



## بسم تعالی

### فرم تعهد اصالت مقاله و انتقال حق طبع و نشر

**عنوان مقاله:** شبیه سازی بالشتک های الاستومری پل دارای لایه های تسلیح مش و یا ورق فولادی به روش اجزاء محدود

**کد مقاله:** SE-۰۵-۵۶۴

امضاکنندگان این فرم متعهد می شوند که مقاله ارسالی به چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران با عنوان مذکور حاصل پژوهش ایشان بوده و تمامی نویسندگان در تدوین و نگارش مقاله همکاری مؤثر داشته اند. در صورتی که به هر طریق در این مقاله از ایده، نوشتار، شکل، داده، جدول و سایر متعلقات مقالات دیگر بهره گیری شده باشد، امضاکنندگان متعهد می شوند مجوزهای لازم را از صاحبان حق نشر و طبع ذی ربط اخذ نموده و تنها دارنده حق طبع و نشر این مقاله هستند.

ضمناً این مقاله تاکنون در هیچ همایش و نشریه ای به چاپ نرسیده و در حال حاضر تحت داوری کنفرانس یا نشریه دیگری نمی باشد. کلیه حقوق نشر و طبع این مقاله به دانشگاه زنجان واگذار می شود تا به صورت الکترونیک یا چاپ شده در کتابچه همایش چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران انتشار یابد.

| نام و نام خانوادگی نویسندگان مقاله | کد ملی     | امضا | تاریخ      |
|------------------------------------|------------|------|------------|
| ۱ حمید توپچی نژاد                  | ۳۲۵۷۰۲۴۴۳۶ |      | ۱۴۰۳.۰۲.۰۲ |
| ۲ پرهام معمارزاده                  | ۲۵۱۱۲۷۱۳۷۰ |      | ۱۴۰۳.۰۲.۰۱ |
| ۳ امیرعباس کریمی                   | ۳۲۵۶۳۶۳۶۲۸ |      | ۱۴۰۳.۰۲.۰۱ |
| ۴                                  |            |      |            |

## شبیه سازی بالشتک های الاستومری پل دارای لایه های تسلیح مش و یا ورق فولادی به روش اجزاء محدود

امیرعباس کریمی<sup>۱</sup>، حمید توپچی نژاد<sup>۲</sup>، پرهام معمارزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، کد پستی ۶۷۱۴۹-۶۷۳۴۶ (نویسنده رابط)

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

[h.toopchinezhad@razi.ac.ir](mailto:h.toopchinezhad@razi.ac.ir)

### خلاصه

بالشتک های الاستومری معمولی توسط ورقهای تسلیح فولادی و اغلب با شرایط مرزی گیردار استفاده می شوند. اخیراً نوع جدیدی از بالشتک های الاستومری با انعطاف پذیری جانبی و راندمان جداسازی لرزه ای بیشتر ابداع شده است که در آنها بجای ورق از مش فولادی مقاومت بالا استفاده می شود. همچنین، بالشتک های مذکور با شرایط مرزی جزیی متصل بکار می روند، یعنی فقط یک ناحیه محدود در قسمت مرکزی سطوح تماس بالشتک به سطوح تکیه گاهی بالا و پایین متصل می شود. با توجه به این شرایط مرزی خاص و انعطاف پذیری خمشی لایه های تسلیح مش، بالشتک تحت بارهای برشی تغییر شکل جانبی شبه غلطان را تجربه می کند. هدف مقاله حاضر مدل سازی اجزاء محدود بالشتک های الاستومری پل دارای لایه های تسلیح مش فولادی و یا ورق فولادی و مقایسه کردن نتایج مدل آباکوس با نتایج آزمایشگاهی (بارگذاری دینامیکی رفت و برگشتی تحت بار قائم ثابت) است. نتایج آزمایش کشش تک محوره ماده الاستومر در محاسبه مدل هایپر الاستیک آن مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مقاله مبین آن است که سختی افقی موثر بالشتک هارا در کرنش های برشی کمتر از ۲۰٪ می توان با خطای کمتر از ۲۰٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی، توسط تحلیل های اجزاء محدود انجام شده در مقاله حاضر بدست آورد.

**کلمات کلیدی:** بالشتک الاستومری پل، جداگر الاستومری مسلح به مش فولادی، جداسازی لرزه ای، کاربرد جزیی متصل، تحلیل اجزاء محدود

### ۱. مقدمه

بالشتک های الاستومری متعارف توسط صفحات فولادی داخلی تسلیح می شوند. هدف از تسلیح داخلی محصور کردن جانبی لایه های الاستومر و تامین سختی قائم مناسب در جداگر است. در بالشتک های الاستومری لرزه ای شرایط تکیه گاهی جداگر بصورت گیردار بوده و تحت اثر نیروهای برشی لنگر داخلی قابل توجهی بر جداگر وارد می شود. لنگر داخلی مذکور منجر به بروز تنش های کششی عمود بر مرز بین لایه های تسلیح و الاستومر می گردد. با توجه به آنکه کشش عمود بر مرز لایه ها مود بارگذاری مطلوبی نیست، در سالهای گذشته مطالعات زیادی بر روی نوع جدید بالشتک های الاستومری که به لایه های تسلیح داخلی با انعطاف پذیری خمشی مسلح شده و با شرایط مرزی اتکایی (غیر متصل<sup>۱</sup>) و یا جزیی متصل<sup>۲</sup> بکار رفته اند، انجام شده است [۷-۱]. بالشتک های جدید با هدف کاهش تقاضای کشش عمود بر لایه های تسلیح و نیز افزایش انعطاف پذیری جانبی بالشتک ابداع شده اند. در این بالشتک ها لایه های تسلیح داخلی از نوع الیاف پلیمری همانند کربن و یا شیشه [۸-۱۴] و یا مش فولادی با مقاومت بالا [۱، ۱۵-۱۷] استفاده شده است. هدف مقاله حاضر شبیه سازی رفتار نیرو-جابجایی بالشتک های الاستومری مسلح به صفحات فولادی و یا مش فولادی با استفاده از مدل اجزاء محدود و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی است. مدل اجزاء محدود ابزار مناسبی در طرح اولیه بالشتک هایی است که با همان مشخصات مصالح بکار رفته در مدل اجزاء محدود ساخته شده و تحت شرایط بارگذاری متفاوت قرار می گیرند. بالشتک های مورد مطالعه و نحوه مدل سازی آنها در بخش های بعدی مقاله ارائه شده اند.

