

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

مطالعه آزمایشگاهی بارگذاری جک‌های پیشران دستگاه حفاری مکانیزه تونل بر  
روی قطعات پیش ساخته بتن مسلح سگمنت

نگارنده:

مجید شهبازی

استاد راهنما:

دکتر میثم جلالی

تیر ماه ۱۴۰۰

## تقدیم به:

همه کسانی که بخطای بعد انسانی و وجدانی خود را فراموش نمی‌کنند و بر آستان کران سنگ انسانیت سرفرو

می‌آورند و انسان را با همه تفاوت‌هایش ارج می‌نهند.

## شکر و قدردانی:

حال که مراحل این پایان نامه روبه اتمام نهاده، لازم می‌دانم تا از کلیه عزیزانی که در پی نمودن این راه ایجاب ریاکاری نموده‌اند، مراتب امتنان و شکر خالصانه را داشته باشم.

ابتداء بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و پشتیبانی‌های بی‌دریغ و راهبانی‌های صبورانه استاد محترم و معزز، جناب آقای دکتر شتم جلالی که راهبانی این پایان نامه را بر عهده داشته‌اند، شکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم.

همچنین از جناب آقای مهندس منصور جامعی که در مراحل مختلف پایان نامه مرایاری نموده‌اند و نقشی مکمل و ارزنده در انجام آن داشتند سپاسگزارم، و موفقیت ایشان در مراحل مختلف زندگی را از خداوند متعال خواستارم.

در انتها از تمامی دوستان عزیزم که به اشکال مختلف در طول مدت انجام این تحقیق مرایاری رسانند، شکر و قدردانی می‌نمایم.

مجید شهبازی

تیرماه ۱۴۰۰

## تعهد نامه

اینجانب **مجید شهبازی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران** گرایش **مهندسی سازه** دانشکده **مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود** نویسنده پایان نامه با عنوان مطالعه آزمایشگاهی بارگذاری جک های پیشران دستگاه حفاری مکانیزه تونل بر روی قطعات پیش ساخته بتن مسلح سگمنت تحت راهنمایی **دکتر میثم جلالی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ .....

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

## چکیده

پوشش نهایی تونل‌های حفاری شده به روش مکانیزه، از نوع قطعات پیش ساخته بتن مسلح به نام سگمنت تشکیل شده است. طراحی سازه سگمنت برای انواع بارهای وارده شامل بار خاک (سنگ) پیرامونی، بار آب خارجی، بارهای لرزه‌ای، بارهای حین ساخت و... انجام می‌شود. یکی از بارهای مهم در طراحی سگمنت‌ها بار ناشی از جک‌های پیشران دستگاه حفار می‌باشد که می‌تواند یکی از عوامل بروز آسیب به سگمنت‌ها نیز باشد.

در عملیات حفاری توسط دستگاه حفاری مکانیزه تونل، رینگ کامل سگمنت به عنوان تکیه گاه تمام یا بخشی از نیروی پیشران عمل می‌کند، این موضوع منجر به وجود آمدن نیروهای کششی در ضخامت سگمنت می‌شود.

هدف از این پایان نامه ارزیابی آزمایشگاهی یک ایده جدید به منظور کاهش نیروهای وارده از طرف جک پیشران به واسطه اصلاح شکل هندسه بارگذاری صفحات جکهای پیشران می‌باشد. بدین منظور ۱۲ نمونه شامل ۶ نمونه بتن ساده (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) و ۶ نمونه بتن الیافی (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین مقاومت فشاری بتن در این تحقیق به طور میانگین ۴۲ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری هندسه پیشنهادی برای صفحات بارگذاری در حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: سگمنت، جک پیشران، ماشین حفاری مکانیزه، نیروی کششی.

## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه.....
۴	۲-۱- ضرورت و اهمیت پژوهش.....
۵	۳-۱- ساختار پایان نامه.....
۶	فصل ۲: مروری بر پیشینه تحقیق
۷	۳-۲- مقدمه.....
۷	۴-۲- پیشینه تحقیق.....
۱۶	فصل ۳: ایده اصلاح شکل هندسی پدهای TBM
۲۰	فصل ۴: معرفی خصوصیات مصالح، طرح اختلاط، نحوه ساخت و عمل آوری بتن
۲۱	۳-۴- مقدمه.....
۲۱	۴-۴- مصالح مورد استفاده در بتن.....
۲۱	۴-۴-۱- سیمان.....
۲۲	۴-۴-۲- سنگ دانه.....
۲۶	۴-۴-۳- فوق روان کننده.....
۲۶	۴-۴-۴- آب.....
۲۷	۴-۴-۵- الیاف فلزی.....
۲۸	۴-۵- طرح اختلاط.....
۳۰	۴-۶- ساخت و عمل آوری نمونه ها.....
۳۳	فصل ۵: آزمایشات انجام شده و تفسیر نتایج آزمایشگاهی
۳۴	۱-۵- مقدمه.....
۳۴	۲-۵- دستگاه ابزار دقیق.....
۳۴	۵-۲-۱- جابجایی سنج (LVDT).....
۳۵	۵-۲-۲- دیتالاگر.....
۳۵	۵-۲-۳- جک بتن شکن.....
۳۶	۵-۳- مقاومت فشاری بتن.....
۳۸	۵-۴- نحوه اعمال بار گذاری.....
۳۹	۵-۵- نمونه های سگمنت.....
۴۲	۵-۶- چیدمان آزمایش.....

۴۳	۷-۵- نحوه انجام آزمایش
۴۶	۸-۵- مشاهدات آزمایشها
۴۶	۱-۸-۵- آزمایش مرحله اول
۴۶	۱-۱-۸-۵- نمونه PC1-A
۵۲	۲-۱-۸-۵- نمونه PC1-B
۵۷	۳-۱-۸-۵- نمونه PC1-C
۶۲	۲-۸-۵- آزمایش مرحله دوم
۶۲	۴-۲-۸-۵- نمونه PC2-A
۶۷	۵-۲-۸-۵- نمونه PC2-B
۷۲	۶-۲-۸-۵- نمونه PC2-C
۷۷	۳-۸-۵- آزمایش مرحله سوم
۷۷	۷-۳-۸-۵- نمونه SFRC1-A
۸۲	۸-۳-۸-۵- نمونه SFRC1-B
۸۷	۹-۳-۸-۵- نمونه SFRC1-C
۹۲	۴-۸-۵- آزمایش مرحله چهارم
۹۲	۱۰-۴-۸-۵- نمونه SFRC2-A
۹۷	۱۱-۴-۸-۵- نمونه SFRC2-B
۱۰۲	۱۲-۴-۸-۵- نمونه SFRC2-C
۱۰۷	۹-۵- تفسیر نتایج پلیت ساده و پیشنهادی
۱۱۷	<b>فصل ۶: رابطه تحلیلی</b>
۱۱۸	۳-۶- رابطه تحلیلی
۱۱۹	۱-۳-۶- پد ساده
۱۱۹	۲-۳-۶- پد تغییر شکل یافته
۱۲۲	<b>فصل ۷: جمع بندی و پیشنهادها</b>
۱۲۳	۱-۷- جمع بندی و نتیجه گیری
۱۲۴	۲-۷- پیشنهادها
۱۲۶	<b>مراجع</b>
۱۳۰	<b>Abstract</b>



## فهرست اشکال

- شکل ۲-۱: چیدمان نمونه‌های آزمایشگاهی در تحقیق تیبرتی [۲] ..... ۸
- شکل ۲-۲: چیدمان آزمایش و محل قرارگیری تکیه گاه‌ها در سگمنت [۴] ..... ۱۰
- شکل ۲-۳: نمودار نیرو-جابجایی [۵] ..... ۱۰
- شکل ۲-۴: نمودار نیرو-جابجایی [۷] ..... ۱۲
- شکل ۲-۵: نمودار نیرو-جابجایی [۸] ..... ۱۳
- شکل ۲-۶: نمونه‌ها و چیدمان آزمایش در تحقیق مدا [۱۰] ..... ۱۴
- شکل ۲-۷: چیدمان آزمایش در تحقیق لیو [۱۱] ..... ۱۵
- شکل ۳-۱: نصب سگمنت توسط TBM [۱۰] ..... ۱۷
- شکل ۳-۲: قرارگیری کفشک‌ها بر روی سگمنت [۱۴] ..... ۱۸
- شکل ۳-۳: صفحه متعارف جک پیشران ..... ۱۸
- شکل ۳-۴: صفحه با هندسه پیشنهادی ..... ۱۹
- شکل ۴-۱: دستگاه لرزاننده الک ..... ۲۳
- شکل ۴-۲: منحنی دانه‌بندی ماسه ..... ۲۴
- شکل ۴-۳: منحنی دانه‌بندی شن ..... ۲۵
- شکل ۴-۴: الیاف فلزی قلاب‌دار ..... ۲۸
- شکل ۴-۵: ماشین مخلوط کن بتن ..... ۲۹
- شکل ۴-۶: قالب نمونه‌ها ..... ۳۰
- شکل ۴-۷: ساخت نمونه‌ها ..... ۳۱
- شکل ۴-۸: عمل آوری نمونه‌ها ..... ۳۲
- شکل ۵-۱: جابجایی سنج ..... ۳۴
- شکل ۵-۲: دیتالاگر ..... ۳۵
- شکل ۵-۳: جک بتن شکن ..... ۳۶
- شکل ۵-۴: نمونه مکعبی قبل از آزمایش ..... ۳۸
- شکل ۵-۵: شمال نمونه (ابعاد به میلی‌متر) ..... ۴۰
- شکل ۵-۶: جنوب نمونه (ابعاد به میلی‌متر) ..... ۴۰
- شکل ۵-۷: نمای بالا نمونه (ابعاد به میلی‌متر) ..... ۴۱
- شکل ۵-۸: سگمنت خط ۲ مترو شیراز [۲۵] ..... ۴۱
- شکل ۵-۹: چیدمان آزمایش ..... ۴۲
- شکل ۵-۱۰: پلیت ساده ..... ۴۳
- شکل ۵-۱۱: پلیت پیشنهادی ..... ۴۳

- شکل ۵-۱۲: لایه پلی تترا فلورواتیلن قبل از انجام آزمایش ..... ۴۴
- شکل ۵-۱۳: لایه پلی تترا فلورواتیلن بعد از انجام آزمایش ..... ۴۴
- شکل ۵-۱۴: اولین ترک در نمونه PC1-A ..... ۴۷
- شکل ۵-۱۵: شمال نمونه PC1-A ..... ۴۷
- شکل ۵-۱۶: جنوب نمونه PC1-A ..... ۴۷
- شکل ۵-۱۷: غرب نمونه PC1-A ..... ۴۸
- شکل ۵-۱۸: شرق نمونه PC1-A ..... ۴۸
- شکل ۵-۱۹: کانال ۳ در نمای شمال نمونه PC1-A ..... ۴۸
- شکل ۵-۲۰: کانال ۲ در نمای شمال نمونه PC1-A ..... ۴۹
- شکل ۵-۲۱: کانال ۱ در نمای شمال نمونه PC1-A ..... ۴۹
- شکل ۵-۲۲: کانال ۵ در نمای جنوب نمونه PC1-A ..... ۵۰
- شکل ۵-۲۳: کانال ۴ در نمای جنوب نمونه PC1-A ..... ۵۰
- شکل ۵-۲۴: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC1-A ..... ۵۱
- شکل ۵-۲۵: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC1-A ..... ۵۱
- شکل ۵-۲۶: اولین ترک در نمونه PC1-B ..... ۵۲
- شکل ۵-۲۷: شمال نمونه PC1-B ..... ۵۳
- شکل ۵-۲۸: جنوب نمونه PC1-B ..... ۵۳
- شکل ۵-۲۹: غرب نمونه PC1-B ..... ۵۳
- شکل ۵-۳۰: شرق نمونه PC1-B ..... ۵۳
- شکل ۵-۳۱: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC1-B ..... ۵۴
- شکل ۵-۳۲: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC1-B ..... ۵۴
- شکل ۵-۳۳: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC1-B ..... ۵۴
- شکل ۵-۳۴: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC1-B ..... ۵۵
- شکل ۵-۳۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC1-B ..... ۵۵
- شکل ۵-۳۶: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC1-B ..... ۵۶
- شکل ۵-۳۷: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC1-B ..... ۵۶
- شکل ۵-۳۸: اولین ترک در نمونه PC1-C ..... ۵۷
- شکل ۵-۳۹: شمال نمونه PC1-C ..... ۵۸
- شکل ۵-۴۰: جنوب نمونه PC1-C ..... ۵۸
- شکل ۵-۴۱: غرب نمونه PC1-C ..... ۵۸
- شکل ۵-۴۲: شرق نمونه PC1-C ..... ۵۸
- شکل ۵-۴۳: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC1-C ..... ۵۹

- شکل ۵-۴۴: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC1-C ..... ۵۹
- شکل ۵-۴۵: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC1-C ..... ۵۹
- شکل ۵-۴۶: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC1-C ..... ۶۰
- شکل ۵-۴۷: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC1-C ..... ۶۰
- شکل ۵-۴۸: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC1-C ..... ۶۱
- شکل ۵-۴۹: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC1-C ..... ۶۱
- شکل ۵-۵۰: اولین ترک در نمونه PC2-A ..... ۶۳
- شکل ۵-۵۱: شمال نمونه PC2-A ..... ۶۳
- شکل ۵-۵۲: جنوب نمونه PC2-A ..... ۶۳
- شکل ۵-۵۳: غرب نمونه PC2-A ..... ۶۳
- شکل ۵-۵۴: شرق نمونه PC2-A ..... ۶۳
- شکل ۵-۵۵: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-A ..... ۶۴
- شکل ۵-۵۶: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-A ..... ۶۴
- شکل ۵-۵۷: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-A ..... ۶۴
- شکل ۵-۵۸: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-A ..... ۶۵
- شکل ۵-۵۹: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-A ..... ۶۵
- شکل ۵-۶۰: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-A ..... ۶۶
- شکل ۵-۶۱: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-A ..... ۶۶
- شکل ۵-۶۲: اولین ترک در نمونه PC2-B ..... ۶۷
- شکل ۵-۶۳: شمال نمونه PC2-B ..... ۶۸
- شکل ۵-۶۴: جنوب نمونه PC2-B ..... ۶۸
- شکل ۵-۶۵: غرب نمونه PC2-B ..... ۶۸
- شکل ۵-۶۶: شرق نمونه PC2-B ..... ۶۸
- شکل ۵-۶۷: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-B ..... ۶۹
- شکل ۵-۶۸: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-B ..... ۶۹
- شکل ۵-۶۹: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-B ..... ۶۹
- شکل ۵-۷۰: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-B ..... ۷۰
- شکل ۵-۷۱: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-B ..... ۷۰
- شکل ۵-۷۲: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-B ..... ۷۱
- شکل ۵-۷۳: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-B ..... ۷۱
- شکل ۵-۷۴: اولین ترک در نمونه PC2-C ..... ۷۲
- شکل ۵-۷۵: شمال نمونه PC2-C ..... ۷۳

- شکل ۵-۷۶: جنوب نمونه PC2-C ..... ۷۳
- شکل ۵-۷۷: غرب نمونه PC2-C ..... ۷۳
- شکل ۵-۷۸: شرق نمونه PC2-C ..... ۷۳
- شکل ۵-۷۹: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-C ..... ۷۴
- شکل ۵-۸۰: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-C ..... ۷۴
- شکل ۵-۸۱: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-C ..... ۷۴
- شکل ۵-۸۲: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-C ..... ۷۵
- شکل ۵-۸۳: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-C ..... ۷۵
- شکل ۵-۸۴: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-C ..... ۷۶
- شکل ۵-۸۵: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-C ..... ۷۶
- شکل ۵-۸۶: اولین ترک در نمونه SFRC1-A ..... ۷۷
- شکل ۵-۸۷: شمال نمونه SFRC1-A ..... ۷۸
- شکل ۵-۸۸: جنوب نمونه SFRC1-A ..... ۷۸
- شکل ۵-۸۹: غرب نمونه SFRC1-A ..... ۷۸
- شکل ۵-۹۰: شرق نمونه SFRC1-A ..... ۷۸
- شکل ۵-۹۱: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A ..... ۷۹
- شکل ۵-۹۲: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A ..... ۷۹
- شکل ۵-۹۳: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A ..... ۷۹
- شکل ۵-۹۴: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-A ..... ۸۰
- شکل ۵-۹۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-A ..... ۸۰
- شکل ۵-۹۶: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-A ..... ۸۱
- شکل ۵-۹۷: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-A ..... ۸۱
- شکل ۵-۹۸: شمال نمونه SFRC1-B ..... ۸۲
- شکل ۵-۹۹: جنوب نمونه SFRC1-B ..... ۸۲
- شکل ۵-۱۰۰: غرب نمونه SFRC1-B ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۰۱: شرق نمونه SFRC1-B ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۰۲: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۰۳: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B ..... ۸۴
- شکل ۵-۱۰۴: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B ..... ۸۴
- شکل ۵-۱۰۵: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-B ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۰۶: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-B ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۰۷: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-B ..... ۸۶

- شکل ۵-۱۰۸: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-B ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰۹: اولین ترک در نمونه SFRC1-C ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۱۰: شمال نمونه SFRC1-C ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱۱: جنوب نمونه SFRC1-C ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱۲: غرب نمونه SFRC1-C ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱۳: شرق نمونه SFRC1-C ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱۴: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۱۵: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۱۶: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۱۷: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-C ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۱۸: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-C ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۱۹: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-C ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۲۰: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-C ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۲۱: اولین ترک در نمونه SFRC2-A ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۲۲: شمال نمونه SFRC2-A ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲۳: جنوب نمونه SFRC2-A ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲۴: شمال نمونه SFRC2-A ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲۵: جنوب نمونه SFRC2-A ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲۶: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲۷: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲۸: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲۹: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-A ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۳۰: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-A ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۳۱: نمودار نیرو- جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-A ..... ۹۶
- شکل ۵-۱۳۲: نمودار نیرو- جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-A ..... ۹۶
- شکل ۵-۱۳۳: اولین ترک در نمونه SFRC2-B ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۳۴: شمال نمونه SFRC2-B ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۳۵: جنوب نمونه SFRC2-B ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۳۶: غرب نمونه SFRC2-B ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۳۷: شرق نمونه SFRC2-B ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۳۸: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۳۹: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B ..... ۹۹

- شکل ۵-۱۴۰: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۴۱: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-B ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۴۲: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-B ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۴۳: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-B ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۴۴: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-B ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۴۵: اولین ترک در نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۴۶: شمال نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۴۷: جنوب نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۴۸: غرب نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۴۹: شرق نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۵۰: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۵۱: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۵۲: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۵۳: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۵۴: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۵۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۵۶: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-C ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۵۷: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه PC1 و SFRC1 ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۵۸: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه PC1 و SFRC1 ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۵۹: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۳ نمونه PC1 و SFRC1 ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶۰: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۴ نمونه PC1 و SFRC1 ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶۱: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۵ نمونه PC1 و SFRC1 ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶۲: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه PC2 و SFRC2 ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۶۳: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه PC2 و SFRC2 ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶۴: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۳ نمونه PC2 و SFRC2 ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶۵: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۴ نمونه PC2 و SFRC2 ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶۶: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۵ نمونه PC2 و SFRC2 ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶۷: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه PC1 و PC2 ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۶۸: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه PC1 و PC2 ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۶۹: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۳ نمونه PC1 و PC2 ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۷۰: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۴ نمونه PC1 و PC2 ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۷۱: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۵ نمونه PC1 و PC2 ..... ۱۱۱

- شکل ۵-۱۷۲: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۱ نمونه SFRC1 و SFRC2 ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷۳: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۲ نمونه SFRC1 و SFRC2 ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷۴: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۳ نمونه SFRC1 و SFRC2 ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷۵: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۴ نمونه SFRC1 و SFRC2 ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۷۶: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۵ نمونه SFRC1 و SFRC2 ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۱: تنش ایجاد شده بر اثر بارگذاری موضعی [۱۴] ..... ۱۱۸

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: لیست نمونه‌ها و نتایج [۶] ..... ۱۱
- جدول ۱-۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان شاهرود، پرتلند تیپ ۲، طبق اعلام سازنده ..... ۲۲
- جدول ۲-۴: دانه‌بندی ماسه ..... ۲۴
- جدول ۳-۴: دانه‌بندی شن ..... ۲۵
- جدول ۴-۴: مشخصات الیاف ..... ۲۷
- جدول ۵-۴: طرح اختلاط ..... ۲۸
- جدول ۱-۵: مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ..... ۳۷
- جدول ۲-۵: برنامه آزمایش‌ها ..... ۴۵
- جدول ۳-۵: خلاصه نتایج آزمایشگاهی ..... ۱۱۲
- جدول ۴-۵: خلاصه نتایج آزمایشگاهی ..... ۱۱۳
- جدول ۵-۵: مقایسه نمونه بتن الیافی با بتن ساده در نیروی ترک خوردگی ..... ۱۱۴
- جدول ۶-۵: مقایسه نمونه بتن الیافی با بتن ساده در نیروی حداکثر ..... ۱۱۵
- جدول ۷-۵: مقایسه تغییر مکان نهایی نمونه بتن الیافی با بتن ساده ..... ۱۱۶
- جدول ۱-۶: خلاصه نتایج تحلیلی ..... ۱۲۰



## فهرست روابط

۳۶ .....	۱-۵
۱۱۸ .....	۱-۶

# فصل ۱:

## کلیات

## ۱-۱- مقدمه

ساخت زیرساخت‌های زیرزمینی برای اهداف حمل و نقل (جاده‌ها، مترو)، انتقال آب و ... نقش مهمی را در جامعه مدرن به عهده گرفته است.

امروزه، استفاده از فضای زیرزمینی یک راه حل جذاب برای مقابله و رفع نیاز به حمل و نقل شهری (که باید همیشه کارآمدتر باشد)، عبور از کوه‌ها، تنگه‌های دریا یا رودخانه‌ها نیز می‌باشد.

در روش مکانیزه، حفاری با ماشین دوار، ماشین حفاری تونل (TBM) انجام می‌شود که می‌تواند زمین یا توده سنگ را حفر کند، مصالح ناشی از حفاری را جمع کرده و بر روی نوار نقاله انتقال می‌دهد و سطح تونل را پشتیبانی می‌کند تا پوشش نهایی (سگمنت) نصب شود.

روند پیشروی TBM شامل موارد زیر است:

- حفر خاک و سنگ جلوی TBM.
  - حرکت TBM به جلو در حین حفاری با استفاده از جک‌های پیشران که خود را روی حلقه تونل به جلو می‌کشد.
  - وقتی ماشین در مسافتی برابر با طول یک حلقه به جلو حرکت کرد، حلقه بعدی قرار می‌گیرد.
- با توجه به مطالعات صورت گرفته پوشش تونل سهم مهمی در هزینه‌های اجرایی ساخت تونل دارد. به همین دلیل طراحی پوشش تونل‌ها، بخصوص تونل‌های حفاری شده با دستگاه TBM از اهمیت خاصی برخوردار است.

پوشش در تونل‌های حفاری شده به روش مکانیزه عمدتاً به صورت قطعات پیش ساخته (سگمنت) می‌باشد. این قطعات پیش ساخته در کارخانه ساخته شده و سپس جهت نصب به داخل تونل منتقل می‌گردد و توسط دستگاه TBM نصب می‌شود.

در طی مراحل ساخت پوشش، مکانیسم‌های احتمالی دیگر رخ می‌دهد، می‌تواند منجر به ایجاد الگوهای ترک شود که اغلب در سگمنت‌های تونل در عمل مشاهده می‌شود. این مکانیزم‌ها با معرفی نیروهای جک پیشران TBM در ارتباط هستند. استفاده از نیروهای جک پیشران یک مرحله مهم است.

در چند دهه اخیر استفاده از بتن الیافی نسبت به بتن معمولی به دلیل خصوصیات مناسب‌تر آن که از جمله می‌توان به مقاومت کششی، برشی، دوام و خاصیت بالای جذب انرژی اشاره کرد به طور قابل توجهی گسترش یافته است.

ماتریس‌های بتنی الیافی چقرمگی الیاف را فراهم می‌کند، که شامل توانایی مقاومت در برابر تنش پس از ترک خوردگی، بهبود مقاومت در برابر ضربه و خستگی و توزیع بیشتر الگوی ترک است. برای اهداف ساختاری، بتن تقویت شده با الیاف فولادی (SFRC) به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به نیروهای جک پیشران که بر روی سگمنت (در طی مراحل ساخت) وارد می‌شوند، می‌توان با تغییر در فلسفه طراحی، استفاده بهینه از خصوصیات مواد بتنی (ساده و مسلح الیافی) را با توجه به مقاومت در برابر ترک دو نیم شدگی حاصل کرد.

## ۱-۲- ضرورت و اهمیت پژوهش

همزمان با حفاری دستگاه TBM، بازوی نصاب دستگاه، سگمنت‌های بتنی را به صورت حلقه به حلقه در محل حفر شده نصب می‌کند، با حرکت سپر به سمت جلو و حفاری تونل، دستگاه TBM از طریق جک‌های هیدرولیکی خود نیرویی محوری به پوشش‌های بتنی وارد می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که اغلب ترک‌های ایجاد شده در سگمنت، در زمان نصب و ناشی از نیروی فشاری جک‌های پیشران می‌باشد. هدف از این پایان‌نامه ارزیابی آزمایشگاهی یک ایده جدید به منظور کاهش نیروهای وارده از طرف جک پیشران به واسطه اصلاح شکل هندسی الگوی بارگذاری می‌باشد. اصلاح شکل هندسی به منظور کاهش نیروی کششی زیر پد در راستای ضخامت سگمنت می‌باشد. با کاهش نیروی کششی، آرماتور محاسباتی و یا الیاف در این قسمت کاهش می‌یابد و این ضرورت تحقیق حاضر است. بدین منظور فعالیت‌های زیر صورت گرفته است:

۱. فاز آزمایشگاهی: در این مرحله آزمایش‌های لازم طراحی و نمونه‌های مربوطه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است.
۲. مقایسه و بحث پیرامون نتایج آزمایشگاهی: با بدست آمدن نتایج آزمایشگاهی، مقایسه کمی رفتار سگمنت‌ها با پلیت ساده و پلیت پیشنهادی امکان پذیر خواهد بود. در این مرحله مشخص می‌شود که میزان تاثیر شیار ایجاد شده در پلیت بر رفتار سگمنت چقدر خواهد بود.

## ۱-۳- ساختار پایان نامه

در راستای دستیابی به اهداف عنوان شده در بخش قبل این پایان نامه در ۷ فصل به شرح زیر تدوین شده است:

فصل اول شامل مقدمه می باشد که در آن تعاریف کلی و اهداف پایان نامه مشخص می گردند.

فصل دوم مروری مختصر دارد بر تاریخچه ای از تحقیقات انجام شده.

در فصل سوم ایده مورد نظر بر اساس پژوهش های قبلی معرفی و توضیح داده شده است.

فصل چهارم به کارهای آزمایشگاهی انجام شده اختصاص داده شده است، که شامل ذکر مصالح به کار رفته و خصوصیات آنها، نحوه ساخت و عمل آوری نمونه ها می باشد.

فصل پنجم به آزمایش های انجام شده، تفسیر نتایج و مقایسه نتایج بدست آمده از نمونه بتن معمولی با نمونه بتن الیافی، و همچنین مقایسه نمونه های پلیت ساده با پلیت پیشنهادی ارائه شده است، تا تاثیر الیاف و همچنین ایده پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در فصل ششم رابطه تحلیلی ارائه شده است، با استفاده از رابطه تحلیلی نیروی وارد بر نمونه ها بدست می آید، همچنین ضریب پیشنهادی ارائه شده و با نتایج بدست آمده از آزمایش ها مقایسه می شود.

در فصل هفتم نتایج حاصل از این پژوهش ارائه شده است و در ادامه پیشنهاد هایی جهت ادامه تحقیقات ارائه شده است.

## فصل ۲:

### مروری بر پیشینه تحقیق

## ۲-۳- مقدمه

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، در طی مراحل ساخت پوشش تونل، نیروی متمرکز زیاد جک پیشران در سگمنت‌ها منجر به تنش‌های فشاری بالا در زیر کفشک‌های پیشران می‌شود، که منجر به خرد شدن بتن و تنش‌های کششی عرضی (حالت قائمه نسبت به محور طولی) می‌شود، که می‌تواند باعث ترک و در نهایت خرابی دو نیم شدگی شود. لازم به ذکر است تاکنون در این زمینه تحقیقات آزمایشگاهی و عددی محدودی گزارش شده است.

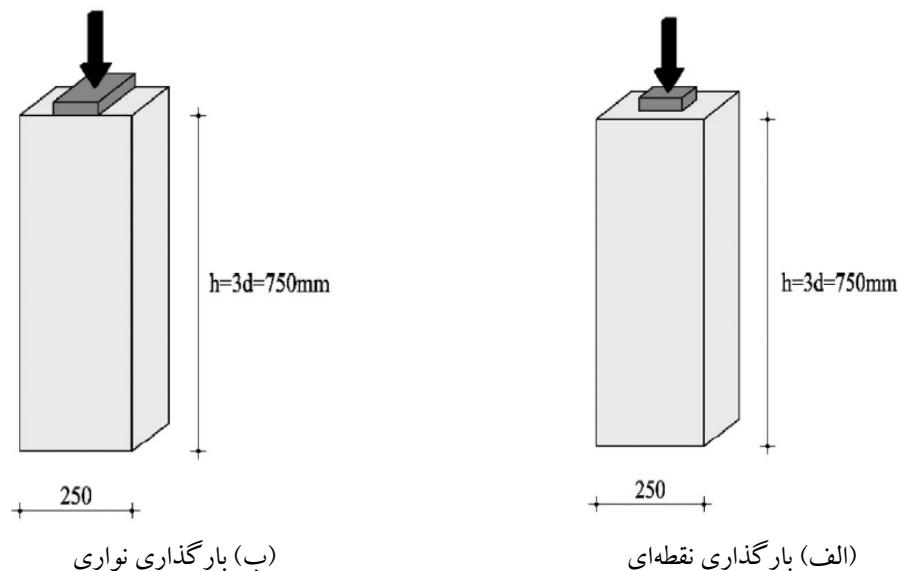
## ۲-۴- پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۱۰ کاراتلی 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 آزمایشات نشان داد به طور خاص عملکرد سگمنت از نظر کنترل ترک خوردگی با حضور الیاف بهبود می‌یابد [۱].

تیرتی و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار ترک تقسیم در سگمنت تحت جک‌های هیدرولیکی دستگاه حفاری تونل (TBM) با استفاده از آزمایشات بر روی نمونه‌های منشوری با یا بدون تقویت الیاف پلی‌پروپیلن تحت



بار نقطه‌ای (PL) و بار نواری (LL) را در دو جهت مختلف بتن ریزی، مورد ارزیابی قرار دادند. در شکل ۲-۱ نمونه‌ها تحت بارگذاری نقطه‌ای و بارگذاری نواری قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱: چیدمان نمونه‌های آزمایشگاهی در تحقیق تیرتی [۲]

نتایج نشان داد خرابی دو نیم شدگی در نمونه‌های بتن ساده بسیار ترد می‌باشد و وجود الیاف منجر به افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ترک تقسیم می‌شود. مقدار الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۱۰ کیلوگرم در متر مکعب (نسبت حجمی ۱,۱٪) به طور قابل توجهی رفتار ترک تقسیم و ظرفیت باربری منشور بتنی (تا ۴۰٪+) و همچنین شکل پذیری نمونه به ویژه در نمونه‌های LL را افزایش داد. همچنین جهت بتن ریزی به دلیل جهت گیری متفاوت الیاف بر رشد ترک تقسیم و ظرفیت باربری نمونه‌ها تأثیر گذاشت [۲].

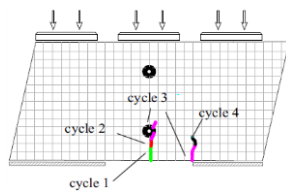
کانفورتی و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار تقسیم موضعی در عناصر بتن مسلح با الیاف (FRC) تحت بار متمرکز زیاد از نظر تحلیلی و تجربی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در تحقیق خود از دو بار خطی (LL)

Point Load

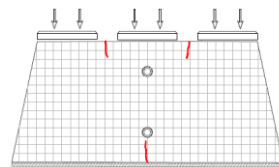
Line Load

و بار نقطه‌ای (PL) به منظور تفاوت‌های اصلی بین این دو پیکربندی بار و تعریف نسبت‌های  $(a/d)$  اتخاذ شده، مطالعه تحلیلی را انجام دادند، همچنین یک برنامه آزمایشی بر اساس پیکربندی LL بر روی نمونه‌های تقویت شده توسط دو نوع مختلف الیاف فولادی ۳۳-۵۵ و ۶۰-۷۵ (طول ۳۳ میلی‌متر و قطر ۰,۶ میلی‌متر که نسبت ابعادی آن می‌شود ۵۵ و همچنین طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۰,۸ میلی‌متر که نسبت ابعادی آن می‌شود ۷۵) را بررسی نمودند. نتایج آنها به این صورت می‌باشد که در بررسی تحلیلی، برای بار خطی، ترک خوردگی از نوع تقسیم در محدوده  $a/d$  از ۰,۱۷ تا ۰,۸۳، و در بارگذاری نقطه‌ای، در بازه ۰,۲۵ تا ۰,۹۱ رخ داده است، برای مقادیر کوچکتر و بزرگتر  $a/d$ ، خرابی از نوع خردکننده غالب می‌شود. در بررسی تجربی الیاف فولادی ۳۳-۵۵ و همچنین الیاف فولادی ۶۰-۷۵، به طور مشابه ظرفیت باربری و شکل پذیری منشور بتنی تحت بار متمرکز زیاد را افزایش می‌دهد [۳].

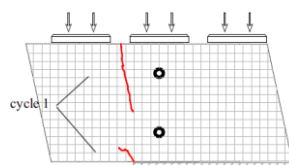
در سال ۲۰۱۶ مدا و همکاران یک روش آزمایشگاهی جهت ارزیابی رفتار ساختاری سگمنت‌های پوشش تونل تحت نیروی پیشران دستگاه حفاری تونل (TBM) را ارائه دادند، تنظیمات پیشنهادی آنها امکان آزمایش سگمنت منفرد در مقیاس کامل، در زیر بارهای مختلف، اعمال شده در شرایط تکیه گاهی مختلف، به منظور شبیه سازی نیروی پیشران TBM و همچنین وضعیت مکرر تماس ناقص بین سگمنت‌های دو حلقه بعدی را فراهم می‌کند. در شکل ۲-۲ نحوه قرار گیری تکیه گاه در زیر سگمنت‌ها نشان داده شده است.



(ب) سگمنت با تکیه گاه ناپیوسته



(الف) سگمنت با تکیه گاه پیوسته

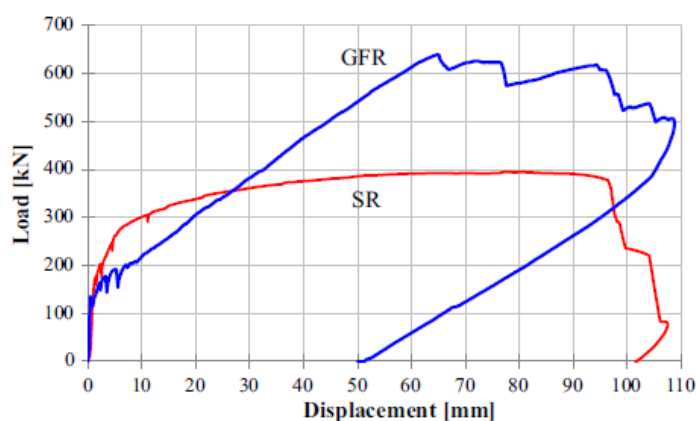


(ج) سگمنت با تکیه گاه ناپیوسته

شکل ۲-۲: چیدمان آزمایش و محل قرارگیری تکیه گاه ها در سگمنت [۴]

نتایج نشان می دهد در تکیه گاه پیوسته نحوه ترک خوردگی همانند الگوهای ترک معمول در تونل های واقعی می باشد، همچنین نشان می دهد که ترک ها بین پدهای بارگذاری و در پایه سگمنت باز و توسعه می یابند [۴].

در سال ۲۰۱۶ کاراتلی و همکاران در یک تحقیق تجربی، آزمایشات خمش در مقیاس کامل بر روی سگمنت های پیش ساخته تونل را به منظور مقایسه عملکرد ساختاری بتن مسلح با میله های پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) با توجه به بتن مسلح فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. در شکل ۲-۳ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به بتن مسلح با میله های پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) و بتن مسلح فولادی (RC) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: نمودار نیرو-جابجایی [۵]

با مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات مشاهده گردید که علی رغم شکنندگی GFRP، تحت آزمایش خمشی با مقیاس کامل نشان داد که این ساختار نه تنها مقاومت قابل توجهی بلکه شکل پذیری کافی به نمایش می گذارد [۵].

