

افزایش جذب انرژی مقاطع تونل با استفاده از المان‌های بتنی با شکل‌پذیری بالا در محیط‌های مچاله‌شونده

یاسر علیلو کسجینی^۱؛ حسن افشین^{۲*}؛ مهرداد امامی تبریزی^۳؛ امیر بهرامی فر^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی سهند

پذیرش:

دریافت: ۰۰

چکیده

مچاله‌شوندگی یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که در بسیاری از تونل‌ها با توده‌سنگ دربرگیرنده ضعیف و یا تحت تنش‌های القایی بالا رخ می‌دهد. یکی از راه‌های فائق آمدن بر این مشکل شکل‌پذیر نمودن جداره تونل با استفاده از المان‌های بتنی با شکل‌پذیری بالا به‌عنوان فیوزهای شکل‌پذیر می‌باشد. استفاده از المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC) که دارای مقاومتی برابر با بتن‌های معمولی بوده و دارای شکل‌پذیری و کرنش فشاری بالا در حدود ۲۰٪ تا ۵۰٪ می‌باشد، می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی در این مقاطع گردد. در زمینه افزایش شکل‌پذیری بتن در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی توسط پژوهشگران انجام شده است، ولی به دلایل تجاری بودن و انحصار تولید آن در یک شرکت خصوصی این محصول، نحوه تولید آن در دسترس محققان قرار نگرفته است. در این مقاله با استفاده از ساخت المان بتنی با شکل‌پذیری بالا و انجام آزمایش‌های فشاری و مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و صحت‌سنجی آن با مدل آزمایشگاهی، جذب انرژی مقاطع مختلف تونل با استفاده از چندین الگوی جایگذاری HDCها مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل نتایج نشان‌دهنده اثرات بسیار کارا و مؤثر HDCها در بالا بردن میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری مقاطع تونل می‌باشد.

جذب انرژی، المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC)، تونل، محیط‌های مچاله‌شونده

واژگان کلیدی

^۱ High Deformable Concrete (HDC)

۱- مقدمه

تونل کریستینا در ایتالیا، گوتهارد در سوئیس، تونل سیمپلون که از مرز ایتالیا و سوئیس عبور می‌کند، به‌عنوان نمونه‌هایی از تونل‌های حفرشده فاصل سال‌های ۱۸۶۰ تا ۱۹۱۰ قابل‌ذکر می‌باشند. به‌منظور جذب انرژی آزادشده در نواحی مچاله شونده می‌توان از تکیه‌گاه نرم و شکل‌پذیر در جداره و اطراف تونل استفاده نمود. در این پژوهش با استفاده از ساخت المان‌های بتنی با شکل‌پذیری بالا در دانشگاه صنعتی سهند تبریز و انجام تست آزمایش فشاری بر روی ستون‌های کوتاه و با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس میزان جذب انرژی تونل‌ها تحت بارگذاری شعاعی که تداعی‌کننده محیط‌های مچاله شونده می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- محیط‌های مچاله شونده

تعاریف مختلفی از مچاله و متورم شوندگی تاکنون ارائه شده است که در این قسمت به تفسیر به آن‌ها اشاره شده است. ترزاقی (۱۹۴۶) اعتقاد دارد مچاله شوندگی فقط در سنگ‌هایی که مقدار قابل‌ملاحظه‌ای رس دارد، اتفاق می‌افتد. سنگ‌ها ممکن است شامل کائولینیت یا دارای خواص ویسکوز از قبیل مونتوریلونیت باشند. سنگ‌های متورم همیشه دارای میزان تراکم متوسط بوده و شامل مقدار زیادی رس پیش بارگذاری شده می‌باشند. ترزاقی خاطر نشان می‌کند که سنگ مچاله شونده بدون ازدیاد حجم محسوس به‌طور آهسته به داخل تونل پیشروی می‌کند که لازمه مچاله‌شوندگی وجود درصد زیادی از ذرات میکاشیست یا رس با خواص تراکم اندک می‌باشد [۸]. گیودا (۱۹۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان تحلیل تأثیرات مچاله-شوندگی غیرخطی در اطراف تونل‌های دایروی بیان می‌نماید واژه مچاله‌شوندگی جهت بیان تغییرات وابسته به زمان سنگ که توسط تمرکز تنش‌های برشی در اطراف تونل اتفاق می‌افتد بکار رفته است. برعکس تورم به افزایش حجم توده‌سنگ به‌صورت وابسته به زمان در اثر جذب آب در اطراف حفره تونل اطلاق می‌شود. پدیده تورم در خاک‌ها و سنگ‌هایی که شامل رس و یا ذرات کوچک از قبیل مونتوریلیت بوده رخ می‌دهد. اوروک (۱۹۸۴) نیز این محیط‌ها را این‌گونه تعریف می‌نماید که زمین مچاله‌شونده به زمینی که تحت تغییر مکان‌های قابل‌توجه وابسته به زمان ناشی از افزایش بارگذاری بیش از مقاومت سنگ در مجاورت تونل رخ می‌دهد اتلاق می‌شود. این بارگذاری توسط باز توزیع تنش در اطراف فضای حفرشده اتفاق می‌افتد، در نتیجه در یک زمین مچاله‌شونده سیستم نگهداری

سازه‌های زیرزمینی در طرح‌های عمرانی و صنعتی هر کشوری از جایگاه فنی و مهندسی خاصی برخوردار است. اهمیت این سازه‌ها اعم از انواع تونل‌های آب‌رسانی، راه، معدن و یا انواع مغارها به‌منظور نصب تأسیسات برقی مربوط به نیروگاه‌های برق-آبی در سدها، ایجاد مخازن نگهدارنده مواد نفتی و فضاهای بزرگ معادن زیرزمینی به حدی است که سالانه ده‌ها میلیارد ریال در بخش مهم سرمایه‌گذاری و هزینه می‌گردد. با توجه به پیچیدگی خاص این قبیل سازه‌ها، روش مطالعه و اجرای آن‌ها نیز با سایر سازه‌های عمرانی و صنعتی متفاوت می‌باشد، زیرا در محل احداث تونل از لحاظ زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و غیره محیط مقابل ناشناخته بوده و انجام مطالعات هرچند دقیق و گسترده، به‌طور کامل گویای شرایط واقعی موجود در درون زمین نیست. بر این اساس طراحی و اجرای تونل و سایر سازه‌های زیرزمینی الزاماً نیازمند تحقیق و دستیابی به آخرین دستاوردهای علمی و فناوری می‌باشد.

