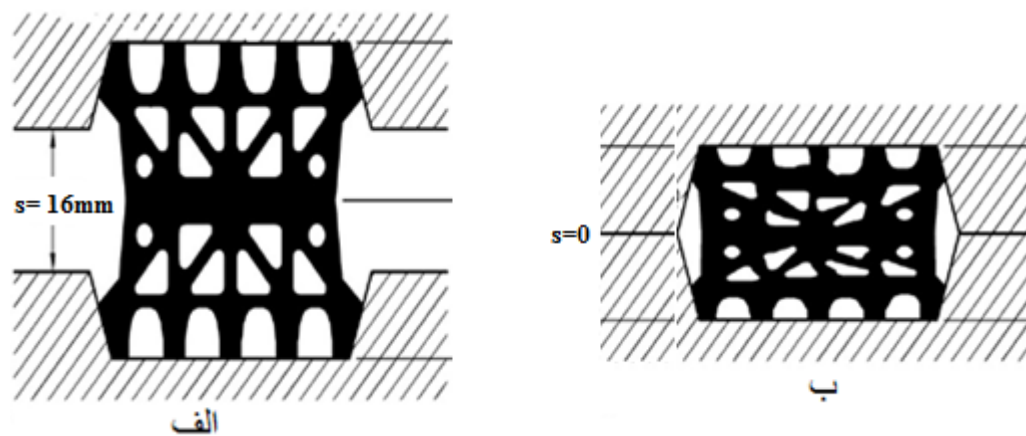
^۲ Gasket

^۳ Elastomer



شکل ۶-۳- پوشش سگمندی همراه با درزگیر (Wittke and Druffel, 2006)

در شکل ۶-۴ سطح تماس بین درزگیر و بدنه سگمنت نشان داده شده و مراحل بازشدگی و فشرده‌شدگی آن بیان شده است.

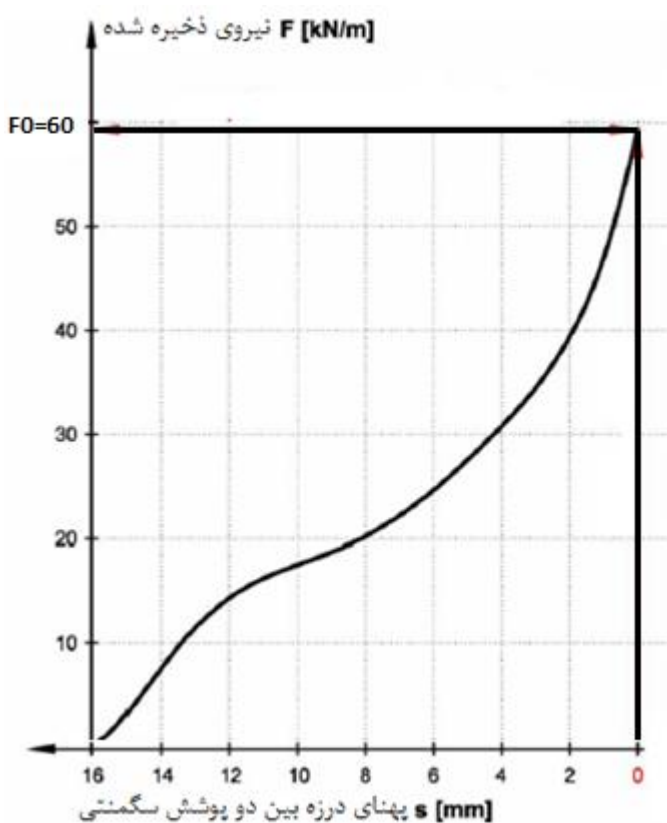


شکل ۶-۴- درزگیر در حالات الف) باز - ب) فشرده (Wittke and Druffel, 2006)

در شکل ۶-۵ نمودار نیرو-فاصله درزگیر به طور نمونه آورده شده است. نیروی لازم جهت تراکم دو سطح کناری سگمنت و قرارگیری آن در محل توسط جک‌های تراست اعمال می‌گردد. حداقل نیروی فشاری بایستی آنقدر باشد تا نیروی عکس‌العمل بین سگمنت‌ها را جبران کند. در مواردی که فشار آب

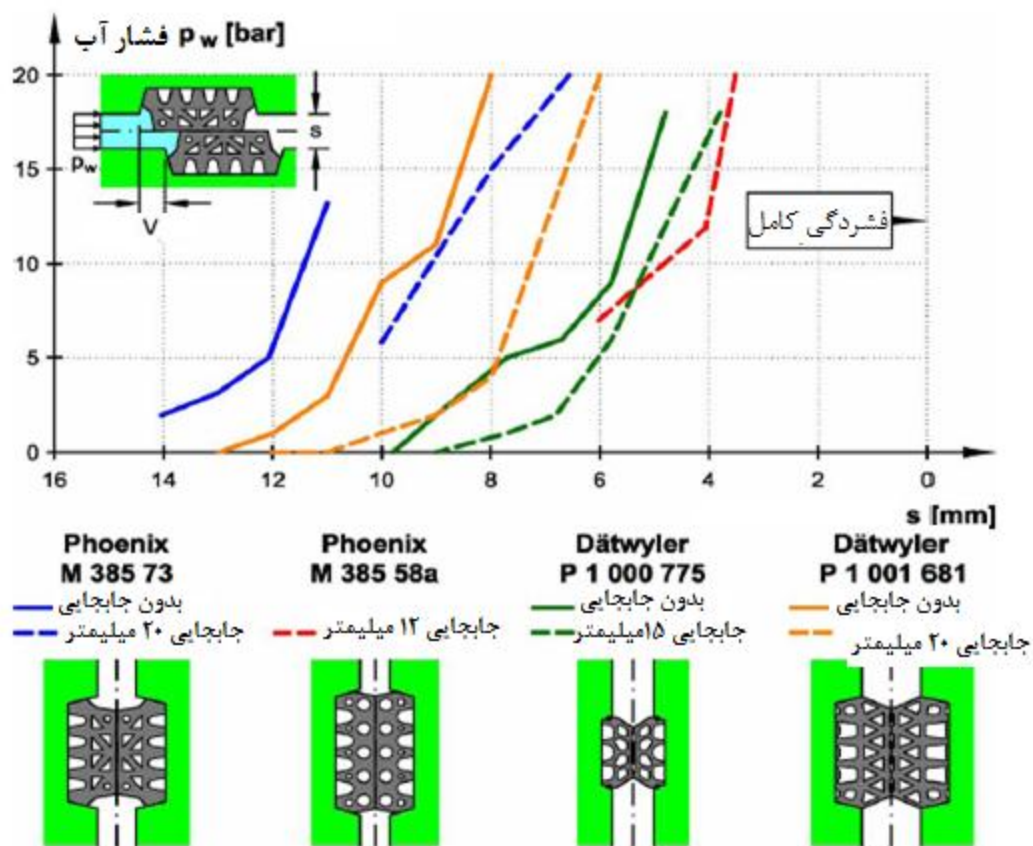
بسیار شدید باشد از درزگیر هایی با خاصیت تورمی استفاده می شود که فشار بیشتری را تحمل می کنند. شدت آماس پذیری در برخی از این درزگیرها، بسته به شدت تماس آب با آنها، بین دو تا هشت برابر است. این خاصیت با افزایش نمک موجود در آب و یا PH آن افزایش می یابد (Wittke and Druffel,2006).

برای جلوگیری از تورم درزگیرها قبل از نصب، آنها را با مواد مخصوصی پوشش می دهند که در مرحله نصب قابل برداشت است. میزان فشردگی شکاف درزگیر با توجه به شدت فشار آب تنظیم شده که در این آزمایش ها بیشترین میزان فشار آبی که در آن درزگیر هنوز بسته است اندازه گیری می شود (Schurch,2006).



شکل ۶-۵- نمودار نیرو - فاصله درزگیر (Wittke and Druffel,2006)

آزمایش قابلیت اطمینان درزگیرها با جابجایی^۱ و فواصل^۲ مختلف اندازه‌گیری می‌شود تا میزان مقاومت در مرحله نصب اندازه‌گیری شود. در شکل ۶-۶ نتایج آزمایش فشار آب و فضای خالی در دو حالت همراه و بدون حاشیه آورده شده است. این نتایج مربوط به محصولات شرکت های PHOENIX و DATWYLER آلمان است. در این آزمایش کمیت P_w بیشترین فشار آبی است که در آن درزگیر بدون نفوذ باقی می‌ماند. با افزایش فشار آب تا آستانه تراوش فاصله درزگیر (s) کاهش می‌یابد. در شکل ۶-۶ نمودارهای خط چین نشانگر ایجاد جابجایی (V) و خطوط ممتد معرف عدم وقوع جابجایی در عملکرد درزگیر است (Wittke and Druffel, 2006).



شکل ۶-۶- تست فشار آب درزگیر (Wittke and Druffel, 2006)

¹ Offset

² Gap

فشار تراوش آب در مدلسازی عددی برای پنج مقطع پیش‌بینی شده در جدول ۶-۱ بیان شده است. لازم به ذکر است که مقادیر محاسبه شده تنها با در نظر گرفتن فشار بار آبی موثر بر درزه‌ها بوده و از تاثیرات میدان تنش محیطی صرف نظر شده است. ضمن اینکه فشار محاسبه شده بیانگر فشار اولیه تراوش می‌باشد. بدیهی است که تاثیر تنش‌های محیطی بر درزه باعث افزایش تنش و در نتیجه کاهش فشار تراوش خواهند شد.

جدول ۶-۱- فشار تراوش محاسبه شده در مقاطع مختلف

شماره مقطع	۷	۸	۹	*۱۰	۱۰	۱۱
متراژ مقطع	۱۸۰۰۰	۱۸۷۵۰	۱۹۰۰۰	۲۰۴۰۰	۲۰۴۰۰	۲۱۱۰۰
فشار (bar)	۴۱	۱۷۰	۹/۲۸	۷۰/۵۶	۴۴	۴۱/۵۲

* مقطع همراه با گسل در نظر گرفته شده است.

با توجه به جدول فوق به نظر می‌رسد که روشی مکمل مانند تزریق برای کنترل تراوش لازم است.

۶-۳-۳- تزریق^۱

در سنگ‌های درزه‌دار اغلب تراوش از درزه‌ها و مناطق گسلیده است که بسته به شدت بازشدگی و ارتفاع آب زیرزمینی، تراوش افزایش یافته و در نتیجه باعث عدم پایداری دوغاب و شسته شدن فضای حلقوی اطراف می‌گردد. مقاومت برشی دوغاب در مرحله گرانرو^۲ و نیمه جامد می‌تواند به طور تقریبی برابر با حد جریان یافتگی در نظر گرفته شود زیرا در این حالت زاویه اصطکاک داخلی قابل چشم‌پوشی است (Thewes and Budach, 2009).

¹ Grouting

² Viscous

برای محاسبه حداقل فشار لازم جهت تزریق در پشت پوشش سگمنت فرض می‌شود تراوش آب به درون فضای حلقوی اطراف سگمنت با ناپیوستگی‌هایی با بازشدگی به میزان $2a_i$ صورت گیرد. نفوذ آب به درون فضای حلقوی و ناپایداری دوغاب به ترتیب هنگامی رخ می‌دهد که فشار آب p_w از فشار تزریق p_i بیشتر شده و فشار موثر آب $(p_w - p_i)$ نیز از مقاومت برشی دوغاب بالاتر باشد. حال با توجه به شکل ۶-۷ شرایط ناپایداری دوغاب توسط روابط زیر بیان می‌گردد: (Wittke and Druffel, 2006).

$$F_w - 2T \sin \alpha > 0 \quad \text{where} \{F_w = (P_w - P_i) 2a_i, T = \tau_0 \cdot b\} \quad (1-6)$$

با فرض معیار شکست موهر- کولمب، زاویه شکست برش برابر است با:

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (2-6)$$

از آنجا که زاویه اصطکاک داخلی دوغاب قابل چشم پوشی است:

$$(P_w - P_i) \cdot 2a_i - 2\tau_0 \cdot b \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} > 0 \quad (3-6)$$

با در نظر گرفتن قضیه فیثاغورث ($b^2 = 2a_i^2$) نامساوی زیر برقرار خواهد بود:

$$P_w - P_i > \tau_0 \quad (4-6)$$

بنابراین حداقل فشار تزریق برای جلوگیری از ناپایداری دوغاب به صورت زیر است:

$$P_i = P_w - \tau_0 \quad (5-6)$$

این رابطه نشان می‌دهد که حداقل فشار تزریق برابر اختلاف فشار آب و مقاومت برشی دوغاب می‌باشد.

باسیتی در نظر داشت که افزایش سن دوغاب باعث افزایش مقاومت برشی آن شده و در نتیجه با گذشت

زمان فشار تزریق کاهش خواهد یافت.

همچنین با افزایش غلظت و وزن مولکولی نیز این کمیت افزایش می‌یابد.

✓ قابلیت نفوذ^۱: این پارامتر معرف توانائی یک دوغاب جهت نفوذ در فضاهای متخلخل و یا پر کردن ترک‌های باریک را نشان می‌دهد. قابلیت نفوذ دوغاب وابسته به ترکیبی از عوامل مختلف از قبیل گرانیروی، شدت قطبی بودن ذرات، فشار تزریق درون چال و زمان گیرش یا ژل شدگی است.

✓ چسبندگی^۲: بیانگر حداقل تنش برشی است که در آن سیال جریان پیدا می‌کند. این کمیت با قابلیت نفوذ رابطه معکوس دارد.

✓ آب اندازی^۳: در یک دوغاب سوسپانسیونی آب اندازی معرف پایداری آن می‌باشد. میزان آبی که در حالت سکون و پس از ته نشینی ذرات جامد، در بخش فوقانی باقی می‌ماند بیانگر آب اندازی دوغاب است. از نظر انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) دوغابی مطلوب است که بعد از دو ساعت کمتر از ۵ درصد آب اندازی داشته باشد.

✓ زمان گیرش^۴ یا زمان ژل شدگی^۵: زمان گیرش واژه‌ای است که معمولاً در مورد دوغاب‌های پایه سیمانی استفاده می‌شود و زمان ژل شدگی در رابطه با دوغاب‌های شیمیائی کاربرد دارد. ولی تعریف هر دو آنها، زمان بین لحظه ترکیب کردن دوغاب و احراز حالت ژل شدگی دوغاب است که در آن دوغاب اتصالات فیزیکی - شیمیائی مناسبی بدست آورده است.

۶-۴-۳- دوغاب‌های پایه سیمانی

این نوع دوغاب مهمترین و پرکاربردترین نوع دوغاب‌ها در صنعت هستند. کارکردن با این نوع دوغاب

¹ Penetrability

² Cohesion

³ Bleeding

⁴ Set Time

⁵ Gel Time

ساده و شاید بتوان گفت دارای ساده ترین تجهیزات تزریق هستند. تولید یک دوغاب پایه سیمانی با دوام و رضایت بخش به نسبت آب به سیمان، نرخ آب اندازی و مقاومت آن بستگی خواهد داشت (عراقچیان، ۱۳۸۹).