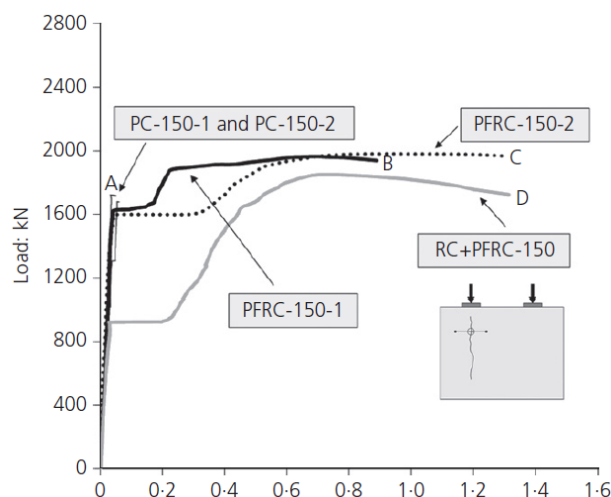
در سال ۲۰۱۶ کانفورتی و همکارانش تاثیر استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP) در سگمنت‌های پیش ساخته تونل را با استفاده از یک برنامه آزمایشی در شش سگمنت در مقیاس کامل از تونل هیدرولیک مونت لیریو (پاناما) را مورد بررسی قرار دادند. آنها سه راه حل مختلف تقویت کننده تحت آزمایش خمش و بار نقطه‌ای را بررسی کردند: تقویت متداول معمولی (RC)، فقط الیاف PP (نمونه های PFRC) و ترکیبی از الیاف PP و تقویت کننده‌های معمولی (RC + PFRC). نتایج آزمایش نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن را می‌توان به عنوان تقویت کننده در خمش و ترک تقسیم در سگمنت‌های پیش ساخته تونل هیدرولیکی استفاده کرد. در مورد تقویت ترک‌های خرد کننده، فقط الیاف پلی پروپیلن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. الیاف پلی پروپیلن به طور قابل توجهی ظرفیت باربری و شکل پذیری سگمنت پیش ساخته تونل را در هر دو بخش PFRC و RC + PFRC تحت خمش را افزایش می‌دهد. در آزمایش بار نقطه‌ای، الیاف PP در هر دو بخش PFRC و RC + PFRC سگمنت عملکرد ساختاری مورد نیاز در طراحی و حداکثر بار پیشران TBM را تضمین می‌کند. در جدول ۱-۲ نتایج نمونه‌ها تحت آزمایش خمش آورده شده است [۶].

جدول ۱-۲: لیست نمونه‌ها و نتایج [۶]

Segment designation	$P_{cracking}$ [kN]	$M_{cracking}$ [kNm]	$\delta_{cracking}$ [mm]	$P_{max}$ [kN]	$M_{max}$ [kNm]	$\delta_{max}$ [mm]
RC	85	25.5	0.85	202	60.6	32.92
PFRC	138	41.4	1.04	172	51.6	8.60
RC + PFRC	128	38.4	1.01	310	93.0	15.54

کانفورتی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از هشت نمونه در مقیاس کوچک با دو ناحیه بارگذاری متفاوت، میزان الیاف پلی پروپیلن متفاوت و با یا بدون تقویت معمولی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که فرآیند ترک خوردگی یک المان که تحت ترکیبی از بارهای متمرکز زیاد قرار دارد، ترک خردکننده اولیه (بین دو ناحیه بارگذاری) و سپس ترک تقسیم (در زیر مساحت بارگذاری) پدید می‌آید، ترک خوردگی از نوع تقسیم در یک سطح بار به طور قابل توجهی بالاتر از بار مربوط به تشکیل

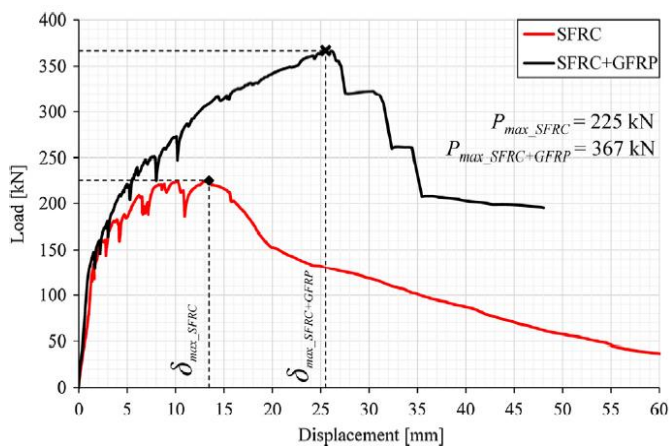
ترک خردکننده (۲-۳ برابر بیشتر) رخ داده است. الیاف PP، در نسبت حجمی ۱،۱٪، به طور قابل توجهی هر دو ظرفیت باربری (۲۰٪+) و شکل پذیری نمونه‌ها را افزایش دادند، نمونه‌های بتنی ساده در هنگام وقوع ترک تقسیم، یا اندکی بعد از آن، خرابی ترد را نشان دادند. در شکل ۲-۴ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های بتنی مختلف نشان داده شده است [۷].



شکل ۲-۴: نمودار نیرو-جابجایی [۷]

در سال ۲۰۱۹ مدا و همکاران امکان استفاده از یک راه حل ترکیبی از سگمنت‌های تونل تقویت شده با الیاف فلزی (SFRC) با میله‌های پلیمر تقویت شده الیاف شیشه (GFRP) را در طی یک بررسی آزمایشگاهی در مقیاس کامل را انجام دادند. آنها به منظور بررسی ظرفیت خمشی سگمنت، و همچنین شبیه سازی نیروی پیشران دستگاه TBM در مرحله نصب به ترتیب آزمایش خمش و بارگذاری نقطه‌ای را در چهار سگمنت FRC در مقیاس کامل با و بدون قفس GFRP محیطی را مورد آزمایش کردند. نتایج نشان دادند در آزمایش خمش ترکیب بتن الیافی با میله‌های GFRP باعث افزایش تقریباً ۵۰٪ مقاومت در برابر خمش می‌شود که نیاز طراحی را کاملاً برآورده کرده است. در آزمون بارگذاری نقطه‌ای اضافه شدن قفس محیطی GFRP باعث کاهش عرض ترک می‌شود. شکل ۲-۵ نمودار نیرو-جابجایی دو نمونه بتن

الیافی+میلگرد پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (SFRC+GFRP) و بتن الیافی (SFRC) را نمایش می دهد [۸].

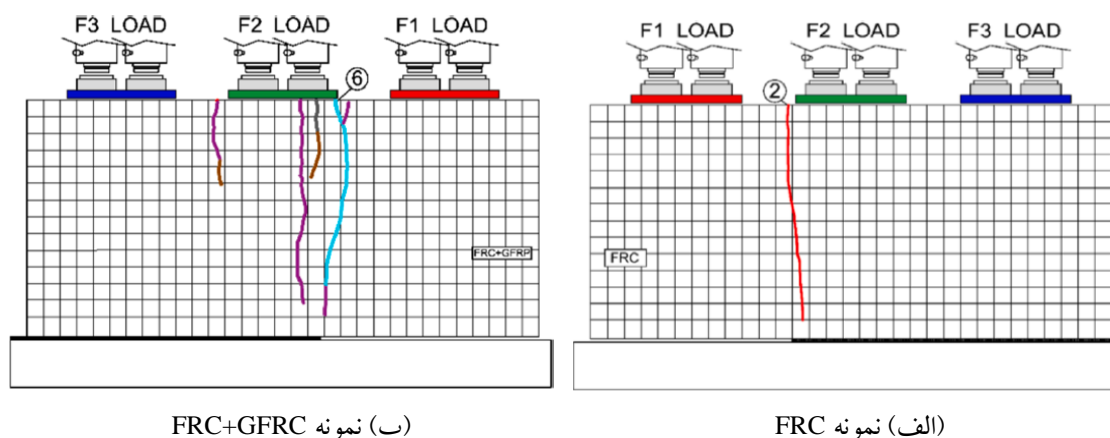


شکل ۲-۵: نمودار نیرو-جابجایی [۸]

در سال ۲۰۱۹ کانفورتی و همکاران با استفاده از یک برنامه آزمایشگاهی بر روی نمونه های مقیاس کامل، کاربرد ساختاری الیاف پلی پروپیلن در سگمنت های پیش ساخته تونل و همچنین در ترکیب با تقویت سنتی (RC) برای پوشش تونل مترو را تحت آزمایش خمش مورد بررسی قرار دادند. نتایج به این صورت می باشد که تحت خمش هر دو راه حل تقویت کننده پس از ترک خوردگی قادر به ایجاد ظرفیت باربری مشابه و شکل پذیری قابل توجهی بودند [۹].

مدا و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثرات بارگذاری نامنظم بر روی سگمنت ها را به دلیل ترازبندی ضعیف، که در اثر کارکرد دستگاه حفاری تونل (TBM) می تواند پدید آید را بررسی کردند. آنها تست های آزمایشی را در مقیاس کامل با بتن مسلح الیافی (FRC) با و بدون آرماتور پلیمر تقویت شده الیافی شیشه (GFRP)، در معرض نیروی پیشران TBM، با یک بادخور در تکیه گاه (تکیه گاه به صورت ناپیوسته)، طراحی کردند. آزمون بار نقطه ای با استفاده از سه بار نقطه ای یکسان ( $F1=F2=F3$ ) به نمونه از طریق صفحات فولادی

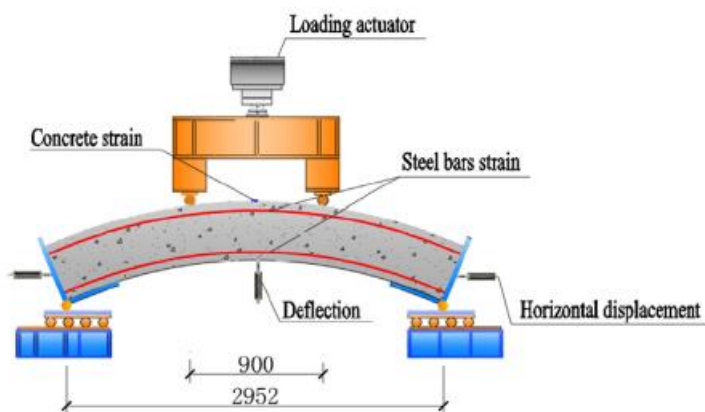
همانطور که توسط TBM استفاده می شود ، انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، راه حل ترکیبی پیشنهادی افزایش ظرفیت بار را نسبت به راه حل فقط FRC نشان می دهد، با تقریباً دو برابر حداکثر بار وارد شده به سگمنت آزمایش شده. در شکل ۲-۶ نحوه ترک خوردن نمونه بتن الیافی (FRC) و نمونه بتن الیافی با میلگرد تقویت (GFRC+FRC) نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۲-۶: نمونه ها و چیدمان آزمایش در تحقیق مد [۱۰]

در سال ۲۰۲۰ لیو و همکاران در یک تحقیق آزمایشگاهی چندین سگمنت با سه طرح مختلف تقویت کننده (سگمنت RC، سگمنت FRC با آرماتور کاهش یافته و اصلی) و دو نوع الیاف (الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی) را به منظور اینکه سگمنت های بتن آرمه الیافی با آرماتور کاهش یافته شرایط عملی را برآورده می کنند و همچنین برای بررسی خواص مکانیکی مختلف بتن مسلح با الیاف مصنوعی و فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به این نتایج دست یافتند که سگمنت های بتنی تقویت شده با الیاف مصنوعی و فولادی با آرماتور کاهش یافته از نظر مشخصات اصلی کنترل، الزامات سگمنت های بتن آرمه معمولی را برآورده می کنند، همچنین بدون تغییر در آرماتورهای طولی، افزودن الیاف مصنوعی و فولادی تأثیر کمی در لنگر ترک خوردگی دارد، علاوه بر این مقدار الیاف تأثیر قابل توجهی در سختی پس از ترک خوردگی

در سگمنت‌ها دارد، در حالی که تأثیر کمی بر ظرفیت باربری نهایی را نشان می‌دهد. در شکل ۷-۲ چیدمان آزمایش نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۷-۲: چیدمان آزمایش در تحقیق لیو [۱۱]



## فصل ۳:

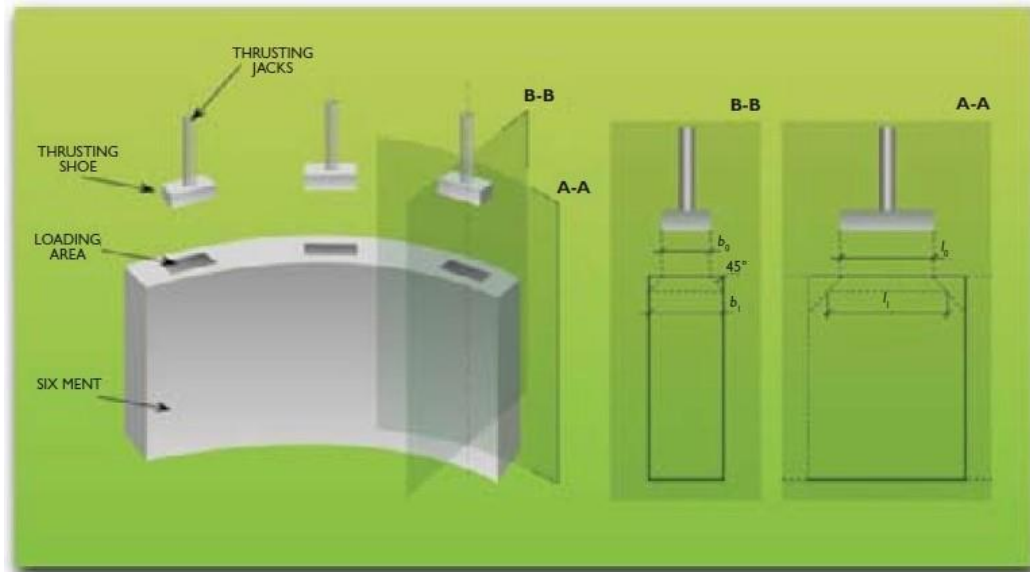
# ایده اصلاح شکل هندسی پدهای TBM

در تونل سازی به روش مکانیزه با استفاده از دستگاه TBM، سازه پوشش تونل از مجموعه قطعات پیش ساخته به نام سگمنت تشکیل می گردد. در چند دهه اخیر استفاده از این نوع تونل ها در ایران و سایر نقاط جهان گسترش چشم گیری داشته است. سگمنت های پوشش تونل در طی فرایند نصب در تونل تحت اثر بارهای ناشی از دستگاه حفاری قرار می گیرند. شکل ۱-۳ نصب سگمنت توسط TBM را نشان می دهد.



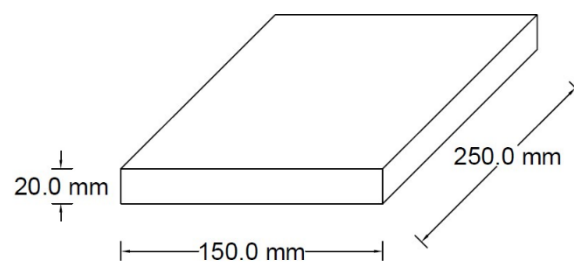
شکل ۱-۳: نصب سگمنت توسط TBM [۱۰]

در اثر اعمال بار جک های TBM به سگمنت، نیروهای کششی در سگمنت ایجاد می شود. جلالی [۱۳] در سال ۱۳۹۴ با استفاده از یک مدل سازی عددی دو و سه بعدی اجزا محدود به منظور ارزیابی میزان نیروهای کششی ایجاد شده سگمنت در زیر جک های پیشران دستگاه حفاری مکانیزه با استفاده از هندسه متعارف جک های پیشران و هندسه پیشنهادی را بررسی کرده است. وی به این نتیجه رسیده است که صفحه با هندسه پیشنهادی نیروهای کششی زیر جک ها را ۳۷ تا ۵۶ درصد کاهش می دهد و به عنوان یک جایگزین مناسب برای پد جک های دستگاه حفاری مکانیزه قابل پیشنهاد می باشد. شکل ۲-۳ شمای از نحوه قرار گیری کفشک ها بر روی سگمنت را نشان می دهد.

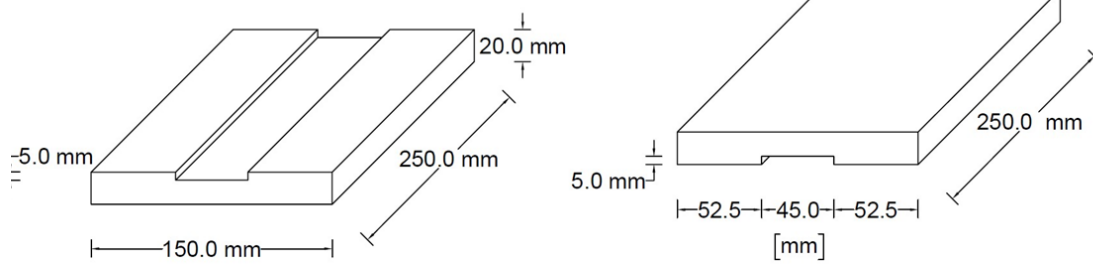


شکل ۲-۳: قرار گیری کفشک‌ها بر روی سگمنت [۱۴]

ایده مورد نظر در تحقیق حاضر بررسی اصلاح شکل هندسی صفحه جک پیشران TBM به منظور کاهش نیروی کششی زیر پد در راستای ضخامت سگمنت می‌باشد. با کاهش نیروی کششی آرماتورهای محاسباتی و یا الیاف فلزی در این قسمت کاهش می‌یابد. در شکل ۳-۳ و ۴-۳ صفحات جک پیشران با هندسه متعارف و همچنین با هندسه پیشنهادی آورده شده است.



شکل ۳-۳: صفحه متعارف جک پیشران



شکل ۳-۴: صفحه با هندسه پیشنهادی

## **فصل ۴:**

**معرفی خصوصیات مصالح، طرح اختلاط،**

**نحوه ساخت و عمل آوری بتن**

## ۴-۳- مقدمه

در این فصل مصالح و خصوصیات مورد استفاده در بتن، طرح اختلاط، نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها آورده شده است.

## ۴-۴- مصالح مورد استفاده در بتن

### ۴-۴-۱- سیمان

در این تحقیق از سیمان شاهرود، پرتلند تیپ ۲ استفاده شده است. طبق ASTM C150 [۱۵] سیمان پرتلند نوع ۲، سیمانی است که برای مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها اصلاح شده است، این سیمان به نسبت سیمان پرتلند نوع ۱ کندگیرتر می‌باشد. وزن مخصوص سیمان ۳/۱۶ گرم بر سانتی مترمکعب در نظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان شاهرود، پرتلند تیپ ۲، طبق اعلام سازنده

PHYSICAL SPECIFICATION					CHEMICAL SPECIFICATION						
NO.	Test	Result	Factory standard	ISIRI 389	Test Method	NO.	Component	Result	Factory standard	ISIRI 389	Test Method
1	Fineness by Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)	2955	Min 2900	Min 2800	390	1	SiO <sub>2</sub> (%)	21.17	—	—	1692
2	Autoclave expansion	0.064	Max 0.6	Max 0.8	391	2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.45	—	—	
3	Setting time					3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.94	—	—	
3-1	Initial Time (min)	145	Min 70	Min 45	392	4	CaO(%)	63.65	—	—	
3-2	Final time (hr)	3.40	Max 5	Max 6	392	5	MgO(%)	1.56	Max 2.5	Max 5	
4	Compressive Strength(Kg/cm2)					6	SO <sub>3</sub> (%)	2.57	Max 2.9	Max 3	
4-1	1 Day	—	—	—	393	7	Na <sub>2</sub> O(%)	0.34	—	—	1695
4-2	2 Day	—	—	—	393	8	K <sub>2</sub> O(%)	0.54	—	—	
4-3	3 Days	236	Min 150	Min 120	393	9	L.O.I(%)	2.45	Max 2.5	Max 3	1692
4-4	7 Days	305	Min 220	Min 200	393	10	IR(%)	0.38	Max 0.07	Max 0.75	
4-5	28 Days	402	Min 350 Max 510	Min 325 Max 525	393	11	F.CaO(%)	1.57	—	—	
5	Heat of hydration (cal/gr)					12	C <sub>3</sub> S(%)	55.4	—	—	
5-1	3 Days	—	—	—	394	13	C <sub>2</sub> S(%)	18.9	—	—	
5-2	28 Day	—	—	—	394	14	C <sub>3</sub> A (%)	5.1	—	—	

#### ۴-۴-۲- سنگ دانه

مصالح سنگی در بتن شامل درشت دانه و یا شن، ریزدانه و یا ماسه می باشد. از نظر حجم، اکثریت مخلوط بتن را سنگدانه ها تشکیل می دهند که معمولاً بین ۶۵-۷۵٪ است [۱۶]. به دلیل اینکه سنگ دانه ها از سیمان ارزان تر هستند، به لحاظ اقتصادی بهتر است مقدار سنگدانه ها را در بتن افزایش داده و مقدار سیمان را کم کنیم. علاوه بر بحث اقتصادی سنگ دانه ها، به لحاظ فنی خصوصیات بتن تحت تاثیر خصوصیات سنگ دانه ها می باشد و خواص اصلی بتن از نظر کارایی، خواص مکانیکی، مقاومت و ... تحت تاثیر قرار می گیرد. مرز درشت دانه و ریزدانه، الکت استاندارد شماره ۴ و بعد ۴/۷۶ میلی متر می باشد. مصالح عبوری از

الک نمره ۴ ریزدانه و مصالح مانده بر روی آن درشت‌دانه نامیده می‌شود. در این تحقیق حداکثر بعد سنگ‌دانه ۹/۵ میلی‌متر انتخاب شد. به منظور دانه‌بندی شن و ماسه از استاندارد ASTM C33 [۱۷] استفاده شده است. به دلیل وضعیت نامناسب سنگ‌دانه‌ها ابتدا آنها به نحوی الک شدند که الزامات استاندارد ASTM C33 را اقلان نماید. این کار برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه انجام شد. سنگ‌دانه‌ها توسط دستگاه لرزاننده مطابق شکل ۴-۱، هر بار به مدت ۵ دقیقه الک شدند.



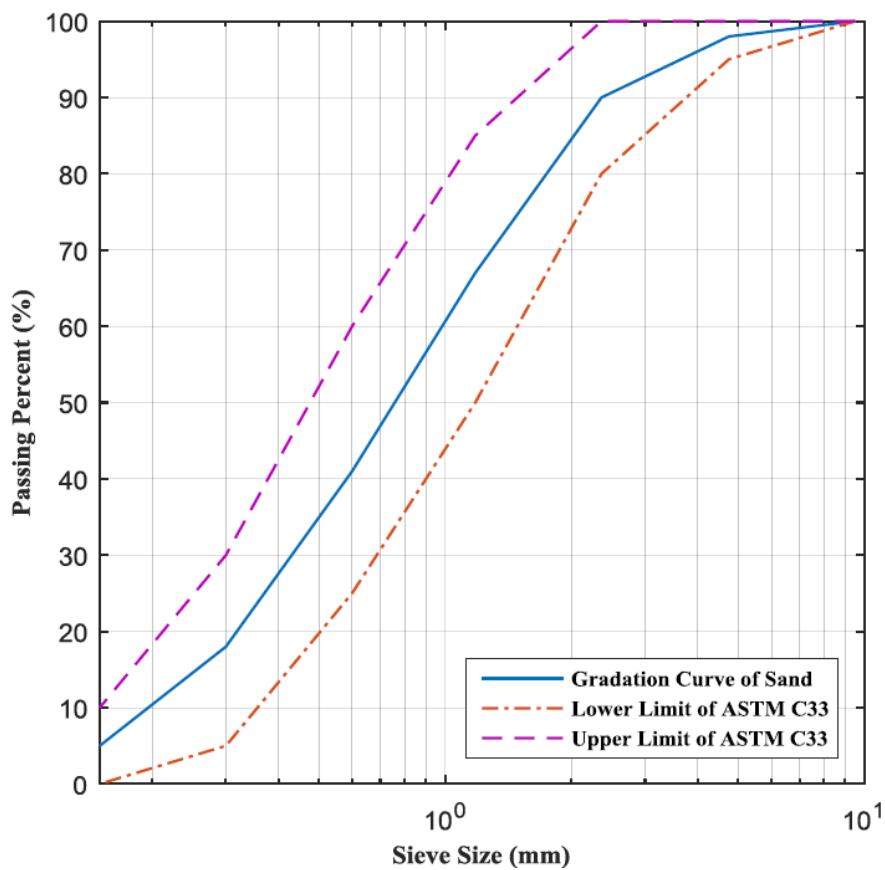
شکل ۴-۱: دستگاه لرزاننده الک

در ادامه جدول ۴-۲ مربوط به دانه‌بندی ماسه، منحنی دانه‌بندی ماسه شکل ۴-۲، جدول ۴-۳ مربوط به دانه‌بندی شن و منحنی دانه‌بندی شن شکل ۴-۳ آورده شده است.



جدول ۴-۲: دانه‌بندی ماسه

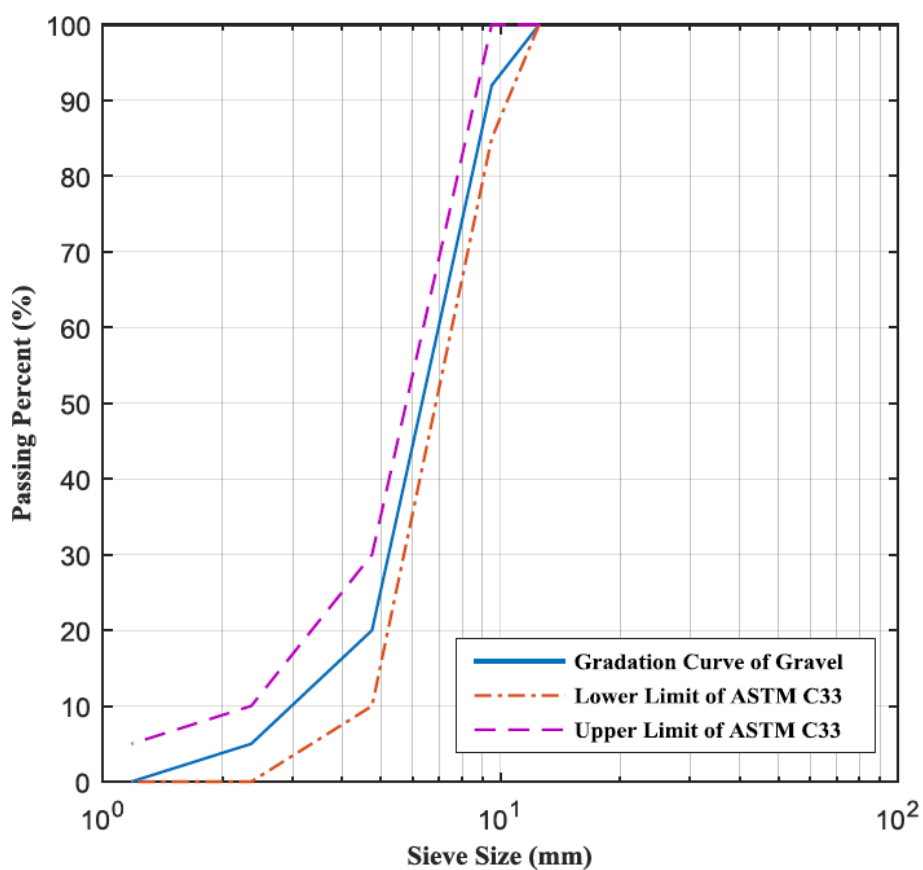
اندازه الک (میلی‌متر)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	درصد عبوری (ASTM C33)
۹,۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۴,۷۵	۲	۲	۹۸	۹۵-۱۰۰
۲,۳۶	۸	۱۰	۹۰	۸۰-۱۰۰
۱,۱۸	۲۳	۳۳	۶۷	۵۰-۸۵
۰,۶	۲۶	۵۹	۴۱	۲۵-۶۰
۰,۳	۲۳	۸۲	۱۸	۵-۳۰
۰,۱۵	۱۸	۱۰۰	۰	۰-۱۰



شکل ۴-۲: منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۳-۴: دانه بندی شن

اندازه الک (میلی متر)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	درصد عبوری (ASTM C33)
۱۲,۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۹,۵	۸	۸	۹۲	۸۵-۱۰۰
۴,۷۵	۷۲	۸۰	۲۰	۱۰-۳۰
۲,۳۶	۱۵	۹۵	۵	۰-۱۰
۱,۱۸	۵	۱۰۰	۰	۰-۵



شکل ۳-۴: منحنی دانه بندی شن

به منظور مشخص نمودن ریز بودن ماسه از شاخصی به نام مدول نرمی استفاده می شود. هر چقدر مقدار این شاخص بزرگتر باشد مخلوط درشت تر و هر چقدر کوچکتر باشد مخلوط ریزدانه تر می باشد. طبق استاندارد

ASTM C125 [۱۸] مدول نرمی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت از مجموع درصد‌های وزنی مانده تجمعی هر یک از الک‌ها در یک گروه مشخص از الک‌ها و تقسیم حاصل جمع بر ۱۰۰ مشخص می‌شود. طبق استاندارد فوق مدول نرمی برای سنگ‌دانه‌های ریز ۲/۳-۳/۱ پیشنهاد می‌شود. مدول نرمی ماسه مصرفی در این تحقیق ۲/۸۷ می‌باشد. وزن مخصوص ماسه ۲/۶۴ و وزن مخصوص شن ۲/۶۸ می‌باشد.

#### ۴-۳-۴- فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ها بر پایه‌ی مواد آلی و شیمیایی هستند. فوق روان کننده‌ها جذب سیمان می‌شوند و به آن بار منفی می‌دهند، این بار منفی موجب دفع شدن ذرات سیمان از یکدیگر شده و پوسته‌ای منظم از آب پیرامون ذرات تشکیل می‌شود، در نتیجه باعث جداسازی ذرات و در نهایت افزایش کارایی می‌شود. عملکردهای اصلی مواد افزودنی طبق ASTM C494 [۱۹] عبارتند از: جذب هوا، کاهش آب، کندگیر کننده، تسریع کننده و روان کننده مخلوط بتن می‌باشد. برای دستیابی به بتن با مقاومت بالا نسبت آب به سیمان را کاهش می‌دهیم، که موجب کاهش کارایی مخلوط می‌شود، این افت کارایی را می‌توان با استفاده از فوق روان کننده جبران کرد. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها از فوق روان کننده -اس آر جی ۵۷۲ (SRJ572) محصول شرکت البرز شیمی آسیا استفاده شد. میزان مصرف آن ۱/۵-۰/۶ درصد وزن سیمان مصرفی می‌باشد، در این تحقیق مقدار ۰/۶ درصد انتخاب شد.

#### ۴-۴-۴- آب

آب یکی از اجزای مهم در بتن بوده و ۱۵ تا ۲۵ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهد [۲۰]. آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها آب شهر شاهرود می‌باشد.

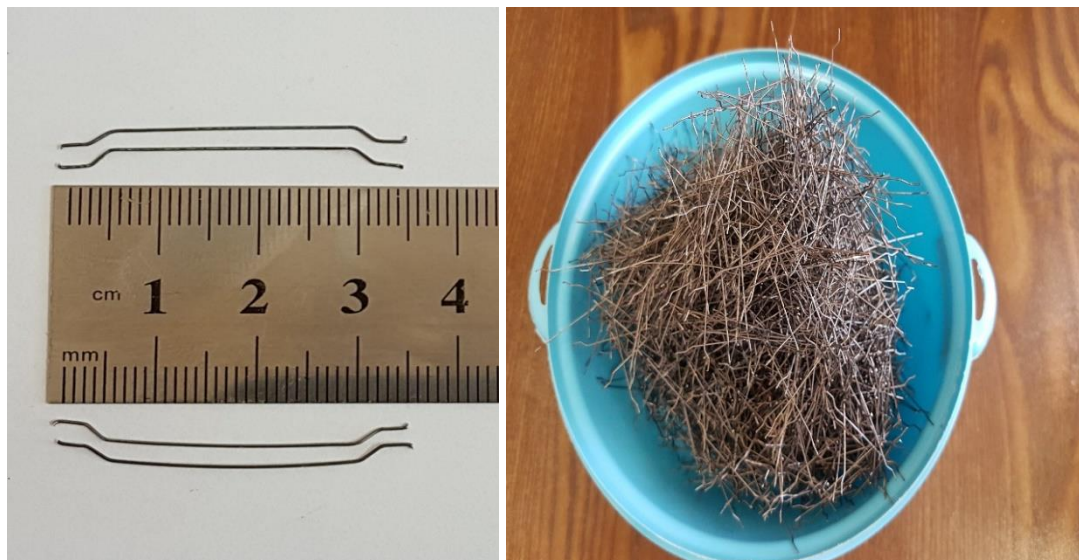
## ۴-۴-۵- الیاف فلزی<sup>۱</sup>

بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی دارای شکل پذیری، جذب انرژی و دوام بالاتری می باشد. در بتن الیافی زمانی که اولین ترک ایجاد می شود، الیاف با پل زدن در سطح ترک تنش های کششی را منتقل می کند. در این زمان الیاف و ماتریس بسته به نحوه پیوستگی آنها دو رفتار را از خود نشان می دهند. هنگامی که مقاومت پیوستگی الیاف زیاد باشد، الیاف گسیخته می شود و برعکس زمانی که مقاومت پیوستگی کم باشد الیاف از ماتریس بیرون کشیده می شود. در نتیجه رفتار کلی مصالح وابسته به پیوستگی ماتریس و الیاف می باشد [۲۱]. الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت صنایع مفتول عرفان تهیه شده و به صورت قلاب دار به طول ۳۵ میلی متر، قطر ۰,۳۸۷ میلی متر و نسبت ظاهری ۹۰ می باشد. مقدار الیاف اضافه شده به بتن به نوع الیاف و عملکرد هدف بستگی دارد، اما ملاحظات عملی میزان الیاف را در عناصر سازه تقریباً به ۱,۵ درصد حجم بتن محدود می کنند [۲۲]. با توجه به پیشینه موضوع [۲] که مقدار ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب با نسبت حجمی ۰,۳۲٪ الیاف فلزی استفاده شده است در این تحقیق به میزان ۳۱ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت حجمی ۰,۴٪ الیاف فلزی استفاده شده است. استفاده درصد بالای الیاف توجیه اقتصادی ندارد، و از سوی دیگر میزان الیاف باید به نحوی انتخاب شود که در بهبود عملکرد ایفای نقش نماید. مشخصات الیاف بر مبنای اعلام سازنده، در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴: مشخصات الیاف

نوع الیاف	قطر (mm)	طول (mm)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
قلاب دار	۰,۳۸۷	۳۵	۷۸۵۰	۳۰۶۵	۲۱۰

در شکل ۴-۴ تصاویری از الیاف فلزی مورد استفاده در بتن نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: الیاف فلزی قلاب دار

## ۴-۵- طرح اختلاط

در این تحقیق طرح اختلاط برگرفته از آیین نامه ACI 211 [۲۳] می باشد که در جدول ۴-۵ نمایش داده شده است.

جدول ۴-۵: طرح اختلاط

بتن الیافی	بتن معمولی	مصالح
۷۰۴	۷۰۴	شن ( $\text{kg/m}^3$ )
۸۱۱	۸۱۱	ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )
۵۴۳	۵۴۳	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )
۲۲۸	۲۲۸	آب ( $\text{kg/m}^3$ )
۰,۴۲	۰,۴۲	نسبت آب به سیمان
۴,۴۲	۳,۲۶	فوق روان کننده ( $\text{kg/m}^3$ )

۰,۸	۰,۶	نسبت فوق روان کننده به سیمان (%)
۳۱	۰	الیاف فلزی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰,۴	۰	نسبت حجمی الیاف فلزی (%)
۱۵۰	۱۸۰	اسلامپ (mm)

فرایند اختلاط اینگونه می باشد که در ابتدا سنگدانه ها به صورت خشک در حدود ۲/۳۰ دقیقه مخلوط می شود، سپس سیمان اضافه شده و حدود ۲/۳۰ دقیقه مخلوط می شوند. در ادامه فوق روان کننده اضافه می شود، فوق روان کننده با ۷۰ درصد آب ترکیب شده و در مدت زمان ۵ دقیقه اضافه می شود و در نهایت ۳۰ درصد آب باقی مانده در حدود ۲/۳۰ دقیقه اضافه می شود. برای بتن یافی همین زمان بندی انجام شده و الیاف ها را در مدت زمان ۳ دقیقه به این صورت که الیاف ها را الک کرده به دلیل جلوگیری از گلوله ای شدن (Balling) به مخلوط اضافه می شود. برای ساخت بتن از ماشین مخلوط کن بتن با ظرفیت ۲۳۰ لیتر استفاده شد. در شکل ۴-۵ تصویر مخلوط کن آورده شده است.



شکل ۴-۵: ماشین مخلوط کن بتن

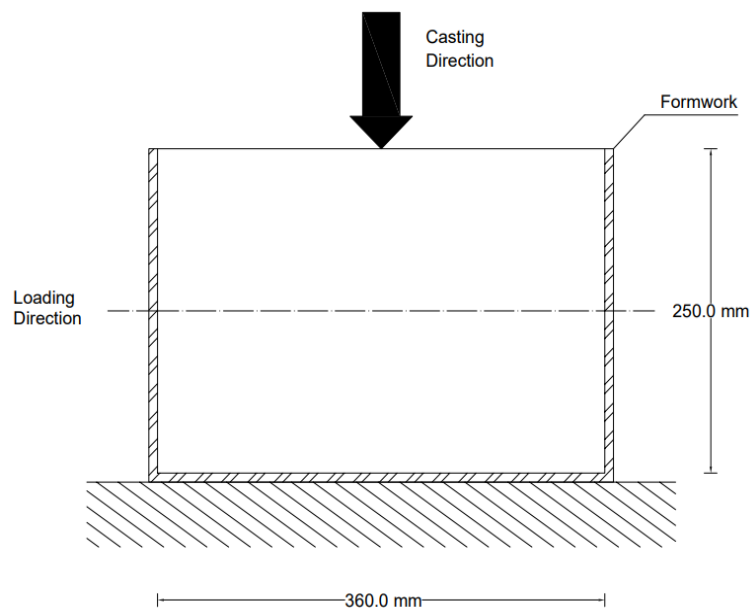
## ۴-۶- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها از قالب ام دی اف و چوبی استفاده شده است. در شکل ۴-۶ تصاویر قالب‌ها آورده شده است.



