

تعیین ضریب اطمینان برای طراحی سیستم نگه‌دارنده موقت تونل‌ها با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد

فرنوش باسلیقه^{۱*}؛ علی کیهانی^۲

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۳/۳۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.7188.1341

چکیده	واژگان کلیدی
<p>پس از حفر تونل به روش سنتی، برای نگهداری موقت، از سیستم‌های نگه‌دارنده مختلفی استفاده می‌شود. یکی از این سیستم‌ها، استفاده از قاب فلزی به همراه شاتکریت است. یکی از روش‌های جدید در زمینه طراحی سازه‌های نگه‌دارنده موقت تونل، روش مقطع معادل است. در این روش ضریب اطمینان برای طراحان پیشنهاد نشده است. با توجه به لزوم داشتن ضریب اطمینان مناسب، در این تحقیق روشی مبتنی بر اطلاعات آماری برای تعیین آن ارائه شده است. به این منظور، با توجه به اطلاعات آماری موجود از متغیرهای تصادفی ضخامت شاتکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی از یکدیگر در پروژه‌های واقعی، نسبت به تعیین توابع توزیع مناسب برای این متغیرها اقدام گردید. این کار با استفاده از سه روش متداول آزمون‌های نیکویی برازش، انجام و تابع توزیع مناسب برای این متغیرهای تصادفی تعیین شد. بر اساس پارامترهای توابع توزیع به‌دست‌آمده، نسبت به شبیه‌سازی و تولید نمونه‌های متعدد از این متغیرهای تصادفی اقدام شد. این مقادیر برای سه حالت سازه اجراشده، روش طراحی تجربی و روش طراحی مقطع معادل به دست آمد و بر اساس آنالیز مونت‌کارلو، تحلیل قابلیت اعتماد چنین سازه‌ای انجام گردید. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این موضوع است که باید اثر خطای ساخت در ضریب اطمینان لحاظ شود. برای روش مقطع معادل نشان داده شد که در این روش، برای رسیدن به احتمال معینی از خرابی، باید از چه ضریب اطمینانی استفاده کرد.</p>	<p>نگه‌دارنده موقت تونل تحلیل قابلیت اعتماد مقطع معادل تابع چگالی احتمال آنالیز مونت‌کارلو ضریب اطمینان</p>

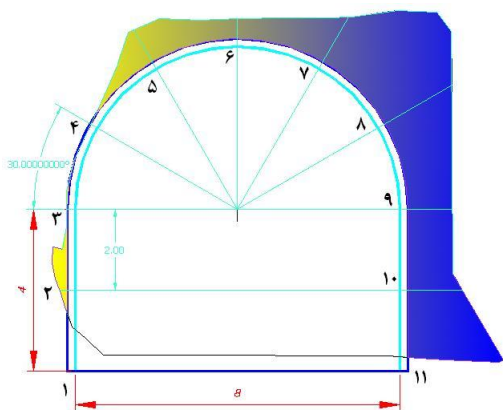
۱- پیشگفتار

خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط آب‌های زیرزمینی، وضعیت درزه و شکاف و ... است که بسته به موارد ذکرشده، نوع سیستم نگه‌دارنده و زمان نصب تعیین می‌شود. از اجزای سیستم‌های نگهداری موقت برای زمین‌های سست، می‌توان به قاب فلزی به همراه شاتکریت اشاره کرد. قاب‌های متداول در نگهداری موقت تونل‌ها، عمدتاً از پروفیل‌های *IPE* یا ناودانی و ... انتخاب می‌شوند و این انتخاب، به شرایط باربری سیستم بستگی دارد. روش دیگر متداول در نگهداری موقت، استفاده از تیر خرپایی به همراه شاتکریت است

یکی از مهم‌ترین مسائل در اجرای حفاری سنتی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، ارائه روشی به‌منظور نگهداری موقت تونل در حین اجراست تا بتواند حاشیه اطمینان مناسبی را برای ادامه پیشروی در حفاری تضمین کند (*Basaligheh, 2003*) و (*Basaligheh, 2006*). در کلیه این روش‌ها عامل تأثیرگذار در سرعت حفاری، استفاده از یک روش مناسب، اقتصادی و سریع برای اجرای نگهداری اولیه (موقت) تونل است. از عوامل تأثیرگذار بر زمان اجرای نگهداری،

* نویسنده مسئول - شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ پردیس مهندسی و فن‌اوریهای نوین دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده عمران؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳۳۰۰۲۵۹؛ داورنگار: ۰۲۳۳۰۰۲۵۹؛ رایانامه:

پیشنهاد شده است که از متداول‌ترین آنها می‌توان به روش تجربی و روش مقطع معادل اشاره کرد. روش مقطع معادل در مرجع (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009) به‌طور مفصل توضیح داده شده است.



شکل ۱- نقاط مختلف انتخابی بر روی تونل با ابعاد ۸*۸ متری برای مشخص کردن ضخامت شاتکریت

در روش تجربی با توجه به طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ، توده‌سنگ بر اساس شاخص‌های مدنظر هر روش طبقه‌بندی‌شده و علاوه بر تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، پیشنهادهایی برای سیستم نگهداری و همچنین بارسنگ وارد بر آن ارائه شده است. در این تحقیق بنا بر اهمیت و نقش گسترده‌ای که طبقه‌بندی توده‌سنگ در طراحی سازه نگه‌دارنده موقت تونل‌ها دارد از روش‌های RMR ، Q ، RQD و RSR استفاده شده است. برای رعایت اختصار از بررسی جزئیات ۴ روش ذکرشده در بالا صرف‌نظر شده است و خواننده می‌تواند به مرجع (Basaligheh, 2016) مراجعه نماید. با توجه به شرایط مشاهده‌شده از وضعیت توده‌سنگ محل و با تلفیق نتایج روش‌های مختلف تجربی و قضاوت مهندسی، سیستم نگه‌دارنده موقت پیشنهادی این تونل، شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر به همراه قاب‌های فولادی $IPE200$ با فواصل ۰/۸ و ۱ متر تعیین می‌شود.

در روش مقطع معادل که روش جدیدتری در زمینه طراحی سازه نگه‌دارنده موقت تونل است، مبانی طراحی به‌صورت زیر است:

رفتار لایه نگه‌دارنده موقت تونل که مقطع متشکل از دو ماده مختلف است (به‌عنوان مثال شاتکریت و مجموعه

(Basaligheh, (Basaligheh, & Keyhani, 2013 A) (Carranza-Torres & Keyhani, 2013 B) و (Deiderichs, 2009).

موضوع مطرح‌شده در این تحقیق، به دست آوردن ضریب اطمینان مناسب با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد نگهداری موقت تونل در حالت استفاده از قاب فلزی به همراه شاتکریت است و اهمیت آن در آنجاست که طراحی نگهداری موقت تونل‌ها، عمدتاً برای یک ضخامت مشخص شاتکریت و فواصل مشخص برای قاب‌های فلزی انجام می‌شود و طرح پیشنهادی ارائه می‌گردد (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009). درحالی‌که در عمل به هیچ وجه این مقادیر به دلایل نوع حفاری و خطاهای انسانی قابل اجرا نیستند؛ لذا لازم است با توجه به این موضوع، برای پروژه‌های واقعی، برداشت دقیقی از اجرای این مقادیر تهیه و سپس با استفاده از روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد، نسبت به قابل اعتماد بودن طراحی چنین سازه‌هایی اقدام شود (Nowak, 2000). برای رسیدن به این هدف، یکی از پروژه‌های احداث‌شده در کشور انتخاب شد. ابتدا با برداشت‌های دقیق نقشه‌برداری، نسبت به میزان اجرای ضخامت شاتکریت در نقاط مختلف یک مقطع در طول مسیر مبادرت شد و سپس از فواصل پروفیل‌های فولادی اجراشده در طول مسیر تونل نیز اندازه‌گیری‌ها انجام شد و با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش نسبت به تخمین توابع توزیع احتمال این مقادیر اقدام گردید. مقطع مورد مطالعه در این تحقیق در شکل ۱، آورده شده است.

