

## ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌یی در پناهگاه تعجیلی

فرزاد امیری هنزا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد فیاض\* (استادیار)

محسن امین رعایا (پژوهشگر)

دانشکده‌ی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۱ (ص. ۳۰۱-۲۵۵، ژورنالی)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۳، ص. ۳۰۱-۲۵۵، ژورنالی

استفاده از بتن پارچه‌یی در ساخت پناهگاه با توجه به مزایای اقتصادی و سرعت نصب آن در حال توسعه است. توجه روزافزون به کارکرد مذکور، مستلزم مطالعه‌ی رفتار محصول در برابر بارهای وارده است و لزوم درک عمیق از مواد و اجزاء بتن پارچه‌یی باعث شناخت بهتر و امکان ارتقاء کیفیت محصول می‌شود. از این رو، خواص دو فاز، شامل پارچه و ملات که عملکرد سازه‌یی دارند، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود در مقیاس ماکرو و مزو با نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مختلف مقایسه شده است که نشان‌دهنده‌ی صحت مطالعه‌ی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف با مقاومت کششی بیشتر همزمان با افزایش مدول یانگ و سختی، عملکرد بهتری در برابر بارهای وارده دارد. پناهگاه طراحی شده، قابلیت تحمل سرباره را دارد و آن را در برابر حملات خمپاره نیز مقاوم می‌سازد. استفاده از پناهگاه بتن پارچه‌یی بدون هیچگونه سرباره نیز آن را در برابر تهدید ۵ کیلوگرمی TNT در فاصله‌ی ۳ متری مقاوم می‌سازد.

واژگان کلیدی: بتن پارچه‌یی، میان‌مقیاس، نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، پناهگاه تعجیلی.

amirifarzad1000@gmail.com  
m.fayyaz@modares.ac.ir  
mohsenaminraya@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

یکی از منحصربه‌فردترین محصولات جایگزین بتن، بتن پارچه‌یی<sup>۱</sup> است. بتن پارچه‌یی یک کامپوزیت با خواص سیمانی Geo Synthetic صفحه‌یی است. در صورت بروز حوادث غیرمترقبه می‌توان با استفاده از مصالح سبک و پرکاربرد مذکور در کوتاه‌ترین زمان ممکن شرایط حیات مجدد را به مناطق بحران‌زده بازگرداند. همچنین می‌توان با اتکا به سرعت عمل و حفاظت بالای آن، در اجرای سربانه‌ها و پوشش‌های نظامی، از محصول نوین اشاره‌شده بهره برد. شرکت کانکریت کانوس<sup>۲</sup> با مسئولیت محدود در تاریخ ۱۶ اوت ۲۰۰۵ تأسیس شد، تا توسعه‌ی تجاری مفهوم پناهگاه سریع احداث را آغاز کند. در سال ۲۰۰۹، اولین محصول تجاری شرکت کانوس با نام CC یا پارچه‌ی بتنی (بتن پارچه‌یی) وارد بازار شد و در سال ۲۰۱۵، اولین محصول فرعی آن با نام بتن پارچه‌یی نفوذناپذیر<sup>۳</sup> به بازار معرفی شد.<sup>[۱]</sup>

پارچه‌ی بتنی (برای اختصار CC)، یکپارچه‌ی انعطاف‌پذیر آغشته به پودر سیمان است که هنگام آبرسانی سخت می‌شود تا یک لایه‌ی بتنی نازک، با دوام و ضد آب و مقاوم در برابر آتش ایجاد کند. هان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، استفاده از سیمان کلسیم سولفور آلومیناتی را در بتن پارچه‌یی برای دستیابی به مقاومت بیشتر، گیرش سریع‌تر و بهبود خصوصیات مکانیکی محصول بررسی کرده‌اند. ایشان اضافه کردن

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59061.3022

بتن پارچه‌ای خالی است که مقاومت خمشی آن در جهت تار برابر  $2/4$  مگاپاسکال و در جهت پود برابر  $2/15$  مگاپاسکال بوده است.

همچنین ایشان نشان دادند که مقاومت خمشی CC با تقویت AFRP در طول جهت تار تقریباً  $16\%$  بیشتر از اندازه‌گیری جهت پود است. در طول آزمایش کشش و خمش، از ترک‌های احتمالی به‌طور مؤثر جلوگیری می‌شود، زیرا صفحه‌ی الیاف AFRP تنش کششی را به پارچه‌ی اسپیسر سه‌بعدی بتن پارچه‌ی مستقل می‌کند. تقویت‌کننده‌ی FRP با توجه به پیشرفت چشمگیر خواص مکانیکی آن، اندازه‌ی کارآمد برای گسترش کاربردهای بتن پارچه‌ی را فراهم می‌کند.<sup>[۸۷]</sup> انصاری و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که مقاومت خمشی پانل‌های بتن پارچه‌ی تقویت‌شده‌ی آلومینیومی،  $23$  مگاپاسکال است، که حدود  $10\%$  برابر بیشتر از پانل‌های بتن پارچه‌ی به‌تهایی  $2/4$  مگاپاسکال است. تقویت با ورق آلومینیوم باعث بهبودی مؤثر در خصوصیات مکانیکی پانل‌های بتن پارچه‌ی می‌شود، که به‌طور چشم‌گیری کاربردهای آن را گسترش می‌دهد.<sup>[۹۱]</sup> لی و همکاران (۲۰۱۹)، نیز بر روی استفاده از بتن پارچه‌ی برای محافظت از شیب کار کردند و نتایج خود را با استفاده از شاتکریت در محافظت از شیب‌ها مقایسه کردند و آن‌ها را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی کردند و با در نظر گرفتن مدول یانگ  $19000$  مگاپاسکال، ضریب پواسون  $0.35$  و وزن مخصوص  $1700$  کیلوگرم بر مترمکعب برای بتن پارچه‌ی به‌عنوان پارامترهای ورودی در نرم‌افزار استفاده کردند و بتن پارچه‌ی را با لایه‌ی تقویت‌شده‌ی FRP در نرم‌افزار مدل‌سازی کردند و بیشینه‌ی تنش اعمال شده روی بتن پارچه‌ی را با توجه به ارتفاع‌های مختلف خاک ( $6$ ،  $8$  و  $10$  متر) به ترتیب برابر  $5/17$ ،  $6/63$  و  $8/16$  مگاپاسکال به‌دست آوردند و دریافتند که توسعه‌ی مقاومت فشاری بتن پارچه‌ی بسیار سریع‌تر از شاتکریت و مقاومت فشاری نهایی آن‌ها تقریباً یکسان است. گرچه فشار کششی نهایی بتن پارچه‌ی  $2/0$  برابر بیشتر از شاتکریت است، اما مقاومت کششی ترک اولیه‌ی بتن پارچه‌ی در جهت پود مانند شاتکریت است که حدود  $5/0$  مگاپاسکال است. آرماتور ورق FRP به‌طور قابل‌توجهی مقاومت کششی را به  $9$  مگاپاسکال افزایش می‌دهد و مقاومت برشی بتن پارچه‌ی و بتن پارچه‌ی تقویت‌شده با FRP می‌تواند در جهت ضخامت به  $10$  مگاپاسکال برسد. مقاومت کششی بالا و مقاومت برشی بتن پارچه‌ی تقویت‌شده با FRP، مزایای بیشتری را به‌عنوان یک لایه‌ی محافظ شیب مهندسی پیش‌ساز و شرایط پیچیده‌ی زمین‌شناسی به ارمغان می‌آورد.<sup>[۹۱]</sup>

دینگ و همکاران (۲۰۲۰)، رفتار و عملکرد شیب‌های تقویت‌شده‌ی مختلف بتن پارچه‌ی در هنگام بارگذاری زلزله را از طریق یک سری آزمایش میز لرزش بررسی کردند و دریافتند که بتن پارچه‌ی که اخیراً توسعه یافته است، تأثیر بهتری در محدود کردن تغییر شکل شیب در طول بارگذاری لرزه‌ی نسبت به تقویت‌کننده‌ی ژئوتکسایل<sup>۱۵</sup> غیر بافته دارد و استفاده از آرماتور کامپوزیت می‌تواند مقاومت لرزه‌ی شیب‌ها را بهبود بخشد.<sup>[۹۱]</sup>

ژو<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی مجموعه‌ی از آزمایش‌های میز لرزان بر روی شیب‌های تقویت‌شده برای مطالعه‌ی ویژگی‌های دینامیکی شیب کار کردند و دریافتند که با افزایش درجه‌های شیب بتن پارچه‌ی، اثر تقویتی بهتری حاصل می‌شود و آرماتور  $30$  درجه به سطح آستانه می‌رسد و نقطه‌ی لغزش از تاج شیب به وسط مدل تقویت شده تغییر می‌کند. ناحیه‌ی  $7/2$  پایینی شیب در هنگام زلزله نسبتاً پایدار و آرماتورها در پایین شیب بی‌اثر بوده‌اند. هنگامی که هر دو اثر تقویت‌کننده و دشواری ساخت در نظر گرفته می‌شوند، مقدار  $20$  درجه، شیب مناسبی در شیب‌های تقویت‌شده با بتن پارچه‌ی است. ویژگی‌های افزایش مقاومت بتن پارچه‌ی، آن را برای کاربرد در حفاظت از شیب مناسب می‌سازد.<sup>[۹۲]</sup>