(ب) قالب چوب سه لایه

(الف) قالب MDF



(ج) نحوه بتن ریزی قالب

شکل ۴-۶: قالب نمونه‌ها

نحوه ساخت بدین صورت می باشد که بتن ریزی به صورت تک مرحله انجام شده است. قبل از بتن ریزی سطح داخل قالب ها را روغن قالب زده، این کار باعث می شود در زمان خارج کردن نمونه از قالب کار راحت تر شود. بعد از بتن ریزی جهت متراکم کردن از لرزاننده دستی و میز لرزان استفاده شد، عمل لرزاندن باعث کاهش اصطکاک داخلی بین سنگدانه ها شده و آنها به یکدیگر نزدیک می شوند، در نتیجه حباب های هوا به سطح می رسند. در ابتدای عمل تراکم، سنگدانه های درشت از میله لرزاننده دور می شوند، به دلیل اینکه جرم سنگدانه های درشت بیشتر از سنگدانه های ریز است. پس از برخورد سنگدانه های درشت، ملات شروع به جاری شدن بین سنگدانه ها می کند. عمل تراکم به استحکام، تراکم بالا، و نفوذ پذیری پایین کمک می کند. نمونه های الیافی با میز لرزاننده و نمونه های غیر الیافی با لرزاننده دستی متراکم شد. سپس سطح نمونه ها پرداخت شدند و به مدت ۲۴ ساعت داخل قالب ماندند. پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در داخل حوض آب قرار گرفتند و تا ۲۴ ساعت قبل از آزمایش داخل آب باقی ماندند [۲۴]. در ادامه تصاویر مربوط به ساخت نمونه ها و عمل آوری بتن به ترتیب در شکل ۴-۷ و ۴-۸ آورده شده است.



شکل ۴-۷: ساخت نمونه ها





شکل ۴-۸: عمل آوری نمونه‌ها

## فصل ۵:

# آزمایشات انجام شده و تفسیر نتایج

## آزمایشگاهی

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل برنامه آزمایشگاهی، نحوه انجام آزمایش و تفسیر نتایج ارائه شده است.

## ۵-۲- دستگاه ابزار دقیق

این دستگاه‌ها شامل دیتالاگر و جابجایی سنج‌ها می‌باشند.

### ۵-۲-۱- جابجایی سنج (LVDT)

مبدل‌های نوع کرنش سنج مقادیر فیزیکی مانند بار و جابجایی را به صورت الکتریکی اندازه‌گیری می‌کنند.

جابجایی سنج‌های مورد استفاده در این تحقیق CDP-50, SDP-50\_C, HS10 می‌باشند. دقت اندازه

گیری آنها به ترتیب ۰,۰۰۱، ۰,۰۰۵ و ۰,۰۰۵ می‌باشد. شکل ۵-۱ جابجایی سنج‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱: جابجایی سنج

## ۵-۲-۲- دیتالاگر

برای ثبت و ذخیره سازی داده‌های اندازه گیری شده توسط جابجایی سنج‌ها از دیتالاگر استفاده می‌شود. در این تحقیق از دیتالاگر مدل TDS-150 ده کاناله ساخت شرکت TML ژاپن استفاده شد. نرخ ثبت داده‌ها در این دیتالاگر ۱ داده در هر ثانیه می‌باشد. در شکل ۵-۲ دیتالاگر نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: دیتالاگر

## ۵-۲-۳- جک بتن شکن

برای آزمایش نمونه‌های اصلی و شاهد از دستگاه جک بتن شکن Toni Technik با ظرفیت ۳۰۰ تن استفاده شد. در شکل ۵-۳ جک بتن شکن نمایش داده شده است.



شکل ۵-۳: جک بتن شکن

## ۵-۳- مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری بتن به عنوان مهمترین خصوصیت مکانیکی بتن و همچنین به عنوان یکی از مهمترین خواص رفتاری بتن شناخته می‌شود. این آزمایش به عنوان معمول‌ترین آزمایش به منظور ارزیابی نمونه‌های بتنی می‌باشد. در این تحقیق از نمونه استاندارد مکعبی استفاده شد. اندازه نمونه مکعبی مورد استفاده ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. هر نمونه در سه لایه، و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم گردید. بار به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. برای محاسبه مقاومت فشاری نمونه، از رابطه حداکثر نیروی بدست آمده بر سطح مقطع نمونه استفاده شد (رابطه ۵-۱).

$$f'_{cu} = \frac{P}{A} \quad (۵-۱)$$

در این رابطه  $f'_{cu}$  (MPa) مقاومت فشاری بتن،  $A$  (mm<sup>2</sup>) سطح مقطع نمونه و  $P(N)$  حداکثر نیروی تحمل شده توسط بتن می باشد. ۲۴ نمونه مکعبی همراه با نمونه های اصلی ساخته شد و تحت آزمایش قرار گرفتند، در جدول ۵-۱ مقاومت فشاری نمونه های مکعبی آورده شده است. سپس مقاومت فشاری نمونه های مکعبی تبدیل به نمونه استوانه ای شدند که به طور میانگین مقاومت فشاری استوانه ای ۴۲ مگاپاسکال می باشد. درصد مقاومت انتخابی با استناد به پروژه خط دو مترو شیراز که مقاومت فشاری بتن آن نیز ۴۲ مگاپاسکال می باشد انتخاب شد [۲۴]. شکل ۵-۴ نمونه مکعبی مورد استفاده در آزمایش مقاومت فشاری بتن را نشان می دهد.

جدول ۵-۱: مقاومت فشاری نمونه های مکعبی

PC1 (MPa)	۴۸,۸	۴۵,۲	۴۶	۴۸,۲	۴۷	۴۶,۳	۴۶,۹
PC2 (MPa)	۴۷	۴۵,۷	۴۹	۴۸,۳	۴۶,۷	۴۷,۳	۴۷,۳
SFRC1 (MPa)	۴۸,۵	۴۸,۳	۴۷	۴۷,۵	۴۶,۳	۴۶,۹	۴۷,۴
SFRC2 (MPa)	۴۸,۳	۴۷,۲	۴۸	۴۹	۵۱	۴۷	۴۸,۴
-	-	-	-	-	-	-	۴۷,۵



شکل ۴-۵: نمونه مکعبی قبل از آزمایش

## ۴-۵- نحوه اعمال بار گذاری

بار گذاری اصولاً به دو روش در آزمایشگاه اعمال می شود:

۱- کنترل شونده توسط تغییر مکان، به این معنی که تغییر مکان توسط جک بار گذاری افزایش داده می شود.

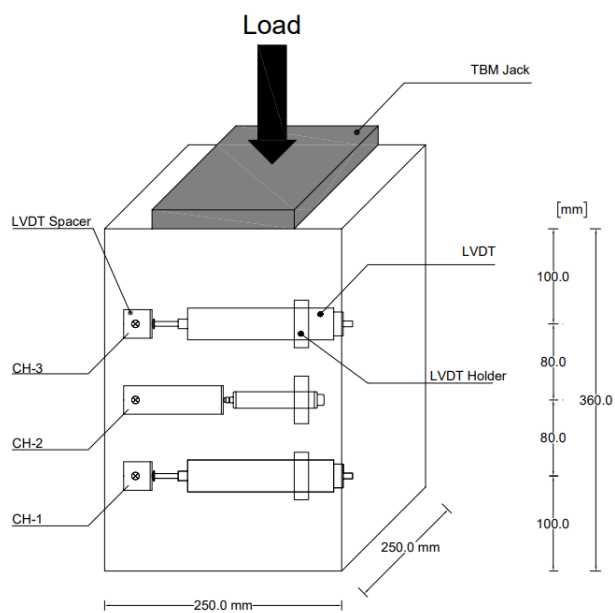
۲- کنترل شونده توسط نیرو، به این معنی که نیرو گام به گام توسط جک بار گذاری اضافه می شود. در کنترل شونده توسط تغییر مکان رفتار نرم شونده‌ها قابل مانیتور کردن و بررسی است، ولی در کنترل شونده توسط نیرو ما فقط تا نیروی حداکثر می توانیم بار گذاری کنیم؛ بعد از نیروی حداکثر اگر رفتار نرم شونده داشته باشیم، مود اعمال نیرو توسط کنترل نیرو کارایی ندارد؛ بنابراین ما احتمال می دادیم که رفتار نرم شونده هم داشته باشیم به همین دلیل از مود کنترل شونده توسط تغییر مکان استفاده کردیم. رفتار نرم شونده یعنی اینکه منحنی نیرو- تغییر مکان به سمت پایین افت می کند. رفتار سخت شونده یعنی اینکه شیب

نمودار نیرو- تغییر مکان مثبت است (به سمت بالا حرکت می کند) که به آن رفتار سخت شونده یا Hardening گفته می شود.

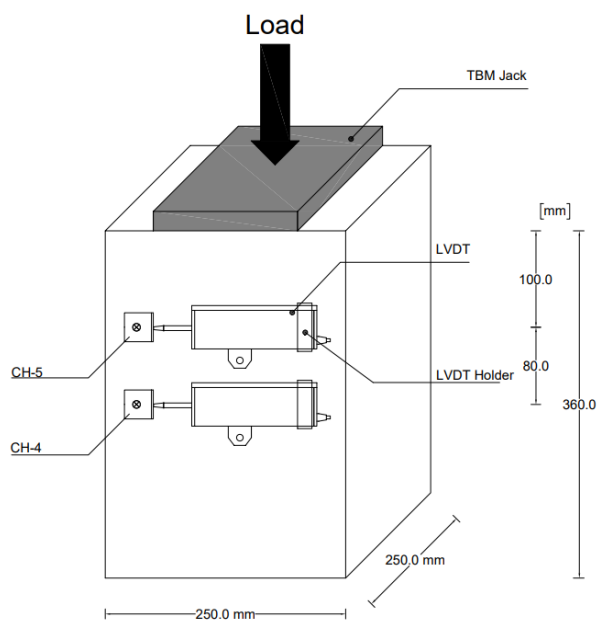
## ۵-۵- نمونه های سگمنت

۱۲ نمونه به صورت نمونه منشوری، به ارتفاع ۳۶۰ میلی متر، با مقطع مربع دارای ضلع ۲۵۰ میلی متر ساخته شد. ۱۲ نمونه شامل ۶ نمونه بتن ساده (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) و ۶ نمونه بتن الیافی (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) می باشد. بار اعمالی به صورت جابجایی کنترل و با سرعت ۰٫۱ میلی متر بر دقیقه بر نمونه ها اعمال گردید. در شکل ۵-۵ شمال نمونه، ۵-۶ جنوب نمونه و در شکل ۵-۷ نمونه از نمای بالا با جزئیات آورده شده است. بر اساس راه حل دو بعدی اینگار [۳] جابجایی سنج ۳ در جایی قرار خواهد گرفت که حداکثر تنش کششی عرضی از لحاظ تئوری بدست می آید، یعنی در فاصله ۱۰۰ میلی متری از سطح بالای نمونه. ابزارهای دیگر به منظور ضبط انتشار ترک در طول ارتفاع نمونه توزیع شده است. در این تحقیق از پنج جابجایی سنج استفاده شده است، سه جابجایی سنج در شمال نمونه و دو جابجایی سنج در جنوب نمونه. نحوه چیدمان آنها در شکل ۵-۵ و ۵-۶ آورده شده است. لازم به ذکر است برای ابعاد صفحه جک پیشران طبق پروژه تونل مکانیزه در ایران (متر و خط ۲ شیراز) نسبت ۶۰ درصد نسبت عرض صفحه جک به ضخامت سگمنت استفاده شد [۲۵].

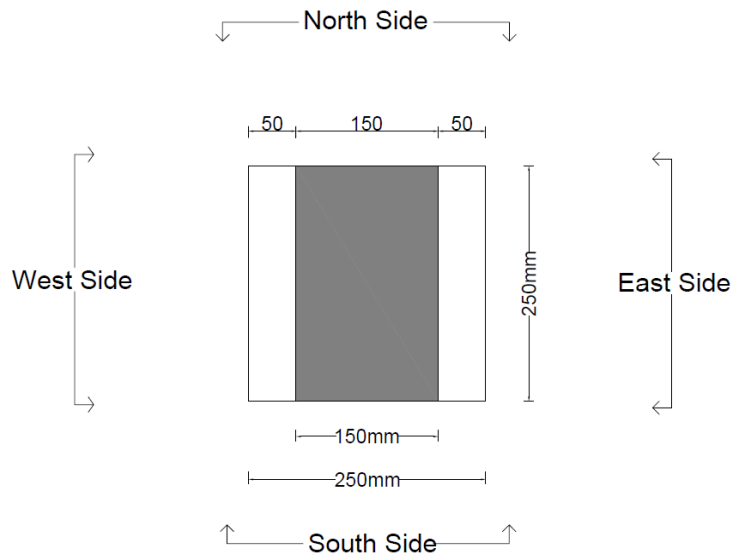




شکل ۵-۵: شمال نمونه (ابعاد به میلی متر)

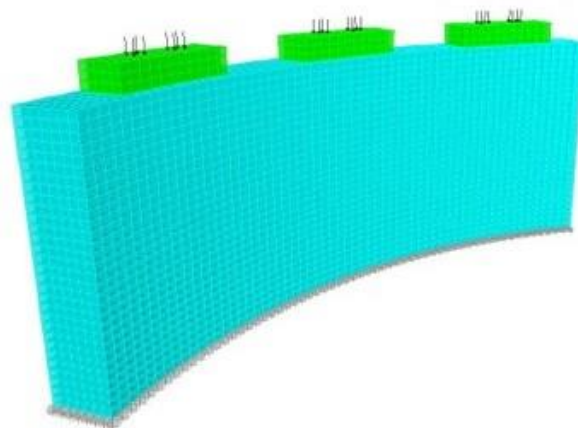


شکل ۵-۶: جنوب نمونه (ابعاد به میلی متر)



شکل ۵-۷: نمای بالا نمونه (ابعاد به میلی متر)

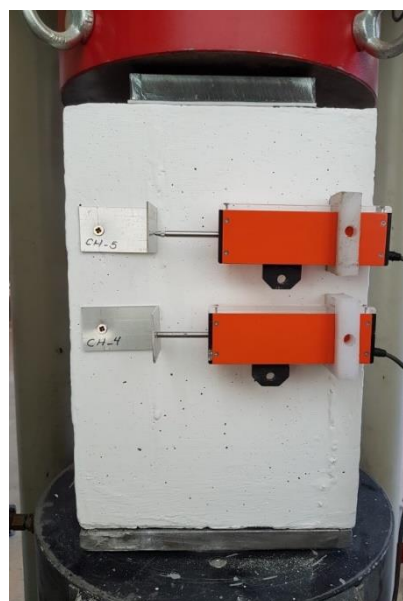
شکل ۵-۸ سگمنت پروژه خط ۲ شیراز را نشان می دهد که دارای ضخامت ۲۵۰ میلی متر، عرض صفحه جک پیشران ۱۵۰ میلی متر و همچنین دارای طول ۱۲۰۰ میلی متر می باشد [۲۵]. ضخامت نمونه آزمایشگاهی در تحقیق حاضر همانند سگمنت خط ۲ مترو شیراز می باشد. در ارتفاع به دلیل محدودیت دستگاه ارتفاع نمونه آزمایشگاهی ۳۶۰ میلی متر می باشد.



شکل ۵-۸: سگمنت خط ۲ مترو شیراز [۲۵]

## ۵-۶- چیدمان آزمایش

نحوه چیدمان آزمایش به این صورت می‌باشد که در تمامی نمونه‌ها یک پلیت به ابعاد  $250 \times 250$  میلی‌متر و به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به عنوان تکیه‌گاه استفاده شد و بر روی نمونه پلیت ساده و پلیت پیشنهادی استفاده شده است. در شکل ۵-۹ چیدمان آزمایش آورده شده است.

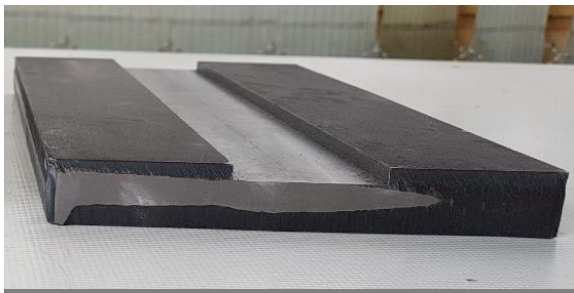


شکل ۵-۹: چیدمان آزمایش

## ۵-۷- نحوه انجام آزمایش

در تمامی آزمایش‌ها برای نمونه‌های اصلی از پنج جابجایی سنج (LVDT) استفاده شد. در شمال نمونه سه جابجایی سنج استفاده شد، دو جابجایی سنج مدل CDP-50 و یک جابجایی سنج مدل HS10 و در جنوب نمونه دو جابجایی سنج مدل SDP-50C استفاده شد.

پلیت‌های مورد استفاده در آزمایش در شکل ۵-۱۰ و ۵-۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۱: پلیت پیشنهادی



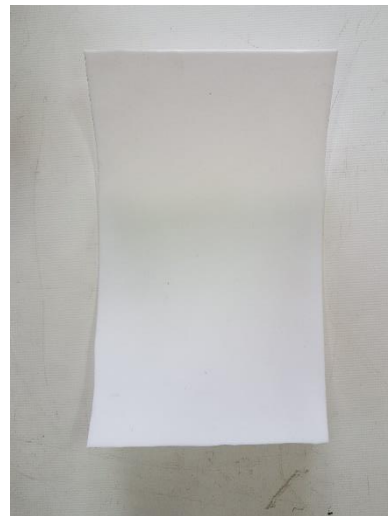
شکل ۵-۱۰: پلیت ساده

پلیت متعارف دارای ابعاد  $150 \times 250 \times 20$  میلی‌متر می‌باشد، پلیت پیشنهادی دارای ابعادی همانند پلیت متعارف اما با تفاوت وجود یک شیار که به اندازه ۳۰ درصد عرض پلیت متعارف کاهش داده شده است، ابعاد شیار  $45 \times 25 \times 5$  می‌باشد. گسترش نیروها در سگمنت منجر به یک ناحیه آشفته (ناحیه D) می‌شود که باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد، زیرا تنش‌های کششی عرضی عمود بر جهت بارگذاری رخ می‌دهد [۲۴]. ناحیه آشفته ناحیه‌ای نزدیک به ناحیه بارگذاری متمرکز می‌باشد. طبق اصل سن‌ونانت، تاثیر موضعی

یک اختلال در حد اندازه عرض عضو می باشد، در نمونه آزمایشگاهی عرض عضو ۲۵۰ میلی متر می باشد. در این تحقیق از پد بارگذاری متعارف به نسبت  $a/d$  برابر با ۰,۶ و پد بارگذاری پیشنهادی که با ایجاد شیار در پد اصلی ایجاد می شود نسبت  $a/d$  آن تغییر کرده و به ۰,۴۲ کاهش می یابد. هیچ محققی در آزمایش خود از نسبت  $a/d$  خاصی استفاده نکرده است [۲۴]. جهت کاهش اصطکاک بین بتن و صفحه فولادی در حال بارگذاری از یک لایه پلی تترا فلورواتیلن (PTFE) به ضخامت ۲ میلی متر استفاده شد. لازم به ذکر است در واقعیت نیز از صفحات تفلن در زیر جکهای TBM بکار می رود به همین دلیل برای ایجاد شرایط واقعی در آزمایش از PTFE استفاده شد. شکل ۵-۱۲ و ۵-۱۳ لایه پلی تترا فلورواتیلن را قبل و بعد از انجام آزمایش نشان می دهد، که به دلیل فشار وارده، ابعاد لایه پلی تترا فلورواتیلن به طور میانگین در طول و عرض در حدود ۱-۲ میلی متر افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۳: لایه پلی تترا فلورواتیلن بعد از انجام آزمایش



شکل ۵-۱۲: لایه پلی تترا فلورواتیلن قبل از انجام آزمایش

در جدول ۵-۲ نمونه های مورد آزمایش آورده شده است.

جدول ۵-۲: برنامه آزمایشها

ابعاد نمونه (mm)	مقاومت هدف طراحی بتن (MPa)	درصد الیاف (%)	توضیحات	نمونه
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت ساده	PC1-A
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت ساده	PC1-B
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت ساده	PC1-C
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت پیشنهادی	PC2-A
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت پیشنهادی	PC2-B
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰	نمونه با بتن ساده و پلیت پیشنهادی	PC2-C
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت ساده	SFRC1-A
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت ساده	SFRC1-B
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت ساده	SFRC1-C
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت پیشنهادی	SFRC2-A
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت پیشنهادی	SFRC2-B
۲۵۰*۲۵۰*۳۶۰	۴۰-۵۰	۰,۴	نمونه با بتن الیافی و پلیت پیشنهادی	SFRC2-C

## ۵-۸- مشاهدهات آزمایشها

در این قسمت جزئیات انجام آزمایشها و مشاهدهات آزمایشگاهی ارائه می شود.

### ۵-۸-۱- آزمایش مرحله اول

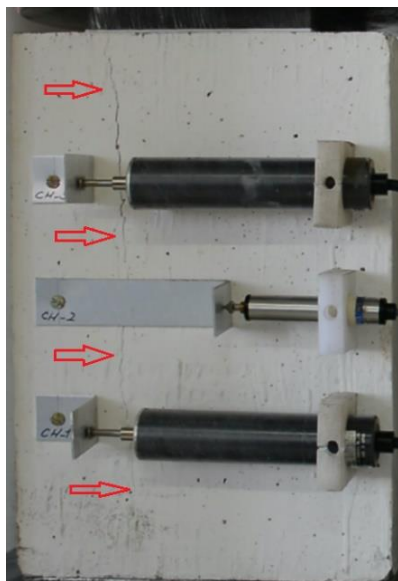
در این مرحله سه نمونه بتن ساده با پلیت ساده تحت عناوین زیر مورد آزمایش قرار گرفتند:

PC1-A, PC1-B, PC1-C

#### ۵-۸-۱-۱- نمونه PC1-A

##### شرح آزمایش:

اولین ترک در نیروی ۷۰۵ kN ایجاد شد (شکل ۵-۱۴)، به این صورت که در نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمالی و جنوبی ترک تقسیم ایجاد شد، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی متر بود، سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد و در ادامه طول ترک افزایش یافت. حداکثر نیروی وارده ۱۰۴۵ kN می باشد که بعد از افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد. در قسمت شمال نمونه (شکل ۵-۱۵) دو ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت جنوب نمونه (شکل ۵-۱۶) علاوه بر ترک های طولی، ترک به صورت گوه مخروطی شکل در نمونه ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۱۷ و ۵-۱۸) ترک ایجاد نشد.



شکل ۵-۱۴: اولین ترک در نمونه PCI-A



شکل ۵-۱۶: جنوب نمونه PCI-A

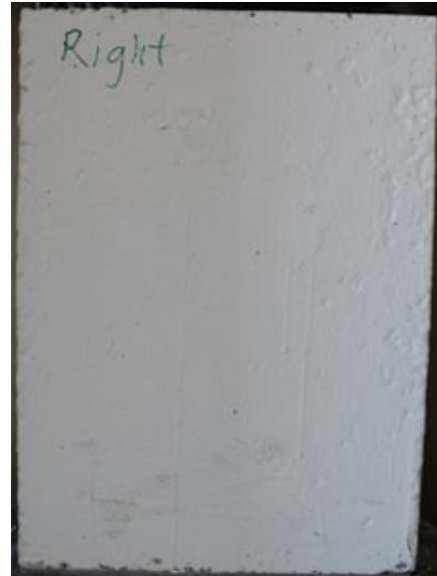


شکل ۵-۱۵: شمال نمونه PCI-A





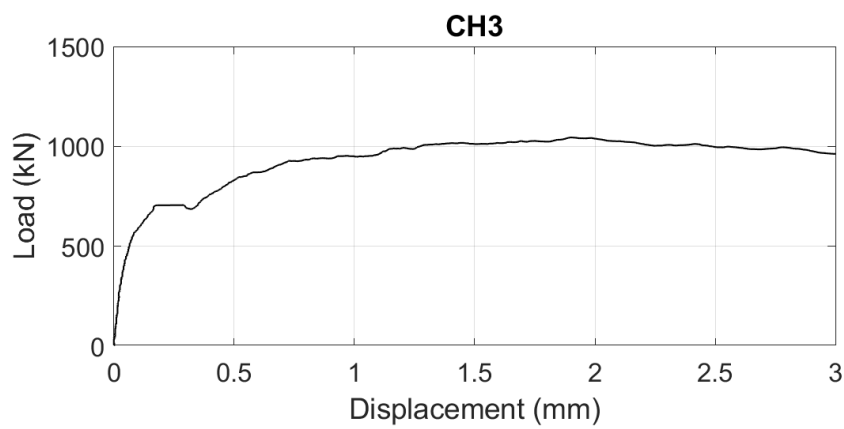
شکل ۵-۱۸: شرق نمونه PCI-A



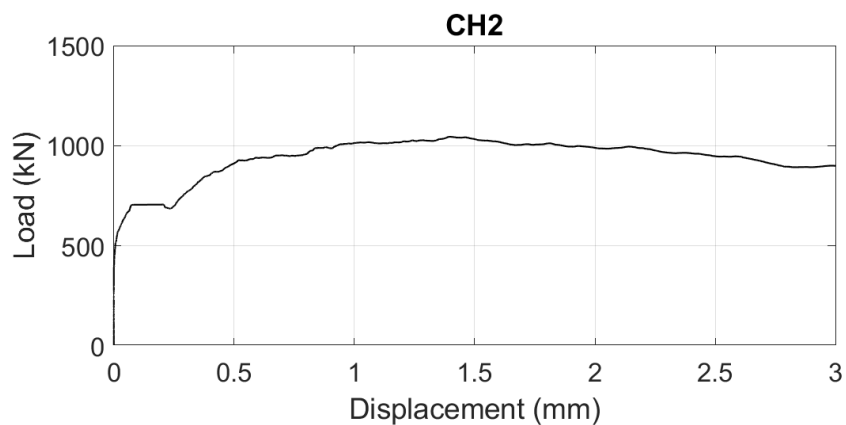
شکل ۵-۱۷: غرب نمونه PCI-A

در ادامه نمودارهای بدست آمده به ترتیب قرارگیری جابجایی سنج‌ها به صورت منفرد قرار داده شده است.

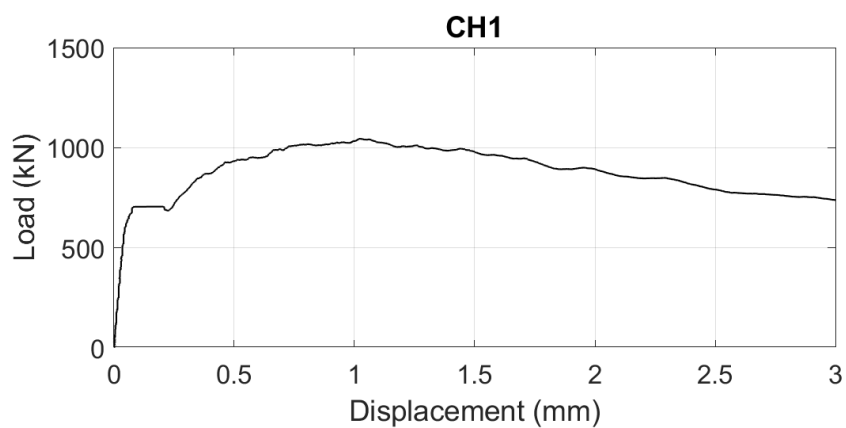
در شکل ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۹: کانال ۳ در نمای شمال نمونه PCI-A

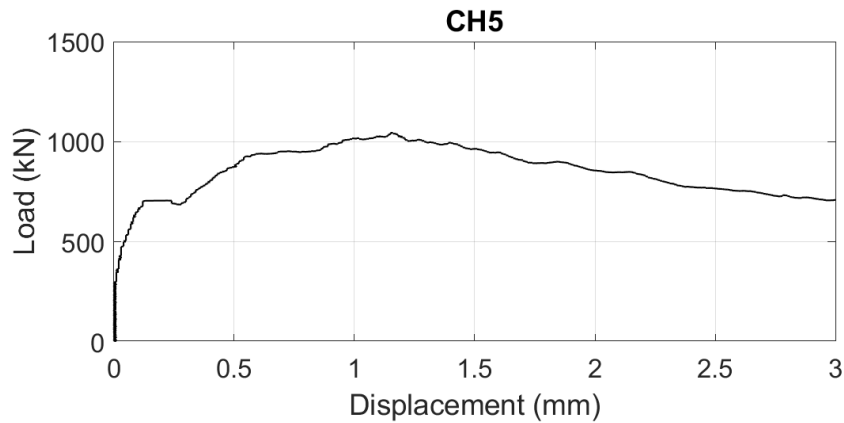


شکل ۵-۲۰: کانال ۲ در نمای شمال نمونه PCI-A

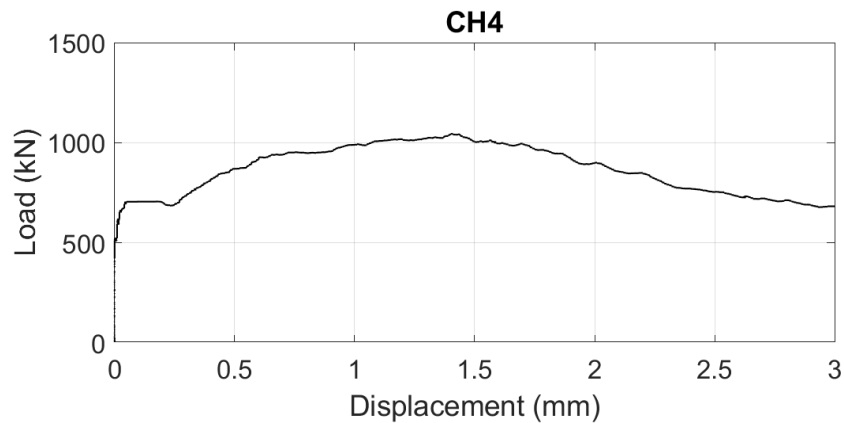


شکل ۵-۲۱: کانال ۱ در نمای شمال نمونه PCI-A

در شکل ۵-۲۲ و ۵-۲۳ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۲۲: کانال ۵ در نمای جنوب نمونه PCI-A



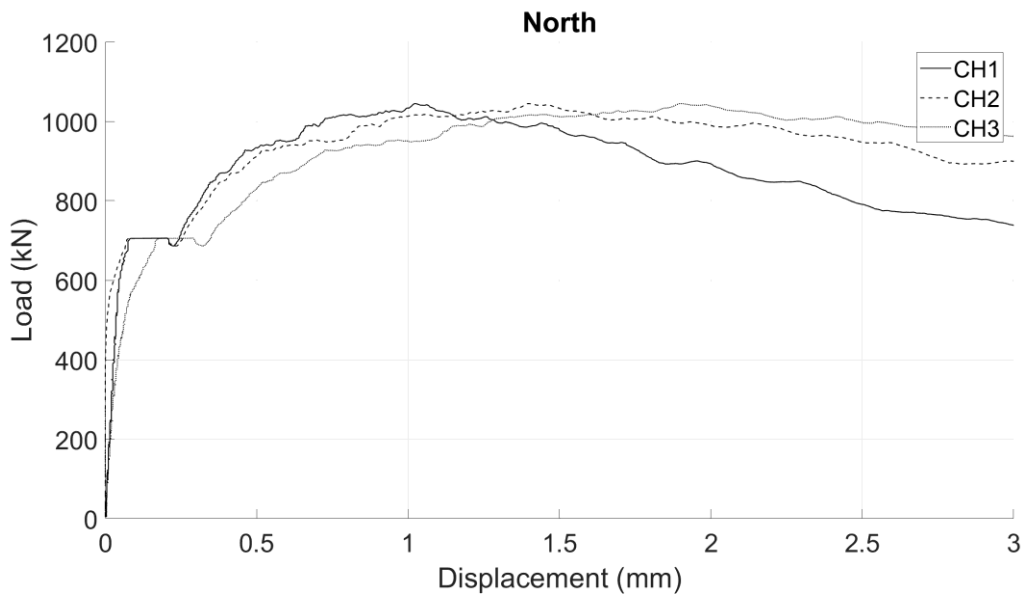
شکل ۵-۲۳: کانال ۴ در نمای جنوب نمونه PCI-A

همانطور که در شکل ۵-۱۹، ۵-۲۰ و ۵-۲۱ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ مشاهده می شود، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده ایم.

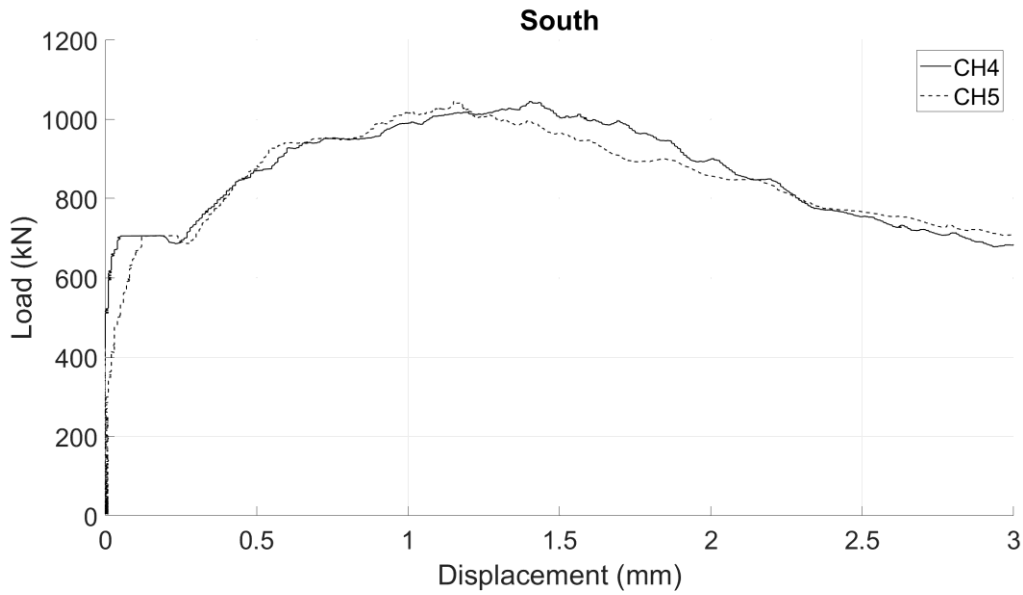
در شکل ۵-۲۲ و ۵-۲۳ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۲۴ و

۵-۲۵ آورده شده است.



شکل ۵-۲۴: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PC1-A

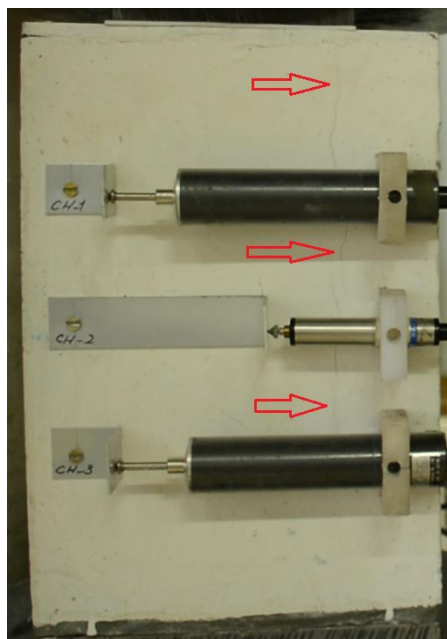


شکل ۵-۲۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PC1-A

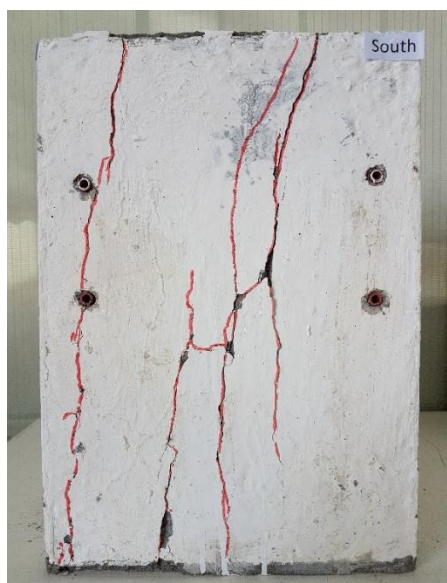
## ۵-۸-۱-۲- نمونه PC1-B

### شرح آزمایش:

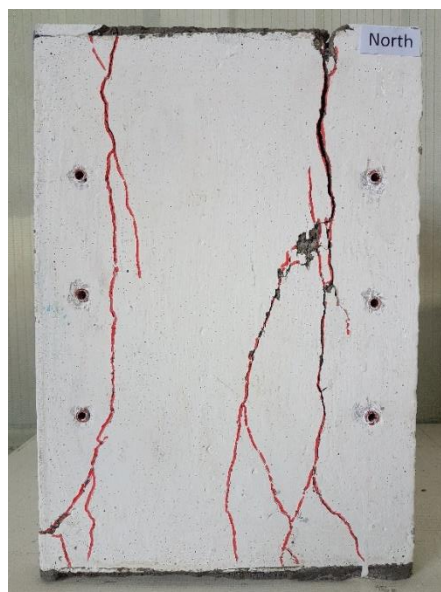
اولین ترک در قسمت شمالی نمونه در نیروی  $730 \text{ kN}$  به صورت عمودی ایجاد شد (شکل ۵-۲۶)، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۲۵ سانتی متر می باشد. سپس در قسمت جنوبی در نیروی حدوداً  $770 \text{ kN}$  ترک تقسیم ایجاد شد، سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد. حداکثر نیروی وارده  $1300 \text{ kN}$  می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال نمونه (شکل ۵-۲۷) دو ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت جنوب نمونه (شکل ۵-۲۸) همانند قسمت شمالی ترک های طولی ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۲۹ و ۵-۳۰) ترک طولی ایجاد شد.