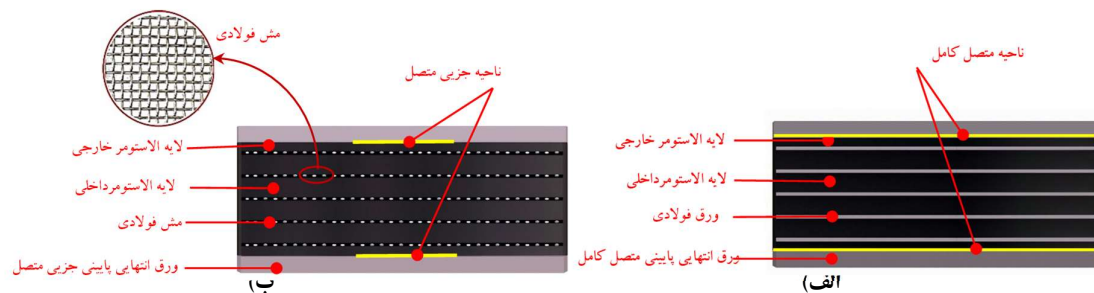
<sup>1</sup> Unbonded

<sup>2</sup> Partially bonded

## ۲. بالشتک های مورد مطالعه

در این مقاله رفتار دو نوع بالشتک بررسی و با هم مقایسه شده است. نمونه اول، بالشتک الاستومری تسلیح شده با ورق فولادی (PR) و نمونه دوم، بالشتک الاستومری تسلیح شده با مش فولادی (MR) است. نتایج آزمایشات بارگذاری رفت و برگشتی تحت بار قائم ثابت بر روی بالشتک های مذکور در مرجع [۱] ارائه شده است. نمونه های آزمایشگاهی PR<sub>1</sub> و MR<sub>1</sub> در مرجع مذکور در این مقاله مدل سازی شده اند. شکل ۱. مقطع عرضی بالشتک های PR و MR را نشان می دهد. خواص مواد الاستومری و ویژگی های هندسی دو نوع بالشتک یکسان است، تنها تفاوت دو نمونه در نوع تسلیح آنهاست، بطوری که در بالشتک های PR و MR نوع تسلیح به ترتیب ورق فولادی و مش فولادی مقاومت بالا است. هر دو نمونه مستطیلی شکل و دارای ابعاد ۶۰\*۲۳۰ میلی متر و ارتفاع کل بالشتک ۳۲.۶ میلی متر و ضخامت لایه های داخلی الاستومر ۳.۷ میلی متر و ضخامت لایه های الاستومر خارجی بالایی و پایینی بالشتک هر کدام ۱.۹ میلی متر و تعداد لایه های الاستومر داخلی ۴ و ضخامت کل لایه های الاستومر ۱۸.۶ میلی متر و ضخامت ورق های تسلیح فولادی ۰.۸ میلی متر و تعداد لایه های تسلیح بالشتک ها ۵ و ضخامت ورق های بالایی و پایینی بالشتک ۵ میلی متر و استحکام تسلیم تمامی ورق های فولادی ۲۴۰ مگا پاسکال است.

مش فولادی بالشتک MR بصورت یک شبکه مفتول با بافت مربعی است. در این شبکه، هر مفتول تار به طور متناوب از روی و زیر هر مفتول بود عبور می کند و بالعکس. قطر مفتول تار و پود ۰.۸ میلی متر و دهانه های چشمه مربعی مش ۲ میلی متر است. استحکام تسلیم و نهایی مفتول فولادی مقاومت بالا به ترتیب ۱۴۴۰ و ۱۸۴۶ مگا پاسکال است.



شکل ۱ - مقطع عرضی بالشتک های مورد مطالعه (الف) بالشتک PR و (ب) بالشتک MR

## ۳. مدل سازی اجزاء محدود

### ۳.۱.۳. مدل الاستومر

الاستومر یا لاستیک در زمره مواد هایپر الاستیک طبقه بندی می شوند. الاستومرها هنگام بارگذاری تغییر شکل های الاستیک بزرگ و کرنش های بالای ۱۰۰٪ را تجربه می کنند و بدون تغییر شکل پلاستیک دچار گسیختگی می شوند. این مواد به عنوان مواد هایپر الاستیک دسته بندی می شوند. پاسخ تنش-کرنش مواد هایپر الاستیک غیر خطی است. بیشتر مواد هایپر الاستیک مانند الاستومر و تقریباً یا به طور کامل تراکم ناپذیر هستند، اما مجموعه های دیگری از مواد هایپر الاستیک مانند اسفنج ها و فوم ها تراکم پذیر هستند.

امروزه مدل های رفتاری مواد هایپر الاستیک در نرم افزارهای اجزاء محدود توسعه یافته است. انتخاب مدل رفتاری دقیق که بتواند رفتار الاستومرها را در کرنش های مختلف به خوبی محاسبه کند چالشی در مدل سازی اجزاء محدود این مواد محسوب می شود. تخمین رفتار هایپر الاستیک مواد الاستومری نیازمند آزمایش های گران قیمت و زمان بر است و پارامترهای انواع مدل رفتاری هایپر الاستیک با برازش این مدل ها به نمودار تنش-کرنش آزمایشگاهی به دست می آید.

در مدل های هایپر الاستیک یک فرض مهم این است که ماده رفتار همسانگرد از خود نشان می دهد. بنابراین، می توان از نامتغیرهای کرنش برای فرمول بندی پتانسیل انرژی کرنشی<sup>۱</sup> استفاده کرد [۱۸]. رفتار مواد هایپر الاستیک را می توان بر حسب پتانسیل انرژی کرنشی بیان کرد که انرژی ذخیره شده در ماده را

