

مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی طرح ابداعی پدهای جک دستگاه حفاری مکانیزه تونل‌های بتن پیش ساخته (سگمنتال)

مقاله پژوهشی

مجید شهبازی^۱؛ میثم جلالی^{۲*}؛ مسلم عابدی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، shahbazi.1396@shahroodut.ac.ir
۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، mjalali@shahroodut.ac.ir
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، abedi.moslem@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

شماره صفحات: ۱۳ تا ۳۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11928.1456

واژگان کلیدی	چکیده
صفحه پد بارگذاری سگمنت جک پیشران ماشین حفاری مکانیزه مدل‌سازی آزمایشگاهی مدل‌سازی عددی	در عملیات حفاری تونل با دستگاه حفاری مکانیزه (<i>Tunnel Boring Machine</i>)، بار متمرکز نسبتاً بزرگی توسط جک‌های دستگاه بر قطعات پیش‌ساخته پوشش تونل (سگمنت) اعمال می‌شود. این بار منجر به ایجاد تنش‌های کششی قابل ملاحظه‌ای در ضخامت سگمنت می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در میزان تنش‌های کششی در ضخامت سگمنت، هندسه صفحه‌ی بارگذاری جک پیشران است. در این مطالعه با هدف کاهش میزان تنش‌های کششی در ضخامت سگمنت‌ها، تغییرات ابداعی بر روی هندسه صفحات بارگذاری جک پیشران به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با این هدف، ۱۲ نمونه سگمنت شامل ۶ نمونه با بتن ساده و ۶ نمونه با بتن الیافی، هرکدام در دو حالت با صفحه‌ی بارگذاری متعارف و صفحه‌ی بارگذاری شکافدار پیشنهادی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نیروی ترک‌خوردگی نمونه‌های با صفحه‌ی ابداعی پیشنهادی نسبت به نمونه‌ی متعارف ۳۰ درصد افزایش داشته است. به منظور ارایه روشی برای مدل‌سازی مساله‌ی حاضر، روند مدل‌سازی عددی پیشنهاد شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد مدل‌سازی عددی با روال پیشنهادی به منظور تخمین بار بیشینه در ستاپ پیشنهادی قابل توصیه بوده اما به منظور مدل‌سازی عددی الگوی ترک‌ها همچنان به مطالعات تکمیلی نیاز است.

۱- مقدمه

ایجاد حالت پیچیده‌ای از تنش‌ها می‌شود که اندازه و توزیع آن به دلیل وجود یک منطقه اختلال در زیر انتقال بار (ناحیه *D*) دشوار است (Nogales & de la Fuente, 2020). این موضوع توسط آبنگار در سال ۱۹۶۲ و لئونارد و مونیگ در سال ۱۹۷۸ برای مناطق انتقال در سازه‌های پیش‌تنیده بتن مسلح مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است

حفاری تونل در روش مکانیزه، با ماشین دوار (*TBM*) انجام می‌شود که می‌تواند زمین یا توده سنگ را حفر کند (Wittke, et al., 2007). در حین حفاری بارهای متمرکز زیادی توسط جک‌های *TBM* بر روی آخرین حلقه نصب شده سگمنت‌ها اعمال می‌شود. اعمال بارهای متمرکز باعث

پیکربندی بار خطی بر روی نمونه‌های تقویت شده توسط دو نوع الیاف فولادی را پیگیری کرده‌اند. نتایج بررسی تحلیلی نشان داد، برای بار خطی، ترک‌خوردگی از نوع a/d پاشیدگی کششی در محدوده a/d از ۰/۱۷ تا ۰/۸۳ و در بارگذاری نقطه‌ای در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۹۱ رخ می‌دهد. برای a/d کوچکتر و بزرگتر از مقادیر بیان شده، خرابی از نوع تخریب بتن فشاری غالب می‌شود (Conforti, et al., 2016b). نتایج تجربی نشان می‌دهد الیاف فولادی به‌طور قابل توجهی ظرفیت باربری از هم پاشیدگی کششی (بیشتر از ۳۰ درصد) و شکل‌پذیری منشور بتنی را افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۱۶ میدا و همکاران یک روش آزمایشگاهی جهت ارزیابی رفتار سازه‌ای سگمنت‌های بتنی تحت نیروی پیشران دستگاه حفاری تونل (*TBM*) را ارائه دادند، روش آزمایش و تجهیزات آنها، امکان بازسازی شرایطی را که یک سگمنت تونل در طی نیروی پیشران *TBM* در معرض آن قرار می‌گیرد را ارائه می‌دهد. نتایج آزمایش با الگوهای ترک معمولی که در تونل‌های واقعی یافت می‌شود سازگار است (Meda, et al., 2016). تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد استفاده از میلگرد *GFRP* در سگمنت از نظر رفتار خمشی تفاوت قابل توجهی با میلگرد فولادی ندارد، در مقابل عملکرد بهتری تحت بار متمرکز حاصل شده است (Caratelli, et al., 2017; Spagnuolo, et al., 2017). در سال ۲۰۱۹ میدا و همکارانش امکان استفاده از یک راه حل ترکیبی از سگمنت‌های تونل تقویت شده با بتن حاوی الیاف فلزی و میلگردهای گلاس (*GFRP*) را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. نتایج آزمایش‌های خمشی، نشان داد که استفاده هم‌زمان از الیاف فولادی و میلگرد *GFRP* منجر به افزایش بار بیشینه و کاهش عرض ترک‌ها می‌شود (Meda, et al., 2019). در سال ۲۰۱۹ کانفورتی و همکارانش در یک تحقیق آزمایشگاهی با هدف مقایسه رفتار سازه‌ای، سگمنت‌های ساخته شده با ترکیب آرماتورهای معمولی و الیاف مصنوعی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب این دو در برابر تنش‌های اصلی سگمنت که در فاز اولیه و نهایی نصب آن ایجاد می‌شود، بسیار موثر است (Conforti, et al., 2019). در سال ۲۰۲۰ نوگالس و فوننته به بررسی عددی اثرات نیروی پیشران *TBM* بر روی سگمنت‌های *FRC* پرداختند. نتایج نشان داد مقاومت خمشی باقیمانده

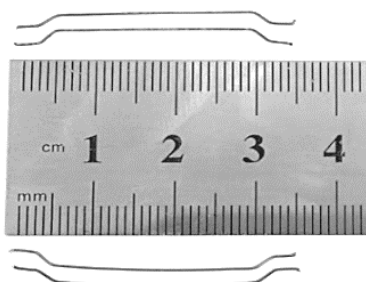
(Iyengar, 1962) و (Leonhardt & Mönnig, 1978). تحقیقات گذشته نشان داده است که افزودن الیاف، منجر به بهبود کنترل ترک‌خوردگی در طی بارگذاری می‌شود و بتن تقویت شده با الیاف در ساخت سگمنت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Chiaia, et al., 2009; de la Fuente, et al., 2014). با وجود اینکه مرحله رانش *TBM* یک مرحله موقت است می‌تواند بر طراحی سگمنت‌های پیش ساخته تونل موثر باشد. این موضوع شایع ترین علت ترک‌خوردگی در ساخت تونل است (Sugimoto, 2006) و (Sugimoto, 2006). در سال ۲۰۱۱ کارتلی و همکاران در یک تحقیق تجربی به ارزیابی تاثیر استفاده از بتن مسلح با الیاف (*FRC*) در سگمنت‌های پیش ساخته تونل به جای بتن مسلح مرسوم (*RC*) پرداختند. در این تحقیق آنها نمونه‌ها را تحت آزمایش خمش قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عملکرد سگمنت از نظر کنترل ترک‌خوردگی با حضور الیاف بهبود می‌یابد (Caratelli, et al., 2011). تیبرتی و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار تنش‌های کششی در ضخامت سگمنت تحت جک‌های هیدرولیکی دستگاه حفاری تونل را با آزمایش نمونه‌های منشوری با و بدون تقویت الیاف پلی‌پروپیلن و در نظر گرفتن دو جهت بتن ریزی مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه‌ها با اعمال هر دو نوع بار نقطه‌ای و بار نواری آزمایش شدند. نتایج آزمایشگاهی این محققین نشان داد استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن ظرفیت باربری منشور بتنی را بیش از ۴۰ درصد و همچنین شکل‌پذیری نمونه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. علاوه بر این جهت بتن ریزی عناصر سازه‌ای بر کشش ایجاد شده در ضخامت سگمنت و ظرفیت باربری نمونه‌ها به دلیل تغییر جهت الیاف، تاثیرگذار است (Tiberti, et al., 2015). در دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در مورد رفتار خمشی و فشاری سگمنت‌ها به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده است (Conforti, et al., 2016a; Conforti, et al., 2017). کانفورتی و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار از هم‌پاشیدگی کششی اعضا بتن مسلح الیافی تحت بار متمرکز زیاد را از نظر تحلیلی و تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در تحقیق خود از دو بار خطی بارخطی و بار نقطه‌ای و تعریف نسبت‌های a/d (a عرض و d عمق عضو بتنی) متفاوت، استفاده کرده‌اند. همچنین یک برنامه آزمایشگاهی بر اساس

