

۳ فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	
۱-۱- کلیات	۱
۲-۱- طبقه بندی انواع تونل ها	۲
۱-۲-۱- تونل های حمل و نقل	۲
۲-۲-۱- تونل های صنعتی	۲
۳-۲-۱- تونل های معدنی	۲
۳-۱- طراحی تونل ها	۲
۱-۳-۱- روش تجربی	۲
۲-۳-۱- روش عددی	۲
۳-۳-۱- روش تحلیلی	۲
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق	۲
۵-۱- اهداف تحقیق	۲
۶-۱- روش انجام تحقیق	۲
۷-۱- نگاهی مختصر به عناوین تحقیق	۲
فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده	
۱-۲- مقدمه	۲
فصل سوم: مبانی و روش ها	
۱-۳- مقدمه	۱۶
۲-۳- معادلات دیفرانسیل تعادلی دو بعدی:	۱۶
۳-۳- معادلات تعادل در حالت قطبی	۱۹
۴-۳- توزیع تنش متقارن حول یک محور	۲۲
۵-۳- وضعیت تنش های اطراف سیلندر:	۲۲
۶-۳- وضعیت تنش های اطراف تونل های دایره ای	۲۴
۷-۳- تابع ایری در ترم های توابع پتانسیل مختلط	۲۶
۸-۳- تنش ها در ترم های پتانسیل مختلط	۲۸

- ۳-۹ - تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای تحت میدان ترکیبی برشی و برجا..... ۲۹
- ۳-۱۰ - تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی به روش استیونسون..... ۳۴
- ۳-۱۱ - تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی در میدان ترکیبی برجا و برشی..... ۴۳

فصل چهارم: تحلیل روابط

- ۴-۱ - مقدمه..... ۵۷
- ۴-۲ - تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای..... ۵۷
- ۴-۲-۱ - تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای تحت تنش‌های برجا..... ۵۷
- ۴-۲-۲ - تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای تحت میدان ترکیبی برجا و برشی..... ۶۷
- ۴-۳ - تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی..... ۷۱
- ۴-۳-۱ - تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی به روش استیونسون..... ۷۱
- ۴-۳-۲ - تاثیر تغییرات قطر تونل بر انواع تنش‌ها..... ۸۳
- ۴-۳-۳ - تغییرات انواع تنش در تونل‌های بیضوی تحت میدان برشی:..... ۸۶
- ۴-۴ - تغییرات انواع تنش در تونل‌های بیضوی تحت میدان برشی..... ۸۶

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۵-۱ - مقدمه..... ۹۱
- ۵-۲ - نتیجه گیری..... ۹۱
- ۵-۳ - پیشنهادات..... ۹۱
- منابع..... ۹۳
- پیوست..... ۹۵

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۸.....	جدول (۱-۲) مقایسه‌ی تنش مماسی با ۳ روش کریس، عددی و تحلیلی [۱۱].....
۷۲.....	جدول (۱-۴) مقادیر $\xi_0 = 0/5$ در مختصات کارتیزین.....
۷۳.....	جدول (۲-۴) مقادیر تنش مماسی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برجای تک محوره قائم.....
۷۴.....	جدول (۳-۴) مقادیر تنش شعاعی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برجای تک محوره قائم.....
۷۵.....	جدول (۴-۴) مقادیر تنش برشی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برجای تک محوره قائم.....
۸۶.....	جدول (۵-۴) مقادیر تنش مماسی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برشی.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲) الف) دیاگرام تونل و سیستم مختصات آن ب) تونل دایره‌ای واحد و سیستم مختصات آن [۱۱]... ۷	
شکل (۲-۲) الف) تمرکز تنش مماسی در مرز تونل شبه دایره‌ای ب) تمرکز تنش افقی در امتداد کف تونل (مورد ۱) [۱۱]..... ۸	
شکل (۳-۲) الف) تونل متقارن تحت میدان تنش همسان و سیستم مختصات آن ب) دیسک با شعاع واحد و سیستم مختصات آن [۱۰]..... ۹	
شکل (۴-۲) الف) مقایسه‌ی تنش‌های مماسی در امتداد حفره‌ی دوبل متقارن ب) تنش‌های مماسی هم تنش محاسبه شده به وسیله‌ی حل تحلیلی [۱۰]..... ۹	
شکل (۵-۲) تونل دایره‌ای با آستر تحت فشار یکنواخت و تنش‌های برجا [۱۹]..... ۱۰	
شکل (۶-۲) ناحیه‌ی مستطیلی تحت بررسی [۲۰]..... ۱۱	
شکل (۷-۲) تونل دایره‌ای با آستر تحت فشار یکنواخت و تنش‌های برجا [۵]..... ۱۲	
شکل (۸-۲) توزیع تنش مماسی و شعاعی $10 = \frac{E_2}{E_1}$ الف) $\Theta = 90^\circ$ ب) $\Theta = 0^\circ$ [۵]..... ۱۲	
شکل (۹-۲) توزیع تنش مماسی و شعاعی $0.1 = \frac{E_2}{E_1}$ الف) $\Theta = 90^\circ$ ب) $\Theta = 0^\circ$ [۵]..... ۱۳	
شکل (۱۰-۲) مقایسه‌ی σ_{max} خروجی برنامه‌ی الف) روش تحلیلی ب) برنامه‌ی PLAXIS برای تونل دایره-ای کم عمق $(\frac{r}{h} = 0.5)$ [۴]..... ۱۴	
شکل (۱۱-۲) مقایسه‌ی σ_{max} خروجی برنامه‌ی الف) روش تحلیلی ب) برنامه‌ی PLAXIS برای تونل دایره‌ای کم عمق $(\frac{r}{h} = 0.5)$ [۴]..... ۱۴	
شکل (۱-۳) نمائی از تنش‌های اعمالی بر یک المان دو بعدی از یک جسم در حال تعادل..... ۱۷	
شکل (۲-۳) نمائی از المان سه بعدی در تعادل تنش‌ها..... ۱۷	
شکل (۳-۳) نمایی از المان دو بعدی در مختصات قطبی..... ۲۰	
شکل (۴-۳) نمائی از فشار داخلی و خارجی سیلندر..... ۲۳	
شکل (۵-۳) یک صفحه با تنش‌های کششی یکنواخت با بزرگی S در جهت X ۲۴	
شکل (۶-۳) صفحه شامل یک تونل بیضوی در یک صفحه مختلط..... ۳۴	
شکل (۷-۳) نمائی از منحنی‌های بیضوی و هایپربولیک..... ۳۵	
شکل (۸-۳) نمائی از تنش‌های شعاعی، مماسی و برشی در در مختصات منحنی الخط..... ۳۶	

