نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۶۳ تا ۷۱

بررسی آزمایشگاهی و عددی مقاطع تونل دارای المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC) واقع در محیط‌های مچاله‌شونده

یاسر علیلو کسجینی[۱]؛ امیر بهرامی فر[۲]؛حسن افشین[۳*]؛ مهرداد امامی تبریزی[۴]؛
۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی سهند
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی سهند
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند
۴- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹؛ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱**

چکیده

به منظور بررسی دقیق رفتار واقعی تونل‌ها در اثر بارهای وارده در شرایط گوناگون محیطی، نیازمند ساخت نمونه‌هایی در مقیاس واقعی می‌باشیم ولی با توجه به اینکه ساخت و اعمال نیروها در مقیاس بزرگ مستلزم صرف هزینه بالایی می‌باشد و از طرفی در بعضی شرایط امکانات آزمایشگاهی برای آماده‌سازی شرایط بارگذاری در این مقیاس فراهم نمی‌باشد، لذا برای کاهش هزینه‌ها و امکان انجام بارگذاری‌های مختلف از نمونه مدل‌های آزمایشگاهی برای ساخت و بارگذاری استفاده می‌گردد. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک بایستی به گونه‌ای باشد تا شرایط واقعی را تا حد قابل قبولی تداعی نماید. معمولاً در راستای بررسی رفتار تونل‌ها از نمونه‌های کوچک آزمایشاهی تا مقیاس تقریبی ۱/۴۰ اندازه واقعی استفاده می‌گردد [۳-۱]. در این پژوهش تونل‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی با قطر ۱۵ سانتی‌متر ساخته شده و با استفاده از یک Set up خاص که در دانشگاه صنعتی سهند ساخته شده است نمونه‌ها تحت بارگذاری شعاعی قرار گرفته‌اند. مقاطع تونل مورد آزمایش در نرم افزار اجزاء محدود اباکوس مدل‌سازی شده‌اند و نتایج نمونه مقاطع تونل آزمایشگاهی شامل کرنش شعاعی بوجود آمده در برابر بار وارده با مدل‌های عددی نظیر مقایسه شده‌اند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد کرنش شعاعی بوجود آمده در مقاطع تونل با افزایش المان‌های شکل‌پذیر افزایش می‌یابد. ایجاد کرنش‌های کوچک در مقاطع تونل می‌تواند بار و تنش‌های وارده به مقاطع را به شدت کاهش دهد و از طرفی با برآورد کرنش شعاعی محیط سنگی و پیرامونی تونل‌ها می‌توان از چیدمان مناسب المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC) استفاده نمود [۵-۴].

واژگان کلیدی **تونل، محیط‌های مچاله شونده، کرنش شعاعی، شکل‌پذیری، المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC)**

۱- مقدمه

در اجرای لاینینگ تونل‌ها در محل گسل‌ها (Fault) و محیط‌های جمع‌شونده و یا در شرایط محیطی که بار بصورت شعاعی و هیدروستاتیکی وارد می‌شود سازه‌های مدفون در زیرزمین دچار تغییر شکل می‌گردند که این تغییرشکل‌ها در صورت برآورد نشدن در محاسبات اولیه باعث تخریب جزء یا کل مقطع سازه می‌گردد [۶-۸]. به منظور برآورد تغییر شکل‌های این مقاطع آزمایش استانداردی مناسبی در دسترس محققان و پژوهشگران قرار ندارد بنابراین ساخت دستگاهی که بتواند این نقیصه را برطرف نماید می‌تواند گره‌گشاری بسیاری از مسائل پیچیده و همچنین برآورد اولیه مناسب و کاربردی

* نویسنده مسئول مکاتبات hafshin@sut.ac.ir

در مقیاس کوچک آزمایشگاهی و متعاقباً برآورد سازه تمام مقیاس یا واقعی باشد. قابل ذکر است در هنگام لغزش گسل‌ها (زلزله) محل گسل‌ها و محیط‌های جمع‌شونده و یا در شرایط محیطی که بار بصورت شعاعی و هیدروستاتیکی انرژی خارجی زیادی به جدار تونل وارد شده و تغییر شکل‌های بزرگ در جدار تونل ایجاد می‌گردد و باعث تخریب موضعی یا کلی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی می‌گردد. همچنین زمانی که تونل از داخل خاک‌ها و توده سنگ‌های متورم شونده با تغییر شکل‌های زیاد عبور می‌کنند، احتمال اعمال تغییر شکل‌های زیاد از سوی محیط اطراف به جدار تونل افزایش می‌یابد. این عامل در موارد زیادی موجب خرابی پوشش تونل‌ها می‌گردد[۹-۱۰]. برای بررسی دقیق رفتار واقعی تونل‌ها در اثر بارهای وارده در شرایط گوناگون محیطی، نیازمند ساخت نمونه‌هایی در مقیاس واقعی می‌باشیم ولی با توجه به اینکه ساخت و اعمال نیروها در مقیاس بزرگ مستلزم صرف هزینه بالایی می‌باشد و از طرفی در بعضی شرایط امکانات آزمایشگاهی برای آماده‌سازی شرایط بارگذاری در این مقیاس فراهم نمی‌باشد، لذا برای کاهش هزینه‌ها و امکان انجام بارگذاری از نمونه مدل‌های آزمایشگاهی برای ساخت و بارگذاری استفاده می‌گردد. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بایستی به گونه‌ای باشند تا شرایط واقعی را تا حد قابل قبولی تداعی نماید. قرار گفتن تونل‌ها در معرض بارهای نامتقارن در مناطق کوهستانی و همچنین در دره‌ها غیر قابل اجتناب می‌باشد [۱۱].

