نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Jounrnal of Science & Research Civil and Enviromental Engineering (ASJR-CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۹۱ تا ۱۹۷
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 191-197

بررسی پایداری تونل‌ها در تقاطعات Y شکل با توجه به زاویه برخورد آن‌ها مطالعه موردی: تونل پنستاک سد رودبار لرستان

مرتضی قارونی نیک[1*]، علی فرمهینی فراهانی[2]

۱-استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲-کارشناس ارشد، مهندسی خطوط راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۶)

چکیده

تحلیل تنش‌ها و کنترل پایداری در مقاطع برخورد تونل‌ها، به دلیل تمرکز تنش و سه‌بعدی بودن مسئله، کار بسیار پیچیده‌ای است. در طول ساخت تونل، افزایش بار بر روی نگهدارنده و تغییر شکل اضافی تونل به علت اختلال ایجاد شده در مصالح اطراف ناحیه تقاطع، منحصر به فرد بوده و ممکن است باعث بروز ناپایداری در این مقطع شود. برای کنترل تنش‌ها و تغییر شکل‌های اضافی در این مقاطع، نیاز به سیستم نگهداری قوی‌تری نسبت به سایر مقاطع تونل وجود دارد. مقادیر تنش و جابه‌جایی‌های اضافی در محل تقاطع Y شکل متأثر از زاویه برخورد تونل‌ها است. در این تحقیق، با مدلسازی سه‌بعدی محل انشعاب تونل پنستاک سد رودبار لرستان در نرم‌افزار FLAC3D تأثیر زاویه برخورد تونل‌ها بر طول نگهداری اضافی در تقاطع Y شکل بررسی شده است. نتایج تحلیل‌ها برای سه زاویه ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد که با کاهش زاویه برخورد، طول نگهداری اضافی لازم در محل گوه میانی و تاج تونل‌ها افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی:

تقاطع Y شکل، تونل پنستاک، نگهداری اضافی، FLAC 3D

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: gharouni@doctor.com

۱- مقدمه

تحلیل تنش‌ها و کنترل پایداری در فضاهای زیرزمینی به دلیل ابهامات زیاد و عدم آگاهی کامل از رفتار زمین کار دشواری است؛ بخصوص در مقاطعی که تونل‌ها چندشاخه می‌شوند و در اصطلاح تقاطع دارند. این مقاطع به دلیل شکل خاصشان تحت تأثیر میدان‌های تنش سه‌بعدی قرار دارند که کار تحلیل تنش‌ها و کنترل پایداری را بسیار پیچیده‌تر می‌نمایند. روش متداول تحلیل در تونل‌ها استفاده از کرنش مستوی در حالت دو بعدی و بررسی مقاطع مختلف است. ولی فرض کرنش مستوی تنها در شرایطی صادق است که مقاطع تونل تحت حوزه تنش‌هایی غیر از خود تونل نباشد. در مقاطع برخورد تونل‌ها وضعیت تنش‌ها به گونه دیگری است و فرض کرنش مسطح صادق نیست و بررسی آن‌ها در حالت دو بعدی نمی‌تواند به خوبی بیانگر وضعیت تنش‌های موجود در آن مقطع باشد [۲]. بنابراین ساخت مدل‌های سه‌بعدی برای بررسی مقادیر تنش و تغییر شکل در محل تقاطع ضروری است.

از عوامل تأثیرگذار بر پایداری تونل‌ها در این مقاطع و مقادیر نگهداری اضافی لازم، زاویه برخورد تونل‌ها با یکدیگر است. با استفاده از مدلسازی سه‌بعدی محل تقاطع با زوایای مختلف، می‌توان تغییرشکل‌ها و تنش‌های اضافی به وجود آمده در این محل‌ها و الگوی گسترش آن‌ها در طول تونل‌ها را بررسی نمود. عموماً در این مقاطع برای مقابله با اضافه تنش‌های موجود، سیستم نگهداری سنگین‌تری نسبت به مقاطع معمولی تونل به‌کار گرفته می‌شود که این سیستم نگهداری اضافی، عامل اصلی هزینه‌ها در اجرای این مقاطع می‌باشد. بنابراین طراحی بهینه نگهداری در محل تقاطع و منطقه متأثر از آن بسیار با اهمیت است.

بسیاری از مطالعات رفتار محل تقاطع تونل‌ها در گذشته، بر اساس مطالعه روی عوامل تمرکز تنش و استفاده از تئوری الاستیسیته شکل گرفته است. آزمایش‌های فتوالاستیسیته توسط رایلی و پنت بر روی فشارهای دربرگیرنده‌ی محل تقاطع تونل صورت گرفته است. ولی به دنبال توسعه‌ی سریع روش‌های مدلسازی، تحلیل‌های سه‌بعدی جایگزین روش‌های قبلی شدند. تارجا و تاکینو و همکارانشان از جمله محققانی بودند که بر روی بحث جابه‌جایی و فشار خطی در محل تقاطع با توجه به خصوصیات سنگ‌ها و زاویه‌های مختلف تقاطع به تحقیق و بررسی پرداختند [۳].

