

Influence of reinforcement flexural rigidity on the performance of unbonded elastomeric bearings

Mohammad Moien Akbari¹ , Hamid Toopchi-Nezhad^{2✉}

1. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.moein.akbari@gmail.com

2. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: h.toopchinezhad@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-10-03

Received in revised form

2025-11-21

Accepted

2025-12-12

Available online

2025-12-23

Keywords:

Seismic isolator,
Elastomeric bearing,
Fiber reinforcing layers,
Finite element analysis,
Unbonded application

ABSTRACT

This study aims to investigate the influence of internal reinforcement type—steel plates versus fiber layers—on the stress–strain demand and force–deformation response of elastomeric bearings under lateral and vertical loading. The novelty of the work lies in the comparative approach: both bearing types are designed with identical geometric dimensions and similar elastomeric material properties, allowing the reinforcement layer to be isolated as the sole varying parameter. The behavior of steel-reinforced elastomeric bearings (SREB) and fiber-reinforced elastomeric bearings (FREB) is examined using finite element analysis. For both bearing types, unbonded support conditions are considered. In this configuration, the bearings are placed between the superstructure and substructure without mechanical attachment, and shear forces are transferred to the supports through friction at the contact surfaces. The numerical models are used to assess the resulting stress distribution, strain demand, and global deformation response in both the vertical and lateral directions. The findings indicate that in unbonded applications, FREB bearings experience significantly lower internal stress demand compared with SREB bearings. This reduction is particularly pronounced for tensile stresses acting normal to the interface between the reinforcement layers and the elastomeric material. In addition, the effective lateral stiffness of FREB bearings is noticeably smaller than that of SREB bearings. The results demonstrate that the type of internal reinforcement has a substantial impact on the mechanical behavior of elastomeric bearings under combined vertical and lateral loading. Fiber reinforcement leads to a meaningful reduction in both internal tensile stresses and lateral stiffness in unbonded configurations. These outcomes highlight the potential advantages of fiber-reinforced bearings for applications where reduced stress demand and greater flexibility are desirable.

Cite this article: Akbari, Mohammad Moien., & Toopchi-Nezhad, Hamid. (2025). Influence of reinforcement flexural rigidity on the performance of unbonded elastomeric bearings. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2), 69-87.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11210.1019



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11210.1019

Publisher: Razi University

Introduction

The idea of isolating structures from ground motion during earthquakes has been explored for more than a century [1], yet the number of practical applications remains limited. High cost is one of the main barriers to its widespread use in ordinary buildings [2]. Steel-reinforced elastomeric bearings (SREB) have long been used as seismic isolators and bridge bearings, with the first simple application reported in a three-story school in France in 1978 [1]. Their behavior has been investigated through shake-table studies [3], blast-induced simulated earthquakes [4], and applications in highway bridges, railway bridges, and other structures [5]. Finite-element simulations of their force–displacement hysteresis behavior have also been reported [6]. Over the past two decades, fiber-reinforced elastomeric bearings (FREB) have been introduced as a new class of elastomeric isolators, followed by extensive experimental research. These studies include vertical stiffness tests [7,8], standard cyclic lateral tests under sinusoidal displacement [9], and shake-table experiments evaluating the dynamic behavior of isolated structures [10,11]. Numerical studies fall into two major groups: those focused on modeling lateral behavior based on cyclic tests [12,13], and finite-element modeling of rubber materials or complete bearings [14–18]. Prior work has reviewed hyperelastic constitutive models for elastomers [14], modeled unbonded FREI bearings under lateral loads of different orientations [15], simulated rocking modes of isolated frames using FE-modeled elastomeric bearings [16], and examined the interaction of bearing rotation and lateral displacement [17]. Internal stresses and force–displacement response of FREI bearings in bonded and unbonded conditions have also been analyzed [18]. After two decades of development, design principles for FREB bearings are now available [19,20], and finite-element modeling of hysteresis behavior has been documented [21,22]. Full-scale shake-table tests on a two-story reinforced-concrete frame isolated with unbonded FREB bearings have demonstrated their efficiency [23], and FREB bearings have even been used for seismic isolation of a power transformer in Iran [24].