<sup>1</sup> Strain energy potential

در واحد حجم شکل اولیه به عنوان تابعی از کرنش در یک زمان معین در ماده اندازه گیری می کند. برای محاسبه ثابت های مواد از پتانسیل انرژی کرنشی نیاز به داده های تجربی است. برای بدست آوردن همبستگی خوب با داده های تجربی باید سه حالت تغییر شکل کشش، فشار و برش را در نظر گرفت. برای مصالحی مانند فلزات که از قانون هوک پیروی می کنند می توان رفتار جانبی مواد را با استفاده از داده های آزمایش کشش به تنهایی، بصورت دقیق پیش بینی کرد. پاسخ های برشی و فشاری فلزات را می توان از داده های آزمایش کشش آن ها محاسبه کرد، اما وقتی صحبت از مواد نرم مانند الاستومرها می شود، آن ها در هر سه حالت تغییر شکل، پاسخ غیرخطی دارند. بنابراین سختی در هر سه حالت متفاوت است و یک راه حل منحصر به فرد را نمی توان تنها با استفاده از داده های آزمایش کشش ارائه کرد. از این رو به داده های آزمایش کشش تک محوری، فشار و آزمایش برش ساده نیاز است تا رفتار انحرافی<sup>۱</sup> مواد هایپرالاستیک را بدست آورد. علاوه بر این، به داده های آزمایش حجمی برای تعیین مدول بالک ماده نیاز است، البته با فرض مواد تراکم ناپذیر می توان پاسخ حجمی را نادیده گرفت. در نرم افزار آباکوس مدل های مختلفی از مواد هایپرالاستیک برای شبیه سازی تقریبی الاستومرهای تراکم ناپذیر همسانگرد وجود دارد. این مدل ها شامل Marlow، Van der waals، Ogden، Arruda-Boyce، مرتبه یک تا شش، Polynomial مرتبه یک (Mooney-Rivlin) و مرتبه دو، Reduced polynomial مرتبه یک (Yeoh، Neo-Hookean) و مرتبه دو و مرتبه سه (Yeoh) و مرتبه چهار و پنج و شش هستند [۱۹]. مدل های Van der waals و Ogden در برازش نتایج تجربی، به خصوص در زمانیکه داده های آزمایش تجربی زیادی در دسترس باشند، به طور معقولی خوب عمل می کنند. معمولاً این دو مدل، حداقل به داده های آزمایش تک محوری<sup>۲</sup> و دو محوری هم جهت نیاز دارند. مدل های هایپرالاستیک مانند Yeoh، Van der waals، Arruda-Boyce، Reduced polynomial یا اغلب زمانی توصیه می شود که تعداد محدودی از داده های آزمایشی برای کالیبراسیون در دسترس باشد، در حالی که مدل هایپرالاستیک Marlow در صورتی توصیه می شود که تنها یک دسته از داده های آزمایشی به عنوان مثال، تک محوری، دو محوری هم جهت یا مسطح<sup>۴</sup> در دسترس باشد.

نرم افزار Abaqus/CAE با استفاده از نوع پتانسیل انرژی کرنشی انتخاب شده، امکان ارزیابی رفتار ماده هایپرالاستیک را با برازش خودکار منحنی فراهم می کند. علاوه بر این برای یک ماده می توان داده های آزمایشی اضافی را ارائه کرد. نرم افزار آباکوس، برای بدست آوردن پتانسیل انرژی کرنش بهینه داده های تجربی را ارزیابی می کند. در این تحقیق، از مدل Marlow برای تعریف رفتار هایپرالاستیک الاستومر استفاده شده است. بیان ریاضی مدل Marlow در معادله زیر آورده شده است:

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(J_{el}) \quad (1)$$

که در آن  $U$  چگالی انرژی کرنش (یا انرژی کرنش در واحد حجم مرجع)،  $U_{dev}$  بخش انحرافی  $U$ ،  $U_{vol}$  بخش حجمی  $U$  و  $\bar{I}_1$  اولین نامتغیر کرنش انحرافی است.  $\bar{I}_1$  را می توان بر حسب نسبت های کشش سه محور اصلی بیان کرد.

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} * \lambda_i \quad (3)$$

که  $\bar{\lambda}_i$  کشش های انحرافی<sup>۵</sup>،  $J$  نسبت حجم کل،  $J_{el}$  نسبت حجم کشسان و  $\lambda_i$  نشان دهنده کشش های اصلی است. در روش Marlow با وارد کردن دو دسته از اطلاعات، به راحتی می توان پتانسیل انرژی کرنشی را محاسبه کرد. اولین اطلاعات اصلی با ارائه داده های آزمایش تک محوری، دو محوری هم جهت یا مسطح به دست می آید. دومین اطلاعات ضروری مربوط به قسمت حجمی ماده است که با ارائه داده های آزمایش حجمی، نسبت پواسون یا مشخص کردن کرنش های جانبی همراه با داده های آزمایش تک محوری، دو محوری هم جهت یا مسطح تعریف می شود. مدل Marlow بر خلاف سایر مدل ها پتانسیل انرژی کرنش ارزیابی شده را از مجموعه داده های تجربی، بطور مستقیم مشخص می کند. بنابراین مدل هایپرالاستیک Marlow، ثابت ماده ندارد.