برای طراحی سیستم نگهداری در محل تقاطع یک تونل اصلی و یک تونل فرعی با زاویه ۴۵ درجه، تساشیاما و همکارانش از تحلیل عددی سه‌بعدی استفاده کردند. بر اساس این تحلیل‌ها، اعلام نمودند که منطقه تأثیر در طول تونل اصلی که احتیاج به نگهداری بیشتری دارد، برابر قطر تونل در جهتی که با تقاطع زاویه منفرجه می‌سازد و سه برابر قطر تونل در جهتی که با نقطه تقاطع زاویه حاده تشکیل می‌دهد، است [۴].

پوتلر مطالعاتی روی شبکه‌ای از فضاهای زیرزمینی در کشور انگلیس (که در مجموع تقریباً ۹۰ تقاطع دارد) انجام داد. این شبکه از تونل‌ها در سنگ‌های ناحیه مارشالینگ حفر شده و در عمق ۱۰۰ متری زمین قرار گرفته است. روش حفاری، مبتنی بر اصول روش تونل‌سازی اتریشی بوده است. او از دو نوع مدل تقاطع یعنی تقاطع T شکل و تقاطع صلیبی بهره برد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌داد که مقادیر تنش‌ها و کرنش‌ها در محل تقاطع‌ها ۱/۵ برابر مقادیر آن‌ها در سایر بخش‌های تونل می‌باشند. تنها در فاصله حدود نصف قطر تونل از محل تقاطع، تنش در پوسته بتنی دچار اغتشاش می‌شود [۵].

هوک و براون اظهار داشتند که در مقطع Y شکل، عامل تمرکز تنش تحت تأثیر تنش تک محوره (تانسور تنش تک محوره)، به بیش از ۳۵ خواهد رسید [۳].

تحقیقات اخیر که توسط نونومورا و همکارانش صورت گرفت، بکارگیری نگهداری تقویت‌شده در محل تقاطع را با یک تخمین حدودی و کلی شامل می‌شد [۶]. همچنین چن و هوسایو تحقیقاتی بر اساس تحلیل الاستوپلاستیک سه‌بعدی، در ارتباط با رفتار تونل در محل تقاطع را سرپرستی کردند [۷].

مطالعات ذکر شده صرفاً محدود به یک مطالعه موردی است. در این تحقیق سعی بر آن است تا با یک دید کلی، تأثیر پارامتر زاویه تقاطع بر طول اضافه نگهداری مورد نیاز در مقاطع برخورد Y شکل بررسی گردد.

۲- مدلسازی

برای بررسی تأثیر زاویه تقاطع بر رفتار تونل‌ها در مقاطع برخورد Y شکل، نیاز به مقایسه رفتار تونل در مدل‌های سه‌بعدی مختلفی است که هر یک با زاویه تقاطع خاصی ساخته شده باشند. بنابراین با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D سه مدل با زاویه بازشدگی۶۰، ۷۵ و۹۰ درجه ساخته شد. برای ساخت مدل در نرم‌افزار FLAC3D، نیاز به دانستن شرایط اولیه و مشخصات ژئوتکنیکی توده سنگ اطراف است. به‌منظور کاربردی‌تر شدن مسئله و تطبیق آن با یک مورد واقعی، شرایط مدلسازی مطابق شرایط واقعی محل انشعاب تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان در نظر گرفته شده است. در محل سد به منظور تأمین آب توربین‌ها که در تراز پایین‌تری واقع شده‌اند، تونلی به قطر ۶ متر آب را به پایین‌دست هدایت می‌کند. این تونل قبل از رسیدن به توربین‌ها، به دو شاخه تقسیم شده و یک انشعاب Y شکل را می‌سازد. محل انشعاب حدود ۳۶۰ متر پایین‌تر از سطح زمین واقع شده است. بنابراین می‌توان گفت تونلی عمیق محسوب می‌شود. به دلیل وجود گسلی عمیق قبل از محل انشعاب و با فاصله از آن، سطح آب زیرزمینی به شدت افت کرده و پایین‌تر از تراز تونل‌ها در محل انشعاب قرارمی‌گیرد. بنابراین در محل انشعاب فشار قائم تنها ناشی از وزن توده‌های سنگ است [۱].

مطابق گزارش زمین‌شناسی، در محل انشعاب به دلیل شدت فعالیت‌های تکتونیکی، شکستگی‌هایی در توده سنگ اتفاق افتاده است. با این حال، توده سنگ از مقاومت نسبتاً خوبی برخوردارست.

گمانه‌های حفر شده در محل انشعاب، مقدار RQD میانگین برابر ۸۷ را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به این مقدار بالای RQD و این

نکته که مفهوم پیوستگی و ناپیوستگی یک مفهوم نسبی است، می‌توان توده سنگ را پیوسته درنظر گرفت [۱].