طراحی و شناخت رفتار تونل‌ها در این نواحی برای مهندسان بسیار پیچیده بوده لذا نیازمند ملاحظات و بررسی‌های خاص و دقیق‌تری می‌باشد. این مسئله باعث گردیده تا محققین مطالعات تئوری و آزمایشگاهی بسیاری در ارتباط با اثر محیط اطراف تونل بر سازه تونل را بررسی نمایند.

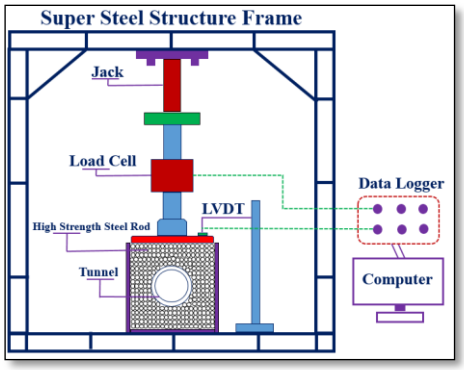
۲- مدل آزمایشگاهی

مهمترین مسئله در فرآیند بارگذاری ایجاد شرایط بارگذاری محیطی با توجه به شرایط گفته شده، بارگذاری شعاعی تقریباً یکنواخت در جداره مقطع تونل یا سازه‌های دیگر می‌باشد. در این راستا روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و چندین *Set up* در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی سهند تبریز ساخته شده است و نهایتا دستگاهی که متعاقبا توضیح داده می‌شود به عنوان طرح نهایی انتخاب شده است.

مکانیزم این دستگاه به گونه‌ای می‌باشد که تونل در درون محفظه فولادی قرار می‌گیرد و میله‌های فولادی استیل با مقاومت بالا در اطراف مقطع تونل قرار داده می‌شود سپس بار بصورت قائم از بالا به دستگاه و یا به عبارتی توسط صفحه فلزی که در بالای دستگاه و زیر جک قرار دارد، به میله‌ها وارد می‌گردد و میله‌ها نیروی وارده را به جداره تونل انتقال می دهند. میله‌ها به علت دایروی بودن و نداشتن خاصیت چسبندگی نسبت به یکدیگر می‌توانند تحت فشار مانند فشار هیدروستاتیکی به جداره‌ها بار وارد نمایند. میله‌ها در اطراف مقطع سازه محصور می باشند و بار قائم وارده باعث ایجاد تنش‌های تقریبا یکنواخت در جدارهای سازه می‌گردد.

این دستگاه قابلیت محاسبه و مقایسه جذب انرژی برای تونل-ها و سازه‌های زیرزمینی را دارد. این دستگاه دارای ساختاری ساده و قابلیت ساخت در داخل کشور را دارد. از مزایای مهم دیگر این دستگاه شبیه‌سازی و معادل‌سازی مناسب شرایط محیطی بارگذاری محیطی با استفاده از میله‌های مصرفی در جداره تونل می‌باشد. در زمینه بررسی نحوه تغییر شکل سازه‌های زیرزمینی به خصوص تونل تاکنون کارهای تحقیقاتی مناسبی انجام نیافته است. به عنوان نمونه سیستم پوشش بتنی شکل‌پذیر تونل‌ها در محیط‌های جمع‌شونده باعث کاهش فشار ناشی از خاک و سنگ اطراف جداره تونل می‌گرد که این رویکرد می‌تواند تحولی در طراحی و ساخت سازه‌ها در شرایط خاص محیطی و بارگذاری ایجاد نماید. با توجه به بالا رفتن ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها می‌توان آنها را در نواحی خاص زمین و تحت بارگذاری‌های ویژه‌ای مورد استفاده قرار داد. برای بررسی شکل‌پذیری تونل‌ها در محیط‌های متورم‌شونده *set up* آزمایشگاهی موجود نمی-باشد، بنابراین ساخت این دسته از المان‌ها و نیز ساخت مقاطعی از تونل در مقیاس آزمایشگاهی و بررسی رفتار شکل‌پذیری آنها توسط *set up* آزمایشگاهی مناسب می‌تواند زمینه‌ای بسیار مناسب در طراحی و ساخت سازه‌های شکل‌پذیر در کشورمان را ایجاد نماید.