<sup>1</sup> Deviatoric behavior

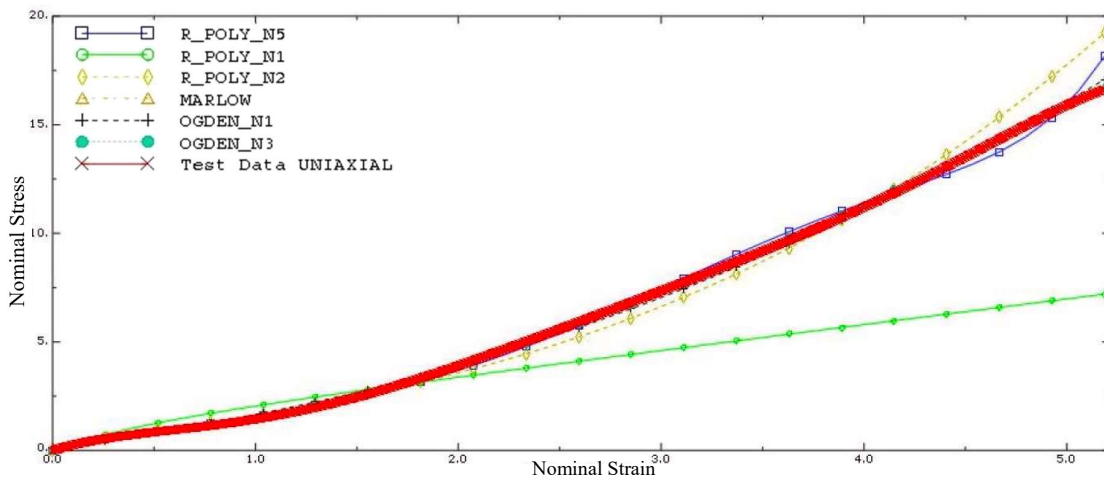
<sup>2</sup> Uniaxial test data

<sup>3</sup> Equibiaxial test data

<sup>4</sup> Planar

<sup>5</sup> Deviatoric stretches

Abaqus/Standard برای شرایطی که رفتار حجمی تعریف نشده باشد، مواد را کاملاً تراکم ناپذیر در نظر می‌گیرد. اگر داده‌های تنش- کرنش الاستومر حاوی ناهمواری‌های غیرمنطقی باشند، قبل از تعریف فرم Marlow، اکیداً توصیه می‌شود که داده‌های آزمایش صاف شوند [۲۰]. در این بخش از مقاله نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف الاستومر ارائه می‌شود. ابتدا داده‌های آزمایش تک محوری کششی الاستومر به نرم افزار آباکوس داده شد و تنظیمات لازم انجام شد. سپس تمامی مدل‌های رفتاری مواد هایپر الاستیک موجود در کتابخانه آباکوس برای ارزیابی انتخاب شدند. در مرحله بعد براساس داده‌های تحلیلی نرم افزار، مدل‌های هایپر الاستیک ناپایدار شناسایی و حذف شدند، این مدل‌ها شامل Mooney-Rivlin، Polynomial مرتبه دو، Ogden مرتبه دو و چهار و پنج و شش، Reduced polynomial مرتبه سه (Yeoh) و مرتبه چهار و شش و Van der waals بودند. در مرحله آخر از بین مدل‌های باقیمانده، مدل‌هایی که بیشترین نزدیکی را با داده‌های آزمایش تک محوری داشتند، انتخاب شدند و تحلیل آباکوس با تک تک مدل‌های هایپر الاستیک مذکور انجام شد و نتایج تحلیل آباکوس برای خروجی نیرو- جابجایی جانبی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در نهایت با توجه به اینکه مدل هایپر الاستیک Marlow منطقی‌ترین پاسخ‌ها را به ما داد، برای تعریف رفتار الاستومر انتخاب شد. علاوه بر این همانطور که ذکر شد، برای زمان‌هایی که تنها یک دسته از داده‌های آزمایشی به عنوان مثال، تک محوری در دسترس هستند، مدل هایپر الاستیک Marlow انتخاب مناسبی است. در شکل ۲. نمودار تنش- کرنش مدل‌های هایپر الاستیک مختلف به همراه داده‌های آزمایش تک محوری در محیط نرم افزار آباکوس نشان داده شده است، نمودار مدل هایپر الاستیک Marlow بر داده‌های آزمایش تک محوری منطبق است.



شکل ۲- نمودار تنش- کرنش مدل‌های هایپر الاستیک مختلف به همراه داده‌های آزمایش تک محوری

### ۲.۳. مشخصات مکانیکی مش، صفحات فولادی و ماده الاستومر

در بالشتک PR ورق‌های فولادی دارای چگالی  $7.8E-6 \text{ kg/mm}^3$  و مدول یانگ  $200000 \text{ N/mm}^2$  و نسبت پواسن 0.3 و رفتار تنش- کرنش بصورت الاستوپلاستیک با تنش تسلیم 240MPa و کرنش پلاستیک نهایی واحد در نظر گرفته شده است. لایه‌های الاستومر دارای چگالی  $1.522E-9 \text{ kg/mm}^3$  و رفتار هایپر الاستیک Marlow تعریف شده براساس داده‌های آزمایش کشش تک محوره است. در بالشتک MR ورق‌های فولادی بالایی و پایینی ۵ میلی‌متری دارای چگالی  $7.8E-6 \text{ kg/mm}^3$  و مدول یانگ  $200000 \text{ N/mm}^2$  و نسبت پواسن 0.3 و رفتار تنش- کرنش بصورت الاستوپلاستیک با تنش تسلیم 240 MPa و کرنش پلاستیک نهایی واحد در نظر گرفته شده است. لایه‌های الاستومر دارای چگالی  $1.522E-9 \text{ kg/mm}^3$  و رفتار هایپر الاستیک Marlow تعریف شده براساس داده‌های آزمایش کشش تک محوره است. مش فولادی مقاومت بالا دارای چگالی  $7.8E-6 \text{ Kg/mm}^3$  و مدول یانگ  $200000 \text{ N/mm}^2$  و نسبت پواسن 0.3 و رفتار تنش- کرنش بصورت دوخطی با تنش تسلیم 1440 MPa و محدوده کرنش‌های پلاستیک بین صفر و یک است.

### ۳.۳. معرفی المان های اجزاء محدود

تحلیل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار Abaqus/CAE (2023) انجام شده است. رفتار ارتجاعی غیرخطی مواد الاستومری با استفاده از مدل هایپر الاستیک Marlow ارائه شده در نرم افزار شبیه سازی شده است. در بالشتک MR صفحات فولادی بالا و پایین با استفاده از کتابخانه المان استاندارد، و خانواده المان تنش سه بعدی، مکعبی خطی ۸ گرهی، با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و کنترل ساعت شنی<sup>۱</sup> با نام C3D8R مدل شدند. لایه های الاستومری با استفاده از کتابخانه المان استاندارد، و خانواده المان تنش سه بعدی، مکعبی خطی ۸ گرهی، با فرمول بندی هیبریدی و فشار ثابت با نام C3D8H مدل شدند. لایه های تسلیح مش فولادی مقاومت بالا با استفاده از کتابخانه المان استاندارد، و خانواده المان تیر، خطی دو گرهی با نام B31 مدل شدند.

در بالشتک PR صفحات فولادی بالا و پایین و همچنین لایه های تسلیح ورق فولادی با استفاده از کتابخانه المان استاندارد، و خانواده المان تنش سه بعدی، مکعبی خطی ۸ گرهی، با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و کنترل ساعت شنی با نام C3D8R مدل شدند. لایه های الاستومری با استفاده از کتابخانه المان استاندارد، و خانواده المان تنش سه بعدی، مکعبی خطی ۸ گرهی، با فرمول بندی هیبریدی و فشار ثابت با نام C3D8H مدل شدند.