This study investigates and compares the internal stress fields of unbonded SREB and FREB bearings using finite-element analysis. Internal stress demand strongly influences material selection, manufacturing tolerances, and overall cost. Although many studies have examined elastomeric bearings, no previous research has focused specifically on how the type of internal reinforcement affects stress distribution and force–deformation behavior in unbonded SREB and FREB bearings. The novelty of this work lies in addressing this gap through a direct finite-element comparison.

Method

In this study, two groups of unbonded elastomeric bearings—FREB and SREB—are examined. The bearings within each group are distinguished by their shape factor. A two-dimensional finite-element model is employed to evaluate their performance. This model is suitable for analyzing strip-type bearings and demonstrates good agreement with

experimental results even when simulating the behavior of square bearings [18]. The thickness of the fiber layer, t_f , is taken as 0.55 mm for all FREB bearings, while the thickness of the steel shims in all SREB bearings is $t_s = 3$ mm. The total thickness of the elastomer layers, t_r , is 100 mm for all bearings considered, and the bearing width is $2a = 400$ mm. The material properties used in the bearings (elastic moduli and Poisson's ratios), adopted in accordance with the assumptions in Reference [18]. The bulk modulus of the rubber is taken as $K_e = 1900$ MPa. All bearings are subjected to a vertical pressure of 3 MPa in the analyses. In the finite-element simulations, each bearing is loaded under a horizontal displacement equal to $1.5H$, where H is the total height of the corresponding bearing.

The bearings were modeled in MSC MARC, chosen for its ability to simulate rubber as a nearly incompressible material under large deformations with automatic mesh updates. Elastomer layers were represented by four-node plane-strain elements, and FREB fiber layers by 2D truss elements. The Neo-Hookean constitutive model, commonly used in prior studies, was adopted. For unbonded bearings, the "Touching" contact option allowed only shear stresses (via Coulomb friction) and compressive normal stresses to be transmitted.

Results

Under purely vertical loading, the internal normal stress values in SREB and FREB bearings are similar, and variations in the shape factor have no significant effect on the normal stress distribution. Under lateral displacement, tensile stresses appear at the ends of the bearings. FREB bearings exhibit negligible tensile stress, while SREB bearings reach up to 1.5 MPa. Increasing the shape factor raises both tensile and compressive stresses, especially in SREB bearings. In FREB bearings, the low bending stiffness of the fiber layers makes shear strains insensitive to the shape factor S_1 . In contrast, SREB bearings show significant sensitivity, with maximum shear strains increasing by about 27% as S_1 rises from 10 to 40, due to the bending stiffness of the steel reinforcement layers.

Conclusions

Considering the widespread use of SREB bearings in important structures and bridges, this study investigates a novel application of both SREB and FREB bearings under unbonded support conditions with a vertical pressure of 3 MPa, and compares their finite-element models. Overall, FREB bearings exhibit greater lateral flexibility (better performance efficiency) and lower internal stress demand compared to equivalent SREB bearings. In addition, they have reduced thickness and lower overall weight.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی اثر صلبیت خمشی لایه های تسلیح در عملکرد بالشتک های الاستومری اتکایی

محمد معین اکبری^۱، حمید توپچی نژاد^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.moein.akbari@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: h.toopchinezhad@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲ کلیدواژه ها: خرابی پیشرونده، روش مسیر بار جایگزین، تحلیل خطی، بتن مسلح، نسبت نیاز به ظرفیت	در این مطالعه رفتار بالشتک های الاستومری مسلح به صفحات فولادی (SREB^۱) و بالشتک های الاستومری مسلح به الیاف (FREB^۲) تحت اثر بارهای جانبی و قائم با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط تکیه گاهی هر دو نوع بالشتک به صورت اتکایی (غیرمتصل) در نظر گرفته شده است؛ به گونه ای که بالشتک بدون اتصال مکانیکی بین روسازه و زیرسازه قرار گرفته و انتقال نیروهای برشی از طریق اصطکاک در سطوح تماس به تکیه گاه ها انجام می شود. هدف این مطالعه، بررسی تأثیر نوع لایه های تسلیح داخلی (صفحات فولادی یا الیاف) بر وضعیت تقاضای تنش-کرنش و رفتار نیرو-تغییر شکل بالشتک در راستاهای جانبی و قائم است. نوآوری اصلی پژوهش در نوع مقایسه انجام شده بین بالشتک هاست. مبنای مشترک بالشتک ها، ابعاد هندسی یکسان و مشخصات مصالح مشابه لایه های الاستومری آنهاست که امکان بررسی نوع لایه تسلیح را به عنوان تنها پارامتر متغیر فراهم می سازد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که در کاربرد اتکایی، تقاضای تنش های داخلی - به ویژه تنش کششی عمود بر مرز بین لایه های تسلیح و الاستومری - و همچنین سختی جانبی مؤثر در بالشتک های FREB در مقایسه با بالشتک های SREB به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