با داشتن توابع توزیع این متغیرهای تصادفی می‌توان مبادرت به تولید مقادیر شبیه‌سازی برای ضخامت شاتکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی نمود؛ سپس با استفاده از آنالیز مونت‌کارلو تحلیل قابلیت اعتماد این سازه در سه حالت سازه اجراشده، سازه طرح‌شده بر اساس روش تجربی و سازه طرح‌شده بر اساس روش مقطع معادل، انجام شده و در نهایت احتمال خرابی و همچنین ضرایب اطمینان مناسب طرح با توجه به احتمال خرابی به دست آمده است (Basaligheh, 2016).

۲- روش‌های طراحی سازه نگه‌دارنده موقت تونل

روش‌های متعددی برای طراحی سازه نگه‌دارنده موقت تونل

و برای همین مقطع در حالت کرنش صفحه‌ای رابطه (۲) برقرار است:

$$D = \frac{EA}{1-\nu^2} \quad (۲)$$

برای شرایط تنش صفحه‌ای رابطه (۳) برقرار است:

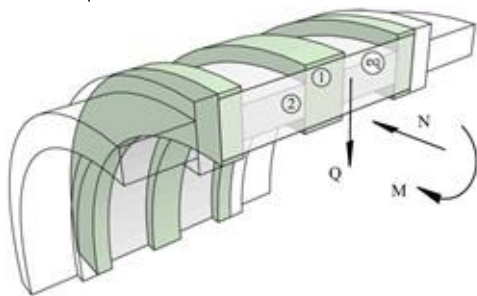
$$K = EI \quad (۳)$$

و برای مقطع در حالت کرنش صفحه‌ای رابطه (۴) برقرار است:

$$K = \frac{EI}{1-\nu^2} \quad (۴)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسیته، A مساحت سطح مقطع، I ممان اینرسی مقطع و ν ضریب پواسون ماده است. مقطع مرکب در شکل ۳، می‌تواند به عنوان مقطع معادل با عرض b و ضخامت t_{eq} (همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است)، در نظر گرفته شود. در این شکل، N و M در مقطع معادل eq عمل می‌کنند که ضرایب سختی Deq و Keq هستند. ضخامت t_{eq} با توجه به ضرایب D_1 ، D_2 و K_1 ، K_2 از دو ماده مختلف به شرح زیر به دست آورده می‌شود:

$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (۵)$$

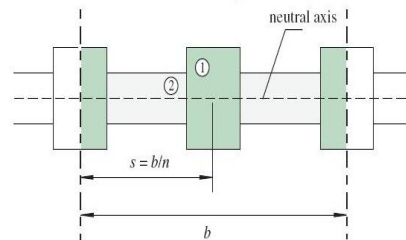


شکل ۳- مجموع لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی ارائه‌شده در مقطع معادل نشان داده‌شده در شکل ۲ (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009)

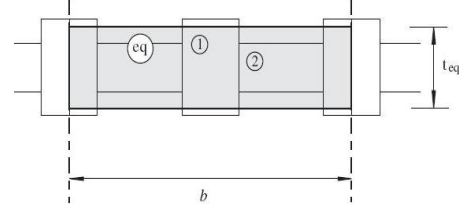
برای مقطع معادل که توسط ضریب فشار و انعطاف‌پذیری به ترتیب Deq و Keq و ضخامت مقطع معادل t_{eq} تعریف‌شده توسط معادله (۵) است، مدول یانگ معادل E_{eq} سازگار با خواص Deq و Keq به شکل زیر نتیجه خواهد شد (برای جزئیات بیشتر به مرجع Carranza-Torres & Deiderichs, 2009 مراجعه شود)

پروفیل‌های فولادی) بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته‌ها و رفتار تیرهای منحنی به شکل ۲ خواهد بود (برای اثبات این موضوع به ضمیمه A مرجع Carranza-Torres & Deiderichs, 2009 مراجعه شود).

شکل ۲، نشان‌دهنده ترکیب دو ماده مختلف برای استفاده از این روش است. این مقطع نشان‌دهنده لایه نگه‌دارنده به عرض b ، شامل n واحد از ماده '۱' (به‌عنوان مثال مجموعه پروفیل‌های فولادی) و n واحد از ماده '۲' (به‌عنوان مثال شاتریت) است. توجه داشته باشید که n واحد از هر یک از مواد در امتداد عرض b وجود دارد. این بیان، هم‌ارز این است که هر یک از واحدها با فاصله $s=b/n$ از یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر یک از واحدهای '۱' و '۲' با تعاریفی برای ضرایب فشار به ترتیب D_1 و D_2 و ضرایب انعطاف‌پذیری به ترتیب K_1 و K_2 نشان داده شده‌اند. در به دست آوردن روابط مقطع معادل از فرض تقارن نسبت به محور افقی مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است.



الف) نمایش شماتیک یک مقطع عرضی از لایه نگه‌دارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲



ب) مقطع معادل برای لایه مرکب (کامپوزیتی) شکل ۲- مقطع عرضی لایه نگه‌دارنده (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009)

پارامترهای ضرایب فشار D و انعطاف‌پذیری K به شکل زیر تعریف می‌شوند:

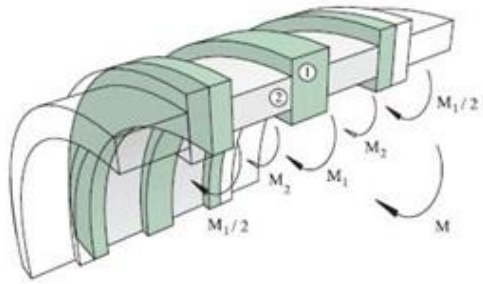
برای شرایط تنش صفحه‌ای رابطه (۱) برقرار است:

$$D = EA \quad (۱)$$

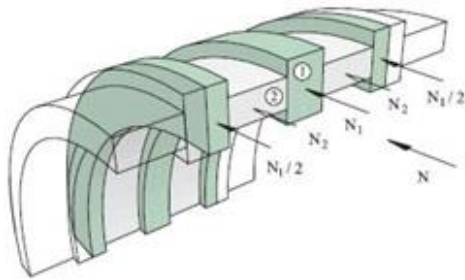
نیروی محوری N توزیع‌شده بین واحدهای '۱' و '۲' برای حالت پوسته ضخیم به شکل زیر خواهد بود:

$$N_1 = \frac{N}{n} \frac{D_1}{(D_1 + D_2)} + \frac{M}{nR} \frac{D_2 K_1 - D_1 K_2}{(D_1 + D_2)(K_1 + K_2)} \quad (12)$$

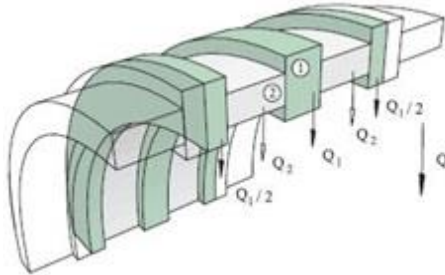
$$N_2 = \frac{N}{n} \frac{D_2}{(D_1 + D_2)} + \frac{M}{nR} \frac{D_2 K_1 - D_1 K_2}{(D_1 + D_2)(K_1 + K_2)} \quad (13)$$



الف) توزیع لنگرهای خمشی



ب) توزیع نیروهای محوری



پ) توزیع نیروهای برشی

شکل ۴- توزیع لنگرهای خمشی، نیروهای محوری و نیروهای برشی در لایه کامپوزیتی نشان داده‌شده در شکل ۲ (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009)

و برای حالت پوسته نازک به شکل زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$N_1 = \frac{N}{n} \frac{D_1}{(D_1 + D_2)} \quad (14)$$

$$E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{bt_{eq}} \quad (6)$$

به دلیل استفاده از دو ماده مجموعه پروفیل‌های فولادی و شاتکریت به ترتیب به‌عنوان ماده ۱ و ۲ می‌توان رابطه زیر را برای در نظر گرفتن وزن معادل در نرم‌افزار به کار برد (Basaligheh & Keyhani, 2013 B)

$$w_{eq} = \frac{A_1 w_s}{st_2} + \left(1 - \frac{A_1}{st_2}\right) w_c \quad (7)$$

در این روابط A_1 سطح مقطع یک پروفیل فولادی، w_s و w_c به ترتیب وزن مخصوص فولاد و بتن است. مقادیر s و t_2 به ترتیب فواصل پروفیل‌های فولادی از یکدیگر و ضخامت شاتکریت اجراشده است.