شکل ۵-۲۶: اولین ترک در نمونه PC1-B



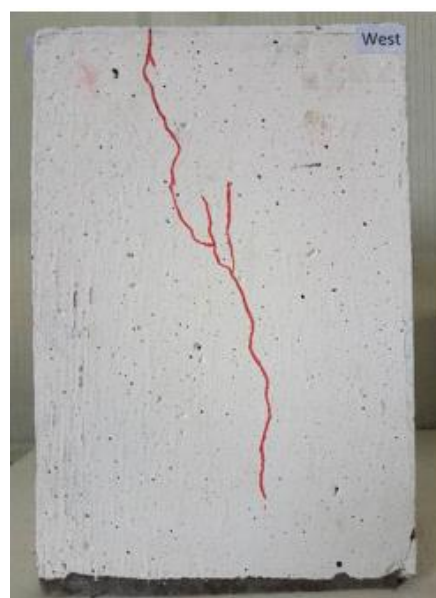
شکل ۵-۲۸: جنوب نمونه PC1-B



شکل ۵-۲۷: شمال نمونه PC1-B

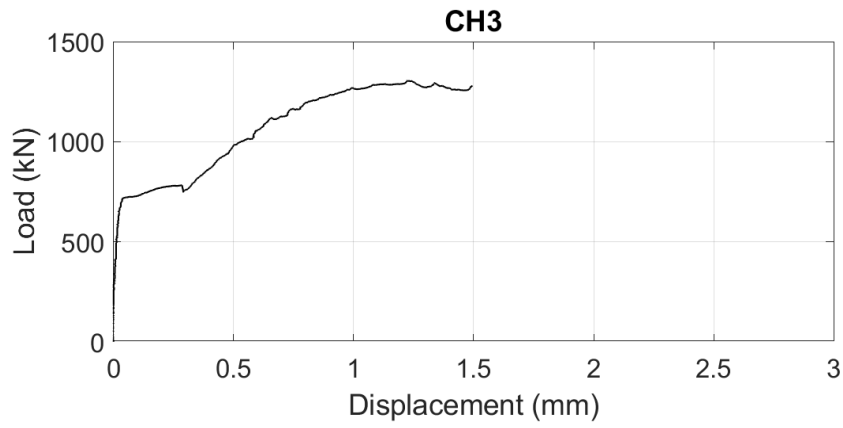


شکل ۵-۳۰: شرق نمونه PC1-B

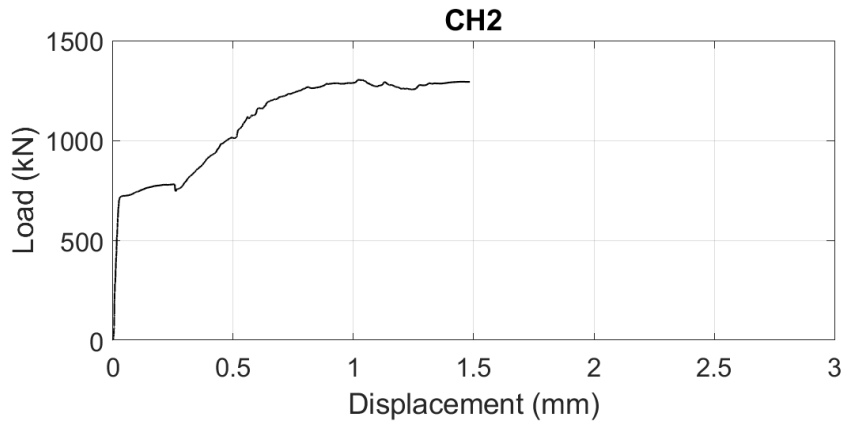


شکل ۵-۲۹: غرب نمونه PC1-B

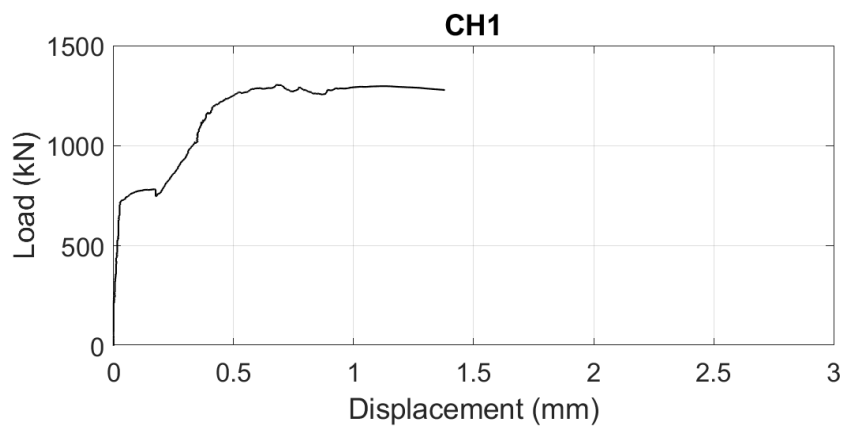
در شکل های ۵-۳۱ تا ۵-۳۳ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳۱-۵: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PCI-B

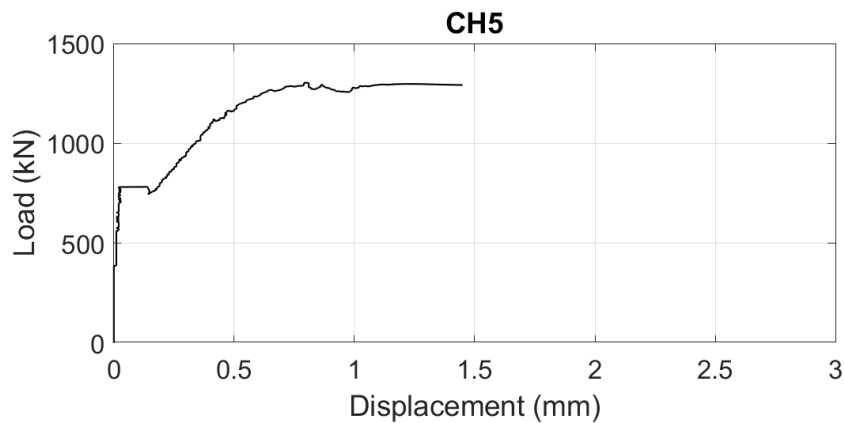


شکل ۳۲-۵: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PCI-B

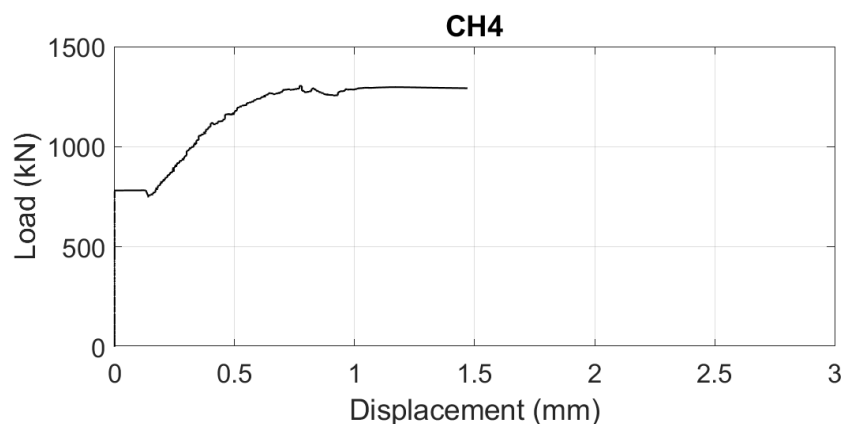


شکل ۳۳-۵: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PCI-B

در شکل ۳۴-۵ و ۳۵-۵ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۳۴-۵: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC1-B



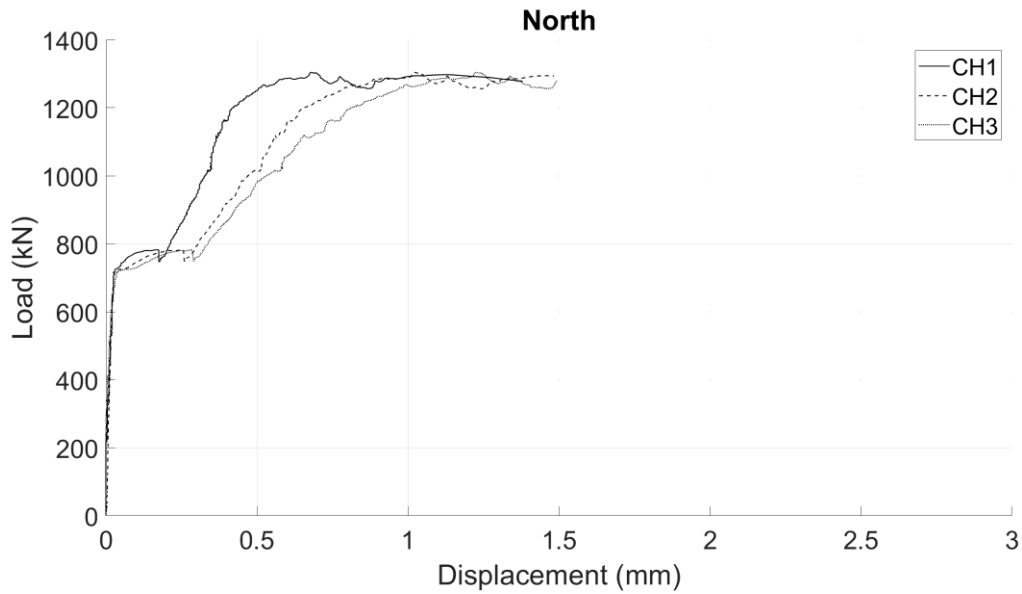
شکل ۳۵-۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC1-B

همانطور که در شکل ۳۱-۵ تا ۳۳-۵ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ اتفاق می‌افتد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۳۴-۵ و ۳۵-۵ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش

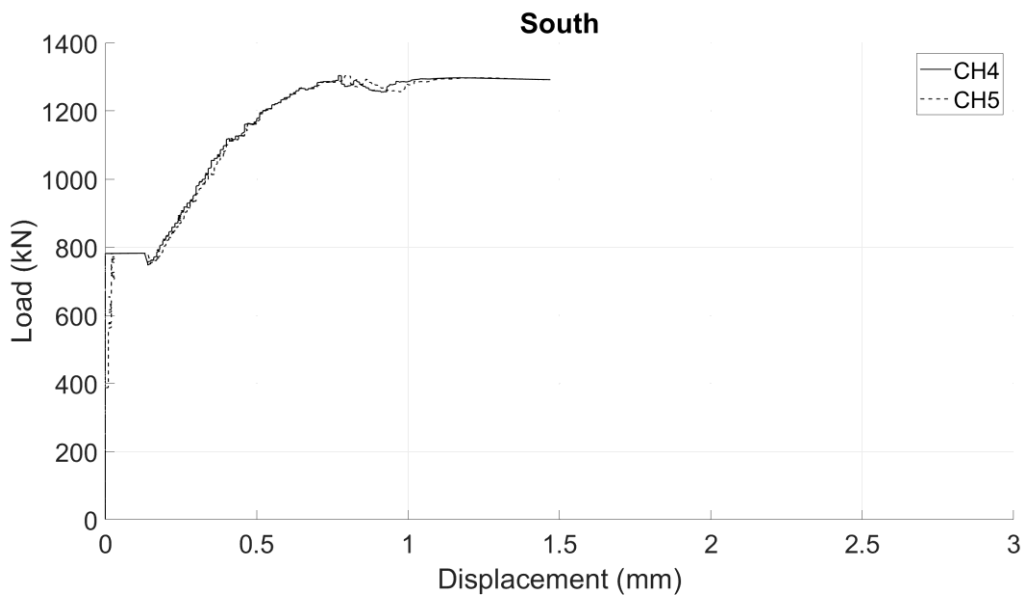


در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۳۶ و ۵-۳۷ آورده شده است.



شکل ۵-۳۶: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PCI-B

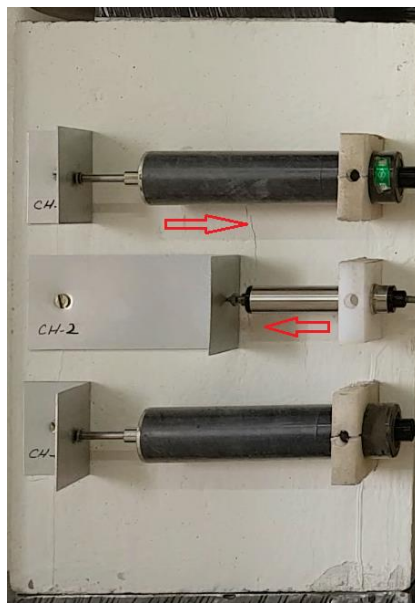


شکل ۵-۳۷: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PCI-B

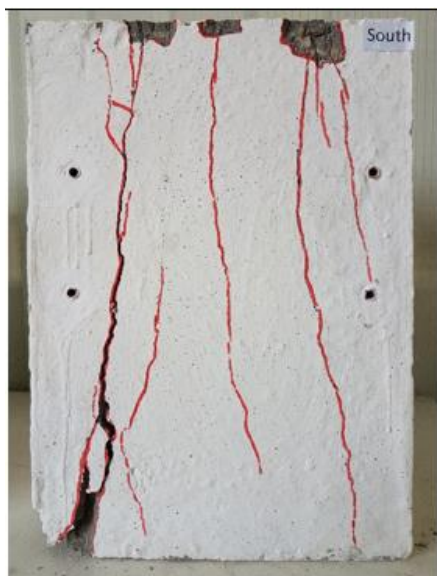
## ۵-۸-۱-۳- نمونه PCI-C

### شرح آزمایش:

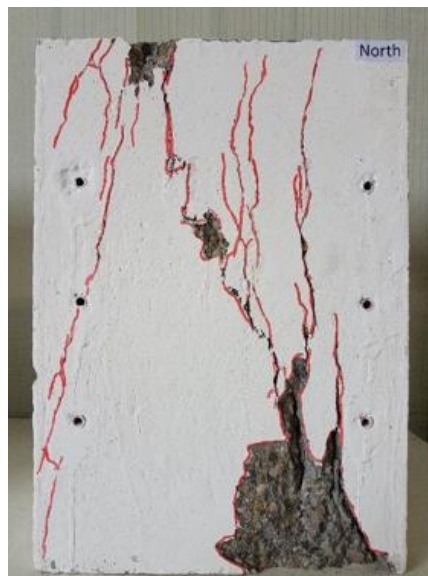
اولین ترک در نیروی ۷۴۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۳۸)، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به طور همزمان در نمای شمالی و جنوبی ترک تقسیم ایجاد شد به طول تقریباً ۱۵ سانتی متر، سپس در نمای شمالی (شکل ۵-۳۹) ترک‌های دیگر پدید آمد به طوری که بیشترین بازشدگی ترک‌ها در قسمت پایین نمونه تشکیل شد، همین موضوع سبب شد تا سنسورها بیشترین جابجایی را بر خلاف نمونه‌های قبلی به ترتیب در کانال شماره ۱ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۳ ثبت کنند، در نمای جنوبی (شکل ۵-۴۰) چندین ترک طولی پدید آمد، سنسورها جابجایی بیشتر را در کانال شماره ۵ با اختلاف اندک نسبت به کانال شماره ۴ را ثبت کردند. در نماهای غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۴۱ و ۵-۴۲) ترک‌های طولی پدید آمد. حداکثر نیروی وارده ۸۶۰ kN بود و بعد از آن نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد.



شکل ۵-۳۸: اولین ترک در نمونه PCI-C



شکل ۵-۴۰: جنوب نمونه PCI-C



شکل ۵-۳۹: شمال نمونه PCI-C

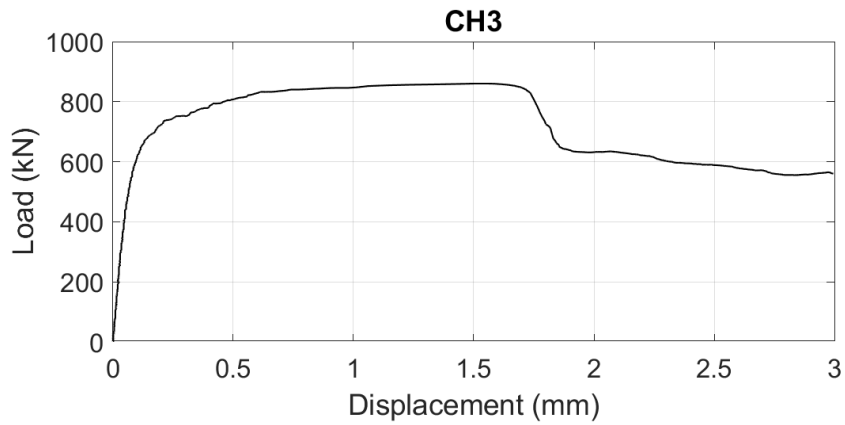


شکل ۵-۴۲: شرق نمونه PCI-C

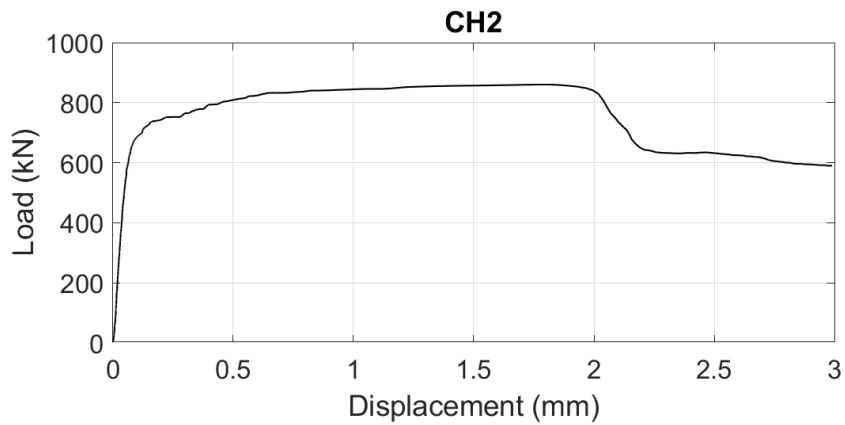


شکل ۵-۴۱: غرب نمونه PCI-C

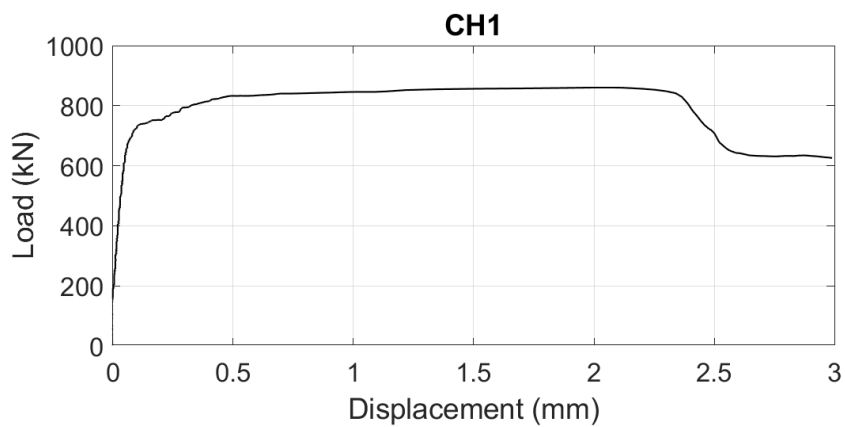
در شکل ۵-۴۳ تا ۵-۴۵ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنجها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴۳-۵: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC1-C

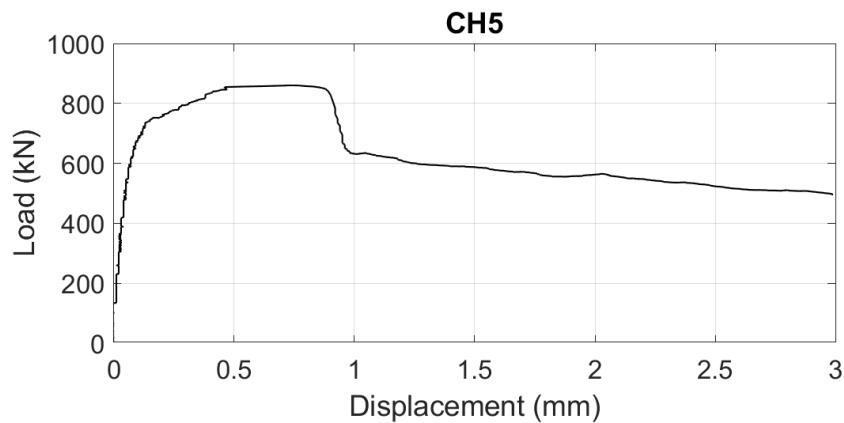


شکل ۴۴-۵: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC1-C

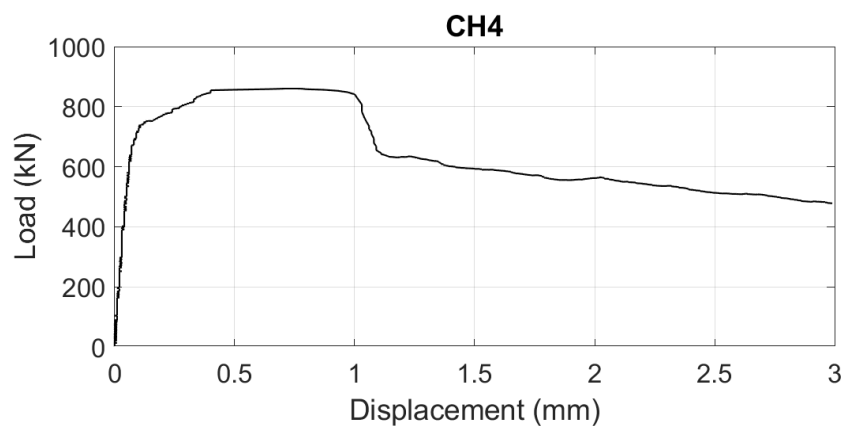


شکل ۴۵-۵: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC1-C

در شکل ۴۶-۵ و ۴۷-۵ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۴۶-۵: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC1-C

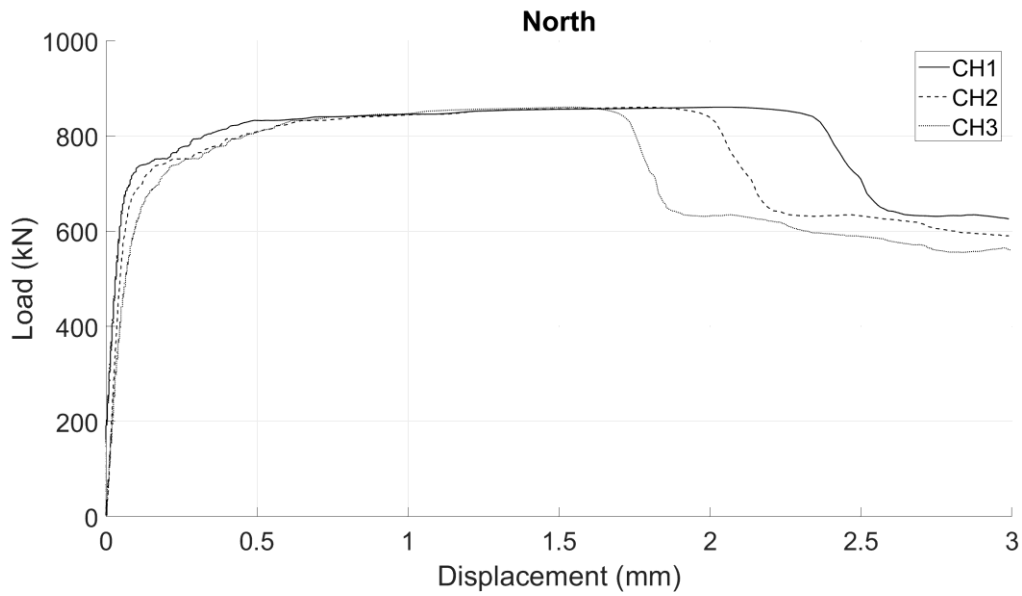


شکل ۴۷-۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC1-C

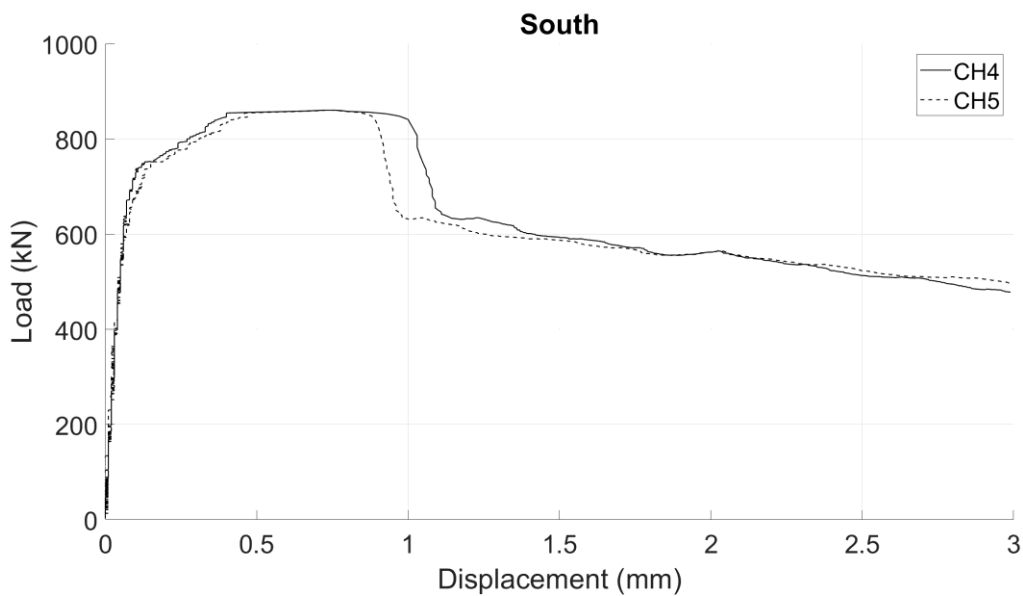
همانطور که در شکل ۴۳-۵ تا ۴۵-۵ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۱ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۳ رخ می‌دهد، که به دلیل شکست نمونه در قسمت پایه می‌باشد. در شکل ۴۶-۵ و ۴۷-۵ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ با اختلاف بسیار کم به نسبت کانال شماره ۴ شاهد

هستیم.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۴۸-۵ و ۴۹-۵ آورده شده است.



شکل ۴۸-۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PCI-C



شکل ۴۹-۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PCI-C

## ۵-۸-۲- آزمایش مرحله دوم

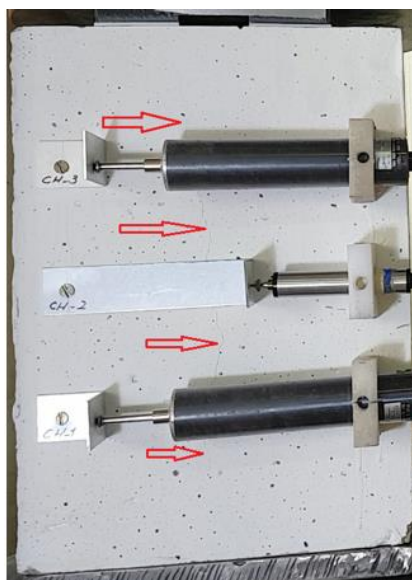
در این مرحله سه نمونه بتن ساده با پلیت پیشنهادی تحت عناوین زیر مورد آزمایش قرار گرفت:

PC2-A, PC2-B, PC2-C

### ۵-۸-۲-۴- نمونه PC2-A

#### شرح آزمایش:

اولین ترک در نیروی ۹۴۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۵)، به این صورت که در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۲۵ سانتی متر می باشد، سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حد اکثر نیروی وارده ۱۲۴۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال نمونه (شکل ۵-۵) چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت جنوب نمونه (شکل ۵-۵) همانند قسمت شمالی چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۵ و ۵-۴) ترک طولی ایجاد شد.



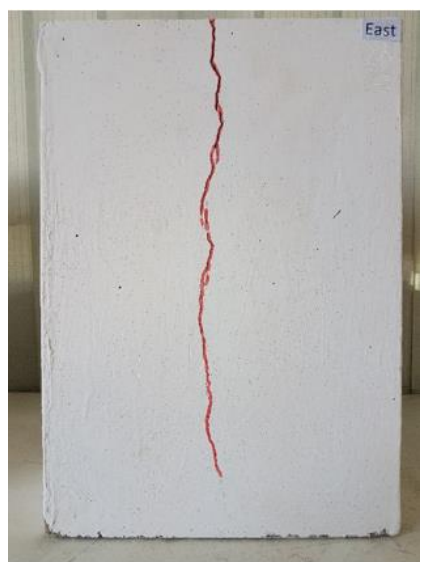
شکل ۵-۵۰: اولین ترک در نمونه PC2-A



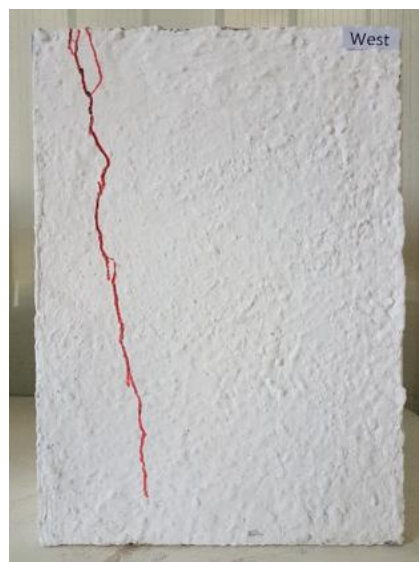
شکل ۵-۵۲: جنوب نمونه PC2-A



شکل ۵-۵۱: شمال نمونه PC2-A



شکل ۵-۵۴: شرق نمونه PC2-A

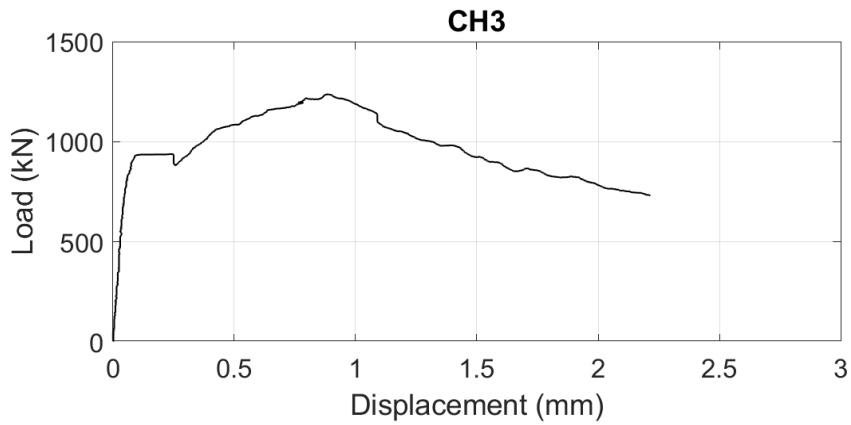


شکل ۵-۵۳: غرب نمونه PC2-A

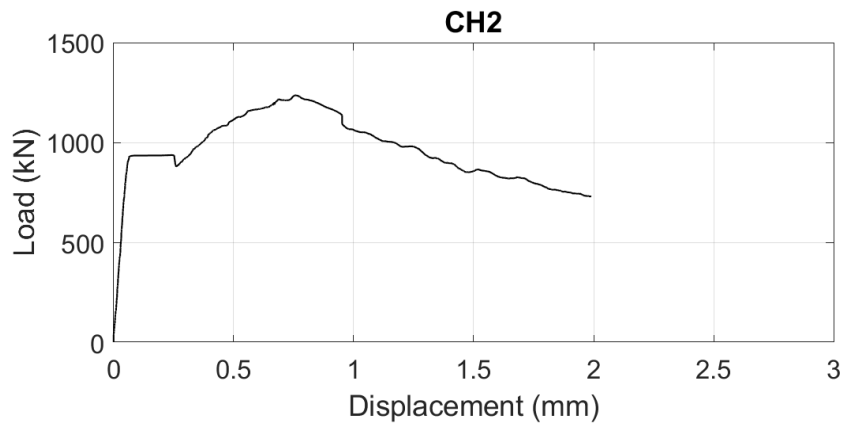
در شکل ۵-۵۵ تا ۵-۵۷ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱

تا ۳ نشان داده شده است.

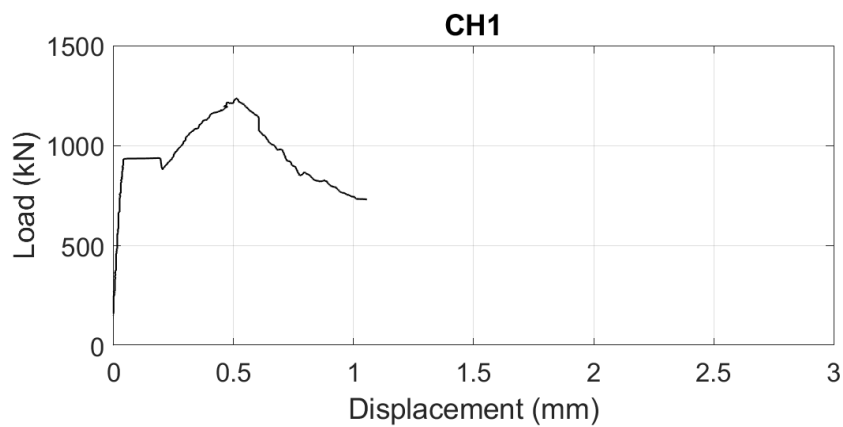




شکل ۵-۵۵: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-A

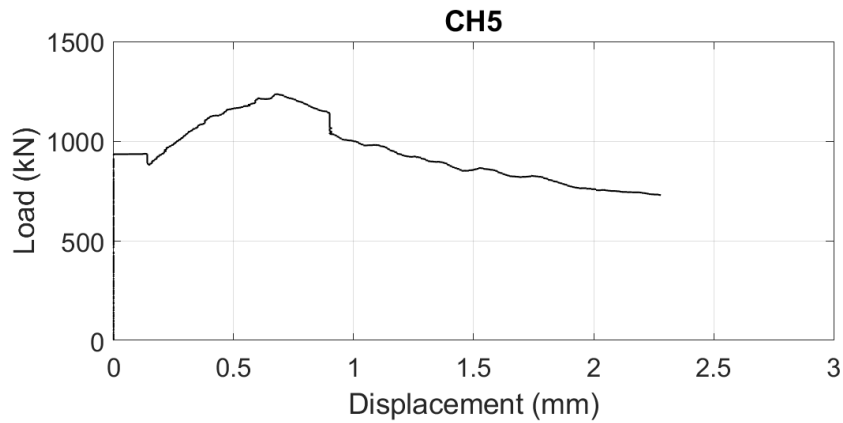


شکل ۵-۵۶: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-A

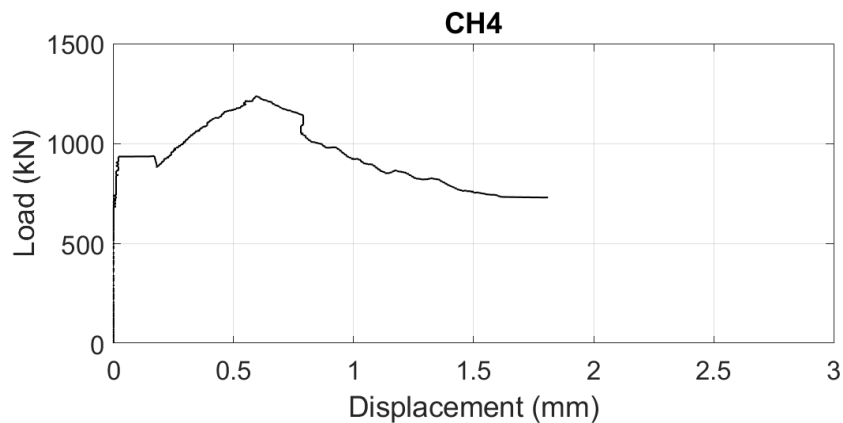


شکل ۵-۵۷: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-A

در شکل ۵-۵۸ و ۵-۵۹ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۵۸: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-A

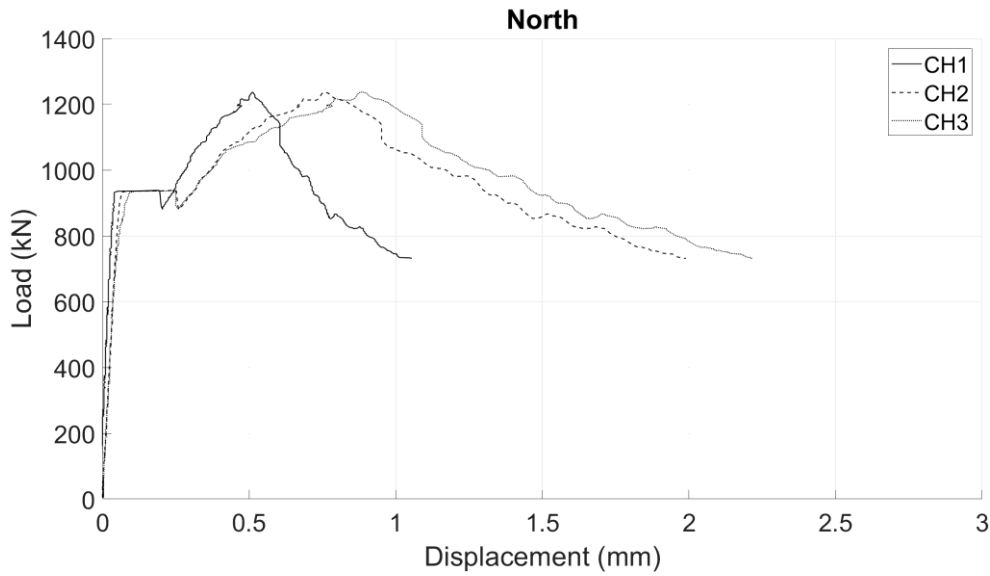


شکل ۵-۵۹: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-A

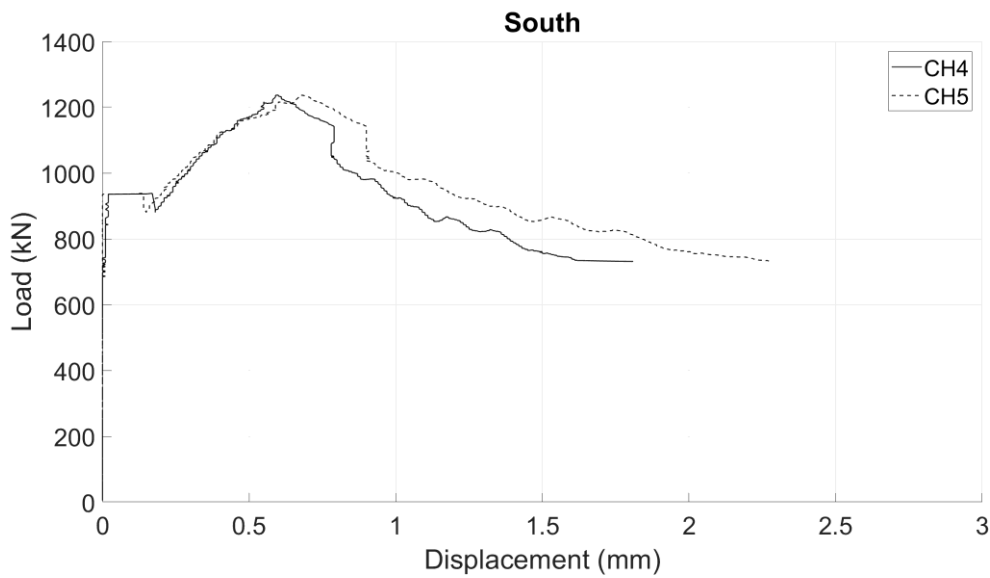
همانطور که در شکل ۵-۵۵ تا ۵-۵۷ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۵۸ و ۵-۵۹ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۶۰ و ۵-۶۱ آورده شده است.