استناد: اکبری، محمد معین؛ توپچی نژاد، حمید. (۱۴۰۴). بررسی اثر صلبیت خمشی لایه های تسلیح در عملکرد بالشتک های الاستومری اتکایی. مجله

مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۲)، ۶۹-۸۷. DOI: 10.22126/amcen.2025.11210.1019



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

^۱ Steel Reinforced Elastomeric Bearing

^۲ Fiber Reinforced Elastomeric Bearing

۱. مقدمه

ایده جداسازی سازه از حرکات زمین در حین وقوع زمین لرزه بیش از یک قرن است که مورد توجه قرار گرفته است [۱]. با این حال تعداد پروژه‌هایی که در آن‌ها از جداگرهای لرزه‌ای استفاده می‌شوند بسیار محدود می‌باشند. یکی از دلایل عدم استفاده گسترده از این فناوری هزینه‌های بالای آن است به طوریکه کاربرد آن را در ساختمان‌های معمولی غیر اقتصادی نموده است [۲]. از بالشتک‌های الاستومری مسلح به صفحات فولادی (SREB) به عنوان جداگر لرزه‌ای و یا بالشتک زیرسری پل استفاده بعمل می‌آید. اولین نمونه ساده از بالشتک لاستیکی مسلح به صفحات فولادی در سال ۱۹۷۸ در یک مدرسه سه طبقه در فرانسه اجرا گردید [۱]. مطالعات میز لرزه بر روی سازه جداسازی شده با این نوع بالشتک‌ها، به کمک شبیه‌ساز زلزله در آزمایشگاه دانشگاه برکلی^۳ کالیفرنیا توسط مرجع [۳] انجام شده است. عملکرد این سیستم همچنین با زلزله‌های شبیه‌سازی شده ناشی از انفجار نیز بررسی شده است [۴]. از جداگرهای الاستومری در جداسازی لرزه‌ای پل‌های ماشین رو، پل‌های راه آهن و سایر سازه‌ها استفاده به عمل آمده است [۵]. همچنین، شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند نیرو-تغییر مکان جانبی بالشتک‌های الاستومری مسلح به صفحات فولادی توسط روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته اند [۶].

در حدود دو دهه گذشته گونه جدیدی از بالشتک‌های الاستومری موسوم به بالشتک‌های الاستومری مسلح به الیاف (FREB) ابداع و مطالعات گسترده‌ای روی آن‌ها انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً جامعی بر روی بالشتک‌های الیافی صورت گرفته است. آزمایشات تعیین سختی قائم بالشتک تحت بارهای قائم [۷، ۸]، آزمایشات استاندارد رفت و برگشتی^۴ تحت جابه‌جایی‌های جانبی با تابع سینوسی [۹] و همچنین آزمایشات میز لرزه [۱۰، ۱۱] که در طی آن رفتار دینامیکی سازه لرزه جداسازی شده به هنگام زلزله شبیه سازی می‌گردد.

مطالعات عددی انجام شده بر روی بالشتک‌های الاستومری را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم بندی نمود. در گروه اول، هدف اصلی شبیه‌سازی عددی رفتار جانبی جداگرهای الیافی با اتکا به

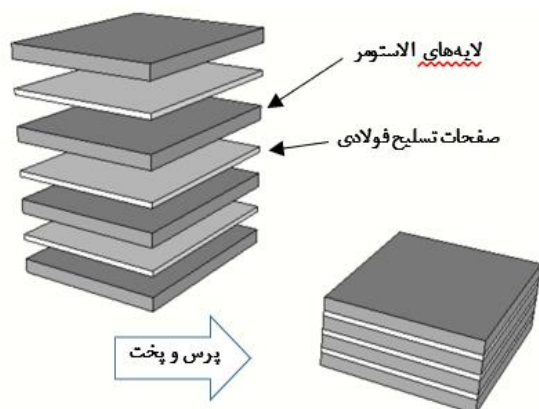
نتایج آزمایشات رفت و برگشتی انجام شده بر روی آن‌ها می‌باشد [۱۲، ۱۳] دسته دوم مطالعات عددی به تحلیل مدل اجزای محدود لاستیک و یا بالشتک مرتبط می‌گردد. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مراجع [۱۸-۱۴] اشاره نمود.