این دستگاه در دانشگاه صنعتی سهند تبریز ساخته شده است و از اجزاء مختلفی تشکیل شده است . هسته اصلی که شامل یک باکس مکعبی می باشد که طرفین آن به یکدیگر مقید شده‌اند و بوسیله پین‌هایی به یک یکدیگر وصل شده‌اند تا در لحظه بارگذاری از یکدیگر جدا نشوند شکل‌های (۱ و ۲).



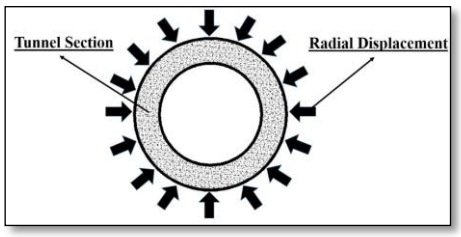
شکل ۱- شمایی از Set up آزمایشگاهی ساخته شده

شکل ۲- Set up ساخته شده و قاب فولادی صلب اطراف آن

مقطع تونل‌های ساخته شده در داخل این دستگاه قرار می-گیرند سپس میله‌های فولادی با مقاومت بالا و صیقل شده در اطراف آن قرار می‌گیرند شکل (۳). میله‌های مورد استفاده دارای مقطع دایروی با قطر ۳ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند که در راستای طولی بر روی جداره تونل قرار می‌گیرند. این میله‌های استیل دارای مقاومت بسیار بالایی می‌باشند که در برابر بارهای وارده صلب می‌باشند. پس از قرارگیری میله‌ها در اطراف جداره تونل یک ورق فولادی صلب بر روی میله‌ها قرار می‌گیرد و جک بصورت استاتیکی از بالا شروع به بارگذاری به ورق می‌نماید. قابل ذکر است جک به یک قاب فولادی قوی متصل است که در برابر بارهای وارده از خود تغییر شکل نشان نمی‌دهد.

شکل ۳- جانمایی مقطع تونل و میله‌های اطراف آن

تونل‌های مورد بررسی پس از بارگذاری دچار تغییر شکل می-گردند. برای ثبت این میزان جابجایی‌ها که کوچک هستند از سیستم ثبت تصویری با کیفیت بالا استفاده شده است تا بتوان در صورت نیاز از پردازش تصویر به منظور برآورد میزان جابجایی شعاعی استفاده نمود. در شکل (۴) به مکانیزم بار وارده به مقطع تونل اشاره شده است.



شکل ۴- نحوه توزیع نیرو در اطراف جداره مقاطع تونل

در این پژوهش نمونه تونل‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی با قطر، ضخامت، و طول به ترتیب ۱۵۰، ۱۵ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. این مقاطع تونل‌ها در مقیاس آزمایشگاهی تقریبا در مقیاس ۱/۴۰ تونل‌های واقعی می‌باشند. با توجه به اینکه در این تحقیق می‌خواهیم اثر محیط‌های مچاله‌شونده بر روی این مقاطع تونل را بررسی کنیم دستگاهی ساخته شده‌است که بتواند شرایط اعمال بار شعاعی را فراهم نماید. نمونه تونل‌ها را در این دستگاه قرار داده و شروع به اعمال بار قائم فشاری می‌نماییم.

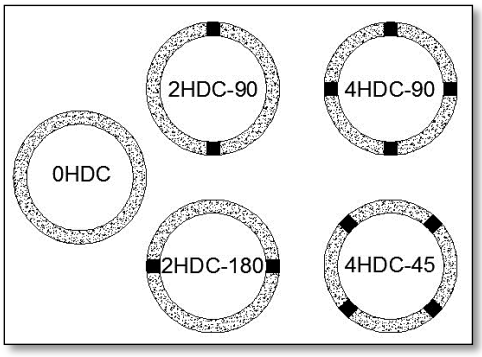
بار قائم باعث می‌گردد بار بصورت شعاعی به جداره تونل وارد گردد. از آزمایشات انجام شده جهت برآورد میزان شکل‌پذیر و تاثیر *HDC*ها در تونل‌ها استفاده شده است. در ساخت نمونه تونل‌ها از دو نوع مصالح شامل بتن معمولی و المان بتنی با شکل‌پذیری بالا استفاده شده است. نمونه تونل‌هایی در مقیاس کوچک و به قطر، طول و ضخامت به ترتیب ۱۵۰، ۱۰۰ و ۱۵ میلی‌متر ساخته شده-است اشکال (۵ و ۶) و از بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال و المان‌های بتنی شکل‌پذیر استوانه‌ای به قطر و طول به ترتیب ۱۵ و ۱۵ میلی-متر استفاده شده است شکل (۷).

شکل ۵- نمونه قالب‌های تهیه شده جهت ساخت مقاطع بتنی تونل‌ها

شکل ۶- نمونه مقاطع بتنی تونل در مقیاس آزمایشگاهی

از المان‌های بتنی با شکل‌پذیری بالا در نقاط مختلف و آرایش-های مختلف بکار برده شده است که در شکل (۸) به نام مدل‌های مختلف مورد استفاده در این پژوهش اشاره شده است.