از طرفی دیگر، با توجه به اینکه نرم‌افزار FLAC3D یک نرم‌افزار تفاضل محدود است، می‌تواند برای مدلسازی عددی در توده‌های سنگ پیوسته مورد استفاده قرارگیرد. بنابراین با توجه به این ویژگی و سرعت و دقت بالای محاسبات، FLAC3D به عنوان نرم‌افزار مدلسازی انتخاب شده است. برای مدلسازی محل انشعاب در نرم‌افزار FLAC3D از مدل رفتاری موهر–کولمب استفاده شده است. بنابراین نیاز به عواملی از قبیل وزن مخصوص توده سنگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول تغییر شکل‌پذیری، نسبت پواسون و نسبت تنش افقی به قائم در محدوده انشعاب می‌باشد که به طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات توده سنگ محل انشعاب [۱]

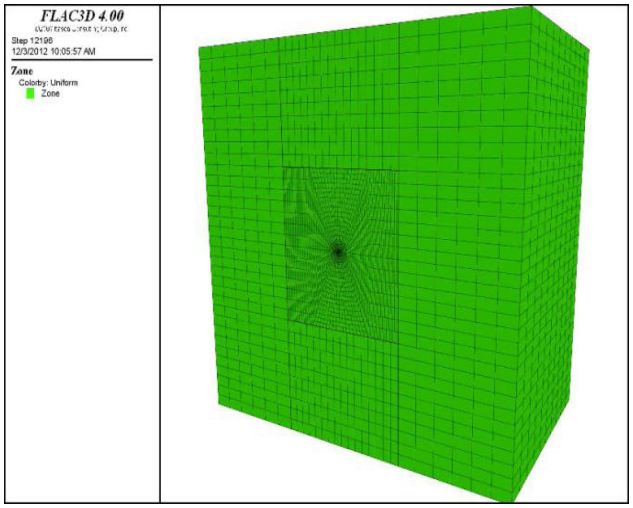
مشخصه	مقدار
ضریب تنش‌افقی (k)	۰/۷
نسبت پواسون (ν)	۰/۲۵
مدول تغییر شکل‌پذیری (گیگا پاسکال)	۴/۸
زاویه اصطکاک درزه‌ها	۳۰
چسبندگی درزه‌ها (مگا پاسکال)	۰/۵
وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۷۱۶

۲- ۱- هندسه مدل

با توجه به دوشاخه‌شدن تونل اصلی در مقاطع Y شکل و برای درنظر گرفتن تأثیر متقابل تونل‌ها بر یکدیگر و تأثیر آن‌ها بر ابعاد بهینه مدل، لازم است که هر دو تونل با ابعاد مشخصی در مدل در نظر گرفته شوند. به منظور کاهش اثر مرزها بر نتایج تحلیل باید ابعاد مدل بیش از ۸ برابر قطر تونل درنظر گرفته شود [۸]. بنابراین در مدلسازی، تمامی مدل‌ها با عرض و ارتفاع ۱۰۰ متر ساخته شده و طول مدل‌ها برابر ۶۰ متر در نظر گرفته شده است؛ به طوری که مرکز تقاطع بر مرکز هندسه مدل منطبق است. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و کاهش حجم محاسبات عددی، شبکه‌بندی مدل‌ها به صورتی انجام شده است که در محل تونل‌ها و نواحی نزدیک آن‌ها، تراکم شبکه ها بیشتر بوده و هرچه از تونل‌ها فاصله گرفته می‌شود، از این تراکم کاسته می‌گردد. شبکه‌بندی مدل‌ها و ابعاد مدل در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

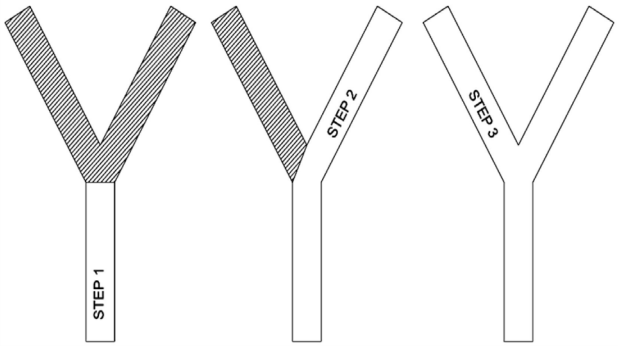
۲- ۲- تعیین ترتیب و گام حفاری

روش حفر در تونل‌ها به صورت تمام مقطع درنظر گرفته شده است. مقطع تونل دایره‌ای است به طوری که با رسیدن به محل انشعاب، به دو تونل مجزا تقسیم می‌شود. در محل انشعاب ابتدا تونل سمت راست تا انتها حفر می‌شود. سپس تونل سمت چپ حفاری می‌گردد تا اثر حفر آن



شکل ۱: مش‌بندی و ابعاد مدل

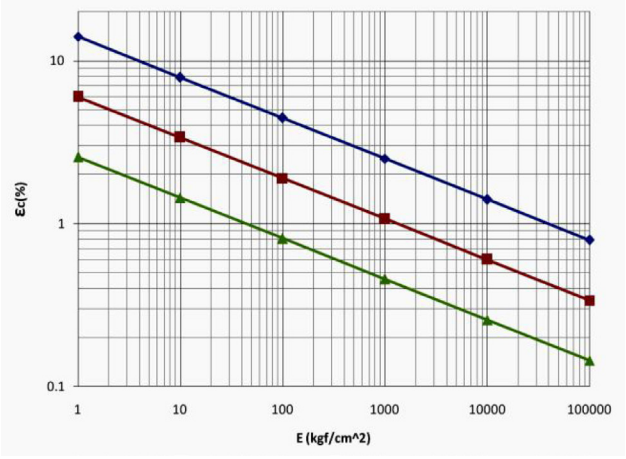
بر تونل سمت راست و محل تقاطع مشاهده شود. این روش حفاری برای کاهش جابه‌جایی‌ها و نگهداری لازم در محل تقاطع درنظر گرفته شده است. در مدل طولی برابر ۳۰ متر از تونل اصلی قبل از محل انشعاب و تقریباً همین طول از تونل‌های انشعابی مدلسازی شده است. در شکل (۲) ترتیب حفاری نشان داده شده است.