بارگذاری متعارف و بار دیگر با صفحه بارگذاری پیشنهادی تحت آزمایش فشار تک محوره بررسی شده‌اند و نتایج شامل نمودار بار-تغییر مکان جانبی و توزیع ترک‌خوردگی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین نمونه‌های مورد بررسی با نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی و تحت بارگذاری مشابه تحلیل شده‌اند و نتایج تحلیل عددی ارائه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

نمونه‌ها شامل دو گروه اصلی با بتن معمولی بامشخصه‌ی PC و نمونه‌های با بتن الیافی با مشخصه‌ی SFRC است. میانگین مقاومت فشاری استوانه‌ی ۲۸ روزه برای گروه‌های PC و SFRC به ترتیب ۴۲ و ۴۴ مگاپاسکال است. الیاف فلزی مورد استفاده به صورت قلاب‌دار به طول ۳۵ میلی‌متر، قطر ۰/۳۸۷ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۹۰ می‌باشد (شکل ۲). مقدار الیاف اضافه شده به بتن به نوع الیاف و عملکرد هدف بستگی دارد، اما ملاحظات اجرایی میزان الیاف را در بتن مسلح معمولی تقریباً به ۱/۵ درصد حجم بتن محدود می‌کنند (Wight & MacGregor, 2020). در این پژوهش مقدار الیاف به میزان ۳۱ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت حجمی ۰/۴ درصد استفاده شده است. در جدول ۱ و شکل ۲، مشخصات الیاف و تصویر الیاف آورده شده است. همچنین در جدول ۲ و جدول ۳، به ترتیب خصوصیات صفحه بارگذاری و صفحه تفلن PTFE ارائه شده است.

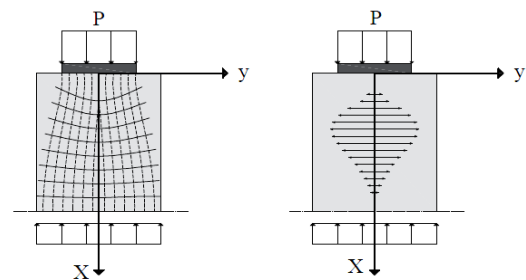


شکل ۲- الیاف فلزی قلاب‌دار مورد استفاده در تحقیق

در این تحقیق از آیین نامه ACI 211 (Dixon, et al., 1997) برای طرح اختلاط بتن استفاده شده که در جدول ۴، مشخصات آن نمایش داده شده است.

برای عرض ترک 0.5 mm تاثیر زیادی در کنترل ترک‌خوردگی دارد و همچنین تقویت ترکیبی (RC+FR) منجر به کاهش عرض ترک می‌شود (Nogales & de la Fuente, 2020). میدا و همکاران در سال ۲۰۲۰ سگمنت های تونل را با ترکیب بتن الیافی و آرماتور گلاس مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد راه حل پیشنهادی منجر به افزایش بار حداکثر به مقدار دو برابر می‌شود (Meda, et al., 2021). در سال ۲۰۲۰ لیو و همکارانش در طی یک مطالعه تجربی و نظری سگمنت‌های بتن مسلح به الیاف فولادی و مصنوعی را بررسی کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مقدار مصرف الیاف تاثیر قابل توجهی بر سختی پس از ترک‌خوردگی سگمنت دارد، در حالی که تاثیر کمی بر ظرفیت باربری نهایی نشان می‌دهد (Liu, et al., 2020).

نحوه توزیع تنش عرضی (در راستای ضخامت) سگمنت‌های بتنی پیش ساخته تونل در اثر بار پدجک‌های دستگاه TBM در شکل ۱، نمایش داده شده است.



شکل ۱- توزیع تنش در ضخامت سگمنت

نیروی اعمالی از طرف سگمنت باعث ایجاد کشش در ضخامت سگمنت می‌شود. به منظور مهار این کشش از آرماتورهای عرضی موسوم به آرماتور نردبانی در قطعات سگمنت استفاده می‌شود. چنانچه با روشی بتوان این تنش‌ها را کاهش داد، آرماتور مصرفی در سگمنت کاهش خواهد یافت. با این هدف تحقیق حاضر می‌کوشد تا با اصلاح هندسه پدهای بارگذاری به هدف دست پیدا کند. مطالعه‌ی حاضر به مطالعه آزمایشگاهی و عددی طرح اصلاحی پیشنهادی می‌پردازد. با این هدف، نمونه‌های بتنی در دو حالت با بتن معمولی و بتنی الیافی یک بار با صفحه‌ی

جدول ۱- مشخصات الیاف

نوع الیاف	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m ³)	طول (mm)	قطر (mm)
الیاف قلابدار	۲۱۰۰۰	۳۰۶۵	۷۸۵۰	۳۵	۰/۳۸

جدول ۲- مشخصات پدهای بارگذاری

نوع فولاد	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m ³)	کرنش نهایی (%)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
ST37	۲۱۰۰۰	۷۸۵۰	۱۵	۳۷۰	۲۴۰

جدول ۳- مشخصات صفحات تفلن (PTFE)

مشخصه	مقدار	واحد
وزن مخصوص	۲/۱۳ تا ۲/۱۹	(gr/cm ³)
مقاومت کششی	بزرگ‌تر از ۲۰	(MPa)
درصد افزایش طول نهایی	بزرگ‌تر از ۲۰۰	(%)
سختی	بزرگ‌تر از ۲۳	(MPa)
مقاومت فشاری در کرنش ۱ درصد	بزرگ‌تر از ۴	(MPa)
ضریب اصطکاک ایستایی	۰/۱ تا ۰/۰۸	-

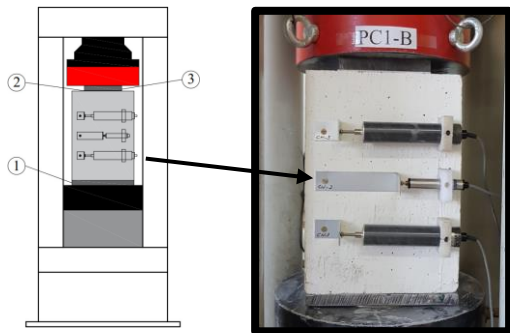
جدول ۴- طرح اختلاط بتن

مصالح	بتن معمولی	بتن الیافی
شن (Kg/m ³)	۷۰۴	۷۰۴
ماسه (Kg/m ³)	۸۱۱	۸۱۱
سیمان (Kg/m ³)	۵۴۳	۵۴۳
آب (Kg/m ³)	۲۲۸	۲۲۸
نسبت آب به سیمان	۰/۴۲	۰/۴۲
نسبت وزنی فوق روان‌کننده به سیمان (%)	۰/۶	۰/۸
الیاف فولادی (Kg/m ³)	۰	۳۱
اسلامپ (mm)	۱۸۰	۱۵۰

۲-۲- پیکربندی و برنامه آزمایش‌ها

در شکل ۳، چگونگی قرارگیری پنج جابجایی‌سنج با علامت اختصاری CH-1 to CH-5 نمایش داده شده است. میزان بازشدگی ترک‌ها توسط تغییر مکان‌سنج (LVDT) در امتداد ارتفاع نمونه در ضلع شمالی و جنوبی اندازه‌گیری شده است. بر اساس تحلیل الاستیک دو بعدی آیینگار ابزار CH-5 و CH-3 در محل حداکثر تنش کششی عرضی از لحاظ

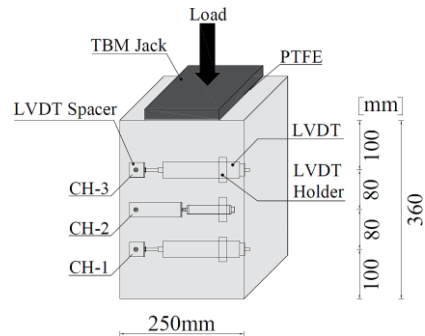
تئوری، یعنی ۰/۴ ضخامت (۱۰۰ میلی‌متر) قرار داده شد (Iyengar, 1962). ابزارهای دیگر (CH-1, CH-2, CH-4) به منظور ثبت انتشار ترک در امتداد ارتفاع نمونه توزیع شده‌اند. جابجایی‌سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع SDP-50_CDP-50_C, HSI0 می‌باشند. وجوه مختلف نمونه در شکل ۳، با جهت‌های اصلی (شمال N، جنوب S، غرب W، شرق E) نمایش داده شده است.