پوزولان‌ها

این مواد مکمل سیمان هستند که بنابر تعریف به موادی گفته می شود که سیلیسی و یا سیلیسی آلومیناتی بوده و بخودی خود چسبندگی نداشته اما به صورت ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیائی دارند. این مواد باعث ایجاد ترکیباتی با خاصیت سیمانی و چسبندگی می شوند.

همراهی مقدار کمی پوزولان با سیمان سبب کاهش گرمای هیدراسیون، کاهش نرخ سخت شدگی و افزایش زمان گیرش خصوصا در درجه حرارت های پایین می شود. اما دوام و مقاومت سیمان بیشتر خواهد شد. از مهمترین پوزولان مورد استفاده در تزریق می توان به خاکستر بادی^۱ و میکروسیلیس^۲ اشاره کرد (عراقچیان ۱۳۸۹).

البته در تزریق آب بند مواد افزودنی دیگری نظیر تسریع کننده ها^۳ (در زمان گیرش)، کاهش دهنده های آب، اصلاح کننده گرانروی و پایدار کننده ها کاربرد دارند (مهدوینژاد، ۱۳۹۰).

۶-۴-۴- دوغاب‌های شیمیائی

هرچند به دلیل مسائل اقتصادی، دوغاب‌های سیمانی نسبت به دوغاب‌های شیمیائی ارجحیت دارند ولی مزایائی همچون قابلیت نفوذ دوغاب‌های شیمیائی به ترک‌ها و حفرات بسیار ریزی که دوغاب‌های پایه

^۱ Fly ash

^۲ Silica Fume

^۳ Acceleator

سیمانی قادر به نفوذ در آنها نیستند و نیز توانائی در کنترل دقیق زمان گیرش، سبب می شود در مواردی چون مقابله با آب روان در ترک‌های ریز، استفاده از آنها نسبت به دوغاب‌های سیمانی ارجحیت داشته باشد. در استفاده از این نوع دوغاب‌ها همواره باید به پتانسیل سمی بودن مواد اولیه و نهائی توجه داشت (عراقچیان، ۱۳۸۹). سه گروه اصلی دوغاب‌های شیمیائی در جهت کنترل آب عبارتند از:

✓ پلی اورتان‌ها

✓ پلیمرهای اکریل آمید

✓ سدیم سیلیکات همراه با سیمان

پلی اورتان‌ها در جای خود از پایداری و مقاومت بالائی برخوردارند. ولی معمولاً به دلیل داشتن گرانبوی بالا و نیز داشتن هزینه بالا به طور گسترده استفاده نمی‌شوند. پلیمرهای اکریلامید بسیار نفوذپذیر، قابل انعطاف و به نسبت ارزان هستند. اما به دلیل سمی بودن کاربردشان در اکثر کشورها ممنوع شده است. سیلیکات‌ها ایمن و ارزان هستند اما به دلیل انقباض به طور دائم جهت تزریق در سنگ و درزه و ترک‌های بزرگ مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. این مواد چنانچه با سیمان پرتلند مخلوط شود به عنوان یک تسریع کننده قوی سیمان عمل کرده و معمولاً برای کنترل جریان آب یا آب تحت فشار استفاده می‌گردد (عراقچیان، ۱۳۸۹).

۶-۵- سایر روش‌ها

روش‌های دیگری نظیر انجماد زمین و یا احداث شبکه‌ای از چاه‌های پمپاژ نیز وجود دارد که با توجه به پرهزینه بودن و همینطور شرایط خاص پروژه مورد نظر چندان مد نظر قرار نمی‌گیرند. به عنوان مثال در عملیات حفر تونل هلندساز در سوئد، برخورد تونل به ناحیه گسلیده باعث تراوش ۴۸۰ لیتر در ثانیه به درون تونل گردید. برای کنترل تراوش ابتدا یک تونل دسترسی به طول ۶۰۰ متر برای دسترسی راحتتر

به محدوده گسلیده حفر شد. سپس در جبهه کار تونل گمانه های انجماد زمین به طول ۱۰۰ متر حفاری گردید. پس از اتمام روند انجماد، یک تونل پایلوت به قطر ۵ متر و طول ۱۰۰ متر در ناحیه منجمد احداث گردید. سپس عملیات انجماد و تزریق با سیمان ریزدانه تا محدوده ۳۰ متری پیرامونی ناحیه منجمد شده انجام گرفت. و نهایتاً حفر تونل اصلی در ناحیه پیش تزریق ادامه یافت. شکل ۶-۸ تونل پایلوت را نشان می‌دهد (Wallentinus and Paivo, 2001).



شکل ۶-۸- به کارگیری روش انجماد زمین در حفر تونل هندس‌اس (Wallentinus and Paivo, 2001)

۶-۶- ارائه روش پیشنهادی به منظور کنترل تراوش در تونل بلند زاگرس (قطعه ۲)

در این پروژه کمبود مطالعات زمین شناسی و هیدروژئولوژی در مرحله پیش از حفر باعث شد تا تخمین‌های نادرستی از شرایط زمین در نظر گرفته شود. این تونل در مراحل شروع حفاری جزء تونل‌های خشک دسته بندی شد اما با افزایش پیشروی بر نرخ تراوش افزوده شده به طوریکه در متر ۳۷۰۰ متر (تاقدیس اسپر) اولین تراوش شدید به میزان ۲۵۰ لیتر در ثانیه باعث توقف کامل پروژه گردید. با توجه به

اینکه تونل از سازندهای دارای مواد هیدروکربوری عبور می‌کند، تراوش آب همراه با خروج گازهای نظیر H_2S و CH_4 همراه می‌باشد. بر اساس گزارش ارائه شده توسط شرکت ایمن سازان، به منظور کنترل تراوش آب و کاهش غلظت گازهای سمی، ایستگاه پمپاژی با ۷ پمپ ۹۰ کیلووات به منظور تخلیه آب به خروجی تونل احداث گردید. در دومین مرحله بحرانی تراوش (۸۵۰۰ متر) ایستگاه پمپاژ دیگری به منظور تخلیه آب احداث شد که در انتقال آب از این ایستگاه‌ها از ۱۰ کیلومتر لوله ۲۰ اینچ و ۱۰ کیلومتر لوله ۱۶ اینچ استفاده شد. تراوش شدید آب در متر ۱۴۰۰۰ الی ۱۴۵۰۰ متر و نیز فرسایش شدید دیسک‌های برش سبب شد تا در متر ۱۴۵۰۰ (تاق‌دیس کردی قاسمان) یک تونل دسترسی به طول ۸۰۰ متر حفاری شده و سپس با حفر یک مغار در اطراف کله حفار، دستگاه حفاری تعمیر و دیسک‌های حفاری تعویض و بازسازی شود که در خلال این امر، کنترل تراوش آب با سیستم پمپاژ ادامه یافت. با توجه به اینکه پوشش سگمندی مورد استفاده در تونل از نوع شش وجهی می‌باشد، قابلیت نصب درزگیر و امکان استفاده از آن با شرایط موجود ممکن نیست. تغییر نوع سگمنت نیز نیازمند صرف هزینه‌های زیادی نظیر تغییر سیستم کارگاه تولید سگمنت، نوع قالب، تغییر سیستم بازوی نصاب سگمنت و غیره می‌باشد. (پیوست د)

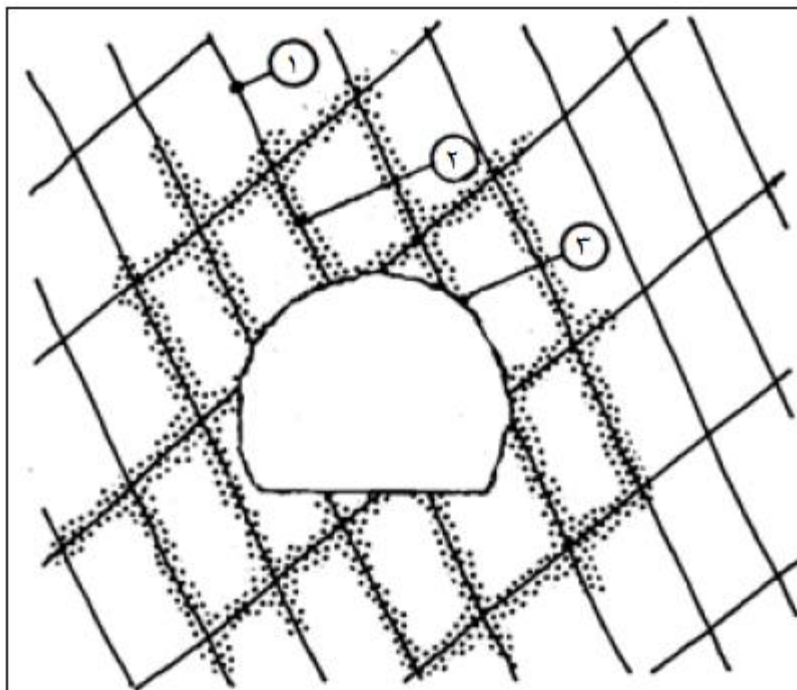
به منظور کنترل تراوش در ادامه حفر سیستم تزریق تحکیمی^۱ در کنار تزریق تماسی^۲ پیشنهاد می‌گردد. برای این منظور لازم است که چالهایی در حدود ۱۰ متر در محیط پیرامون تونل حفاری شود. حفر این چالها از روی بدنه سگمنت و از طریق سوراخ‌های موجود در آن صورت می‌گیرد. پس از اتمام حفاری تزریق دوغاب درون چال با فشار به منظور کاهش نفوذپذیری توده سنگ (تزریق تحکیمی) صورت می‌گیرد. با توجه به رابطه ۵-۶ میزان فشار تزریق وابسته به فشار آب و مقاومت برشی دوغاب و نوع مواد به کاررفته در ترکیب آن می‌باشد. انجام این روش سبب خواهد شد تا آب به سمت جبهه کار تغییر جهت

¹ Consolidation Grouting

² Contact Grouting

دهد و در نتیجه با به کارگیری پیوسته سیستم پمپاژ آب تراوش یافته از جبهه کار خارج خواهد شد. مضاف بر اینکه با گذشت زمان از میزان فشار آب کاسته شده و پایداری دوغاب افزایش می یابد. در شکل ۹-۶ نمای کلی تزریق تحکیمی نشان داده شده است.

در کنار این روش از تزریق تماسی در پشت سگمنت به منظور عملکرد بهتر آببندی استفاده می شود. می توان برای کاهش ناپایداری و جلوگیری از شسته شدن دوغاب از مصالح دانه ای در پست سگمنت استفاده کرد. با توجه به اینکه استفاده از درزگیر به دلیل نوع پوشش سگمنتی منتفی است، استفاده از مواد شتاب دهنده گیرش در بندکشی پوشش سگمنتی پیشنهاد می گردد. لازم به ذکر است که انجام روش عملیات های مشابه در پروژه های داخلی نظیر تونل انتقال آب سمنان بسیار مفید بوده است.



شکل ۹-۶- تزریق تحکیمی از تونل در توده سنگ ۱- درزه با فشار آب بالا ۲- نواحی تزریق شده ۳- جداره تونل (Blindheim, 2008)

۶-۷- نتیجه گیری

مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک در تامین داده های طراحی و نیز شناخت مخاطرات زمین‌شناسی در مسیر تونل های بلند دارای اهمیت فوق العاده می‌باشد. این مطالعات بایستی قبل از انجام طراحی و اجرای تونل و با اختصاص بودجه و زمان کافی صورت گیرد. انجام ناقص و سریع این مطالعات در پروژه‌های داخلی در برخی موارد گمراه کننده بوده و سبب تحمیل تاخیرات زمانی و نیز اعمال هزینه های فراوان بر پروژه در زمان اجرا شده است.

از بهبود روند پیشگیری از تراوش، اطلاعات دقیق از شرایط زمین و به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی و در نهایت عملیات‌های بهسازی نظیر حفاری و تزریق مفید بوده و می‌تواند از تراوش های یکباره و نابهنگام به درون تونل جلوگیری کند. در عملیات کنترل و مدیریت آب تراوش یافته به درون تونل، امکانات گروه اجرایی و میزان دسترسی به ابزار مهمترین گزینه می‌باشند. به طور مثال در پروژه تونل بلند زاگرس، عدم انتخاب صحیح ماشین حفاری موجب شده است که استفاده از برخی روش‌های کنترل نظیر استفاده از درزگیر منتفی گردد. در پروژه مورد نظر به دلیل مشکلات شدید تراوشی، عملیات تزریق تحکیمی و تماسی پیشنهاد می‌گردد.

به طور کلی در حفاری با ماشین تمام مقطع به دلیل دسترسی محدود به جبهه کار عموماً شرایط دشوارتر از حالت آتشیاری می‌باشد. از این نظر دقت و صحت داده های زمین‌شناسی در روش حفاری تمام مقطع بسیار کاربردی و تاثیرگذار است.

بایستی خاطر نشان کرد که روش یکتا و مخصوصی برای کنترل آب زیرزمینی در تونل وجود ندارد. بلکه با تجربه از پروژه های قبل و ترکیب روش‌های معمول و در برخی موارد با ابتکار می‌توان بر مشکل ایجاد شده فائق شد.

فصل، ہفتم:

نتیجہ گیری و پیشہدات

۷-۱- مقدمه

مطالعه انجام شده در این پژوهش به منظور بررسی عوامل موثر بر تراوش آب به درون تونل بلند زاگرس (قطعه دوم)، تخمین میزان تراوش در مقاطع حفر نشده و در نهایت ارائه راهکار جهت کنترل آب ورودی به تونل انجام شده است. تونل مذکور قسمتی از پروژه انتقال آب رودخانه سیروان در استان کرمانشاه می‌باشد. طول کلی این تونل ۴۸ کیلومتر بوده که قطعه دوم آن بالغ بر ۲۶ کیلومتر است. بخش عمده مسیر این تونل از سنگ های شیل سیاه رنگ، آهک مارن، آهک شیلی و شیل پوشیده شده است. از دیدگاه سیستم درزه‌داری، توده سنگ‌های مسیر تونل درزه‌دار با سه یا چهار سیستم درزه‌داری به شمار می‌آیند. در ادامه مهمترین نتایج حاصل از تحقیق شامل تخمین تراوش، تحلیل پارامتری عوامل موثر بر تراوش و ارائه راهکار جهت کنترل تراوش ارائه می‌گردد.