$80$  درصد وزن مخصوص بتن است که به دلیل تولید یک ماتریس سختی با تخلخل بالا ناشی از کاهش قابل‌توجه سیمان داخل پارچه، بتن پارچه‌ی و مصرف زیاد آب اضافه شده است.<sup>[۹۳]</sup> حسین و مگوید<sup>۶</sup> (۲۰۱۶)، برای تجزیه و تحلیل ساختار دیوار حائل متشکل از بتن پارچه‌ی، از روش مدل‌سازی اجزاء محدود استفاده کرده‌اند.<sup>[۹۴]</sup> سیستم دیواره‌ی حائل خاک مسلح که توسط زارنبرگ<sup>۷</sup> (۱۹۹۸) توسعه داده شده است، برای مطالعه‌ی توزیع تنش و جابه‌جایی افقی مرتبط در هنگام استفاده از CC به‌عنوان لایه‌ی محافظ سطح استفاده شده است. رفتار بیرون‌کشیدگی انواع مختلف آرماتورها به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بوده و بار کششی در لایه‌ی عامل تقویتی هم به تغییرات شرایط مرزی بسیار حساس است. به‌عنوان مثال، تغییر نوع آرماتور، شرایط خاک و پژوهش‌هایی در زمینه‌ی اندرکنش خاک و ژئوگرید تحت بارهای بیرون‌کشیدگی انجام شده است.<sup>[۹۵]</sup>

به منظور مدل‌سازی عددی رفتار بتن پارچه‌ی در شرایط مختلف، شناخت ویژگی‌های مکانیکی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن پارچه‌ی ضروری است. مدل‌سازی برای تحلیل و طراحی بتن که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا موزوسکوپی (میان‌مقیاس) انجام می‌شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی سازه‌های بتن مسلح، تعیین رفتار غیرخطی است. در نرم‌افزار آباکوس برای در نظر گرفتن خرابی و همچنین تعریف رفتار غیرخطی بتن که باید در بخش خواص مصالح مشخص شود، به سه روش تعریف می‌شود: مدل ترک اندود<sup>۸</sup>، ترک شکننده<sup>۹</sup> و مدل خمیری آسیب‌دیده<sup>۱۰</sup> است. مدل خمیری آسیب‌دیده، یگانه مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شود.

در مدل خمیری آسیب‌دیده، دو فرض اصلی ترک‌خوردگی کششی و خرد شدن فشاری در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. در ترک‌خوردگی کششی در اثر کشش تک‌محوره، منحنی تنش - کرنش تا نقطه‌ی تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از نقطه‌ی تنش خرابی، خرابی‌ها به‌صورت ترک‌های قابل‌مشاهده در می‌آیند که به صورت منحنی نرم‌شوندگی در فضای تنش - کرنش نمایش داده می‌شوند.<sup>[۹۶]</sup> لی<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، طراحی CC را با هدف ساختار مقاوم‌سازی خاک بررسی کردند و دریافتند که جابه‌جایی افقی پارچه‌ی بتنی (CC) کمی بزرگ است. همچنین مطالعات مختلفی در مورد پاسخ لوله‌های مدفون و مقاوم‌سازی مجدد آن‌ها در برابر انفجارها انجام داده و پاسخ مکانیکی خط لوله‌ی دفن شده برای انفجارهای داخلی را بررسی کرده‌اند. به‌منظور بررسی پاسخ فشار - تنش در خطوط لوله‌ی مدفون با فشار داخلی تحت انفجار سطح، محاسبات عددی یک لوله‌ی مدفون با فشار داخلی بررسی و پاسخ دینامیکی یک خط لوله‌ی دفن شده پس از انفجار سطح شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که بیشینه‌ی درصد تنش و کرنش خمیری در قسمت بالای خط لوله‌ی مدفون منتقل شده است.<sup>[۹۷]</sup>

ژانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، اولین بار رفتار مکانیکی بتن پارچه‌ی تقویت شده با FRP<sup>۱۳</sup> را به‌طور آزمایشی با استفاده از آزمایش‌های کششی و خمشی بررسی کردند و دریافتند که بتن پارچه‌ی تقویت شده با FRP از نظر رفتار مکانیکی، پیشرفت قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. مقاومت کششی بتن پارچه‌ی با تقویت‌کننده‌ی AFRP<sup>۱۴</sup> به  $8/74$  مگاپاسکال در جهت تار و  $8/76$  مگاپاسکال در جهت پود می‌رسد که به ترتیب حدود  $6$  و  $9$  برابر بیشتر از بتن پارچه‌ی خالی است که مقاومت کششی آن  $1/36$  مگاپاسکال در جهت تار و  $0/99$  مگاپاسکال در جهت پود در بیشینه‌ی بار بوده است.

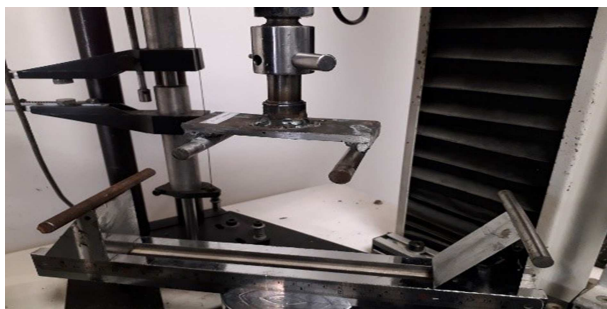
مقاومت خمشی بتن پارچه‌ی تقویت شده با AFRP در جهت تار برابر  $50/86$  مگاپاسکال و در جهت پود برابر  $42/86$  مگاپاسکال است که تقریباً  $20$  برابر بیشتر از

میزان مقاومت پناهگاه طراحی شده با استفاده از بتن پارچه‌یی در برابر حملات انفجاری و سرباره‌های آن در مقابل TNT، هدف مطالعه‌ی پژوهش حاضر بوده است.

## ۲. روش مطالعه

در پژوهش حاضر، از مدل رفتاری خمیری آسیب‌دیده‌ی بتنی (CDP) مطابق جدول برای شبیه‌سازی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت آنالیز خمش چهارنقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. آزمایش خمش، نوعی آزمون خواص مکانیکی مواد است که در آن مقاومت قطعه در برابر خم‌شدگی سنجیده می‌شود. آزمایش خمش چهارنقطه‌یی همانند آزمون خمش سه‌نقطه‌یی است، با این تفاوت که به‌جای یک سمبه از دو سمبه جهت اعمال نیرو استفاده می‌شود، که فاصله‌ی سمبه‌ها از دو طرف با تکیه‌گاه‌های نزدیک خود برابر است. بیشترین یا بیشینه‌ی تنش خمشی در سندان بارگذاری در آزمون‌های خمشی در آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی رخ می‌دهد. در آزمون‌های خمش چهارنقطه‌یی، بیشینه‌ی تنش خمشی بر روی بخش تیر بین نقاط بارگذاری پخش می‌شود. همچنین، در مواردی که مواد یکدست هستند، مانند مواد پلاستیکی، آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی بهترین کارایی را دارد؛ در صورتی که مواد یکدست نباشند، مانند مواد کامپوزیتی، آزمایش خمش چهارنقطه‌یی بهترین کارایی را دارد. تمرکز تنش در یک آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی کوچک و در مرکز جسم تحت بارگذاری متمرکز است، در حالی که تمرکز تنش در یک آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در یک ناحیه‌ی بزرگ‌تر است و از شکست زودرس جلوگیری می‌کند، با توجه به اینکه بتن پارچه‌یی خواص مواد کامپوزیت را دارد. به همین جهت در پژوهش حاضر، از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی استفاده شده است. آزمایش خمش چهارنقطه‌یی بتن پارچه‌یی توسط دستگاه کشش ۲ تن، SANTAM-STM۲۰ در آزمایشگاه علوم رازی انجام شده است (شکل ۱).

عملکرد دستگاه مذکور به صورت سروالکترونیکال بوده و جهت کنترل بار از بازخورد Load cell و جابه‌جایی دقیق فک‌ها استفاده می‌کند. با به‌کار بردن موتور و درایور سرو به عنوان محرک، دقت کنترل افزایش پیدا کرده و با بهره‌گیری از بازخورد از Encoder، انجام آزمایش در بازه‌ی گسترده‌یی از سرعت با دقت بالا (۰/۰۰۱-۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) انجام پذیر است. با توجه به اینکه استاندارد BS EN ۱۲۴۶۷ در برگه‌ی اطلاعات شرکت تولیدکننده‌ی بتن پارچه‌یی خارجی موجود بود و همچنین استاندارد مذکور، یک استاندارد بسیار کامل و دقیق از نمونه‌های Fiber Cement Sheet است، برای آزمایش خمش به استاندارد ذکر شده استناد شده است. روش آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در آزمایشگاه بدین صورت بوده است که در ابتدا نمونه‌های



شکل ۱. دستگاه خمش چهارنقطه‌یی.