شکل ۲: ترتیب حفاری محل انشعاب

برای محاسبه گام پیشروی در سازه‌های سنگی اختلاف نظرهایی وجود دارد. یکی از روابط پرکاربرد، رابطه‌ای است که ساکورایی پیشنهاد داده است. ساکورایی در سال ۱۹۸۶ روشی برای ارزیابی پایداری سنگ باتوجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرد که بر اساس نتایج آزمایش فشاری تک‌محوره بر روی سنگ‌ها تعریف می‌شود. این روش اغلب به عنوان روشی استاندارد برای همگرایی (جابه‌جایی نسبی دیوارهای تونل) استفاده می‌شود که در نتیجه‌ی بررسی تونل‌های مختلف به‌دست آمده است. ساکورایی و همکارانش علاوه بر انتشار روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش بحرانی برای سنگ‌های مختلف، روابطی نیز بین مدول الاستیسیته سنگ‌های مختلف و کرنش بحرانی ارائه دادند که در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این روش برای بررسی پایداری سازه، مقدار تراز هشدار خطر تعیین و با عامل اندازه‌گیری‌شده (کرنش مجاز) مقایسه می‌گردد. اگر



شکل ۳: رابطه بین مدول تغییر شکل و کرنش بحرانی [۹]

مقدار اندازه‌گیری‌شده از سطح هشدار خطر (کرنش بحرانی) کمتر باشد، سازه پایدار است و کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است.

تعریف کرنش بحرانی به صورت:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \qquad (۱)$$

است که در آن، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری و E مدول یانگ است.

ساکورایی با ارتباط‌دادن نتایج آزمایشگاهی و داده‌های صحرایی با استفاده از عوامل کرنش مجاز (بحرانی)، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ، سه تراز هشدار خطر ارائه داده است:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \qquad (۲)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \qquad (۳)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \qquad (۴)$$

که در آن، ε_c کرنش بحرانی برحسب درصد و E مدول تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ (کیلوگرم فورس بر سانتی‌متر مربع (kgf/cm^2)) است.

رابطه‌های (۲) تا (۴)، به ترتیب نشان‌دهنده تراز هشدار خطر I و II و III هستند [۹،۱۰].

همچنین جابه‌جایی مجاز به صورت:

$$\varepsilon_c = \frac{U_c}{a} \qquad (۵)$$

تعریف می‌شود که در آن، U_c جابه‌جایی اندازه‌گیری‌شده در محل مورد نظر و a شعاع تونل (هم واحد با U_c) است [۹،۱۰].

برای ارزیابی پایداری از روش ساکورایی مقادیر به دست آمده از مدل با گام حفاری ۲ متر، جابه‌جایی حداکثر ۱۶ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در حالی‌که برای شعاع ۳ متری تونل مقدار کرنش بحرانی برابر با ۰/۰۰۵۳ می‌شود. بنابراین اندازه کرنش بحرانی به دست آمده از نتایج تحلیل، تونل را با توجه به مقدار مدول الاستیسیته سنگ محل، در سطح هشدار خطر III محدود می‌کند. در نتیجه گام ۲ متری، گام حفاری مناسبی خواهد بود.

۲- ۳- مدلسازی سیستم نگهداری

در مدلسازی‌ها از پوشش بتنی و بتن پاششی به عنوان سیستم نگهداری موقت و نهایی استفاده شده است. به طوری که پس از حفر هر گام حفاری ابتدا سیستم نگهداری موقت شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر اجرا شده، سپس در گام حفاری بعدی با حذف المان ساختاری بتن پاششی و جایگزینی آن با المان ساختاری پوشش بتنی با ضخامت مجموع هر دو پوشش، یعنی۵۰ سانتی‌متر مراحل مدلسازی تکمیل شده است. در جدول (۲) مشخصات سیستم‌های نگهداری موقت و دائم آمده است.

جدول ۲: خصوصیات مقاومتی سیستم نگهداری

سیستم نگهداری	مدول برشی (گیگا پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب پواسون (ν)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
بتن پاششی	۸/۹۶	۲۵۰۰	۰/۲۵	۲۲/۴
پوشش بتنی	۱۲	۲۵۰۰	۰/۲۵	۳۰

۳- بررسی نتایج حاصل از مدلسازی

برای تفسیر خروجی‌های حاصل از مدلسازی در نرم‌افزار FLAC3D نقاط بحرانی روی مدل درنظر گرفته شده است که مقادیر جابه‌جایی و تنش مدل در این نقاط، برای مقایسه و تحلیل خروجی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مدل Y شکل تونل‌ها، به طور مشخص نواحی بحرانی در محل تقاطع به سه بخش تقسیم می‌شوند:

- سقف تونل‌ها قبل و بعد از مرکز تقاطع
- گوه میانی (محل تشکیل زاویه حاده)
- گوه کناری (محل تشکیل زاویه منفرجه)

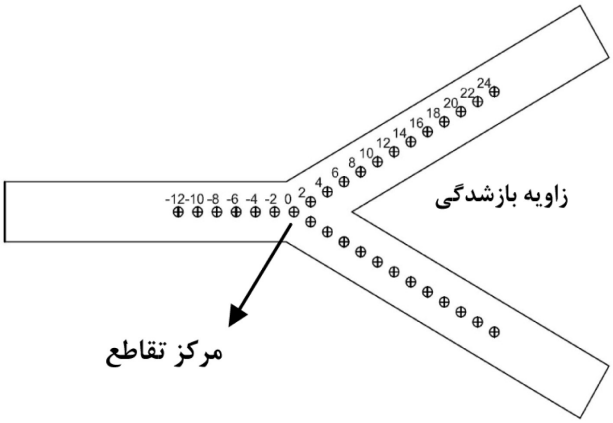
نقاطی ثابت روی این نواحی در هر مدل در نظر گرفته شده است که شامل ۱۲ متر (۲ برابر قطر تونل) قبل و ۲۴ متر (۴ برابر قطر تونل) بعد از محل تقاطع است. نتایج جابه‌جایی و تنش حاصل از تحلیل عددی نرم‌افزار در این نقاط، برای مقایسه با یکدیگر و تفسیر نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان محل این نقاط را به ترتیب در محل تاج و دیوارها مشاهده کرد. به طوری که فاصله نقاط از یکدیگر ۲ متر بوده و نامگذاری آن‌ها برای بعد از محل تقاطع و با توجه به فاصله از مرکز تقاطع با اعداد مثبت و قبل از مرکز تقاطع با اعداد منفی نشان داده شده است.

شکل‌های (۶) تا (۱۰) نمونه‌ای از تغییرات تنش و جابه‌جایی را در نقاط مختلف تاج و دیواره تونل‌های تقاطع ۹۰ درجه و در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۷ نشان می‌دهند.

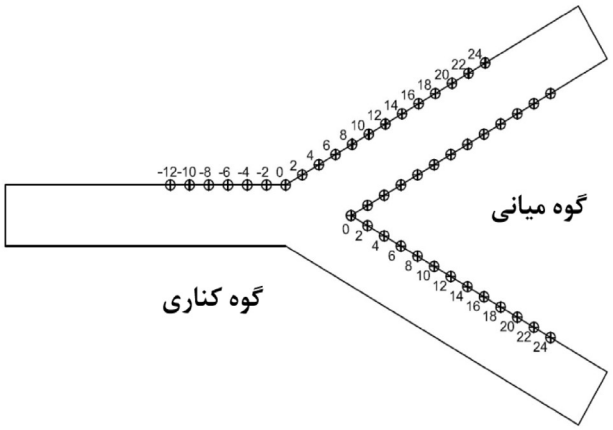
برای مشاهده بهتر اثر زاویه بازشدگی بر طول نگهداری اضافی

مورد نیاز در محل انشعاب، مقادیر جابه‌جایی‌ها و تنش‌های حاصل از تحلیل عددی روی نواحی بحرانی به صورت نمودارهای فاصله-جابه‌جایی و فاصله-تنش در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) نشان داده شده‌است.

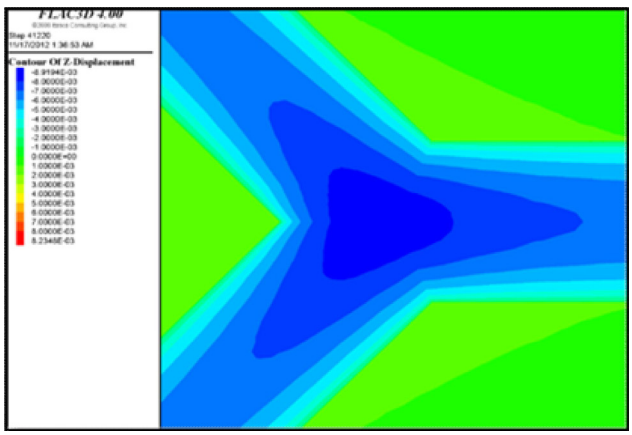
شکل (۱۱) مقادیر جابه‌جایی تاج را با فاصله از مرکز تقاطع برای زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. حداکثر جابه‌جایی در مرکز تقاطع اتفاق می‌افتد. مقادیر جابه‌جایی در تونل اصلی (قبل از محل تقاطع) در تمام زوایای برخورد تقریباً یکسان است. ولی در تونل‌های انشعابی، مقادیر



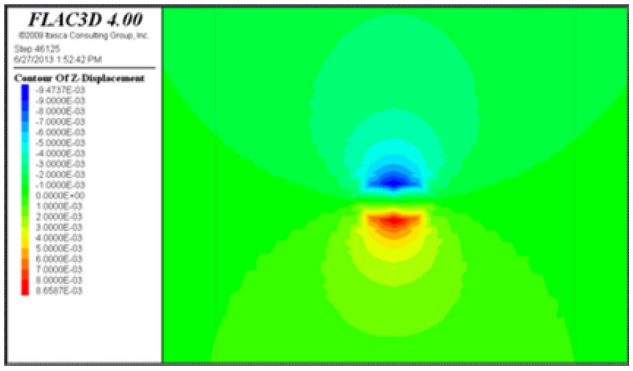
شکل ۴: نمایش محل نقاط بحرانی در تاج تونل