شکل ۵-۶۰: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-A

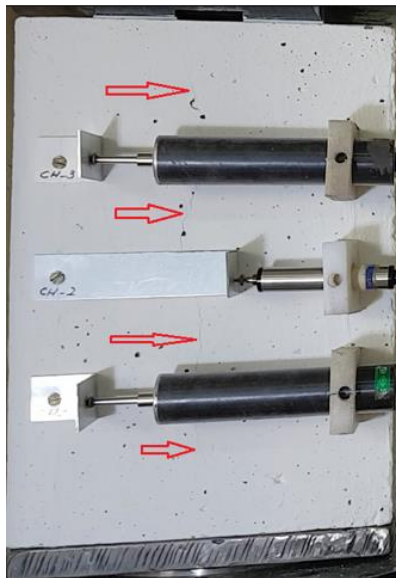


شکل ۵-۶۱: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-A

## ۵-۸-۲-۵- نمونه PC2-B

### شرح آزمایش:

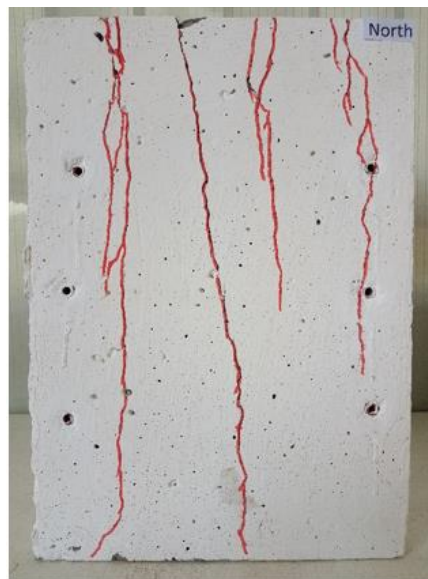
اولین ترک در نیروی ۹۵۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۶۲)، به این صورت که در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمالی و جنوبی ترک تقسیم ایجاد شد طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی متر می باشد، سپس افت نیرو ایجاد شد، و بعد دوباره افزایش نیرو، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۱۶۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال نمونه (شکل ۵-۶۳) چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت جنوب نمونه (شکل ۵-۶۴) همانند قسمت شمالی چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت غرب نمونه (شکل ۵-۶۵) ترک طولی ایجاد شد، در قسمت شرق نمونه (شکل ۵-۶۶) ترک طولی مشاهده نشد.



شکل ۵-۶۲: اولین ترک در نمونه PC2-B



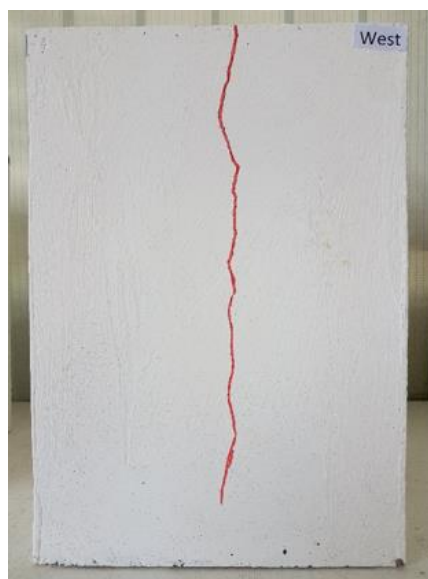
شکل ۵-۶۴: جنوب نمونه PC2-B



شکل ۵-۶۳: شمال نمونه PC2-B

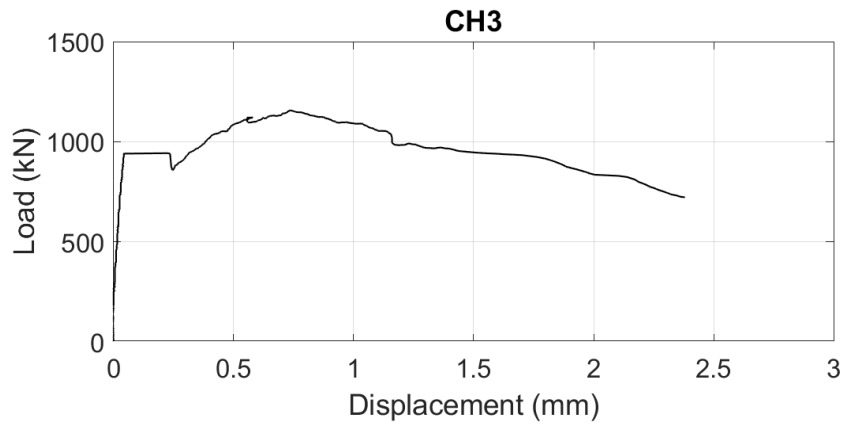


شکل ۵-۶۶: شرق نمونه PC2-B

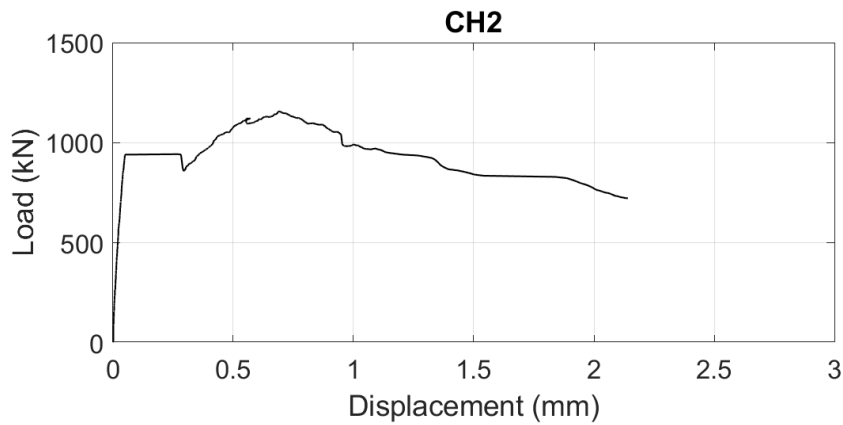


شکل ۵-۶۵: غرب نمونه PC2-B

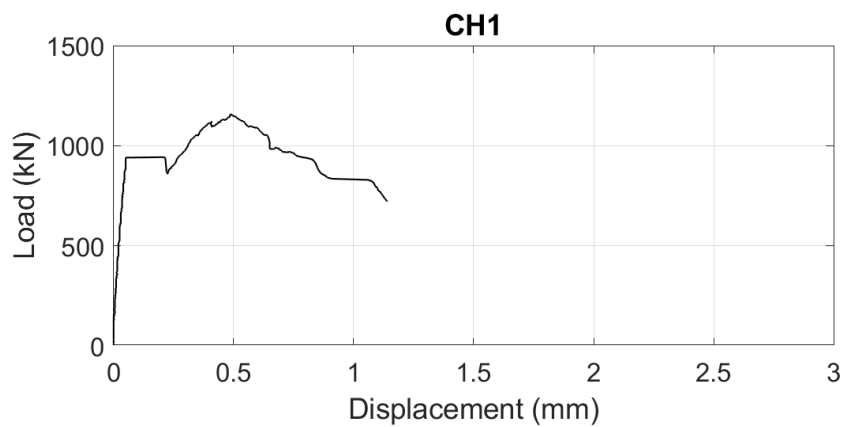
در شکل ۵-۶۷ تا ۵-۶۹ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنجها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۶۷: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-B

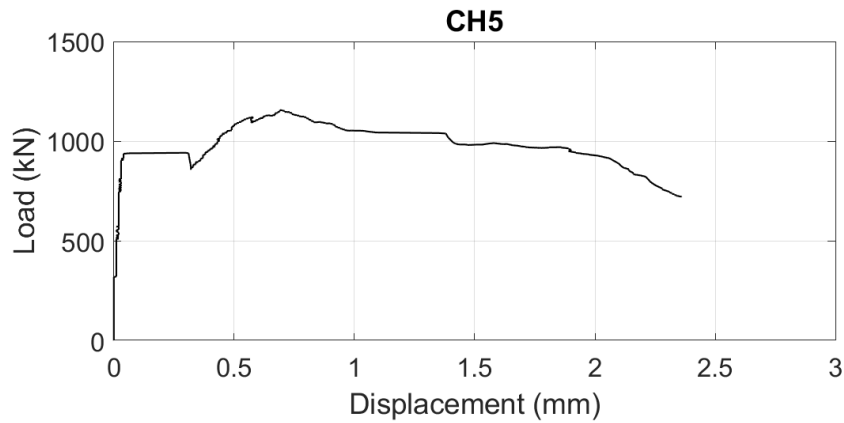


شکل ۵-۶۸: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-B

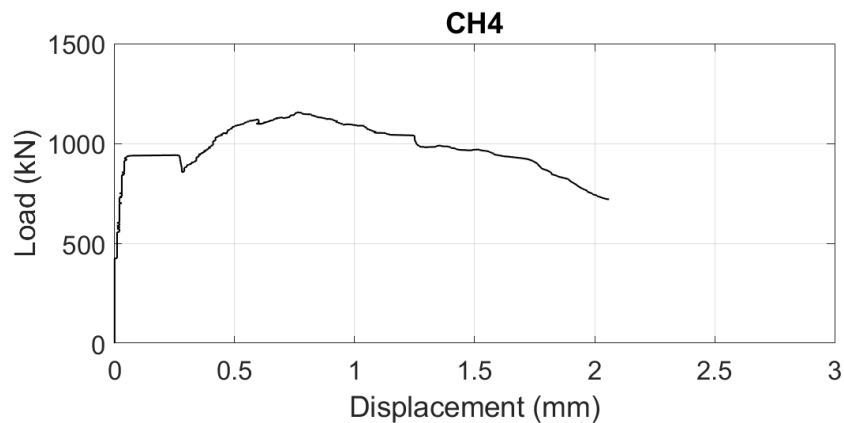


شکل ۵-۶۹: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-B

در شکل ۷۰-۵ و ۷۱-۵ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷۰-۵: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-B

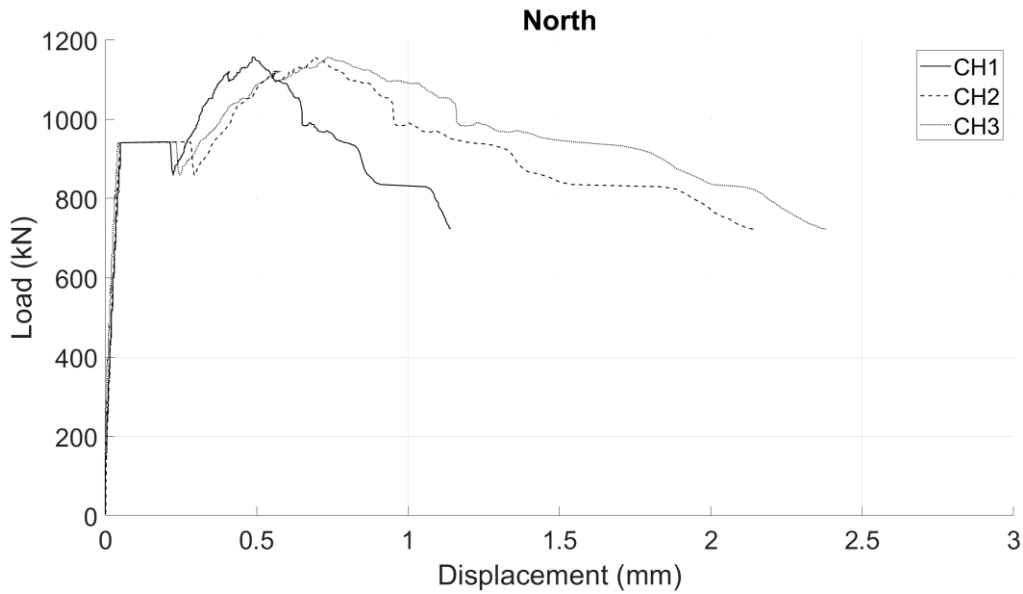


شکل ۷۱-۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-B

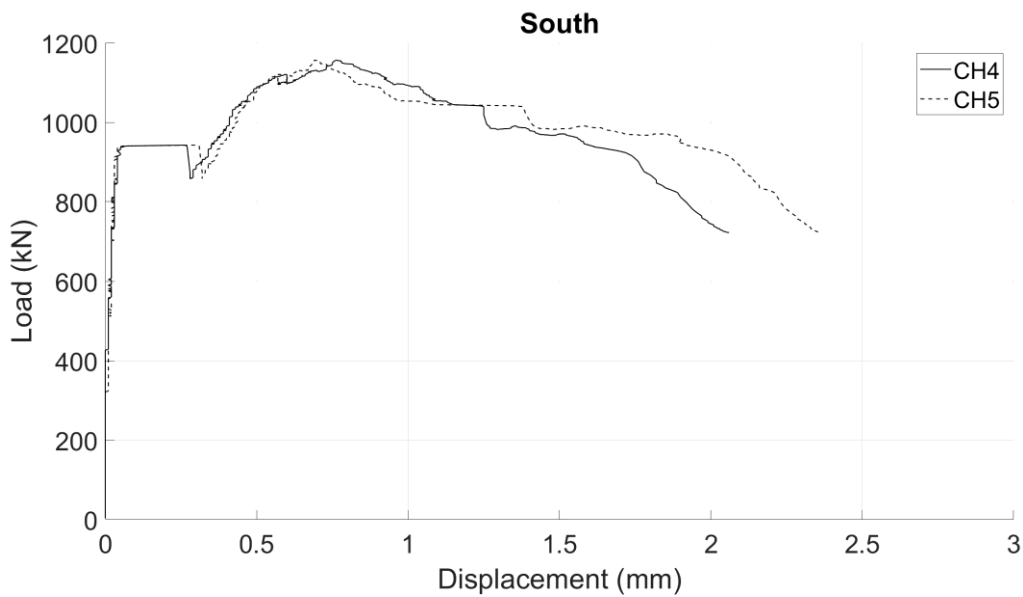
همانطور که در شکل ۶۷-۵ تا ۶۹-۵ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۷۰-۵ و ۷۱-۵ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل های ۷۲-۵ و ۷۳-۵ آورده شده است.



شکل ۷۲-۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-B



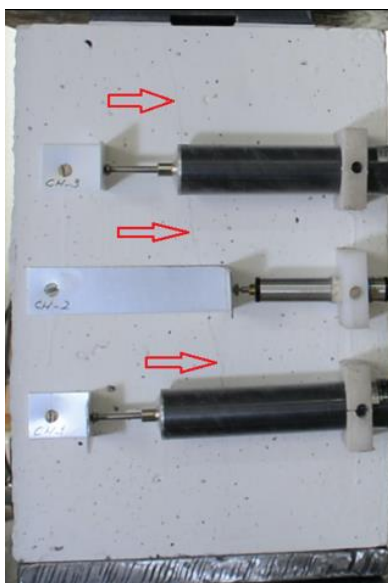
شکل ۷۳-۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-B



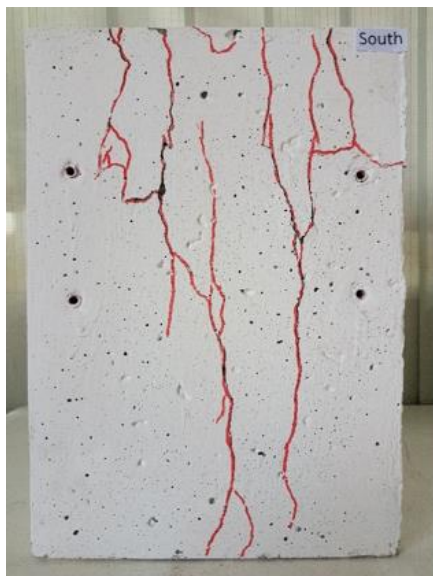
## ۵-۸-۲-۶- نمونه PC2-C

### شرح آزمایش:

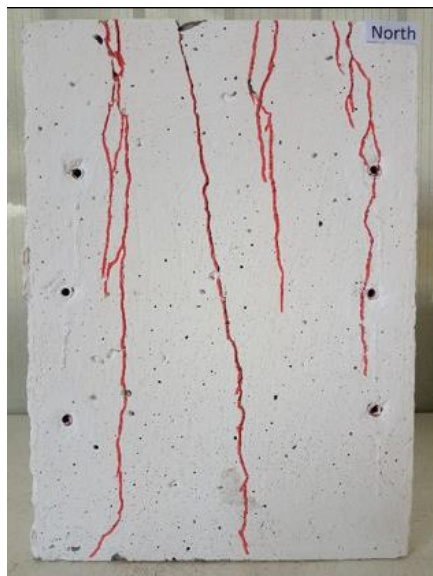
اولین ترک در نیروی ۹۰۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۷۴)، به این صورت که در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمالی و جنوبی ترک تقسیم ایجاد شد طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی متر می باشد، سپس افت نیرو ایجاد شد، و بعد دوباره افزایش نیرو، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۳۳۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال نمونه (شکل ۵-۷۵) چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت جنوب نمونه (شکل ۵-۷۶) همانند قسمت شمالی چندین ترک طولی اصلی ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۷۷ و ۵-۷۸) ترک طولی ایجاد شد.



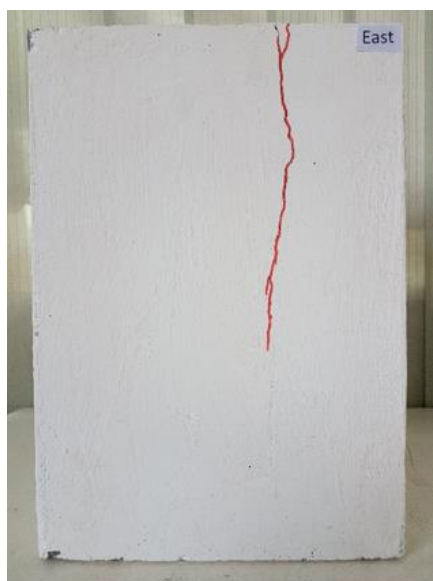
شکل ۵-۷۴: اولین ترک در نمونه PC2-C



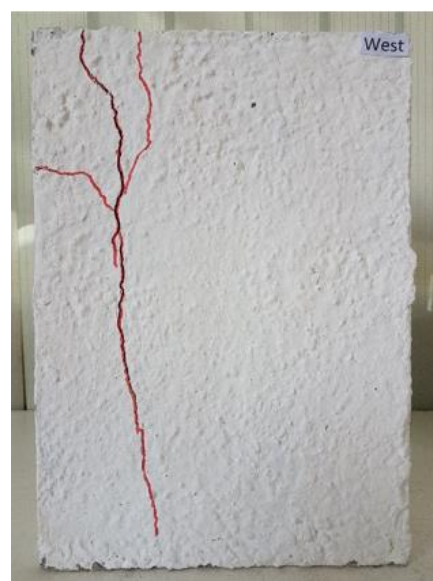
شکل ۵-۷۶: جنوب نمونه PC2-C



شکل ۵-۷۵: شمال نمونه PC2-C

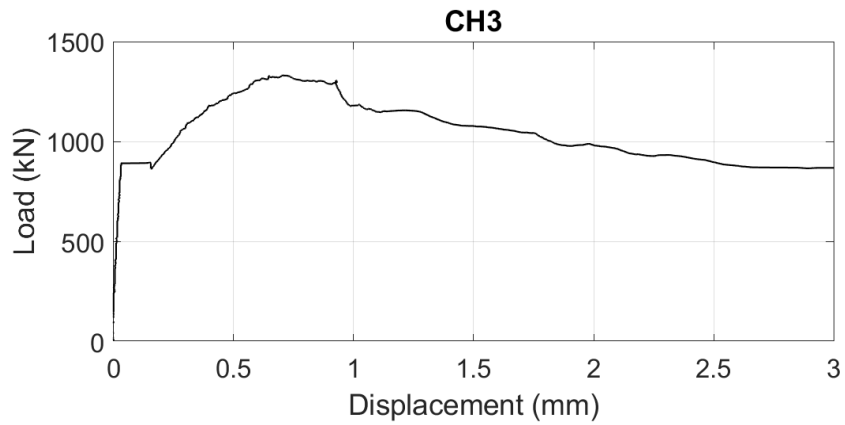


شکل ۵-۷۸: شرق نمونه PC2-C

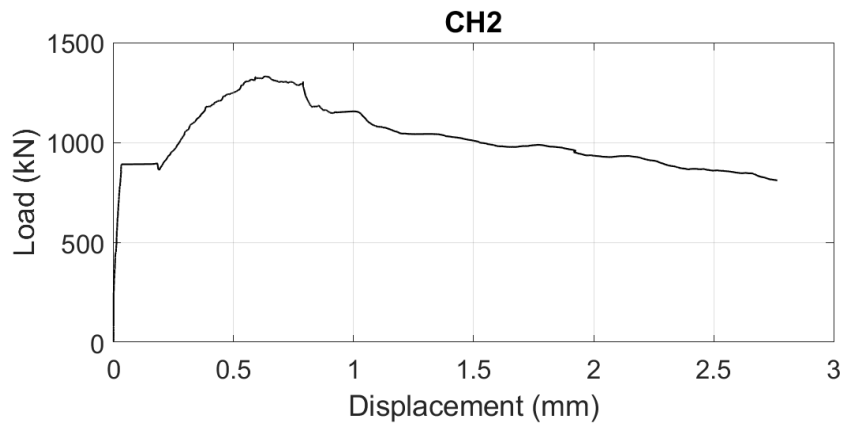


شکل ۵-۷۷: غرب نمونه PC2-C

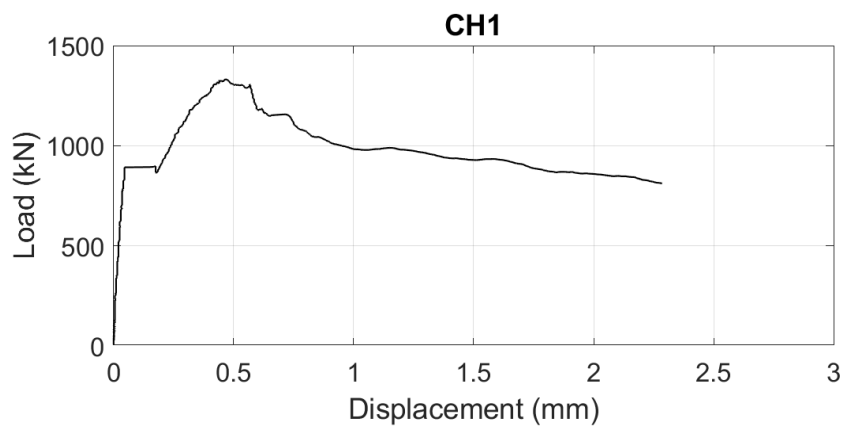
در شکل ۵-۷۹ تا ۵-۸۱ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷۹: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه PC2-C

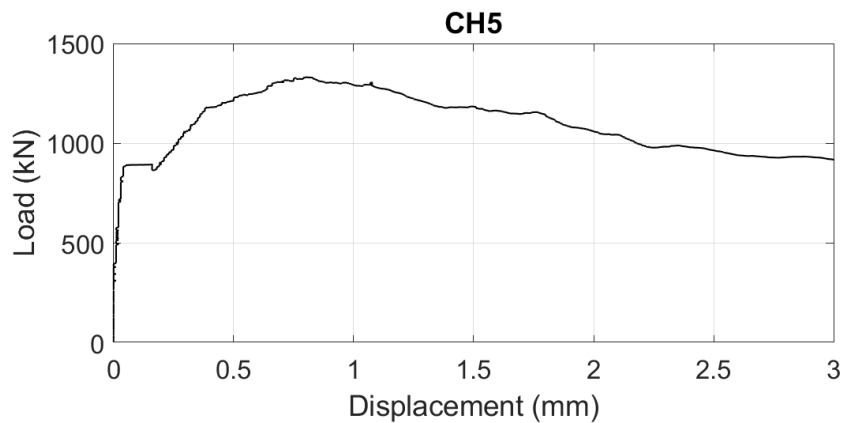


شکل ۵-۸۰: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه PC2-C

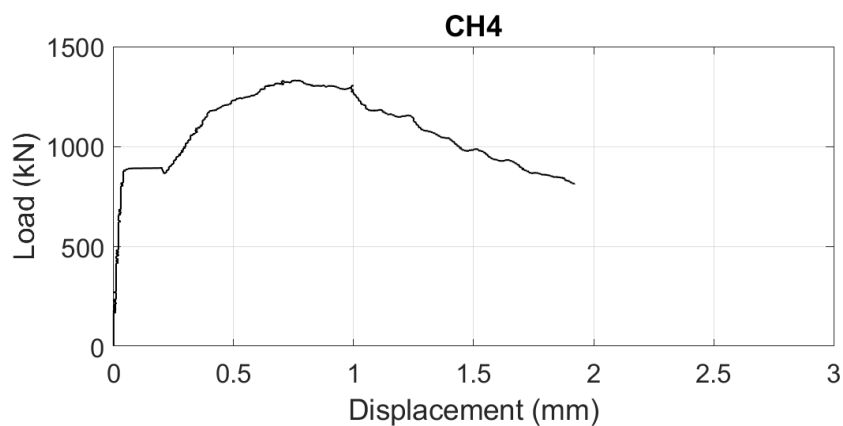


شکل ۵-۸۱: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه PC2-C

در شکل ۵-۸۲ و ۵-۸۳ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۸۲: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه PC2-C

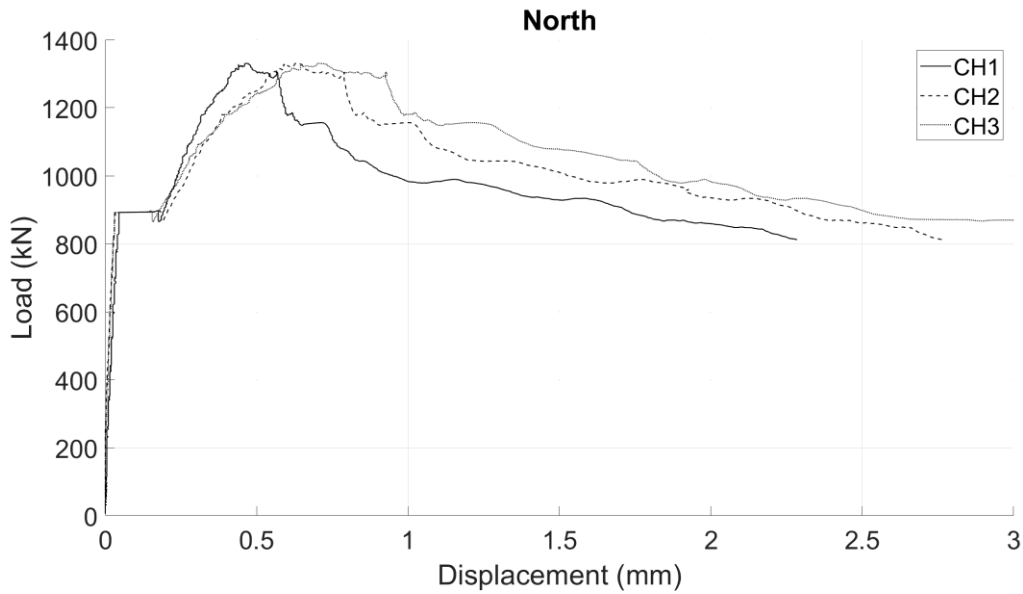


شکل ۵-۸۳: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه PC2-C

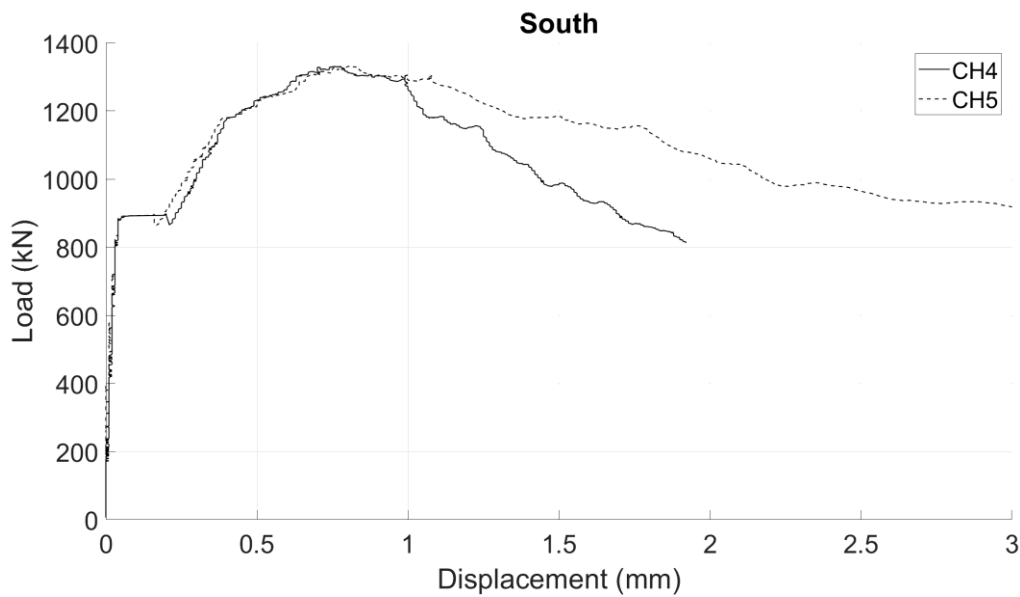
همانطور که در شکل ۵-۷۹ تا ۵-۸۱ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۸۲ و ۵-۸۳ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۸۴ و ۵-۸۵ آورده شده است.



شکل ۵-۸۴: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه PC2-C



شکل ۵-۸۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه PC2-C

## ۵-۸-۳- آزمایش مرحله سوم

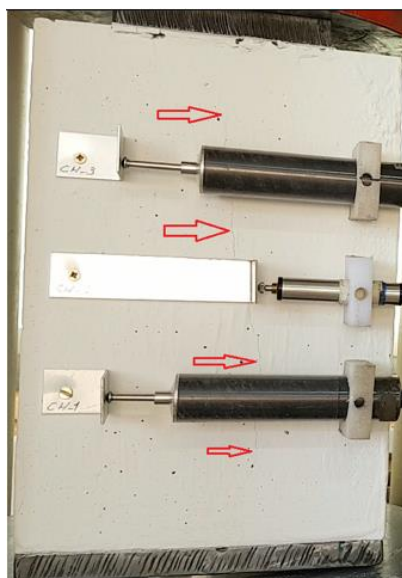
در این مرحله سه نمونه بتن الیافی با پلیت ساده تحت عناوین زیر مورد آزمایش قرار گرفت:

SFRC1-A, SFRC1-B, SFRC1-C

## ۵-۸-۳-۷- نمونه SFRC1-A

### شرح آزمایش:

اولین ترک در نیروی ۷۱۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۸۶)، به این صورت که در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی متر می باشد، سپس افت نیرو ایجاد شد، و بعد دوباره افزایش نیرو، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حد اکثر نیروی وارده ۱۲۶۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال و جنوب نمونه (شکل ۵-۸۷ و ۵-۸۸) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۸۹ و ۵-۹۰) ترک طولی ایجاد شد.