جان<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، اخیراً بر روی تقویت بتن پارچه‌یی کار کرده و دریافته‌اند که بتن پارچه‌یی، کاربردی گسترده و پتانسیل کاربردی بسیار زیادی در حفاظت از چادرها و پناهگاه‌های اضطراری، تعمیر اضطراری و ساخت روسازی فرودگاه، تعمیر اضطراری و ساخت پروژه‌های موقعیتی و سایر مهندسی‌های اضطراری دارد. با این حال، مقاومت فشاری CC، استحکام خمشی، مقاومت در برابر سایش، و عملکرد ضدنفوذ هنوز نیاز به بهبود دارد. برای دستیابی به هدف اخیر، می‌توان این تلاش‌ها را انجام داد: اصلاح مواد سازنده‌ی بتن پارچه‌یی، تقویت بتن پارچه‌یی توسط FRP با پیوند خارجی.<sup>[۱۳]</sup>

هادی جعفری و همکاران (۲۰۲۰)، بتن پارچه‌یی را به صورت المان Shell در نظر گرفتند و برای محافظت از لوله‌های مدفون آن را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، به صورت ماکرو شبیه‌سازی کردند و تأثیر بتن پارچه‌یی در پاسخ خطوط لوله‌ی فولادی مدفون را تحت نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند و همچنین بیشینه‌ی تنش‌های خطوط لوله‌ی مدفون برای حالت‌هایی که ضخامت بتن پارچه‌یی آن‌ها ۲۰ میلی‌متر است، را ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد لایه‌های بتن پارچه‌یی، تنش ناشی از بارگذاری انفجار سطح در دیواره‌های خطوط لوله‌ی دفن شده در بیشتر موارد کاهش یافته است.<sup>[۱۴]</sup>

شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بر روی بتن پارچه‌یی توسط پژوهشگران اکثراً در مقیاس ماکرو بودند و این خلأ در زمینه‌ی شبیه‌سازی مزو بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار اجزاء محدود مشاهده می‌شد؛ در همین راستا، در مطالعه‌ی حاضر، به شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو پرداخته شده و با نتایج شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در حالت ماکرو مقایسه صورت گرفته است. در مدل ماکرو ارائه شده سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات و امکان استفاده‌ی وسیع‌تر، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. استفاده از روش ماکرو، به دلیل کاهش حجم بالای محاسبات نسبت به مدل مزو مقرون به صرفه است و می‌تواند به صورت گسترده استفاده شوند. در ضمن، گزینش مدل کلی مناسب برای اتصال، شامل: اجزاء مختلف، پیکربندی، و ارتباط اجزا و همچنین انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر یک از اجزاء مدل برگزیده که جهت حصول نتایج با دقت قابل قبول ضروری است، در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است. اما این نکته نباید فراموش شود که استفاده از روش مزو، قابل اتکاتر است و نتایج را به دقت بالاتری ارائه می‌کند. بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو به صورت محدود و آن‌هم فقط به صورت المان shell مدل شده است و چندان دقیق نیست. در ابتدا، برای ارائه‌ی مدل رفتاری خمیری آسیب‌دیده‌ی بتنی (CDP) برای شبیه‌سازی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار آباکوس به صورت ماکرو بوده و با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه مقایسه شده است. همچنین به بررسی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در آزمایشگاه و در نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است. در مرحله‌ی بعد، بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو شبیه‌سازی شده و به صورت ماده‌ی دو فازی در نظر گرفته شده و با نتایج به دست آمده از مدل ماکرو بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است. سپس با استفاده از مدل ماکرو به دست آمده، سازه‌هایی که در آن‌ها از بتن پارچه‌یی استفاده شده است، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده از خروجی نرم‌افزار مذکور با نتایج آزمایش میدانی مقایسه شده‌اند. در نهایت، به بررسی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت انفجار در هوای آزاد پرداخته شده است. لذا، به دست آوردن: (۱) بیشینه‌ی جابه‌جایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت بار خمش چهارنقطه‌یی؛ (۲) پارامترهای تخریب انفجاری در مدل ایجاد شده با استفاده از بتن پارچه‌یی؛ و (۳)

جدول ۱. مشخصات CDP داده شده به بتن پارچه‌یی.

۰/۰۰۱	Viscosity Parameter
۰/۶۶۷	K
۱/۱۶	$Fb_0/Fc_0$ (پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک‌محوره)
۰/۱	Eccentricity (پتانسیل خروج از مرکزیت خمیری)
۳°	Dilation Angle (زاویه‌ی اتساع)

پتانسیل خروج از مرکزیت خمیری: عدد کوچک مثبتی است که مساوی نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن است که برای بتن پارچه‌یی ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک‌محوره: پارامتر ذکر شده، مشخصات تابع گسیختگی را بیان می‌کند، که برای بتن پارچه‌یی ۱/۱۶ در نظر گرفته شده است. [۱۵] پارامتر **Kc**: در مدل خمیری آسیب‌دیده برای بتن، مقدار پیش فرض ضریب ۰/۶۶۷ است، که براساس آزمایش‌های فشاری سه‌محوره و تحلیل‌های عددی پیشنهاد شده است، که برای بتن پارچه‌یی همان مقدار اخیر در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو در نرم‌افزار، در ابتدا یک جسم Solid به ابعاد  $40 \times 80 \times 13$  میلی‌متر در نظر گرفته شده و مشخصات فشاری و کششی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی به دست آمده در آزمایشگاه به جسم ترسیم شده مطابق شکل ۲، اختصاص یافته است. سپس فک‌های واردکننده‌ی بار در مدل به قطر ۲۰ رسم شده است. فاصله‌ی بین فک‌های بالایی برابر ۹۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های ثابت پایین، ۲۷۰ میلی‌متر بوده است (مطابق شکل ۳). به فک‌های بالایی فقط جابه‌جایی در راستای عمود بر نمونه و به میزان ۱۰ میلی‌متر داده شده است و برای اینکه فقط عملکرد خود بتن پارچه‌یی بررسی شود و برش پانچ صورت نگیرد، اتصال‌های دو طرف نمونه به صورت مفصل (جابه‌جایی‌ها در راستاهای اصلی برابر صفر) در نظر گرفته شده است. و در وسط فک‌ها، Partition زده شد تا نمونه دارای شبکه‌بندی با Mesh با کیفیت تری شود.

برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو در نرم‌افزار آباکوس، بتن پارچه‌یی به صورت دوفازی (بتن و پارچه) در نظر گرفته شده است. بدین صورت که ماده‌ی ملات با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال به صورت یک فاز و پارچه‌ی تهیه شده از نخ FDY به صورت یک فاز دیگر در نظر گرفته شده است (شکل ۴) که نمودار استحکام کششی نخ به آن داده شده است. اتصال بین پارچه و ملات به صورت tie در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی بتن پارچه‌یی مطابق قبل، تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و به فک جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر داده شده است. سپس نمودار نیرو - جابه‌جایی ترسیم و با نمودار نیرو - جابه‌جایی مدل ماکرو مقایسه شده است.

-- تفاوت دو روش ماکرو و مزو و دلایل استفاده از هر کدام: مدل‌سازی برای تحلیل و طراحی بتن، که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا موزوسکوپی (میان‌مقیاس) انجام می‌شود. در بررسی ماکروسکوپی، که رایج‌ترین شیوه‌ی مدل‌سازی بتن است، تمامی بتن به صورت تک فاز، شامل خمیر سیمان، مدل‌سازی می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی، هر یک از فازها با عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، نظیر کریستال‌های سیمان و سنگدانه‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. به دلیل افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات و نیاز به رایانه‌هایی با ظرفیت‌های خیلی بالا، مدل‌سازی اخیر فقط برای موارد خاص یا دوفازه‌ی (ITZ) بتن به عنوان یک ماده‌ی ناهمگن سه فاز،

بتن پارچه‌یی در ابعاد  $30 \times 80 \times 30$  میلی‌متر با ضخامت ۱۳ میلی‌متر در آزمایشگاه دانشگاه در قالب‌های چوبی با همین ابعاد ساخته و پس از ۱۰ روز از قالب خارج شده‌اند. دستگاه خمشی چهارنقطه‌یی، شامل چهار فک مطابق شکل ۱ است که دو فک پایین ثابت دارد که فاصله‌ی بین آن‌ها ۳۰ میلی‌متر است. فک‌هایی بالایی با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه جابه‌جایی دارند و به سمت پایین حرکت می‌کنند. قطر فک‌هایی که به نمونه نیرو وارد می‌کنند، برابر ۲۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های بالایی ۹۰ میلی‌متر است و دستگاه خمشی چهارنقطه‌یی مجهز به حسگر LVDT<sup>۱۸</sup> برای ترسیم لحظه‌یی نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه است.

-- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها:

ابعاد نمونه‌ها و طول آزمایش باید به گونه‌یی باشند که:

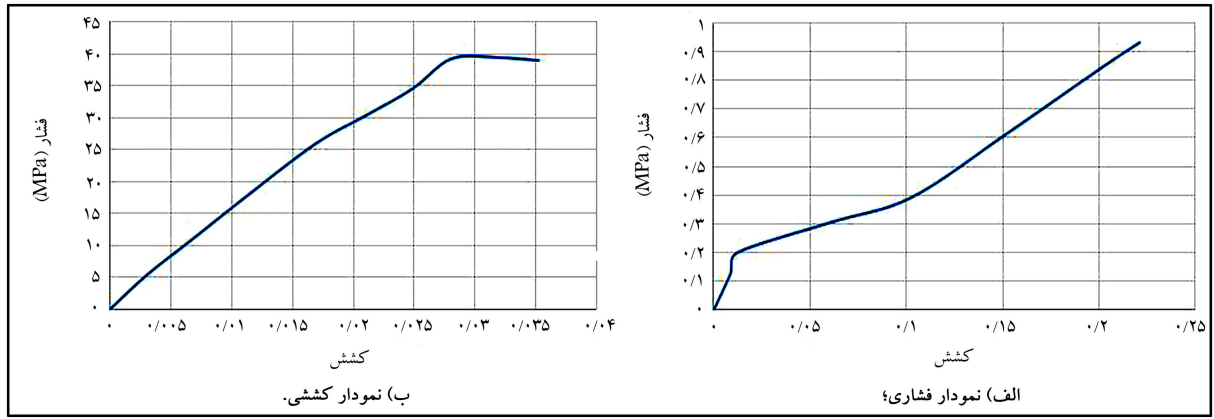
- نسبت دهانه/ضخامت اسمی بیشتر از یا برابر با ۱۵ باشد.
  - نسبت دهانه/انحراف در هنگام بارگی بیشتر از یا برابر با ۲۰ باشد.
  - طول نمونه‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با مقدار دهانه به علاوه ۴۰ میلی‌متر باشد.
  - عرض نمونه‌ها از ۵ برابر ضخامت اسمی نمونه‌ها بیشتر یا مساوی باشد.
  - نمونه‌ها ممکن است مربع یا مستطیل باشند.
  - ابعاد ترجیحی نمونه‌ها  $250 \times 250$  میلی‌متر باشد.
- طول دهانه‌ی ترجیحی ۲۰۰ میلی‌متر باشد.
- در مواردی که ابعاد و دهانه‌ی ترجیحی دارای شرایط a تا d نباشند، ابعاد و دهانه طوری تنظیم شود که شرایط ذکر شده برآورده شود.
- ابعاد نمونه‌ها و دهانه‌ی آزمایش ممکن است از مقادیر ترجیحی تغییر یابند، به شرط آنکه شرایط a تا d برآورده شود.

به دلیل ایجاد شرایط دقیق آزمایشگاهی و وجوب همگنی بین نمونه‌های مختلف و همچنین جلوگیری از تأثیر غیریکنواخت بودن نمونه در لبه‌های نمونه‌ی بتن پارچه‌یی، نمونه‌برداری باید شرایط ویژه‌یی داشته باشد، که در ادامه توضیح داده شده است: برای صفحات با ابعاد کوچک، ۵ صفحه‌ی نمونه به صورت تصادفی گرفته می‌شود. برای صفحه‌های کوچک‌تر از  $250 \times 250$  میلی‌متر، کل صفحه‌ها آزمایش می‌شوند. برای صفحه‌های بزرگ‌تر، یک نمونه‌ی آزمایش مربع  $250 \times 250$  میلی‌متر از هر صفحه برش داده می‌شود. قطعه‌ی آزمایش به صورت صحیح در برابر تکیه‌گاه‌ها تنظیم و با استفاده از میله‌ی بارگذاری مرکزی بارگذاری می‌شود.

نمونه باید طوری بارگذاری شود که شکستگی در ۱۰ و ۳۰ ثانیه رخ دهد. نرخ ثابت کرنش ترجیح داده می‌شود. در صورت عدم امکان تهیه‌ی لوازم ذکر شده، بار ثابت بارگذاری قابل قبول است. برای نمونه‌های بدون بافت، ضخامت در دو نقطه، قبل از شکستن در امتداد خط بارگیری یا بعد از شکستن در امتداد لبه‌ی شکسته، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود.

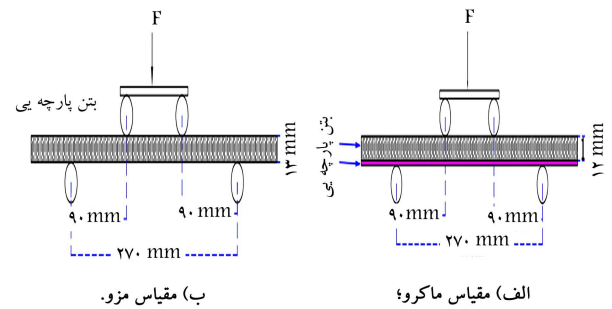
صفحات با ابعاد بزرگ، نمونه‌های آزمایش از همان قسمت صفحه بریده می‌شوند. طرح‌های برش دیگر ممکن است استفاده شود، به شرطی که تعداد مساوی از نمونه‌ها از برش عمود و موازی با جهت تولید باشد. پارامترهای استفاده شده در مدل CDP برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای بتن پارچه‌یی طبق جدول ۱ استخراج شده‌اند.

زاویه‌ی اتساع ( $\Psi$ ): زاویه‌ی اتساع کرنش خمیری در اثر برش را در فاز بعد از کشسان تعریف می‌کند. هنگامی که  $\Psi = 0$  باشد، ماده هیچ‌گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. زاویه‌ی اتساع برای بتن پارچه‌یی ۳° در نظر گرفته شده است.



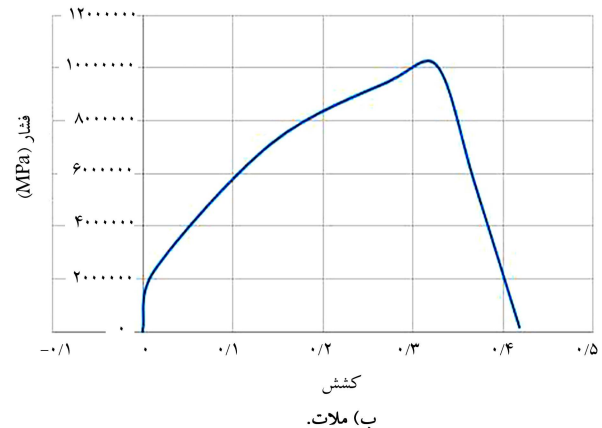
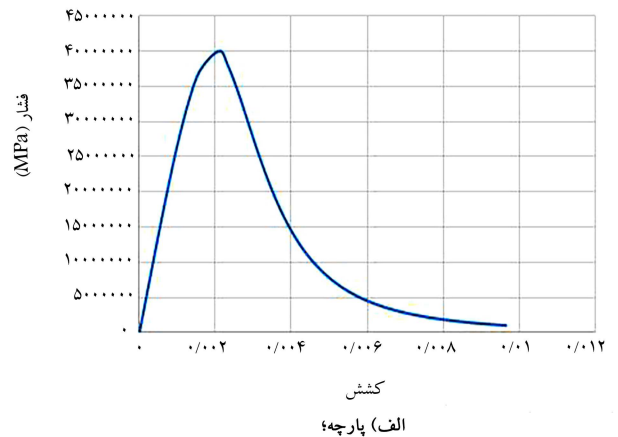
شکل ۲. مشخصات داده شده به بتن پارچه‌بی در حالت ماکرو.

مشمول بر: سنگدانه، خمیرسیمان و ناحیه‌ی انتقال انجام می‌شود. میان‌مقیاس مشتمل بر سنگدانه و خمیر سیمان در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل بتن در میان‌مقیاس می‌تواند صفات‌های بتن غیرمسلح را به خوبی نشان دهد. برای دستیابی به درک عمیق‌تر، مطالعات نظری مبتنی بر تجزیه و تحلیل روی ساختار ریزمکانیکی، برهم‌کنش بین اجزاء مختلف بتن برای استنباط رفتار سازنده‌ی میکروسکوپی بتن توسعه یافته است. با این حال، ساختار موضوعی و خصوصیات تک‌تک اجزاء بتن و آثار آن‌ها در رفتار مواد ماکروسکوپی در نظر گرفته نمی‌شود. برای اینکه چنین جزئیاتی در تحلیل محاسباتی گنجانده شود، نیاز است که بتن به عنوان یک ماده‌ی ترکیبی چندمقیاس، که در آن ریزساختارها واقعاً شبیه‌سازی شده‌اند، تجزیه و تحلیل شود. شبیه‌سازی‌های عددی، همراه با تئوری و آزمایش، ابزاری فوق‌العاده مهم برای موفقیت در بررسی خواص مواد با استفاده از علم مواد محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند. در شبیه‌سازی عددی بتن در سطح مازوسکوپی، مشخص است که چندین پارامتر، مانند: شکل، اندازه و توزیع سنگ‌دانه‌های درشت درون ماتریس ملات به‌طور قابل‌توجهی در رفتار مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند.

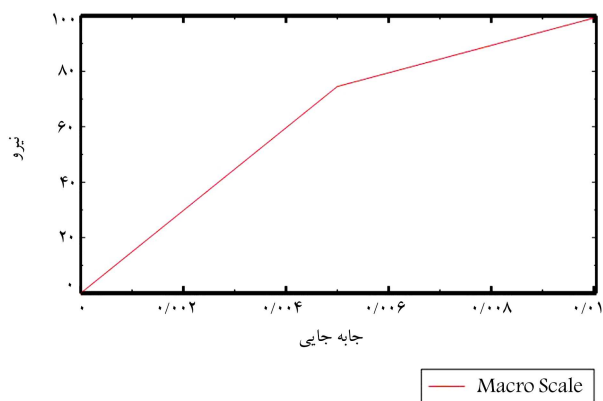


شکل ۳. فاصله‌ی بین اجزا در حالت شبیه‌سازی خمش چهارنقطه‌بی.