### ۴.۳. شرایط تکیه گاهی و قیدها

تمام درجات آزادی تکیه گاه پایینی و درجه آزادی دورانی تکیه گاه فوقانی مقید شده است. از آنجایی که هر دو بار قائم و جانبی به تکیه گاه بالایی اعمال می شود، حرکت در هر دو جهت قائم و افقی (در امتداد عرض بالشتک) برای تکیه گاه بالایی آزاد است. در بالا و پایین بالشتک ها، تکیه گاه های صلب تعریف شده است. در سطح تماس تکیه گاه های صلب بالایی و پایینی با بالشتک از نوع قید مهار سطح به سطح<sup>۲</sup> استفاده شده است. در محل تماس لایه های الاستومر خارجی بالایی و پایینی بالشتک با ورق های بالایی و پایینی بالشتک هم از نوع قید مهار سطح به سطح استفاده شده است. نکته قابل توجه اینست که در بالشتک PR کل سطح تماس مهار شده است ولی در بالشتک MR یک چهارم عرض ورق های بالایی و پایینی یعنی به اندازه ۱۵ میلی متر در سطح تماس مهار شده است، این مقدار تماس بیانگر نوع اتصال جزئی متصل در بالشتک MR است. در بالشتک PR اتصال لایه های الاستومر با ورق های فولادی داخلی و ورق های بالایی و پایینی بالشتک همگی از نوع قید مهار سطح به سطح است ولی در بالشتک MR اتصال لایه های الاستومر داخلی و خارجی با مش های فولادی از نوع قید سه بعدی تیر مدفون شده در جسم جامد<sup>۳</sup> استفاده شده است، در این حالت قرار گیری مش های فولادی در داخل الاستومر ها شبیه قرار گیری میلگردها در داخل بتن است و نتایج بدست آمده به واقعیت نزدیکتر است.

### ۵.۳. تحلیل حساسیت مش

تحلیل حساسیت مش در آباکوس، با هدف تعیین اندازه بهینه المان و انتخاب بهترین اندازه برای المان ها انجام می شود. در این پژوهش تعیین اندازه های المان براساس ارتفاع بالشتک MR انجام شد بطوری که اندازه های المان ها طوری انتخاب شدند که مرز المان های الاستومر منطبق بر محل قرار گیری لایه میانی مش فولادی در وسط ارتفاع بالشتک باشد، تا بتوان خروجی های تنش را در یک مسیر و در یک ارتفاع یکسان در مدل های PR و MR مقایسه کرد و بدین صورت از خطای احتمالی جلوگیری کرد. با توجه به اینکه ارتفاع بالشتک MR بدون ورق های فولادی بالایی و پایینی ۵ میلی متری، برابر ۲۲.۶ میلی متر است، اندازه های المان ۱.۸۸۶، ۲.۲۶۳، ۲.۸۲۹، ۳.۷۷۱، ۵.۶۵۷ و ۷.۶۷۱ میلی متر بدست آمد و تحلیل بالشتک ها براساس این اندازه های المان انجام شد. در بالشتک PR تعداد کل المان ها به ازای اندازه های مختلف المان به ترتیب برابر ۱۰۶۰۲۸، ۶۳۵۱۴، ۳۹۹۲۷، ۲۰۲۰۰ و ۱۰۱۳۶ است. همچنین تعداد کل معادلات به ازای اندازه های مختلف المان به ترتیب برابر ۳۸۲۳۷۸، ۲۳۲۴۱۸، ۱۴۷۵۶۰، ۷۶۷۶۲ و ۳۹۲۱۸ است. در بالشتک MR تعداد کل المان ها به ازای اندازه های مختلف المان به ترتیب برابر ۱۱۸۰۰۶، ۷۷۰۹۰، ۵۰۵۲۲، ۳۲۱۱۸ و ۲۲۸۱۶ است. همچنین تعداد کل معادلات به ازای اندازه های مختلف المان به ترتیب برابر ۲۹۷۰۹۶، ۱۷۷۹۰۳، ۱۰۶۵۳۹، ۵۷۹۸۱ و ۳۶۹۰۷ است.

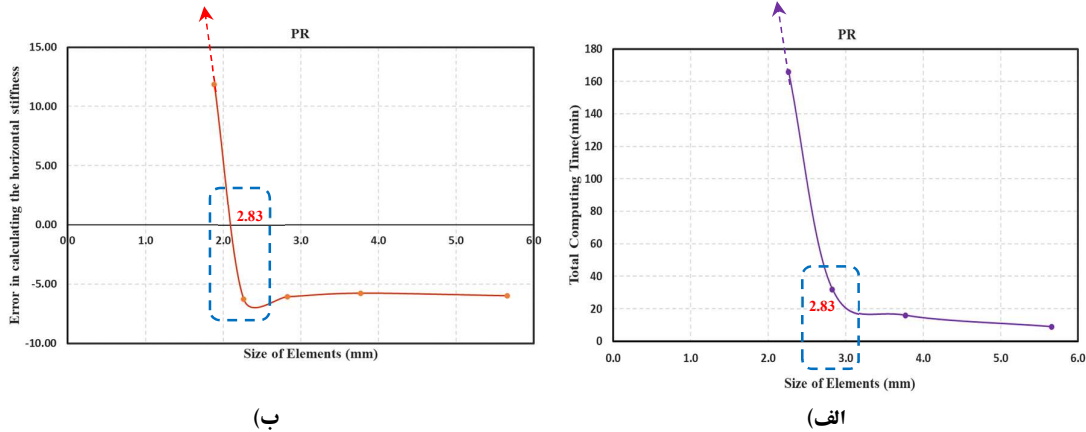
برای آنکه مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شود دقت خروجی های تحلیل اجزاء محدود با اندازه های مختلف المان، با نتایج آزمایشگاهی بالشتک ها مقایسه شده است. در این تحقیق تحلیل های مختلفی با اندازه های مختلف المان و با نرم افزار آباکوس انجام شده است. برای هر تحلیل، پارامتر

<sup>1</sup> Hourglass control

<sup>2</sup> Surface-to-surface tie constraint

<sup>3</sup> Beam-in-solid embedded region constraint

زمان تحلیل و پارامتر خطای مقادیر سختی افقی بدست آمده از نمودار نیرو- جابجایی آباکوس نسبت به نتایج آزمایشگاهی و در تغییر مکان جانبی معادل ۱۰۰٪ کرنش برشی، محاسبه شدند. پارامتر زمان تحلیل برای کنترل مدت زمان تحلیل و پارامتر خطای مذکور برای کنترل دقت تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نمودار (زمان تحلیل- اندازه المان) و نمودار (زمان تحلیل- خطای مقادیر سختی افقی آباکوس نسبت به نتایج آزمایشگاهی) ترسیم شدند. در شکل ۳ این نمودارها برای بالشتک PR نشان داده شده اند. فرآیند ذکر شده برای بالشتک MR نیز انجام شد و در نهایت اندازه بهینه المان ۲.۸۲۹ میلی متر انتخاب شد.