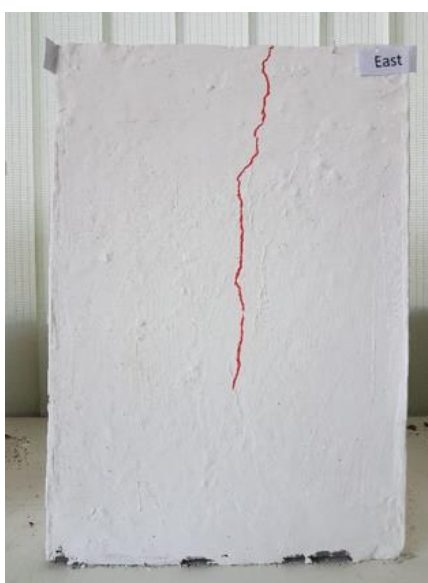
شکل ۵-۸۶: اولین ترک در نمونه SFRC1-A



شکل ۵-۸۸: جنوب نمونه SFRC1-A



شکل ۵-۸۷: شمال نمونه SFRC1-A

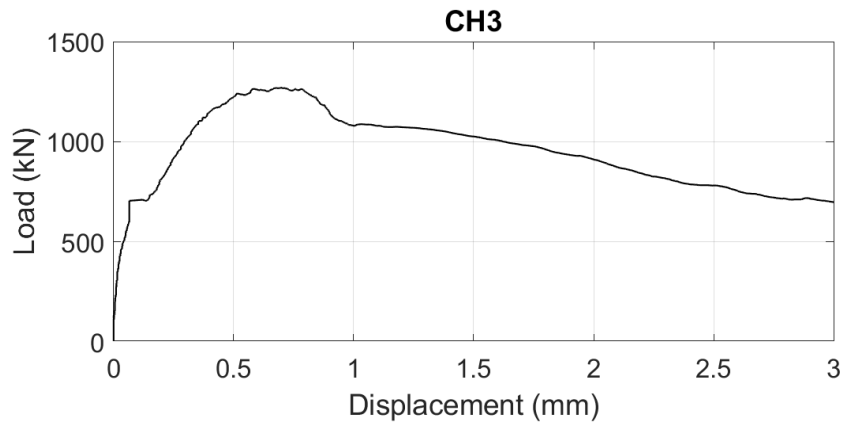


شکل ۵-۹۰: شرق نمونه SFRC1-A

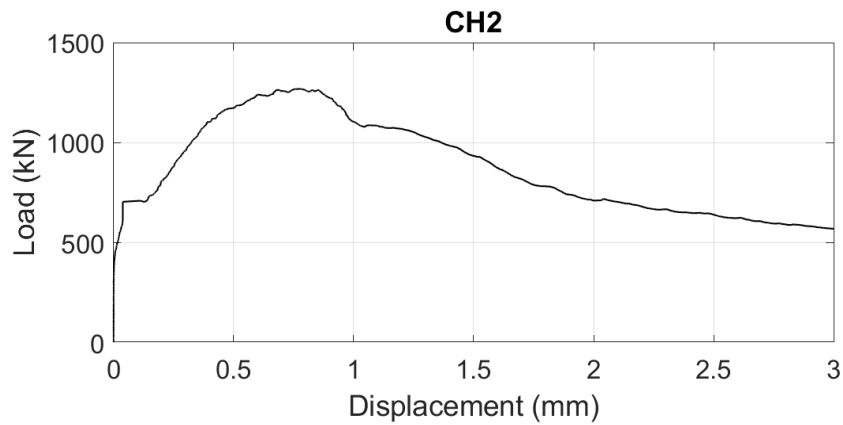


شکل ۵-۸۹: غرب نمونه SFRC1-A

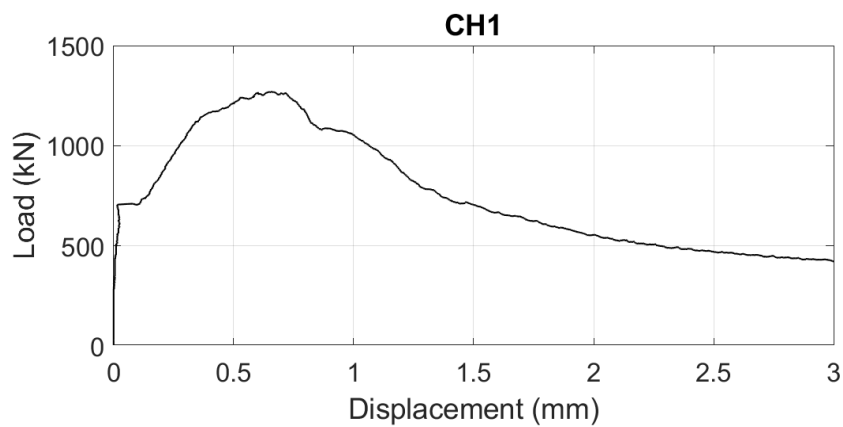
در شکل ۵-۹۱ تا ۵-۹۳ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۹۱: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A



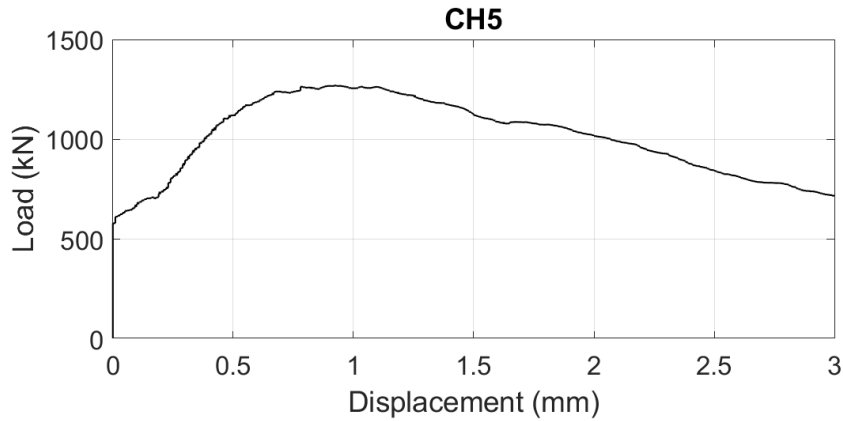
شکل ۵-۹۲: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A



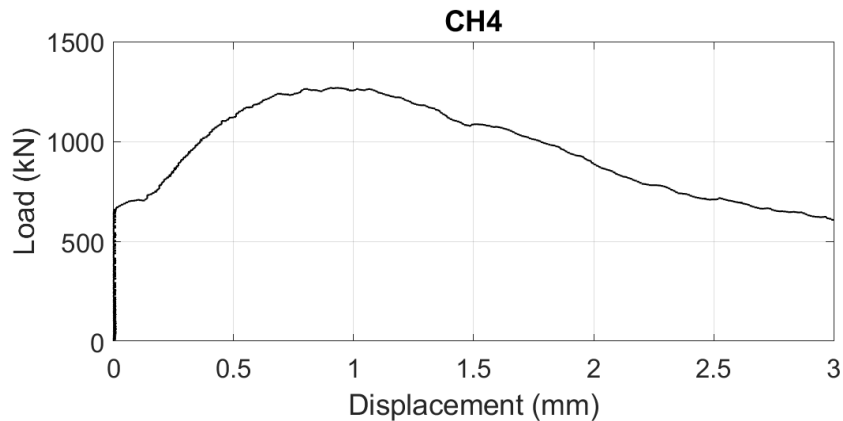
شکل ۵-۹۳: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-A



در شکل ۵-۹۴ و ۵-۹۵ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۹۴: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-A

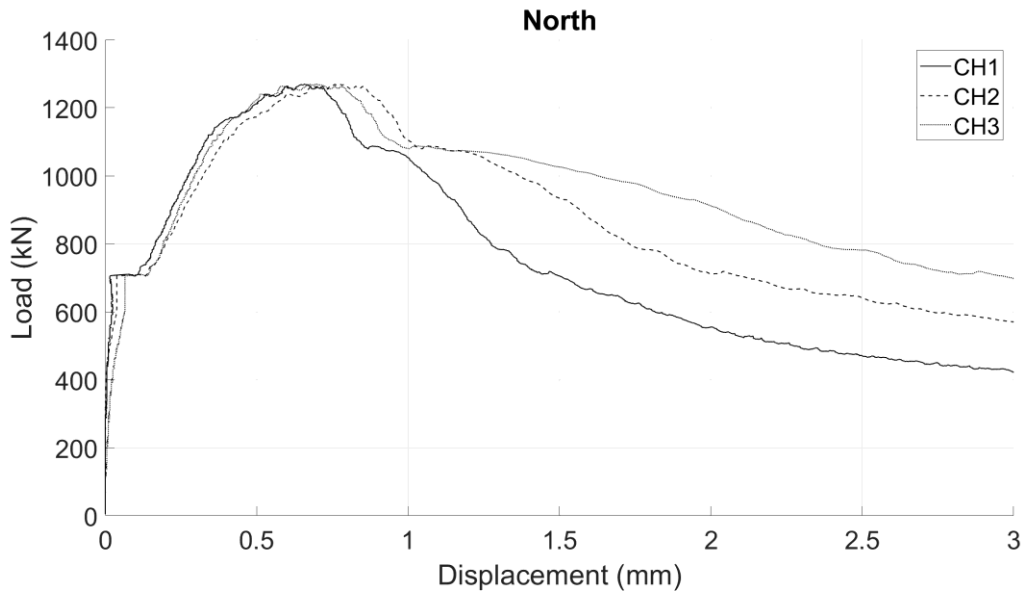


شکل ۵-۹۵: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-A

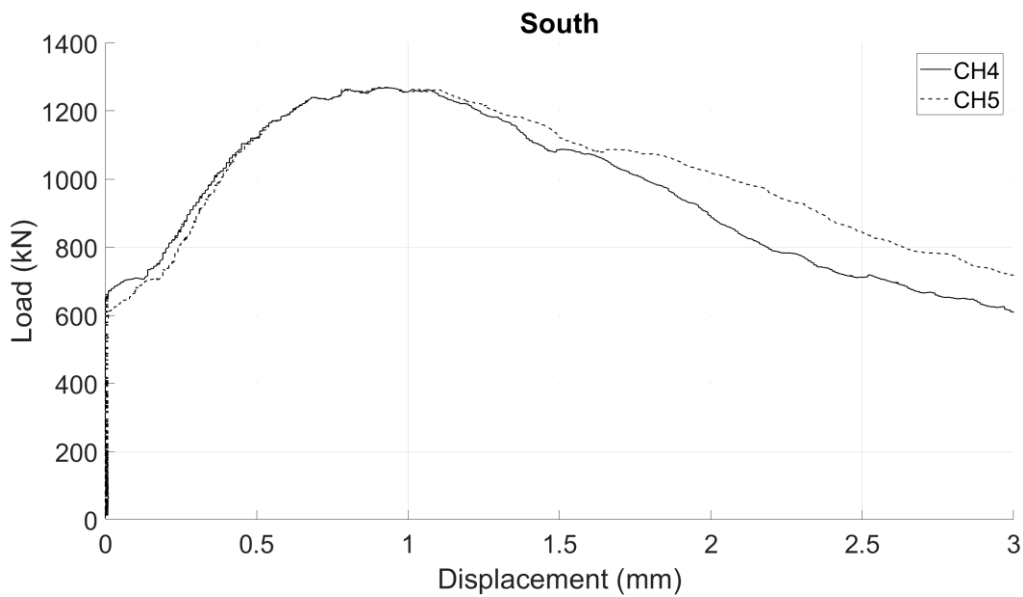
همانطور که در شکل ۵-۹۱ تا ۵-۹۳ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۹۴ و ۵-۹۵ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۹۶ و ۵-۹۷ آورده شده است.



شکل ۵-۹۶: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-A



شکل ۵-۹۷: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-A

## ۸-۳-۸-۵- نمونه SFRC1-B

### شرح آزمایش:

اولین ترک در نیروی ۷۷۰ kN ایجاد شد، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی متر می باشد، سپس افت نیرو ایجاد شد، و بعد دوباره افزایش نیرو، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۵۶۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال و جنوب نمونه (شکل ۹۸-۵ و ۹۹-۵) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل ایجاد شد. در قسمت غرب نمونه (شکل ۱۰۰-۵) ترک طولی ایجاد شد، در قسمت شرق نمونه (شکل ۱۰۱-۵) ترک ایجاد نشد.



شکل ۹۹-۵: جنوب نمونه SFRC1-B



شکل ۹۸-۵: شمال نمونه SFRC1-B

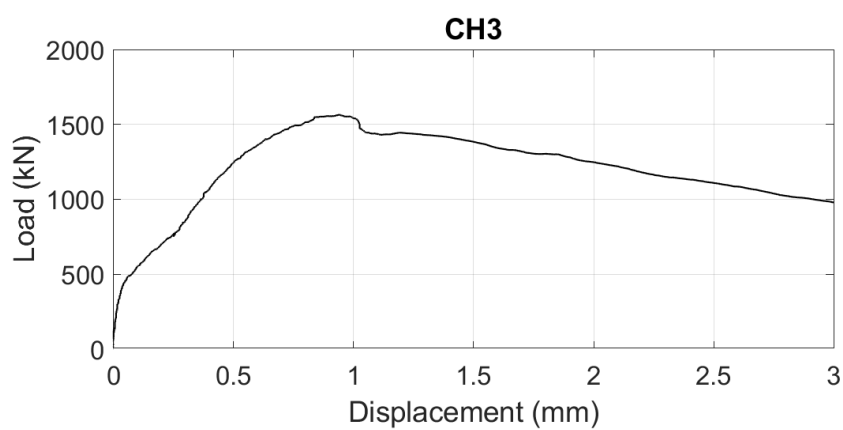


شکل ۵-۱۰۱: شرق نمونه SFRC1-B

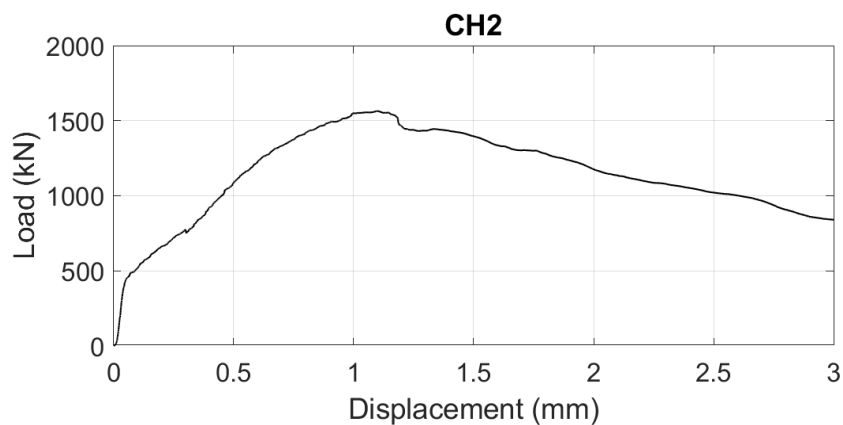


شکل ۵-۱۰۰: غرب نمونه SFRC1-B

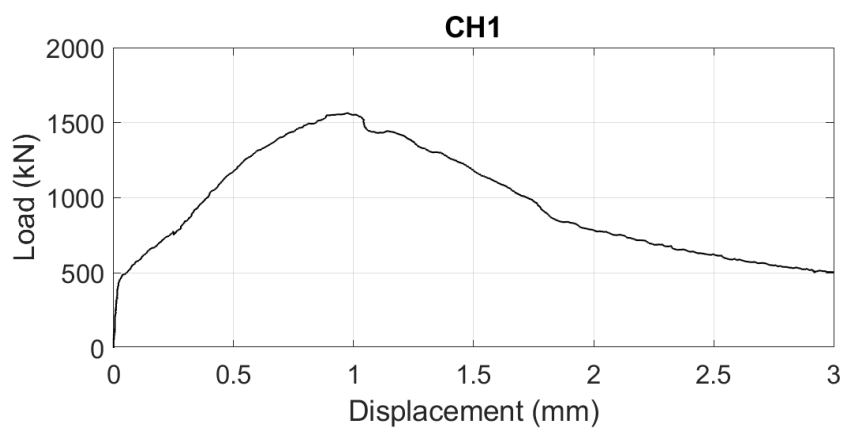
در شکل ۵-۱۰۲ تا ۵-۱۰۴ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰۲: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B

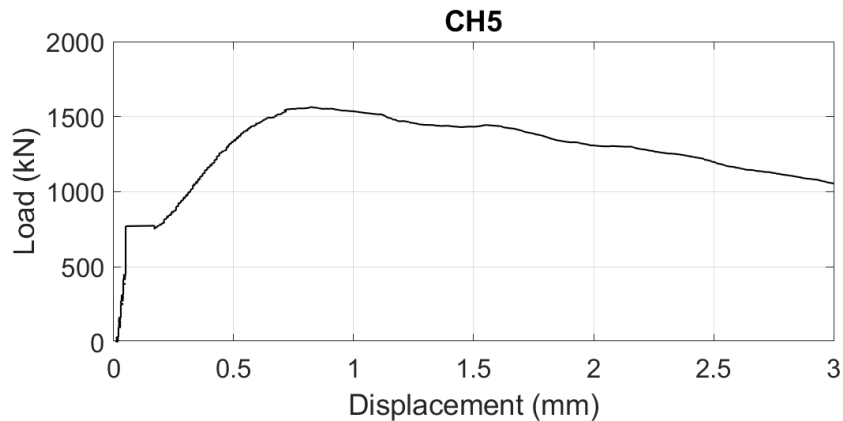


شکل ۵-۱۰۳: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B

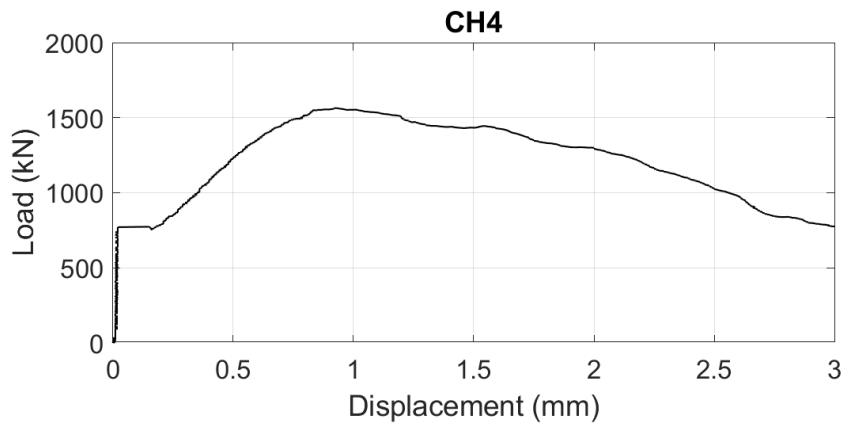


شکل ۵-۱۰۴: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-B

در شکل ۵-۱۰۵ و ۵-۱۰۶ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰۵: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-B

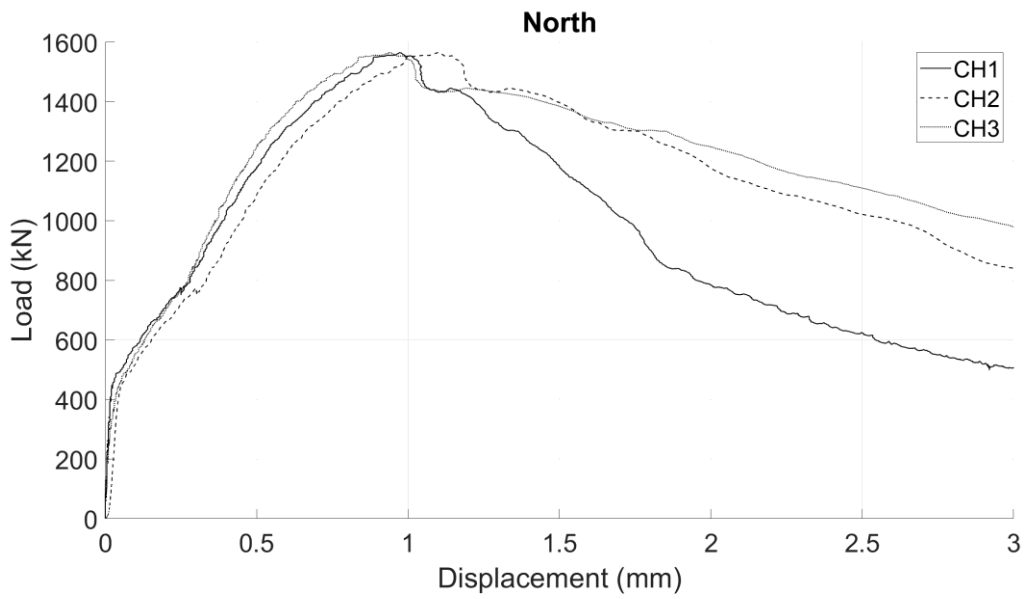


شکل ۵-۱۰۶: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-B

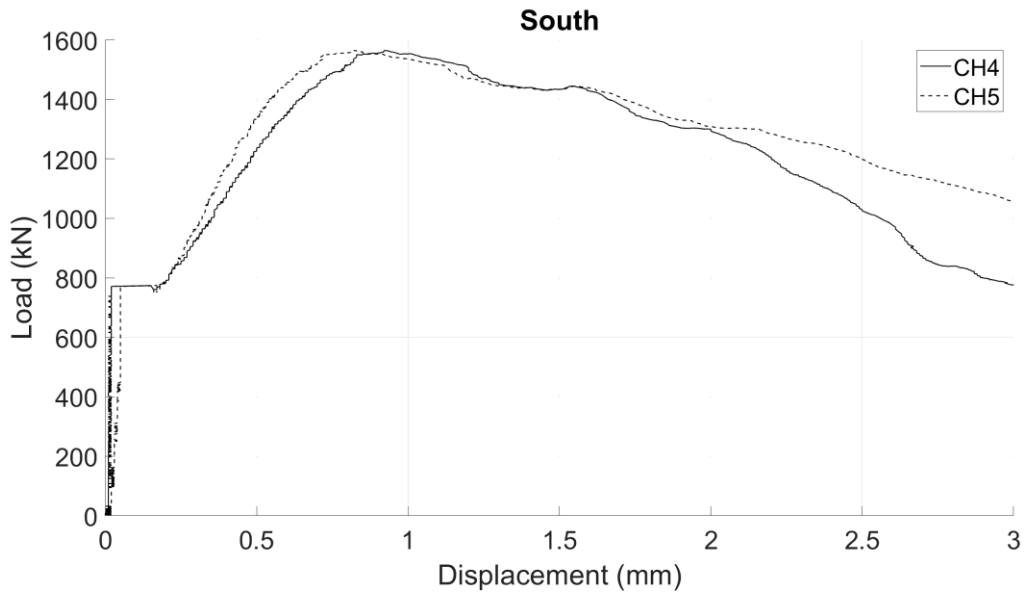
همانطور که در شکل ۵-۱۰۲ تا ۵-۱۰۴ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده ایم. در شکل ۵-۱۰۵ و ۵-۱۰۶ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ را شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می‌باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال و جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۱۰۷ و ۵-۱۰۸ آورده

شده است.



شکل ۵-۱۰۷: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-B

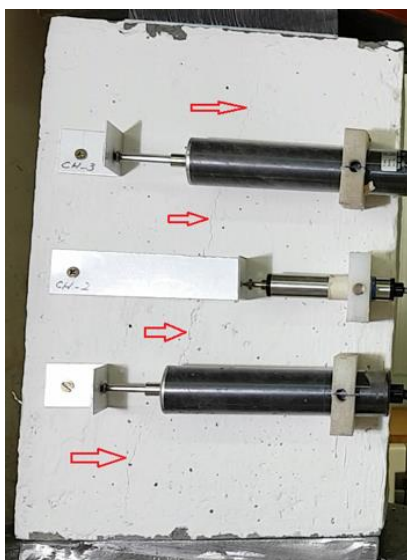


شکل ۵-۱۰۸: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-B

## ۵-۸-۳-۹- نمونه SFRC1-C

### شرح آزمایش:

اولین ترک در نیروی ۶۸۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۱۰۹)، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد، سپس افت نیرو ایجاد شد، و بعد دوباره افزایش نیرو، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. در نمای شمالی (شکل ۵-۱۱۰) ترک‌های دیگر پدید آمد به طوری که بیشترین بازشدگی ترک‌ها در قسمت پایین نمونه تشکیل شد، همین موضوع سبب شد تا سنسورها بیشترین جابجایی را بر خلاف نمونه‌های قبلی به ترتیب در کانال شماره ۱ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۳ ثبت کنند، در نمای جنوبی (شکل ۵-۱۱۱) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک‌های ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل می‌باشد. در نماهای غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۱۱۲ و ۵-۱۱۳) ترک‌هایی پدید آمد. حداکثر نیروی وارده ۱۱۵۰ kN می‌باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد.



شکل ۵-۱۰۹: اولین ترک در نمونه SFRC1-C





شکل ۵-۱۱۱: جنوب نمونه SFRC1-C



شکل ۵-۱۱۰: شمال نمونه SFRC1-C

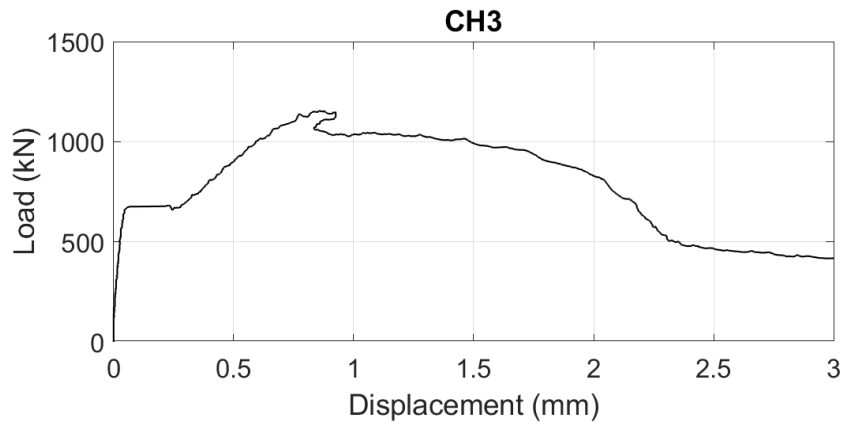


شکل ۵-۱۱۳: شرق نمونه SFRC1-C

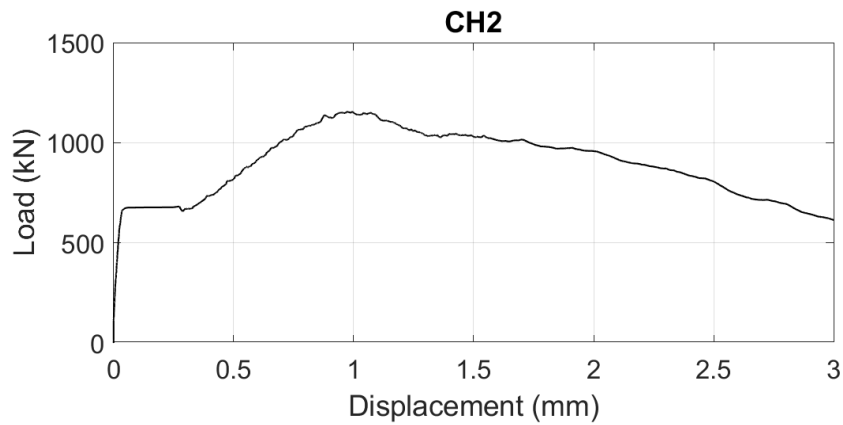


شکل ۵-۱۱۲: غرب نمونه SFRC1-C

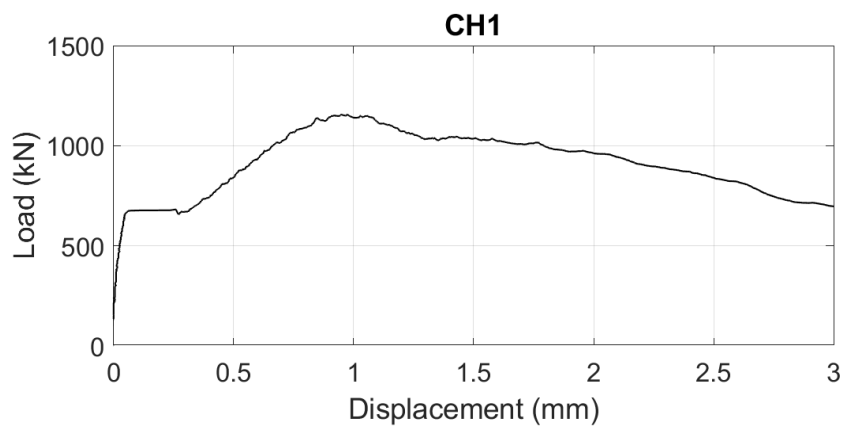
در شکل ۵-۱۱۴ تا ۵-۱۱۶ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۱۴: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C

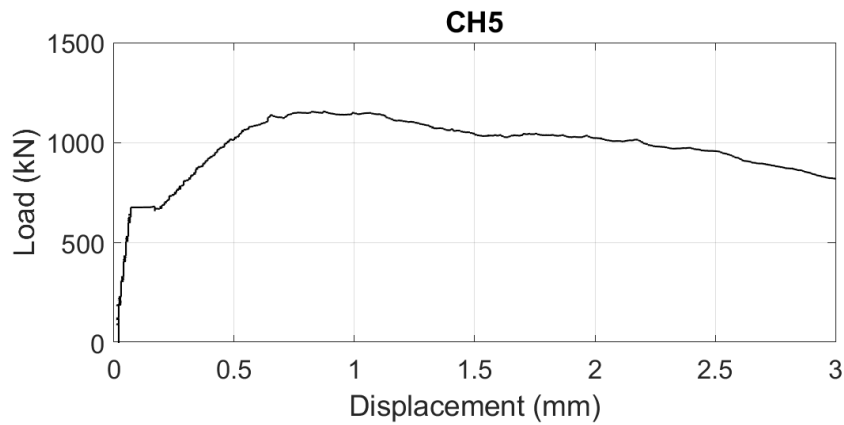


شکل ۵-۱۱۵: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C

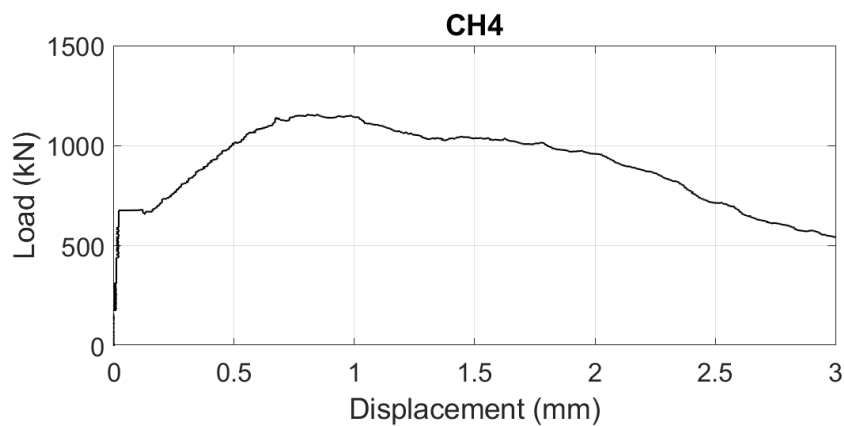


شکل ۵-۱۱۶: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC1-C

در شکل ۵-۱۱۷ و ۵-۱۱۸ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۱۱۷: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-C

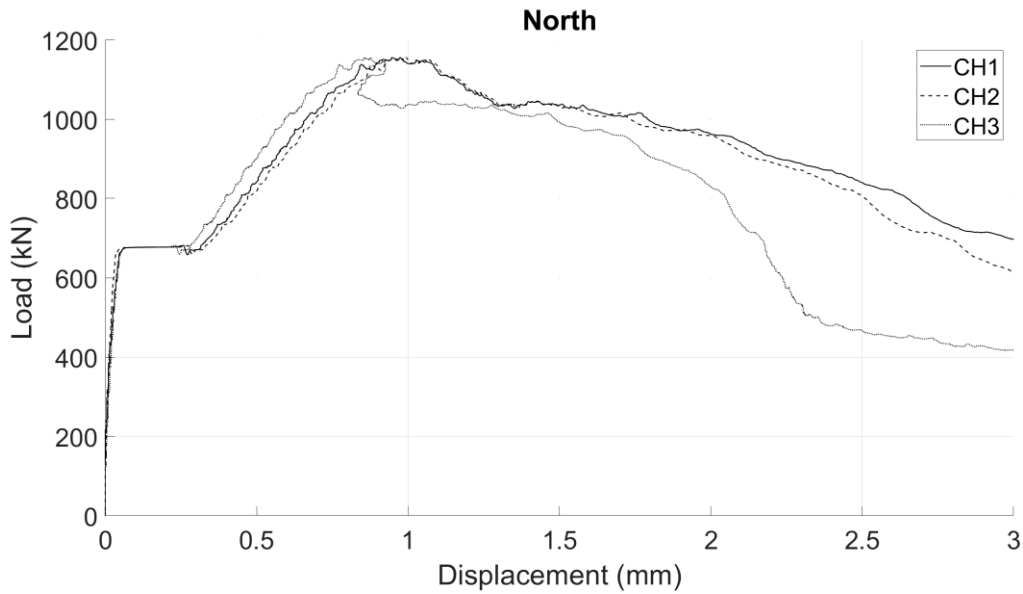


شکل ۵-۱۱۸: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC1-C

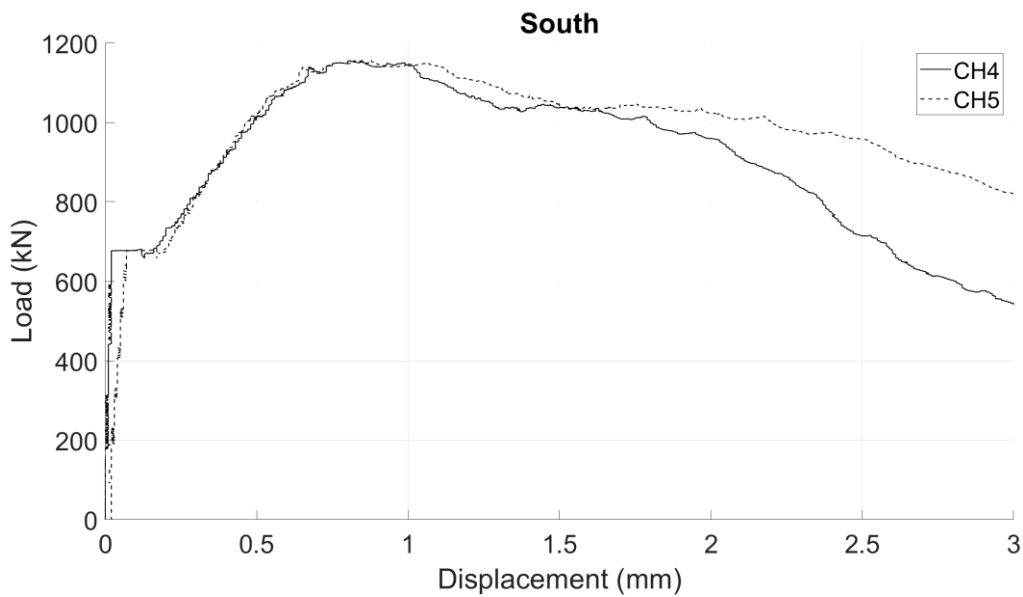
همانطور که در شکل ۵-۱۱۴ تا ۵-۱۱۶ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۱ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۳ رخ می‌دهد، که به دلیل شکست نمونه در قسمت پایه بیشترین جابجایی در کانال شماره ۱ ثبت شده است. در شکل ۵-۱۱۷ و ۵-۱۱۸ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه

می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۱۱۹ و ۵-۱۲۰ آورده شده است.



شکل ۵-۱۱۹: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC1-C



شکل ۵-۱۲۰: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC1-C

## ۵-۸-۴- آزمایش مرحله چهارم

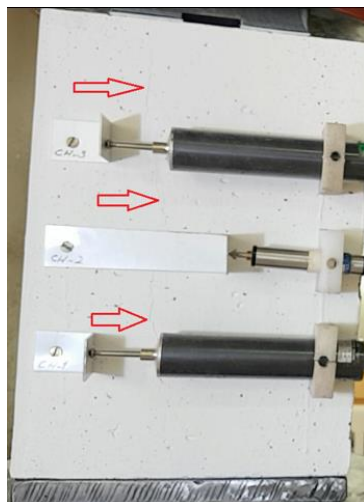
در این مرحله سه نمونه بتن یافی با پلیت پیشنهادی تحت عناوین زیر مورد آزمایش قرار گرفت:

SFRC2-A, SFRC2-B, SFRC2-C

### ۵-۸-۴-۱- نمونه SFRC2-A

#### شرح آزمایش:

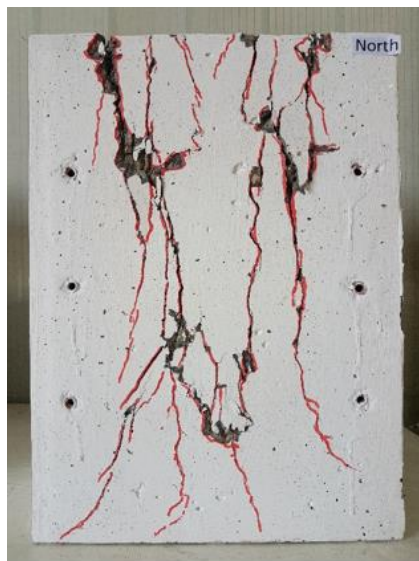
اولین ترک تقریباً در نیروی ۹۰۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۱۲۱)، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد (طول ترک ایجاد شده تقریباً ۲۵ سانتی متر بود) سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۱۲۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال و جنوب نمونه (شکل ۵-۱۲۲ و ۵-۱۲۳) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۱۲۴ و ۵-۱۲۵) ترک ایجاد نشد.