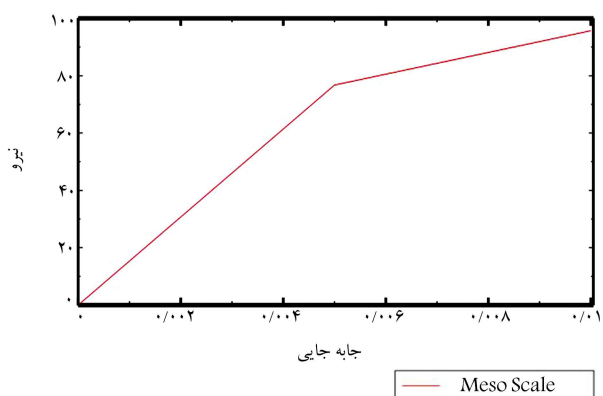
در مدل ماکرو ارائه شده سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات و امکان استفاده‌ی وسیع‌تر، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. استفاده از روش ماکرو، به دلیل کاهش حجم بالای محاسبات نسبت به مدل مزو مقرون به صرفه است و می‌تواند به صورت گسترده استفاده شوند. در ضمن گزینش مدل کلی مناسب برای اتصال، شامل: اجزاء مختلف، پی‌کربندی و ارتباط اجزا و همچنین انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر یک از اجزاء مدل برگزیده که جهت حصول نتایج با دقت قابل قبول ضروری است، در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است. اما این نکته نباید فراموش شود که استفاده از روش مزو قابل‌انکاتر است و نتایج را با دقت بالاتری ارائه می‌کند. در شبیه‌سازی مذکور، نمودارهای فشاری و کششی بتن پارچه‌بی به دست آمده از آزمایشگاه و نتایج پژوهشگران، به عنوان ورودی نرم‌افزار در نظر گرفته شده و نمونه‌ی بتن پارچه‌بی به صورت خمش چهارنقطه‌بی شبیه‌سازی شده است. در نهایت نمودار نیرو - جابه‌جایی به عنوان خروجی نرم‌افزار، در یک مرحله به صورت دوخطی ترسیم شده و در مرحله‌ی بعد، ترک‌ها و شکستگی‌های نمونه، در نمودار به دست آمده لحاظ شده است. در پژوهش حاضر، برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب، روش‌ها و ابعاد مختلف شبکه‌بندی بررسی شده و متناسب با هر مرحله، نمودار نیرو - جابه‌جایی ترسیم و در نهایت نمودارهای به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند. بنابراین برای مشاهده‌ی محل شکست‌ها (صعود و سقوط‌ها) در نمودار نیرو -



شکل ۴. مشخصات داده شده به بتن پارچه‌بی در حالت مزو.



شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو تحت خمش چهارنقطه‌یی.



شکل ۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی به دست آمده‌ی بتن پارچه‌یی در حالت شبیه‌سازی در مقیاس مزو.

نیرو - جابه‌جایی ارائه‌شده توسط ژانگ و همکارانش، بر مبنای مقاومت خمشی - جابه‌جایی ترسیم شده است، با توجه به رابطه‌ی ۱، نمودار نیرو - جابه‌جایی تبدیل به نمودار مقاومت خمشی - جابه‌جایی شده است.

$$MOR = \frac{FL}{bh^2} \quad (1)$$

که در آن، مقاومت خمشی نهایی<sup>۱۹</sup> به دست آمده است؛  $L$  طول کل نمونه مساوی ۴۰۰ میلی‌متر،  $b$  عرض نمونه مساوی ۸۰ میلی‌متر،  $h$  ضخامت نمونه مساوی ۱۳ میلی‌متر است و از طریق رابطه‌ی ۱، مقدار نیرو بر حسب کیلونیوتن محاسبه شده است. با توجه به شکل ۶، مقدار پیشینه‌ی نیرو برای بتن پارچه‌یی، ۱۰۰ کیلونیوتن به دست آمده است. با توجه به رابطه‌ی ۱، مقدار مقاومت خمشی نهایی برای بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو، ۲ مگاپاسکال به دست آمده است که مقدار اخیر در پژوهش ژانگ طبق جدول ۲ معادل  $2/15 \pm 0/09$  مگاپاسکال به دست آمده و نتیجه‌ی به دست آمده در نرم‌افزار آباکوس، میزان خطای ۰/۰۶٪ را نشان داده است.

#### ۴. راستی‌آزمایی مدل بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده در مقیاس مزو

پس از پایان تحلیل نمودار نیرو - جابه‌جایی استخراج شده در حالت مزو (شکل ۷) با نتایج حالت ماکرو و نتایج آزمایشگاه علوم رازی (شکل ۸) مقایسه و نتیجه‌گیری



شکل ۵. پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌یی.

جابه‌جایی، نیاز به شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو است و نتایج اخیر در شبیه‌سازی ماکرو قابل رؤیت نیستند. همچنین برای تقویت بتن پارچه‌یی در برابر بارهای دینامیکی و اضافه کردن مواد افزودنی برای تقویت خواص بتن پارچه‌یی، شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو الزام و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

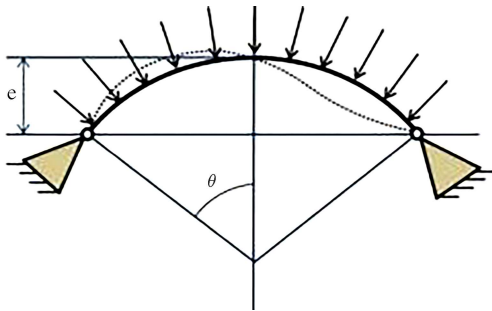
پناهگاه تعجیلی مطابق استاندارد نمونه‌ی خارجی مطابق شکل ۵الف، با ابعاد: طول ۶/۲۴ متر و ارتفاع قوس ورودی ۲/۳۵ متر در محیط نرم‌افزار ترسیم شده است. در انتها، برای شبیه‌سازی پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌یی مطابق شکل ۵ب در نرم‌افزار آباکوس، پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌یی تحت وزن خود و بار گسترده‌ی خاک مطابق شکل ۵ج، شبیه‌سازی و نتایج تنش و جابه‌جایی برای سازه محاسبه شده است. لذا سازه به صورت قوس در نظر گرفته شده است که طراحی سازه‌های به شکل قوس، باعث پخش قدرت انفجار در سطح بیشتری از خاک می‌شود که موجب کاهش انتقال نیرو به سازه‌ی مورد مطالعه می‌شود. بنابراین درجه ایمنی سازه‌های مذکور به لحاظ عملکرد در برابر بار انفجار به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت و برای افزایش ممان اینرسی مقطع شکل به پناهگاه تعجیلی مدنظر، چین‌خوردگی‌هایی با ارتفاع ۶ سانتی‌متر داده شده است، لذا با افزایش ممان اینرسی مقطع، تنش و تغییرشکل خمشی مقطع کاهش یافته و فاصله‌ی بین هر دو چین متوالی ۳۵/۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از آنجا که طول هر رول بتن پارچه‌یی ۱۱۰ سانتی‌متر و طول مستقیم هر رول بتن پارچه‌یی با چین‌خوردگی‌های داده شده به آن ۷۸ سانتی‌متر است، پس در شبیه‌سازی انجام شده از ۸ رول بتن پارچه‌یی استفاده شده است، تا طول موردنظر سازه به دست آید. برای بررسی عملکرد تخریب‌کششی بتن پارچه‌یی، نمونه‌یی با ضخامت ۱۳ میلی‌متر در مقابل بار انفجار شبیه‌سازی شده و با توجه به مطالعات صورت‌گرفته توسط پژوهشگران روی نمونه‌ی خارجی، بتن پارچه‌یی با ابعاد  $100 \times 100$  سانتی‌متر در برابر ۵ کیلوگرم ماده‌ی منفجره‌ی TNT در فاصله‌ی ۳ متر قرار گرفته است.

#### ۳. راستی‌آزمایی مدل بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده در مقیاس ماکرو

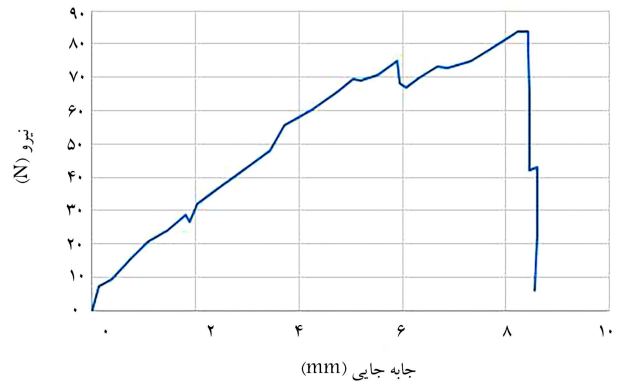
نمودار خمش چهارنقطه‌یی بتن پارچه‌یی انتخاب شده با توجه به انتخاب اندازه شبکه‌بندی ۰/۰۲۵ متر و در نظر گرفتن زمان تحلیل یک ثانیه، با نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از نتایج مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۸]</sup> مقایسه و مشاهده شده است، که نتایج بسیار به هم نزدیک و قابل قبول بوده است؛ و چون نمودار

جدول ۲. محاسبه‌ی مقاومت خمشی نمونه‌ی بتن پارچه‌ی طبق پژوهش ژانگ و همکاران.