- شکل (۱-۴) نتایج آزمایشات متعدد هوک و براون در سال ۱۹۷۸ در زمینه‌ی اندازه‌گیری ضریب تنش‌های افقی در سنگ ۵۸
- شکل (۲-۴) نمودار تنش مماسی در فواصل a ، γa و δa از مرکز تونل در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۵۹
- شکل (۳-۴) تنش مماسی در فواصل بین a و δa در زوایای صفر و ۶۰ و ۹۰ در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۵۹
- شکل (۴-۴) تنش مماسی در فواصل بین $\Theta=۰$ تا $\Theta=۹۰$ و در شعاع‌های ثابت a و γa و δa ؛ در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۰
- شکل (۵-۴) نمودار تنش شعاعی در فواصل a ، γa و δa از مرکز تونل در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۱
- شکل (۶-۴) تنش شعاعی در فواصل بین a و δa و در زوایای صفر و ۶۰ و ۹۰ در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۲
- شکل (۷-۴) تنش شعاعی در فواصل بین $\Theta=۰$ تا $\Theta=۹۰$ و در شعاع‌های ثابت a و γa و δa در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۲
- شکل (۸-۴) نمودار تنش برشی در فواصل a ، γa و δa از مرکز تونل در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۳
- شکل (۹-۴) تنش برشی در فواصل بین a و δa و در زوایای ۳۰ و ۴۵ و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۴
- شکل (۱۰-۴) تنش برشی در فواصل بین $\Theta=۰$ تا $\Theta=۹۰$ و در شعاع‌های ثابت a و γa و δa در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۵
- شکل (۱۱-۴) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش مماسی در تونل دایره‌ای در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۵
- شکل (۱۲-۴) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش شعاعی در تونل دایره‌ای در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۶
- شکل (۱۳-۴) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش برشی در تونل دایره‌ای در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۶۷
- شکل (۱۴-۴) وضعیت تنش‌های اصلی در عمق ۱۰۰ متری در یک توده‌ی سنگی ۶۸
- شکل (۱۵-۴) الف) وضعیت تنش‌های محوری و برشی در توده‌ی سنگی با تغییر زاویه‌ی ۱۵ درجه توده‌ی سنگی نسبت به حالت تنش‌های اصلی، ب) وضعیت تنش‌های محوری و برشی در توده‌ی سنگی در حالت میدان برشی ماکزیمم ۶۸
- شکل (۱۶-۴) الف) نمودار مربوط به تنش مماسی در حالت اول ب) نمودار مربوط به تنش شعاعی در حالت اول ج) نمودار مربوط به تنش برشی در حالت اول ۶۹

- شکل (۴-۱۷) الف) نمودار مربوط به تنش مماسی در حالت دوم (ب) نمودار مربوط به تنش شعاعی در حالت دوم (ج) نمودار مربوط به تنش برشی در حالت دوم..... ۶۹
- شکل (۴-۱۸) نمودارهای الف) تنش مماسی (ب) تنش شعاعی (ج) تنش برشی بین شعاع‌های $R=a$ تا $R=5a$ و در زوایای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه در وضعیت موجود تنش‌ها در توده‌ی سنگی..... ۷۰
- شکل (۴-۱۹) نمودارهای الف) تنش مماسی (ب) تنش شعاعی (ج) تنش برشی در شعاع‌های مشخص و در زوایای صفر تا ۹۰ در دو وضعیت تنش موجود در توده‌ی سنگی..... ۷۱
- شکل (۴-۲۰) نمائی از ربع دایره‌ها در مختصات قطبی و ربع بیضی‌های نگاشتی مربوط به آنها در مختصات منحنی‌الخط..... ۷۲
- شکل (۴-۲۱) نمودار تنش مماسی در فواصل $a, 2a, 3a$ و $5a$ از مرکز تونل در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۴
- شکل (۴-۲۲) نمودار تنش شعاعی در فواصل $a, 2a, 3a$ و $5a$ از مرکز تونل بیضوی در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۵
- شکل (۴-۲۳) نمودار تنش برشی در فواصل $a, 2a, 3a$ و $5a$ از مرکز تونل در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۶
- شکل (۴-۲۴) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش مماسی در تونل بیضوی در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۷
- شکل (۴-۲۵) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش شعاعی در تونل بیضوی در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۸
- شکل (۴-۲۶) رسم نمودارهای هم‌تراز تنش برشی در تونل بیضوی در سه حالت الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۹
- شکل (۴-۲۷) تنش مماسی در تونل بیضوی در ξ های مختلف و در زوایای بین صفر تا ۹۰ درجه و در حالت-های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۷۹
- شکل (۴-۲۸) تنش شعاعی در تونل بیضوی در ξ های مختلف و در زوایای بین صفر تا ۹۰ درجه و در حالت-های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۸۰
- شکل (۴-۲۹) تنش برشی در تونل بیضوی در ξ های مختلف و در زوایای بین صفر تا ۹۰ درجه و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۸۰
- شکل (۴-۳۰) تنش مماسی در دیواره‌های تونل و در اطراف تونل‌های بیضوی در زوایای مختلف و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۸۱
- شکل (۴-۳۱) تنش شعاعی در دیواره‌های تونل و در اطراف تونل‌های بیضوی در زوایای مختلف و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۸۲
- شکل (۴-۳۲) تنش برشی در دیواره‌های تونل و در اطراف تونل‌های بیضوی در زوایای مختلف و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=8/4$ ۸۳

- شکل (۴-۳۳) تغییرات تنش مماسی در دیواره‌ی تونل در اثر تغییرات قطر تونل بیضوی و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۸۴
- شکل (۴-۳۴) تغییرات تنش مماسی اطراف تونل در اثر تغییرات قطر تونل بیضوی و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۸۴
- شکل (۴-۳۵) تغییرات تنش شعاعی اطراف تونل در اثر تغییرات قطر تونل بیضوی و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۸۵
- شکل (۴-۳۶) تغییرات تنش برشی اطراف تونل در اثر تغییرات قطر تونل بیضوی و در حالت‌های الف) تنش برجای قائم، ب) تنش برجای هیدرواستاتیک، ج) تنش برجای دو محوره با $K=۸/۴$ ۸۶
- شکل (۴-۳۷) تغییرات الف) تنش مماسی، ب) تنش شعاعی، ج) تنش برشی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برشی خالص ۸۷
- شکل (۴-۳۸) تغییرات الف) تنش مماسی، ب) تنش شعاعی، ج) تنش برشی در اطراف تونل بیضوی در حالت تنش برشی خالص ۸۸
- شکل (۴-۳۹) تغییرات الف) تنش مماسی، ب) تنش شعاعی، ج) تنش برشی در اطراف تونل بیضوی در زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ در حالت تنش برشی خالص ۸۹
- شکل (۴-۴۰) تغییرات الف) تنش مماسی، ب) تنش شعاعی، ج) تنش برشی در اطراف تونل بیضوی در دو حالت ذکر شده در حالت تنش برشی خالص ۹۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

تونل یک سازه‌ی زیرزمینی و مهم است که برای حمل و نقل، عبور آب و اهدافی نظیر عبور کابل‌های برق یا مخابراتی به کار برده می‌شود. با توسعه‌ی زیر ساخت‌ها، تونل‌ها در سراسر جهان در حال افزایش هستند و ضریب ایمنی و اقتصادی سازه‌های تونلی دارای اهمیت بیشتری می‌شود. همچنین تونل‌های زیرزمینی به صورت گسترده برای کاهش بارترافیکی، رفت و آمدها، معادن و مهندسی نظامی به کار گرفته می‌شود.