شکل ۵-۱۲۱: اولین ترک در نمونه SFRC2-A



شکل ۵-۱۲۳: جنوب نمونه SFRC2-A



شکل ۵-۱۲۲: شمال نمونه SFRC2-A

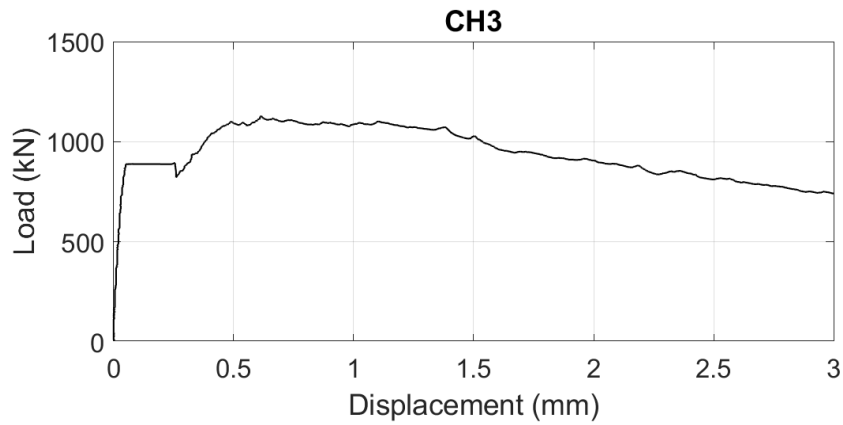


شکل ۵-۱۲۵: جنوب نمونه SFRC2-A

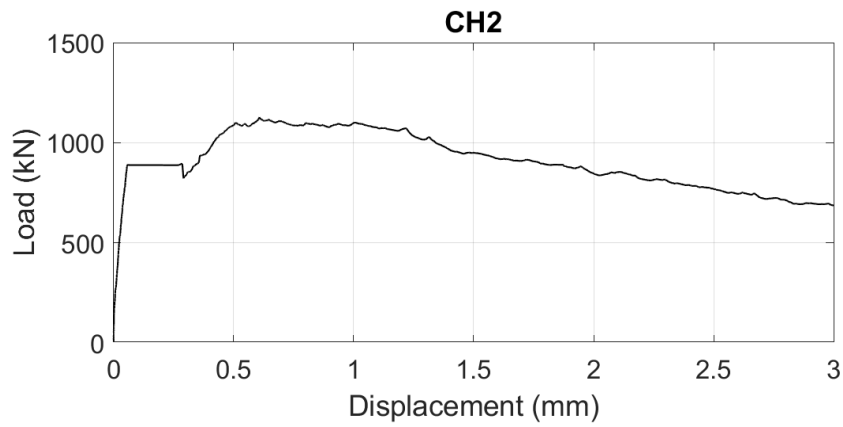


شکل ۵-۱۲۴: شمال نمونه SFRC2-A

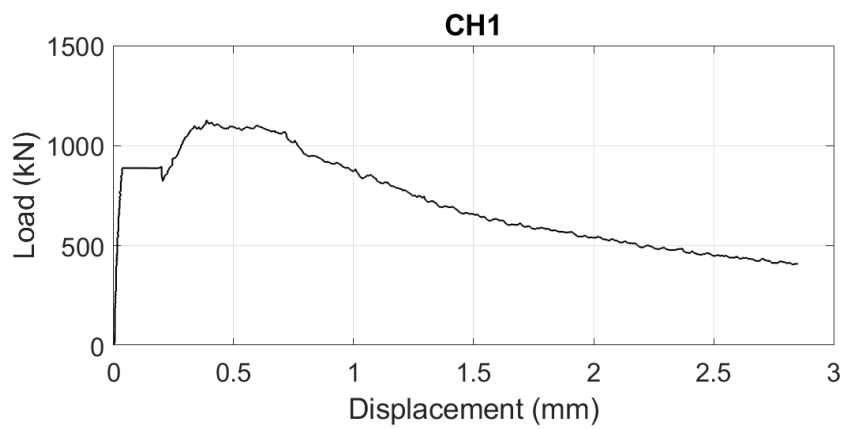
در شکل ۵-۱۲۶ تا ۵-۱۲۸ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲۶: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A

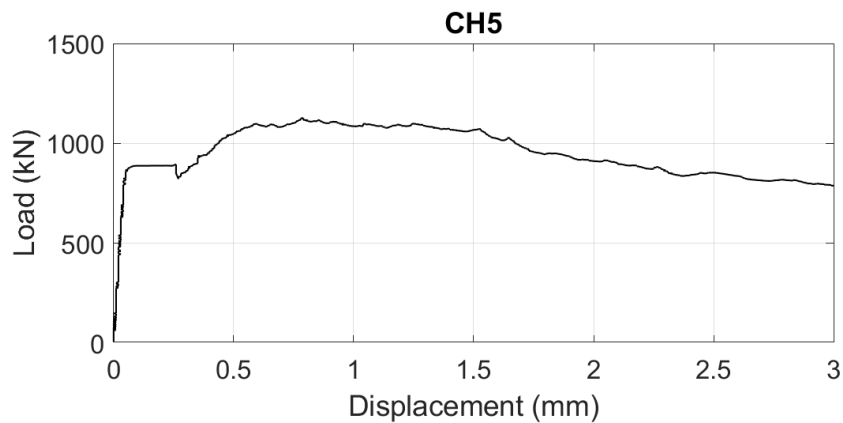


شکل ۵-۱۲۷: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A

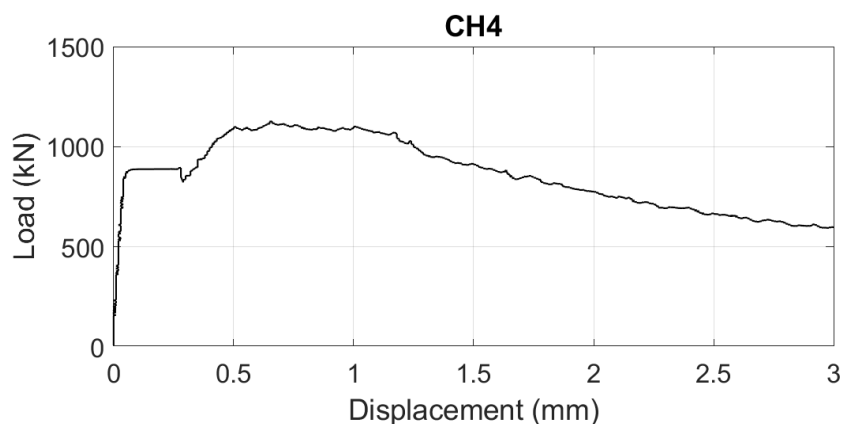


شکل ۵-۱۲۸: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-A

در شکل ۵-۱۲۹ و ۵-۱۳۰ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۱۲۹: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-A



شکل ۵-۱۳۰: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-A

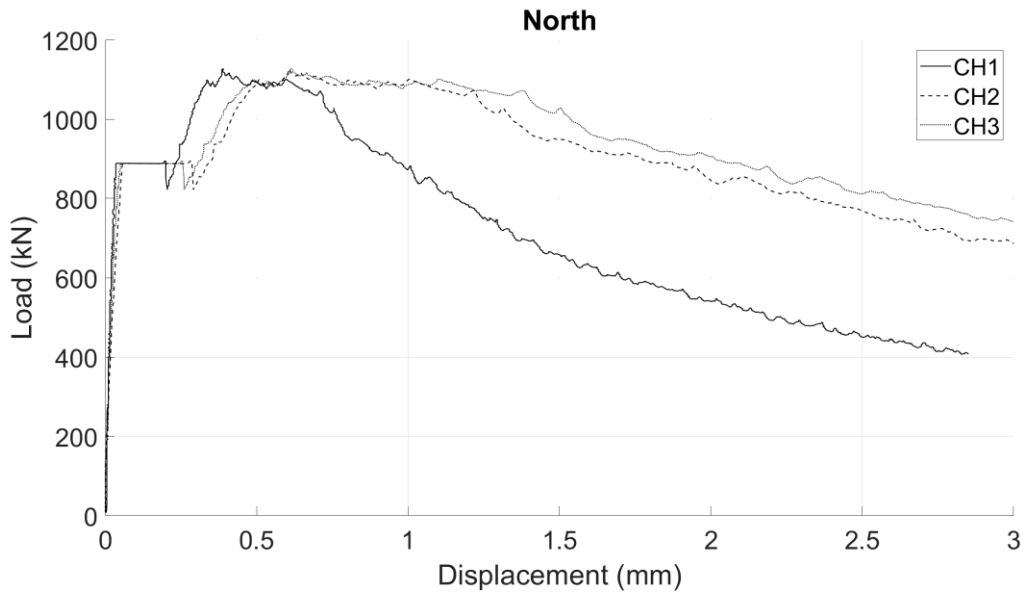
همانطور که در شکل ۵-۱۲۶ تا ۵-۱۲۸ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۱۲۹ و ۵-۱۳۰ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در



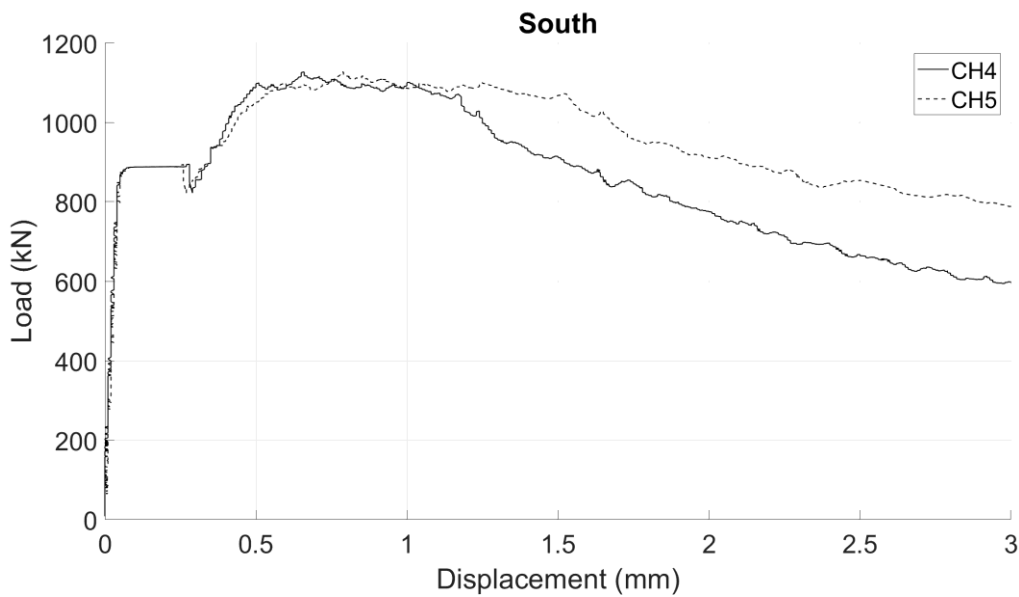
فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۱۳۱ و

۵-۱۳۲ آورده شده است.



شکل ۵-۱۳۱: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-A

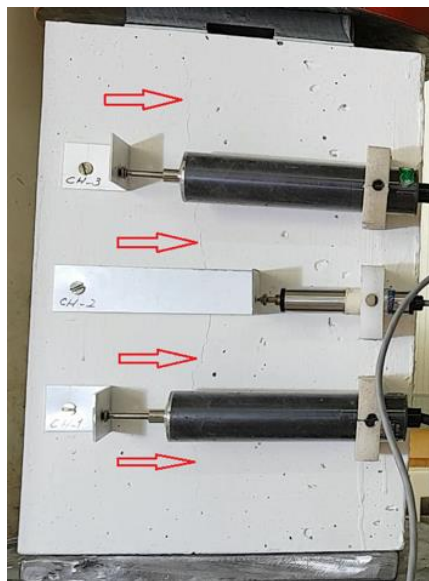


شکل ۵-۱۳۲: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-A

## ۵-۸-۴-۱۱- نمونه SFRC2-B

### شرح آزمایش:

اولین ترک تقریباً در نیروی ۹۵۵ kN ایجاد شد (شکل ۵-۱۳۳)، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد، طول ترک ایجاد شده تقریباً ۲۵ سانتی متر می‌باشد، سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۲۷۰ kN می‌باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال و جنوب نمونه (شکل ۵-۱۳۴ و ۵-۱۳۵) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل ایجاد شد، در قسمت غرب نمونه (شکل ۵-۱۳۶) ترک ایجاد نشد، در قسمت شرق نمونه (شکل ۵-۱۳۷) ترک طولی ایجاد شد.



شکل ۵-۱۳۳: اولین ترک در نمونه SFRC2-B



شکل ۵-۱۳۵: جنوب نمونه SFRC2-B



شکل ۵-۱۳۴: شمال نمونه SFRC2-B

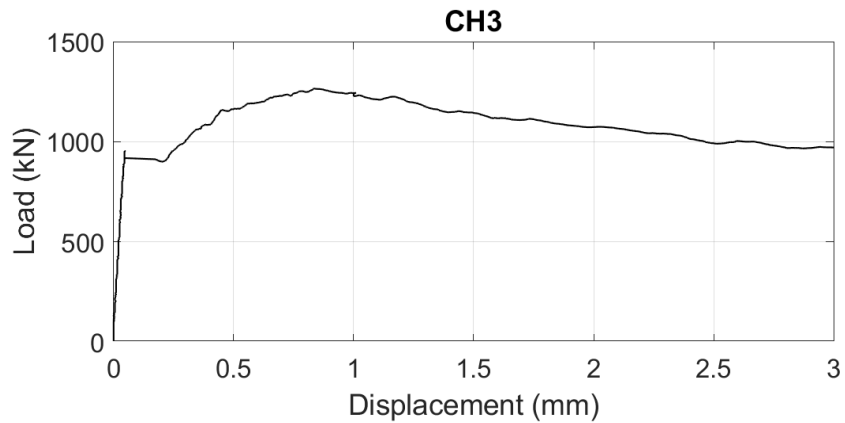


شکل ۵-۱۳۷: شرق نمونه SFRC2-B

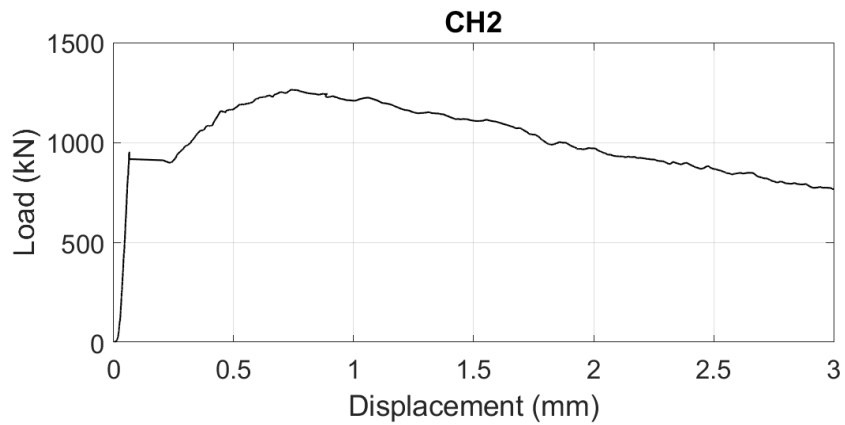


شکل ۵-۱۳۶: غرب نمونه SFRC2-B

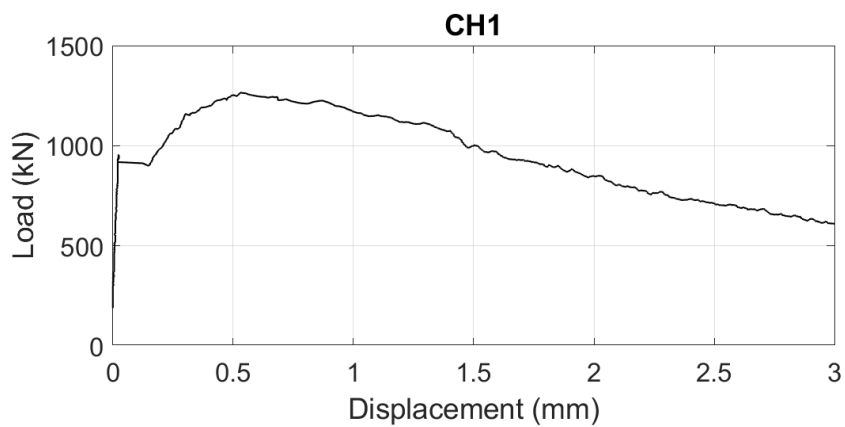
در شکل ۵-۱۳۸ تا ۵-۱۴۰ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳۸: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B

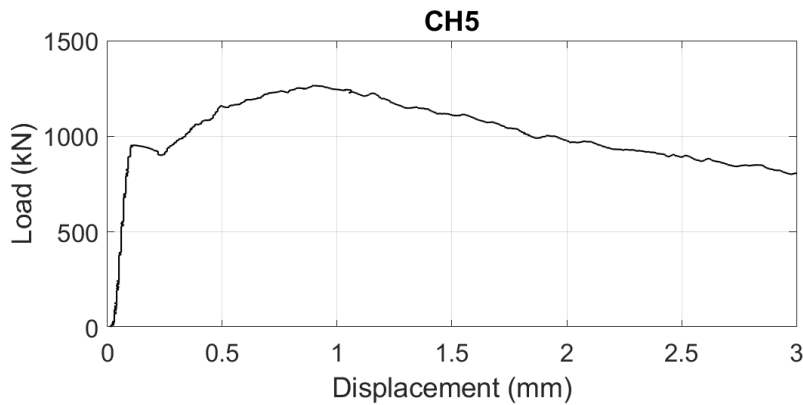


شکل ۵-۱۳۹: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B

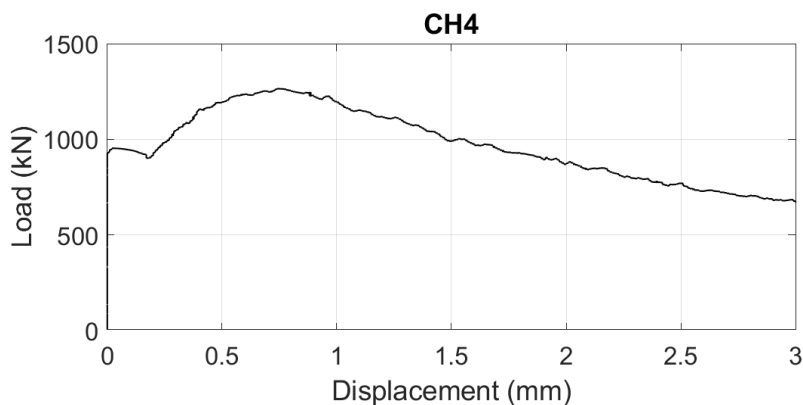


شکل ۵-۱۴۰: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-B

در شکل ۵-۱۴۱ و ۵-۱۴۲ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۱۴۱: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-B

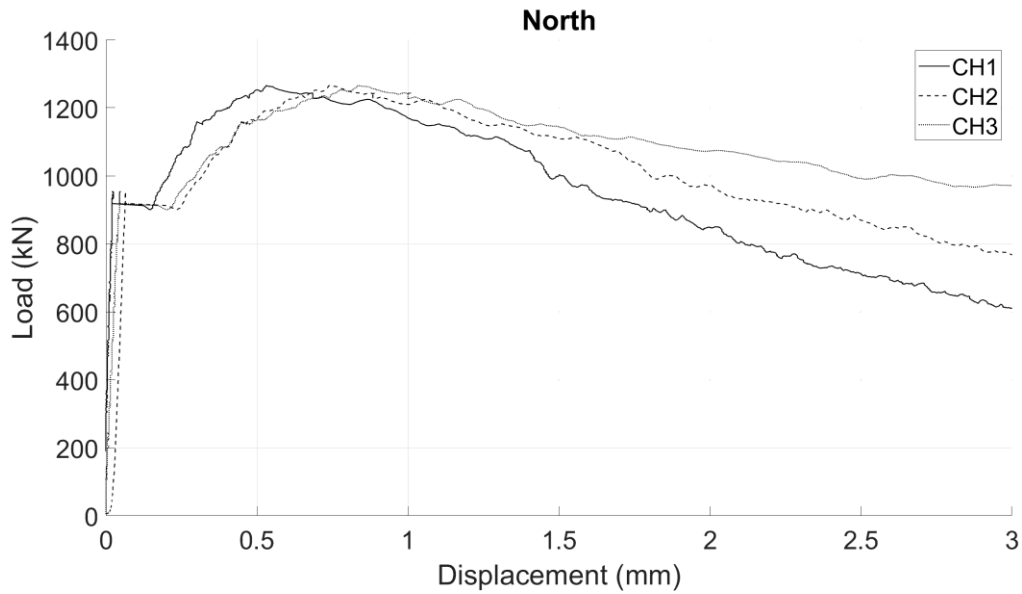


شکل ۵-۱۴۲: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-B

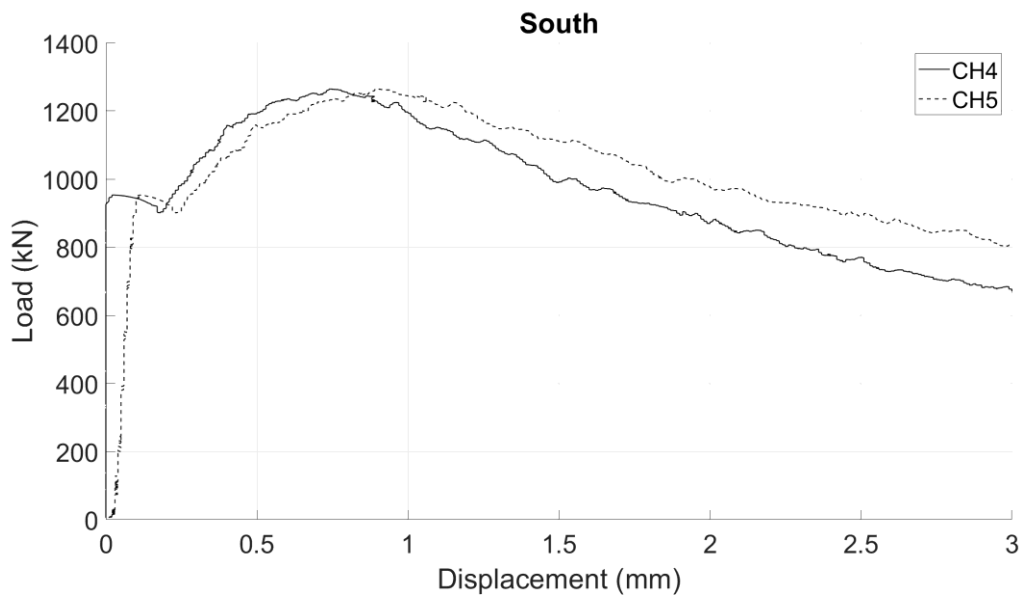
همانطور که در شکل ۵-۱۳۸ تا ۵-۱۴۰ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۱۴۱ و ۵-۱۴۲ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۱۴۳ و ۵-۱۴۴ آورده شده است.



شکل ۵-۱۴۳: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-B

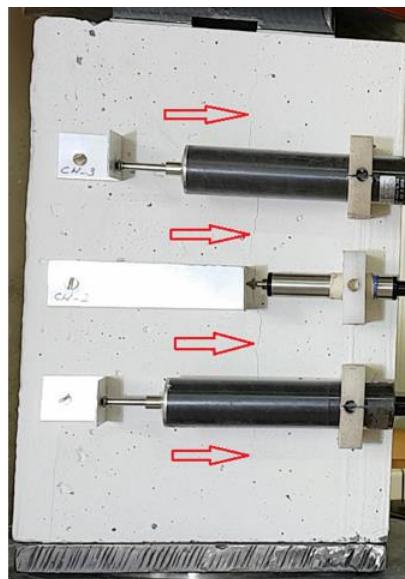


شکل ۵-۱۴۴: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-B

## ۵-۸-۴-۱۲- نمونه SFRC2-C

### شرح آزمایش:

اولین ترک تقریباً در نیروی ۹۳۰ kN ایجاد شد (شکل ۵-۱۴۵)، به این صورت که تقریباً در وسط نمونه به صورت عمودی همزمان در قسمت شمال و جنوب ترک تقسیم ایجاد شد (طول ترک ایجاد شده تقریباً ۲۵ سانتی متر می باشد) سپس افت نیرو و بعد دوباره افزایش نیرو ایجاد شد، در ادامه عرض و طول ترک بیشتر شد. حداکثر نیروی وارده ۱۳۳۰ kN می باشد و بعد افت نیرو ایجاد شد و در نهایت منتهی به خرابی نمونه شد، در قسمت شمال و جنوب نمونه (شکل ۵-۱۴۶ و ۵-۱۴۷) علاوه بر ترک طولی اصلی، شکل ترک ایجاد شده همانند گوه مخروطی شکل ایجاد شد، در قسمت غرب و شرق نمونه (شکل ۵-۱۴۸ و ۵-۱۴۹) ترک ایجاد نشد.



شکل ۵-۱۴۵: اولین ترک در نمونه SFRC2-C



شکل ۵-۱۴۷: جنوب نمونه SFRC2-C



شکل ۵-۱۴۶: شمال نمونه SFRC2-C



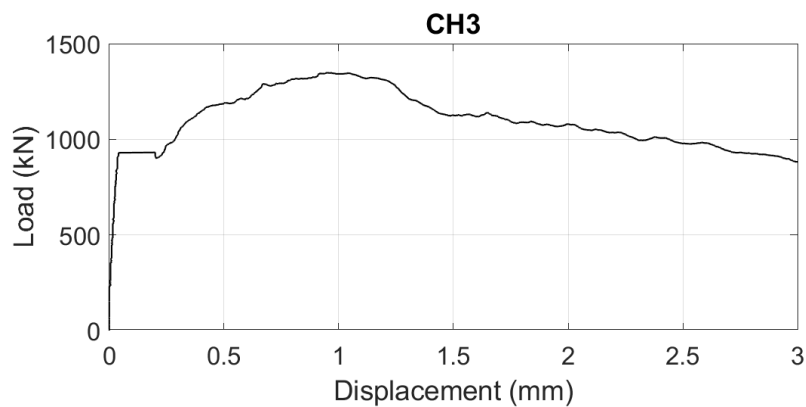
شکل ۵-۱۴۹: شرق نمونه SFRC2-C



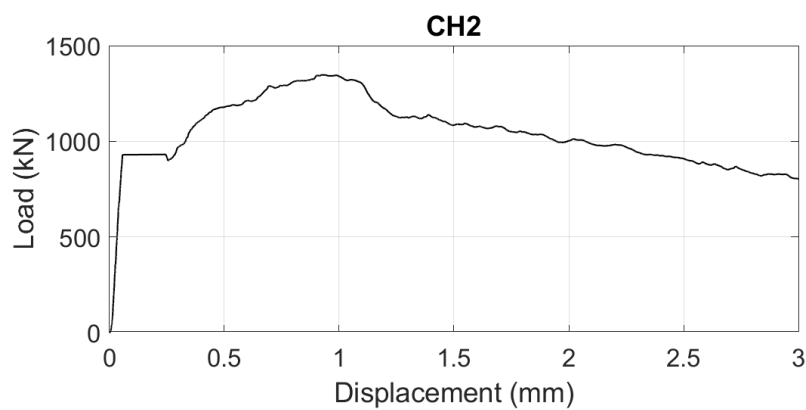
شکل ۵-۱۴۸: غرب نمونه SFRC2-C

در شکل ۵-۱۵۰ تا ۵-۱۵۲ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت شمال نمونه از کانال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

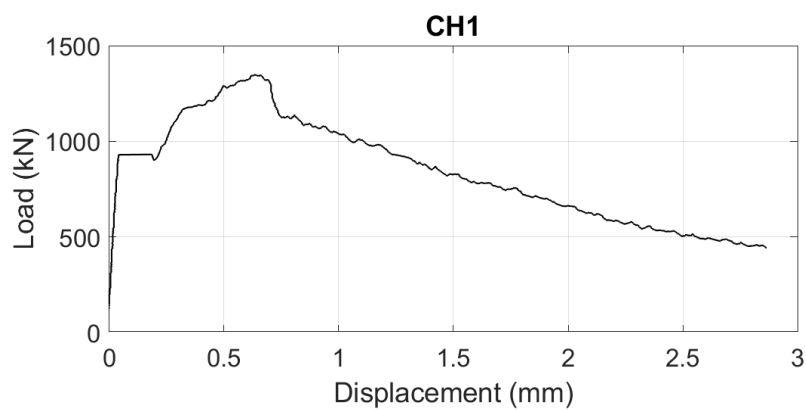




شکل ۵-۱۵۰: کانال ۳ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C

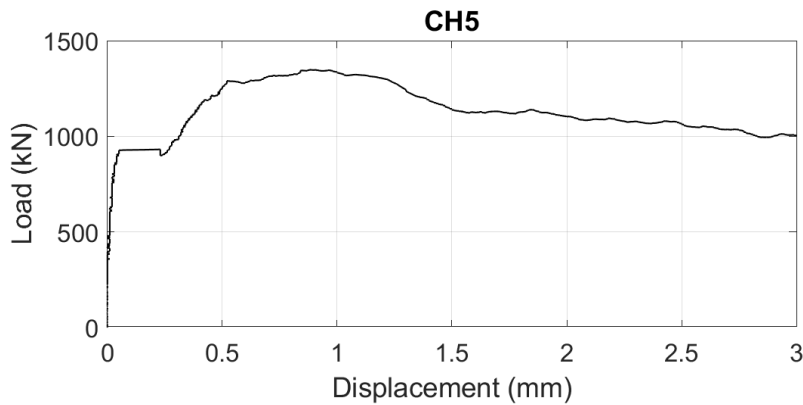


شکل ۵-۱۵۱: کانال ۲ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C

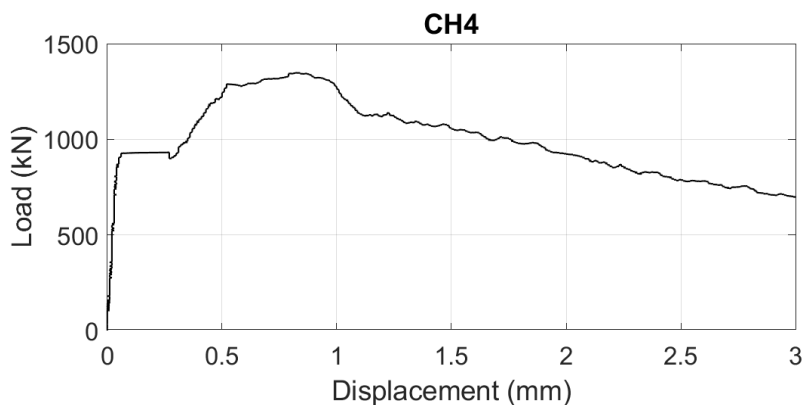


شکل ۵-۱۵۲: کانال ۱ در نمای شمالی نمونه SFRC2-C

در شکل ۵-۱۵۳ و ۵-۱۵۴ نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب جابجایی سنج‌ها در سمت جنوب نمونه از کانال ۴ تا ۵ آورده شده است.



شکل ۵-۱۵۳: کانال ۵ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-C

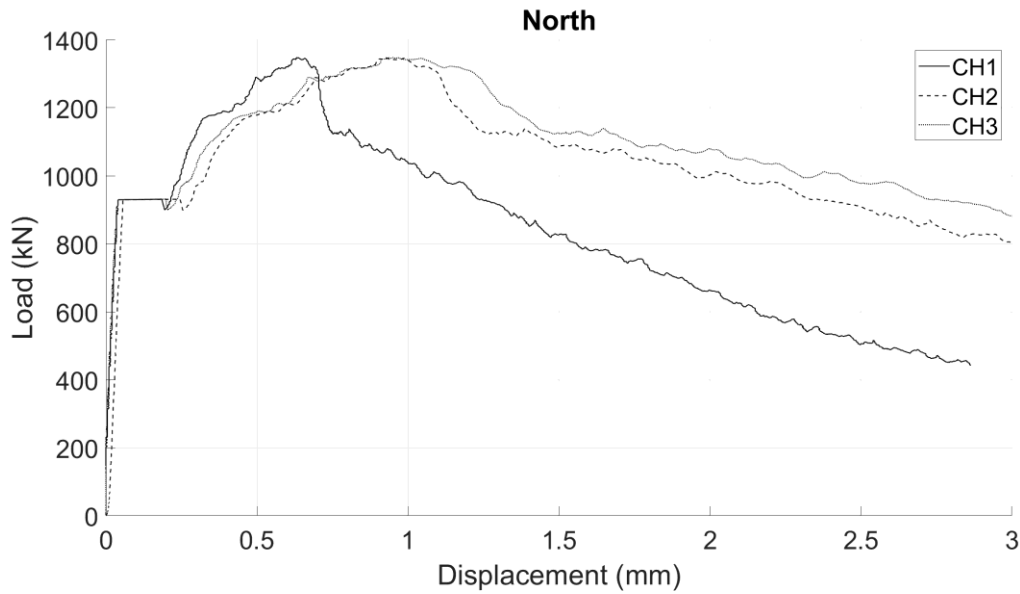


شکل ۵-۱۵۴: کانال ۴ در نمای جنوبی نمونه SFRC2-C

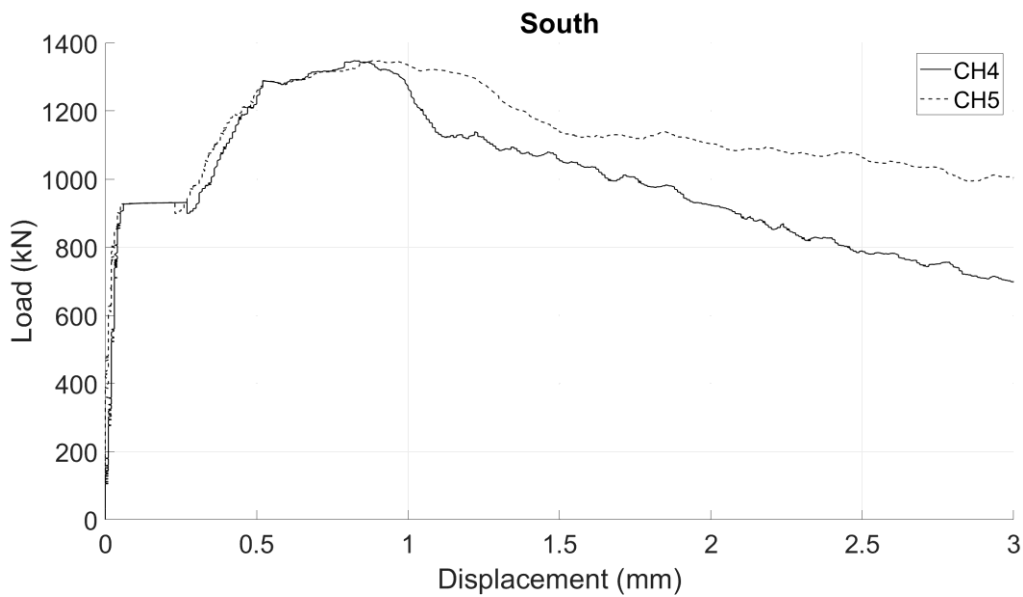
همانطور که در شکل ۵-۱۵۰ تا ۵-۱۵۲ قابل مشاهده است، بیشترین جابجایی در کانال شماره ۳ و بعد کانال شماره ۲ و در نهایت کانال شماره ۱ رخ می‌دهد، که نشان دهنده این است که بیشترین کشش را در فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه در جابجایی سنج شماره ۳ دریافت کرده‌ایم. در شکل ۵-۱۵۳ و ۵-۱۵۴ بیشترین جابجایی را در کانال شماره ۵ و بعد کانال شماره ۴ شاهد هستیم که نشان دهنده بیشترین کشش در

فاصله ۱۰ سانتی متری از سطح بالای نمونه می باشد.

در ادامه نمودارهای نیرو-جابجایی سمت شمال نمونه و سمت جنوب نمونه به ترتیب در شکل ۵-۱۵۵ و ۵-۱۵۶ آورده شده است.



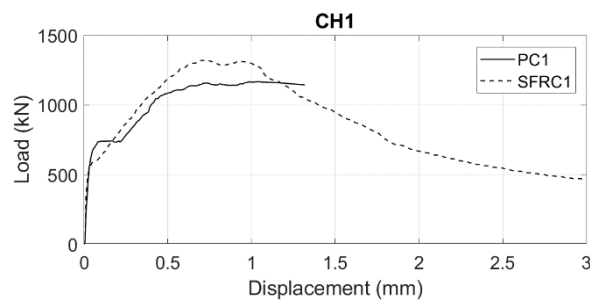
شکل ۵-۱۵۵: نمودار نیرو-جابجایی در سمت شمال نمونه SFRC2-C



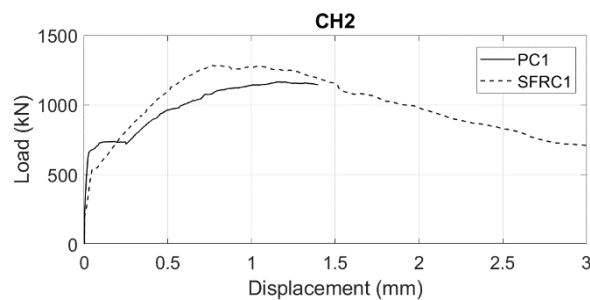
شکل ۵-۱۵۶: نمودار نیرو-جابجایی در سمت جنوب نمونه SFRC2-C

## ۵-۹- تفسیر نتایج پلیت ساده و پیشنهادی

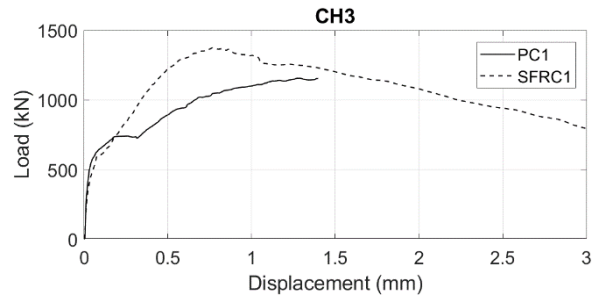
در شکل ۵-۱۵۷ تا ۵-۱۶۶ میانگین نمودارهای نمونه بتن الیافی با نمونه بتن ساده و در شکل ۵-۱۶۷ تا ۵-۱۷۶ میانگین نمودارهای نمونه PC1 با PC2 و SFRC1 با SFRC2 مورد مقایسه قرار داده شده است، با توجه به این نمودارها نمونه‌های بتن الیافی نسبت به بتن ساده دارای شکل پذیری بیشتری و افزایش نیرو تا ۲۳ درصد می‌باشند.