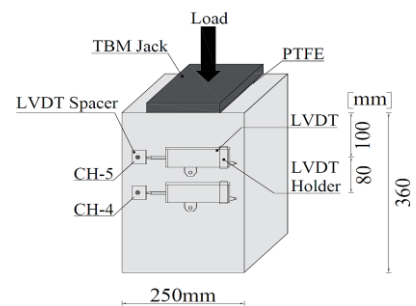
شکل ۴- روش بارگذاری و ادوات اندازه‌گیری بارشدگی ترک

در این مطالعه به منظور کاهش تنش‌های کششی در راستای ضخامت سگمنت ناشی از فشار اعمالی از طرف جک پیشران، صفحه‌ی بارگذاری شکاف‌دار پیشنهاد شده است. با این هدف، در این مطالعه آزمایشگاهی، ۱۲ نمونه به صورت منشوری، به ارتفاع ۳۶۰ میلی‌متر و با مقطع مربع با بعد ۲۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌های مورد بررسی، شامل ۶ نمونه بتن ساده *PC* و ۶ نمونه بتن الیافی *SFRC*، هر کدام در دو حالت با صفحه‌ی بارگذاری متعارف و صفحه‌ی بارگذاری شکاف‌دار، تحت آزمایش فشار تک محوره مورد ارزیابی قرار گرفته است. نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت *X-N-Y* می‌باشد که *X* در دو دسته‌ی *PC* و *SFRC* است که به ترتیب نمونه با بتن معمولی و بتن الیافی را نشان می‌دهد *N* در دو حالت ۱ و ۲ است که در حالت ۱، نمونه با صفحه‌ی بارگذاری متداول و در حالت ۲ نمونه با صفحه‌ی بارگذاری شکاف‌دار پیشنهادی را مشخص می‌کند و در نهایت *Y*، سه حالت *A*، *B* و *C* می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی سه نمونه مورد آزمایش در هر گروه می‌باشد. به طور مثال نمونه *PC-2-A* معرف نمونه با بتن معمولی همراه با صفحه‌ی بارگذاری پیشنهادی می‌باشد که نمونه‌ی *A* آن مدنظر بوده است.

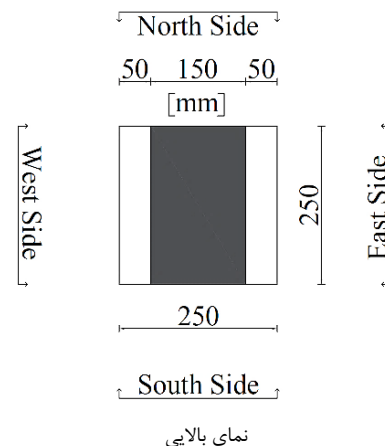
در شکل ۵ و شکل ۶، به ترتیب صفحه متعارف جک پیشران و صفحه با هندسه پیشنهادی قابل مشاهده است. صفحه متعارف دارای ابعاد $250 \times 250 \times 150$ میلی‌متر می‌باشد، صفحه پیشنهادی دارای ابعادی همانند صفحه متعارف اما با تفاوت وجود یک شیار که به اندازه ۳۰ درصد عرض صفحه متعارف کاهش داده شده است، ابعاد شیار $45 \times 250 \times 5$ میلی‌متر می‌باشد. پد بارگذاری متعارف ۱۵۰ میلی‌متر عرض



ابزاربندی نمای شمالی



ابزاربندی نمای جنوبی



نمای بالایی

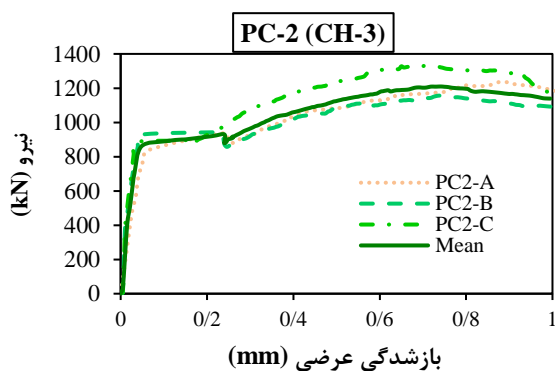
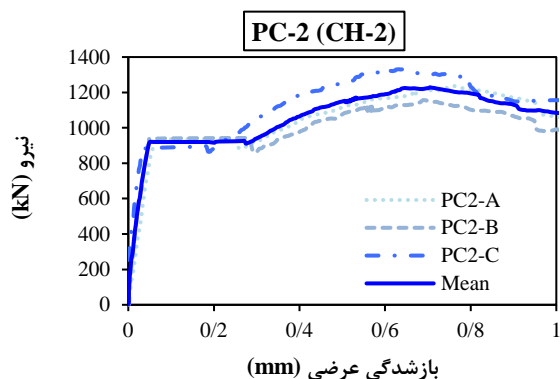
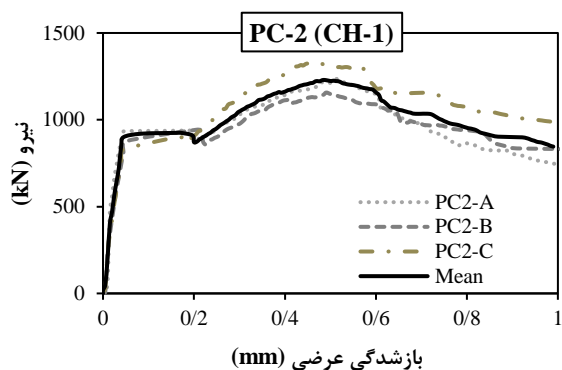
شکل ۳- پیکربندی آزمایش‌ها

در شکل ۴، نمونه‌های مورد آزمایش و مکان قرارگیری جابجایی‌سنج‌ها به‌طور شماتیک نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، برای تست نمونه‌ها از دستگاه تست فشار تک محوره تونی تکنیک با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. آزمایش‌ها به صورت کنترل تغییرمکان انجام شده است. نرخ جابجایی برای همه نمونه‌ها ۰/۰۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

۳- بحث روی نتایج آزمایشگاهی

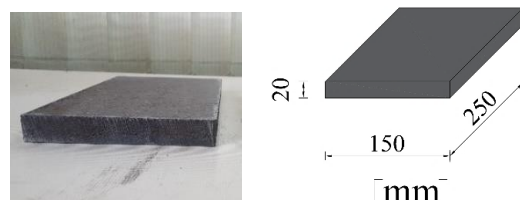
۳-۱- رفتار نیرو-بازشدگی عرضی

نمودار نیرو- جابه‌جایی *LVDT* ها و میانگین آنها برای نمونه *PC-2* و *SFRC-2* به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸، آورده شده است.

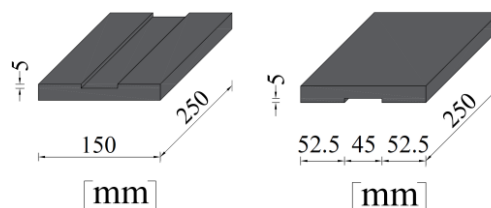


شکل ۷- نمودار بازشدگی عرضی در مقابل نیروی اعمالی

(*a*) و ۲۵۰ میلی‌متر عمق (*d*) دارد که منجر به نسبت *a/d* برابر با ۰/۶ شده است. پد بارگذاری پیشنهادی ۱۰۵ میلی‌متر عرض (*a*) و ۲۵۰ میلی‌متر عمق (*d*) دارد که منجر به نسبت *a/d* برابر با ۰/۴۲ شده است (شکل ۱). مقادیر مختلف *a/d* که تا کنون توسط پژوهش‌گران اتخاذ شده است با این ترتیب است: ۰/۱۱ (Conforti, et al., 2016b)، ۰/۲۵ (Conforti, et al., 2016b)، ۰/۴ (Conforti, et al., 2016b)، ۰/۴۳ (Conforti, et al., 2016b)، ۰/۴۴ (Conforti, et al., 2016b). نسبت انتخابی در تحقیق حاضر بر اساس سگمنت پروژه انتقال آب کانی سیب بوده است.



شکل ۵- هندسه پدهای بارگذاری متعارف



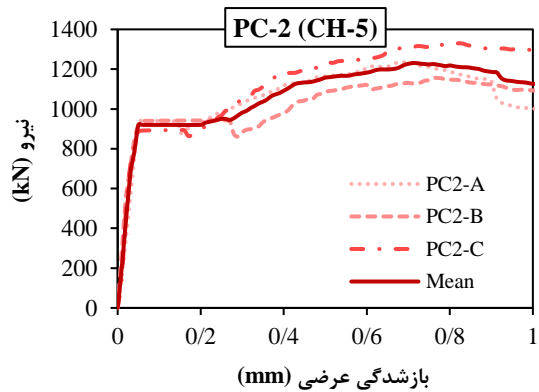
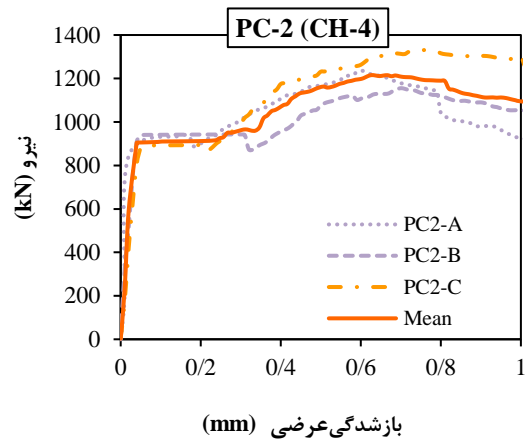
شکل ۶- هندسه پدهای بارگذاری پیشنهادی

جهت کاهش اصطکاک بین بتن و صفحه فولادی در حال بارگذاری ناشی از اختلاف ضریب پواسون فولاد و بتن از یک لایه *Poly Tetra Fluoro Ethylene (PTFE)* ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در واقعیت پدهای جک دستگاہ حفار نیز این صفحات تفلن را دارند.