تونل‌سازی هم زمان با انقلاب صنعتی به ویژه به منظور حمل و نقل، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافت. تونل‌سازی به گسترش و پیشرفت کانال‌سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بسزایی داشت. کانال‌ها یکی از پایه‌های انقلاب صنعتی بوده‌اند و توانستند هزینه‌های حمل و نقل را به طور چشمگیری کاهش دهند. تونل مال پاس به طول ۱۵۷ متر بر روی کانال دومیدی در جنوب فرانسه اولین تونلی بود که در دوره‌های مدرن در سال ۱۶۸۱ ساخته شد. تونل ۵۲ کیلومتری کانال مانس که بندر ادوکاله فرانسه را به شهرک فولکستون انگلستان متصل می‌کند از زیر دریا و در کف آن کشیده شده است. هزینه‌ی ساخت آن ۶ میلیارد پوند یا بالغ بر ۱۰ میلیارد دلار برآورد شده است. این تونل در ۴۰ متری زیر دریا ساخته شده است و دارای دو خط رفت و برگشت برای قطارهای حمل اتومبیل و مسافر است. قطر هر کانال ۷/۲ متر و دارای لوله‌های تهویه‌ی هوا و کانال‌های امدادی است. عبور قطارها از تونل ۳۰ دقیقه طول می‌کشد و زمان سفر در این دو کشور ۳ ساعت کاهش یافته است. در حال حاضر طولی‌ترین تونل جهان در کوه‌های آلپ در سوئیس قرار دارد که پس از ۱۵ سال حفاری از سال ۲۰۱۷ آغاز به کار می‌کند و طول آن ۱۷ کیلومتر می‌باشد که با هزینه‌ی ۷ میلیارد دلار ساخته خواهد شد.

سال‌های طولانی است که متخصصان و کارگران ایرانی در صنعت تونل تلاش زیادی را انجام داده‌اند. به طوری که از چند هزار سال پیش تونل‌های موسوم به قنات محاسبه و حفر شده است که یکی دستاوردهای ایرانیان به شمار می‌رود. طول بعضی از سازه‌های زیرزمینی به ۷۰ کیلومتر می‌رسد. تعداد قنات‌های ایران بالغ بر ۵۰۰۰ رشته برآورد شده است قدیمی‌ترین قنات در دنیا که باستان‌شناسان ردیابی و کاوش کرده‌اند، ناحیه‌ای در شمال ایران است که قدمت آن به حدود سه هزار سال قبل یعنی دوره‌ی ورود آریایی‌ها می‌رسد.

۲-۱- طبقه بندی انواع تونل‌ها

۱-۲-۱- تونل‌های حمل و نقل

- تونل‌های راه آهن.
- تونل‌های راه.
- تونل‌های پیاده رو.
- تونل‌های ناوبری.
- تونل‌های مترو.

۱-۲-۲- تونل‌های صنعتی

- تونل‌های مربوط به نیروگاه‌های آبی.
- انتقال آب.
- استفاده‌ی همگانی و پناهگاه‌ها.
- طرح‌های نظامی.
- تونل‌های انبارهای نظامی.
- تونل‌های دفع زباله‌های اتمی.

۱-۲-۳- تونل‌های معدنی

- تونل‌های گشایش معدن.
- تونل‌های اکتشافی.
- تونل‌های استخراجی.
- تونل‌های خدماتی.
- تونل‌های زهکشی.

۳-۱- طراحی تونل‌ها

طراحی تونل‌ها و تحلیل فضاهاى زیرزمینی به ۳ روش انجام می‌پذیرد:

- ۱- روش تجربی.
- ۲- روش عددی.
- ۳- روش تحلیلی.

۱-۳-۱- روش تجربی

یک روش، روش تجربی است که منجر به تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی می‌شود. در مراحل مختلف تحلیل پایداری و طراحی تونل‌ها، استفاده از یک روش رده‌بندی توده‌های سنگی بسیار مناسب است. در ساده‌ترین حالت یک سیستم رده‌بندی را می‌توان به عنوان کنترل به کار برد و بر اساس آن دریافت که آیا تمام امکانات ضروری برای تحلیل و یا طراحی فراهم است یا خیر؟ باید توجه داشت که

به کارگیری یک روش رده‌بندی توده‌های سنگی را نمی‌توان و نباید جایگزین روش طراحی دقیق کرد. و تأکید یک روش رده‌بندی، در واقع ابزار اولیه‌ای برای طراحی دقیق‌تر به شمار می‌آید. واضح است که تحلیل دقیق پایدار مستلزم آگاهی دقیق از وضعیت تنش‌های مؤثر بر توده سنگ و خاک و نیز جزئیات شیوه‌ی حفر تونل است.

طرح رده‌بندی مهندسی سنگ، سابقه‌ی دیرینه‌ای دارد و به سال ۱۸۷۹ میلادی برمی‌گردد که در آن سال شخصی به نام ریتز^۱ اولین طبقه‌بندی را برای طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه داد. در ادامه اشخاص دیگری این رده‌بندی را کامل‌تر کردند که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

۱- رده‌بندی ترزاقی^۲ (۱۹۴۶)

۲- رده‌بندی بر مبنای زمان پا بر جایی لوفر^۳ (۱۹۵۸)

۳- رده‌بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ (RQD) که توسط دیپر و همکاران^۴ انجام گرفت. (۱۹۶۷)

۴- رده‌بندی ژئومکانیکی (RMR) که توسط بنیاوسکی^۵ انجام گرفت. (۱۹۷۶)

۵- رده‌بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل‌سازی Q بارتون و همکاران^۶ (۱۹۷۴)