خمش			C/Cs	
مدول یانگ معادل (MPa)	مقاومت خمشی نهایی (MPa)	مقدار کشش در ترک اولیه ترک اولیه (mm)	ترک (%)	
$2/39 \pm 0/27$	$2/40 \pm 0/26$	$0/96 \pm 0/24$	$0/09 \pm 0/02$	بتن پارچه‌ی در جهت تار-CC
$2/10 \pm 0/03$	$2/15 \pm 0/09$	$1/06 \pm 0/06$	$0/10 \pm 0/01$	بتن پارچه‌ی در جهت پود-CC
$2/98 \pm 0/39$	$50/86 \pm 0/99$	$17/89 \pm 2/39$	$1/72 \pm 0/23$	بتن پارچه‌ی تقویت شده در جهت تار-CC-AF
$2/40 \pm 0/22$	$42/86 \pm 4/61$	$18/47 \pm 1/94$	$1/79 \pm 0/19$	بتن پارچه‌ی تقویت شده در جهت پود-CC-AF



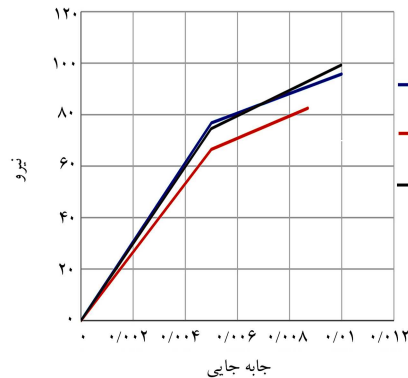
شکل ۱۰. مود کمانشی برای تیر قوسی دایروی.



شکل ۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی گرفته شده از آزمایشگاه رازی.

## ۵. بررسی پدیده‌ی فروجهش ناگهانی

تیر قوسی کم عمق، یک المان سازه‌ی مهم در کاربرد بناهای مهندسی راه و ساختمان، مهندسی مکانیک، و هوافضاست. مشخصه‌ی مهم تیرهای قوسی کم عمق تحت بارگذاری جانبی، ناپایداری آن‌ها در برابر نیروهای بحرانی است که در اثر آن سازه دستخوش یک جابه‌جایی بزرگ ناگهانی به سوی یک ساختار تعادلی جدید می‌شود که اصطلاحاً فروجهش نامیده می‌شود. با معرفی مواد مدرج تابعی و ترکیب آن با بحث تیرهای قوسی، نتایج جالبی حاصل می‌شود که می‌توان سازه‌هایی را با مشخصات پایداری مطلوبی برای شرایط خاص ایجاد کرد. مسئله‌ی بحرانی در رفتار تیرهای قوسی کم عمق تحت بارهای جانبی، ناپایداری هندسه‌ی آن‌هاست که می‌تواند منجر به تخریب سازه یا جابه‌جایی‌های بیش از حد شود. در واقع، اگر میزان نیروی فشاری درونی تیرهای قوسی به بیش از مقدار حدی برسد، در این صورت سازه دستخوش یک جابه‌جایی بزرگ ناگهانی به سوی ساختار تعادلی جدیدی می‌شود. این پدیده می‌تواند هم مطلوب باشد (تغییر وضعیت سوئیچ) و هم خطرناک (فروپاشی یک گنبد یا خرپا). به‌طور کلی دو حالت برای کمانش تیرهای قوسی وجود دارد:

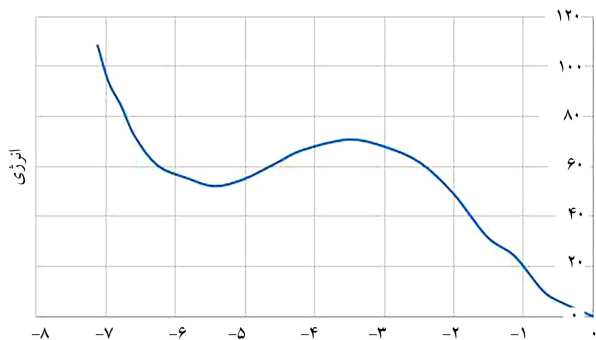


شکل ۹. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی بتن پارچه‌ی در مقیاس مزو و ماکرو و نتایج آزمایشگاهی.

شد که نمودارها از لحاظ ساختار و دوخطی بودن، شبیه هم‌دیگر هستند و فقط در مشخصات ملات و پارچه‌ی استفاده شده تفاوت دارند؛ چون مشخصات پارچه‌ی نمونه‌ی داخلی و مشخصات پارچه در نرم‌افزار با هم تفاوت دارند که همین امر باعث ایجاد تفاوت شده است؛ ولی از لحاظ ساختار نمودار، شباهت بسیار زیاد و قانع‌کننده‌ی وجود دارد و تفاوت اصلی به دلیل سختی ماده‌ی بتن در هر دو حالت است و حالت کشسانی بتن، تأثیر بسیار زیادی دارد و همچنین نتیجه گرفته شد که نتایج حالت مزو با نتایج آزمایشگاه، اختلاف کمتری دارد و مدل‌سازی بتن پارچه‌ی در حالت مزو نسبت به ماکرو، دقت بالاتری دارد. محل شکستگی نمودارها تقریباً در جابه‌جایی  $0/05$  متر رخ داده است. همچنین میزان بار قابل تحمل در مدل‌سازی مزو تقریباً  $90$  کیلو نیوتن است که این مقدار برای مدل ماکرو تقریباً  $100$  نیوتن و برای آزمایشگاه مقادیر  $82/5$  نیوتن به دست آمده است (شکل ۹).

۱. اگر مرتبه‌ی ارتفاع اولیه‌ی تیر قوسی با فاصله‌ی دو تکیه‌گاه تیر قوسی یکسان باشد (شکل ۱۰)، این امکان برای تیر قوسی وجود دارد که تحت فشار بحرانی در مود نشان داده شده (نقطه چین) کمانش کند. برای نمونه، تیرهای قوسی دایروی تحت نیروی عرضی گسترده‌ی غیریک‌ناوخت با انواع گوناگون تکیه‌گاه‌ها می‌تواند برای مدل اخیر در نظر گرفته شود.

۲. اگر ارتفاع اولیه‌ی یک تیر قوسی شکل بسیار کوچک‌تر از فاصله‌ی دو تکیه‌گاه آن باشد، در این صورت تیر قوسی، کم عمق نامیده می‌شود (شکل ۱۱) و نیروی محوری که به دلیل ثابت بودن دو انتهای تیر ایجاد می‌شود، نقش مهمی را در پایداری کشسانی ایفا می‌کند. تیر ممکن است ناپایدار شود و به طور ناگهانی معکوس انحنای اولیه شود که تغییر انحنای از خط ممتد به خط نقطه چین بیانگر پدیده‌ی مذکور است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نمودار تابع انرژی بر حسب a1.

شکل ۱۲. نمودار تابع انرژی بر حسب a1.

است: اگر سیستم معادلات حرکت دارای بیش از یک ساختار تعادلی پایدار باشد، یک ساختار تعادلی بهینه در میان آن‌ها وجود دارد که کمترین میزان انرژی را دارد و ساختار تعادلی ذاتی نامیده می‌شود که در اینجا همان نقطه‌ی  $p^0$  است. اگر سیستم تحت تأثیر یک اختلال اولیه یا اعمال نیرویی (ضربه‌بی) قرار گیرد، سیستم در نهایت به حالت تعادلی مرجع خود میل خواهد کرد و گفته می‌شود که سیستم در مقابل پدیده‌ی فروجهش دینامیکی پایدار است. اما اگر اختلال یا نیروی اعمال شده به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، سیستم ممکن است در نهایت به یک ساختار تعادلی پایدار دیگری که متفاوت از این حالت مرجع است، جهش کند و این جهش‌های بین ساختارهای تعادلی، ناپایداری فروجهش نامیده می‌شود. برای اینکه این نوع مفهوم پایداری به‌طور فیزیکی مشهود باشد، حالت تعادلی مرجع الزاماً باید یک حالت پایدار موضعی باشد و برای تعیین نیروی بحرانی از تابع لیاپانوف استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۲):

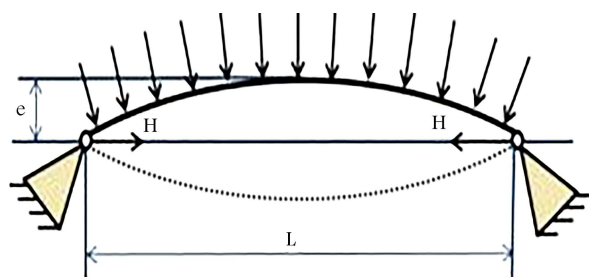
$$V(C) = \Pi(C) - \Pi(p^0) \quad (2)$$

مطالعه‌ی توزیع نقاط  $p^0$  تعادل در فضای حالت مرتبط با سطوح تراز  $V(C)$  حول نقطه‌ی تعادلی ذاتی  $p^0$  برای تیر قوسی کم عمق منجر به این نتایج درباره‌ی نقطه‌ی بحرانی  $p^*$  خواهد شد:

۱. به ازاء  $\lambda_1 < \lambda_2 < \sqrt{2}(\bar{D}/\bar{B})^{1/2}$ ، فقط یک ساختار تعادلی موضعی  $P^0$  وجود دارد و  $p^*$  در بازه‌ی اخیر وجود ندارد و بنابراین مهم نیست که نیرو چه اندازه بزرگ باشد، تیر قوسی در برابر پدیده‌ی فروجهش پایدار است و نیروی بحرانی می‌تواند هر مقداری داشته باشد.