شکل ۳- نمودارهای تحلیل حساسیت مش (الف) نمودار زمان تحلیل- اندازه المان (ب) نمودار زمان تحلیل- خطای مقادیر سختی افقی

با توجه به اینکه محاسبات انجام شده برای تغییر مکان جانبی معادل ۱۰۰٪ کرنش برشی است، در جدول ۱. مقادیر سختی افقی موثر آباکوس و خطای مقادیر سختی افقی آباکوس نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای بالشتک PR برای سایر دامنه های تغییر مکان جانبی، نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است مقادیر خطا در اندازه المان انتخاب شده دارای وضعیت بهتری نسبت به مقادیر خطا در کوچکترین اندازه المان است.

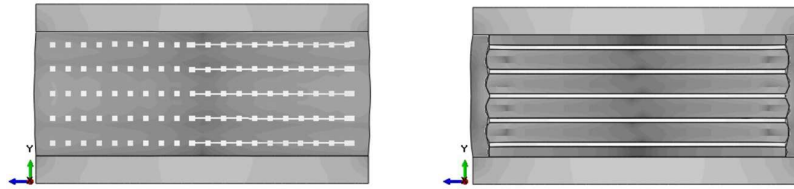
جدول ۱- مقادیر سختی افقی موثر آباکوس و خطای مقادیر سختی افقی برای دو اندازه المان مختلف برای بالشتک PR

| Shear strain (Displacement in mm) | Size of Elements: 1.886mm |       | Size of Elements: 2.829mm |        |
|-----------------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|--------|
|                                   | keff Abaqus (kN/mm)       | Error | keff Abaqus (kN/mm)       | Error  |
| 25% (4.4)                         | 0.560                     | -2.11 | 0.456                     | -20.27 |
| 50% (8.8)                         | 0.534                     | 10.11 | 0.445                     | -8.21  |
| 75% (13.2)                        | 0.526                     | 6.81  | 0.440                     | -10.48 |
| 100% (17.6)                       | 0.530                     | 11.86 | 0.445                     | -6.07  |
| 150% (26.4)                       | 0.578                     | 21.99 | 0.488                     | 2.85   |
| 200% (35.3)                       | 0.682                     | 45.70 | 0.574                     | 22.69  |

#### ۴. نتایج تحلیل اجزاء محدود

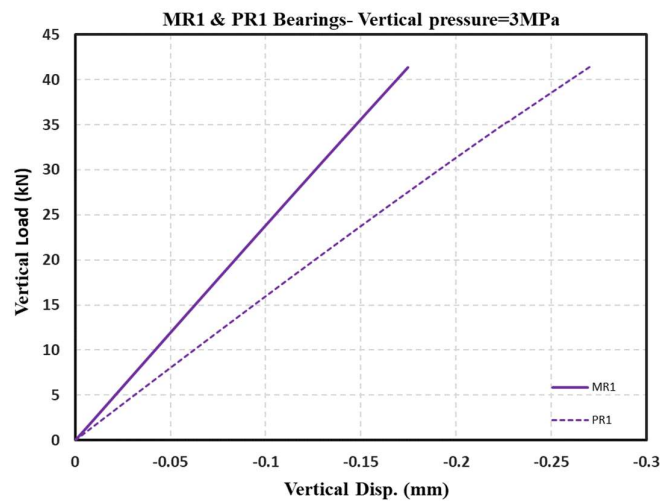
##### ۱.۴. سختی قائم بالشتک ها

در نرم افزار آباکوس مقدار فشار موثر قائم اعمال شده به بالشتک ها، ۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در شکل ۴. تصویر بالشتک های MR و PR در محیط آباکوس و در انتهای مرحله بارگذاری قائم نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میزان بیرون زدگی جانبی در بالشتک PR بیشتر از بالشتک MR است.



شکل ۴- بالشتک های MR (چپ) و PR (راست) تحت بار قائم ۳ مگا پاسکال

در شکل ۵، منحنی نیرو- تغییر مکان قائم بالشتک ها تحت بار قائم ۳ مگاپاسکال نشان داده شده است. مطابق شکل، سختی قائم بالشتک MR از بالشتک PR بیشتر است، مقدار سختی قائم بالشتک های MR و PR به ترتیب ۲۲۸.۳ و ۱۵۴.۶ کیلونیوتن بر میلی متر محاسبه می شود. دلایل فیزیکی افزایش سختی قائم بالشتک با مش فولادی نسبت به بالشتک مسلح شده با صفحات فولادی نیازمند مطالعات بیشتر و از جمله بررسی آزمایشگاهی سختی آن ها است.