با توجه به ضخامت‌های متغیر شاتکریت، مقادیر وزن معادل بین ۲۴۰۰ تا ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به دست می‌آید که با توجه به محدوده تغییرات کم، در جهت اطمینان برای کلیه حالات میزان ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

نتایج تحلیل به شکل ملاحظه شده در شکل ۳ دارای نتایج مجموع لنگر خمشی M ، نیروی محوری N و نیروی برشی Q برای مقطع معادل با ضخامت t_{eq} و مدول بانگ E_{eq} خواهد بود. بعد از آن که مقادیر لنگر خمشی، نیروی محوری و برشی بر روی مقطع معادل تعیین شدند، مجموع لنگر خمشی M ، نیروی محوری N و نیروی برشی Q توزیع‌شده بر روی هر یک از مواد تشکیل‌دهنده این مقطع مرکب به شکل ۴، خواهد شد.

لنگر خمشی M توزیع‌شده بین واحدهای '۱' و '۲'، برای فرمولاسیون پوسته ضخیم و نازک، به شرح زیر است (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009):

$$M_1 = \frac{MK_1}{n(K_1 + K_2)} \quad (8)$$

$$M_2 = \frac{MK_2}{n(K_1 + K_2)} \quad (9)$$

به‌طور مشابه نیروی برشی Q توزیع‌شده بر روی هر دو پوسته ضخیم و نازک با فرمولاسیون زیر خواهد بود:

$$Q_1 = \frac{QK_1}{n(K_1 + K_2)} \quad (10)$$

$$Q_2 = \frac{QK_2}{n(K_1 + K_2)} \quad (11)$$

۳-۱- تخمین تابع توزیع احتمال ضخامت شاتکریت

در بسیاری از مواقع پس از حفاری تونل‌ها، نیاز به پوشش سریع احساس می‌شود که معمولاً از شاتکریت برای این کار استفاده می‌شود. با توجه به سرعت اجرا و غیریکنواختی حفاری انجام‌شده در نقاط مختلف، ضخامت شاتکریت یکسان نیست و می‌تواند به عنوان یک متغیر تصادفی به حساب آید.

در این تحقیق به منظور تعیین تابع توزیع این متغیر تصادفی، یکی از پروژه‌های اجراشده در ایران انتخاب شده است. حفاری این تونل در سنگ آندزیتی با مقطع نعل اسبی و به ابعاد نشان داده‌شده در شکل ۱ انجام شده و در ۹ نقطه از ۱۱ نقطه مشخص‌شده بر روی این تونل، مقادیر ضخامت شاتکریت توسط نقشه‌برداری دقیق اندازه‌گیری شده است. این مقادیر در طول تونل و در ۴۲ موقعیت متوالی در جدولی در مرجع (Basaligheh, 2016) آورده شده است. سپس تابع توزیع احتمال این متغیر، توسط برنامه Easy Fit 5.5 از سه روش ذکرشده در بالا انجام شده است. بعد از بررسی ۶۵ توزیع ارائه‌شده در این نرم‌افزار، تنها توابع توزیعی که بر اطلاعات مسئله برازش می‌شدند، شامل ۱۵ توزیع بود که اسامی این توابع توزیع به همراه مقادیر آماره و رتبه هر یک از سه روش نیکویی برازش در جداول مربوطه در مراجع (Basaligheh & Keyhani, 2017 A) و (Basaligheh, 2016) آورده شده است. از هر سه روش آزمون‌های نیکویی برازش تابع توزیع Generalized Extreme Value بهترین تابع توزیع برازش شده، به دست آمده است.

مقادیر متوسط ضخامت شاتکریت در ۹ نقطه از ۱۱ نقطه مشخص‌شده بر روی این تونل (طبق شکل ۱)، در جدول ۱ آورده شده است. عموماً مقادیر متوسط این نقاط خیلی بیشتر از مقدار ضخامت توصیه‌شده طراحی از روش تجربی است (Basaligheh & Keyhani, 2017 A)

۳-۲- تخمین تابع توزیع احتمال فواصل قاب‌های فولادی

در بسیاری از مواقع اگر شدت بارهایی که از زمین به نگهداری موقت منتقل می‌شود، به اندازه‌ای بزرگ باشد که مانع از استفاده شاتکریت به‌تنهایی شود، از پروفیل‌های فولادی برای کمک به نگهداری موقت تونل‌ها استفاده

$$N_2 = \frac{N}{n} \frac{D_2}{(D_1 + D_2)} \quad (15)$$

در نتیجه طراحی از این روش برای فواصل پروفیل‌های فولادی ۸۰ سانتی‌متر از یکدیگر، ضخامت شاتکریت ۲۳/۴۵ سانتی‌متر به دست آمده که این ضخامت حداقل ضخامت در بحرانی‌ترین نقطه مقطع، برای جوابگویی مسئله است.

۳- تخمین توابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی سازه نگه‌دارنده موقت تونل

بر اساس نحوه اجرای پروژه که مربوط به طراحی بر اساس روش تجربی بود، مبادرت به تخمین تابع توزیع متغیرهای تصادفی سازه نگه‌دارنده موقت تونل‌ها شد. تا کنون تحقیقات اندکی بر روی برخی از توابع توزیع انتخاب‌شده با واقعیت‌های موجود، صورت پذیرفته است. از جمله این موارد می‌توان به تخمین توابع توزیع مناسب برای ضخامت پوشش شاتکریت و همچنین فواصل پروفیل‌های فولادی در نگهداری موقت تونل‌ها اشاره کرد که تاکنون در این زمینه کاری انجام نشده است. در این تحقیق، سعی شده با توجه به اطلاعات آماری موجود حاصل از برداشت‌های یک پروژه در حال ساخت در ایران، توابع توزیع مناسب برای ضخامت پوشش شاتکریت و همچنین فواصل پروفیل‌های فولادی در نگهداری موقت تونل‌ها پیشنهاد شود. به منظور تعیین توابع توزیع این متغیرها، از سه روش معمول آزمون‌های نیکویی برازش، برای ارزیابی و تعیین بهترین توابع توزیع استفاده شده است که این سه روش معمولاً در برنامه‌های رایانه‌ای نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سه روش عبارت‌اند از:

- آزمون کای اسکوتر

- آزمون کولموگروف - اسمیرنوف

- آزمون اندرسون - دارلینگ

هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند و نمی‌توان به راحتی یکی را رد یا قبول کرد؛ بنابراین در این تحقیق از هر سه روش برای تعیین مناسب‌ترین تابع چگالی استفاده شده است و با امتیاز دادن به هر یک از این روش‌ها و معدل‌گیری بین آنها، نتیجه مطلوب قابل دستیابی خواهد بود (Milford, 1987)، (Sanchildrian, 2014) و (Ghamishoon & Malekian, 2011).