پدیده مچاله‌شوندگی^۲ یا تغییر شکل‌های بزرگ و همگرایی وابسته به زمان^۳ در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌هایی القایی، تنش موجود از حد مقاومت برشی گذشته و توده‌سنگ به داخل سوراخ محدوده حفاری شده رانده می‌شود [۱]. این تغییر شکل‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی‌مدت ادامه داشته باشد. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر شکل‌ها و وسعت حوزه ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، تنش برجا، جریان آب، فشار آب حفره‌ای و خواص توده‌سنگ دارد. از طرفی مچاله‌شوندگی رابطه نزدیکی با تکنیک‌های حفاری و نصب سازه نگهدارنده دارد به‌طور مثال اگر نصب سیستم نگهدارنده به تعویق انداخته شود، تنش‌ها باز توزیع شده، توده‌سنگ به داخل تونل رانده می‌شود. در عوض اگر تغییر شکل‌ها توسط نصب سریع سیستم نگهدارنده متوقف شود، سیستم نگهدارنده سنگین می‌گردد [۶،۷]. تونل‌سازی درزمینه‌ای با رفتار مچاله‌شونده باعث تاخیرات طولانی در احداث یک پروژه تونل‌سازی و هزینه‌های اقتصادی زیاد می‌شود. موارد موفقیت‌آمیزی نیز با درک درست از مسائل مچاله-شوندگی و تشخیص مناسب رفتار توده‌سنگ در اروپا از قبیل

^۲ Squeezing
^۳ Time- dependent convergence

که همیشه تغییر مکان‌های بزرگ، نتیجه مچاله‌شوندگی نمی‌باشند. سنگی که شامل مصالح رسی از قبیل ایلیت و مونت مورلینیت باشد حساس به تورم خواهد بود. تورم به معنای افزایش در حجم توده‌سنگ به علت جذب آب می‌باشد.

۲- تغییر مکان‌های بزرگ سنگ که در محدوده دیواره‌ها و تاج اتفاق می‌افتد ممکن است به علت ضعف سیستم نگهداری نصب‌شده در سنگ‌های درزه‌دار باشند لذا این تغییر مکان‌ها به علت شل‌شدگی سنگ و نه تسلیم در حوزه فراتنش می‌باشد.

۳- ترکیدن سنگ نیز ربطی به پدیده مچاله‌شوندگی نخواهد داشت [۸].

پروفسور انیشتین در مقاله مفصلی در باب طراحی و تحلیل سازه‌های زیرزمینی در سنگ‌های متورم و مچاله‌شونده به این نکته اشاره کرده است که هم تورم و هم مچاله‌شوندگی باعث حرکت روبه‌داخل محیط تونل در طول زمان می‌شوند. نرخ بالای حرکت و جابجایی قابل توجه در سطح تونل متفاوت است و به زمین‌شناسی، به حالت تنش اصلی و به شکل تونل بستگی دارد. تورم مربوط به افزایش حجمی است که در اثر آب گرفتی است و اغلب بدون تسلیم شدن صورت می‌گیرد. درحالی‌که مچاله‌شوندگی الزاماً با خزش حاصل از افزایش از حد تنش برشی مرتبط می‌باشد. مچاله‌شوندگی می‌تواند مرتبط با افزایش حجم باشد و به عبارت دیگر تورم تنش‌ها را سبب می‌شود و مشخصه‌های مواد ممکن است باگذشت زمان به تسلیم برسند. سینگ نیز به پدیده‌ای که در اثر آن توده‌سنگ خرد شدن سیلان می‌نماید و رویداد فراتنش رخ می‌دهد و در نتیجه سنگ دچار افزایش حجم شده و به داخل فضای حفرشده حرکت می‌کند، مچاله‌شوندگی را تعریف می‌نماید. قابل‌ذکر است که پدیده تورم مربوط به مصالح خاصی از قبیل رس‌ها، مونت مورلینیت، ایلیت، کلریت و غیره بوده که در اثر نشست آب به داخل آن‌ها متورم می‌گردند، با این تفاوت که انسداد دهانه تونل در اثر مچاله‌شوندگی ممکن است تا مدت‌ها حتی پس از یک سال ادامه داشته باشد.

آیدان و همکاران نیز اعتقاد دارند وقتی تونل تغییر مکان‌های بزرگی را در طی حفاری از خود نشان می‌دهد، سنگ به‌عنوان یک ماده منبسط‌شونده نام‌گذاری می‌گردد. به‌طور کلی انسداد تونل در اثر پدیده مچاله‌شوندگی ممکن است شامل سه نوع انهدام گردد [۸].

۱- انهدام برشی کامل

تونل بارهای افزایش‌دهنده‌ای (چند برابر بارهای اولیه) را برای هفته‌ها و حتی ماه‌ها تجربه خواهد کرد در برخی حالات بهتر است به زمین اجازه‌ی آزادسازی تنش و تغییر مکان را داد و سپس سیستم نگهداری را نصب کرد که در این حالت تنش‌ها توزیع مجدد شده و نیروی کمتری به سیستم نگهداری اعمال خواهد گردید. طراحی تونل درزمینه‌ای مچاله‌شونده نیازمند مطالعات دقیق فاکتورهای از قبیل تنش‌های برجا، درجه هوازدگی زمین، زمان و مقاومت وابسته به تنش، شکل‌پذیری زمین حفاری، نوع حفاری و تکنیک نصب سیستم نگهداری می‌باشد. حرکت‌های سطح زمین در بالای تونل ممکن است افزایش یابد. جتوآ (۱۹۸۴) بیان می‌نماید که حفاری تونل در سنگ باعث اغتشاش در تنش‌های ابتدایی شده و تغییر مکان‌هایی را در اثر این تنش‌های القایی موجب می‌گردد و در اثر حفاری، تمام نقاط اطراف تونل به‌صورت شعاعی به داخل تونل وارد می‌شود. در توده‌های سنگ این تغییر مکان‌ها در ابتدا الاستیک و در حدود یک درصد شعاع تونل می‌باشند. این تغییر مکان‌ها مستقل از زمان بوده و به‌سرعت پس از حفاری به تعادل می‌رسند. به‌عنوان مثال پوشش نهایی بتنی در بعضی تونل‌های انتقال آب فقط جهت مقاصد هیدرولیکی طراحی می‌گردد. برعکس یک توده‌ی سنگ ضعیف تحت تنش‌های القایی زیاد ناشی از حفاری منهدم شده و منجر به تشکیل یک ناحیه‌ی خردشده در اطراف مقطع حفرشده می‌گردد که ممکن است ماه‌ها به تغییر شکل خود ادامه دهد. در این راستا جداره‌های تونل تحت یک تغییر مکان وابسته به زمان قرارگرفته و بارهای اعمالی بر پوشش بتنی تا زمانی که تغییر مکان دیواره به صفر برسد، افزایش خواهد داشت. فشار شعاعی وارد بر پوشش بتنی در این حالت، فشار نهایی سنگ نامیده خواهد شد [۹].