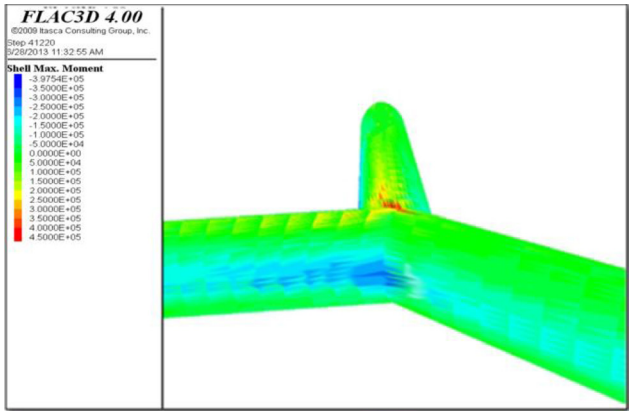
شکل ۵: نمایش محل نقاط بحرانی در دیواره‌ها



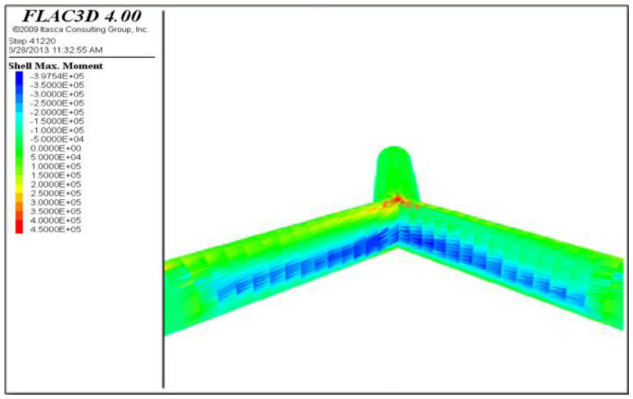
شکل ۶: کانتور جابجایی تاج در تراز ۳۵۷ متر زیر سطح زمین- تقاطع ۹۰ درجه



شکل ۷: کانتور جابجایی قائم در مرکز تقاطع-تقاطع ۹۰ درجه



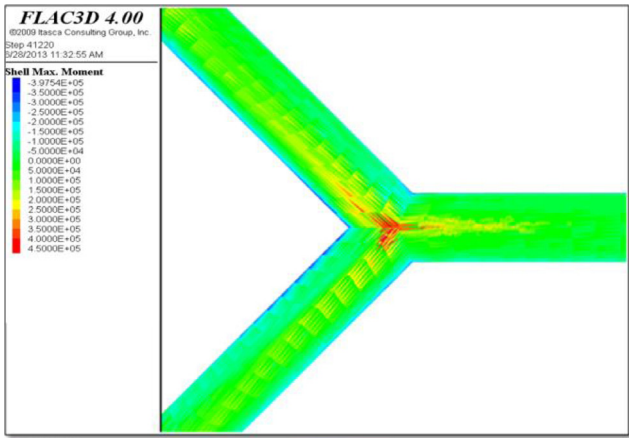
شکل ۸: کانتور ممان روی لاینینگ دیواره در محل زاویه منفرجه-تقاطع ۹۰ درجه



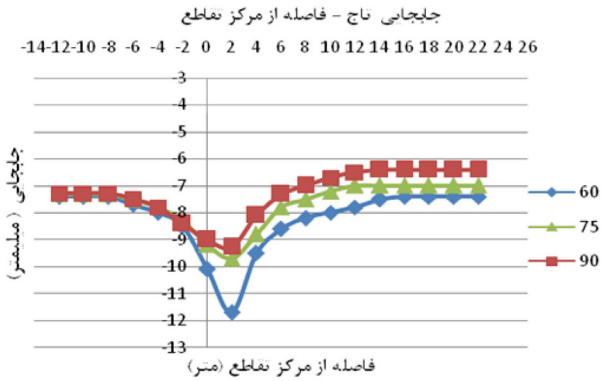
شکل ۹: کانتور ممان روی لاینینگ دیواره در محل زاویه حاده (گوه میانی) -تقاطع ۹۰ درجه

جابه‌جایی نهایی با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد که علت این امر، می‌تواند خارج‌شدن تونل‌های انشعاب از حوزه تأثیر یکدیگر و کاهش تمرکز تنش ناشی از محل تقاطع باشد. با فاصله‌گرفتن از مرکز تقاطع، مقادیر جابه‌جایی تاج تونل‌های انشعابی تا رسیدن به مقدار ثابت، روند کاهشی دارند که این روند با افزایش زاویه تقاطع شدت بیشتری دارد. در نتیجه در فاصله کمتری از مرکز تقاطع به این مقادیر ثابت میل می‌کند.