قبل، در این قسمت نسبت به تحلیل قابلیت اعتماد سازه نگه‌دارنده موقت تونل بر سه مبنای سازه اجراشده، طرح بر اساس روش تجربی و طرح بر اساس مقطع معادل اقدام شده و سپس با استفاده از روش طراحی بر اساس مقطع معادل نسبت به دست آوردن ضریب اطمینان قابل قبول برای این روش جدید اقدام شده است.

۴-۱- تولید متغیرهای تصادفی ضخامت

شاتکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی

بر این اساس تولید متغیرهای تصادفی ضخامت شاتکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی در سه حالت زیر انجام پذیرفت:

- بر اساس سازه اجراشده

طبق جدول ۱، ملاحظه می‌شود که مقادیر میانگین اجراشده، در کلیه نقاط این مقطع عرضی بیشتر از مقدار پیش‌بینی بوده است. لذا این روش اجرا، مبنای تولید اطلاعات در دو حالت بعدی قرار گرفته است.

- بر اساس اجرای متوسط ۲۰ سانتی‌متری ضخامت شاتکریت طرح تجربی در کلیه نقاط مقطع

در این قسمت با توجه به فرض داشتن مقدار متوسط ضخامت اجراشده ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت و مقادیر واریانس و چولگی حالت اجراشده، اقدام برای به دست آوردن پارامترهای توزیع ضخامت شاتکریت در حالت جدید گردید. بدین منظور و بر اساس معادلات ارائه‌شده برای مقادیر میانگین، واریانس و چولگی تابع توزیع *GEV*، (طبق معادلات مربوط به این توزیع) اقدام به حل دستگاه سه معادله غیرخطی ناشی از این قضیه گردید که این کار توسط بخش *fsolve* برنامه *MATLAB* انجام پذیرفت. علت انتخاب دو مشخصه واریانس و چولگی، علاوه بر مقدار میانگین، بدین جهت بود که بر اساس روش اجرا، عموماً واریانس و چولگی را می‌توان ثابت فرض کرد؛ بنابراین با تغییر مقدار میانگین می‌توان نتایج مختلفی را با توجه به روش اجرا به دست آورد. همچنین برای پوشش دادن به کلیه خواص آماری داده‌ها لازم بود که از هر گشتاور اول، دوم و سوم نمونه‌ای انتخاب شود که برای این کار، میانگین به عنوان گشتاور اول، واریانس به عنوان گشتاور دوم و چولگی به عنوان گشتاور سوم انتخاب شد.

- بر اساس اجرای متوسط ۲۳/۴۵ سانتی‌متری ضخامت شاتکریت طرح بر اساس مقطع معادل در کلیه نقاط

می‌شود. این پروفیل‌ها به دلیل اجرای سریع، در فواصل متغیری اجرا می‌شوند که این قضیه خود دلیلی برای در نظر گرفتن فواصل پروفیل‌های فولادی به عنوان متغیر تصادفی است.

در این تحقیق به منظور تعیین تابع توزیع این متغیر تصادفی، مقادیر متغیر تصادفی فواصل پروفیل‌ها در ۸۲ مقطع عرضی مختلف نشان داده شده در شکل ۱ اندازه‌گیری شده که این موقعیت‌های مکانی در جدولی در مرجع (*Basaligheh, 2016*) آورده شده است. سپس تابع توزیع احتمال این متغیر توسط برنامه *Easy Fit 5.5* از سه روش نیکویی برازش ذکرشده در بالا به دست آمده است. بعد از بررسی ۶۵ توزیع ارائه‌شده در این نرم‌افزار، تنها توابع توزیعی که بر اطلاعات مسئله برازش می‌شدند، شامل ۳۲ توزیع بود که اسامی این توابع توزیع به همراه مقادیر آماره و رتبه هر یک از سه روش نیکویی برازش در جداول مربوطه در مراجع (*Basaligheh & Keyhani, 2015*) و (*Basaligheh, 2016*) آورده شده است. از هر سه روش آزمون‌های نیکویی برازش تابع توزیع *Wakeby* بهترین تابع توزیع برازش شده، به دست آمده است.

جدول ۱- مقادیر میانگین اجراشده متغیر تصادفی ضخامت شاتکریت در نقاط نه‌گانه شکل ۱ بر حسب سانتی‌متر

موقعیت (نقاط)	میانگین ضخامت (cm)
۲	۳۱
۳	۴۱/۸
۴	۴۳/۳
۵	۴۵
۶	۴۰/۶
۷	۴۹/۲
۸	۴۶/۲
۹	۴۳/۲۵
۱۰	۴۷/۱

۴- تحلیل قابلیت اعتماد سازه نگه‌دارنده

موقت تونل مورد مطالعه

با توجه به مشخص شدن توابع توزیع متغیرهای تصادفی ضخامت شاتکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی در بخش

همچنین مدول الاستیسیته شاتکریت از رابطه *ACI318* به صورت رابطه (۱۷) پیشنهاد شده است. (*Mostofinejad, 2015*) لذا با توجه مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد شاتکریت که ۲۰ مگاپاسکال و همچنین وزن مخصوص شاتکریت که ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب اجرا شده و با ثابت فرض کردن این مقادیر در کلیه حالات مقدار مدول الاستیسیته شاتکریت 21354.62 مگاپاسکال به دست خواهد آمد.

$$E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f_c} = 21354.62 \text{ MPa} \quad (17)$$

حال با فرض روابط (۱۶) و (۱۷) و با توجه به روابط (۵) و (۶) اشاره شده در بند ۲، مقادیر ضخامت و مدول الاستیسیته معادل به ازای واحد طول تونل به دست آمده است؛ سپس بر اساس این مقادیر و با استفاده از بخش *Macro* نرم‌افزار *Excel*، برنامه‌ای برای تولید فایل ورودی *SAP2000* به صورت متنی و با پسوند *s2k* نوشته شد. در مرحله بعدی، تمامی این حالات توسط نرم‌افزار *SAP2000* تحلیل شد و نتایج خروجی به فایل نرم‌افزار *Excel* منتقل گردید. لازم به ذکر است که سایر اطلاعات مربوط به فایل ورودی، برای بار سنگ، مقادیر به دست آمده و توصیه شده در گزارش مکانیک سنگ اشاره شده در مراجع (*Basaligheh, 2016*) و (*Basaligheh & Keyhani, 2017 B*) است. همچنین برای شرایط تکیه‌گاهی بر اساس واقعیات اجرا، تکیه‌گاه‌ها مفصلی در پایین پایه‌ها فرض شده و برای سایر نقاط واقع بر جداره تونل، فنرهای وینکلر بر اساس شعاع تونل ۴ متر و مدول الاستیسیته سنگ ۲۵۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲۸ سنگ ارائه شده در گزارش مکانیک سنگ به دست آمده است.

یک نمونه هندسه مدل ساخته شده از فایل‌های *SAP2000* در شکل ۵ آورده شده است.

یک نمونه از در نظر گرفتن ۹ ضخامت مختلف در یک مقطع در شکل ۶ آمده است. نمونه بارهای وارده بر روی این مقطع، در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است.

۴-۳- تعریف تابع حالت حدی طراحی

نتایج به دست آمده از فایل‌های *SAP2000* مرحله قبل برای مقطع مرکب به ازای یک متر طول تونل است که پس از انتقال این مقادیر به فایل نرم‌افزار *Excel*، بر اساس فرمول‌های ارائه شده در بند ۲ می‌توان سهم مقادیر نیروی

مقطع حداقل ضخامت $23/45$ سانتی‌متری شاتکریت با توجه به ساخت مدل و جوابگویی از این روش قابل دسترس است. این کار با سعی و خطای حداقل ضخامت شاتکریت جوابگو، به دست آمده است. بدین صورت که با فرض رفتار خطی برای شاتکریت و فولاد و تعریف حد گسیختگی، این مقدار را می‌توان به دست آورد. بر این اساس با توجه به فرض داشتن مقدار متوسط ضخامت اجرا شده $23/45$ سانتی‌متر شاتکریت و مقادیر واریانس و چولگی حالت اجرا شده، برای به دست آوردن پارامترهای توزیع ضخامت شاتکریت حالت جدید اقدام شد. بدین منظور و بر اساس معادلات ارائه شده برای مقادیر میانگین، واریانس و چولگی تابع توزیع *GEV*، (طبق معادلات مربوط به این توزیع) اقدام به حل دستگاه سه معادله غیرخطی ناشی از این قضیه گردید که این کار مجدداً توسط بخش *fsolve* برنامه *MATLAB* انجام پذیرفت.