۱-۳-۲- روش عددی

یکی دیگر از روش‌های محاسبه تنش‌های اطراف تونل‌ها استفاده از روش‌های عددی نظیر المان محدود، تفاضل محدود، المان‌های مرزی و ... می‌باشد. این روش نیز در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. به طور کلی روش‌های عددی در مکانیک سنگ و مهندسی تونل جایگاه ویژه‌ای دارند. به علت پیچیدگی‌های خاص موجود در مهندسی تونل و به طور کلی در مکانیک سنگ، استفاده از روش‌های عددی ابزاری بسیار قدرتمند برای تحلیل و طراحی سیستم‌های مهندسی از جمله تونل فراهم کرده است که با استفاده از روش‌های معمول مبتنی بر راه‌حل‌های تحلیلی غیر ممکن و یا بسیار دشوار می‌باشد. این امر به علت عوامل مختلفی مانند تعریف مشکل شرایط مرزی با استفاده از توابع ریاضی و ناهمگنی در ناحیه‌ی مسئله مورد مطالعه می‌باشد. در همه‌ی این موارد با استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر کامپیوتر، راه‌حل‌های تقریبی قابل استخراج می‌باشد. به طور کلی روش‌های عددی برای حل مسائل با مقادیر مرزی، می‌تواند به دو قسمت طبقه‌بندی شود:

- روش‌های دیفرانسیلی
- روش‌های انتگرالی

^۱ Ritter

^۲ Terzaghi

^۳ Luffer

^۴ Deere et al.

^۵ Benyowsky

^۶ Barton et al

در روش‌های دیفرانسیلی، ناحیه مسأله مورد نظر به یک سری عناصر ریزتر و یا به المان‌هایی تجزیه می‌شود و مجموعه‌ی این عناصر فرعی، رفتار کلی توده ی سنگ را بیان می‌کند. در این روش باید تقریب‌های فیزیکی یا ریاضی مرزبندی شده صورت پذیرد. مانند:

- روش کلاسیک عناصر محدود (finite element).
- روش تفاضل محدود (finite difference).
- روش عناصر مجزا (distinct element).

در روش‌های انتگرالی تنها مرزهای مسأله تعریف و تجزیه می‌شوند. روش‌های انتگرالی به طور مؤثر یک مرتبه از بعد مسأله را کاهش می‌دهند. زیرا فقط مرز مسأله تعریف و تجزیه می‌شود. این کاهش مرتبه باعث می‌شود تا اندازه سیستم معادلاتی که باید حل شود کاهش پیدا کند و به این ترتیب کارآمدی محاسباتی در این روش‌ها نسبت به روش‌های دیفرانسیلی مشخص می‌شود. به این ترتیب روش‌های انتگرالی برای مسائل سه بعدی که چالش بزرگی در مهندسی تونل محسوب می‌شوند مفید خواهد بود. روش‌های انتگرالی شرایط مرزی را به درستی مدل می‌کند. این روش‌ها برای مصالح همگن و رفتار خطی مصالح بسیار مناسب هستند. مانند:

روش عناصر مرزی (boundary element).

۱-۳-۳- روش تحلیلی

دسترسی و استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری نظیر المان محدود، تفاضل محدود، المان‌های مرزی و... باعث شده است که آنالیز این مسایل آسان شود. فایده‌است و کارنزا-تورس^۱ به طور واضح تغییر شکل حفاری‌های زیرزمینی را در مقالاتشان بررسی کردند و نشان دادند که اگر چه بسیاری از مسائل طراحی ژئوتکنیکی با استفاده از مدل‌های عددی بهتر از روش‌های تحلیلی حل می‌شوند اما از حل طبیعی عمومی (مانند تأثیر متغیرهای پیچیده) که می‌تواند از حل کلاسیکی بدست آید نباید چشم پوشی شود. عموماً در فرمول‌سازی یک آنالیز طراحی به بعضی درجات ساده‌سازی احتیاج است. بنابراین یک مهندس طراح بایستی قادر به شناسایی درستی عمومی یک آنالیز عددی باشد. روش تحلیلی خود شامل روش‌های مختلفی از جمله روش توابع پتانسیل و توابع پتانسیل مختلط می‌باشد. در روش توابع پتانسیل یک تابع تنش ایری در نظر گرفته و با استفاده از تابع پتانسیل U ، معادلات تنش و شرایط مرزی، تنش‌های اطراف تونل را بدست می‌آوریم. در روش توابع پتانسیل مختلط با استفاده از نگاشت همدیس برای مقطع تونل و همچنین دو تابع پتانسیل φ و χ و با استفاده از روابطی که در آینده به اثبات آن پرداخته می‌شود، تنش‌های اطراف تونل بدست می‌آید.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

ارائه‌ی یک روش تحلیلی برای بررسی درستی یا نادرستی دیگر روش‌ها مناسب می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یک روش تحلیلی به بررسی تنش‌های اطراف تونل‌های دایروی و بیضوی پرداخته می‌شود.

^۱ Carranza-Tores and Fairhurst

با بدست آمدن تنش‌های اطراف این نوع تونل‌ها می‌توان آن‌را با تنش‌های بدست آمده از دیگر روش‌ها مقایسه کرد و درصد خطای آن‌ها را بدست آورد.

۱-۵- اهداف تحقیق

در این تحقیق به بررسی تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی تحت تنش‌های برجا در سه حالت تنش‌های قائم، هیدرواستاتیک و دو محوره، همچنین تحت تنش‌های برشی پرداخته شده است و در نهایت معادلات برای محاسبه‌ی این تنش‌ها ارائه می‌شود. از اهداف این مطالعه عبارتند از:

- ۱- ارائه‌ی روابط ریاضی به شکل ساده و قابل فهم.
- ۲- تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی تحت تنش‌های برجا به روش استیونسون
- ۳- تاثیر تغییرات قطر تونل بر تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی
- ۴- تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی تحت تنش‌های برجا به روش جدید (موشخیلیویلی)
- ۵- مقایسه‌ی دو روش استیونسون و موشخیلیویلی در تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی
- ۶- ارائه‌ی دو تابع پتانسیل مختلط برای بدست آوردن تنش‌های اطراف تونل‌های بیضوی تحت میدان برشی
- ۷- بدست آوردن تنش‌های اطراف تونل بیضوی تحت این دو تابع پتانسیل و ارائه‌ی نتایج حاصله در قالب نمودارهای گرافیکی

۱-۶- روش انجام تحقیق

در این تحقیق با استفاده از روش توابع پتانسیل مختلط و نگاشت هم‌مدیس سعی شده معادلات Γ و Γ' را بدست آورده. سپس با استفاده از آنها توابع f و \bar{f} و در نهایت دو تابع پتانسیل مختلط برای بدست آوردن تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی در حالت کلی ارائه گردد. سپس با استفاده از معادلات انواع تنش‌ها به رسم نتایج در قالب نمودارهای گرافیکی پرداخته می‌شود. در ضمن نمودارهای گرافیکی تنش‌ها بر اساس تمرکز تنش می‌باشند. منظور از تمرکز تنش، مقادیر تنش در هر نقطه به تنش قائم در بینهایت می‌باشد.