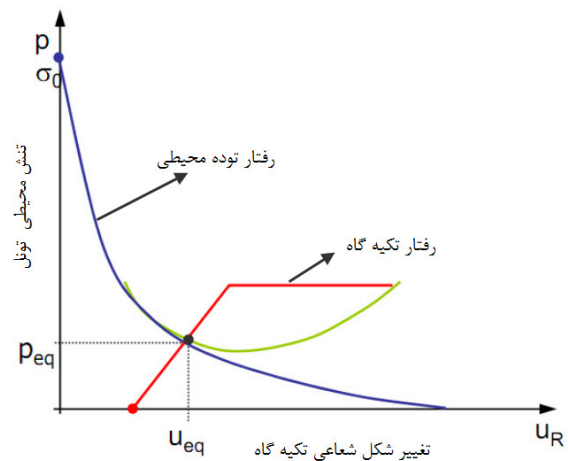
کواری (۱۹۹۸) رفتار مچاله‌شوندگی را قالب موارد زیر تعریف می‌نماید:

۱- رفتار مچاله‌شوندگی سنگ در اثر حفاری عبارت است از تغییر شکل‌های بزرگ که باعث تقلیل سطح مقطع حتی در کف تونل خواهد شد و این تغییر شکل در یک دوره طولانی ادامه دارد. اگر با نصب سیستم نگهداری بخواهند جلوی این تغییر مکان‌ها را بگیرند، سیستم نگهداری سنگین خواهد شد و سنگ با مقاومت پایین در مقابل تنش‌های اعمالی بالا مچاله خواهد شد. سنگ تا ظرفیت باربری خود تحت اعمال تنش قرار خواهد گرفت و سپس جاری می‌گردد. همچنین باید توجه کرد

۲- انهدام کمانشی

۳- انهدام برشی و لغزشی

اصطلاح فشردن شدن یا متورم شدن^۴ زمین به پدیده به وجود آمدن تغییر شکل‌های زیاد در اثر حفر تونل اطلاق می‌شود که ممکن است باعث مختل شدن کاربری کل یا قسمتی از تونل گردد. برمبنای مشاهدات اولیه تنش اولیه در سنگ با افزایش تغییر شکل کاهش می‌یابد که آن را از نظر ساختار کنترل‌پذیر می‌کند شکل (۱). در دهه‌های اول قرن ۲۰ کارهای زیادی در این زمینه انجام شد و با معرفی اتصال لغزشی که با توجه به شرایط زمین به تغییر شکل‌های زیادی برای پایداری نیاز داشت فصلی جدید در بررسی پایداری تونل‌ها ایجاد گردید. فشرده شدن یا در حین ساخت تونل متوقف می‌گردد و یا زمان‌بر می‌باشد.



شکل ۱: رفتار تنش توده سنگی و تکیه‌گاه [۲]

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد با افزایش تغییر شکل توده سنگی و تکیه‌گاه، فشار وارد بر تکیه‌گاه کاهش می‌یابد، بنابراین تنها راه برای کنترل رفتار و هدایت سنگ‌های متورم شونده در تونل‌ها ایجاد یک تکیه‌گاه نرم است که بتواند این تغییر شکل‌ها را کنترل کند. پیش از اینکه محققین به تکنولوژی ساخت تکیه‌گاه نرم که پایه به وجود آمدن آن همان بتن شکل‌پذیر است دست یابند، در ساخت تونل‌ها بیشتر از لاینینگ درجا و صلب استفاده می‌شد. روش‌های دیگری برای شکل‌پذیر نمودن جدار لاینینگ تونل‌ها وجود دارد که به تفصیل در قسمت‌های پیش رو به آن اشاره خواهد شد [۶].

۳- المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC) و کاربرد آن

امروزه بتن به‌عنوان یکی از مصالح پرمصرف در صنعت ساختمان به شمار می‌آید به‌گونه‌ای که تمایل زیاد صنعت به استفاده از آن، کاربردهای متنوع و برخی ویژگی‌های آن باعث شده تا تحقیقات بسیار زیادی در زمینه اصلاح معایب و بهبود مشخصات آن صورت پذیرد. یکی از ضعف‌های اصلی بتن ترد بودن و عدم شکل‌پذیری ذاتی مصالح بتنی است که محققین زیادی وقت خود را صرف بهبود شکل‌پذیری بتن نموده‌اند و به نتایج چشمگیر و موفقیت‌آمیزی با استفاده از افزودن برخی کامپوزیت‌ها دست‌یافته‌اند که می‌تواند تحول بزرگی در زمینه صنعت ساختمان و ساخت سازه‌های مختلف ایجاد نماید [۴]. این تحول علاوه بر اصلاح خواص بتن که شکل‌پذیری در رأس آن قرار دارد، باعث به وجود آمدن تحولات زیادی در طراحی و ساخت سازه‌های بتن‌آرمه می‌گردد و همچنین در بحث مقاوم سازی نیز می‌تواند بسیار کارگشا باشد. ایجاد مفاصل پلاستیک در اتصال‌های سازه‌های بتن‌آرمه، فلسفه طراحی این سازه‌ها را دچار تغییرات اساسی می‌کند و محدودیت‌های حال حاضر سازه‌های بتن‌آرمه را از بین می‌برد.

با توجه به توان تحمل کرنش‌های بالا توسط عناصر بتنی با شکل‌پذیری بالا و کاربردهای متنوع دیگر آن از جمله به‌عنوان میراگر در سازه‌های بتنی یا جداگرها در پی‌ها (جداگر لرزه‌ای)^۵، اهمیت استفاده از این نوع بتن را برجسته کرده است. آنچه ما را بر آن داشته به فکر روش‌هایی برای تولید بتن شکل‌پذیر یا عناصر بتنی با شکل‌پذیر بالا باشیم، کاربرد آن در پوشش جداره تونل‌ها می‌باشد. در این روش به‌جای استفاده از پوشش‌های صلب یکپارچه شاتکریت شده و یا قطعات پیش‌ساخته صلب می‌توان با ترکیب المان‌های پیش‌ساخته بتنی با شکل‌پذیری بالا یا HDC^۶ همراه با قطعات منحنی ایجادشده در لاینینگ تونل، به جدار انعطاف‌پذیر و کنترل‌کننده تغییر شکل سنگ-های جمع‌شونده رسید که پایداری، دوام و ایمنی تونل را تضمین می‌کند [۲، ۵].

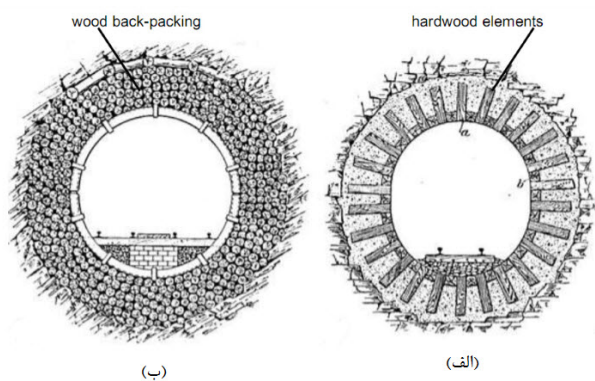
در این پژوهش منظور از HDC، عناصر بتنی با شکل‌پذیری بالا می‌باشد که دارای قابلیت تحمل کرنش فشاری تا حدود ۵۰٪ و مقاومت مشخصه فشاری در حدود ۲۰-۴ مگاپاسکال می‌باشد.