در کلیه حالات فوق با توجه به مقادیر پارامترهای به دست آمده دو تابع *Generalized Extreme Value* برای ضخامت‌های شاتکریت و *Wakeby* برای فواصل پروفیل‌های فولادی در مراجع (*Basaligheh & Keyhani, 2015*) و (*Basaligheh, 2016*) نسبت به تولید متغیرهای تصادفی به تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه از هر کدام برای هر یک از حالات اقدام شد.

۴-۲- ساخت مدل سازه‌ای، تحلیل و ارائه نتایج تحلیل

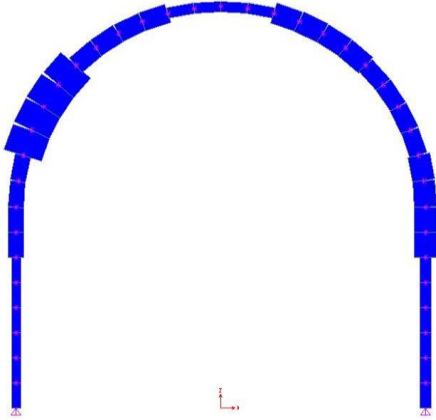
پس از تولید متغیرهای تصادفی ذکر شده، برای تحلیل مقطع نیازمند ضخامت و مدول الاستیسیته معادل برای هر حالت بود که این کار با استفاده از نرم‌افزار *Excel* *Microsoft office* و با استفاده از فرمول‌های ارائه شده در بند ۲ و با فرض کرنش صفحه‌ای برای هر حالت مقطع، ۹ ضخامت و مدول الاستیسیته معادل به دست آمده است. به دلیل طولانی بودن تونل در جهت عمود بر مقطع دوبعدی مدل شده در شکل ۵، فرض کرنش صفحه‌ای برای این مقطع، منطقی است (*Carranza-Torres & Deiderichs, 2009*). برای به دست آوردن مقادیر ضخامت و مدول الاستیسیته معادل، مدول الاستیسیته فولاد طبق پیش‌فرض برنامه‌های رایانه‌ای و با فرض فولاد *ST37* به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$E_s = 203890.19 \text{ MPa} \quad (16)$$

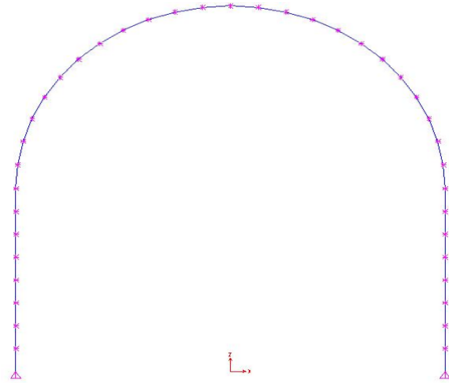
تعیین ضریب اطمینان برای طراحی سیستم نگه‌دارنده موقت تونل‌ها با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد: ص ۷۳-۸۷

خرابی را با فرض رفتار الاستیک برای فولاد و شاتکریت به صورت یک تابع خطی و به صورت دو دسته چهار معادله‌ای برای فولاد و شاتکریت به شکل زیر در نظر گرفت.

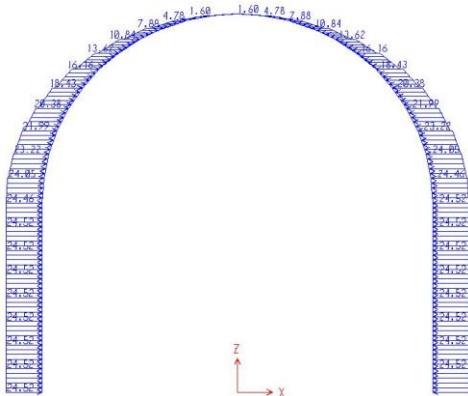
محوری و لنگر خمشی را به تفکیک برای شاتکریت و پروفیل فولادی به دست آورد. پس از انجام این کار با توجه به مرجع (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009)، می‌توان مرز



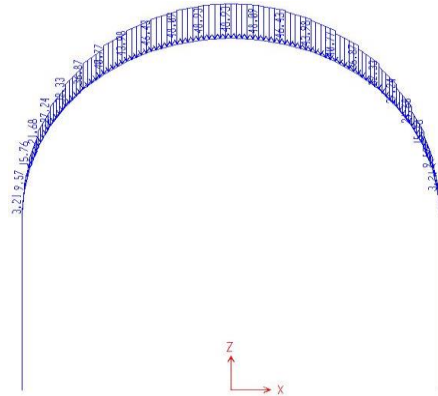
شکل ۶- یک نمونه از ضخامت‌های مدل شده برای سازه اجراشده (مقطع شماره ۵۰۲ تولیدشده روش اجراشده)



شکل ۵- یک نمونه از هندسه مدل فایل‌های SAP2000 ساخته شده



شکل ۸- بارسنگ افقی اعمالی بر روی کلیه مدل‌های سازه‌ای بر حسب کیلونیوتن بر مترمربع



شکل ۷- بارسنگ قائم اعمالی بر روی کلیه مدل‌های سازه‌ای بر حسب کیلونیوتن بر مترمربع

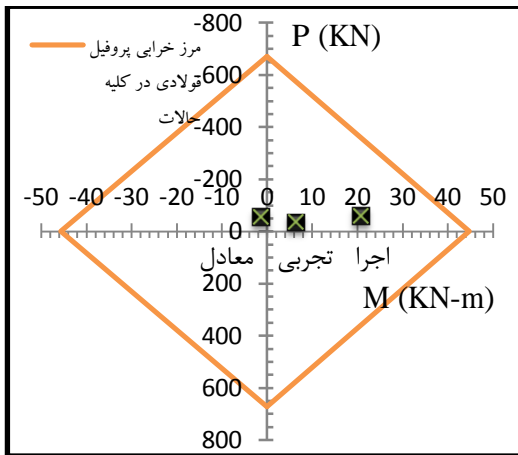
فرض شود. برای لنگر خمشی قراردادی نیز فرض بر این است که هرگاه خیز به سمت پایین (به سمت داخل تونل) باشد مثبت بوده و خلاف آن منفی در نظر گرفته شود. بر این اساس در خروجی برنامه SAP2000 برای نتایج تحلیل مقطع، نیروی محوری و برشی با همان علامت در نظر گرفته شده در برنامه خواهد بود و لنگر خمشی ناشی از

با توجه به جهت‌های مثبت قراردادی در استاتیک، جهت مثبت نیروی محوری و تنش کششی به صورت کششی مثبت فرض شده و نیروی برشی مثبت زمانی است که سمت چپ مقطع به سمت پایین و سمت راست مقطع به سمت بالا حرکت کند. در تونل چنین فرض شده که پایین مقطع به سمت داخل تونل و بالای مقطع، به سمت بیرون تونل

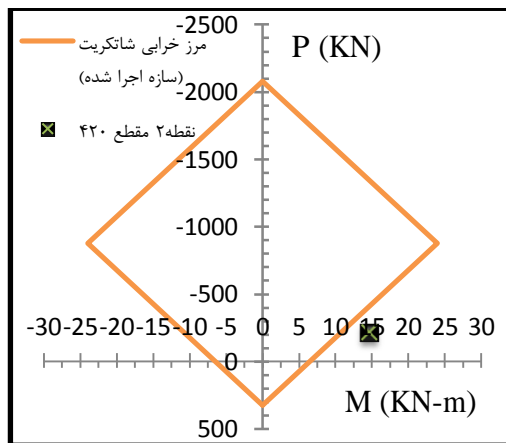
$$f_c = -20 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$f_t = 0.7\sqrt{f_c} = +3.13 \text{ MPa} \quad (23)$$

بر اساس جهت مثبت قراردادی، سه نمونه از منحنی‌های اندرکنش نیروی محوری، لنگر خمشی فولاد و شاتکریت در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ برای سه حالت سازه اجراشده، روش تجربی و روش مقطع معادل نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تغییر نیافتن مشخصات پروفیل‌های فولادی، مرز خرابی تعریف‌شده برای کلیه حالات ثابت خواهد ماند؛ بنابراین برای فولاد کلیه نقاط در یک منحنی و مطابق با شکل ۹ به نمایش در آمده است.