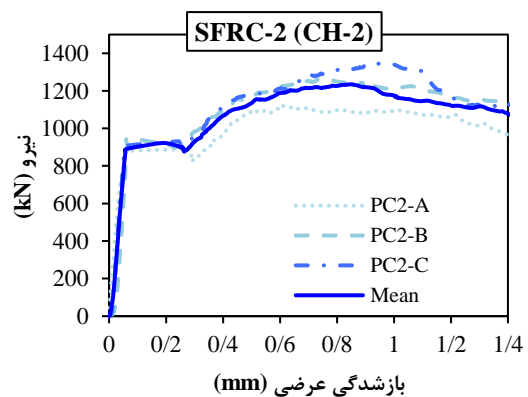
در شکل ۹، بار نهایی و بار ترک‌خوردگی (متناظر با از هم پاشیدگی عرضی در ضخامت سگمنت) مورد مقایسه قرار داده شده‌اند. نتایج مطالعه نشان داده است که در نمونه $PC-1$ ، بار ترک‌خوردگی و نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۷۱۸ و ۱۱۵۵ کیلونیوتن است، در صورتی که در نمونه $PC-2$ ، بار ترک‌خوردگی و نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۹۳۰ و ۱۲۴۳ کیلونیوتن می‌باشد این نتایج نشان‌دهنده افزایش حدود ۳۰ درصدی در بار ترک‌خوردگی و افزایش ۸ درصدی در نیروی حداکثر در نمونه $PC-2$ نسبت به نمونه $PC-1$ می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در نمونه $SFRC-1$ ، بار ترک‌خوردگی و نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۷۲۰ و ۱۳۲۳ کیلونیوتن است در صورتی که در نمونه $SFRC-2$ ، بار ترک‌خوردگی و نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۹۲۸ و ۱۲۴۰ کیلونیوتن می‌باشد. نتایج این قسمت نشان دهنده افزایش حدود ۲۹ درصدی در بار ترک‌خوردگی و کاهش ۶ درصدی در نیروی حداکثر در نمونه $SFRC-2$ نسبت به نمونه $SFRC-1$ می‌باشد. در جدول ۵، خلاصه نتایج آزمایشگاهی از نظر بار ترک‌خوردگی ($P_{splitting}$)، و مقدار بازشدگی ثبت شده توسط هر تقییرمکان‌سنج از کانال ۱ تا ۵ در نمای شمالی و جنوبی نمونه ($WCH-1-N-splitting$ تا $WCH-1-S-splitting$) آورده شده است.

نتایج نمونه بتن الیافی با بتن ساده در جدول ۶ و جدول ۷، مورد مقایسه قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد نیروی حداکثر در نمونه $SFRC-1$ نسبت به نمونه $PC-1$ حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و در دیگر موارد تغییر قابل توجه‌ای در نیروهای قابل تحمل رخ نمی‌دهد. میانگین بازشدگی عرضی در راستای ضخامت سگمنت در بار ترک‌خوردگی در نمونه‌های با پد بارگذاری پیشنهادی نسبت به نمونه‌های با پد بارگذاری متعارف بیشتر بود. همچنین میانگین بازشدگی عرضی در راستای ضخامت سگمنت در بارحداکثر در پد بارگذاری متعارف بیشتر از پد پیشنهادی بود.

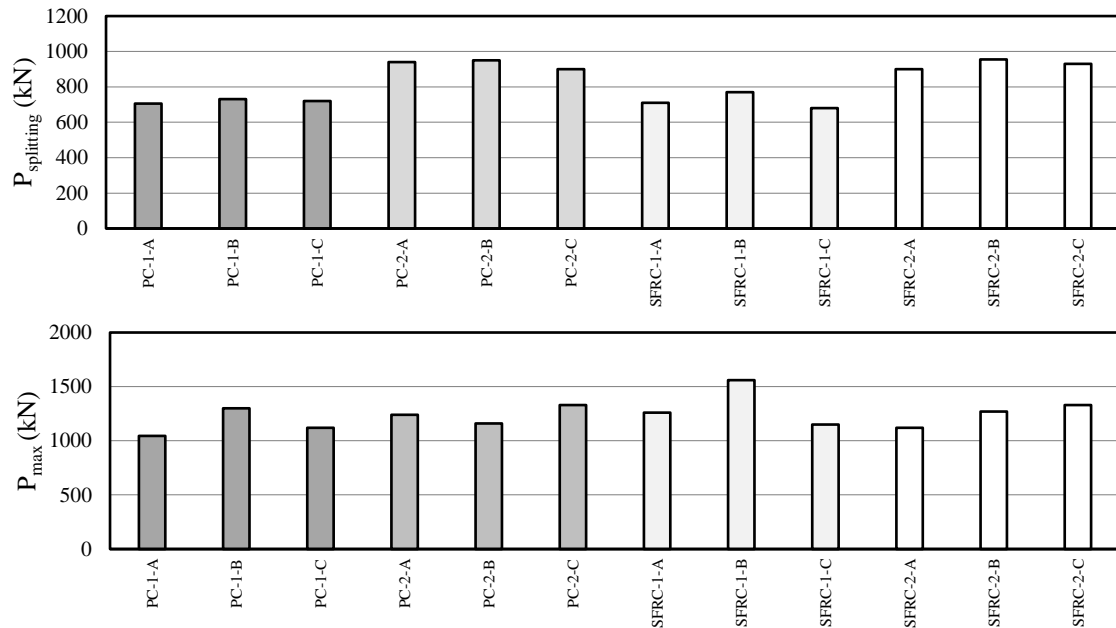
نمونه‌های سری PC-2



ادامه شکل ۷- نمودار بازشدگی عرضی در مقابل نیروی اعمالی نمونه‌های سری PC-2



شکل ۸- نمودار بازشدگی عرضی در مقابل نیروی اعمالی نمونه‌های سری SFRC-2 برای (CH-2).



شکل ۹- مقایسه بار ترک‌خوردگی و بار حداکثر نمونه‌ها

جدول ۵- خلاصه نتایج آزمایشگاهی در $P_{splitting}$

نمونه	$P_{splitting}$ (kN)	$W_{CH-1-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-2-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-3-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-4-S-splitting}$ (mm)	$W_{CH-5-S-splitting}$ (mm)
PC-1-A	۷۰۵	۰/۲۱۰	۰/۲۱۹	۰/۳۰۵	۰/۲۱۰	۰/۲۵۰
PC-1-B	۷۳۰	۰/۱۷۵	۰/۲۶۱	۰/۲۹۰	۰/۱۴۰	۰/۱۵۰
PC-1-C	۷۲۰	۰/۱۶۳	۰/۲۱۳	۰/۲۲۵	۰/۲۰۶	۰/۱۹۴
میانگین PC-1	۷۱۸	۰/۱۸۳	۰/۲۳۱	۰/۲۷۳	۰/۱۸۵	۰/۱۹۸
PC-2-A	۹۴۰	۰/۲۰۵	۰/۲۶۱	۰/۲۶۰	۰/۱۸۰	۰/۱۵۰
PC-2-B	۹۵۰	۰/۲۲۵	۰/۲۹۴	۰/۲۴۵	۰/۲۸۰	۰/۳۲۰
PC-2-C	۹۰۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۸	۰/۱۶۰	۰/۲۱۰	۰/۱۷۰
میانگین PC-2	۹۳۰	۰/۲۰۳	۰/۲۴۸	۰/۲۲۲	۰/۲۳۳	۰/۲۱۳
اختلاف PC-1 با PC-2 (%)	۳۰	۱۱	۸	-۱۹	۲۱	۸
SFRC-1-A	۷۱۱	۰/۱۰۰	۰/۱۳۵	۰/۱۳۴	۰/۱۳۰	۰/۱۸۰
SFRC-1-B	۷۷۰	۰/۲۵۰	۰/۳۰۳	۰/۲۵۰	۰/۱۶۰	۰/۱۷۰
SFRC-1-C	۶۸۰	۰/۲۷۰	۰/۲۸۷	۰/۲۴۵	۰/۱۳۰	۰/۱۷۰
میانگین SFRC-1	۷۲۰	۰/۲۰۶	۰/۲۴۱	۰/۲۰۹	۰/۱۴۰	۰/۱۷۳
SFRC-2-A	۹۰۰	۰/۲۰۵	۰/۲۹۱	۰/۲۶۰	۰/۲۹۰	۰/۲۷۰
SFRC-2-B	۹۵۵	۰/۳۰۰	۰/۴۵۰	۰/۴۴۶	۰/۴۰۰	۰/۴۹۰
SFRC-2-C	۹۳۰	۰/۱۹۵	۰/۲۵۴	۰/۲۰۵	۰/۲۷۰	۰/۲۳۰
میانگین SFRC-2	۹۲۸	۰/۲۳۳	۰/۳۳۰	۰/۳۰۳	۰/۳۲۰	۰/۳۳۰
اختلاف SFRC-1 با SFRC-2 (%)	۲۹	۱۳	۳۷	۴۵	۱۲۹	۹۱