^۵ Base Isolator

^۶ High Deformable Concrete

^۴ Swelling

روش اساسی مناسب جهت تحمل تغییر شکل در لاینینگ تونل‌ها بدون اینکه به آن آسیب برساند وجود دارد. الف) قرار دادن لایه‌های شکل‌پذیر در مابین لایه‌های صلب لاینینگ تونل. ب) نصب قطعات شکل‌پذیر در جداره اطراف تونل در مجاورت زمین اطراف تونل. این دو روش از زمان‌های قدیم نیز به روش‌های مختلف مرسوم بوده است که در شکل (۴) به صورت شماتیک به آن‌ها اشاره شده است.



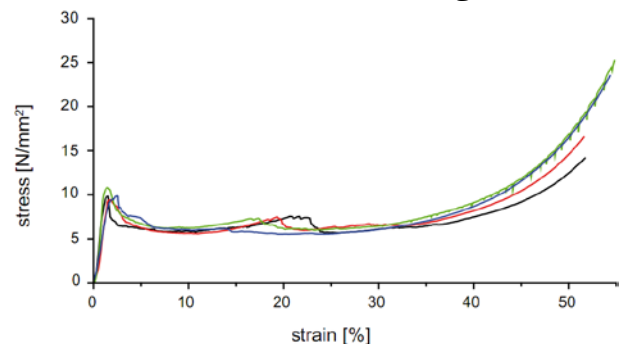
شکل (۴) مفاهیم تکیه‌گاه نرم. الف) الوار چوبی مابین لایه‌های بتنی ب) چوب‌های پرکننده مابین توده سنگی و جداره تونل [۵]

تغییر شکل‌ها در شرایط خاک جمع‌شونده و متورم‌شونده به صورت آهسته به جداره تونل وارد می‌شود. جهت کاهش فشار وارده به جداره تونل (لاینینگ اصلی یا موقت) از روش‌های متفاوتی در جداره تونل به‌منظور جذب انرژی نیروی وارده استفاده می‌گردد که در شکل (۱-۵) ارائه و متعاقباً توضیح داده شده است.

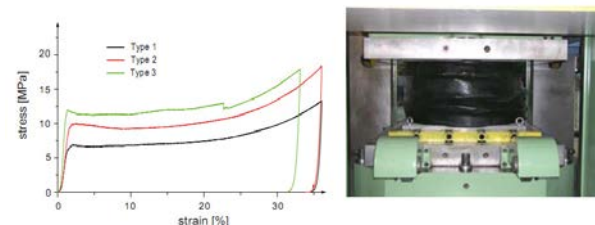
نحوه استفاده از المان‌های شکل‌پذیر در بین لایه‌ها در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است المان‌های شکل‌پذیر به صورت محیطی در جداره تونل در جانمایی‌های متفاوت قرار می‌گیرند.

شکل (۵-ب) حالتی را نشان می‌دهد که در جداره محیطی تونل، پروفیل‌های فلزی به صورت لغزشی به‌کاربرده شده است که این پروفیل‌ها به صورت عملکرد اصطکاکی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. با اعمال نیرو از بیرون جداره مقطع به روی یکدیگر می‌لغزند و درنهایت از طرفی تغییر شکل داده و از طرفی بر روی یکدیگر با عملکرد اصطکاکی می‌لغزند. در شکل

یکی از مهم‌ترین کاربردهای بتن با شکل‌پذیری بالا در تونل‌ها می‌باشد و البته کاربردهای متعدد دیگری نیز دارد. رفتار تنش- کرنش این نوع المان پس از رسیدن به کرنش در حدود ۵۰ درصد، به صورت سخت‌شونده توأم با افزایش کرنش می‌باشد که ظرفیت باربری آن با افزایش کرنش در انتها افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۲ و ۳) رفتار تنش-کرنش و آزمون تحت بارگذاری فشاری بتن با شکل‌پذیری بالا نشان داده شده است. این المان‌ها علاوه بر کاربرد به‌عنوان تکیه‌گاه نرم^۷ در پوشش تونل‌ها به‌عنوان عناصر مهاری و از طرفی فونداسیون (پدستال‌ها) کاربرد دارد و حتی قابلیت تعویض بعد از رسیدن به ظرفیت تغییر شکل نهایی را نیز دارد [۵].



شکل ۲: رفتار تنش کرنش المان بتن شکل‌پذیر [۵]



شکل ۳: المان بتنی با شکل‌پذیری بالا تحت بارگذاری فشاری [۵]

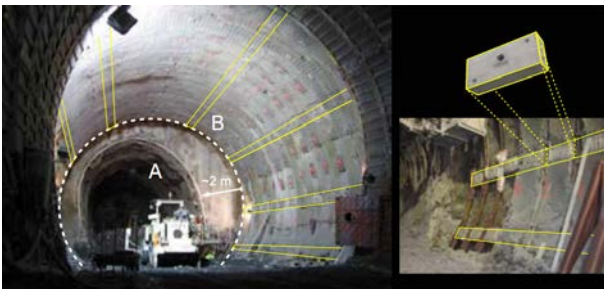
شرایطی که در اطراف زمین تونل در حالت‌های مختلف شامل خاک‌های آماس‌کننده و متورم در جداره تونل وجود دارد، اساساً با یکدیگر متفاوت است. یک ویژگی مشترک بین آن‌ها وجود دارد و به صورت تئوری و تجربی اثبات شده است که با تغییر شکل میلی‌متری توده سنگی، مقدار زیادی از تنش در لاینینگ تونل آزاد می‌گردد. با توجه به این مشاهدات یک سری روش‌های طراحی در دسترس مهندسان قرار گرفته است که بر اساس آن‌ها سازه موقت و لاینینگ نهایی تونل به‌گونه‌ای ساخته می‌شوند که اجازه می‌دهند صخره‌ها تغییر شکل دهند که راه‌حلی عملیاتی و اقتصادی در ساخت تونل‌ها می‌باشد. دو

^۷ Yield Support

مستهلک می‌نماید و باعث می‌گردد به جداره اصلی شاتکریت شده تونل که شکست ترد دارد انتقال نیابد.