۲. به ازاء  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \sqrt{2}(\bar{D}/\bar{B})^{1/2}$ ، سه نقطه‌ی بحرانی وجود دارد:  $p^0$ ،  $p^1$  و  $p^2$  با استفاده از نمودار انرژی بر حسب a1 در شکل ۱۲ (سایر مقادیر  $n = 3, 2, \dots$  صفر است) مشخص است که اولین نقطه‌ی بحرانی که بسط سطح تراز  $V(C)$  حول  $p^0$  برخورد می‌کند، نقطه‌ی بحرانی  $p^1$  است، پس  $p^*$  است.

مرز ناحیه‌ی پایدار در مقابل پدیده‌ی فروجهش ناگهانی تیر قوسی کم عمق، برای مواد همگن برابر عدد ثابت  $\lambda a = 2$  است و مقدار عمق اولیه‌ی آن نیز از رابطه‌ی  $e$  به دست می‌آید. این مرز برای مواد مدرج تابعی برابر  $\lambda a = 2(D/B)^{1/2}$  است و رابطه‌ی عمق اولیه‌ی تیر قوسی نیز برابر  $e = \sqrt{2}ra$  خواهد بود که متناسب با شعاع ژیراسیون سفتی است و مقدار بیشینه یا کمینه‌ی  $\lambda a$  با بیشینه یا کمینه‌ی مقدار توزیع سفتی ارتباطی ندارد. با به کارگیری ساختار مدرج تابعی در تیرهای قوسی کم عمق، برخلاف حالت همگن، دامنه‌ی برای  $\lambda a$  وجود دارد که برای طراح این امکان را فراهم



شکل ۱۱. مود کمانشی برای تیر قوسی کم عمق.

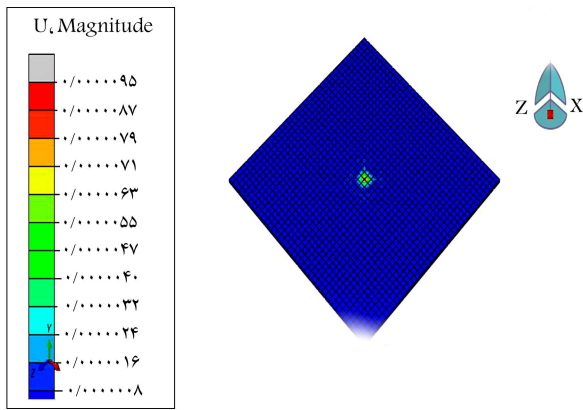
پارامتر نیرویی که تغییری زیاد در پاسخ ایجاد کند، نیروی بحرانی نامیده می‌شود. پس از تخطی نیرو از سطح نیرویی بحرانی، تیر قوسی کم عمق به‌طور ناگهانی از یک حالت تعادلی پایدار به یک ساختار تعادلی پایدار غیرمجاور آن جهش می‌کند. این پدیده‌ی ناپایدار، فروجهش نامیده می‌شود که یک مشخصه‌ی مهم از تیرهای قوسی کم عمق است. پژوهش‌ها در بررسی پایداری تیرهای قوسی کم عمق با توجه به چگونگی بار عرضی اعمال شده بر آن‌ها، می‌توانند به دو دسته تقسیم‌بندی شوند: پایداری استاتیکی و پایداری دینامیکی. در بحث پایداری استاتیکی فرض می‌شود که بارگذاری عرضی در یک حالت شبه‌استاتیکی اعمال شده است. به علت رفتار غیرخطی تغییرشکل تیر قوسی، وضعیت‌های تعادلی پایدار چندگانه‌ی ممکن است وجود داشته باشد و ساختار تیر قوسی ممکن است از یک حالت تعادلی پایدار به حالت تعادلی پایدار دیگری جهش کند.

به طور کلی راهکارهای استفاده شده در برآورد نیروهای بحرانی دینامیکی سازه‌های کشسان، که بارگذاری دینامیکی دارند، در دو رویکرد می‌توانند دسته‌بندی شوند: رویکرد اول، استفاده از روش‌های عددی در تحلیل معادلات حرکت سیستم‌های مذکور است تا کمانش دینامیکی یک سازه تحت بار متداول دینامیکی برای انواع مقادیر پارامتر نیرویی بررسی شود و پاسخ سازه‌ی سیستم در پایداری دینامیکی احراز شود. به منظور ساده‌سازی تحلیل عددی برای حل معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت، یک سازه‌ی پیوسته باید به مدلی با چندین درجه آزادی تفکیک شود و اغلب تعداد درجه‌های آزادی که برای چنین سیستم‌هایی در نظر گرفته می‌شود، زیاد است و محاسبات بسیاری را می‌طلبد. دقت رویکرد عددی اغلب وابسته به تعداد درجه‌های آزادی سیستم تقلیل می‌یابد و دقت روش محاسبه‌ی عددی اتخاذ شده است. رویکرد دوم، مطالعه‌ی انرژی کلی سیستم است که به عنوان روش‌های انرژی نیز شناخته می‌شود. در رویکرد اخیر، به دو طریق به مطالعه‌ی سیستم پرداخته می‌شود. در روش اول، انرژی کلی سیستم در صفحه‌ی فازی بررسی می‌شود،<sup>[۱۶]</sup> که در آن، شرایط بحرانی سیستم به مشخصات صفحه‌ی فازی آن وابسته است. از این رو، ابتدا با تعیین نقاط بحرانی از روی معادله‌ی حرکت، ویژگی‌های نقاط بحرانی در صفحه‌ی فازی بررسی می‌شود و اهمیت آن در این است که با استفاده از ویژگی‌های اشاره شده، می‌توان کلیه‌ی شرایط کافی برای پایداری و ناپایداری دینامیکی سیستم را تعیین کرد. در روش دوم، که بر اساس اصل پایستاری انرژی استوار است،<sup>[۱۷]</sup> با استفاده از معادله‌ی انرژی کلی سیستم، شرایط بحرانی و نیروهای بحرانی تعیین می‌شوند. مزیت اصلی رویکرد دوم در این است که معیاری در تعیین نیروی بحرانی کمانش دینامیکی فراهم می‌کند و عملاً پژوهشگران نیازی به حل معادلات حرکت سیستم ندارند.

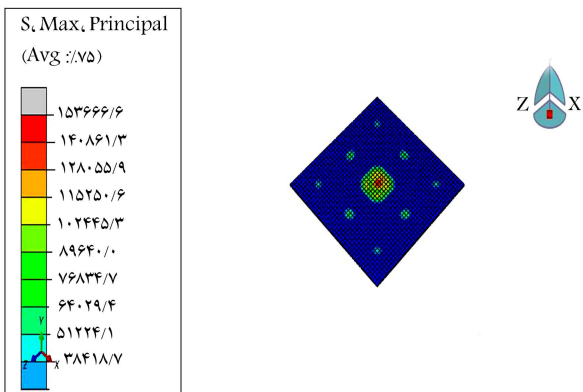
## ۶. بار بحرانی ضربه‌یی برای تعیین پدیده‌ی فروجهش دینامیکی

در بحث توصیف ناپایداری فروجهش دینامیکی، مفهوم فیزیکی به این شرح مدنظر

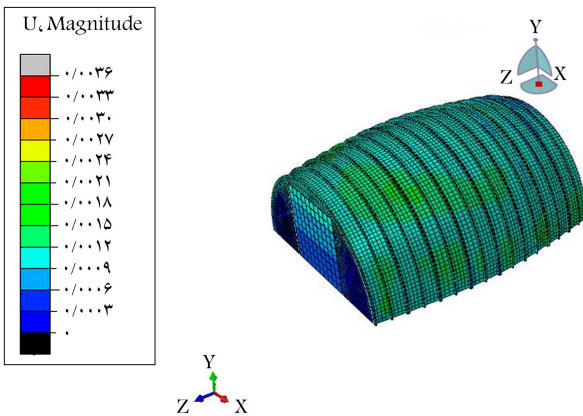




شکل ۱۳. کانتور جابه‌جایی به‌دست آمده برای بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ.



شکل ۱۴. کانتور تنش بیشینه‌ی بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ.



شکل ۱۵. کانتور جابه‌جایی به‌دست آمده از سازی بادی در نرم‌افزار.

اندازه‌ی  $9e-6$  است، که مقدار بسیار کمی است؛ پس هیچ خرابی در سطح نمونه ایجاد نشده و میزان بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی مقدار  $0/15$  مگاپاسکال و در وسط بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده، طبق شکل ۱۴ رخ داده است، که مقدار بسیار کمی است و تا تنش قابل تحمل بتن پارچه‌یی فاصله‌ی بسیار زیادی دارد. استفاده از پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌یی، تحت بارگذاری خاک فقط به میزان  $3/6$  میلی‌متر در آن جابه‌جایی ایجاد شده است و استفاده از پناهگاه تعجیلی نسبت به پناهگاه‌های استفاده شده در دوران مقدس، قابلیت ایمنی و اقتصادی بهتری را ارائه می‌دهد (شکل ۱۵).