۷-۲- روند مطالعات و نتایج آن

مسئله تراوش به درون تونل همواره با بحث نفوذپذیری توده‌سنگ دربرگیرنده و روش های تخمین آن همراه است. محاسبه نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار نیازمند اطلاعات مهمی نظیر سیستم درزه توده سنگ، میزان بازشدگی و جهت داری درزه و جنس توده سنگ (انحلالی، شکننده و ...) می‌باشد. پس از انجام مشاهدات صحرائی و برداشتهای سطحی نوبت به حفر گمانه و تلفیق داده های سطحی و زیرسطحی خواهد رسید. آزمون لوژان جزء معدود آزمایش‌هایی است که در محاسبه نفوذپذیری توده سنگ از عمومیت بالائی برخوردار است. این آزمون قسمت کوچکی از توده سنگ را پوشش داده و در نتیجه پاسخ آن معرف نفوذپذیری کل توده‌سنگ نیست. اما مبنای محاسبه در بسیاری از روش‌های تخمین تراوش می‌باشد.

محاسبه حجم تراوش به درون تونل از سه دیدگاه تحلیلی، تجربی و عددی مورد مطالعه است. در

محاسبات تحلیلی و تجربی نفوذپذیری معادل در کل توده سنگ مبنای تخمین تراوش قرار می‌گیرد. چنانچه در عمل مقادیر نفوذپذیری کم و توده سنگ دارای شرایط کیفی مناسب (شدت درزه داری کم) باشد، تخمین های بدست آمده از این روش‌ها به مقادیر واقعی نزدیک است. اما در محیط‌هایی با شرایط شدید ناپیوستگی نظیر توده سنگ با چند دسته درزه و میزان بازشدگی بالا، میزان نفوذپذیری شدیدتر و دامنه تغییرات آن نیز بسیار بزرگتر خواهد بود. از این جهت پاسخ های بدست آمده در روش های تحلیلی و تجربی دارای محدودیت می‌باشند.

نرم افزارهای عددی به منظور تحلیل سینماتیکی و دینامیکی محیط های پیوسته دارای کاربرد فراوانی بوده اما بکارگیری این روش‌ها در تحلیل محیط ناپیوسته محدودتر می‌باشد. پرکاربردترین نرم افزارهای موجود در زمینه محیط‌های ناپیوسته شامل UDEC و نسخه سه بعدی آن 3DEC می‌باشد که در هر دو مدل سازی به روش المان مجزا صورت می‌گیرد.

نرم افزار 3DEC تنها به محاسبه فشار ناشی از سیال درون درزه پرداخته و توانایی محاسبه جریان درون درزه را ندارد اما نرم افزار UDEC علاوه بر محاسبه فشار به محاسبه جریان نیز می‌پردازد. این نرم افزار نفوذپذیری توده سنگ را با توجه به ویژگی درزه‌ها مدل و محاسبه می‌کند در نتیجه به کمک این نرم افزار می‌توان میزان تراوش در مقاطع مختلف تونل را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که کدنویسی و ارائه برنامه کامپیوتری نیازمند داشتن توزیع آماری سیستم درزه و سایر ویژگی‌های آن است که در دسترسی به این اطلاعات محدودیت وجود داشت.

با در نظر گرفتن میزان تراوش در مترژهای مختلف تونل و مطالعات زمین شناسی تعداد ۱۱ مقطع در طول نیمرخ ۲۶ کیلومتری تونل در نظر گرفته شد. به منظور اعتبار سنجی پاسخ مدل‌های عددی تعداد ۶ مقطع از ۱۱ مقطع به مدل سازی نقاط حفر شده اختصاص یافته و این ۶ مقطع در نقاطی در نظر گرفته شد که تراوش روندی پایدار دارد و به نظر می‌رسد که تراوش تنها ناشی از عبور جریان آب از سیستم درزه

باشد. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و هیدرولوژی موجود تعداد ۵ مقطع دیگر در نقاطی که احتمال تراوش شدید در آنها وجود دارد در نظر گرفته شد. به طور کلی تراوش ناپایدار ناشی از حفرات آهکی، چشمه‌ها و غسل‌های موجود در منطقه می‌باشند و بنابر گزارش‌های موجود، در فرآیند حفاری در تاق‌دیس کردی قاسمان حفرات آهکی به ابعاد حدود ۲ متر مشاهده شده است.

در نهایت نتایج کلی بدست آمده از تحقیق به شرح زیر است:

✓ نتایج مطالعات صحرائی و بررسی‌های تکمیلی هیدرولوژی و زمین‌شناسی مسیر تونل بیانگر شرایط واقعی محیط نمی‌باشد و به مطالعات و اکتشافات دقیقتری نیاز است.

✓ با توجه به سیستم درزه داری و ناپیوستگی محیط به کارگیری روش‌های تحلیلی، تجربی و روش‌های عددی مبتنی بر فرض پیوستگی محیط برای تخمین تراوش دارای نتایج نادرست و دور از واقعیت می‌باشد.

✓ به کارگیری روش المان مجزا در مدل‌های اعتبار سنجی شده دارای مطابقت خوبی با میزان تراوش مشاهده شده می‌باشد. در ادامه مدلسازی، پیش‌بینی تراوش برای ۵ مقطع حفر نشده صورت گرفت که حداکثر تراوش در این مقاطع با در نظر گرفتن غسل برابر ۱۲۷۷ لیتر در ثانیه محاسبه شد.

✓ نتایج تحلیل پارامتری برای ویژگی‌های درزه بیانگر آن است که:

➤ میزان تراوش با توان سوم بازشدگی درزه نسبت مستقیم دارد. این روند محاسبه در مقایسه بین متوسط بازشدگی و تراوش در سه مقطع اول و دوم مشاهده می‌شود. در نتیجه بایستی انتظار تراوشات شدیدتر در نقاط با بازشدگی بالا را داشت.

➤ کاهش فاصله‌داری درزه با توجه به سطح مقطع تونل باعث افزایش تراوش به درون تونل

می‌گردد. این روند افزایش خطی بوده و در فاصله داری کمتر از ۲ متر شدت یافته و در کمتر از ۱ متر این روند شدیدتر خواهد شد.

➤ کاهش شیب درزه باعث افزایش نرخ تراوش شده که این نتیجه با در نظر گرفتن فاصله داری ثابت و برابر برای تمام دسته درزه ها به دست آمده است. مطالعه تاثیر شیب درزه با فاصله داری متغیر نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

➤ تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییر خطی تراوش همراه خواهد بود. با توجه به معادلات به کار گرفته شده در محاسبات نرم افزار، ارتباط تراوش و فشار به صورت خطی می‌باشد. از سوی دیگر مطالعه انجام شده صرفاً به صورت هیدرولیکی بوده و از تاثیر تنش ها بر تراوش صرف نظر شده است. در نتیجه روند خطی مشاهده شده تایید کننده صحت نتایج مطالعه عددی می‌باشد.

✓ در فصل آخر روش‌های ممکن در کنترل و پیشگیری تراوش بررسی شد. در نهایت با توجه به مشکلات خاص پروژه و نیز عدم امکان استفاده از مواردی نظیر درزگیر، به کارگیری تزریق تحکیمی و تماسی توده‌سنگ به منظور کاهش نفوذپذیری آن پیشنهاد گردید.

۳-۷- پیشنهادات

مطالعه جریان آب زیرزمینی از دید عمرانی و زمین شناسی مهندسی همراه نیازمند جزئیات و نتایج برزگ مقیاس می‌باشد. از این جهت وجود داده‌های ژئوتکنیکی در مراحل مختلف عملیات مفید خواهد بود. در پروژه مورد نظر کمبود اطلاعات سبب شد تا شرایط ژئوتکنیکی ساختار تونل به درستی شناخته نشود که این مسئله در نهایت سبب مشکلات عدیده‌ای از جمله توقف و افزایش زمان عملیات حفاری گردیده است.

مسیر حرکت جریان در توده سنگ های درزه دار وابسته به سیستم درزه‌داری می‌باشد. در نتیجه بررسی خطوط جریان تنها به صورت محلی ممکن بوده و استفاده از مواد ردیاب به منظور ایجاد دیدگاه کلی از روند مسیر حرکت آب زیرزمینی می‌تواند مفید واقع گردد.

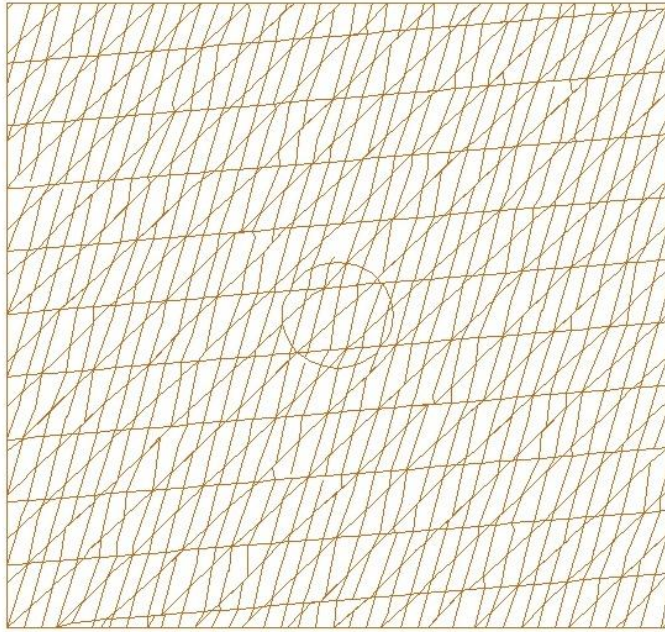
به دلیل کاربرد محدود مدلسازی عددی در بحث تخمین تراوش محیط درزه‌دار، در بیشتر پروژه ها به پاسخ‌های تحلیلی و تجربی بسنده می‌شود دیگر آنکه با توجه به اینکه تاثیر لایه بندی بر تراوش بسیار پر اهمیت بوده و نرم افزارهای موجود نیز قابلیت مدلسازی آن را ندارند، نیاز به انجام این تحقیقات در مقیاس عددی برای مطالعات آینده احساس می‌شود.

مطالعه دقیق حرکت سیال در توده‌سنگ درزه‌دار مستلزم داشتن دید سه بعدی نسبت به این موضوع می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی به کمک ابزاری نظیر شبکه شکستگی های گسسته^۱ به تحلیل این موضوع پرداخته شود.

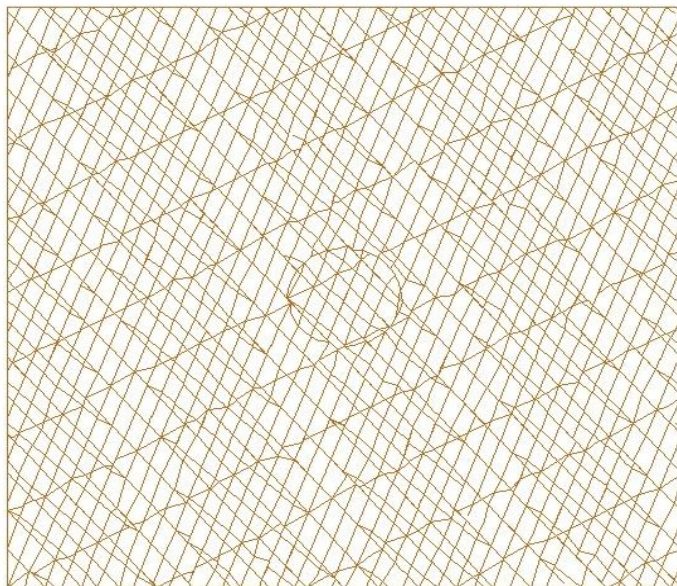
¹ Discrete Fracture Networks

پوست

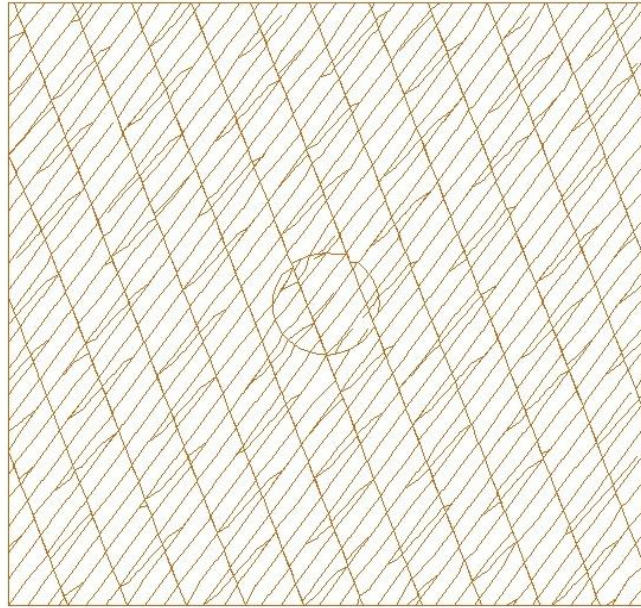
الف) پلات مربوط به بلوک در ۱۱ مقطع مورد بررسی (اندازه ۴۰ در ۴۰ متر)