شکل ۷- نمایی از المان بتنی با شکل‌پذیری بالا ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی جهت استفاده در مقاطع تونل‌ها

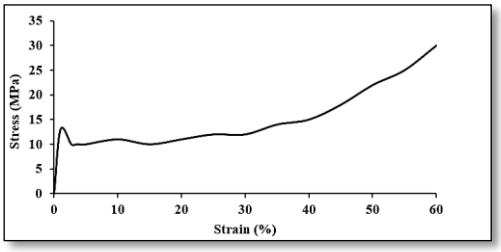


شکل ۸- نام و چیدمان مقاطع بتنی تونل مورد بررسی

قابل ذکر است به منظور معادل‌سازی رفتار تنش کرنش از رفتار خطی تنش-کرنش بتن معمولی (NC) استفاده شده است و نیز به رفتارتنش کرنش المان بتنی با شکل‌پذیری بالا در مقیاس آزمایشگاهی که در جدول (۱) و شکل (۹) اشاره شده است استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی بتن معمولی

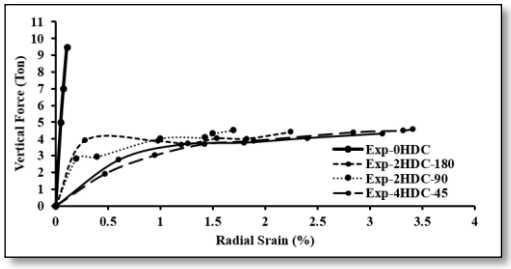
مشخصات مکانیکی	مدول الاستیسیته(E) (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پواسون
بتن معمولی (NC)	2.05 E4	40	0.195



شکل ۹- رفتار تنش-کرنش HDC در مقیاس آزمایشگاهی

نمونه تونل‌ها در *Set up* ساخته شده تحت بارگذاری قرار گرفته اند و تغییرشکل آنها با پردازش تصویر سنجیده شده شکل (۱۰) و در نمودارهای در شکل (۱۱) کرنش شعاعی مقاطع تونل در برابر بار قائم ترسیم شده است.

شکل ۱۰- نمای جانبی از مقطع تغییر شکل نمونه 4HDC-45



شکل ۱۱- میزان کرنش شعاعی کلیه مقاطع تونل‌ها در برابر بار قائم کل

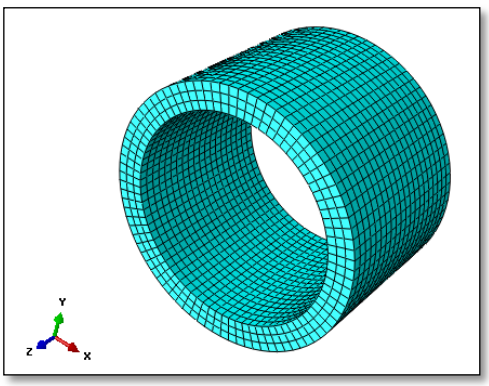
۳-مدل‌سازی عددی

در این فصل کلیه مقاطع تونل‌های مورد آزمایش در بخش قبل در نرم افرار اجزاء محدود *ABAQUS* مدل‌سازی شده‌اند و میزان تغییرشکل‌های شعاعی آنها در قالب کرنش شعاعی و نیروی‌های قائم ایجاد شده در آنها با مدل‌های آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی

مقایسه شده‌اند. در مدل‌های عددی از مشخصات مکانیکی بتن معمولی *(NC)* و المان بتنی با شکل‌پذیری بالا *(HDC)* شامل مقاومت فشاری، رفتار تنش کرنش، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بدست آمده از آزمایش با استفاده از دستگاه *Extensometer* استفاده شده است شکل (۱۲).

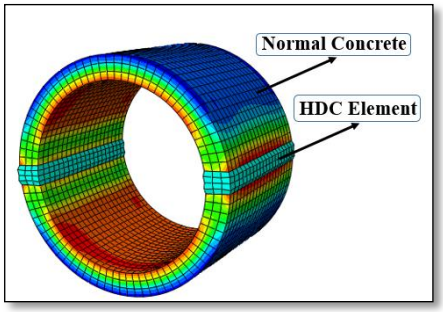
شکل ۱۲- شمایی از دستگاه Extensometer

یک سری نقاط در جداره تونل‌های مدل‌سازی شده بصورت عمود بر هم تعریف شده‌اند و میزان میانگین جابجایی شعاعی آنها تحت بارگذاری وارده (بصورت جابجایی شعاعی که به جداره تونل وارد می‌شود) در مراحل مختلف بارگذاری ثبت شده‌اند. در این فصل میزان نیروی قائم و کرنش شعاعی نمونه‌های مدل‌سازی شده با مدل-های آزمایشگاهی نظیر مقایسه شده‌اند. در مدل‌سازی بتن معمولی از رفتار خطی و الاستیک استفاده شده است. مشخصات بتن مدل‌سازی شده در تحلیل عددی که از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است، به شرح زیر می‌باشد شکل (۱۳).