شکل ۹- منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی پروفیل فولادی برای سه نمونه از نتایج طراحی



شکل ۱۰- منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی شاتکریت برای یک نمونه از نتایج طراحی سازه اجراشده

خروجی برنامه SAP2000 بایستی در یک منفی ضرب شود. (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009).

روابط حالات حدی (مرز خرابی) برای فولاد به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} f_{yc} = \frac{N}{A_1} \pm \frac{M(h/2)}{I_1} \\ f_{yt} = \frac{N}{A_1} \pm \frac{M(h/2)}{I_1} \end{cases} \quad (18)$$

که در این روابط N معرف مقادیر نیروی محوری و مؤلفه قائم منحنی اندرکنش، M معرف مقادیر لنگر خمشی و مؤلفه افقی منحنی اندرکنش، h و A_1 و I_1 به ترتیب معرف ارتفاع، مساحت مقطع پروفیل و ممان اینرسی حول محور خمشی مقطع است که این مقادیر با توجه به استفاده از پروفیل IPE200 و از جداول اشتال یا پیش‌فرض‌های برنامه SAP2000 ثابت و قابل دسترس است. مقادیر f_{yc} و f_{yt} که معرف به ترتیب مقاومت فشاری و کششی فولاد است، بر اساس جهت مثبت قراردادی و با فرض فولاد ST37 به صورت زیر خواهد بود:

$$f_{yc} = -240 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$f_{yt} = +240 \text{ MPa} \quad (20)$$

روابط حالات حدی (مرز خرابی) برای شاتکریت به صورت زیر خواهد بود:

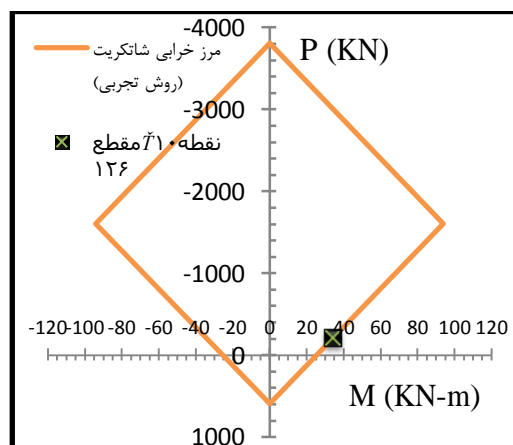
$$\begin{cases} f_c = \frac{N}{A_2} \pm \frac{M(t_2/2)}{I_2} \\ f_t = \frac{N}{A_2} \pm \frac{M(t_2/2)}{I_2} \end{cases} \quad (21)$$

در این روابط N معرف مقادیر نیروی محوری و مؤلفه قائم منحنی اندرکنش، M معرف مقادیر لنگر خمشی و مؤلفه افقی منحنی اندرکنش، t_2 و A_2 و I_2 به ترتیب معرف ضخامت، مساحت و ممان اینرسی حول محور خمشی یک واحد شاتکریت مقطع است. این مقادیر با توجه به تغییرات ایجادشده در هر مقطع و برای هر یک از نقاط ارائه‌شده در شکل ۱ بوده و عدد ثابتی نخواهد بود. مقادیر f_c و f_t به ترتیب معرف مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد و مقاومت کششی ناشی از خمش شاتکریت است؛ لذا بر اساس رابطه ارائه‌شده در (Mostofinejad, 2015) ACI318 و جهت مثبت قراردادی، مقادیر f_c و f_t به صورت زیر خواهند بود:

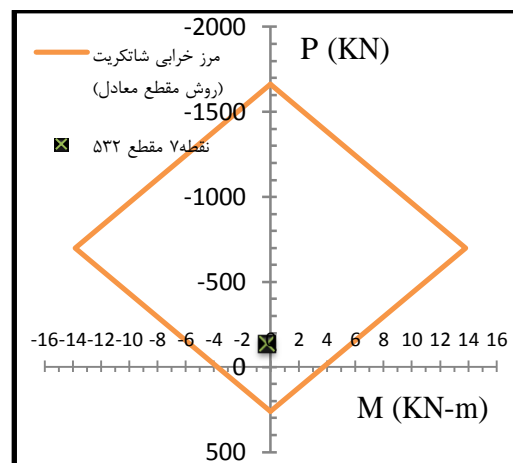
تابع g از تفاضل ظرفیت و نیاز تشکیل شده است؛ چنانچه مقادیر منفی داشته باشد به معنی خرابی و چنانچه مثبت شود به معنی امن بودن است (Nowak, 2000). این کار توسط برنامه نوشته‌شده *Interaction* در بخش *Macro* نرم‌افزار *Excel* انجام شده است. در این برنامه در صورتی که یکی از نقاط نه‌گانه ذکرشده بر روی مقطع چه برای فولاد و چه برای شاتکریت دچار گسیختگی شوند، فرض شده که کل مقطع گسیخته خواهد شد؛ بنابراین با شمارش این مقادیر می‌توان تعداد مقاطع گسیخته شده را به دست آورده و با تقسیم بر تعداد حالات کلی در نظر گرفته شده، احتمال خرابی را محاسبه کرد. ضریب قابلیت اعتماد نشانگر آن است که تا چه اندازه ابزار اندازه‌گیری ویژگی‌های باثبات آزمودنی یا ویژگی‌های متغیر و موقتی را می‌سنجد. لازم به ذکر است برای به دست آوردن مقادیر β از جداول احتمال نرمال ذکرشده در مرجع (Nowak, 2000) استفاده شده است.

ضریب تغییرات، یک معیار بهنجار است که برای اندازه‌گیری توزیع داده‌های آماری به کار می‌رود و از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به دست می‌آید. به عبارت دیگر ضریب تغییرات، میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. این مقدار زمانی تعریف شده است که میانگین صفر نباشد. با توجه به بی بعد بودن ضریب تغییرات، این مقدار مناسب مقایسه داده‌های آماری با واحدهای مختلف است. ضریب تغییرات تنها برای مقیاس‌های نسبی کاربرد دارد و نمی‌توان از آن برای سنجش مقادیری که می‌توانند منفی باشند استفاده کرد یا به بیان بهتر نمی‌توان برای سنجش مقادیر فاصله‌ای از آن بهره برد. خلاصه این محاسبات در جدول ۲ آورده شده است.