۱-۷- شرح مختصر به فصول پایان‌نامه

در ادامه شرح مختصری از عناوین فصول و محتوای هر کدام ارائه می‌شود.

فصل اول: این فصل به بیان مقدمه و کلیات تحقیق می‌پردازد. در این فصل نخست تاریخچه‌ی تونل و صنعت تونل در جهان و ایران و طبقه بندی انواع تونل‌ها بررسی شده است. سپس روش‌های طراحی تونل و اهداف مطالعه ارائه شده است.

فصل دوم: در این فصل مروری بر تحقیقات پیشین که بر تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی تمرکز داشته‌اند پرداخته شده است.

فصل سوم: مبانی روش آنالیزی استفاده شده در تحقیق توضیح داده شده است. ابتدا به توضیح روش طراحی تحلیلی به دو روش توابع پتانسیل و توابع پتانسیل مختلط پرداخته شده است. سپس به تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی تحت تنش‌های برجا به روش توابع پتانسیل مختلط پرداخته شده است. سپس به تحلیل تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی تحت میدان برشی به روش توابع پتانسیل مختلط پرداخته شده است.

فصل چهارم: در این فصل به بررسی نتایج بدست آمده از هر کدام از تنش‌های اطراف تونل‌های دایره‌ای و بیضوی تحت دو میدان تنش برجا و برشی با استفاده از روابطی که در فصل سوم بدست آمده پرداخته می‌شود.

فصل پنجم: به بررسی موانع و محدودیت‌های موجود در این تحقیق و نیز فرصت‌های مطالعاتی آتی در این زمینه پرداخته می‌شود.

فصل دوم

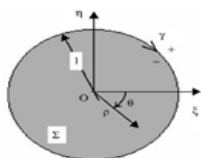
مروری بر مطالعات انجام شده

۱-۲- مقدمه

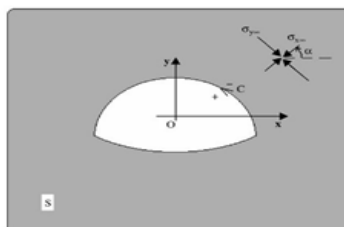
مرحله‌ی اصلی طراحی تونل‌ها محاسبه‌ی تنش‌های اطراف آنها می‌باشد. از دیرباز تا کنون محققان زیادی درصدد محاسبه‌ی تنش‌های اطراف انواع تونل‌ها می‌باشند. با توجه به موضوع این تحقیق، مروری بر مطالعاتی که در این زمینه انجام گرفته به طور خلاصه بازگو می‌شود.

۲-۲- تاریخچه تحقیقات پیشین

کریس^۱ در سال ۱۸۹۸ آنالیز تحلیلی تونل بدون آستر در عمق زیاد را برای تونل‌های دایره‌ای مجرد (تکی) پیشنهاد داد. [۱۶] او برای تونل‌های دایره‌ای نتایج بدیهی را از روی فرمول‌های بدست آمده ارائه داد که در آینده به اثبات آنها پرداخته می‌شود. این روش، روش حل بسته به صورت حقیقی می‌باشد. اکساداکلیوس^۲ در سال ۲۰۰۲ نشان داد که در تونل‌هایی با مقطع شبه دایره‌ای که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، فرمول‌سازی پتانسیل مختلط با نداشت ارائه شده می‌تواند برای تونل با یک محور تقارن با کشش‌های سطحی به صورت موفقیت‌آمیزی استفاده شود. این روش با استفاده از نرم افزار Flac2D برای تونل‌های شبه دایره‌ای نشان می‌دهد که به غیر از نواحی گوشه و کف‌ها، در سایر موارد هر دو مدل تحلیلی و عددی دارای نتایج یکسانی هستند. [۱۲]



(ب)



(الف)

شکل ۱-۲ (الف) دیاگرام تونل و سیستم مختصات آن (ب) تونل دایره‌ای واحد و سیستم مختصات آن [۱۲]

^۱ Kirsch

^۲ Exadaklylos

توزیع تنش‌های مماسی در مرز تونل‌های شبه دایره‌ای به وسیله‌ی روش آنالیزی مذکور با مدل عددی Flac2D و با حل دایره‌ای کریس برای دو وضعیت تنش، مقایسه شده است. در این روش تنش فشاری منفی می‌باشد.

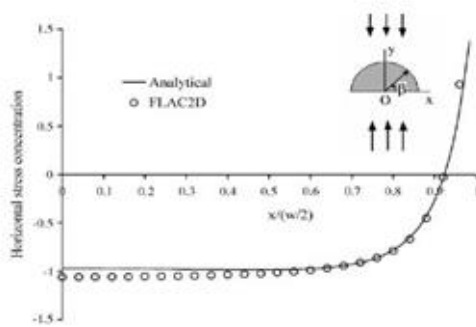
$$\sigma_{x\infty} = 0, \sigma_{y\infty} = -1MPa$$

مورد ۱

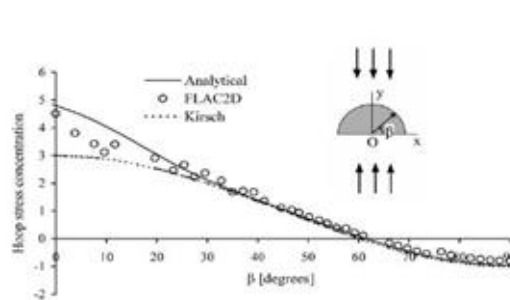
$$\sigma_{x\infty} = -1, \sigma_{y\infty} = -1MPa$$

مورد ۲

از شکل ۲-۲ الف و جدول ۱-۲ می‌توان دریافت که بین روش‌های عددی و تحلیلی در این تونل‌ها برای مورد بارگذاری ۱ تفاوت وجود دارد. بنابراین در این مدل تحلیلی فاکتور تمرکز تنش مماسی در مورد بارگذاری ۱، در زاویه‌ی ۹۰ درجه برابر ۰/۹۶ محاسبه می‌گردد، در حالی که در مدل عددی و حل دایره‌ای کریس مقدار ۰/۸ و ۱ بدست آمده است.