شکل ۷: الف- استفاده بتن با شکل‌پذیری بالا در لاینینگ تونل
ب- استفاده از استوانه‌های فلزی شکل‌پذیر فولادی [۵]

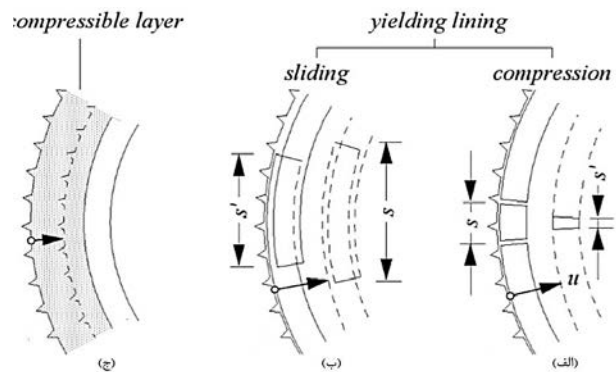


شکل ۸: تونل قطار سریع‌السیر لیون - تورین [۵]

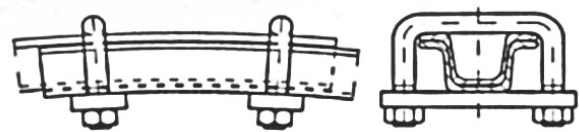
شکل (۹) نحوه قرارگیری و عملکرد المان‌های شکل‌پذیر در لاینینگ تونل را نشان می‌دهد. عناصر بتنی به‌عنوان پدستال^۸ (ستونک) یا عناصر مهارتی بتنی نیز می‌تواند بکار رود که استفاده از آن به‌عنوان عناصر مهارتی تسلیم شونده صرفاً با توجه به شکل‌پذیری بالای آن محقق می‌شود. از بتن مسلح معمولی نیز می‌توان به‌عنوان پدستال استفاده کرد ولی ویژگی شکل‌پذیری بالای عناصر بتنی، عملکرد و دوام آن را تضمین می‌کند. از مزایای دیگر این المان‌ها می‌توان به قابل تعویض بودن و جایگذاری مجدد این المان‌ها نیز اشاره نمود [۵].

از دیگر موارد استفاده عناصر بتنی با شکل‌پذیری بالا، کاربرد آن‌ها به‌عنوان المان مهارتی می‌باشد. شکل (۱۰) المان مهارتی را تحت آزمایش فشاری نشان می‌دهد. همچنین نمودار تنش- کرنش آن در این شکل ترسیم شده است که کرنش این المان شکل‌پذیر تا ۴۰٪ افزایش یافته است. در این شکل مشاهده می‌گردد با حفظ توان باربری آن با توجه به رفتار سخت‌شوندگی ۴۰ درصد، ظرفیت باربری آن با توجه به رفتار سخت‌شوندگی آن افزایش یافته است. تکیه‌گاه‌های تسلیم شونده باید دارای مقاومت کافی نسبتاً بالایی باشند وگرنه در همان ابتدای

(۶) به نحوه اتصال و مقطع پروفیل‌ها اشاره شده است [۶].



شکل ۵: انواع جداره‌های منعطف مورد استفاده در تونل [۵]



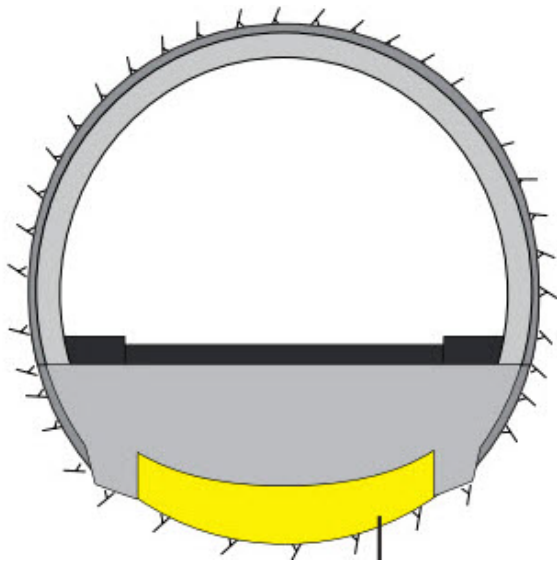
شکل ۶: نحوه اتصال پشت‌بندهای فولادی در تکیه‌گاه لغزشی [۶]

شکل (۵-ج) ساختار لایه شکل‌پذیر را در جداره تونل نشان می‌دهد که پس از تورم و تغییر شکل توده‌سنگ و خاک لایه منعطف متراکم می‌گردد. این مکانیزم باعث جذب انرژی آزاد شده توسط صخره‌ها توسط لایه منعطف محیط بر جداره تونل می‌گردد.

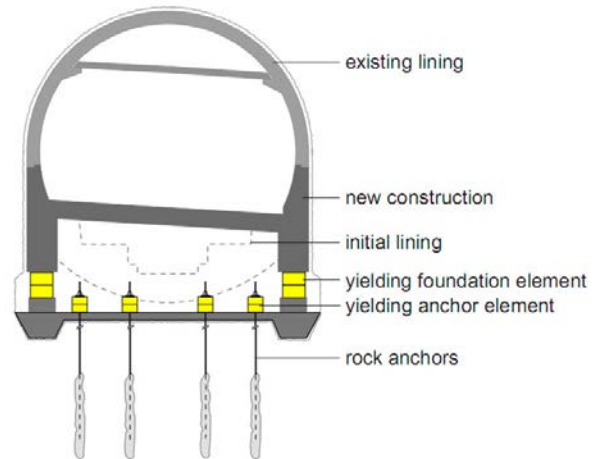
پوشش معمولی تونل با بتن پاششی (شاتکریت) مقاومت بالایی در برابر بارهای اعمالی دارد ولی ظرفیت تغییر شکل بسیار کمی دارد. با افزایش بارگذاری در جداره این تونل حتی با وجود استفاده از شبکه فولادی، شکست ترد رخ می‌دهد بنابراین تونل ساخته شده با بتن پاششی در نواحی جمع‌شونده مناسب نیست. استفاده از عناصر شکل‌پذیر در محیط مقاطع تونل و در فواصل مشخص باعث بالا رفتن شکل‌پذیری کل سازه تونل می‌گردد. شکل (۷) استفاده عملی تونل با بتن پاششی به همراه المان‌های شکل‌پذیر در دو حالت استفاده از المان‌های شکل‌پذیر را نشان داده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود مقطع تونل A دارای همگرایی شعاعی ۲ متر نسبت به مقطع B می‌باشد که این شکل‌پذیری، بدون مختل شدن کاربری صورت پذیرفته است. افزایش فشار محیطی باعث شده است که تونل در جهت شعاعی تغییر شکل دهد. به علت وجود المان‌های شکل‌پذیر در لاینینگ تونل، تغییر شکل‌های به وجود آمده در محیط اطراف تونل به المان‌های شکل‌پذیر انتقال یافته و این اعضاء با تغییر شکل خود نیرو و انرژی وارده را

^۸ Pedestal

بارگذاری زیر بار صخره تسلیم می‌شوند.