شکل ۵- منحنی نیرو- تغییر مکان قائم بالشتک های MR و PR تحت بار قائم ۳ مگا پاسکال

#### ۲.۴. سختی افقی بالشتک ها

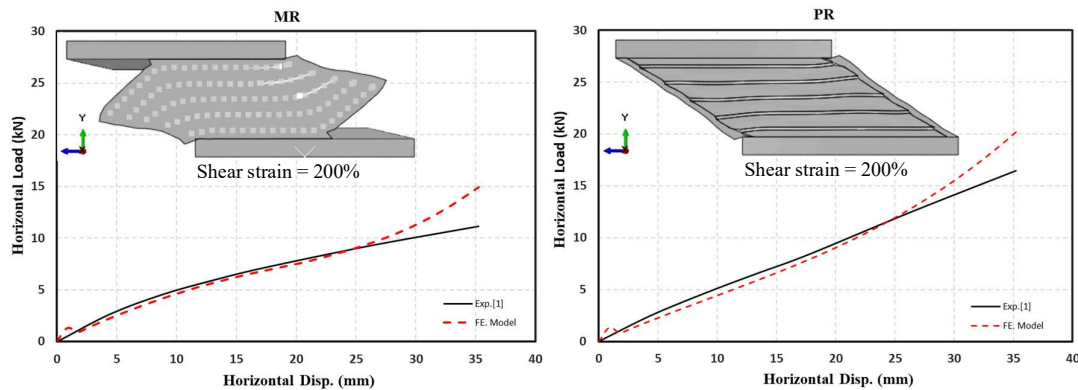
پس از اعمال بار قائم ۳ مگاپاسکال، نمونه ها تحت تغییر مکان جانبی تا ۲۰۰٪ کرنش برشی (معادل ۳۵.۳ میلی متر) قرار گرفتند. تحلیل اجزاء محدود نمونه ها با مدل هایپیرالاستیک Marlow برای ماده الاستومری بالشتک ها انجام شد. سپس نتایج آباکوس با نتایج آزمایشگاهی نمونه ها مقایسه شد و خطاهای موجود بین نتایج نیرو- جابجایی آباکوس و نتایج آزمایشگاهی استخراج شدند. در جدول ۲، مقدار این خطاها بیان شده است. با توجه به اینکه مدل هایپیرالاستیک الاستومر فقط براساس داده های آزمایش کشش تک محوره بدست آمده است و میدان تنش واقعی یک جداگر تفاوت قابل توجهی با شرایط تنش در آزمایش کشش تک محوری (که مبنای محاسبه مدل رفتار هایپیرالاستیک Marlow است) دارد بنابراین طبیعی است که نتایج نیرو- جابجایی آباکوس بصورت کامل با نتایج آزمایشگاهی منطبق نباشد، ولی با این وجود نتایج تحلیل آباکوس در این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار است، همچنین این مدل سازی برای طراحی های اولیه بالشتک ها می تواند مناسب باشد.

جدول ۲- خطا در محاسبه سختی افقی بالشتک ها در کرنش های برشی مختلف (مدل Marlow)

| Shear strain (Displacement in mm) | Error |       |
|-----------------------------------|-------|-------|
|                                   | PR    | MR    |
| 25% (4.4)                         | -20.3 | -16.0 |
| 50% (8.8)                         | -8.2  | -8.9  |
| 75% (13.2)                        | -10.5 | -4.6  |
| 100% (17.6)                       | -6.1  | -4.3  |
| 150% (26.4)                       | 2.8   | 2.9   |
| 200% (35.3)                       | 22.7  | 34.1  |



در شکل ۶. نمودار نیرو- جابجایی افقی بالشتک ها با نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است. حداقل و حداکثر مقدار خطا بین نتایج نیرو- جابجایی افقی آباکوس و نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۲۸ درصد و ۳۴.۱ درصد است (به جدول ۲ رجوع شود). یک علت برای زیاد شدن مقدار خطا در کرنش های بزرگ، این می تواند باشد که در آزمایش دینامیکی رفت و برگشتی، بالشتک دچار خسارت موضعی شده و این آسیب دیدگی باعث نرم تر شدن رفتار جانبی (وکاهش سختی جانبی) بالشتک می شود، از طرفی در نرم افزار آباکوس این آسیب های داخلی مدل سازی نشده است بنابراین نرم افزار سختی بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد و خطای بیشتری را نمایش می دهد.



شکل ۶- منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی بالشتک های PR (راست) و MR (چپ)

در جدول ۳. سختی های موثر افقی بالشتک ها در دامنه های مختلف جابه جایی جانبی براساس نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل آباکوس نشان داده شده است. براساس داده های جدول مشخص است که در تغییر مکان های جانبی کوچک (تا کرنش برشی ۵۰٪) سختی های افقی بالشتک ها قابل مقایسه هستند و در تغییر مکان های جانبی بزرگتر، مقدار سختی افقی بالشتک MR از سختی افقی بالشتک PR کمتر است و با افزایش دامنه تغییر مکان های جانبی، نرخ کاهش سختی افقی بالشتک MR نسبت به بالشتک PR افزایش می یابد. دلایل اصلی این پدیده، سختی خمشی ناچیز مش فولادی و شرایط مرزی بالشتک MR در محل تکیه گاه های آن می باشد که در دامنه تغییر مکان های جانبی بالا منجر به ایجاد تغییر شکل جانبی شبه غلتان در جداگر می شود.

جدول ۳- سختی موثر افقی بالشتک ها در دامنه های مختلف جابجایی

| Shear strain (Displacement in mm) | $k_{eff}$ Exp. (kN/mm) |       | $k_{eff}$ Abaqus (kN/mm) |       |
|-----------------------------------|------------------------|-------|--------------------------|-------|
|                                   | PR                     | MR    | PR                       | MR    |
| 25% (4.4)                         | 0.572                  | 0.603 | 0.456                    | 0.506 |
| 50% (8.8)                         | 0.485                  | 0.518 | 0.445                    | 0.472 |
| 75% (13.2)                        | 0.492                  | 0.453 | 0.440                    | 0.432 |
| 100% (17.6)                       | 0.474                  | 0.410 | 0.445                    | 0.392 |
| 150% (26.4)                       | 0.474                  | 0.353 | 0.488                    | 0.363 |
| 200% (35.3)                       | 0.468                  | 0.316 | 0.574                    | 0.424 |

## ۵. نتیجه گیری

هدف اصلی مقاله حاضر کالیبراسیون مدل اجزا محدود جداگرهای دارای تسلیح داخلی فولادی از نوع ورق و یا مش فولادی بود. نتایج آزمایش کشش تک محوره ماده الاستومر در انتخاب مدل هایپر الاستیک آن مورد استفاده قرار گرفته اند. در ادامه، مدل اجزاء محدود بالشتک های مسلح به مش فولادی (MR) و بالشتک های مسلح به ورق فولادی (PR) در نرم افزار ABAQUS ساخته شدند. رفتار تنش-کرنش ماده الاستومری بالشتک ها توسط مدل هایپر الاستیک Marlow در نرم افزار شبیه سازی شد. هدف از کالیبراسیون مدل اجزا محدود کاهش خطای مدل در محاسبه سختی افقی موثر بالشتک در قیاس با نتایج بدست آمده از بارگذاری دینامیکی رفت و برگشتی بالشتک ها تحت اثر نیروی قائم ثابت در آزمایشگاه بود. نتایج این مقاله مبین آن است

که برای تغییر مکان های جانبی کمتر از ۲۰٪ کرنش برشی، سختی افقی موثر بالشتک ها را می توان با خطای کمتر از ۲۰٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی، توسط تحلیل های اجزاء محدود انجام شده در مقاله حاضر بدست آورد.