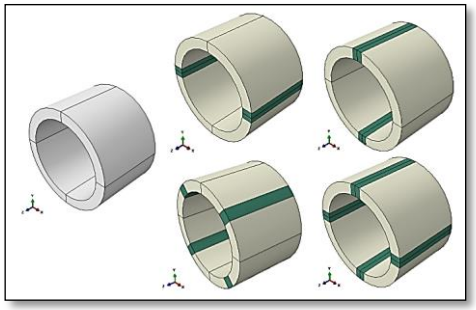
شکل ۱۳- شمایی از مدل‌سازی مقطع تونل با استفاده از بتن معمولی

در تحلیل عددی از رفتار تنش-کرنش *HDC* که دارای رفتار الاستو پلاستیک می باشد استفاده شده است. این رفتار شامل سه ناحیه اصلی شامل رفتار الاستیک، پلاستیک و سخت شوندگی کرنشی می باشد. مدل رفتاری مذکور بصورت آزمایشگاهی و از رفتار تنش-کرنش نمونه المان *HDC* بدست آمده است. در شکل (۱۴) به مدل‌سازی المان‌های *HDC* و بتن معمولی اشاره شده است.



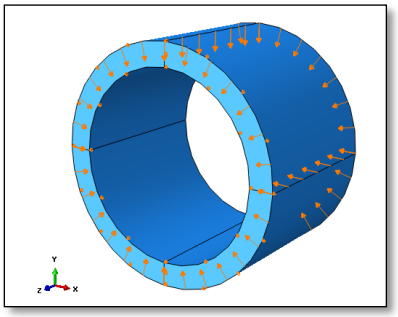
شکل ۱۴- مدل سازی تونل با استفاده از المان HDC و بتن معمولی

در مدل‌سازی عددی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس از یک سری المان‌های سه بعدی شکل‌پذیر ۸ گره‌ای چهار وجهی استفاده شده است. مدل‌ها بصورت سه بعدی مدل شده‌اند و از المان C3D8R استفاده شده است. شرایط مرزی ایجاد شده در مدل عددی مانند شرایط موجود در مدل آزمایشگاهی می‌باشند به گونه‌ای که مقاطع تونل در راستای عمود بر محور تونل جابجایی ندارند (محور Z) ولی در راستای طولی تونل قابلیت تغییر شکل را دارا هستند. نمونه تونل‌های مدل‌سازی شده دارای مقطع دایروی هستند و قطر خارجی، ضخامت، و طول آنها به ترتیب ۱۵۰، ۱۵ و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. مقاطع با اعمال شرایط تکیه‌گاهی که در راستای عمود بر محور تونل مقید شده اند بار در قالب جابجایی شعاعی بصورت استاتیکی به جداره تونل‌ها وارد می‌شود. در شکل (۱۵) به مدل‌های مختلف با چیدمان‌های متفاوت المان‌های HDC و بدون استفاده از المان‌های HDC در جداره تونل‌های مورد تحلیل اشاره شده است.

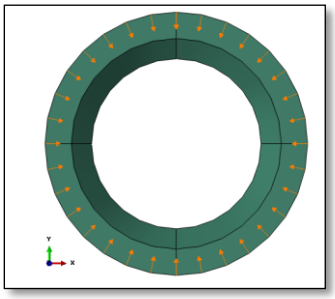


شکل ۱۵- نمایی از کلیه مدل‌های عددی مقاطع تونل با و بدون استفاده از المان HDC

بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی نمونه تونل‌های مدل‌سازی شده در این پژوهش از تحلیل استاتیکی غیر خطی در بررسی نمونه‌ها تونل‌ها استفاده شده است. مقطع تونل در راستای طولی (در راستای محور z) مقید شده اند و بارگذاری بصورت جابجایی شعاعی (جابجایی کنترل) به مقاطع تونل وارد شده است شکل (۱۶ و ۱۷). مقاطع تونل قابلیت تغییر شکل در ر استای طولی تونل (محور z) را دارند.