جدول ۶- مقایسه نتایج بتن الیافی و بتن ساده در $P_{splitting}$

نمونه	$P_{splitting}$ (kN)	$W_{CH-1-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-2-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-3-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH-4-S-splitting}$ (mm)	$W_{CH-5-S-splitting}$ (mm)
میانگین PC-1	۷۱۸	۰/۱۸۳	۰/۲۳۱	۰/۲۷۳	۰/۱۸۵	۰/۱۹۸
میانگین SFRC-1	۷۲۰	۰/۲۰۶	۰/۲۴۱	۰/۲۰۹	۰/۱۴۰	۰/۱۷۳
تفاوت SFRC-1 با PC-1 (%)	۰	۱۳	۵	-۲۳	-۲۴	-۱۲
میانگین PC-2	۹۳۰	۰/۲۰۳	۰/۲۴۸	۰/۲۲۲	۰/۲۲۳	۰/۲۱۳
میانگین SFRC-2	۹۲۸	۰/۲۳۳	۰/۳۳۱	۰/۳۰۳	۰/۳۲۰	۰/۳۳۰
تفاوت SFRC-2 با PC-2 (%)	۰	۱۵	۳۴	۳۷	۴۳	۵۵

جدول ۷- مقایسه نتایج بتن الیافی و بتن ساده در P_{max}

نمونه	P_{max} (kN)	$W_{CH-1-N-max}$ (mm)	$W_{CH-2-N-max}$ (mm)	$W_{CH-3-N-max}$ (mm)	$W_{CH-4-S-max}$ (mm)	$W_{CH-5-S-max}$ (mm)
میانگین PC-1	۱۱۵۵	۰/۹۷۳	۱/۳۲۹	۱/۵۴۸	۱/۰۹۷	۰/۹۸۳
میانگین SFRC-1	۱۳۲۳	۰/۸۷۰	۰/۹۵۶	۰/۸۳۸	۰/۹۰۳	۰/۸۷۳
تفاوت SFRC-1 با PC-1 (%)	۱۵	-۱۱	-۲۸	-۴۶	-۱۸	-۱۱
میانگین PC-2	۱۲۴۳	۰/۴۸۸	۰/۶۹۵	۰/۷۷۸	۰/۷۰۶	۰/۷۲۳
میانگین SFRC-2	۱۲۴۰	۰/۵۱۶	۰/۷۵۷	۰/۸۰۰	۰/۷۴۰	۰/۸۵۶
تفاوت SFRC-2 با PC-2 (%)	۰	۶	۹	۳	۵	۱۸

۳-۲- الگوی ترک خوردگی

در شکل ۱۰، الگوهای ترک خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی آورده شده است. در الگوی ترک مربوط به هر نمونه بارهای ثبت شده متناظر با ترک در مراحل مختلف نیز ارائه شده است. در نمونه‌های $PC-1$ و $PC-2$ ترک خوردگی در لبه‌های صفحه بارگذاری ایجاد شده و در امتداد ارتفاع نمونه گسترش یافته است. در نمونه‌های $SFRC-1$ و $SFRC-2$ همانند نمونه‌های با بتن ساده ترک‌ها در لبه‌های صفحه بارگذاری ایجاد شدند ولی به دلیل وجود الیاف تنش در نواحی ری توزیع شد و ریز ترک‌های بیشتری به شکل مخروط ایجاد گردید.

در شکل ۱۱، الگو ترک خوردگی نمونه‌های با صفحه بارگذاری پیشنهادی و صفحه بارگذاری متعارف در دو حالت بتن معمولی و بتن الیافی مورد مقایسه قرار گرفته است. همانگونه که در این شکل قابل مشاهده است در حالت استفاده از بتن معمولی دو مسیر اصلی ترک خوردگی در انتهای صفحه بارگذاری ساده تشکیل شده است در حالی که در استفاده از صفحه بارگذاری شیاردار علاوه بر این دو مسیر

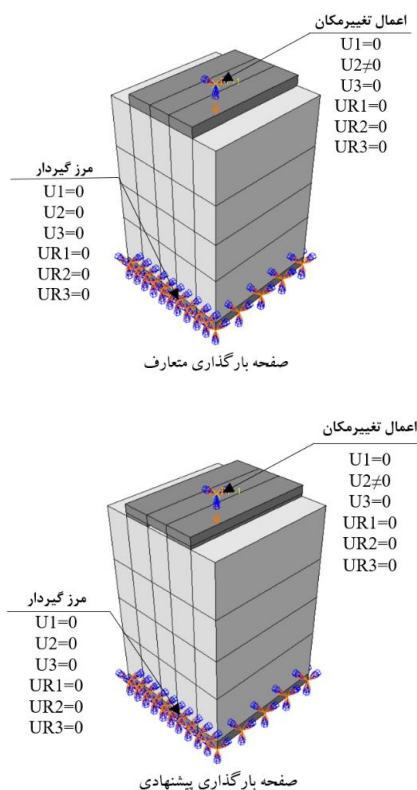
ترک خوردگی، دو مسیر ترک خوردگی دیگر در امتداد لبه‌های شیار میانی شکل گرفته است. این موضوع در مورد بتن الیافی نیز قابل مشاهده است با این تفاوت که در بتن الیافی گستردگی ترک‌ها به وضوح افزایش داشته است و مسیرهای ترک خوردگی انشعابی بیشتر است. به این ترتیب می‌توان گفت به واسطه استفاده از صفحه بارگذاری پیشنهادی تنش‌های کششی در محدوده‌ی وسیع‌تری از ضخامت سگمنت توزیع شده است و از ظرفیت مصالح استفاده بیشتری شده است.

در شکل ۱۲، الگو ترک خوردگی نمونه‌های بتن الیافی با نمونه‌های بتن ساده در دو حالت با صفحه‌ی بارگذاری متعارف و پیشنهادی مورد مقایسه قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌های بتن الیافی ترک‌های بیشتری تشکیل می‌شود که به دلیل پل زدن الیاف به لبه‌های ترک می‌باشد. بعد از ترک خوردن بتن، الیاف وارد عمل شده و باعث توزیع تنش در نواحی گسترده‌تری می‌شوند، در نتیجه ترک‌های بیشتری ایجاد می‌شود.

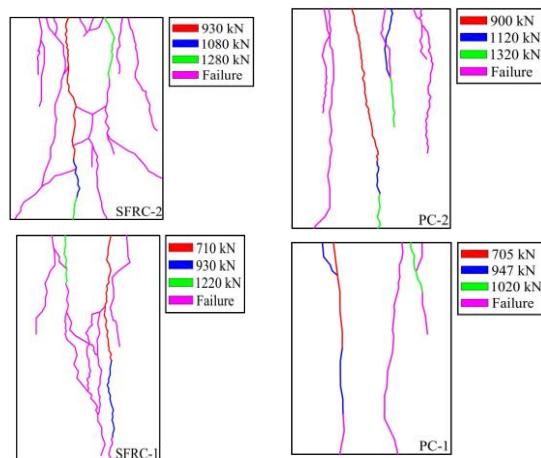
نمونه‌های با بتن الیافی ترک‌های متعددی تشکیل و منتشر می‌شوند. علاوه بر این نتایج نشان دادند ترک‌ها در لبه‌های صفحه بارگذاری ایجاد می‌شوند این امر به دلیل تمرکز تنش در این نواحی می‌باشد. با ایجاد شیار در صفحه بارگذاری در واقع دو ناحیه ی بحرانی برای توزیع ترک‌خوردگی در نمونه وجود دارد که این موضوع منجر به افزایش بار ترک‌خوردگی و افزایش مسیره‌های ترک‌خوردگی در بار نهایی در نمونه‌ها با صفحه بارگذاری شیاردار شده است.

۴- مدل‌سازی عددی

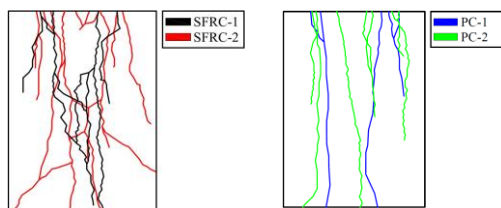
علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های مورد بررسی در نرم‌افزار اجزای محدود *ABAQUS* مدل‌سازی و تحلیل شدند. قطعات با المان پیوسته سه بعدی ۸ گره‌ای و با روش انتگرال گیری کاهش یافته (*C3D8R*) مدل‌سازی شدند. در شکل ۱۳، پیکربندی و شرایط مرزی نمونه‌های مدل‌سازی شده در آباکوس آورده شده‌اند.