(ب)



(الف)

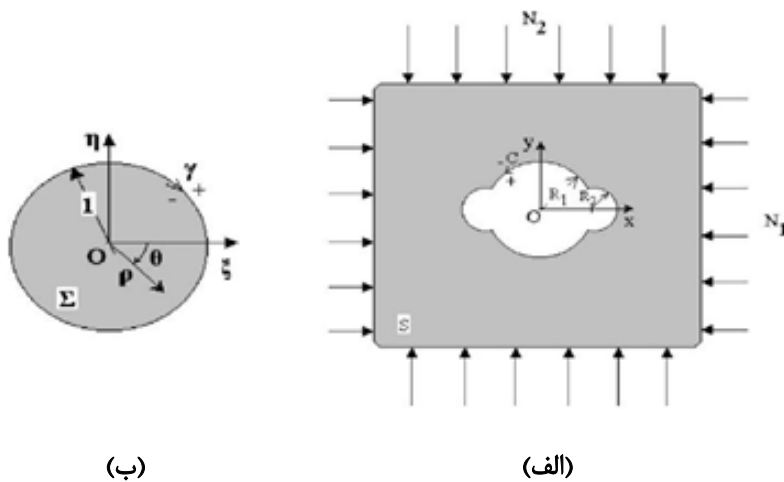
شکل ۲-۲ الف) تمرکز تنش مماسی در مرز تونل شبه دایره‌ای ب) تمرکز تنش افقی در امتداد کف تونل (مورد ۱) [۱۲]

جدول ۱-۲ مقایسه‌ی تنش مماسی با روش کریس، عددی و تحلیلی [۱۲]

Position	Stress state	Kirsch's solution	Analytical model	FLAC ^{2D}	Relative error (%)
Crown ($\beta = 90^\circ$)	Case I	1	0.96	0.80	16.6
	Case II	-2	-1.50	-1.55	3.3
Invert ($x = 0$)	Case I	—	0.97	1.06	9.3
	Case II	—	-0.43	-0.33	23.2

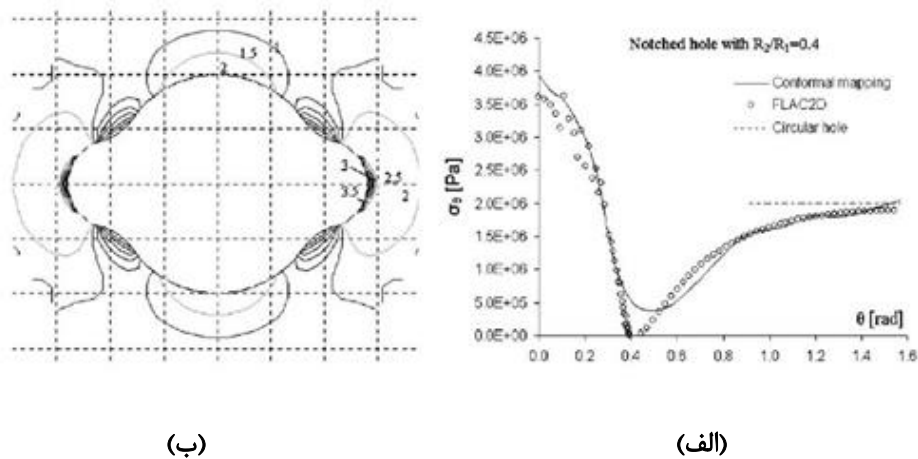
اکسداد کلیوس^۱ در سال ۲۰۰۳، حالت خاصی از تونل‌های دومحوری متقارن را در معرض فشار هیدرواستاتیک ۱ مگاپاسکال مطابق شکل ۲-۳ مورد مطالعه قرار داد. [۱۱]

^۱ Exadaklylos



شکل ۳-۲ الف) تونل متقارن تحت میدان تنش همسان و سیستم مختصات آن ب) دیسک با شعاع واحد و سیستم مختصات آن [۱۱]

توزیع تنش مماسی اطراف این تونل در شکل ۲-۴-الف نشان داده شده است. باید توجه کرد که تنش فشاری در این تحقیق مثبت در نظر گرفته شده است. هم چنین شکل ۲-۴-ب تنش مماسی اطراف تونل که به روش تحلیلی محاسبه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲ الف) مقایسه‌ی تنش‌های مماسی در امتداد حفره‌ی دوپل متقارن ب) تنش‌های مماسی هم تنش محاسبه شده به وسیله‌ی حل تحلیلی [۱۱]

روش‌های موجود برای سازه‌های مستطیلی تقریبی بوده و بر اساس فرضیاتی هستند که نحوه‌ی انتقال تنش‌ها از زمین به سازه را به خوبی منعکس نمی‌کنند. یک روش آنالیزی جدید توسط هو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است که بعضی از نواقص روش‌های آنالیزی قبلی را می‌پوشاند. روش جدید بر اساس تئوری متغیر مختلط و نگاهت همدیس می‌باشد. روش جدید بر فرضیات زیر استوار است.

۱- عمق سازه‌ی زیرزمینی

^۱ Huo et al.

۲- شرایط کرنش صفحه‌ای در هر مقطع عمودی

۳- توده‌ی سنگ دارای جهت ایزوتروپ و همگن باشد

۴- بین سازه و محیط توده‌ی سنگ ارتباط الاستیک برقرار باشد

پس از شبیه‌سازی‌های عددی، هو و همکارانش ثابت کردند که توزیع تنش نرمال و برشی سطح برخورد کاملاً مستقل از ابعاد سازه و شرایط الاستیک زمین و سازه هستند. [۱۳]

لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای تونل‌های دایره‌ای با آستر تحت تنش‌های برج‌ها که جزئیات آن در شکل ۲-۵ نشان داده شده با استفاده از تئوری توابع پتانسیل مختلط به فرمول‌های ۱-۲ دست یافتند. پارامترهای موجود در روابط ۱-۲ هر کدام از روابط مربوط به خود بدست می‌آیند که در تحقیق

ذکر شده موجود می‌باشند. [۲۰]

$$\sigma_{r_2} = 2W_0 + r^{-2}R_0 - \left[4r^{-2}(\operatorname{Re}V_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Re}R_2) + \operatorname{Re}Q_0 \right] \sqrt{2} \quad (الف-۱-۲)$$

$$\times \cos 2\theta - \left[4r^{-2}(\operatorname{Im}V_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Im}R_2) - \operatorname{Im}Q_0 \right] \times \sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta_2} = 2W_0 - r^{-2}R_0 + \left[12r^2(\operatorname{Re}W_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Re}R_2) + \operatorname{Re}Q_0 \right] \quad (ب-۱-۲)$$

$$\times \cos 2\theta - \left[12r^2(\operatorname{Im}W_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Im}R_2) + \operatorname{Im}Q_0 \right] \times \sin 2\theta$$

$$\sigma_{r_1} = 2k_0 + r^{-2}H_0 - \left[4r^{-2}(\operatorname{Re}F_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Re}H_2) + \operatorname{Re}L_0 \right] \quad (ج-۱-۲)$$

$$\times \cos 2\theta - \left[4r^{-2}(\operatorname{Im}F_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Im}H_2) - \operatorname{Im}L_0 \right] \times \sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta_1} = 2K_0 - r^{-2}H_0 + \left[(\operatorname{Re}L_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Re}H_2) \right] \quad (د-۱-۲)$$