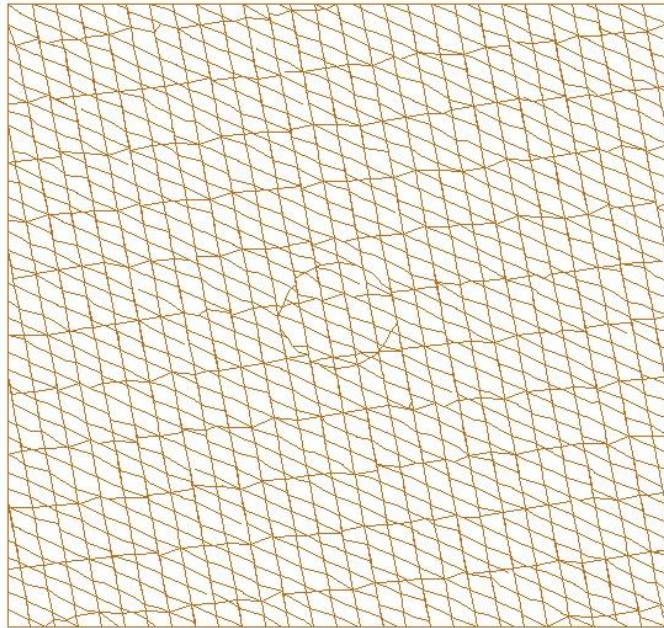
مقطع ۱



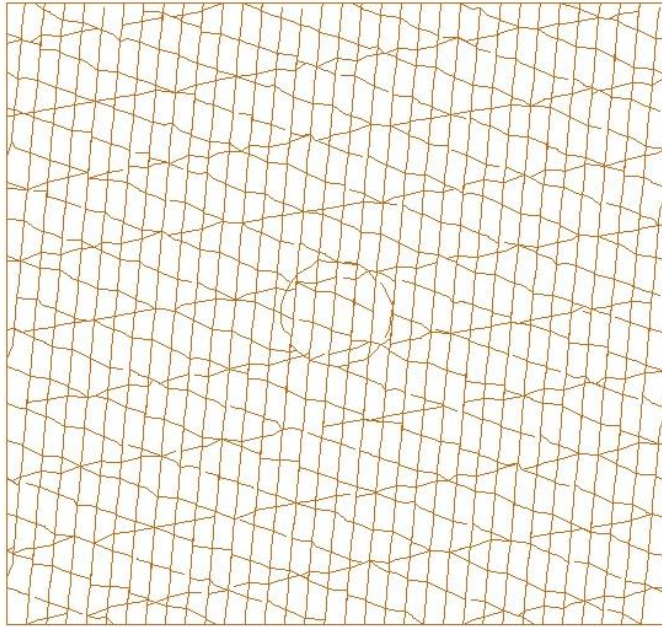
مقطع ۲



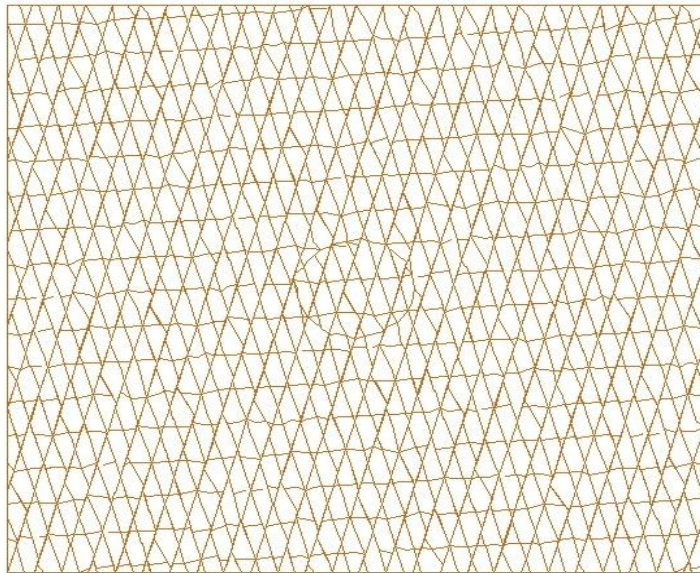
مقطع ۳



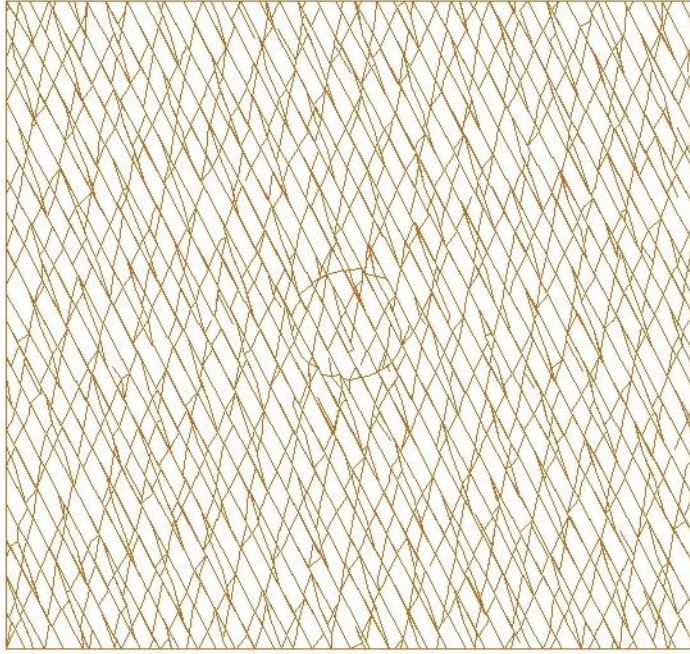
مقطع ۴



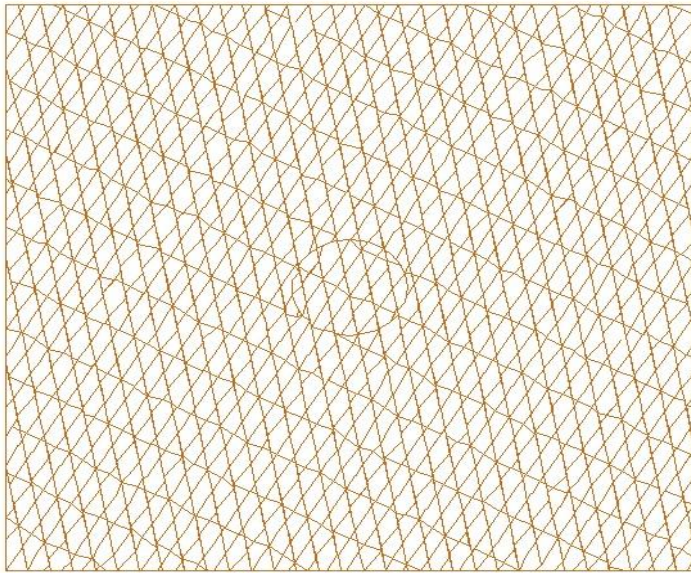
مقطع ٥



مقطع ٦



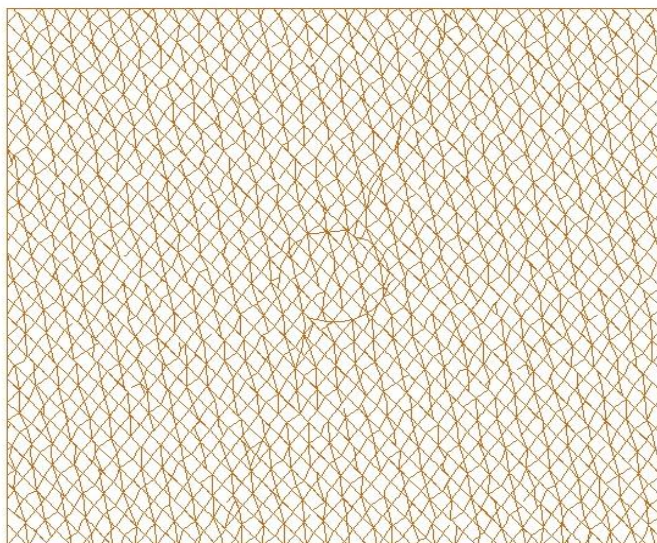
مقطع ٧



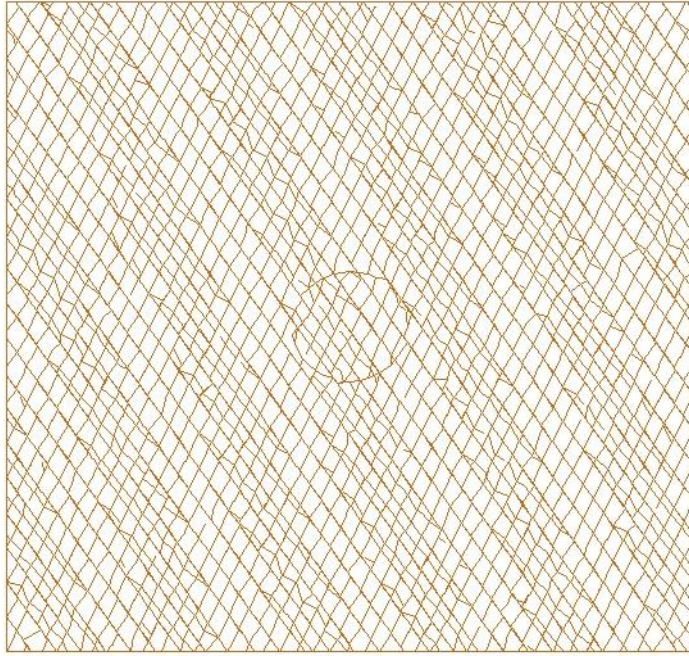
مقطع ٨



مقطع شماره ۹

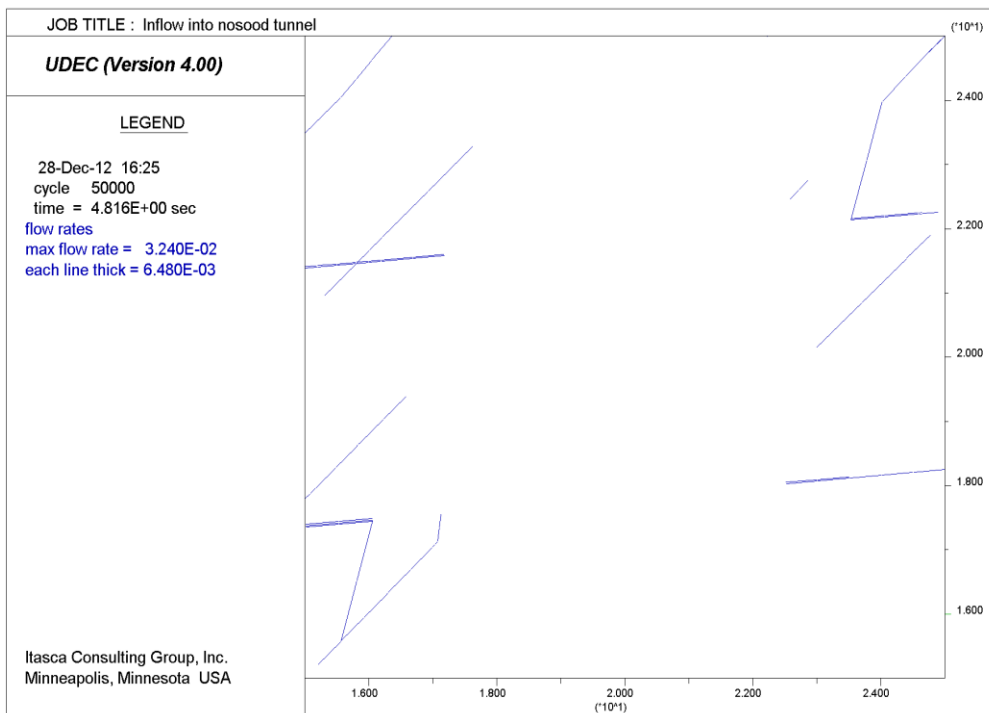


مقطع ۱۰ با در نظر گرفتن گسل

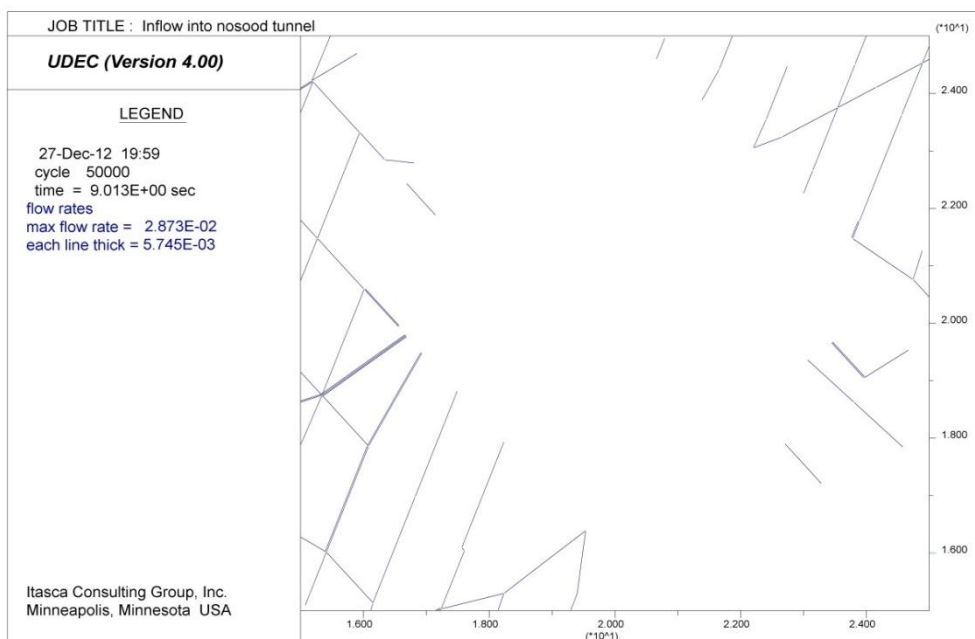


مقطع ۱۱

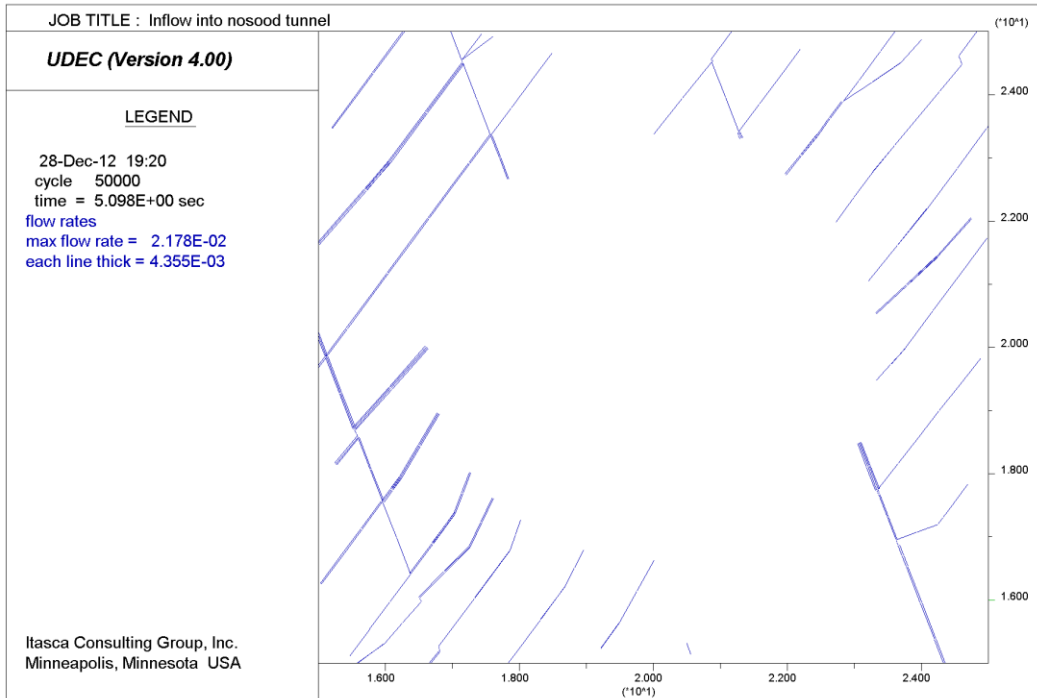
ب) خطوط جریان در جداره تونل برای مقاطع مختلف