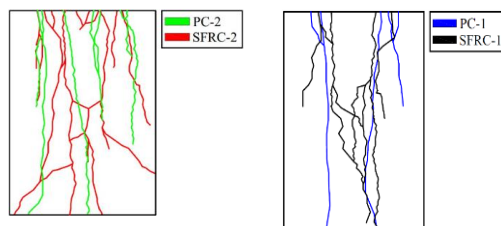
شکل ۱۳- مشخصات و شرایط مرزی مدل‌های عددی



شکل ۱۰- الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی در سطوح مختلف بار



شکل ۱۱- مقایسه الگوی ترک در صفحه بارگذاری ساده و پیشنهادی



شکل ۱۲- مقایسه الگوی ترک در نمونه‌های بتن ساده و بتنی الیافی

با توجه به نتایج حاصل سه مرحله اصلی را می‌توان برای فرآیند ترک‌خوردگی نمونه‌ها تعریف کرد، مرحله اول از شروع بارگذاری تا وقوع ترک *Psplitting*، مرحله دوم- ترک‌خوردگی به تدریج در امتداد ارتفاع نمونه تا رسیدن به حداکثر نیرو گسترش می‌یابد، مرحله سوم بعد از رسیدن به حداکثر نیرو همزمان با افت مقاومت، در نمونه‌های بتن ساده ترک‌ها در امتداد ارتفاع نمونه گسترش می‌یابند ولی در

است. برای مدل‌سازی خصوصیات بتن ساده در ناحیه فشاری از رابطه Saenz (Gooranorimi, et al., 2017) و برای ناحیه کششی از رابطه اصلاح شده نایال و رشید (Wahalathantri et al., 2011) استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی بتن الیافی در ناحیه فشاری از رابطه پیشنهادی کیو و همکارانش (Ou, et al., 2012) و ناحیه کششی از رابطه پیشنهادی شی و همکارانش (Shi, et al., 2020) استفاده شده است. در جدول ۹، روابط مورد استفاده در مدل‌سازی خصوصیات بتن داده شده است. در شکل ۱۴، نتایج مدل‌سازی عددی نمودار نیرو-بازشدگی عرضی نمونه‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.

یک نقطه مرجع به صفحه بارگذاری بالایی کوپل شد و بار قائم به صورت کنترل جابجایی به آن اعمال گردید و پای صفحه بارگذاری تحتانی گیردار مدل‌سازی شد. برای اندرکنش بین صفحه بارگذاری و بتن از قید *Contact* استفاده شد و برای سطح تماس صفحه بارگذاری فوقانی با بتن و صفحه بارگذاری تحتانی با بتن به ترتیب ضریب اصطکاک ۰/۱ و ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی رفتار بتن از مدل خسارت بتن (Concrete Damage Plasticity) CDP استفاده شده است. این مدل دو فرض ترک‌خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری را برای گسیختگی بتن در نظر می‌گیرد. مدل CDP قادر به ایجاد ترک نمی‌باشد ولی محل و راستای ایجاد ترک را پیش‌بینی می‌نماید. پارامترهای پایه مدل CDP در جدول ۸، آورده شده

جدول ۸- مشخصات مدل خسارت بتن در مدل‌سازی عددی

پارامتر ویسکوزیته	K	fb0/fc0	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع
۰/۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۵

جدول ۹- معادلات مورد استفاده در مدل‌سازی مشخصات بتن

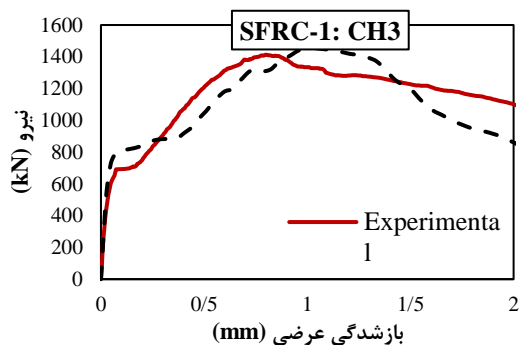
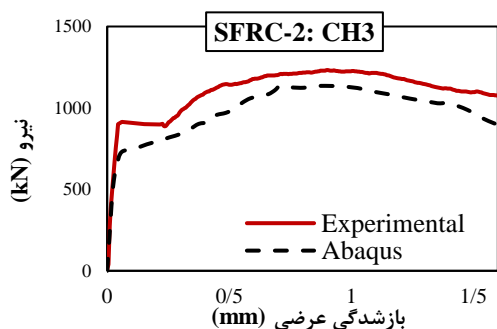
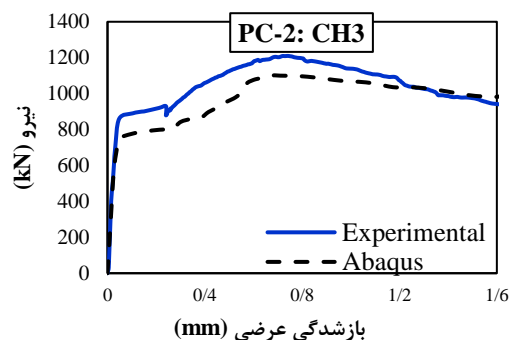
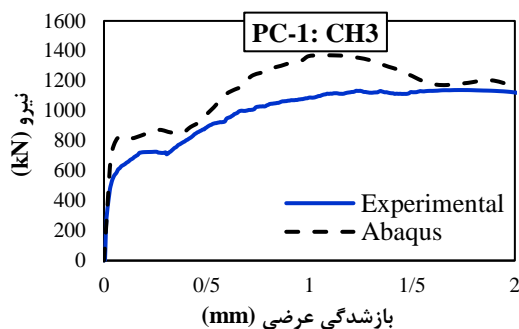
نام رابطه	معادله
Saenz [22]	$\sigma_c = \frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_0 \varepsilon_{max}}{\sigma_{max}} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{max}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{max}} \right)^2}$
Modified Nayal and Rasheed [23]	$\sigma_{t3} = 0.10 \sigma_{t0}, \varepsilon_{t3} = 8.7 \varepsilon_{cr}$ $\sigma_{t2} = 0.45 \sigma_{t0}, \varepsilon_{t2} = 0.4 \varepsilon_{cr}$
Ou, et al [24]	$\beta = 0.71(RI_v)^2 - 2.00(RI_v) + 3.05$ $RI_v = V_f \frac{l}{\phi}$ $\varepsilon_{cf} = \varepsilon_0 + 0.0007(RI_v)$ $\sigma_c = f'_{cf} \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf}} \right)^\beta}$ $f'_{cf} = f'_c + 2.35(RI_v) \text{ (MPa)}$
Shi, et al [25]	$\sigma_{t1} = \alpha_t f_{ct}, \varepsilon_{t1} = \gamma_t \varepsilon_{ct}$ $\sigma_{t2} = \beta_t f_{ct}, \varepsilon_{t2} = 0.0005$

مدل‌سازی عددی به ترتیب ۱۳۷۰، ۱۱۰۱، ۱۴۵۸ و ۱۱۳۸ کیلونیوتن می‌باشد و در نمونه‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۱۱۵۵، ۱۲۴۳، ۱۳۲۳ و ۱۲۴۰ کیلونیوتن به دست

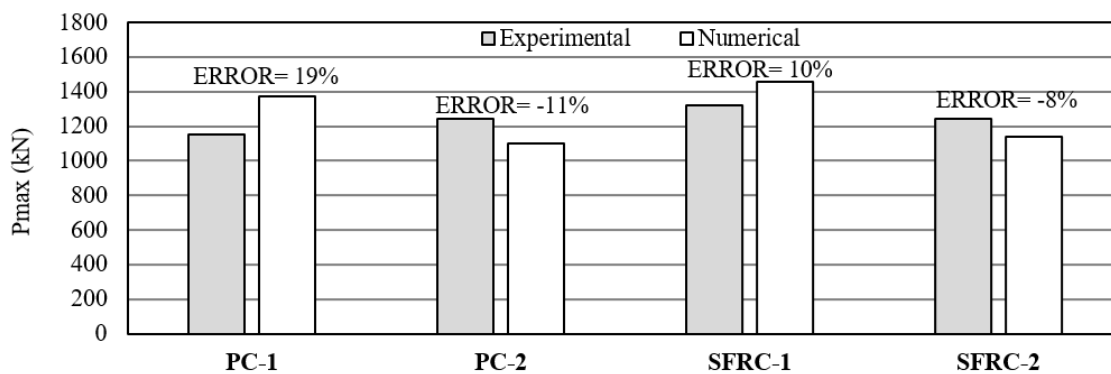
در شکل ۱۵، نیروی حداکثر نمونه‌های آزمایشگاهی با عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. نیروی حداکثر نمونه‌های *PC-1*، *PC-2*، *SFRC-1* و *SFRC-2* در

درصد می‌باشد. در شکل ۱۶ تا شکل ۱۹، نحوه توزیع آسیب در مدل‌سازی عددی با الگوی ترک‌ها مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته شده است. مدل‌سازی عددی به خوبی توانست محل آسیب در نمونه‌ها را نشان دهد.