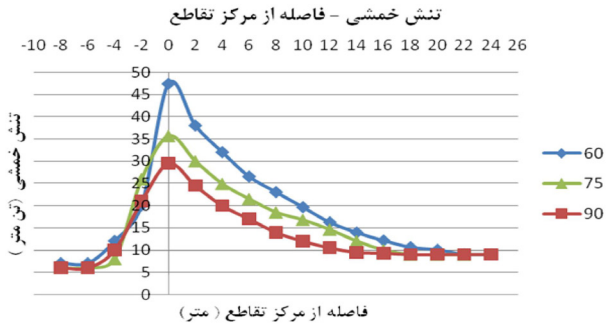
برای نمودارهای تنش خمشی روی تاج در شکل (۱۲) این نکته مشهود است که بزرگترین مقادیر لنگر خمشی سقف در مدل با زاویه تقاطع ۶۰ درجه رخ می‌دهد و هرچه زاویه تقاطع بیشتر می‌شود، این



شکل ۱۰: کانتور ممان روی لاینینگ تاج تونل-تقاطع ۹۰ درجه



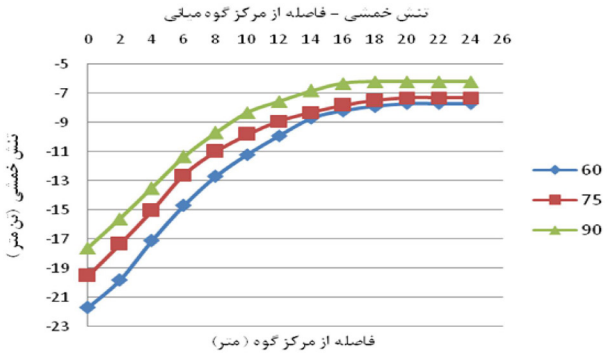
شکل ۱۱: نمودار جابجایی تاج-فاصله از مرکز تقاطع برای مقادیر مختلف زاویه تقاطع



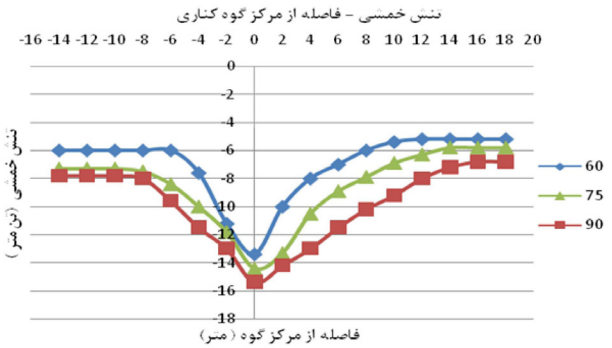
شکل ۱۲: نمودار تنش خمشی روی تاج-فاصله از مرکز تقاطع برای مقادیر مختلف زاویه تقاطع

تنش‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه زاویه تقاطع بزرگتر باشد، نمودارها در فاصله کمتری از مرکز تقاطع به مقادیر ثابتی می‌رسند. مقادیر ممان سقفی نهایی در تونل‌های انشعابی کمی بزرگ‌تر از مقادیر ممان در تونل اصلی است که این امر، به علت قرارگرفتن تونل‌های انشعابی در محدوده شعاع تأثیر یکدیگر و تأثیر ناحیه تقاطع است.

تأثیر زاویه برخورد تونل‌ها بر تنش خمشی در محل گوه میانی در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. همانند الگوی تنش در تاج تونل‌ها، حداکثر تنش خمشی در کمترین زاویه برخورد رخ می‌دهد. با فاصله‌گرفتن از مرکز گوه مقدار تنش خمشی کاهش می‌یابد. هرچه زاویه برخورد افزایش یابد،



شکل ۱۳: تنش خمشی دیواره-فاصله از مرکز گوه برای مقادیر مختلف زاویه تقاطع



شکل ۱۴: تنش خمشی دیواره-فاصله از مرکز گوه برای مقادیر مختلف زاویه تقاطع

مقدار تنش خمشی در فاصله کمتری به مقداری ثابت میل می‌کند. به طور کلی، در محل گوه میانی تنش بیشتری نسبت به گوه کناری مشاهده شد.

مقادیر لنگر خمشی روی دیواره تونل‌ها در محل گوه کناری در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با افزایش زاویه میانی تقاطع، زاویه گوه کناری کاهش می‌یابد. پس با افزایش تمرکز تنش در این ناحیه، مقادیر لنگر خمشی روی دیواره تونل افزایش خواهد یافت.

۳- ۱- تعیین محدوده نگهداری اضافی در مدل انشعاب Y شکل

با مقایسه نمودارهای تغییرات مقادیر جابه‌جایی و مقادیر تنش خمشی روی لاینینگ تونل‌ها در سه ناحیه تاج تونل‌ها، گوه میانی (محل تشکیل زاویه حاده) و گوه کناری (محل تشکیل زاویه منفرجه) به وضوح مشخص است که مقادیر حداکثر تنش و جابه‌جایی در مرکز انشعاب رخ داده و با روندی کاهشی تونل‌های انشعابی و تونل اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین نواحی که تحت تأثیر انشعاب می‌باشند، به دلیل وجود تنش‌های اضافی برای تأمین پایداری نیاز به تمهیدات ویژه در سیستم نگهداری دارند. در جدول (۳) می‌توان تأثیر زاویه تقاطع در محل انشعاب بر طول نگهداری اضافی لازم را مشاهده کرد.