می‌کند که با در نظر گرفتن مواد مدرج تابعی، یک انتخاب مناسب از ابعاد اولیه‌ی تیر قوسی کم عمق بسته به نوع کاربرد و فضای مورد نیاز در دست داشته باشد. فقط به ازاء امکان بروز ناپایداری، فروجهش دینامیکی وجود دارد و آن نیز فقط زمانی روی می‌دهد که انرژی دریافتی سیستم توسط بار ضربه‌یی  $F$  بیش از مقدار انرژی نقطه‌ی بحرانی  $p^*$  باشد. در غیر این صورت، پدیده‌ی فروجهش دینامیکی روی نخواهد داد و سیستم پایدار خواهد بود.

در تیرهای قوسی کم عمق همگن تنها عامل مؤثر در میزان بار بحرانی  $F$ ، پارامتر عمق اولیه‌ی تیر قوسی شکل (مقدار  $\lambda_1$ ) است که یک ارتباط خطی بین بار ضربه‌یی بحرانی  $F$  و  $\lambda_1$  وجود دارد. در حالی که در تیرهای قوسی کم عمق با مواد مدرج تابعی، میزان بار بحرانی  $F$  به توزیع ناهمگنی آن وابسته است. به طوری که به ازاء مقدار  $\lambda_1$  یکسان برای هر دو حالت همگن و ناهمگن، با انتخاب مقادیر مختلف برای  $\gamma$  و  $m$  می‌توان بار بحرانی  $F$  را به مراتب بیشتر از حالت همگن و یا کمتر از آن به‌دست آورد. بنابراین با توجه به اینکه ارتفاع سازی پناهگاه بتن پارچه‌یی کمتر از ۳ متر و در گروه سازه‌های قوسی کم عمق قرار دارد، پدیده‌ی فروجهش ناگهانی در سازه‌ی پناهگاه ساخته شده از بتن پارچه‌یی رخ نداده است.

## ۷. نتایج و بحث

با توجه به شکل ۹ این نتیجه گرفته شد که نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس‌های مزو و ماکرو با استفاده مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس، بسیار نزدیک به نتایج پژوهشگران و آزمایش‌های آزمایشگاهی بوده است، همچنین این نتایج به‌دست آمده است:

۱. جابه‌جایی نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی در آزمایش آزمایشگاهی تقریباً  $9/0$  متر و مقدار جابه‌جایی به‌دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس در مقیاس مزو و ماکرو  $1/0$  متر بوده است.
۲. در مقدار جابه‌جایی  $5/0$  متر، در نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آزمایشگاه و نرم‌افزار، شکست نمودار دوخطی ایجاد شده است.
۳. مقدار نیروی ایجاد شده در محل شکستگی نمودارها در مقدار جابه‌جایی  $5/0$  متر برای آزمایش آزمایشگاهی  $66/5$  نیوتن، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو  $76/75$  نیوتن، و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو  $74/5$  نیوتن بوده است.
۴. مقدار نیروی نهایی به‌دست آمده از نمودارها، برای آزمایش آزمایشگاهی  $82/5$  نیوتن، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو  $95/7$  نیوتن و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو  $99/2$  کیلونیوتن بوده است.
۵. سطح زیر نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمده از آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی، تقریباً شبیه هم به‌دست آمده است. همچنین نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس، تحت مقیاس‌های ماکرو و مزو، بتن پارچه‌یی بسیار نزدیک همدیگر به‌دست آمده‌اند.

شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی تحت انفجار به صورت کانوپ تحت  $5$  کیلوگرم TNT در فاصله‌ی  $3$  متری قرار گرفته و فرض شده است که حذف المان اتفاق بیفتد. مطابق شکل ۱۳ مشاهده شده است که بیشینه‌ی جابه‌جایی ایجاد شده در وسط نمونه به

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به راستی‌آزمایی نتایج ماکرو و مزو بتن پارچه‌ای در نرم‌افزار آباکوس با نتایج پژوهش ژانگ و نتایج آزمایشگاهی بتن پارچه‌ای تحت خمش چهارنقطه‌ای، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. میزان سربراه‌ی قابل تحمل بتن پارچه‌ای تحت خمش چهارنقطه‌ای ۸۲/۵ نیوتن است. تحت سربراه‌ی ۸۲/۵ نیوتن، به میزان ۱۰ میلی‌متر جابه‌جایی در نمونه‌ی بتن پارچه‌ای ایجاد شده و صعود و سقوط‌های ایجاد شده در نمودار نیرو - جابه‌جایی مانع از شکست نمونه در جابه‌جایی نسبتاً پایین نسبت به بتن شده و عملکرد انعطاف‌پذیری خوب بتن پارچه‌ای را نشان داده است. سپس به

بررسی و عملکرد بتن پارچه‌ای در سازه‌ی دفاعی پناهگاه تعجیلی پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

-- میزان سربراه‌ی قابل تحمل توسط پناهگاه، ۷۰ سانتی‌متر است که توسط سازندگان نمونه‌ی خارجی ارائه شده است.

-- میزان جابه‌جایی ایجاد شده در پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌ای، ۳ میلی‌متر و میزان تنش ایجاد شده تحت سربراه‌ی ۷۰ سانتی‌متر خاک، ۲/۷ مگاپاسکال در قسمت پایین پناهگاه بوده است.

-- در نهایت عملکرد بتن پارچه‌ای تحت بار انفجاری ۵ کیلوگرم در فاصله‌ی ۳ متری بررسی شده و نتایج نشان داده است که بتن پارچه‌ای به دلیل داشتن کرنش خمیری گسیختگی کششی بالا در حدود ۱۰ برابر بتن معمولی در مقابل انفجار، عملکرد بسیار خوبی نشان داده است.

## پانوشته‌ها

1. concrete canvas
2. Canvas
3. concrete canvas hydro (CC Hydro)
4. Han
5. Spacer fabric
6. Hussein & Meguid
7. Zonberg
8. concrete smeared cracking
9. crack propagation
10. concrete damage plasticity
11. Li
12. Zhang
13. fiber reinforced ploymer (FRP)
14. aramid fiber reinforced polymer (AFRP)
15. Geotextile
16. Zhou
17. Jun
18. linear variable differential transformer (LVDT)
19. MOR

## منابع (References)

4. Hussein, M. and Meguid, M. "A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(3), pp. 295-307 (2016).
5. Zornberg, J.G., Sitar, N. and Mitchell, J.K. "Limit equilibrium as basis for design of geosynthetic reinforced slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(8), pp. 684-698 (1998).
6. ABAQUS Analysis Users Manual, Version 6.10
7. Li, H., Chen, H., Liu, L. and et al. "Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 557-567 (2016).
8. Zhang, F., Chen, H., Li, X. and et al. "Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels", *Composite Structures*, **176**, pp. 608-616 (2017).
9. Ansari Umair, A. and Pallavi, K.P. "Experimental study of the mechanical behaviour of aluminium mosquito sheet on concrete canvas panels", *International Journal of Advanced Research In Engineering and Technology (IJARET)*, **9**(4), pp. 154-161 (2018).
10. Li, H., Chen, H., Li, X. and et al. "Design and construction application of concrete canvas for slope protection", *Powder Technology*, **344**, pp. 937-946 (2019).
11. Ding, G., Zhou, Li., Wang, J. and et al. "Shaking table tests on gravel slopes reinforced by concrete canvas geotextiles and geomembranes", **48**(4), pp. 539-545 (2020).
12. Zhou, L., Ding, G., Tan, J. and et al. "Seismic response of concrete-canvas reinforced slopes: Influence of tilt degrees for reinforcement", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **14**(03), p. 2050011 (2020).
13. Jun, Z., Wei, X., Xingzhong, W. and et al. "Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, **15**(1), p. 155892502097575 (2020).
1. Tsesarsky, M., Peled, A., Katz, A. and Anteby, I. "Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells-static and impact properties", *Construction and Building Materials*, **44**, pp. 514-523 (2013).
2. Han, F., Chen, H. and Li, X. "Improvement of mechanical properties of concrete canvas by anhydrite-modified calcium sulfoaluminate cement", *Journal of Composite Materials*, **50**(14), pp. 1937-1950 (2016).
3. Han, F., Chen, H., Jiang, X. and et al. "Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas", *Construction and Building Materials*, **65**, pp. 620-629 (2014).

14. Jafari, H., Atrchian, M. and Daghigh, Y. "Dynamic response of buried pipelines retrofitted with concrete canvas panels under blast loading", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **44**(1), pp. 105-119 (2020).
15. Wahalathantri, B. and et al. "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS", in *Proceedings of the 1st International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland (2011).
16. Hsu, C.S. "On dynamic stability of elastic bodies with prescribed initialconditions", *International Journal of Engineering Science*, **4**(1), pp. 1-21 (1966).
17. Simitses, G.J. "Dynamic stability of suddenly loaded structures springerVerlag", 398, New York, University of Technology (1990).