آمدهاست. همچنین بازشدگی عرضی متناظر با نیروی حداکثر نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی در جدول ۱۰، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. میانگین اختلاف جابجایی افقی مدل‌سازی عددی با آزمایشگاهی برای نمونه‌های *PC-1*، *PC-2*، *SFRC-1* و *SFRC-2* به ترتیب ۳۳، ۱۸، ۱۱ و ۳۰



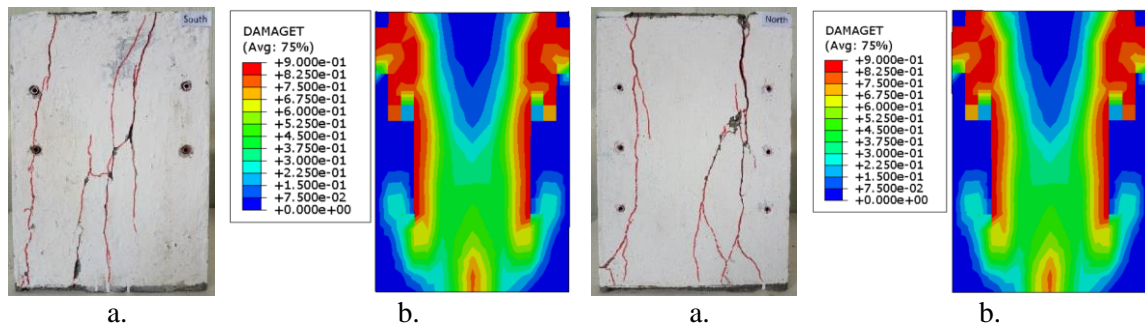
شکل ۱۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی



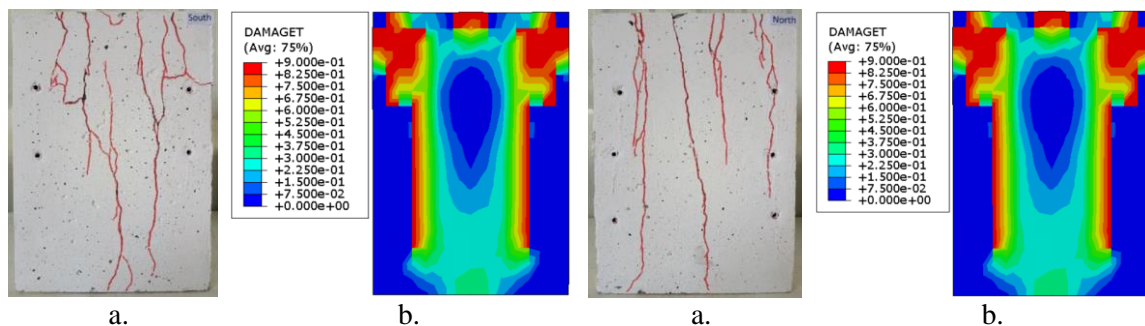
شکل ۱۵- مقایسه بار بیشینه مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۱۰- مقایسه بازشدگی‌های عرضی در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

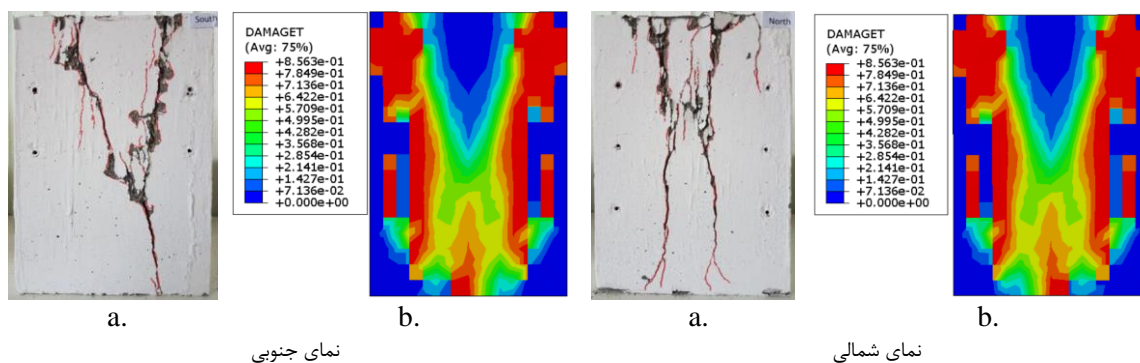
نمونه	W _{CH-1-N-max} (mm)	W _{CH-2-N-max} (mm)	W _{CH-3-N-max} (mm)	W _{CH-4-S-max} (mm)	W _{CH-5-S-max} (mm)	
PC-1	آزمایشگاهی	۰/۹۷۳	۱/۳۲۹	۱/۵۴۸	۱/۰۹۷	۰/۹۸۳
	عددی	۰/۴۲۵	۰/۷۳۱	۱/۰۵	۰/۷۳۱	۱/۰۵
	خطا (%)	-۵۶	-۴۵	-۳۲	-۳۳	۷
PC-2	آزمایشگاهی	۰/۴۸۸	۰/۶۹۵	۰/۷۷۸	۰/۷۰۶	۰/۷۲۳
	عددی	۰/۲۴۶	۰/۵۹۶	۰/۶۷	۰/۵۹۶	۰/۶۷
	خطا (%)	-۵۰	-۱۴	-۱۴	-۱۶	-۷
SFRC-1	آزمایشگاهی	۰/۸۷	۰/۹۵۶	۰/۸۳۸	۰/۹۰۳	۰/۸۷۳
	عددی	۰/۳۷۹	۰/۷۸۲	۱/۰۱	۰/۷۸۲	۱/۰۱
	خطا (%)	-۵۶	-۱۸	۲۰	-۱۳	۱۵
SFRC-2	آزمایشگاهی	۵۱۶	۰/۷۵۷	۰/۸۰۰	۰/۷۴۰	۰/۸۵۶
	عددی	۰/۲۲۷	۰/۴۶۵	۰/۷۱۱	۰/۴۶۵	۰/۷۱۱
	خطا (%)	-۵۶	-۳۹	-۱۱	-۳۷	-۱۷



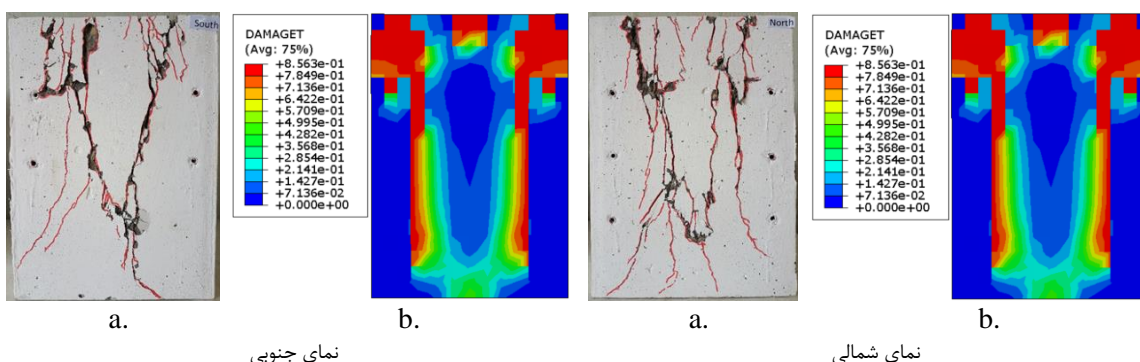
شکل ۱۶- الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های سری PC-1: (a) نتایج آزمایشگاهی (b) نتایج عددی



شکل ۱۷- الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های سری PC-2: (a) نتایج آزمایشگاهی (b) نتایج عددی



شکل ۱۸- الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های سری ۱-SFRC. (a): نتایج آزمایشگاهی (b): نتایج عددی



شکل ۱۹- الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های سری ۲-SFRC. (a): نتایج آزمایشگاهی (b): نتایج عددی

برای نمونه با بتن معمولی به همراه صفحه بارگذاری پیشنهادی (نمونه‌های سری ۲-PC) نسبت به نمونه با بتن معمولی به همراه صفحه بارگذاری معمولی (نمونه‌های سری ۱-PC) به ترتیب در حدود ۳۰ درصد و ۸ درصد بیشتر مشاهده شد.

۲- نتایج آزمایش‌ها نشان داد نیروی قابل تحمل در لحظه وقوع اولین ترک خوردگی برای نمونه با بتن الیافی به همراه صفحه بارگذاری پیشنهادی (نمونه‌های سری ۲-SFRC) نسبت به نمونه با بتن الیافی به همراه صفحه بارگذاری معمولی (نمونه‌های سری ۱-SFRC) در حدود ۲۹ درصد افزایش داشته است. تفاوت معناداری برای نیروی حداکثر این دو سری مشاهده نشد.

۳- نیروی حداکثر در نمونه با بتن الیافی به همراه صفحه بارگذاری معمولی (نمونه‌های سری ۱-SFRC) نسبت به نمونه با بتن معمولی به همراه صفحه بارگذاری معمولی

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر تغییر شکل هندسی صفحه بارگذاری جک‌های پیش‌ران دستگاه حفاری مکانیزه بر مقدار بار بیشینه و توزیع ترک خوردگی قطعات پیش ساخته بتنی بررسی شده است. به این منظور ۱۲ نمونه شامل ۶ نمونه بتن ساده و ۶ نمونه بتن الیافی، هرکدام در دو حالت با صفحه‌ی بارگذاری متعارف و صفحه بارگذاری شکافدار پیشنهادی، تحت آزمایش فشار تک محوره قرار گرفت. همچنین به منظور دستیابی به روش مدل‌سازی قابل اطمینان در خصوص موضوع تحقیق، مدل‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود انجام و نتایج آن در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارزیابی شد. مهم‌ترین نتایج تحقیق به شرح زیر خلاصه شده است.