لازم به ذکر است که در احتمال خرابی کلیه حالات به دست آمده در جدول فوق، با توجه به شکل مقطع بیشترین خرابی‌ها متعلق به دیواره تونل است (۹۰ درصد به بالا). نکته جالب توجه در این جدول این است که در روش مقطع معادل توزیع ضخامت شاتکریت بر اساس حداقل ضخامت متوسط جوابگو به دست آمده است، ولی بر اساس توزیع انجام‌شده برای ضخامت شاتکریت میزان خرابی مقطع بالای ۵۰ درصد به دست آمده است. ولی باین حال میزان خرابی کمتر از روش قدیمی‌تر تجربی بوده است. همچنین سازه



شکل ۱۱- منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی شاتکریت برای یک نمونه از نتایج طراحی به روش تجربی



شکل ۱۲- منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی شاتکریت برای یک نمونه از نتایج طراحی به روش مقطع معادل

۵- به دست آوردن ضریب قابلیت اعتماد و احتمال خرابی

مرز خرابی (ظرفیت) نشان‌داده‌شده فولاد در شکل ۹ و شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ برای شاتکریت، معرف تابع ظرفیت یا همان تابع R و مقادیر به دست آمده از نتایج تحلیل توسط برنامه *SAP2000* معرف تابع نیاز یا همان تابع Q خواهد بود. حال اگر مقادیر تابع Q داخل محدوده ایجادشده توسط تابع R واقع شود، معرف ایمن بودن و اگر خارج از این محدوده واقع شود، معرف ناامن بودن و خرابی خواهد بود.

اجرا شده نیز که بر اساس جدول ۱ برای ضخامت‌های متوسط بالای ۳۱ سانتی‌متری برای کلیه نقاط اجرا شده، دارای ۳۱ درصد خرابی بوده است.

جدول ۲- مقادیر احتمال خرابی و ضریب قابلیت اعتماد سه حالت سازه اجرا شده، روش تجربی و روش مقطع معادل

حالت	تعداد نمونه تولید شده	ضریب قابلیت اعتماد	احتمال خرابی	ضریب تغییرات
	N	β	P_f	V
سازه اجرا شده	۱۰۰۰۰	۰/۵	۰/۳۱	۰/۰۴۷۲
روش تجربی	۱۰۰۰۰	-۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۰۱۸۷
روش مقطع معادل	۱۰۰۰۰	-۰/۱۶	۰/۵۶۶	۰/۰۲۷۷

۳۳/۵، ۳۵، ۳۶/۵ و ۳۹/۵ سانتی‌متری برای احتمال خرابی به ترتیب ۲۰، ۱۰، ۱ و ۰/۱ درصد، به دست آمد. بر اساس این ضخامت‌ها، با توجه به فرض داشتن مقدار متوسط ضخامت اجرا شده ۳۳/۵، ۳۵، ۳۶/۵ و ۳۹/۵ سانتی‌متر شاکریت و مقادیر واریانس و چولگی حالت اجرا شده، اقدام برای به دست آوردن پارامترهای توزیع ضخامت شاکریت در حالت جدید گردید. از نتایج حاصله، ضرایب اطمینان به دست آمده از این روش در جدول ۳ آورده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول فوق، ملاحظه می‌شود که برای احتمال خرابی‌های پایین، نیازی به استفاده از ضرایب اطمینان خیلی بالا نسبت به احتمال خرابی‌های بالا نیست و با توجه به موقت بودن این سازه، هیچ توصیه خاصی برای در نظر گرفتن احتمال خرابی مناسب در مراجع ذکر نشده است. لذا با توجه به تجربه نگارنده در زمینه سازه نگهدارنده تونل، به نظر می‌رسد که استفاده از احتمال خرابی یک در صد برای سازه موقت، عددی معقول بوده و می‌توان با توجه به نتایج جدول ۳ که بر اساس شرایط اجرای واقعی تونل در ایران به دست آمده است، توصیه نمود که در صورت استفاده از روش مقطع معادل برای طراحی سازه موقت نگهداری تونل، استفاده از ضریب اطمینان ۲/۹ برای روش مقطع معادل مناسب‌تر خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای اولین بار ضرایب اطمینان مناسب طراحی سازه نگهدارنده موقت تونل، بر مبنای روش مقطع معادل ارائه شده است. بدین منظور، ضخامت شاکریت و فواصل پروفیل‌های فولادی در نگهداری موقت تونل به عنوان

۶- به دست آوردن ضریب اطمینان با توجه به احتمال خرابی

در این مرحله به دلایل ذکر شده در بالا به این صورت تصمیم‌گیری شد که با فرض طراحی از روش جدید مقطع معادل و با فرض تابع حالت حدی تعریف شده، چه ضرایب اطمینانی با چه ریسکی برای طرح مناسب خواهد بود. بدین منظور، برای ۱۰۰۰۰ نمونه بر اساس احتمال خرابی به ترتیب ۲۰، ۱۰، ۱ و ۰/۱ درصد، ضرایب اطمینان طراحی نسبت به روش مقطع معادل به دست آمد. در تعیین ضریب اطمینان برای فولاد و شاکریت طبق مرجع (Carranza-Torres & Deiderichs, 2009) به ترتیب از روابط زیر استفاده شده است:

$$FS = \frac{f_{yc}}{\sigma_{max}} = \frac{f_{yt}}{\sigma_{min}} \quad (24)$$

که در این رابطه برای به دست آوردن σ_{min} و σ_{max} می‌توان از جایگزینی این مقادیر به جای f_{yc} و f_{yt} در رابطه (۱۸) استفاده کرد. در این رابطه دقت شود که مقادیر f_{yc} و f_{yt} طبق روابط (۱۹) و (۲۰) ثابت بوده و مقادیر σ_{min} و σ_{max} متغیر خواهند بود.

$$FS = \frac{f_{yc}}{\sigma_{max}} = \frac{f_{yt}}{\sigma_{min}} \quad (25)$$

که در این رابطه برای به دست آوردن σ_{min} و σ_{max} می‌توان از جایگزینی این مقادیر به جای f_c و f_t در رابطه (۲۱) استفاده کرد. در این رابطه دقت شود که مقادیر f_c و f_t طبق روابط (۲۲) و (۲۳) ثابت بوده و مقادیر σ_{min} و σ_{max} متغیر خواهند بود.

با استفاده از سعی و خطا ضخامت‌های شاکریت

- متغیرهای تصادفی مستقل از هم فرض شده و نسبت به بررسی تأثیر این عوامل بر روی رفتار این مقطع مرکب اقدام شد. تأثیر این عوامل با روش تجربی و مقطع معادل منجر به نتایجی گردید که در ذیل به آنها اشاره می‌شود:
- ۱- استفاده از متوسط اجرای شاتکریت (چه از روش تجربی و چه از روش مقطع معادل) قابل اعتماد نبوده و احتمال خرابی با توجه به این موضوع قابل ملاحظه است ولی چنانچه از جدول ۲ نیز قابل مشاهده است وضعیت خرابی از روش تجربی بدتر از وضعیت مقطع معادل بوده است.
 - ۲- در صورت استفاده از طراحی به روش مقطع معادل، با پذیرفتن ریسک احتمال خرابی ۲۰ درصد می‌توان از ضریب اطمینان ۲/۱۲ برای طراحی مقطع از روش مقطع معادل استفاده کرد.
 - ۳- در صورت استفاده از طراحی به روش مقطع معادل، با پذیرفتن ریسک احتمال خرابی ۱۰ درصد می‌توان از ضریب اطمینان ۲/۴۳ برای طراحی مقطع از روش
- مقطع معادل استفاده کرد.
- ۴- در صورت استفاده از طراحی به روش مقطع معادل، با پذیرفتن ریسک احتمال خرابی ۱ درصد می‌توان از ضریب اطمینان ۲/۸۸ برای طراحی مقطع از روش مقطع معادل استفاده کرد.
- ۵- در صورت استفاده از طراحی به روش مقطع معادل، با پذیرفتن ریسک احتمال خرابی ۰/۱ درصد می‌توان از ضریب اطمینان ۳/۲۵ برای طراحی مقطع از روش مقطع معادل استفاده کرد.
- ۶- با توجه به موقت بودن سازه نگه‌دارنده تونل و همچنین نبود توصیه خاص در مراجع و با توجه به تجربه نگارنده، به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲/۹ برای طراحی نگهداری موقت مقاطع تونل، مناسب‌تر خواهد بود.