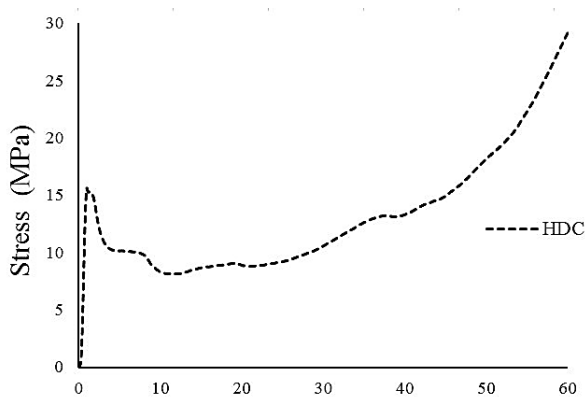
شکل ۱۱: نحوه قرارگیری بستر منعطف در تونل [۴]



شکل ۹: استفاده المان‌های بتنی به عنوان پدستال (ستونک) [۵]

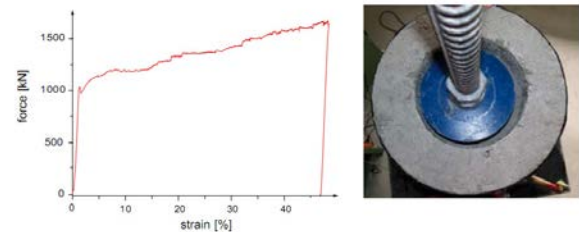


شکل ۱۲: نمونه HDC تحت بارگذاری در UTM



شکل ۱۳: رفتار تنش-کرنش HDC

نمونه دیگری به صورت ستون استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر ساخته شده است که در قسمت میانی آن از HDC به طول ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. به عبارتی



شکل ۱۰: تست آزمایشگاهی المان مهاری و نمودار نیرو - کرنش یک المان مهاری [۴]

برای ایجاد تکیه‌گاه نرم می‌توان از بستری منعطف شامل بتن شکل‌پذیر مابین جداره تونل و محیط مجاور استفاده نمود که در شکل (۱۱) به نحوه جای‌گذاری آن اشاره شده است. در این حالت با افزایش تورم در بستر تونل به علت شکل‌پذیری بیشتر بستر منعطف نسبت به جداره تونل، فشار حاصل از تورم باعث تغییر شکل در جداره منعطف می‌گردد و از فشار اضافی وارد به جداره تونل جلوگیری می‌نماید.

۴- مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش در ابتدا المان بتنی با شکل‌پذیری بالا (HDC) در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی سهند ساخته شده و تحت بارگذاری فشاری در دستگاه UTM قرار گرفته شکل (۱۲) و رفتار تنش-کرنش آن ثبت شده است. آزمون المان بتنی با شکل‌پذیری بالا دارای رفتار تنش-کرنش مطابق با تعریف ارائه شده در این مقاله می‌باشد که به رفتار تنش-کرنش آن در شکل (۱۳) اشاره شده است.

کرنش از رفتار خطی تنش-کرنش بتن معمولی (NC) و رفتار غیرخطی تنش-کرنش HDC استفاده شده است.

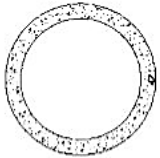
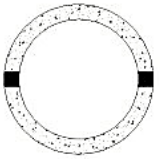
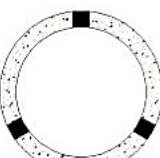
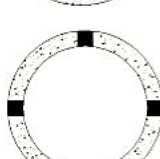
جدول ۱: مشخصات بتن معمولی

| مشخصات | مدول الاستیسیته (E) (Kg/cm ²) | مقاومت فشاری (Kg/cm ²) | ضریب پواسون |
|-----------------|--|---------------------------------------|-------------|
| بتن معمولی (NC) | 2e5 | 500 | 0.2 |

۵- مدل سازی عددی

در این پژوهش چهار مقطع تونل در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی شده است. این مقاطع دارای قطر خارجی و داخلی به ترتیب ۱۰۰ و ۸۰ سانتی متر بوده و دارای ضخامت جداره ۱۰ سانتی متر می باشند. در سه مدل مقطع تونل از المان بتنی با شکل پذیری بالا با تعداد ۲، ۳ و ۴ عدد به ترتیب در زوایای ۱۸۰، ۱۲۰ و ۹۰ درجه استفاده شده است و یک مدل نیز فاقد HDC می باشد. در جدول زیر به مشخصات تونل های مدل سازی شده اشاره شده است.

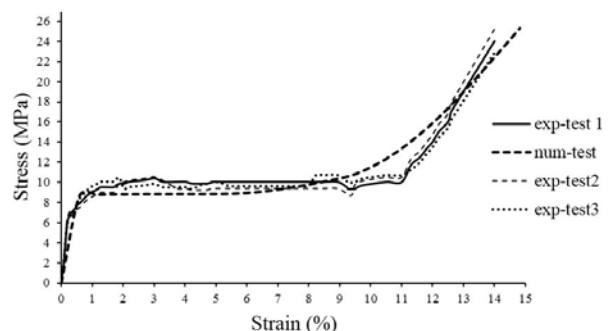
جدول ۲: مقاطع تونل های مدل سازی شده

| مقطع | جایگذاری HDC ها | زوایای بین HDC ها |
|-------|---|-------------------|
| TNC |  | - |
| T2HDC |  | 180° |
| T3HDC |  | 120° |
| T4HDC |  | 90° |

دو سرستون از بتن معمولی و در قسمت میانی HDC قرار گرفته است. سپس این ستون زیر جک فشاری قرار گرفته و تغییر شکل و تنش های محوری ایجاد شده در آن ثبت شده و رفتار تنش کرنش آن ترسیم شده است. با داشتن مقاومت فشاری و رفتار تنش-کرنش HDC ها، در نرم افزار المان محدود آباکوس این ستون با مشخصات موجود مدل سازی شده است. رفتار تنش-کرنش مدل آزمایشگاهی و عددی در یک نمودار ترسیم شده است شکل (۱۴). تحلیل نتایج آزمایشگاهی و عددی مطابقت مناسبی از این دو مدل را نشان می دهد که زمینه مدل سازی مقطع تونل در نرم افزار را فراهم می سازد.