مدل‌های رفتاری هایپرالاستیک^۵ حاکم بر رفتار تنش - کرنش لاستیک، به عنوان یک ماده الاستومری دارای رفتار ارتجاعی غیر خطی و نحوه کاربرد آن‌ها در تحلیل‌های اجزای محدود توسط مرجع [۱۴] مرور شده‌اند. مرجع [۱۵] رفتار نیرو-جابجایی جانبی بالشتک‌های مکعبی اتکایی (غیر متصل) FREI تحت اثر بارهای جانبی یک طرفه دارای امتدادهای مختلف را با استفاده از یک مدل اجزای محدود سه بعدی مطالعه نموده است. رفتار لرزه‌ای قاب جداسازی شده با جداگرهای الاستومری پایه و شبیه‌سازی مودهای ارتعاشی گهواره‌ای سیستمی که در آن جداگرها به روش اجزای محدود مدل شده‌اند را میتوان در مرجع [۱۶] مطالعه نمود. تاثیر هم زمانی دوران تکیه گاه فوقانی بالشتک با جابجایی‌های جانبی وارده در رفتار نیرو-جابجایی بالشتک‌های الاستومری توسط مدل اجزای محدود ارائه شده در مرجع [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۸] رفتار نیرو-جابجایی و وضعیت تنش‌های داخلی را در بالشتک‌های FREI بکار رفته در دو کاربری مختلف (متصل و غیر متصل) را به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داده است.

با توسعه تحقیقات در دو دهه گذشته، امروزه مبانی و اصول طراحی بالشتک‌های FREB در دسترس است [۱۹، ۲۰]. مدل‌سازی اجزای محدود حلقه‌های هیستریزیس نیرو-تغییر مکان جانبی بالشتک‌ها گزارش شده است [۲۱، ۲۲]. آزمایشات میز لرزه در مقیاس واقعی بر روی قاب بتنی دوطبقه جداسازی شده توسط بالشتک‌های FREB اتکایی، کارایی بالشتک‌های مذکور در جداسازی لرزه‌ای را به اثبات رسانده است [۲۳]. همچنین، بالشتک‌های FREB اتکایی در جداسازی لرزه‌ای یک ترانسفورماتور قدرت در ایران بکار رفته‌اند [۲۴].

هدف اصلی در این مقاله بررسی و مقایسه میدان تنش در بالشتک‌های SREB و FREB می‌باشد. هر دو نوع بالشتک مورد مطالعه به صورت اتکایی (غیر متصل) بکار گرفته شده‌اند. به عبارتی

^۳ Berkeley^۴ cyclic tests^۵ hyperelastic



شکل ۱. تصویری شماتیک از اجزای بالشتک SREB

بالشتک‌های SREB به دو روش پخت سرد و گرم ساخته می‌شوند. در روش سرد، صفحات پخته شده لاستیک با چسب مخصوص به صفحات فولادی چسبانده شده و برای گیرش کامل چسب، مجموعه در دمای معمولی یا دمای بالا توسط تجهیزات گرمادهی مناسب نگهداری می‌شود. پس از گیرش کامل چسب در بین لایه‌های یک لایه‌ی لاستیک محافظ با چسب به دور جداساز چسبانده شده و دوباره فرآیند خشک کردن آن سپری می‌گردد. نقش لایه‌ی محافظ حفاظت از صفحات تسلیح فولادی در برابر نفوذ اکسیژن و یا سایر عوامل خارجی و ممانعت از خوردگی در فولاد است. در روش پخت گرم که متداول‌تر است، کامپوند خام لاستیک پس از ترکیب مواد مختلف در حالی که هنوز به حالت خمیری است به شکل صفحه‌ای درآمده و در بین صفحات فولادی قرار داده می‌شود. برای حفظ فاصله‌ی برابر بین صفحات فولادی از پرچ، گوه‌های فولادی یا پین‌های مخصوص بین صفحات مذکور استفاده می‌شود. در این روش صفحات فولادی از قبل سندبلاست و اسید شویی می‌گردند تا سطحشان کاملاً تمیز و آماده چسب زدن گردد. ضمناً، قبل از قرار گیری در قالب به ماده پیوند آغشته می‌گردند. در ادامه، تحت فشار و حرارت عملیات پخت لاستیک و پیوند آن با صفحات تسلیح فلزی تکمیل می‌گردد. برای جلوگیری از نفوذ عوامل مهاجم خارجی، یک پوشش لاستیکی دور بالشتک کشیده می‌شود [۲۵].