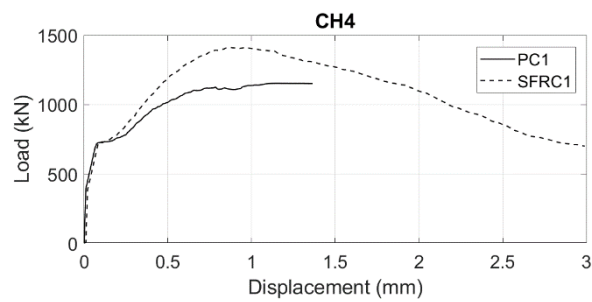
شکل ۵-۱۵۷: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه PC1 و SFRC1



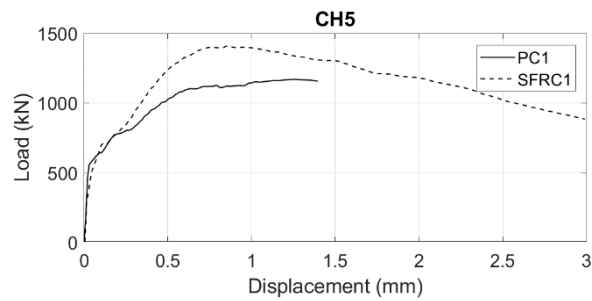
شکل ۵-۱۵۸: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه PC1 و SFRC1



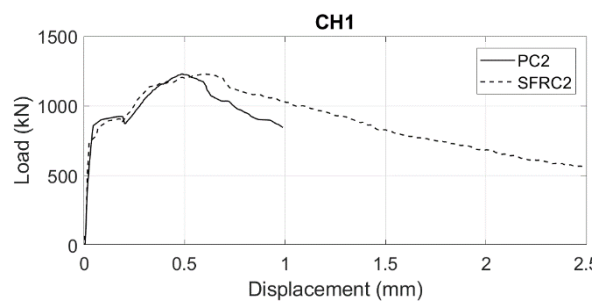
شکل ۵-۱۵۹: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۳ نمونه PC1 و SFRC1



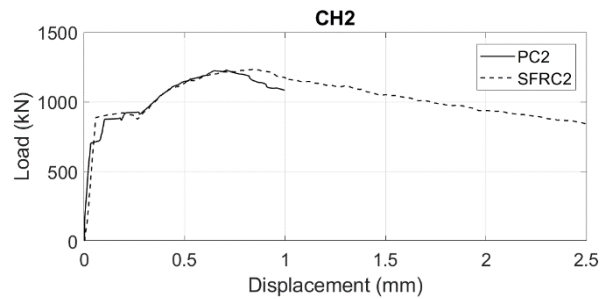
شکل ۵-۱۶۰: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۴ نمونه PC1 و SFRC1



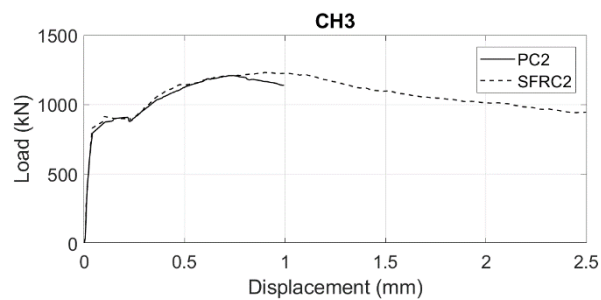
شکل ۵-۱۶۱: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۵ نمونه PC1 و SFRC1



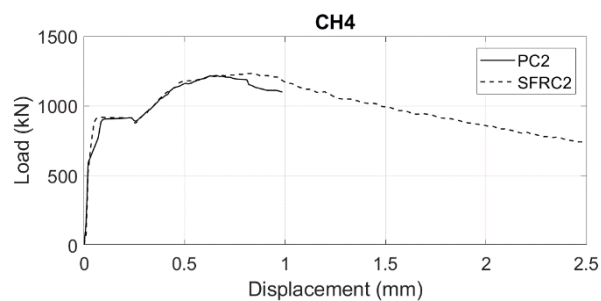
شکل ۵-۱۶۲: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۱ نمونه PC2 و SFRC2



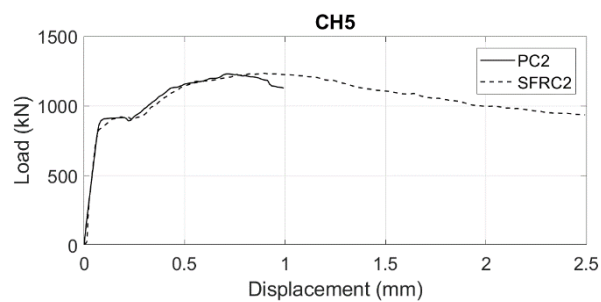
شکل ۵-۱۶۳: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۲ نمونه PC2 و SFRC2



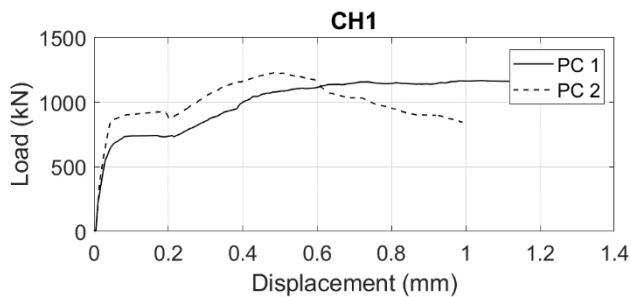
شکل ۵-۱۶۴: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۳ نمونه PC2 و SFRC2



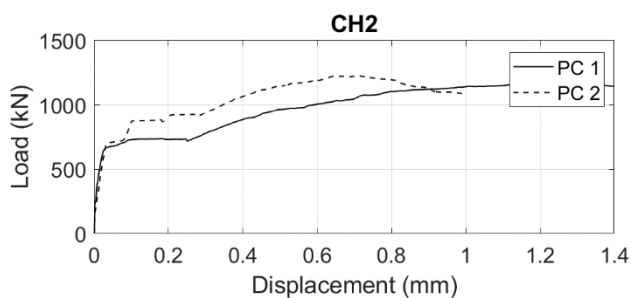
شکل ۵-۱۶۵: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۴ نمونه PC2 و SFRC2



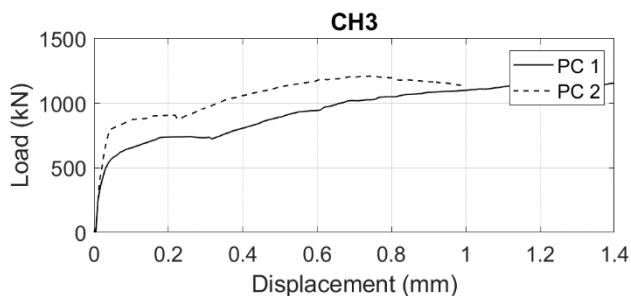
شکل ۵-۱۶۶: میانگین نمودار نیرو- جابجایی کانال ۵ نمونه PC2 و SFRC2



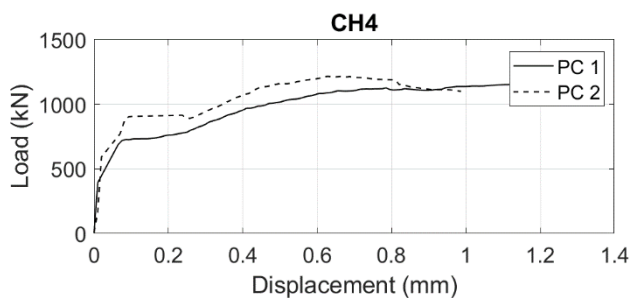
شکل ۵-۱۶۷: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه PC1 و PC2



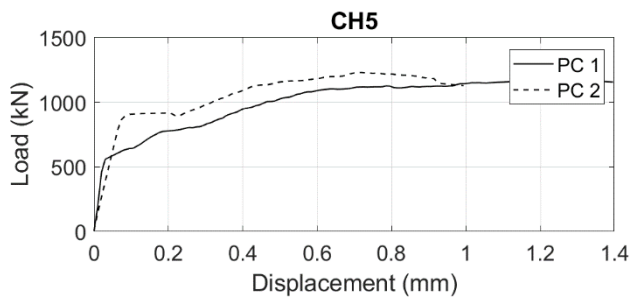
شکل ۵-۱۶۸: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه PC1 و PC2



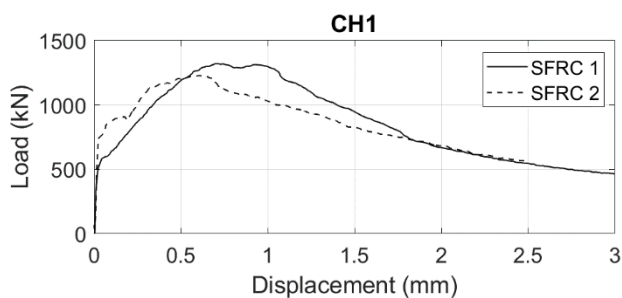
شکل ۵-۱۶۹: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۳ نمونه PC1 و PC2



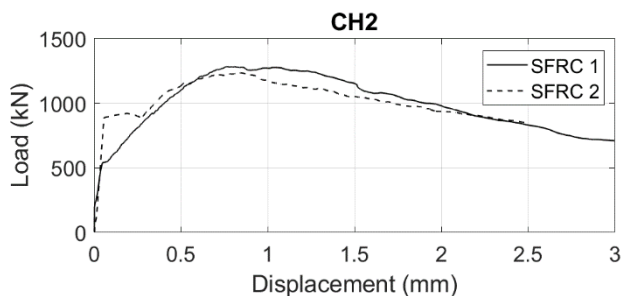
شکل ۵-۱۷۰: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۴ نمونه PC1 و PC2



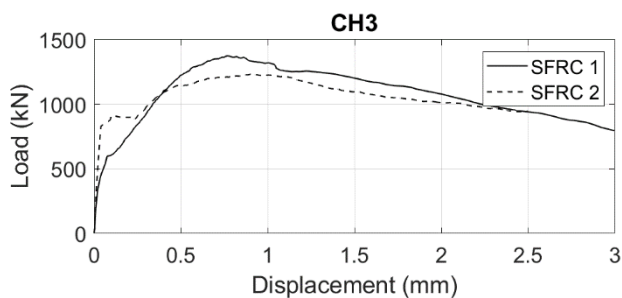
شکل ۵-۱۷۱: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۵ نمونه PC1 و PC2



شکل ۵-۱۷۲: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۱ نمونه SFRC1 و SFRC2

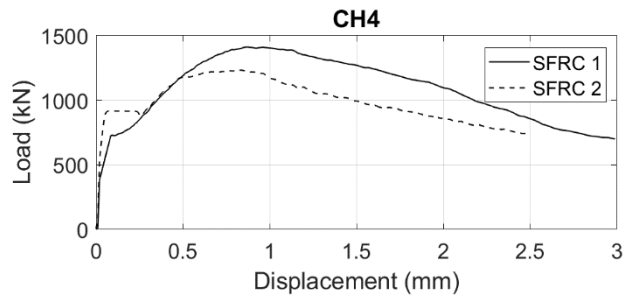


شکل ۵-۱۷۳: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۲ نمونه SFRC1 و SFRC2

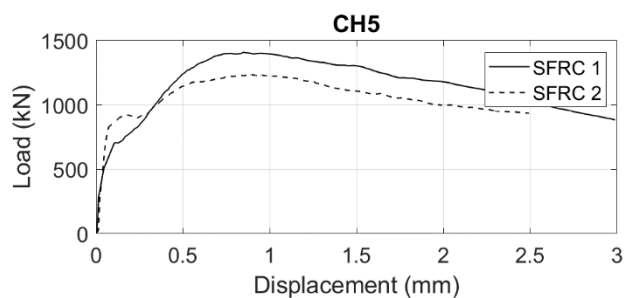


شکل ۵-۱۷۴: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۳ نمونه SFRC1 و SFRC2





شکل ۵-۱۷۵: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۴ نمونه SFRC1 و SFRC2



شکل ۵-۱۷۶: میانگین نمودار نیرو-جابجایی کانال ۵ نمونه SFRC1 و SFRC2

در جدول ۳-۵ خلاصه نتایج آزمایشگاهی از نظر نیروی ترک تقسیم ( $P_{splitting}$ )، اولین ترک خوردگی نمونه (در کانال ۱ تا ۵) در نمای شمالی و جنوبی نمونه ( $W_{CH1-N-splitting}$  تا  $W_{CH5-S-splitting}$ ) آورده شده است. همچنین در جدول ۴-۵ خلاصه نتایج آزمایشگاهی از نظر حداکثر نیروی وارده ( $P_{max}$ )، بازشدگی ترک در حداکثر نیروی وارده (در کانال ۱ تا ۵) در نمای شمالی و جنوبی نمونه ( $W_{CH1-N-max}$  تا  $W_{CH5-S-max}$ ) آورده شده است.

جدول ۳-۵: خلاصه نتایج آزمایشگاهی

نمونه	$P_{splitting}$ (kN)	$W_{CH1-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH2-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH3-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH4-S-splitting}$ (mm)	$W_{CH5-S-splitting}$ (mm)
PC1-A	۷۰۵	۰٫۲۱۰	۰٫۲۱۹	۰٫۳۰۵	۰٫۲۱۰	۰٫۲۵۰
PC1-B	۷۳۰	۰٫۱۷۵	۰٫۲۶۱	۰٫۲۹۰	۰٫۱۴۰	۰٫۱۵۰
PC1-C	۷۴۰	۰٫۱۳۰	۰٫۱۸۳	۰٫۲۳۵	۰٫۱۱۰	۰٫۱۵۰

PC1 میانگین	۷۲۵	۰,۱۷۱	۰,۲۲۱	۰,۲۷۶	۰,۱۵۳	۰,۱۸۳
PC2-A	۹۴۰	۰,۲۰۵	۰,۲۶۱	۰,۲۶۰	۰,۱۸۰	۰,۱۵۰
PC2-B	۹۵۰	۰,۴۹۰	۰,۶۹۲	۰,۷۳۵	۰,۷۶۰	۰,۶۹۰
PC2-C	۹۰۰	۰,۱۸۰	۰,۱۸۸	۰,۱۶۰	۰,۲۱۰	۰,۱۷۰
PC2 میانگین	۹۳۰	۰,۲۹۱	۰,۳۸۰	۰,۳۸۵	۰,۳۸۳	۰,۳۳۶
درصد اختلاف PC1 با PC2	۲۸	۷۰	۷۲	۳۹	۱۵۰	۸۴
SFRC1-A	۷۱۰	۰,۱۰۰	۰,۱۳۵	۰,۱۳۴	۰,۱۳۰	۰,۱۸۰
SFRC1-B	۷۷۰	۰,۲۵۰	۰,۳۰۳	۰,۲۵۰	۰,۱۶۰	۰,۱۷۰
SFRC1-C	۶۸۰	۰,۲۷۰	۰,۲۸۷	۰,۲۴۵	۰,۱۳۰	۰,۱۷۰
SFRC1 میانگین	۷۲۰	۰,۲۰۶	۰,۲۴۱	۰,۲۰۹	۰,۱۴۰	۰,۱۷۳
SFRC2-A	۹۰۰	۰,۲۰۵	۰,۲۹۱	۰,۲۶۰	۰,۲۹۰	۰,۲۷۰
SFRC2-B	۹۵۵	۰,۳۰۰	۰,۴۵۰	۰,۴۴۶	۰,۴۰۰	۰,۴۹۰
SFRC2-C	۹۳۰	۰,۱۹۵	۰,۲۵۴	۰,۲۰۵	۰,۲۷۰	۰,۲۳۰
SFRC2 میانگین	۹۲۸	۰,۲۳۳	۰,۳۳۱	۰,۳۰۳	۰,۳۲۰	۰,۳۳۰
درصد اختلاف با SFRC2 SFRC1	۲۹	۱۳	۳۷	۴۵	۱۲۹	۹۱

جدول ۴-۵: خلاصه نتایج آزمایشگاهی

نمونه	$P_{max}$ (kN)	$W_{CH1-N-max}$ (mm)	$W_{CH2-N-max}$ (mm)	$W_{CH3-N-max}$ (mm)	$W_{CH4-S-max}$ (mm)	$W_{CH5-S-max}$ (mm)
PC1-A	۱۰۴۵	۱۰۲۵	۱,۴۰۰	۱,۹۰۵	۱,۴۰۰	۱,۱۶۰
PC1-B	۱۳۰۰	۰,۶۸۰	۱,۰۲۰	۱,۲۲۵	۰,۷۷۰	۰,۸۰۰
PC1-C	۸۶۰	۲,۰۱۵	۱,۷۶۸	۱,۵۱۵	۰,۷۲۰	۰,۷۳۰
PC1 میانگین	۱۰۶۸	۱,۲۴۰	۱,۳۹۶	۱,۵۴۸	۰,۹۶۳	۰,۸۹۶
PC2-A	۱۲۴۰	۰,۵۱۰	۰,۷۶۰	۰,۸۹۰	۰,۶۰۰	۰,۶۸۰
PC2-B	۱۱۶۰	۰,۲۲۵	۰,۲۹۴	۰,۲۴۵	۰,۲۸۰	۰,۳۲۰
PC2-C	۱۳۳۰	۰,۴۶۵	۰,۶۳۳	۰,۷۱۰	۰,۷۶۰	۰,۸۰۰
PC2 میانگین	۱۲۴۳	۰,۴۰۰	۰,۵۶۲	۰,۶۱۵	۰,۵۴۶	۰,۶۰۰
درصد اختلاف PC1 با PC2	۱۶	-۶۸	-۶۰	-۶۰	-۴۳	-۳۳
SFRC1-A	۱۲۶۰	۰,۶۶۰	۰,۷۷۴	۰,۷۰۰	۰,۹۳۰	۰,۹۲۰

SFRC1-B	۱۵۶۰	۰,۹۷۵	۱,۱۰۰	۰,۹۴۰	۰,۹۳۰	۰,۸۳۰
SFRC1-C	۱۱۵۰	۰,۹۷۵	۰,۹۹۴	۰,۸۷۵	۰,۸۵۰	۰,۸۷۰
میانگین SFRC1	۱۳۲۳	۰,۸۷۰	۰,۹۵۶	۰,۸۳۸	۰,۹۰۳	۰,۸۷۳
SFRC2-A	۱۱۲۰	۰,۳۹۰	۰,۶۰۷	۰,۶۱۵	۰,۶۶۰	۰,۷۹۰
SFRC2-B	۱۲۷۰	۰,۵۳۰	۰,۷۳۹	۰,۸۳۵	۰,۷۴۰	۰,۹۰۰
SFRC2-C	۱۳۳۰	۰,۶۳۰	۰,۹۲۵	۰,۹۵۰	۰,۸۲۰	۰,۸۸۰
میانگین SFRC2	۱۲۴۰	۰,۵۱۶	۰,۷۵۷	۰,۸۰۰	۰,۷۴۰	۰,۸۵۶
درصد اختلاف						
با SFRC2	-۶	-۴۱	-۲۱	-۵	-۱۸	-۲
SFRC1						

نتایج به دست آمده حاکی از این است که در نمونه با بتن ساده و پلیت پیشنهادی، نیرو ترک تقسیم و نیرو حداکثر به ترتیب برابر ۹۳۰ و ۱۲۴۳ کیلونیوتن است در صورتی که در نمونه با بتن ساده و پلیت ساده، نیرو ترک تقسیم و نیرو حداکثر به ترتیب برابر ۷۲۵ و ۱۰۶۸ کیلونیوتن می باشد که نشان دهنده افزایش حدود ۲۸ درصدی در نیرو ترک تقسیم و ۱۶ درصدی در نیرو حداکثر در نمونه با پلیت پیشنهادی نسبت به پلیت ساده می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد در نمونه با بتن الیافی و پلیت پیشنهادی، نیرو ترک تقسیم و نیرو حداکثر به ترتیب برابر ۹۲۸ و ۱۲۴۰ کیلونیوتن است در صورتی که در نمونه با بتن الیافی و پلیت ساده، نیرو ترک تقسیم و نیرو حداکثر به ترتیب برابر ۷۲۰ و ۱۳۲۳ کیلونیوتن می باشد که نشان دهنده افزایش حدود ۲۹ درصدی در نیرو ترک تقسیم و کاهش ۶ درصدی در نیرو حداکثر در نمونه با پلیت پیشنهادی نسبت به نمونه با پلیت ساده می باشد.

علاوه بر این نتایج نمونه بتن الیافی با بتن ساده در جدول ۵-۵ و ۵-۶ مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

جدول ۵-۵: مقایسه نمونه بتن الیافی با بتن ساده در نیروی ترک خوردگی

نمونه	$P_{splitting}$ (kN)	$W_{CH1-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH2-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH3-N-splitting}$ (mm)	$W_{CH4-S-splitting}$ (mm)	$W_{CH5-S-splitting}$ (mm)
میانگین PC1	۷۲۵	۰,۱۷۱	۰,۲۲۱	۰,۲۷۶	۰,۱۵۳	۰,۱۸۳
میانگین SFRC1	۷۲۰	۰,۲۰۶	۰,۲۴۱	۰,۲۰۹	۰,۱۴۰	۰,۱۷۳

درصد اختلاف						
PC1 با SFRC1	-۱	۲۰	۹	-۲۴	-۸	-۵
میانگین PC2	۹۳۰	۰,۲۹۱	۰,۳۸۰	۰,۳۸۵	۰,۳۸۳	۰,۳۳۶
میانگین SFRC2	۹۲۸	۰,۲۳۳	۰,۳۳۱	۰,۳۰۳	۰,۳۲۰	۰,۳۳۰
درصد اختلاف						
PC2 با SFRC2	۰	-۲۰	-۱۳	-۲۱	-۱۶	-۲

جدول ۵-۶: مقایسه نمونه بتن الیافی با بتن ساده در نیروی حداکثر

نمونه	$P_{max}$ (kN)	$W_{CH1-N-max}$ (mm)	$W_{CH2-N-max}$ (mm)	$W_{CH3-N-max}$ (mm)	$W_{CH4-S-max}$ (mm)	$W_{CH5-S-max}$ (mm)
میانگین PC1	۱۰۶۸	۱,۲۴۰	۱,۳۹۶	۱,۵۴۸	۰,۹۶۳	۰,۸۹۶
میانگین SFRC1	۱۳۲۳	۰,۸۷۰	۰,۹۵۶	۰,۸۳۸	۰,۹۰۳	۰,۸۷۳
درصد اختلاف						
PC1 با SFRC1	۲۴	-۳۰	-۳۲	-۴۶	-۶	-۳
میانگین PC2	۱۲۴۳	۰,۴۰۰	۰,۵۶۲	۰,۶۱۵	۰,۵۴۶	۰,۶۰۰
میانگین SFRC2	۱۲۴۰	۰,۵۱۶	۰,۷۵۷	۰,۸۰۰	۰,۷۴۰	۰,۸۵۶
درصد اختلاف						
PC2 با SFRC2	۰	۲۹	۳۵	۳۰	۳۶	۴۳

نتایج نشان می‌دهد نیروی حداکثر در نمونه با بتن الیافی و پلیت ساده نسبت به نمونه با بتن ساده و پلیت ساده حدود ۲۹ درصد افزایش می‌یابد و در دیگر موارد تغییر قابل توجه‌ای در نیروهای قابل تحمل رخ نمی‌دهد. در بررسی عرض ترک در اولین ترک خوردگی در پد بارگذاری متعارف به طور میانگین در تمامی جابجایی سنج‌ها عرض ترک کمتری نسبت به پد بارگذاری پیشنهادی ثبت شد، این موضوع برای بتن ساده و الیافی یکسان بود، اما در عرض ترکی که در بیشترین نیرو ثبت شده است نشان می‌دهد که در تمامی جابجایی سنج‌ها به طور میانگین عرض ترک بدست آمده در پد بارگذاری متعارف جک پیشران بیشتر از پد پیشنهادی می‌باشد. علاوه بر این، عرض ترک خوردگی در نمونه بتن الیافی نسبت به نمونه بتن ساده بجز در نمونه با پلیت پیشنهادی که عرض ترک خوردگی در نیروی حداکثر افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد. در جدول ۷-۵ تغییر مکان نهایی نمونه‌های بتن الیافی با بتن ساده مورد مقایسه قرار گرفته است که نشان

می دهد در بتن الیافی تغییر مکان نهایی نسبت به بتن ساده افزایش یافته است.

جدول ۵-۷: مقایسه تغییر مکان نهایی نمونه بتن الیافی با بتن ساده

نمونه	D <sub>CH1</sub> (mm)	D <sub>CH2</sub> (mm)	D <sub>CH3</sub> (mm)	D <sub>CH4</sub> (mm)	D <sub>CH5</sub> (mm)
میانگین PC1	۱,۴	۱,۴	۱,۴	۱,۴	۱,۴
میانگین SFRC1	۳	۳	۳	۳	۳
نسبت SFRC1 با PC1	۲,۱	۲,۱	۲,۱	۲,۱	۲,۱
میانگین PC2	۱	۱	۱	۱	۱
میانگین SFRC2	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵
نسبت SFRC2 با PC2	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵

## فصل ۶:

# رابطه تحلیلی

### ۳-۶- رابطه تحلیلی

در روش رایج برای طراحی نیروی از هم پاشیدگی زیر جک از فرمول ۱-۶ استفاده می‌شود [۲۶].

$$T_b = \frac{P}{4} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \quad (1-6)$$

$T_b$ : نیروی کششی

$P$ : بار جک

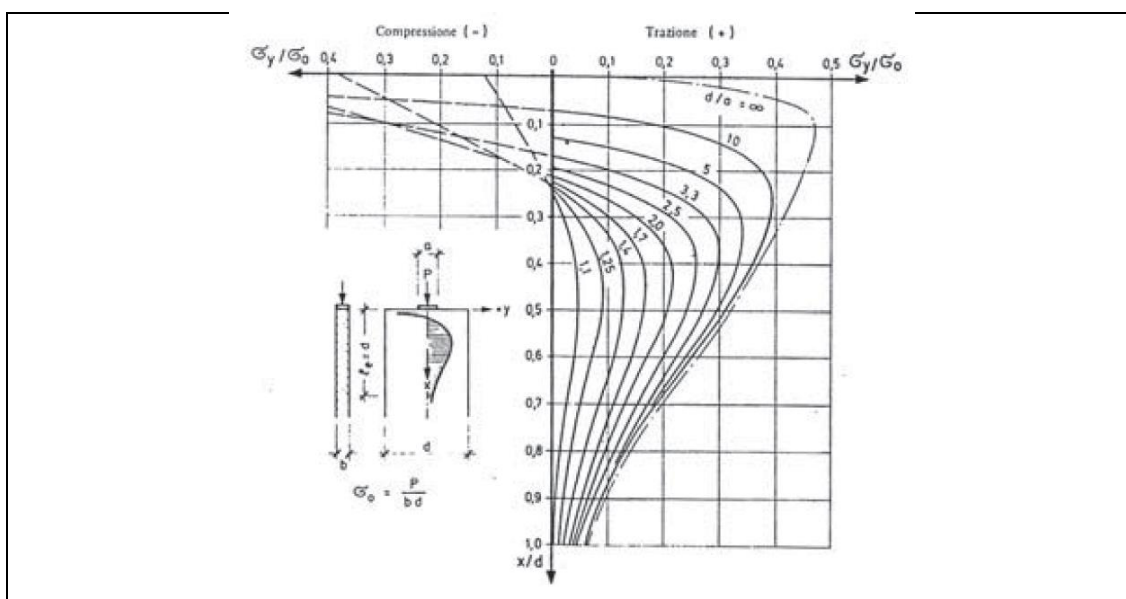
$h$ : عرض پد بارگذاری (a)

$D$ : عرض سگمنت (d)

برای پیدا کردن محل کشش حداکثر از نمودار شکل ۱-۶ [۱۴] استفاده شد، با توجه به عرض پلیت و

سگمنت، منحنی  $\frac{1}{6} = 1.67$  انتخاب گردید. در محور قائم این نمودار از ۰,۳ تا ۰,۷ بیشترین کشش را

داریم.



شکل ۱-۶: تنش ایجاد شده بر اثر بارگذاری موضعی [۱۴]

$$\frac{x}{d} = \frac{x}{250} = 0.3 \sim 0.7 \rightarrow x = 0.3 \times 250 \sim 0.7 \times 250$$

$$x = 75 \sim 175 \rightarrow \Delta_x = 175 - 75 = 100 \text{ mm}$$

۱۰۰ میلی متر ناحیه‌ای است که از نظر تحلیلی بیشترین کشش ایجاد می‌شود.

$$T_b = \Delta_x \times D \times f_{ct} \rightarrow T_b = 100 \times 250 \times 3.9 = 97500 \text{ N} = 97.5 \text{ kN}$$

$$f_{ct} = 0.6 \sqrt{f'_c} \rightarrow 0.6 \times \sqrt{42} = 3.9 \text{ MPa}$$

$f_{ct}$ : مقاومت کششی بتن

### ۶-۳-۱- پد ساده

$$T_b = \frac{P}{4} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \rightarrow 97.5 = \frac{P}{4} \left(1 - \frac{15}{25}\right) \rightarrow P = 975 \text{ kN}$$

بر اساس جواب به دست آمده، نمونه ۹۷۵ کیلو نیوتن نیروی فشاری تحمل می‌کند. این مقدار نیرو حدود

۱۹ درصد کمتر از میانگین حداکثر نیروی فشاری وارد بر سگمنت در آزمایشات می‌باشد. به این ترتیب با

استفاده از رابطه زیر نیروی فشاری را محاسبه می‌کنیم.

$$T_b = \frac{P}{4 \times 1.3} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \rightarrow 97.5 = \frac{P}{4 \times 1.3} \left(1 - \frac{15}{25}\right) \rightarrow P = 1170 \text{ kN}$$

همانطور که مشاهده می‌شود نیروی به دست آمده، تخمین مناسبی می‌باشد و با نتایج آزمایشگاهی تطابق

دارد.

### ۶-۳-۲- پد تغییر شکل یافته

برای پیدا کردن محل کشش حداکثر از نمودار شکل ۶-۱ [۱۴] استفاده شد، و در نتیجه برای هندسه

پیشنهادی جک پشیران، منحنی  $\frac{1}{\rho} = 1.67$  انتخاب گردید. در محور قائم این نمودار از ۰.۳ تا ۰.۷ بیشترین



کشش را داریم.

$$\frac{x}{d} = \frac{x}{250} = 0.3 \sim 0.7 \rightarrow x = 0.3 \times 250 \sim 0.7 \times 250$$

$$x = 75 \sim 175 \rightarrow \Delta_x = 175 - 75 = 100 \text{ mm}$$

۱۰۰ میلی متر ناحیه ای است که از نظر تحلیلی بیشترین کشش ایجاد می شود.

$$T_b = \Delta_x \times D \times f_{ct} \rightarrow T_b = 100 \times 250 \times 3.9 = 97500 \text{ N} = 97.5 \text{ kN}$$

$$f_{ct} = 0.6 \sqrt{f'_c} \rightarrow 0.6 \times \sqrt{42} = 3.9 \text{ MPa}$$

در نتیجه:

$$T_b = \frac{P}{4} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \rightarrow 97.5 = \frac{P}{4} \left(1 - \frac{15}{25}\right) \rightarrow P = 975 \text{ kN}$$

بر اساس جواب به دست آمده، نمونه ۹۷۵ کیلونیوتن نیروی فشاری تحمل می کند. این مقدار نیرو حدود

۲۱ درصد کمتر از میانگین حداکثر نیروی فشاری وارد بر سگمنت در آزمایشات یعنی ۱۲۴۱ کیلونیوتن

می باشد. به این ترتیب با استفاده از رابطه زیر نیروی فشاری را محاسبه می کنیم.

$$T_b = \frac{P}{4 \times 1.3} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \rightarrow 97.5 = \frac{P}{4 \times 1.3} \left(1 - \frac{15}{25}\right) \rightarrow P = 1270 \text{ kN}$$

همانطور که مشاهده می شود نیروی به دست آمده، تخمین مناسبی می باشد و با نتایج آزمایشگاهی تطابق

دارد.

در جدول ۶-۱ نتایج حاصل از معادله تحلیلی آورده شده است.

جدول ۶-۱: خلاصه نتایج تحلیلی

نمونه	X (mm)	T <sub>b</sub> (kN)	f <sub>ct</sub> (MPa)	P <sub>max</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN) با ضریب پیشنهادی	P <sub>max,mean</sub> (kN)
صفحه با هندسه متعارف	۱۰۰	۹۷,۵	۳,۹	۹۷۵	۱۱۷۰	۱۲۰۰
صفحه با هندسه پیشنهادی	۱۰۰	۹۷,۵	۳,۹	۹۷۵	۱۲۷۰	۱۲۴۱

P<sub>max,mean</sub>: میانگین حداکثر نیرو به دست آمده از آزمایشات

همانطور که در جدول ۶-۱ قابل مشاهده است، در صفحه با هندسه متعارف با استفاده از رابطه تحلیلی نیروی به دست آمده در حدود ۱۹ درصد از حداکثر نیروی میانگین به دست آمده از آزمایشات کمتر می‌باشد، با اعمال ضریب پیشنهادی ۱,۲ در مخرج فرمول، جواب به دست آمده به نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد. در صفحه با هندسه پیشنهادی جواب به دست آمده در حدود ۲۱ درصد با نتیجه به دست آمده از آزمایشات کمتر می‌باشد. با اعمال ضریب پیشنهادی ۱,۳ در مخرج فرمول، جواب به دست آمده به نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد.

## فصل ۷:

# جمع‌بندی و پیشنهادها

## ۱-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۱۲ نمونه شامل ۶ نمونه بتن ساده (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) و ۶ نمونه بتن الیافی (۳ نمونه با هندسه صفحات متعارف جکهای پیشران و ۳ نمونه با هندسه پیشنهادی در تحقیق حاضر) مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مهم به دست آمده به این شرح هستند:

۱. نیروی قابل تحمل در لحظه وقوع ترک خوردگی برای نمونه PC2 (نمونه با بتن ساده + صفحه بارگذاری پیشنهادی) نسبت به نمونه PC1 (نمونه با بتن ساده + صفحه بارگذاری عادی) در حدود ۲۸ درصد بیشتر بود.
۲. حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه PC2 در حدود ۱۶ درصد نسبت به نمونه PC1 افزایش نشان داد.
۳. نیروی قابل تحمل در لحظه وقوع ترک خوردگی برای نمونه SFRC2 (نمونه با بتن الیافی + صفحه بارگذاری پیشنهادی) نسبت به نمونه SFRC1 (نمونه با بتن الیافی + صفحه بارگذاری عادی) در حدود ۲۹ درصد بیشتر بود.
۴. نتایج نشان داد نیروی حداکثر در نمونه SFRC1 نسبت به نمونه PC1 حدود ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.
۵. تعداد ترکها در نمونه بتن الیافی نسبت به نمونه بتن ساده بجز در نمونه با پلیت پیشنهادی که تعداد ترکها در نیروی حداکثر افزایش می‌یابد، کاهش نشان داد.
۶. در نمونه با صفحه متعارف با استفاده از رابطه تحلیلی نیروی به دست آمده در حدود ۱۹ درصد از حداکثر نیروی میانگین به دست آمده از آزمایشات کمتر می‌باشد ولی با اعمال ضریب پیشنهادی

$\frac{1}{1.2}$  در رابطه تحلیلی متعارف، جواب به دست آمده به نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری نشان می‌دهد.

۷. در نمونه با صفحه پیشنهادی با استفاده از رابطه تحلیلی نیروی به دست آمده در حدود ۲۱ درصد با نتیجه به دست آمده از آزمایشات کمتر می‌باشد ولی با اعمال ضریب پیشنهادی  $\frac{1}{1.3}$  در رابطه تحلیلی متعارف، جواب به دست آمده به نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات این تحقیق، پلیت پیشنهادی باعث کاهش حدود ۲۸ درصد نیروی از هم پاشیدگی در ضخامت سگمنت، ناشی از نیروی جکهای دستگاه حفار شده است البته برای اطمینان از عملکرد شکل هندسی پدهای پیشنهادی نیاز به آزمایشهای تکمیلی برای مقاومت‌های دیگر بتن و همچنین ضخامت‌های متنوع سگمنت می‌باشد. اصلاح انجام شده بر روی مدل تحلیلی نیز بسیار ارزشمند و قابل توصیه به جامعه مهندسين تونل می‌باشد.

## ۲-۷- پیشنهادها

- ۱- مدل‌سازی عددی
- ۲- بررسی آزمایشگاهی با آرماتورهای فلزی و پلیمری
- ۳- بررسی آزمایشگاهی در مقیاس کامل
- ۴- بررسی آزمایشگاهی نمونه با شیارهای متفاوت صفحه فولادی
- ۵- بررسی ضخامت‌های دیگر سگمنت (۲۰، ۳۰ و ۳۵)



## مراجع

- [1] Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., and Romualdi P., “Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 26, No. 2, (2011), 284-291.
- [2] Tiberti G., Conforti A., and Plizzari G.A., “Precast segments under TBM hydraulic jacks: Experimental investigation on the local splitting behavior”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 50, (2015), 438-450.
- [3] Conforti A., Tiberti G., and Plizzari G.A., “Splitting and crushing failure in FRC elements subjected to a high concentrated load”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 105, (2016), 82-92.
- [4] Meda A., Rinaldi Z., Caratelli A., and Cignitti F., “Experimental investigation on precast tunnel segments under TBM thrust action”, **Engineering Structures**, Vol. 119, (2016), 174-185.
- [5] Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., and Spagnuolo S., “Precast tunnel segments with GFRP reinforcement”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 60, (2016), 10-20.
- [6] Conforti A., Tiberti G., Plizzari G.A., Caratelli A., and Meda A., “Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 63, (2017), 1-11.
- [7] Conforti A., Tiberti G., and Plizzari G.A., “Combined effect of high concentrated loads exerted by TBM hydraulic jacks”, **Magazine of Concrete Research**, Vol. 68, No. 21, (2016), 1122-1132.
- [8] Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., De Rivaz B., and Giamundo N., “Hybrid precast tunnel segments in fiber reinforced concrete with glass fiber reinforced bars”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 86, (2019), 100-112.
- [9] Conforti A., Trabucchi I., Tiberti G., Plizzari G.A., Caratelli A., and Meda A., “Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers”, **Engineering Structures**, Vol. 199, (2019), 109628.
- [10] Meda A., Rinaldi Z., Spagnuolo S., and Eddie C.M., “Behaviour of FRC segments with GFRP cage under TBM thrust in presence of GAPS”, **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 107, (2021), 103669.



- [11] Liu X., Sun Q., Yuan Y., and Taerwe L., "Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 103, (2020), 103506.
- [12] PAS 8810:2016, Tunnel design. Design of concrete segmental tunnel linings. Code of practice, BSI, (2016).
- [13] جلالی م., "بررسی روشهای تحلیل سازه‌های قطعات پیشساخته پوشش تونل در اثر بار جکهای TBM؛ مطالعه موردی"، دومین کنفرانس منطقه ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران. (۱۳۹۴),
- [14] Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., and Xu S., (2008), **Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control**. CRC Press.
- [15] ASTM C150/C150M-16, Standard specifications for portland cements, American Society for Testing and Materials, (2016).
- [16] Darwin D., Dolan C.W., and Nilson A.H., (2016), **Design of concrete structures**. McGraw-Hill Education New York, NY, USA.
- [17] ASTM C33 / C33M-16, Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, (2016).
- [18] ASTM C125-15, Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, American Society for Testing and Materials, (2015).
- [19] ASTM C494/C494M-15, Standard specification for chemical admixtures for concrete, American Society for Testing and Materials, (2015).
- [20] مستوفی‌نژاد د., (۱۳۹۷), تکنولوژی و طرح اختلاط بتن. ارکان دانش, اصفهان.
- [21] جامعی م., (۱۳۹۱), پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار و تاثیر آن بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی", دانشکده عمران و معماری, دانشگاه شاهرود.
- [22] Wight J.K. and MacGregor J.G., (2020), **Reinforced concrete mechanics and design**.
- [23] ACI 211 . 191, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal , Heavyweight , and Mass Concrete, Reported by ACI Committee 211, (1997).
- [24] ASTM C192/C192M-16, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, American Society for Testing and Materials, (2016).
- [25] خدمات مهندسی پروژه خط ۲ قطار شهری شیراز. ۱۳۹۲, مهندسین مشاور ساحل.

[26] ACI 318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, (2019).

## **Abstract**

The final cover of the excavated tunnels in the mechanized method consists of a variety of precast concrete parts called a segment. Segment structure design for all types of loads including soil load (stone), External Water Load, Seismic loads, The loads was built during the construction, etc., is performed. One of the main loads in the design of these segments is caused by the Thrust jacks of TBM, Which could be one of the factors causing damage to the segments.

In drilling operations by mechanized tunnel drilling machine, the complete ring of the segment acts as a support for all or part of the propulsion force, this leads to the creation of tensile forces in the thickness of the segment.

The purpose of this thesis is the experimental evaluation of a new idea in order to reduce the forces acting by the Thrust jack due to modifying the shape of the driving geometry. For this purpose, 12 large-scale specimens including six simple concrete specimens(three samples using the geometry of the Conventional plates of Thrust jacks and three samples using the proposed geometry in this study) and six samples of fiber concrete(three samples using the geometry of the Conventional plates of Thrust jacks and three samples using the proposed geometry in this study) were tested. Also, the compressive strength of cylindrical concrete in this study is mean 42 MPa. Results show the increase in the bearing capacity of the proposed geometry for loading plates is about 30 %.

**Keywords: Segment, Thrust jack, Mechanized drilling machine, Tensile force.**



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Structural Engineering**

**Experimental study of TBM auxiliary jacks load  
on precast RC segments in mechanized tunneling**

**By:**

**Majid Shahbazi**

**Supervisors:**

**Dr. Meysam Jalali**

**July 2021**