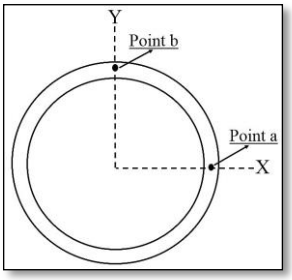


شکل ۱۶- نمایی از مقطع تونل و شرایط مرزی و بارگذاری اعمال شده



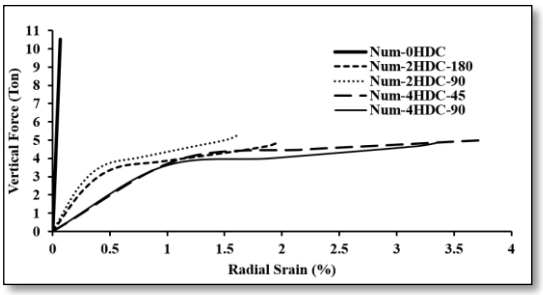
شکل ۱۷- مقطع تونل در مدل‌سازی عددی تحت بارگذاری شعاعی در قالب جابجایی شعاعی

بررسی تغییر شکل شعاعی جداره تونل‌ها در مدل‌سازی عددی همان‌طور که در شکل (۱۸) مشخص است دو نقطه a و b در وسط جداره تونل و در دو راستای عمود بر هم تعریف شده‌اند. در تحلیل-های عددی و آزمایشگاهی تغییر مکان قائم نقطه b و تغییر شکل شعاعی با استفاده از میانگین میزان جابجایی این نقاط به ازاء نیروی قائم ایجاد شده در مقاطع تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۸- جانمایی نقاط a و b تعریف شده در مقطع تونل‌ها در مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی تونل‌ها نیروی قائم ایجاد شده در مقاطع متناسب با میانگین تغییر شکل شعاعی نقاط a و b در مراحل و گام‌های مختلف بارگذاری ثبت و متعاقبا نمودارهای آنها بر حسب بار قائم ایجاد شده در مقاطع تونل و میزان کرنش شعاعی ایجاد شده در آنها ترسیم شده‌اند. در نمودارهای شکل (۱۹) به رفتار بار –کرنش شعاعی ۵ نوع مقطع تونل اشاره شده است.

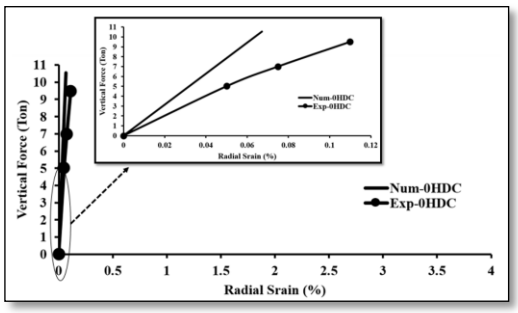


شکل ۱۹- رفتار بار قائم – کرنش شعاعی مقاطع جداره تونل‌ها

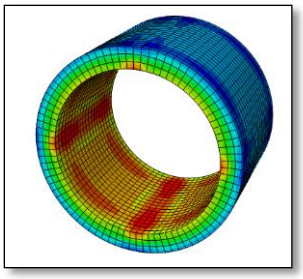
۴-تجزیه و تحلیل نتایج

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر *HDC* ها در میزان بررسی رفتار بار-تغییر شکل شعاعی پنج نمونه تونل می‌باشد. نمونه مقطع تونل *0HDC* دارای رفتار صرفا الاستیک می‌باشد در حالی که نمونه-های دیگر دارای رفتارالاستیک و پلاستیک می‌باشند و از طرفی میزان کرنش شعاعی مقاطع تونل‌ها متناسب با افزایش تعداد *HDC*ها افزایش یافته است.

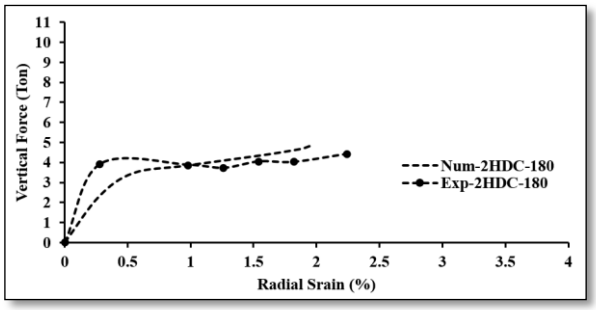
در مدل‌سازی عددی تونل‌ها تحت بارگذاری شعاعی مشابه آنچه در مدل آزمایشگاهی انجام یافته، قرار گرفته‌اند و مدل‌سازی شده و میزان بار قائم وارده و میزان تغییر شکل شعاعی در مراحل مختلف بارگذاری ثبت شده است. میزان بار و کرنش شعاعی برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی برای کلیه مقاطع با یکدیگر مقایسه شده‌اند. کرنش شعاعی مقاطع تونل را نیز می‌توان به عنوان یک مولفه شکل‌پذیری در نظر گرفت. مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی رفتار بار قائم در مقابل کرنش‌های شعاعی ایجاد شده برای کلیه مقاطع تونل‌ها در شکل‌های (۲۰ تا ۲۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



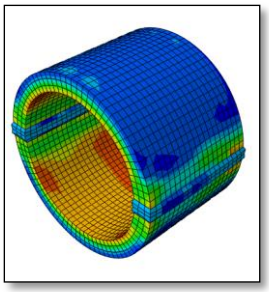
شکل ۲۰- مقایسه بار-کرنش شعاعی مدل آزمایشگاهی و عددی مقطع تونل 0HDC