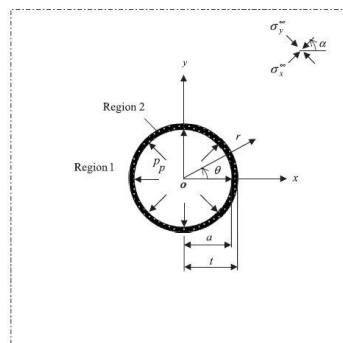
$$\times \cos 2\theta - \left[(\operatorname{Im}L_0) + 3r^{-4}(\operatorname{Im}H_2) \right] \times \sin 2\theta$$

$$\tau_{\theta_1} = [-2r^{-2}(\operatorname{Re}F_0) + 3r^{-4}(\operatorname{Re}H_2) + \operatorname{Re}L_0] \sin 2\theta \quad (ه-۱-۲)$$

$$+ [2r^{-2}(\operatorname{Im}F_0) - 3r^{-4}(\operatorname{Im}H_2) + (\operatorname{Im}L_0)] \cos 2\theta$$

$$\tau_{\theta_2} = [6r^2(\operatorname{Re}W_2) - 2r^{-2}(\operatorname{Re}V_2) + 3r^{-4}(\operatorname{Re}R_2) + \operatorname{Re}Q_0] \sin 2\theta \quad (و-۱-۲)$$

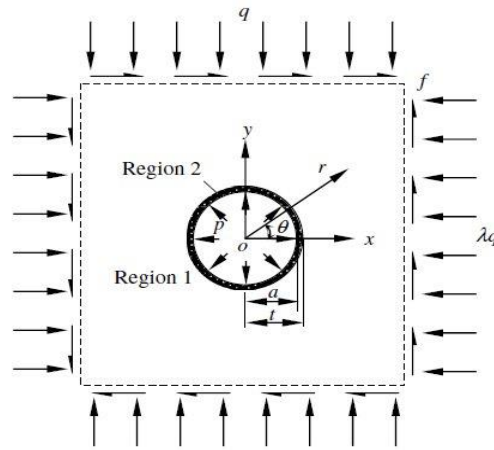
$$+ [6r^2(\operatorname{Im}W_2) + 2r^{-2}(\operatorname{Im}V_2) - 3r^{-4}(\operatorname{Im}R_2) + \operatorname{Im}Q_0] \cos 2\theta$$



شکل ۲-۵ تونل دایره‌ای با آستر تحت فشار یکنواخت و تنش‌های برج [۲۰]

^۱ Li et al.

این محققان با استفاده از روابط ذکر شده ، تاثیر صلبیت نسبی و ضخامت آستر روی میدان تنش و تغییرات تنش در محیط برای نسبت‌های مختلف پارامترها در قالب نمودارهایی نشان داده شده است. لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از تئوری پتانسیل مختلط در تونل‌های دایره‌ای با آستر تحت تنش‌های برجا و برشی که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است یک روش کرنش صفحه‌ای الاستیک برای تنش‌های اطراف تونل در یک محیط ایزوتروپ و تحت بارهای یکنواخت زمین و فشار وسیله‌ی نگهداری ارائه کرده‌اند. با در نظر گرفتن پیوستگی تنش در امتداد مرز، توابع پتانسیل مختلط به ترتیب در آستر و توده‌ی سنگ بدست می‌آیند. حساسیت آنالیزها نشان می‌دهد که اگر ضخامت نسبی آستر خیلی بالا باشد، تنش‌های کششی در توده سنگ و سطح مشترک بین آستر و سنگ اتفاق می‌افتد. به علاوه تفاوت‌های تنش در توده سنگ شدیداً به صلبیت و ضخامت نسبی آستر و نسبت بین فاصله نقاط تحت بررسی از محور تونل و شعاع خارجی آستر در مقادیر بین ۱ تا ۲ بستگی دارد. صلبیت و ضخامت نسبی آستر خیلی کم یا زیاد، برای پایداری سازه نامساعد هستند. [۲۱]



شکل ۲-۶ ناحیه‌ی مستطیلی تحت بررسی [۲۱]

لو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از توابع پتانسیل مختلط روابط ۲-۲ را بدست آوردند: [۵]

$$\sigma_{r_2} = 2f_1 + g_1 r^{-2} + (-4e_1 r^{-2} + 3g_3 r^{-4} - h_1) \cos 2\theta \quad (الف-۲-۲)$$

$$\sigma_{\theta_2} = 2f_1 - g_1 r^{-2} + (12f_3 r^2 - 3g_3 r^{-4} + h_1) \cos 2\theta \quad (ب-۲-۲)$$

$$\tau_{r\theta_2} = (6f_3 r^2 - 2e_1 r^{-2} + 3g_3 r^{-4} + h_1) \sin 2\theta \quad (ج-۲-۲)$$

$$\sigma_{r_1} = -(1+\lambda)p/2 + \left[(1+\lambda)pR_1^2/2 + d_1 \right] / r^2 + \left\{ (1-\lambda)p/2 - 2 \left[(1-\lambda)pR_1^2 + 2c_1 \right] / r^2 + \left[3(1-\lambda)pR_1^4/2 + 3d_3 \right] / r^4 \right\} \cos 2\theta \quad (د-۲-۲)$$

$$\sigma_{\theta_1} = -(1+\lambda)p/2 - \left[(1+\lambda)pR_1^2/2 + d_1 \right] / r^2 - \left\{ (1-\lambda)p/2 + \left[3(1-\lambda)pR_1^4/2 + 3d_3 \right] / r^4 \right\} \cos 2\theta \quad (ه-۲-۲)$$

^۱ Li et al.

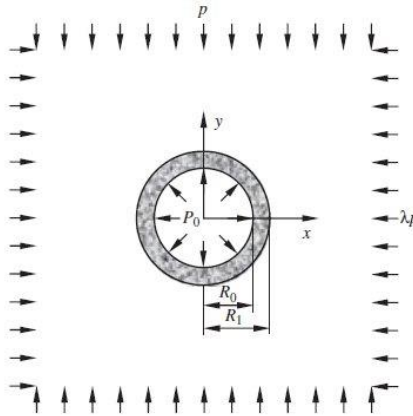
^۲ Lu et al.

$$\tau_{r\theta 1} = -(1+\lambda)p/2 + [(1-\lambda)pR_1^2 + 2c_1]/r^2 - [3(1-\lambda)pR_1^4/2 + 3d_3]/r^4 \sin 2\theta \quad (۲-۲-۵)$$