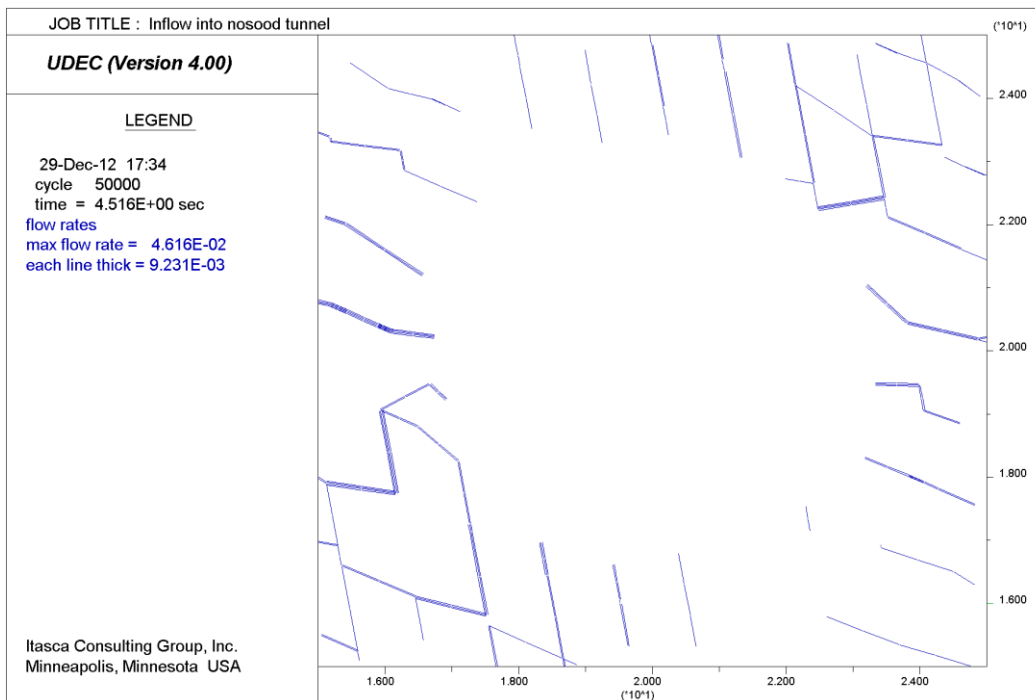
خطوط تراوش در مقطع ۱



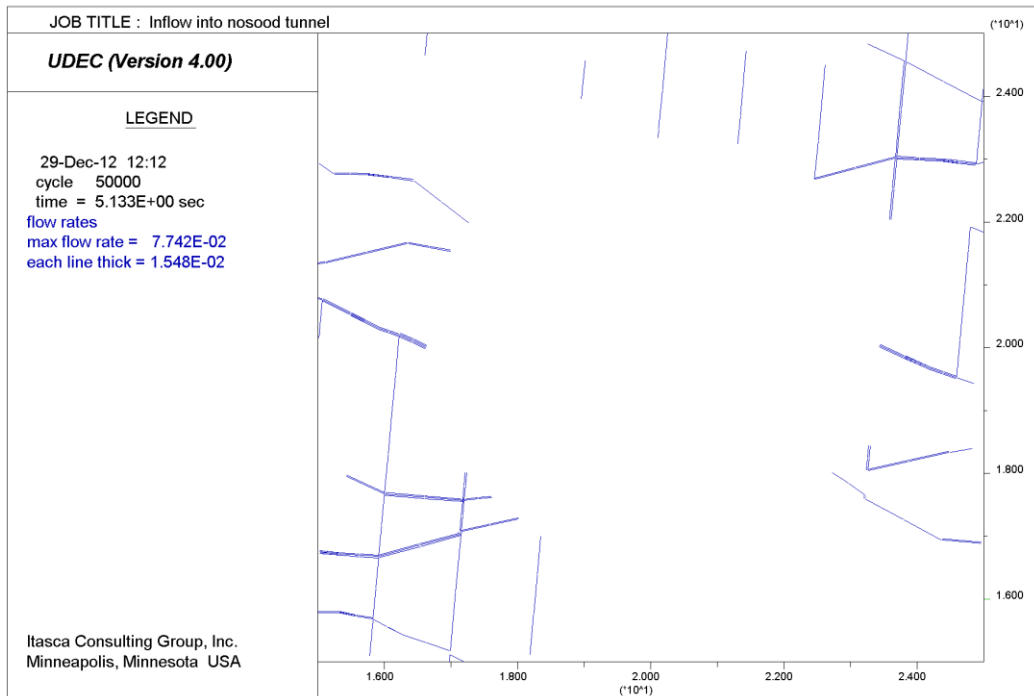
خطوط تراوش در مقطع ۲



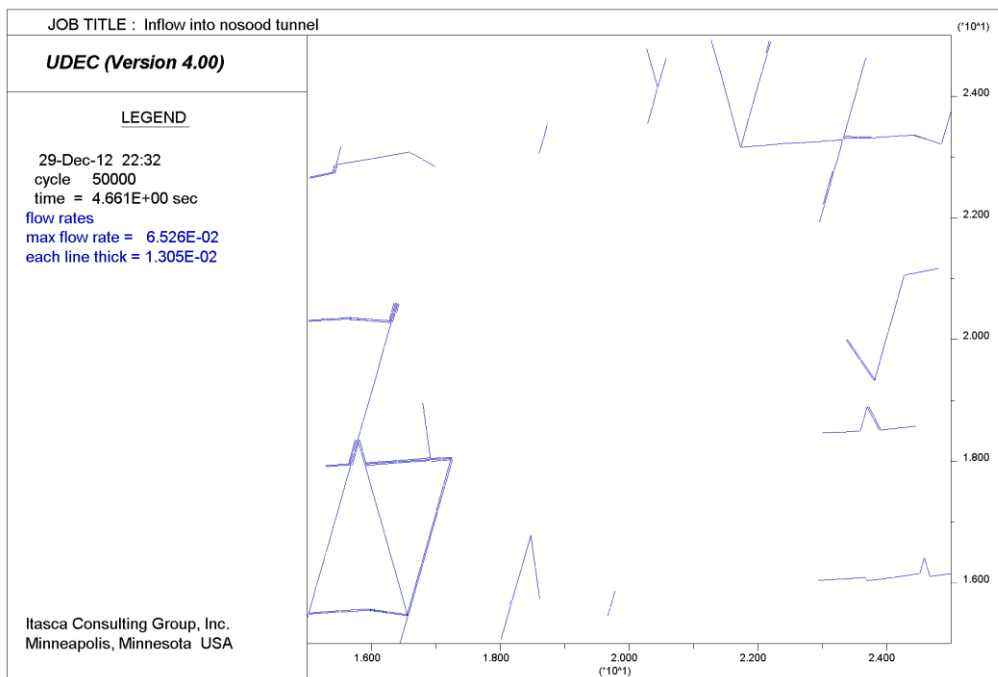
خطوط تراوش در مقطع ۳



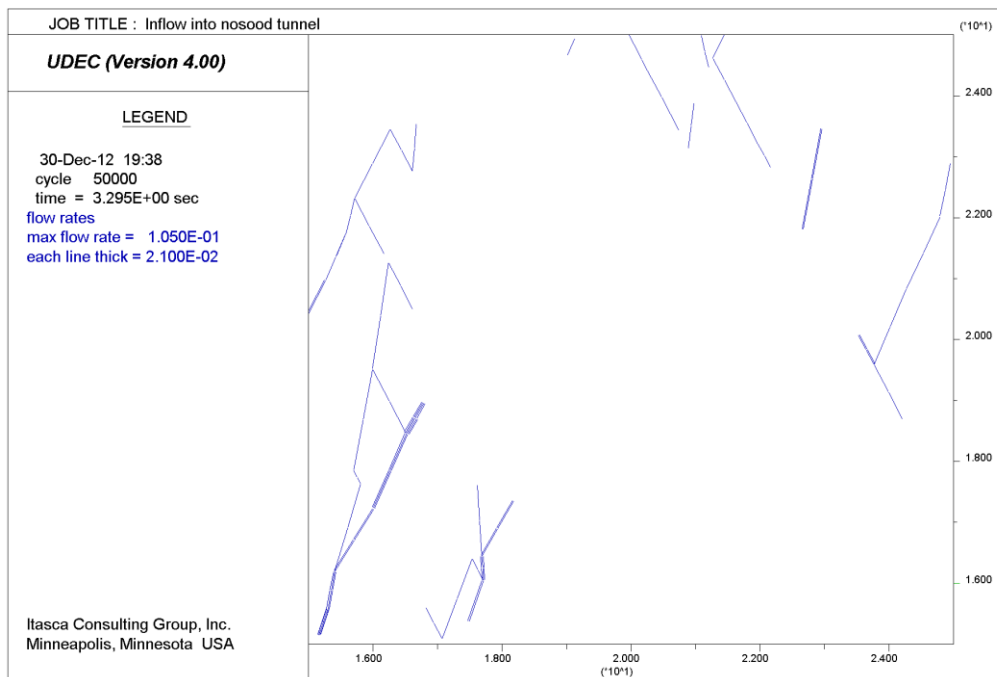
خطوط تراوش در مقطع ۴



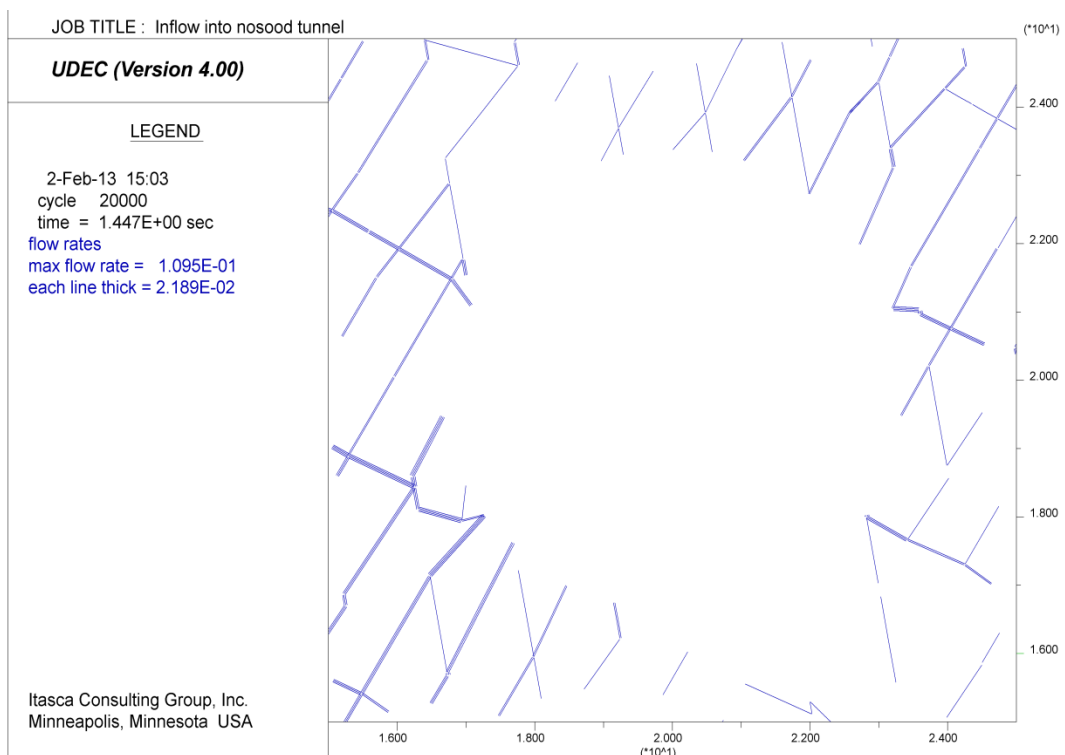
خطوط تراوش در مقطع ۵



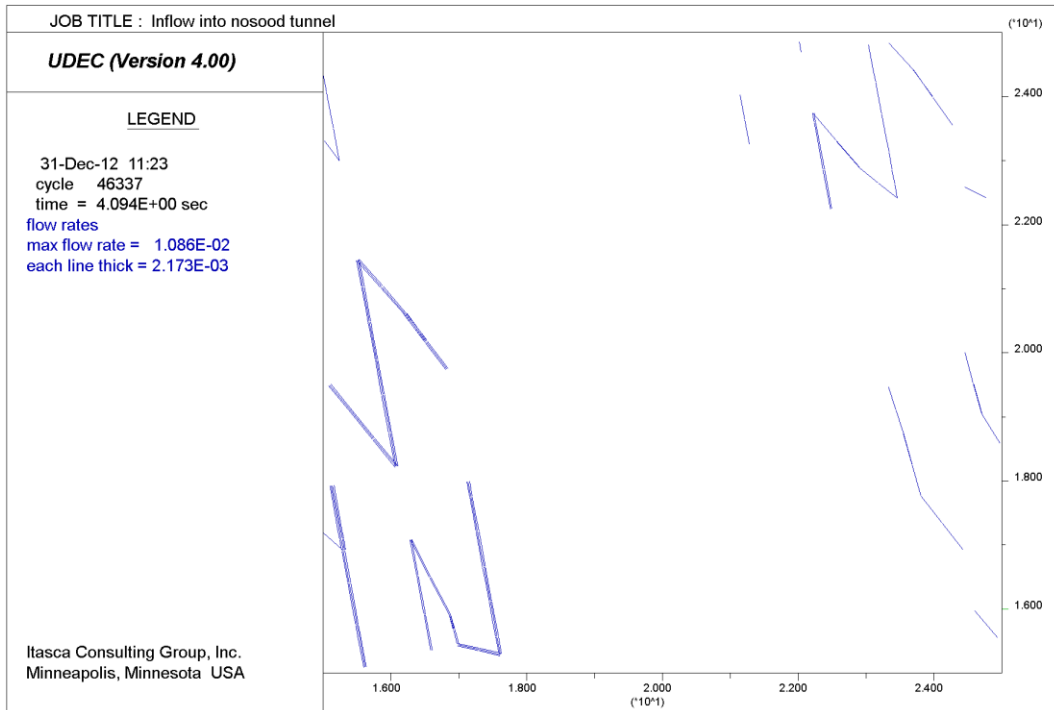
خطوط تراوش در مقطع ۶



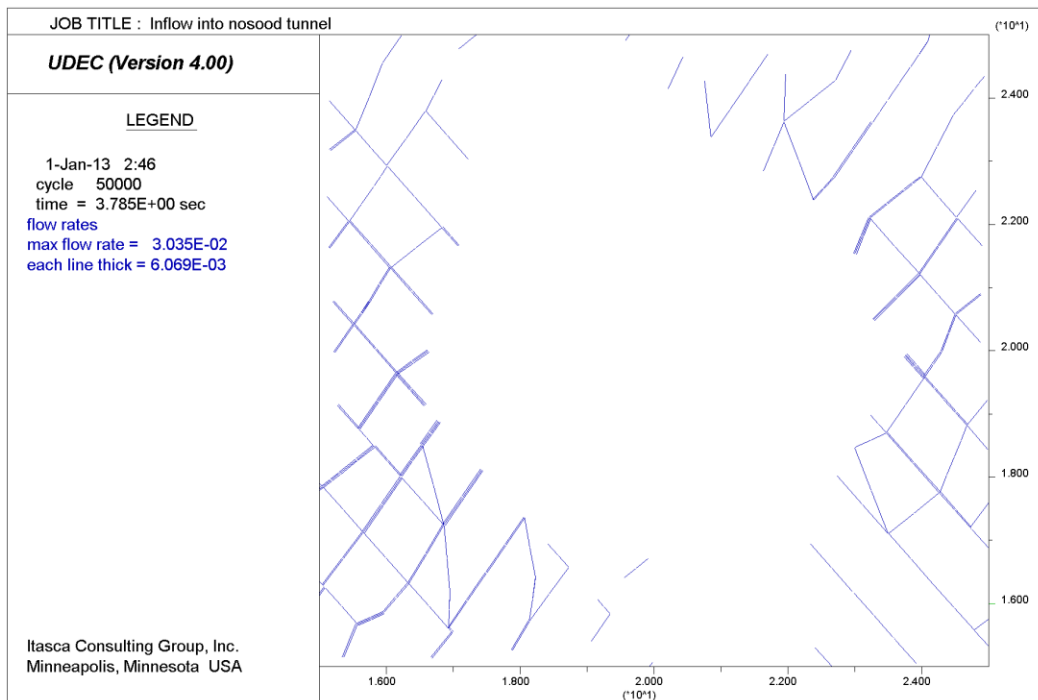
خطوط تراوش در مقطع ۷