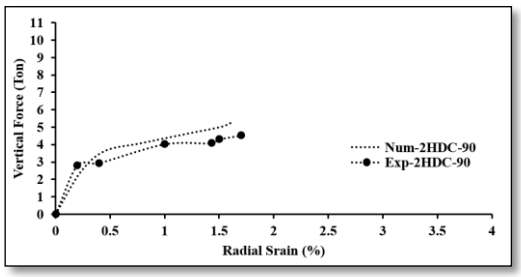
شکل ۲۱- تغییر شکل مدل عددی مقطع تونل 0HDC



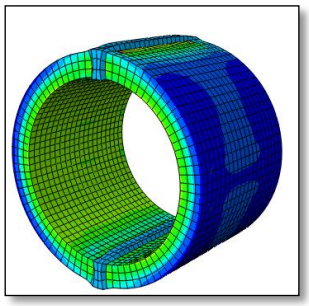
شکل ۲۲- مقایسه بار-کرنش شعاعی مدل آزمایشگاهی و عددی مقطع تونل 2HDC-180



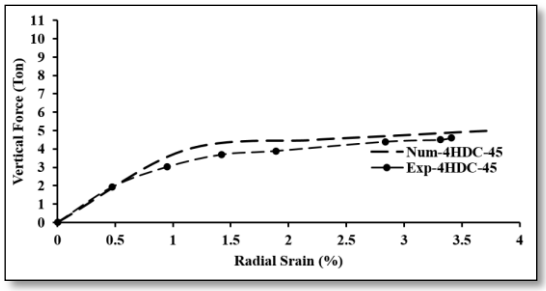
شکل ۲۳- تغییر شکل مدل عددی مقطع تونل 2HDC-180



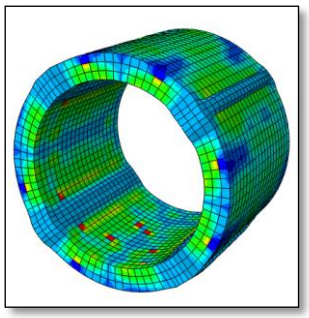
شکل ۲۴- مقایسه بار-کرنش شعاعی مدل آزمایشگاهی و عددی مقطع تونل 2HDC-90



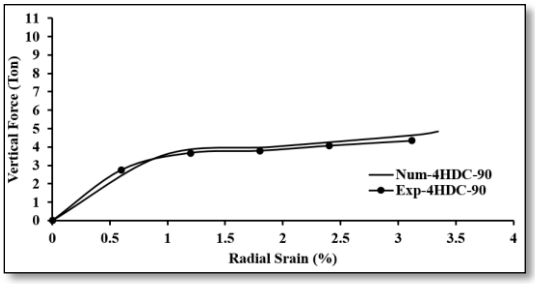
شکل ۲۵- تغییر شکل مدل عددی مقطع تونل 2HDC-90



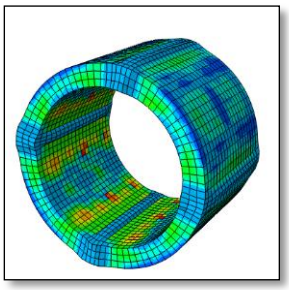
شکل ۲۶- مقایسه کرنش شعاعی مدل آزمایشگاهی و عددی اصلاح شده مقطع تونل 4HDC-45



شکل ۲۷- تغییر شکل مدل عددی مقطع تونل تونل 4HDC-45



شکل ۲۸- مقایسه بار-کرنش شعاعی مدل آزمایشگاهی و عددی مقطع تونل 4HDC-90



شکل ۲۹- تغییر شکل مدل عددی مقطع تونل 4HDC-90

همان‌طور که در نمودارهای بار-کرنش شعاعی مدل 0HDC مشخص است رفتار این مدل الاستیک بوده ولی در مدل‌های دیگر دارای رفتار الاستو پلاستیک می‌باشد. HDC ها دارای رفتار الاستو پلاستیک بوده و این رفتار باعث شده با توجه به قرارگیری آن در مقاطع تونل‌ها، این مقاطع نیز دارای رفتار الاستو پلاستیک باشند. تغییر شکل‌های شعاعی ایجاد در حالاتی که از HDC استفاده شده است تا ۶۰ برابر بیشتر از حالت‌هایی است که از HDC استفاده نشده است. در مقاطعی که از HDC استفاده شده است نیروی قائم وارده تغییرات زیادی نداشته است. تغییرات کم نیروی قائم در مقاطعی که دارای HDC باشند را می‌توان به حد تسلیم پایین HDC ها مرتبط ساخت. تغییر شکل شعاعی کل تونل‌هایی که دارای HDC می‌باشند ارتباط مستقیمی با تعداد HDC ها دارد لذا با داشتن کرنش شعاعی محیط‌های مچاله شونده می‌توان چیدمان و تعداد مناسب از HDCها را انتخاب نمود.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد المان بتنی با شکل‌پذیری بالا به منظور استفاده از آن به عنوان فیوز یا المان جذب انرژی در تونل‌هایی که در محیط‌های جمع‌شونده و یا شرایط محیطی که جابجایی نامتعارف به جداره تونل وارد می‌گردد قرار دارند می‌باشد. با ساخت تونل‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی و نیز ساخت دستگاهی که بتواند بار محیطی یکنواختی به جداره تونل وارد نماید، کاربرد و همچنین عملکرد آنها با توجه به چیدمان مختلف آنها در جداره تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مقاطع تونل‌های آزمایشگاهی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی شده‌اند و میزان شکل-پذیری آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در محدوده آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده نتایج متعددی بدست آمده است که در زیر به گزیده‌ای از آنها اشاره شده است.