پارامترهای موجود در روابط فوق هر کدام از روابط مربوط به خود بدست می‌آیند که در تحقیق مذکور موجود می‌باشند. در این نمونه پارامترهایی که در شکل ۲-۷ نشان داده شده‌اند به صورت زیر فرض شده‌اند:

$$\mu_1 = \mu_2 = 0.25, p_0 = 2 \text{ MPa}, p = 4 \text{ MPa}, \lambda = 1/3, R_0 = 2.5 \text{ m}, R_1 = 3 \text{ m} \quad (۲-۳)$$

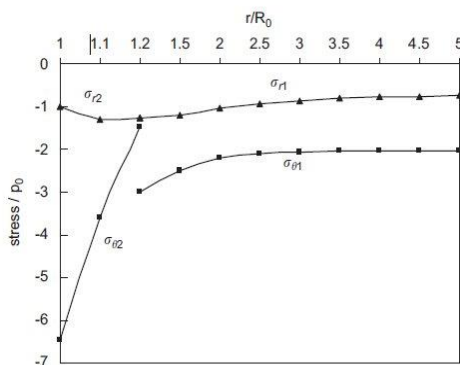
که μ در این تحقیق ضریب پواسون می‌باشد.



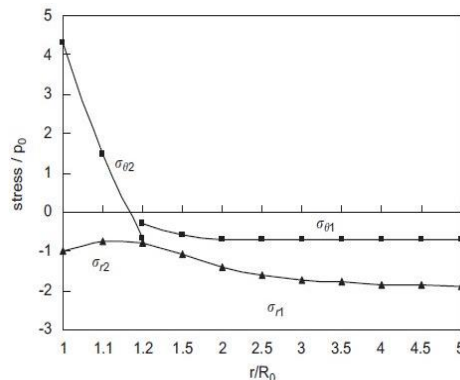
شکل ۲-۷ تونل دایره‌ای با آستر تحت فشار یکنواخت و تنش‌های برجا [۵]

تغییرات تنش نسبت به فاصله شعاعی از مرکز تونل (r/R) در آستر و اطراف توده‌ی سنگ در امتداد زوایای صفر و ۹۰ درجه با نسبت مدول الاستیسیته آستر به توده‌ی سنگ ۱۰ و ۰/۱ ($E_2/E_1=0.1$ و $E_2/E_1=10$) توسط آی زنگ لو و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است. از معادلات مربوط به تنش برشی در آستر و اطراف توده سنگ می‌توان مشاهده کرد در امتداد زوایای صفر و ۹۰ درجه، آن برابر صفر می‌باشد.

تغییرات تنش مماسی و شعاعی در آستر و در توده سنگ در امتداد زوایای صفر و ۹۰ درجه با نسبت مدول الاستیسیته آستر به توده‌ی سنگ ۱۰ و ۰/۱ در شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹ به ترتیب رسم شده‌اند.

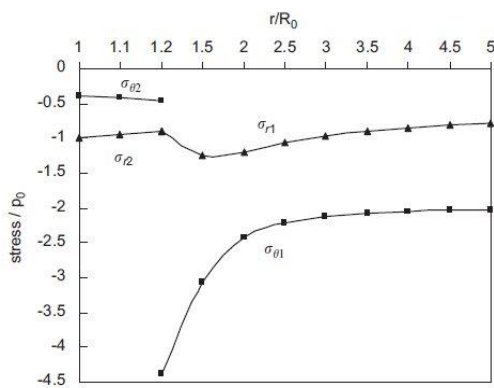


(ب)

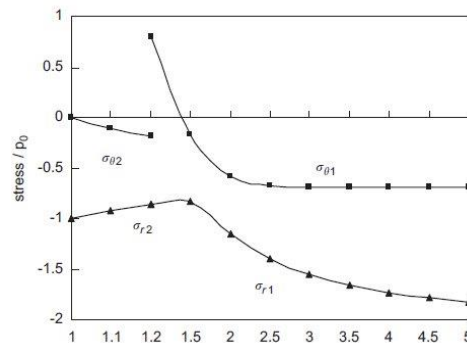


(الف)

شکل ۲-۸ توزیع تنش مماسی و شعاعی $\frac{E_2}{E_1} = 10$ (الف) $\theta = 90^\circ$. (ب) $\theta = 0^\circ$ [۵]



(ب)



(الف)

شکل ۲-۹ توزیع تنش مماسی و شعاعی $\frac{E_2}{E_1} = 0.1$ (الف) $\theta = 90^\circ$ (ب) $\theta = 0^\circ$ [۵]

در شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹ می‌توان مشاهده کرد که در سطح مشترک آستر و توده سنگ، تنش شعاعی همیشه پیوسته و تنش مماسی ناپیوسته است.

در شکل‌های ۲-۸ می‌توان نتیجه گرفت وقتی نسبت مدول الاستیسیته آستر به توده‌ی سنگ ۱۰ باشد ($E_2/E_1 = 10$)، در مرز داخلی آستر، تنش مماسی در امتداد زاویه‌ی صفر درجه از نوع فشاری و در امتداد زاویه‌ی ۹۰ درجه ابتدا کششی و بعد به مقدار کمی فشاری می‌باشد. مقادیر تنش مماسی در آستر بیشتر از مقادیر تنش مماسی در اطراف توده‌ی سنگ است.

از شکل‌های ۲-۹ نیز می‌توان نتیجه گرفت که در محیط توده‌ی سنگ، وقتی نسبت مدول الاستیسیته آستر به توده‌ی سنگ ۰/۱ باشد ($E_2/E_1 = 0.1$) است، تنش مماسی در امتداد زاویه‌ی صفر درجه از نوع فشاری و در امتداد زاویه‌ی ۹۰ درجه ابتدا کششی و بعد فشاری است. مقادیر آن‌ها نیز از مقادیر تنش مماسی در آستر بیشتر است.

نوآموز در سال ۱۳۸۲ برای بررسی میدان تنش تونل‌های دایره‌ای، خروجی برنامه‌ی فرترن روش تحلیلی را با برنامه‌ی *PLAXIS* مقایسه کرده است. اما از آنجا که نرم افزار *PLAXIS* قابلیت رسم خطوط هم تراز را ندارد، خروجی میدان تنش دو برنامه به نرم افزار *surfer* منتقل شد. وی در بررسی نتایج خروجی در دو حالت تونل کم عمق و تونل با عمق زیاد دریافت که خروجی برنامه‌ها شباهت‌های زیادی به هم دارند که این صحت تنش‌های بدست آمده توسط برنامه را تاکید می‌کند. البته عدم تطابق کامل نتایج به سبب اشکالاتی در درون‌یابی برنامه *surfer* است. در شکل‌های ۲-۱۰ و ۲-۱۱ نتایج خروجی در حالت تونل کم عمق مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت عمق مرکز تونل از سطح آزاد ۱۰ متر است که در نتیجه تونل را باید کم عمق در نظر گرفت. [۴]