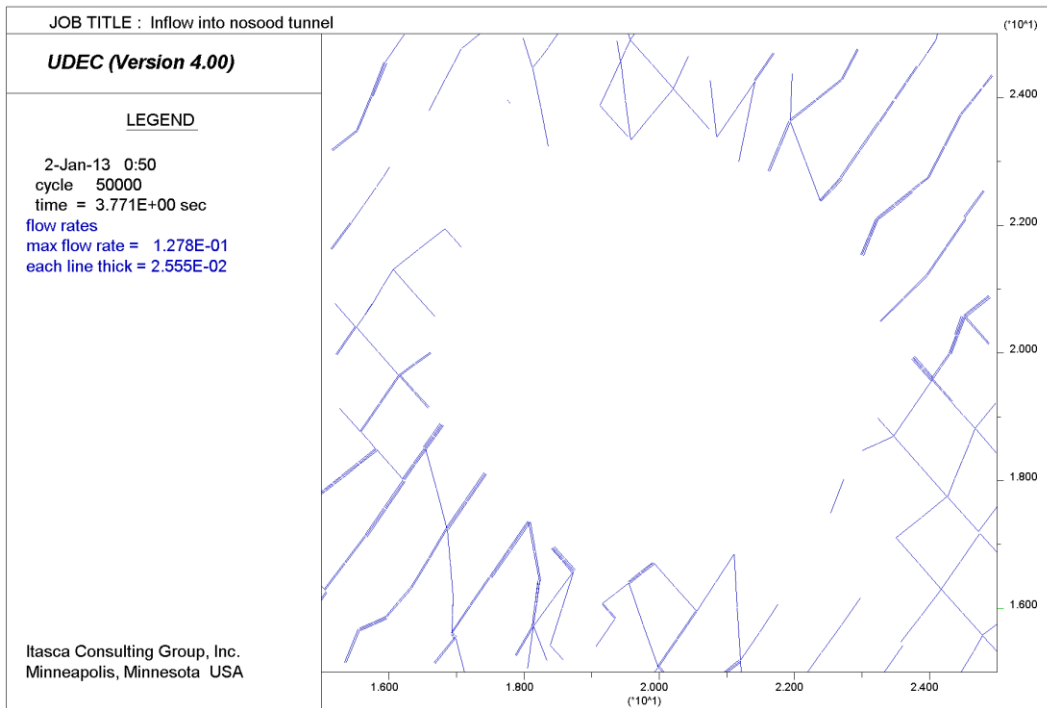
خطوط تراوش در مقطع ۸



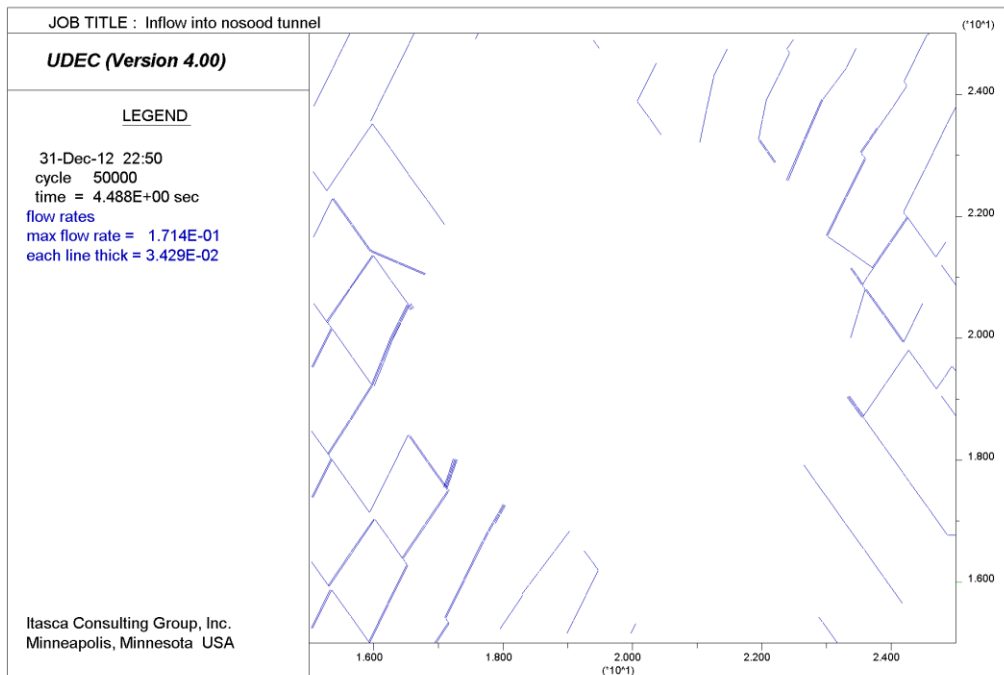
خطوط تراوش در مقطع ۹



خطوط تراوش در مقطع ۱۰ (بدون در نظر گرفتن گسل)



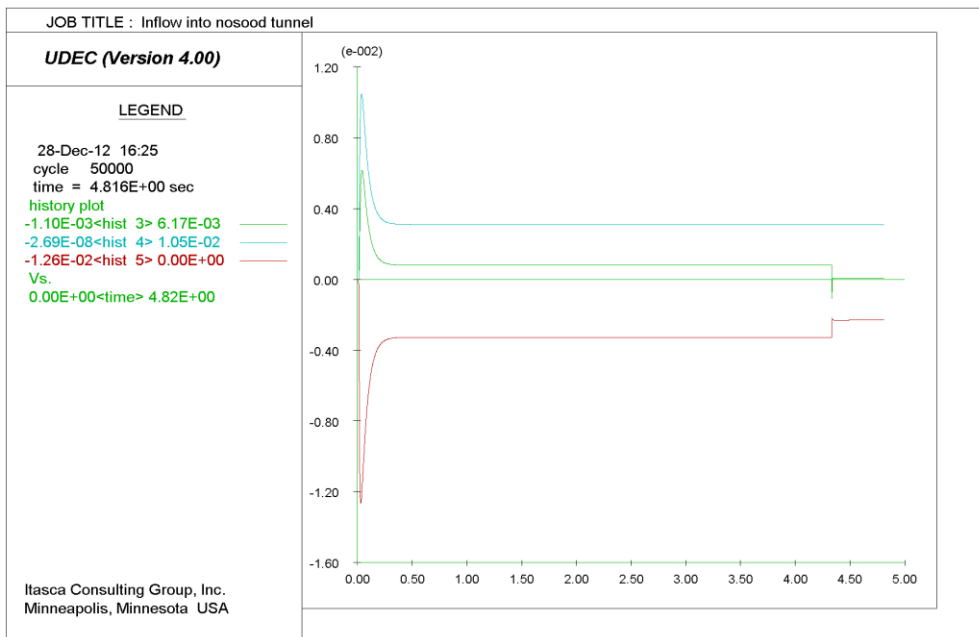
خطوط تراوش در مقطع ۱۰ (با در نظر گرفتن گسل)



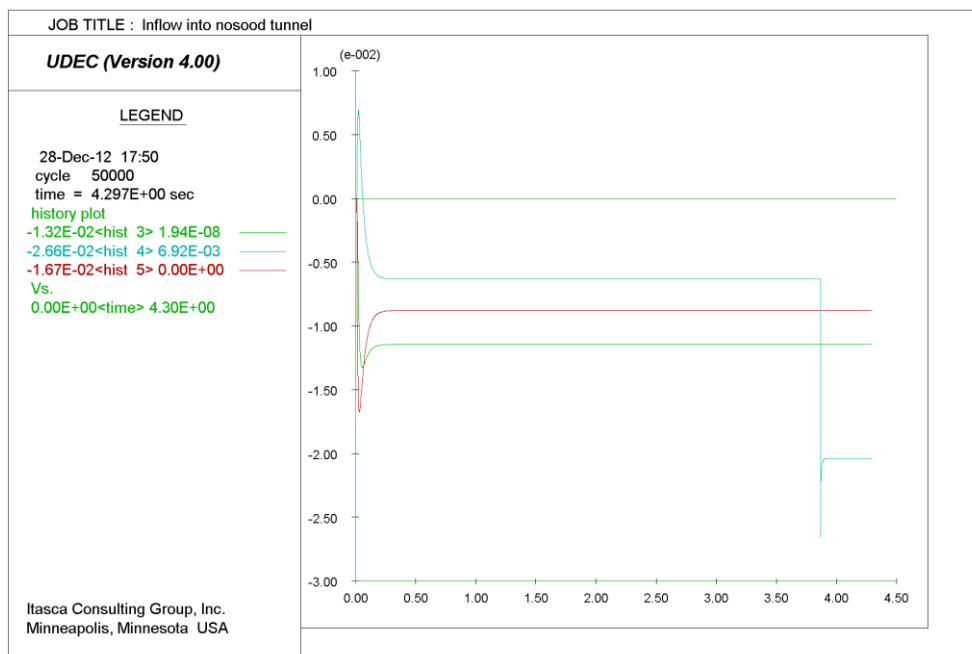
خطوط تراوش در مقطع ۱۱

ج) نمودار پایداری جریان در مقاطع مختلف (رنگ سبز، آبی و قرمز به ترتیب بیانگر پایداری در سقف، دیواره و

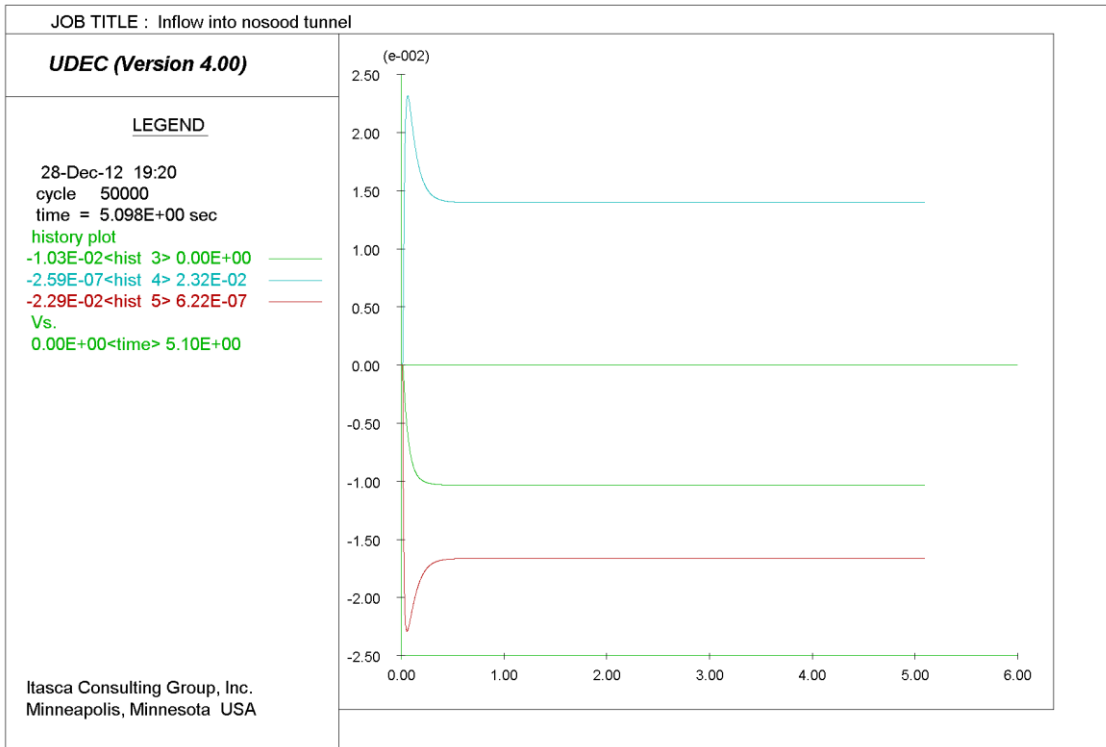
کف تونل می باشند)