در تغییر مکان های جانبی کوچک (تاکرنش برشی ۵۰٪) سختی های افقی بالشتک ها قابل مقایسه هستند و در تغییر مکان های جانبی بزرگتر، مقدار سختی افقی بالشتک MR از سختی افقی بالشتک PR کمتر است و با افزایش دامنه تغییر مکان های جانبی، نرخ کاهش سختی افقی بالشتک MR نسبت به بالشتک PR افزایش می یابد. دلایل اصلی این پدیده، سختی خمشی ناچیز مش فولادی و شرایط مرزی جریبی متصل در بالشتک MR در محل تکیه گاه های آن می باشد که در دامنه تغییر مکان های جانبی بالا منجر به ایجاد تغییر شکل جانبی شبه غلتان در جداگر می شود.

با استفاده از مدل اجزاء محدود می توان وضعیت تنش های داخلی ایجاد شده در بالشتک ها تحت اثر بارهای قائم و نیروهای برشی را مطالعه نمود. همچنین، مدل اجزاء محدود در طرح اولیه بالشتک هایی که دارای خواص مصالح یکسان با بالشتک های مدل شده در این مقاله را داشته اما وضعیت بارگذاری متفاوتی داشته باشند دارای کاربرد خواهد بود. خروجی طرح اولیه بالشتک ها ساخت نمونه های پرتوتایپ آنها جهت انجام آزمایشات بارگذاری با پروتکل های استاندارد خواهد بود.

## ۶. قدردانی

نویسندگان از شرکت دانش بنیان لرزه بدل کار (bk.co.ir) برای ساخت بالشتک های الاستومری این مطالعه و ارائه امکانات آزمایش تشکر می کنند. همچنین، از آزمایشگاه تحقیقاتی سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، برای آزمایش های انجام شده بر روی بالشتک های مورد استفاده در این مطالعه، قدردانی می گردد.

## ۷. مراجع

1. Amir A. Karimi, Hamid Toopchi-Nezhad, Parham Memarzadeh (2024) The Performance of Novel Rectangular Partially Bonded Steel Mesh-Reinforced Elastomeric Bearings for Seismic Isolation of Bridges. *Journal of Bridge Engineering*
2. Losanno D, De Domenico D, Madera-Sierra IE (2022) Experimental testing of full-scale fiber reinforced elastomeric isolators (FREIs) in unbounded configuration. *Eng Struct* 260:114234. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114234>
3. Toopchi-nezhad H, Ghotb MR, Al-anany YM, Tait MJ (2019) Partially bonded fiber reinforced elastomeric bearings: Feasibility, effectiveness, aging effects, and low temperature response. 179:120–128. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.043>
4. Van Engelen NC, Osgooei PM, Tait MJ, Konstantinidis D (2015) Partially bonded fiber-reinforced elastomeric isolators (PB-FREIs). *Struct Control Health Monit* 22:417–432. <https://doi.org/10.1002/STC.1682>
5. Toopchi-Nezhad H, Drysdale RG, Tait MJ (2009) Parametric Study on the Response of Stable Unbonded-Fiber Reinforced Elastomeric Isolators (SU-FREIs). *J Compos Mater* 43:1569–1587. <https://doi.org/10.1177/0021998308106322>
6. Toopchi-Nezhad H, Tait MJ, Drysdale RG (2009) Simplified analysis of a low-rise building seismically isolated with stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36:1182–1194. <https://doi.org/10.1139/L09-056>
7. Saremi E, Toopchi-Nezhad H (2021) Finite element modeling of horizontal load-displacement hysteresis loops in unbonded elastomeric isolators. *Structures* 34:2987–2995. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.095>
8. Van Engelen NC (2019) Fiber-reinforced elastomeric isolators: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2019.03.035>
9. Karimzadeh Naghshineh A, Akyüz U, Caner A (2014) Comparison of fundamental properties of new types of fiber-mesh-reinforced seismic isolators with conventional isolators. *Earthq Eng Struct Dyn* 43:301–316. <https://doi.org/10.1002/eqe.2345>
10. Toopchi-Nezhad H, Tait MJ, Drysdale RG (2008) Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures* 15:876–900. <https://doi.org/10.1002/stc.225>



11. Sheikh H, Ruparathna R, Van Engelen NC (2022) Bi-directional loading of unbonded rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators. *Eng Struct* 251:113500. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113500>
12. Toopchi-Nezhad H, Tait MJ, Drysdale RG (2009) Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs (stable unbonded-fiber reinforced elastomeric isolators). *Earthq Eng Struct Dyn*. <https://doi.org/10.1002/eqe.923>
13. Fosoul SaberAS, Tait MJ (2022) Seismic Performance Assessment of An Existing Multi-span Bridge in Eastern Canada Retrofitted with Fiber Reinforced Elastomeric Isolator. *Canadian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0344>
14. Al-Anany YMYM, Tait MJMJ (2017) Experimental assessment of utilizing fiber reinforced elastomeric isolators as bearings for bridge applications. *Compos B Eng* 114:373–385. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.060>
15. Li H, Tian S, Dang X, et al (2016) Performance of steel mesh reinforced elastomeric isolation bearing: Experimental study. *Constr Build Mater* 121:60–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.143>
16. Li H, Xie Y, Gu Y, et al (2020) Shake table tests of highway bridges installed with unbonded steel mesh reinforced rubber bearings. *Eng Struct* 206:110124. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110124>
17. Li H, Alam MS (2024) Exploring key factors affecting the ultimate compression capacity of Unbonded Steel-mesh-reinforced Rubber Bearings. *Eng Struct* 306:117813. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117813>
18. Treloar LRG (2005) *The physics of rubber elasticity*. Clarendon Press
19. Michael Smith (2023) *Abaqus/ Standard Users Manual, Version 7.00*. In: Dassault Systemes. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
20. Pal S, Naskar K (2021) Machine learning model predict stress-strain plot for Marlow hyperelastic material design. *Mater Today Commun* 27:1102213. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102213>