۱) مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد مقاطع تونل‌هایی که دارای HDC نمی‌باشند در برابر بارهای وارده دارای رفتار ترد می‌باشند و از طرفی میزان شکل‌پذیری آنها در مقایسه با مقاطع تونل‌هایی که دارای HDC می‌باشند به شدت پایین می‌باشند. استفاده از HDC ظرفیت تغییر شکل پلاستیک و جذب انرژی مقاطع را تا ۱۰۰ برابر می‌تواند افزایش دهد و با توجه به ویژگی مدل رفتار فشاری المان-های HDC که دارای ظرفیت سخت‌شوندگی کرنشی می‌باشند و بعد از محدوده کرنش مشخص مقاومت فشاری آنها بالا می‌رود، می‌توان تغییر شکل‌های شعاعی تونل را محدود نمود.

۲) افزایش تعداد HDC در مقاطع تونل میزان شکل‌پذیری آنها را افزایش می‌دهد در حالیکه الگو و چیدمان و جانمایی HDC ها در میزان شکل‌پذیری و به تبع آن شکل‌پذیری نیز اثرگذار است.

۳) محیط‌های مچاله شونده بر اساس میزان کرنش شعاعی توده سنگ در این محیط‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند و از طرفی با داشتن تغییر شکل و کرنش محیطی و یا بر اساس درجه بندی محیط‌های مچاله‌شونده می‌توان با استفاده از الگوهای مختلف استفاده از HDCها در مقاطع تونل، راه حل مناسب و کاربردی در مقیاس واقعی در مواجهه با این محیط‌ها و جذب تغییر شکل وارده تعیین و برآورد نمود.

۴) در بارگذاری شعاعی استفاده از HDC ها در مقاطع تونل‌ها به گونه‌ای است که در حالت بارگذاری شعاعی HDC ها مانند فنرهایی سری در اتصال جداره بتنی لاینینگ قرار دارند بنابراین جانمایی HDC ها تاثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای در رفتار کل مقطع دارد.

۶- سپاسگزاری

از حمایت سرپرست و تلاش‌های تکنسین‌های آزمایشگاه بتن و سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز که شرایط مناسب برای انجام آزمایشات را فراهم نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از همسر عزیزم خانم مهندس آریانا که در کلیه مراحل انجام این پژوهش با صبوری مرا یاری نموده‌است سپاسگزارم.

۷- منبع ها

[1] Tina Marolt Cebasek and Jakob Likar, 2014. Compatibility of the support system consisting of yielding elements and shotcrete lining in highly faulted grounds, Journal of civil engineering and architecture, volume 8, No 11.

[2] B. Singh, J.L. Jethwa, A.K. Dube, B. Singh, 1992. Correlation between observed support pressure and rock mass quality, tunneling and underground Space Technology 7 57-74.

[3] K. Opolony, H.B. Einch, M. Thewes, 2011. Testing of yielding elements for ductile support, presented in: World Tunnel Congress and 37th General Assembly, Helsinki,

[4] Bai. Z., Wu, S.c, 2012. Calculation method of surrounding rock pressure for shallow and unsymmetrical tunnel under deep valley terrain, Adv, Mater, Res 170-173, 1382-1387.

[5] Mingfeng Lei, Limin Peng, Chenghua Shi, 2015. Model test to investigate the failure mechanics and lining stress characteristics of shallow buried tunnels unsymmetrical loading, Tunneling and underground space technology 46, 64-75.

[6] Barla, Giovanni, Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. In Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8 (3), pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.12.003.

[7] Barla, Giovanni, Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. In Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8 (3), pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.12.003.

[8] Carranza, Torres, C, Fairhurst, Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology 15 (2), 187-213

[9] N. Vlachopoulos1, M. S. Diederichs, Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels, Rock Mech Rock Engng (2009) 42: 131–146

[10] K. Kovari, 2009. Consulting Engineer, Fabrikstr. 4, 8102 Oberengstringen, Switzerland-design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks, World Tunnel Congress 2009, Budapest, Hungary, may 23-28.

[11] K. Kovari, 2009. Consulting Engineer, Fabrikstr. 4, 8102 Oberengstringen, Switzerland-design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks, World Tunnel Congress 2009, Budapest, Hungary, may 23-28