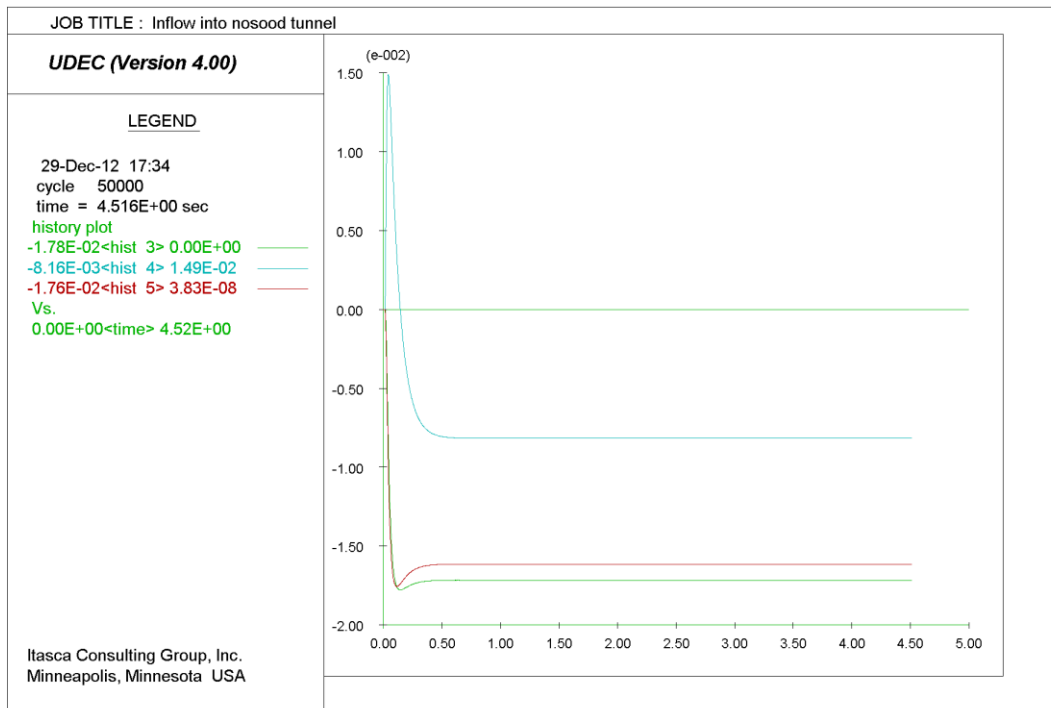
مقطع ۱



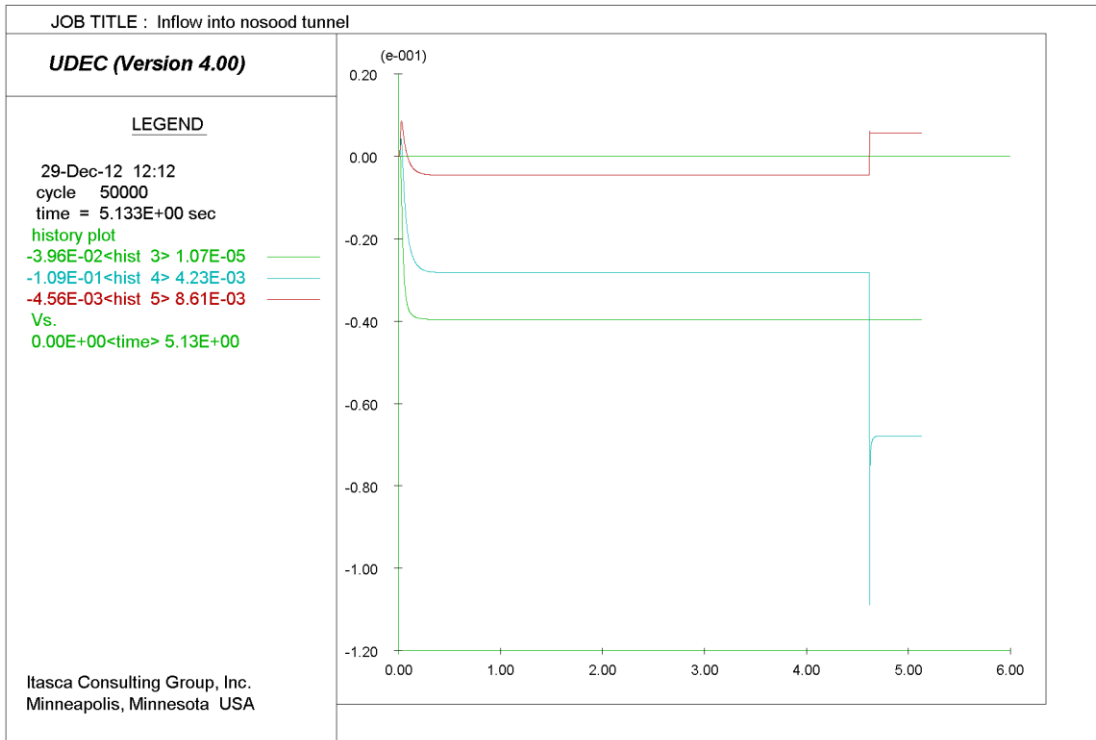
مقطع ۲



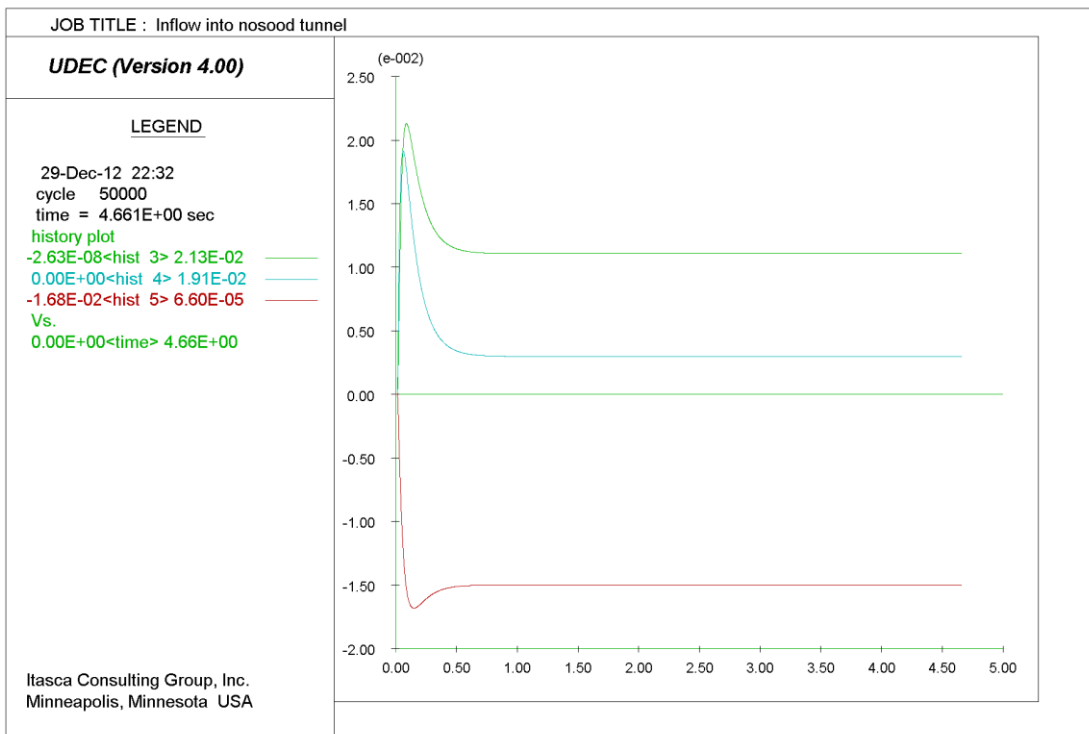
مقطع ٣



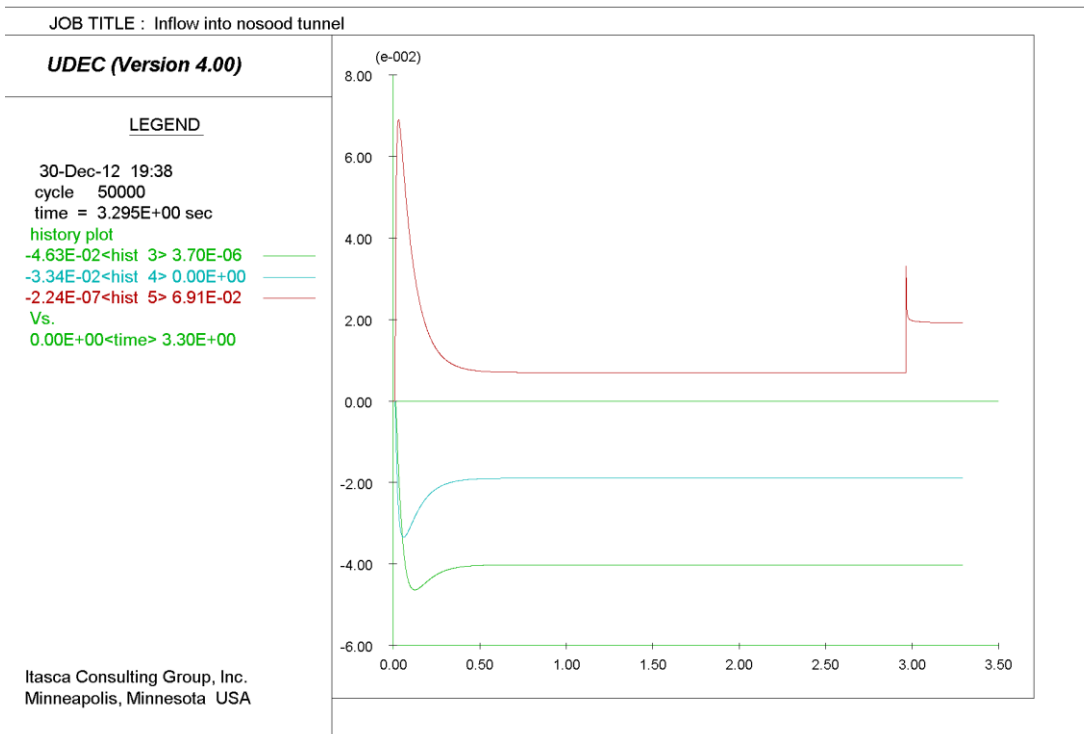
مقطع ٤



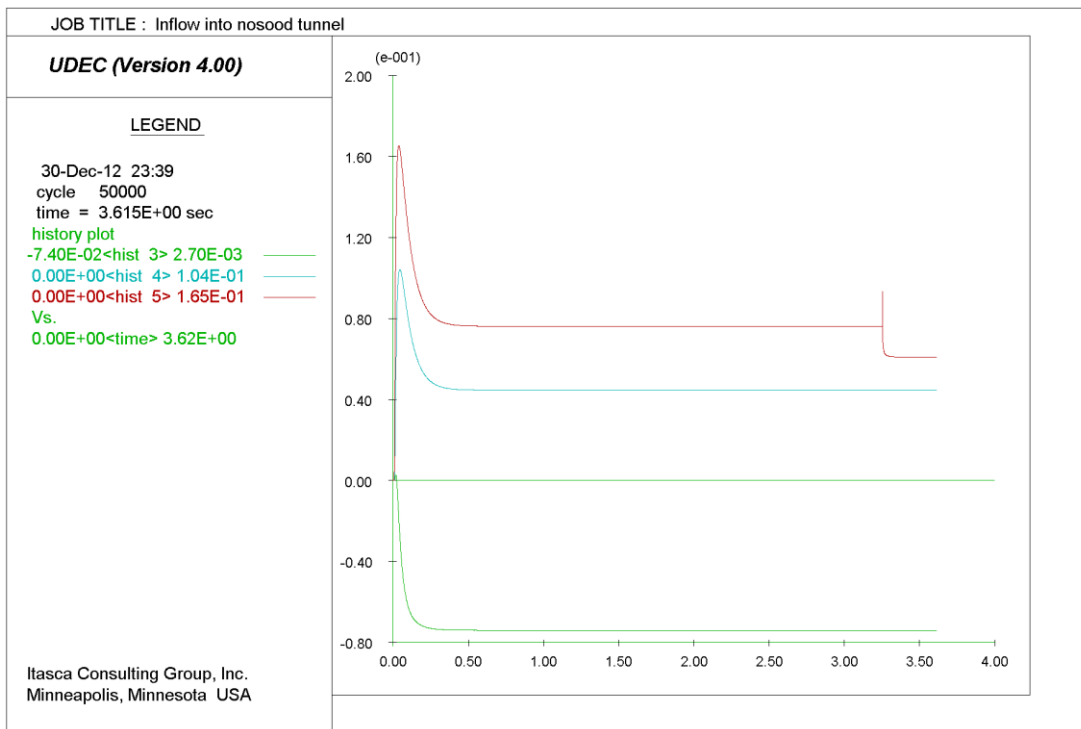
مقطع ۵



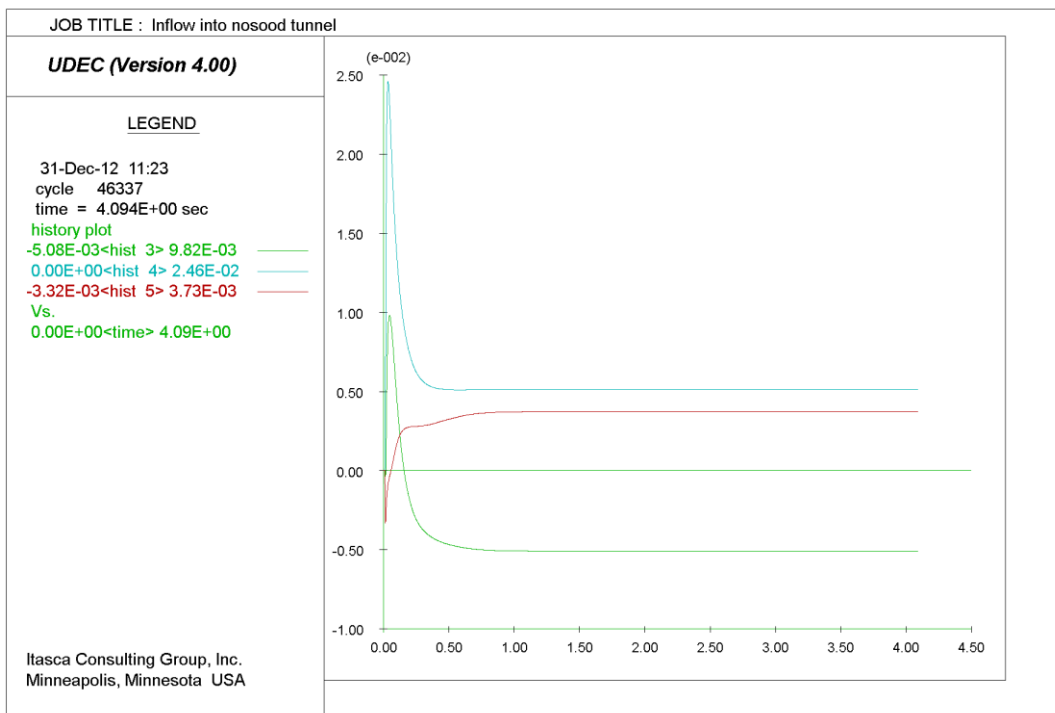
مقطع ۶



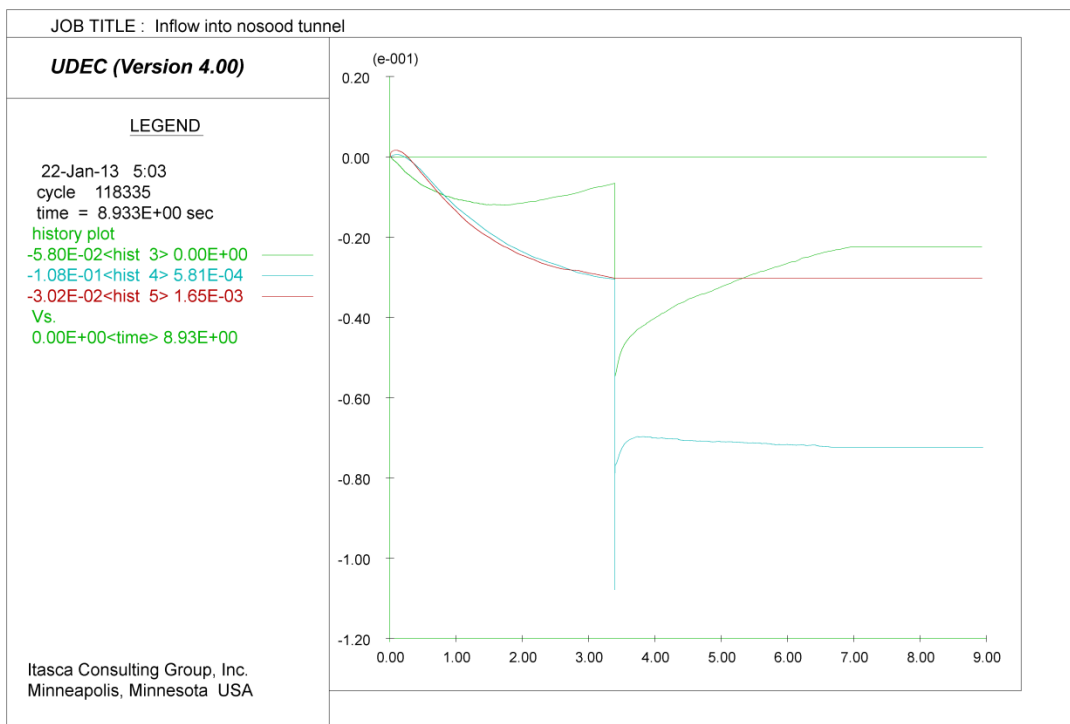
منقطع ۷



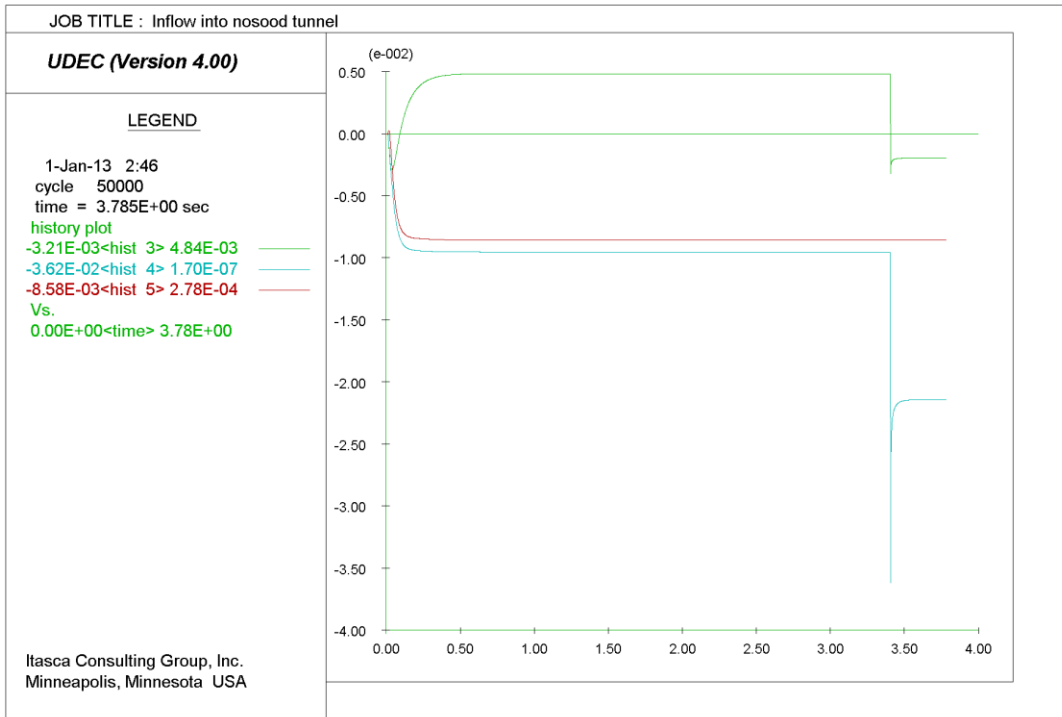
منقطع ۸



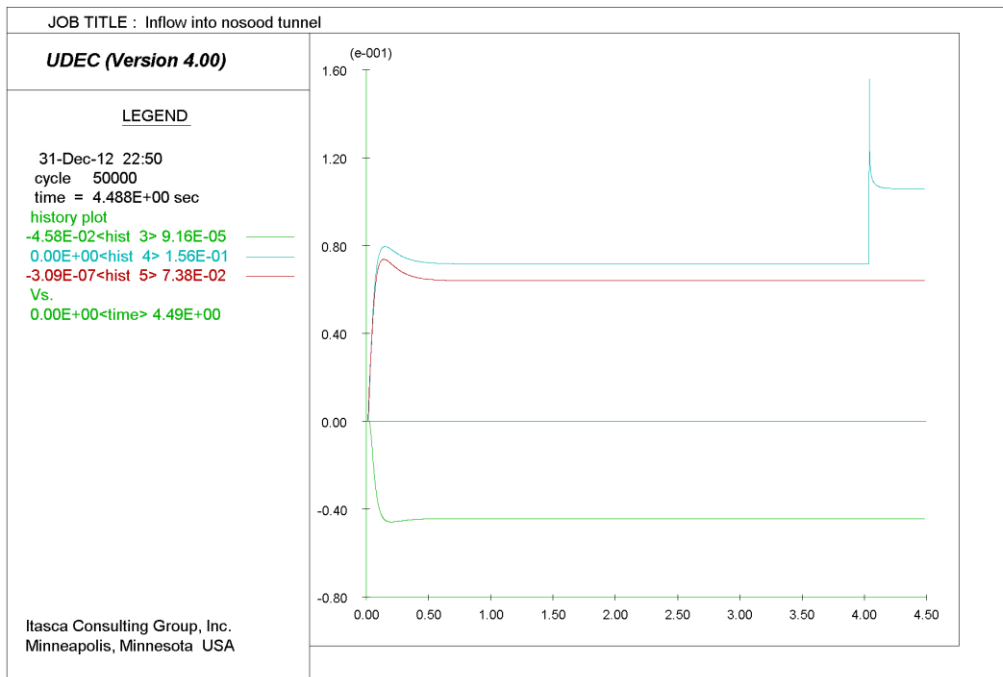
مقطع ۹



مقطع ۱۰ با در نظر گرفتن گسل



مقطع ۱۰ بدون در نظر گرفتن گسل



مقطع ۱۱

د) تصاویر کارگاه-قطعه دوم تونل زاگرس



مرحله شروع حفاری و مونتاژدستگاه



پوشش سگمتی هگزاگونال مورد استفاده در تونل



نوع قالب و کارگاه تولید پوشش سگمتی



دشواری عملیات اجرایی به دلیل تراوش شدید آب و نفوذگاز در تونل

ه) نمودار تغییرات تراوش آب و گاز سمی بر حسب متر از پیشروی در تونل - پایان آذر ۹۱

و) پروفیل طولی تونل و موقعیت مقاطع مدلسازی شده

منابع

- Adams J, Roberts R.(2012) "*Advances in hydrogeologic testing of mineral exploration boreholes*" international mine water association, pp 357-363
- Arnold JG, Allen PM, Bernhardt G. (1993)."*A comprehensive surface-groundwater flow model*". *Journal of Hydrology*,142,1,pp 47-69.
- Blindheim oT. (2008)."*design principle and construction method for water control in subsea road tunnel in rock*". *introduction to water control in norwegian tunneling*,12 pp 34-6.
- Chen R.(2010) ;PhD Dissertation"*Groundwater inflow into rock tunnels*". civil department .Austin,Texas: University Of Texas.
- Craig RF. (1984), "*Soil mechanics*".vol 1.elsevier pp 180-185.
- Farhadian H, Aalianvari A, Katibeh H. (2012)."*Optimization of analytical equations of groundwater seepage into tunnels: A case study of Amirkabir tunnel*". *Journal of the Geological Society of India*,80,1,pp 96-100.
- Fernandez G, Moon J. (2010)."*Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel Part 1: Guideline for estimate of ground water inflow rate*". *Tunnelling and Underground Space Technology*,25,5,pp 560-6.
- Gattinoni P, Scesi L, Terrana S. (2009)."*TUNNEL INFLOW ASSESSMENT IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES: FROM NUMERICAL MODELING TO EMPIRICAL EQUATIONS*". Department of Environmental, Hydraulic, Infrastructures and Surveying Engineering, milan,Italy
- Heuer RE,(1995) "*Estimating rock tunnel water inflow*".Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference; pp 394-407, society for mining, metallurgy and exploration,INC, USA
- Hsu SM, Lo HC, Chi SY, Ku CY. (2011)."*Rock Mass Hydraulic Conductivity Estimated by Two Empirical Models*" pp 134-58.*Developments in Hydraulic Conductivity Research* , Dikinya O, InTech, shanghai china
- Hwang JH, Lu CC. (2007)."*A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow*". *Tunnelling and Underground Space Technology*,22,1,pp 39-46.
- Indraratna B, Singh R. (1994)."*Distinct element analysis of water inflow to underground excavations*". *Mine Water and the Environ*,13pp.11-24
- ITASCA U. (2004)."*UDEC Manual, Theory and Background, Itasca Consulting Group*". Inc Minneapolis, Minnesota, USA.
- Katibeh H, Aalianvari A.(2012), "*Common Approximations to the Water Inflow into Tunnels*"pp 75-88, *Drainage Systems*, Salik Javaid.M,InTech, shanghai china
- Kolymbas D, Wagner P. (2007)."*Groundwater ingress to tunnels*". *Tunneling and Underground Space Technology*,pp 23-27.
- Marjoribanks R. (2010), "*Geological methods in mineral exploration and mining*".vol 1.

2nd, editor.Springer pp 59-60.

Masset O, Loew S. (2010)."**Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland**". *Hydrogeology Journal*,18,4,pp 863-91.

Moon J, Jeong S. (2011)."**Effect of highly pervious geological features on ground-water flow into a tunnel**". *Engineering Geology*,117,3,pp 207-16.

Pan JB, Lee CC, Lee CH, Yeh HF, Lin HI. (2010)."**Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock**". *Engineering Geology*,116,1,pp 166-77.

Perrochet P, Dematteis A. (2007)."**Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation**". *Ground Water*,45,6,pp 786-90.

Raymer J,(2001) "**Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution**". 2001 Rapid Excavation and Tunneling Conference;pp 1027-1038

Schurch M,(2006) "**Small But Important-Gaskets for Tunnel Segments**". *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling*;pp 239-248 ,Germany

Sharifzadeh M, Karegar S, Ghorbani M. (2011)."**Influence of rock mass properties on tunnel inflow using hydromechanical numerical study**".*Arabian Journal of Geosciences*, pp 1-7.

Singh B, Goel RK. (2006), "**Tunnelling in weak rocks**".vol 5.Elsevier Science pp307-311