٤- نتیجه‌گیری

حداکثر جابه‌جایی‌های تاج تونل در مرکز تقاطع رخ می‌دهد که ناشی

جدول ۳: طول نگهداری اضافی بر حسب فاصله از مرکز انشعاب

k	۰/۷		
زاویه تقاطع (درجه)	۶۰	۷۵	۹۰
طول نگهداری‌اضافی در محل گوه میانی (زاویه حاده) برحسب متر	۲۰	۱۸	۱۶
طول نگهداری اضافی در محل گوه کناری (زاویه منفرجه) برحسب متر	۱۰	۱۴	۱۶
طول نگهداری اضافی در تاج تونل‌ها برحسب متر	۲۳	۲۰	۱۸

از تغییر شکل‌های اضافه متأثر از محل تقاطع است. این جابه‌جایی‌های اضافی که نیاز به اضافه نگهداری دارد، با کاهش زاویه تقاطع تشدید می‌شود.

حداکثر تنش دیواره تونل‌ها در مرکز گوه میانی رخ می‌دهد که به علت تمرکز تنش در این ناحیه و زاویه کوچکتر نسبت گوه کناری (زاویه منفرجه) است. تنش روی لاینینگ با توجه به زاویه بازشدگی در فاصله‌ای از مرکز گوه به مقدار ثابتی می‌رسد که این فاصله، نیاز به نگهداری اضافی دارد. به طوری که حداکثر طول نگهداری اضافه برای زاویه تقاطع ۶۰ درجه برای دیواره تونل‌ها حدوداً برابر با ۲۰ متر یا تقریبا ۳/۵ برابر قطر تونل اصلی است.

در ناحیه گوه کناری، با افزایش زاویه میانی، مقادیر لنگر خمشی روی دیواره تونل افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش زاویه میانی، طول اضافه نگهداری لازم نیز افزایش می‌یابد.

نمودارها کاهش مقادیر تنش خمشی روی دیواره تونل را با فاصله‌گرفتن از مرکز گوه تا رسیدن به مقدار ثابت، به خوبی نشان می‌دهند. اندازه تنش خمشی برای زاویه ۶۰ درجه در فاصله کمتر و در زاویه ۹۰ درجه با فاصله بیشتری از مرکز گوه به مقدار ثابتی می‌رسد.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حداکثر طول اضافه نگهداری مورد نیاز مربوط به زاویه ۹۰ درجه بوده و حدود ۱۶ متر یا تقریباً ۲/۵ برابر قطر تونل اصلی است.

تاج تونل در مرکز تقاطع متحمل بیشترین مقادیر تنش است.

با فاصله‌گرفتن از مرکز تقاطع، مقادیر تنش اضافی نیز کاهش می‌یابد. افزایش زاویه بازشدگی، مقادیر تنش در این ناحیه را افزایش می‌دهد. بنابراین بیشترین طول نگهداری اضافی در این ناحیه برای زاویه بازشدگی ۶۰ درجه مورد نیاز می‌باشد که حدود ۲۳ متر یا تقریباً ۴ برابر قطر تونل اصلی است.

۵- مراجع

[۱] شرکت آب و نیرو، طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان، گزارش زمین‌شناسی مهندسی، مطالعات مرحله دوم، فروردین ۱۳۸۶.

[2] Hsiao, F. Y.; Wang, C. L.; and Chern, J. C.; "*Numerical Simulation of Rock Deformation for Support Design in Tunnel Intersection Area*", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 14-21, 2009.

[3] Tsuchiyama, S.; Hayakawa, M.; Shinokawa, T.; and Konno, H.; "*Deformation Behavior of the Tunnel under the Excavation of Crossingtunnel*", In: Numerical Methods of Geomechanics. Balkema, Rotterdam, pp. 1591-1596, 1988.

[4] Pottler, R.; "*Three Dimensional Modeling of Junctions at the Channel Tunnel Project*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 16, pp. 683-695, 1992.

[5] Nonomura, S.; Kimura, H.; Nakamura, J.; and Tamura, S.; "*Design and Construction of a Tunnel Intersection Area with Special Structure*", Tunnelling and Underground Space Technology, WTC 2004, G13, pp. 1-7, 2004.

[6] Hsiao, F. Y.; Yu, C. W.; and Chern, J. C.; "*Modeling the Behavior of the Tunnel Intersection Area Adjacent to the Ventilation Shaft in the Hsuehshan Tunnel*", World Long Tunnel, pp. 81-90, 2005.

[7] Hoek, E.; and Brown, E. T.; "*Underground Excavations in Rock*", London, The Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

[8] Itasca Consulting Group Inc, "*FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*", Ver 3.1, User's Manual, 2002.

[9] Sakurai, S.; "*Direct Strain Evaluation Technique in Construction of Underground Opening*", In Proc. 22, U.S. Symp. Rock Mech. Boston. M. A. (Edit by: H. H. Enistein), pp. 278-282, 1993.

[10] Sakurai, S.; "*Back Analysis in Rock Engineering*", Comprehensive Rock Engineering, Chap. 19, 1993.