شکل ۱۳: نمونه ستون دارای HDC تحت بارگذاری

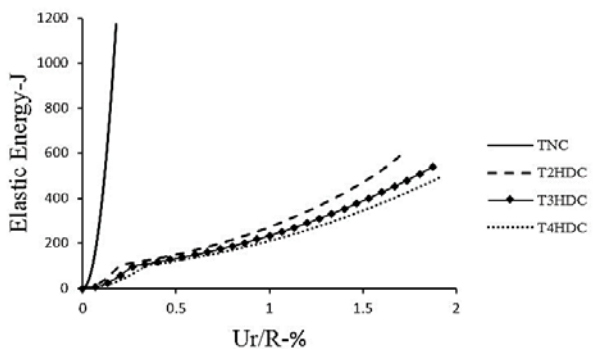


شکل ۱۴: رفتار تنش-کرنش نمونه ستون آزمایشگاهی و مدل سازی شده در آباکوس

مشخصات مکانیکی مصالح بتن و HDC به شرح زیر می باشد جدول (۱). قابل ذکر است به منظور معادل سازی رفتار تنش

۶-۱- میزان جذب انرژی الاستیک بتن معمولی مقاطع تونل‌ها

بتن معمولی مورد استفاده در جداره تونل‌ها دارای رفتار خطی می‌باشد که در این بخش میزان جذب انرژی الاستیک مقاطع مختلف تونل مورد بررسی قرار گرفته و به انرژی جذب شده الاستیک مقطع بتنی تونل بر حسب کرنش‌های شعاعی اشاره شده است شکل (۱۷). تحلیل نتایج نشان می‌دهد مقطع تونلی که دارای HDC نیست جذب انرژی الاستیک آن بیشتر از مقاطع دیگر می‌باشد. این نتیجه را می‌توان به وجود حجم بیشتر بتن معمولی در این نمونه مرتبط ساخت. با بررسی جذب انرژی الاستیک بتن معمولی در جداره سه مقطع دیگر نیز می‌توان استنباط نمود که هرچه قدر حجم بتن معمولی بیشتر باشد جذب انرژی این جداره‌های بتنی بیشتر می‌باشد. البته قابل ذکر است با بررسی‌های انجام شده این میزان انرژی در مقابل میزان جذب انرژی توسط المان‌های شکل پذیر بسیار کم می‌باشد. مقطع تونل T2HDC دارای بیشترین جذب انرژی الاستیک و کمترین تغییر شکل الاستیک را در مقایسه با دیگر نمونه‌های دارای HDC می‌باشد.



شکل ۱۶: انرژی الاستیک جذب شده توسط بتن معمولی جداره مقاطع تونل

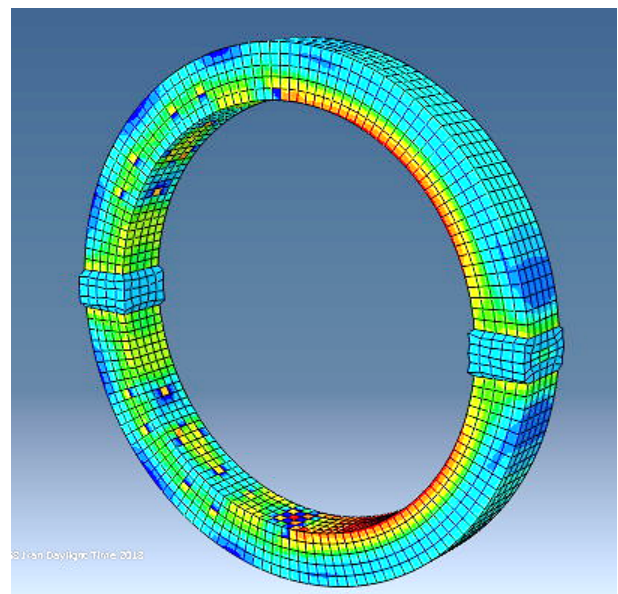
۶-۲- میزان جذب انرژی الاستیک در HDC ها

المان‌های بتنی با شکل پذیر بالا دارای رفتار الاستوپلاستیک می‌باشند بنابراین این مقاطع دارای دو نوع جذب انرژی الاستیک و پلاستیک می‌باشند. تفکیک میزان این مقدار انرژی می‌تواند شاخص مناسبی در طراحی‌ها و تغییر شکل‌های به وجود آمده باشد.

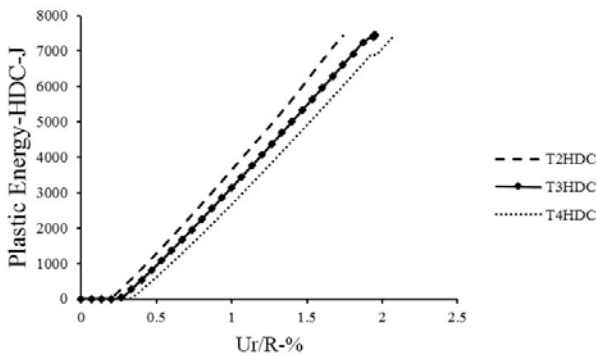
مشخصات مکانیکی مصالح بتن و HDC مدل سازی شده به شرح زیر می‌باشد. قابل ذکر است در مدل رفتاری مصالح از رفتار خطی تنش-کرنش بتن معمولی (NC) و رفتار غیرخطی تنش-کرنش HDC استفاده شده است.

۶- تجزیه و تحلیل نتایج

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر HDC ها در میزان جذب انرژی پلاستیک و الاستیک در مقاطع تونل‌ها می‌باشد. بدین منظور تونل‌هایی با قطر و طول ۱۰۰ سانتی متر و ضخامت جداره ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. جداره تونل‌ها از دو مصالح متفاوت شامل بتن معمولی در جداره اصلی مقطع تونل‌ها و المان بتنی با شکل پذیری بالا (در سه مدل مختلف در جداره مقطع تونل) تشکیل شده است. بتن معمولی دارای رفتار صرف الاستیک و المان بتنی با شکل پذیری بالا دارای رفتار الاستیک و پلاستیک می‌باشد. در این مدل سازی جداره تونل‌ها تحت بارگذاری شعاعی قرار گرفته است. این بارگذاری به صورت تغییر شکل هیدرواستاتیکی یکنواخت به جداره مقاطع تونل‌ها وارد می‌گردد. با توجه به چیدمان مختلف HDC ها در جداره تونل‌ها تغییر شکل شعاعی مقاطع تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. انرژی جذب شده به تفکیک شامل انرژی جذب شده الاستیک و پلاستیک مقاطع مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است.