Thewes M, Budach C,(2009) "**Grouting of the annular gap in shield tunnelling An important factor for minimisation of settlements and production performance**". Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 Safe Tunnelling for the City and Environment;

Wallentinus H, Paivo J. (2001)."**The Hallandsas railway tunnel project in Sweden**". The Role of environmental impact assessment in the planning and decision process of large development projects in Nordic countries Stockholm, Sweden: Norderegio Report

Wittke W, Druffel R, Erichsen C, Gattermann J, Kiehl J, Schmitt D, et al. (2006), "**Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling**".vol.1, Glückauf WBI, Aachen,Germany

Zarei H, Uromeihy A, Sharifzadeh M. (2011)."**Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features**". *Tunnelling and Underground Space Technology*,26,2,pp 364-73.

منابع فارسی

- ایمن - سازان. گزارش پیشرفت تونل زاگرس: مهندسين مشاور ایمن سازان ۱۳۹۰.
- حسن پور ج, (۱۳۸۵) "ارزیابی اعتبار روش‌های مختلف تخمین جریان آب ورودی به تونل‌های سنگی - مطالعه موردی تونل قمرود". هفتمین کنفرانس تونل ایران, ص ۵۷۴ دانشگاه صنعتی شریف
- حسنپور ج, (۱۳۸۲) "تخمین جریان آب ورودی به تونل با استفاده از تست فشار آب - مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرود". ششمین کنفرانس تونل, ص ۹۰ دانشگاه علم و صنعت ایران
- ساحل. بررسی هجوم آب و نشت گاز به درون تونل زاگرس در تاق‌دیس اسپر: مهندسين مشاور ساحل ۱۳۸۷.
- ساحل. گزارش مطالعات تکمیلی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب زاگرس - قطعه دوم: مهندسين مشاور ساحل ۱۳۸۶.
- ساحل. گزارش مطالعات تکمیلی هیدرولوژی مسیر تونل انتقال آب زاگرس - قطعه دوم: مهندسين مشاور ساحل ۱۳۸۶.
- ستاری ق, (۱۳۹۰) "تونلسازی مکانیزه در شرایط بحران آب و گاز - مطالعه موردی تونل بلند زاگرس". نخستین همایش آسیایی ونهمین همایش ملی تونل, ص ۱۳۵ تهران, ایران
- عراقچیان م, (۱۳۸۹) "شناخت مواد ومصالح" انتشارات دانشگاه بوعلی سینا, ص ۹۳
- کردنظیری م, (۱۳۹۰) پایان نامه ارشد "مدلسازی عددی نرخ نفوذ آب به درون تونل به روش شبکه شکستگی‌های نامنظم - مطالعه موردی تونل دسترسی به تونل بلند زاگرس". اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.
- مدنی ح. (۱۳۸۲), "زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک" انتشارات جهاد دانشگاهی.
- معماریان ح. (۱۳۸۵), "زمین‌شناسی برای مهندسين" انتشارات دانشگاه تهران.
- معماریان ح. (۱۳۷۴), "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران.
- مهدوی نژاد ح. (۱۳۹۰) پایان نامه ارشد "بررسی فرآیند تزریق آب بند در تونل‌های سنگ سخت - مطالعه موردی تونل انتقال آب کرج - تهران (قطعه ۱)". شاهرود: صنعتی شاهرود.

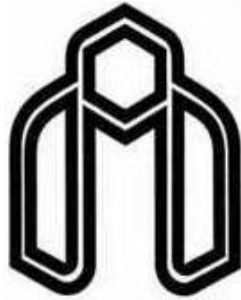
Abstract

Water inflow is one of the main problems in constructing of underground space during constructing and utilizing steps. This problem decreases the ability of the operative group and consequently increasing the costs and decreasing the advance rate. Accurate predicting the value of the inflow in different steps of construction will increase the ability of the operative group to control the inflow.

Zagros long tunnel is one of the projects that is so hard to excavate because of water inflow. This tunnel with 26km length passed the hydrocarbon formations and jointed rock mass, and is a part of water conveyance project in the west tropical plains of Iran.

The estimation of inflow jointed rock mass is convoluted because of jointed properties such as orientation and spacing. In this study the behavior of underground water in fractured rock and then analytic and empirical methods in tunnel inflow will discussed. In this methods pendency of permeability that estimated in field testing and assumption such as continuous rock mass will make error in result. For better estimation of inflow in this tunnel, estimation will solve by distinct element method numerically by UDEC software. The results of numerical estimation have a better corrolation with real data from tunnel inflow. Inflow was predicted by use of calibrated model in the areas that is not excavated now. By use of parametric analysis, the aperture, spacing, orientation of the joint and underground water level analysed. In the end of this study control systems of inflow will discuss and offer a method for control of water in this project.

Key words: inflow, jointed rock mass, numerical modelling, UDEC, parametric analysis, inflow control



Shahrood University of technology

Faculty mining engineering, petroleum and geophysics department

Numerical Modeling of Rock Mass Hydraulic Behaviour Around the Tunnel
and Construction and Relevant Controlling Techniques
Case study: (zagros water conveyance tunnel, lot2)

Mohammadreza Mehravaran

Supervisors:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Dr. Shokrollah Zare

February 2013