۱- در مدل‌سازی آزمایشگاهی، نیروی قابل تحمل در لحظه وقوع اولین ترک خوردگی و حداکثر نیروی قابل تحمل

۵- نتایج مدل‌سازی عددی در تخمین بار بیشینه با نتایج آزمایشگاهی تطبیق مناسبی داشته است در حالی که در تعیین عرض ترک خوردگی، مدل عددی به اندازه کافی کار آمد نبوده است. به این ترتیب مدل‌سازی عددی با روال پیشنهادی در این تحقیق به منظور تخمین بار بیشینه ستاپ پیشنهادی قابل استفاده بوده و برای مدل‌سازی الگوی ترک‌ها همچنان به مطالعات تکمیلی نیاز است. عملکرد پدهای پیشنهادی تا این مرحله از تحقیق قابل قبول و مناسب ارزیابی می‌شود. اما برای کاربردهای مهندسی، تحقیق و مطالعات تکمیلی آزمایشگاهی و عددی بر روی سگمنت‌های در مقیاس کامل و با ضخامت‌های مختلف، مقاومت‌های متنوع بتن و مدل‌سازی در حضور آرماتور فولادی مورد نیاز است که توسط نگارنده مسوول مقاله در حال برنامه‌ریزی به منظور انجام در آینده نزدیک می‌باشد.

(نمونه‌های سری $PC-I$) حدود ۱۵ درصد افزایش داشته است.

میانگین بازشدگی ترک‌ها در اولین ترک‌خوردگی و همچنین در حداکثر نیرو برای نمونه با بتن معمولی به همراه صفحه بارگذاری پیشنهادی (نمونه‌های سری $PC-2$) نسبت به نمونه با بتن معمولی به همراه صفحه بارگذاری معمولی (نمونه‌های سری $PC-I$) به ترتیب ۰.۴٪ بیشتر و ۰.۴۳٪ کمتر بود.

۴- میانگین بازشدگی ترک‌ها در اولین ترک‌خوردگی و در حداکثر نیرو برای نمونه با بتن الیافی به همراه صفحه بارگذاری پیشنهادی (نمونه‌های سری $SFRC-2$) نسبت به نمونه با بتن الیافی به همراه صفحه بارگذاری معمولی (نمونه‌های سری $SFRC-I$) به ترتیب ۰.۵۷٪ بیشتر و ۰.۱۷٪ کمتر بود.

۶- مراجع

- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., & Romualdi, P. (2011). Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 284-291 .
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., & Spagnuolo, S. (۲۰۱۶). Precast tunnel segments with GFRP reinforcement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 10-20 .
- Chiaia, B., Fantilli, A. P., & Vallini, P. (2009). Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings. *Engineering Structures*, 31(7), 1600-1606 .
- Conforti, A., Tiberti, G., & Plizzari, G. A. (2016a). Combined effect of high concentrated loads exerted by TBM hydraulic jacks. *Magazine of Concrete Research*, 68(21), 1122-1132. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.0043>.
- Conforti, A., Tiberti, G., & Plizzari, G. A. (2016b). Splitting and crushing failure in FRC elements subjected to a high concentrated load. *Composites Part B: Engineering*, 105, 82-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.032>
- Conforti, A., Tiberti, G., Plizzari, G. A., Caratelli, A., & Meda, A. (2017). Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.005>
- Conforti, A., Trabucchi, I., Tiberti, G., Plizzari, G. A., Caratelli, A., & Meda, A. (2019). Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers. *Engineering Structures*, 199, 109628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109628>

- de la Fuente, A., Blanco, A., Pujadas, P., & Aguado, A. (2014). Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles. *Hormigón y Acero*, 65(274), 267-279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hya.2014.11.002>
- Dixon, D., Secretary, Burg, G. R. U., Abdun-Nur, E., Barton, S. G., Bell, L., Blas, S. J., Ramon, Carrasquillo, Carrasquillo, P., Carter, A. C., Conrey, M. T., Cook, J., Cook, R. A., Cordon, W., Costa, W. J., Abdun-Nurt, E. A., Barringer-t, W. L., Bennett, J., . . . Roget, J. (1997). ACI 211 . 191. In *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal , Heavyweight , and Mass Concrete*: Reported by ACI Committee 211.
- Gooranorimi, O., Suaris, W., & Nanni, A. (۲۰۱۷). A model for the bond-slip of a GFRP bar in concrete. *Engineering Structures*, 146, 34-42 .
- Iyengar, K. (1962). Two-Dimensional Theories of Anchorage Zone Stresses in Post-Tensioned Prestressed Beams .
- Leonhardt, F., & Mönnig, E. (1978). *Casi speciali di dimensionamento nelle costruzioni in c.a. e c.a.p.* Edizioni di Scienza e Tecnica. <https://books.google.com/books?id=WvIJcgAACAAJ>
- Liu, X., Sun, Q., Yuan, Y., & Taerwe, L. (2020). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103506>
- Meda, A., Rinaldi, Z., Caratelli, A., & Cignitti, F. (2016). Experimental investigation on precast tunnel segments under TBM thrust action. *Engineering Structures*, 119, 174-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.049>
- Meda, A., Rinaldi, Z., Spagnuolo, S., De Rivaz, B., & Giamundo, N. (2019). Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 100-112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.016>
- Meda, A., Rinaldi, Z., Spagnuolo, S., & Eddie, C. M. (2021). Behaviour of FRC segments with GFRP cage under TBM thrust in presence of GAPS. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103669. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103669>
- Nogales, A., & de la Fuente, A. (2020). Crack width design approach for fibre reinforced concrete tunnel segments for TBM thrust loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103342 .
- Ou, Y.-C., Tsai, M.-S., Liu, K.-Y., & Chang, K.-C. (2012). Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), 207-215 .
- Shi, X., Park, P., Rew, Y., Huang, K., & Sim, C. (2020). Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. *Construction and Building Materials*, 233, 117316 .
- Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., & Nanni, A. (2017). Precast concrete tunnel segments with GFRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 21(5), 04017020 .

- Sugimoto, M. (2006). Causes of shield segment damages during construction. International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling ,
- Tiberti, G., Conforti, A., & Plizzari, G. A. (2015). Precast segments under TBM hydraulic jacks: Experimental investigation on the local splitting behavior .*Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 438-450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.08.013>
- Wahalathantri, B., Thambiratnam, D., Chan, T., & Fawzia, S. (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing ,
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2020). *Reinforced concrete mechanics and design* .
- Wittke ,W., Erichsen, C., & Gattermann, J. (2007). Stability analysis and design for mechanized tunnelling. *Geotechnical Engineering in Research and Practice*, 581 .

Experimental and numerical study on slotted loading Plates in tunnel boring machine thrust jacks

Research Article

M. Shahbazi¹; M. Jalali^{2*}; M. Abedi³

1- MSc; Civil engineering Department, Shahrood University of Technology, shahbazmajid98@gmail.com

2- Assistant Professor; Civil engineering Department, Shahrood University of Technology, mei.jalali@gmail.com

3- MSc; Civil engineering Department, Shahrood University of Technology, abedi.mslm@gmail.com

Received: 16 May 2022; Accepted: 19 Jun 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.11928.1456

Keywords

Loading pad plate
Segment
Thrust jack
Experimental modeling
Tunnel boring machine (TBM)
Numerical modeling

Final English Extended Abstract

Summary

In tunnel drilling operations using tunnel boring machine (TBM), a relatively large concentrated load is applied by the device jacks to the prefabricated parts or segments of the tunnel cover. This load leads to significant tensile stresses in the segments. One of the most important parameters affecting the tensile stresses in the segments is the geometry of the loading plates of the trust jacks. In this study, with the aim of reduction of the values of tensile

stresses in the segments, the innovative changes in the geometry of the loading plates of the propulsion jacks have been evaluated experimentally and numerically.

Introduction

Tunnel boring machines (TBMs) are commonly used for construction of tunnels in urban areas. Linings of tunnels constructed using TBMs consist of set of concrete segments, which form a ring at each step of construction. In order to move forward, the TBM inserts a great load through thrust jacks resting on the segments of the tunnel. This load causes to have significant tensile stresses in the segments. The geometry of the loading plates of the trust jacks can greatly influence these tensile stresses in the segments. In this research work, an experimental and numerical study is made on the geometry of the loading plates of the trust jacks, and the results are discussed in this paper.

Methodology and Approaches

12 segment samples including 6 samples with plain concrete and 6 samples with fibrous concrete, each in two modes with conventional loading plate and the proposed slotted loading plate, have been examined. Abaqus software has been employed for numerical modeling in this study.

Results and Conclusions

The results show that the cracking force (capacity) of the samples with the proposed innovative plate has increased by 30% compared to the conventional samples. In order to provide a method for modeling the current problem, the modeling process has been presented and its results have critically been compared with laboratory results. The force obtained from the results of numerical modeling using the Abaqus software is in good agreement with the laboratory model, and therefore, the numerical modeling result in prediction the amount of force is recommended.