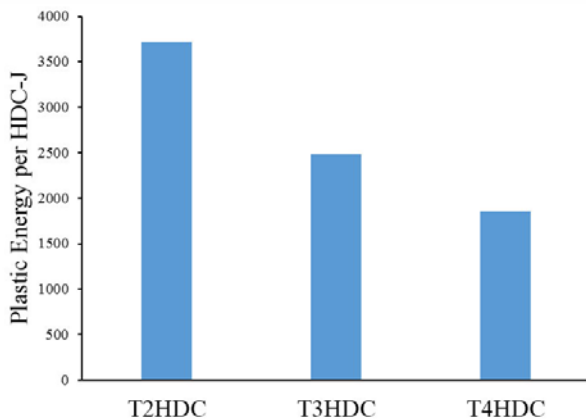


شکل ۱۵: نمونه مقطع تونل T2HDC در آباکوس



شکل (۱۸) انرژی پلاستیک جذب شده در HDC

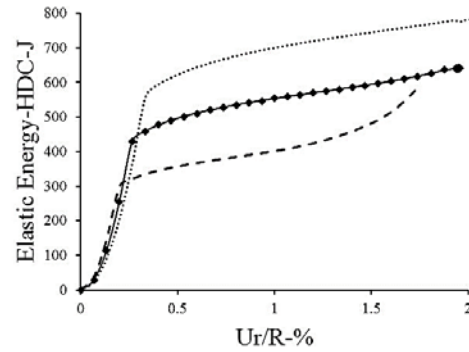
در شکل (۱۹) میزان جذب انرژی پلاستیک میانگین هر HDC در مقاطع تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است HDCها در مقطع T2HDC از ظرفیت بیشتری استفاده نموده‌اند و به ترتیب این ظرفیت در مقاطع T3HDC و T2HDC کاهش می‌یابد هرچند نمونه مقطع T4HDC، T3HDC و T2HDC به ترتیب ظرفیت تغییر شکل بیشتری را دارند که می‌تواند در تغییر شکل‌های بیشتر انرژی را گرفته و ظرفیت بالقوه‌ای را دارا باشد.



شکل ۱۹: میزان جذب انرژی هر HDC

۷- نتیجه‌گیری

برخورد با زمین‌های مچاله‌شونده از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی تونل می‌باشد که با توجه به عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های عظیم زیرزمینی مشکلات ناشی از نواحی مچاله‌شونده بسیار شایع است. یکی از روش‌های مناسب در حفاری تونل‌های در معرض جمع‌شدگی استفاده از المان‌های بتنی با شکل‌پذیری بالا در جداره تونل‌ها می‌باشد. HDCها توانایی بالایی در جذب انرژی را دارا می‌باشند. این ویژگی می‌تواند به صورت بالقوه در جداره تونل‌ها بکار گرفته شود تا در تغییر شکل‌های وابسته به زمان قابلیت خنثی نمودن اثر فشارهای ناشی از بارها را داشته باشد. بنابراین بررسی ویژگی این المان‌ها می‌تواند ابزاری



شکل (۱۷) انرژی الاستیک جذب شده در HDCها

نمودار شکل (۱۷) میزان جذب انرژی الاستیک HDCها را برای سه مدل دارای HDC نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت میزان جذب انرژی الاستیک مقاطع با تعداد HDCها رابطه مستقیم دارند. HDCها در این مقاطع به صورت فشرده‌ای سری عمل نموده به گونه‌ای که پس از استفاده از ظرفیت الاستیک کلیه HDCها وارد ناحیه پلاستیک خود می‌شوند. شیب افزایش جذب انرژی الاستیک در کلیه مقاطع یکسان بوده ولی اندازه آن‌ها در سطوحی متفاوت می‌باشد. مقطع T3HDC نسبت به مقطع T2HDC و نمونه T4HDC نسبت به نمونه T2HDC به ترتیب دارای افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصدی در تعداد HDC بوده و میزان جذب انرژی الاستیک HDC در آن‌ها به ترتیب ۳۰ و ۶۰ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد در این شرایط رابطه خطی و مستقیم بین تعداد HDCها و جذب انرژی الاستیک DCها وجود دارد.

۶-۳- میزان جذب انرژی پلاستیک در HDCها:

بررسی‌های تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که درصد عمده‌ای از میزان جذب انرژی در مقاطع تونل‌های در HDCها اتفاق می‌افتد. این میزان جذب انرژی با توجه به ظرفیت پلاستیک HDCها در این المان‌ها در قالب انرژی پلاستیک جذب می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد مقاطع T4HDC دارای بیشترین جابجایی بوده که می‌توان آن را به تغییر مکان‌های قابل انتقال HDCها در جداره تونل‌ها مرتبط ساخت. به ازاء یک کرنش شعاعی یکسان مقطع T2HDC دارای جذب انرژی پلاستیک بیشتری می‌باشد که آن را می‌توان به شکل هندسی و جانمایی HDCها مرتبط ساخت. قابل ذکر است علاوه بر تعداد HDCها جانمایی HDCها در جذب انرژی نیز بسیار مؤثر می‌باشند. با توجه به شکل (۱۸) با افزایش استفاده از HDCها میزان تغییر شکل مقاطع بتنی افزایش می‌یابد.

۹- مراجع

- [1] Varden & Woods, Design approach for squeezing ground, Underground Design Methods Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9924810-3-2, 2015
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kalman Kovari, 2007. Modular yielding support for tunnels in heavily swelling rock, Stuva conference, koln 2007.
- [5] Kovári, Kalman. "Design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks." Proceedings of the World Tunnel Congress. 2009.
- [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] Agan,Celal, Prediction of squeezing potential of rock masses around the Suruc, Water tunnel Bull Eng Geol Environ DOI 10.1007/s10064-015-0758-1, 2015
- [8] Tunnelling under squeezing rock conditions by Giovanni Barla, lecture.
- [9] Sezan Orak, 2000. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin, cement and concrete research, 171-174.

.....

مناسب در حل مشکلات ناشی از برخورد با نواحی جمع‌شونده باشد. با توجه به نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نتایج زیر بدست آمده است.

۱- استفاده از HDC ها در مقاطع تونل‌ها شکل‌پذیری و کرنش شعاعی را می‌تواند تا حدود ۱۰ برابر افزایش دهد که ابعاد و شکل هندسی المان‌ها در میزان شکل‌پذیری تونل بسیار مؤثر می‌باشد.

۲- استفاده از HDC ها در دو لایه با زوایای ۱۸۰ درجه مانند مقطع T2HDC بهینه‌ترین حالت استفاده این المان‌ها در جداره تونل می‌باشد. به عبارتی در این چیدمان از حداکثر ظرفیت HDC ها استفاده شده است.

۳- مقاطع دارای تعداد HDC های بیشتر، ظرفیت شکل‌پذیری بالاتر و به نسبت دارای ظرفیت تحمل کرنش‌های شعاعی بیشتری را دارند. HDC ها در مقاطع تونل‌ها مانند فنرها به صورت سری عمل می‌نمایند بنابراین سختی معادل فنرها با افزایش HDC ها کاهش می‌یابد بنابراین جذب انرژی آنها افزایش می‌یابد.

۴- بر اساس طبقه‌بندی محیط‌های مجاله شونده و داشتن میزان همگرایی شعاعی تونل‌ها در این زمین‌ها می‌توان با طراحی و جایگذاری مناسب HDC ها در جداره تونل‌ها، میزان همگرایی ایجادشده در این محیط‌ها را به صورت تغییر شکل در المان‌های شکل‌پذیر در جداره تونل‌ها جبران نمود. این المان‌ها قابلیت جذب انرژی وارده از محیط اطراف جداره تونل را دارند و می‌توان برحسب میزان کرنش شعاعی موردنیاز از اثربخشی مناسب‌تری دست‌یافت.

۸- سپاسگزاری

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