۸- سیاهه نمادها

در جدول ۴ نمادهای استفاده شده در این پژوهش ارایه شده است.

جدول ۳- مقادیر ضرایب اطمینان به دست آمده برای چهار حالت ذکر شده در بالا

ضریب تغییرات	احتمال خرابی	ضریب قابلیت اعتماد	تعداد نمونه تولید شده	ضریب اطمینان طراحی نسبت به روش مقطع معادل
V	P_f	β	N	
۰/۰۲	۰/۲۰	۰/۸۴	۱۰۰۰۰	۲/۱۲
۰/۰۳	۰/۱۰	۱/۲۸	۱۰۰۰۰	۲/۴۳
۰/۰۹۹۵	۰/۰۱	۲/۳۳	۱۰۰۰۰	۲/۸۸
۰/۳۱۶۱	۰/۰۰۱	۳/۰۹	۱۰۰۰۰	۳/۲۵

جدول ۴- سیاهه نمادها

شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
مقاومت فشاری فولاد	N/m^2	f_{yc}	عرض لایه نگهداری موقت	m	b
مقاومت کششی فولاد	N/m^2	f_{yt}	تعداد واحد ماده‌های استفاده شده در نگهداری موقت مرکب در امتداد عرض	---	n
ضخامت شاتکریت	m	t_2	عرض معادل ماده استفاده شده در مقطع معادل	m	s
مساحت شاتکریت	m^2	A_2	ضرایب فشار	N	$D1, D2$
ممان اینرسی حول محور خمشی شاتکریت	m^4	I_2	ضرایب انعطاف‌پذیری	N/m^2	$K1, K2$
مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد شاتکریت	N/m^2	f_c	نیروی محوری	N	N
مقاومت کششی ناشی از خمش شاتکریت	N/m^2	f_t	لنگر خمشی	$N-m$	M
ضریب قابلیت اعتماد	---	β	ارتفاع پروفیل	m	h
احتمال خرابی	---	P_f	سطح مقطع پروفیل	m^2	$A1$
ضریب تغییرات	---	V	ممان اینرسی حول محور خمشی پروفیل	m^4	$I1$

۹- مراجع

- Anderson, T. (1952). *Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes*. *Ann. Math. Statist.*
- Anderson, T. (2010). *Anderson-Darling tests of goodness-of-fit*. Stanford University.
- Basaligheh, F. (2003). *The advantages of using lattice girder with shotcrete instead of steel sets for temporary support of tunnels*. *Proceeding of the Sixth International Conference on Civil Engineering* (pp. 265-270). Esfahan: Isfahan University of Technology.
- Basaligheh, F. (2006). *Evaluation of two methods for the temporary support of the tunnels from economic point of view*. *Journal of science and technology*, 11-17.
- Basaligheh, F. (2016). *Reliability Analysis of Steel Sets and Shotcrete Composite Support in Tunnels*. Shahrood: Ph.D. Thesis. Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology.
- Basaligheh, F., & Keyhani, A. (2013 A). *New approaches for modelling of two common methods of temporary support for tunnels*. *Proceedings of Tenth Iranian Tunnelling Conference*. Tehran: Iranian Tunnelling Association.
- Basaligheh, F., & Keyhani, A. (2013 B). *The advantages of using the method of "equivalent section" in design of shotcrete and steel sets for temporary support of tunnels*. *Proceedings of Seventh National Congress on Civil Engineering*. Zahedan: Shahid Nikbakht Faculty of Engineering.
- Basaligheh, F., & Keyhani, A. (2015). *Application of Tests of Goodness of Fit in Determining the Probability Density Function for Spacing of Steel Sets in Tunnel Support System*. *International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE)*, 187-203.
- Basaligheh, F., & Keyhani, A. (2017 A). *Distribution function of the random variable thickness of shotcrete in temporary support of tunnels*. *Iranian Journal of Rock Mechanics (IJRM)*, 55-67.
- Basaligheh, F., & Keyhani, A. (2017 B). *Reliability Analysis of Steel Sets and Shotcrete Composite Support in Tunnels*. *10th National Congress on Civil Engineering*. Tehran: Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- Carranza-Torres, C., & Deiderichs, M. (2009). *Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 506-532.
- Ghamishoon, R., & Malekian, A. (2011). *Determination of the most suitable statistical distribution functions for regional floods (Case study of southwest Kerman Province)*. *Proceedings of Sixth National Watershed Sciences and Engineering Conference and forth national congress on soil erosion and sediment*.
- Milford, R. (1987). *Annual maximum wind speeds from parent distribution functions*. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 163-178.
- Mostofinejad, D. (2015). *Reinforced Concrete Structures*. Esfahan: Arkan Danesh.
- Nowak, A. (2000). *Reliability of structures*. McGraw Hill.
- Sanchidrian, J. (2014). *Size distribution functions for rock fragments*. *International Journal of Rock*

تعیین ضریب اطمینان برای طراحی سیستم نگهدارنده موقت تونل‌ها با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد: ص ۷۳-۸۷

Mechanics & Mining Sciences. doi:10.1016/j.ijrmms.2014.08.007

Determination of Safety Factors for Design of Temporary Support System in Tunnels Using Reliability Analysis

F. Basaligheh¹; A. Keyhani²

1. Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology

2. Associate Professor; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology

Received: 19 June 2018; Accepted: 06 May 2019

DOI: 10.22044/TUSE.2019.7188.1341

Keywords

Tunnel
Temporary Support
Reliability
Shotcrete
Steel Sets
Monte Carlo Analysis
Safety Factor

Extended Abstract

Summary

In this paper, reliability analysis is achieved for composite supports consisting of steel sets and shotcrete in tunnels. Appropriate distribution functions for spacing between steel frames and shotcrete thicknesses in tunnels are obtained from the statistical data collected from a recent tunnel project in north of Iran. The distribution functions are then utilized for reliability analysis of the supports using Monte Carlo technique to simulate

shotcrete thickness and steel set intervals. The results indicates that effect of imperfections and deviations of shotcrete thickness should be considered in the determination of safety factor for design of temporary composite supports.

Introduction

Construction of tunnels has been increasing in recent years due to development of infrastructures such as highways, underground, railways and passive defense facilities. In order to excavate tunnels, both traditional drilling and blasting methods, as well as modern techniques such as TBMs (tunnel boring machines) might be used. After excavation, support systems need to be employed to make the tunnel stable. There are several approaches to support tunnels. Steel frames combined with shotcrete are usually utilized as primary support system in loose ground conditions that is the case studied in this research. Quick installations of steel frames and rough boundaries of the tunnel due to excavation circumstances lead to different shotcrete thicknesses and different spacings between steel sets. As a result, the thickness of shotcrete and spacing between steel sets can be considered as random variables. Therefore, in this paper, different failure probability is derived for different safety factors, which are used for design of steel sets and shotcrete composite support system.

Methodology and Approaches

For this study, different distribution functions have been utilized to fit the data. Each function is evaluated by three well known methods called Chi-squared, Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Darling methods. According to the results obtained from all the three methods, the generalized extreme value (GEV) distribution function is recommended for the thickness of shotcrete and the Wakeby distribution function is suggested for the spacing between the steel sets. The selected distribution functions are then utilized to simulate the thickness of shotcrete and the spacings between steel sets. The Monte Carlo technique is used to evaluate the possibility of failure for various circumstances of different shotcrete thicknesses and steel sets intervals.

Results and Conclusions

The results indicates that effect of deviations in shotcrete thickness should be considered to determine safety factor for design of composite sections of steel sets and shotcrete. Therefore, in this paper, safety factors are determined to reach several certain amounts of failure probabilities.