دیگر بالشتک‌ها بدون اتصال مکانیکی فقط مابین تکیه‌گاه‌های فوقانی و تحتانی بصورت اتکایی قرار گرفته‌اند. یکی از موارد تاثیرگذار بر هزینه تمام شده یک بالشتک، تقاضای تنش‌های داخلی ایجاد شده در آن در هنگام بهره‌برداری است. تقاضای تنش کمتر به معنای امکان استفاده از مواد نسبتاً ارزان‌تر در ساخت بالشتک و نیز افزایش رواداری‌ها در تولید آن می‌باشد که این موارد در کاهش قیمت تمام شده آن موثر خواهند بود. در مقاله حاضر ضمن معرفی بالشتک‌های مورد مطالعه، رفتار نیرو-جابجایی آن‌ها به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته و وضعیت تقاضای تنش داخلی در آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در حال حاضر، پژوهش منسجمی که صرفاً بر تأثیر نوع لایه تسلیح داخلی بر میدان تنش‌های داخلی و رفتار نیرو-تغییرشکل بالشتک‌های اتکایی از نوع SREB و FREB متمرکز باشد، در مطالعات پیشین گزارش نشده است. از این رو، نوآوری پژوهش حاضر را می‌توان در به کارگیری روش اجزای محدود به منظور انجام این مقایسه دانست.

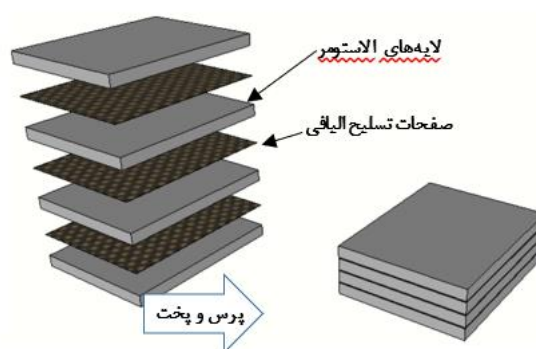
۲. معرفی ساختار بالشتک‌های الاستومری

۲-۱. بالشتک‌های الاستومری مسلح به صفحات فولادی

بالشتک‌های الاستومری مسلح به صفحات فولادی (SREB) از لایه‌های متناوب و به هم پیوسته الاستومر و صفحات فولادی ساخته می‌شوند (شکل ۱). صفحات تسلیح با محدود کردن کرنش جانبی لایه‌های الاستومر تحت اثر بارهای فشاری قائم، موجب کاهش تغییر شکل‌های قائم بالشتک شده و در نتیجه سختی لازم در جداگر را تامین می‌نمایند. اثر این صفحات بر سختی جانبی ناچیز بوده و مدول برشی الاستومر عمدتاً تعیین کننده سختی جانبی بالشتک‌ها می‌باشد. سختی قائم بالشتک‌های الاستومری معمولاً چند صد برابر بزرگتر از سختی جانبی آن‌هاست [۵]. بالشتک‌های SREB همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است از صفحات لاستیکی و فولادی که به طور متناوب بر روی یکدیگر قرار گرفته و تحت فشار و حرارت پخته شده و به شکل یکپارچه در می‌آیند تشکیل شده‌اند.

۲-۲. بالشتک های الاستومری مسلح به الیاف

بالشتک های الاستومری مسلح به الیاف (FREB) در حدود دو دهه اخیر ابداع و مورد توجه قرار گرفته اند [۵،۳]. در این بالشتک ها به جای صفحات فولاد از الیاف پلیمری (FRP) جهت مهار کرنش جانبی لایه های الاستومر و تامین سختی لازم در امتداد قائم استفاده می شود (شکل ۲). در پی این جایگزینی وزن بالشتک به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه هزینه های حمل و نقل و نصب آن کاهش می یابد.



شکل ۲. تصویری شماتیک از اجزای بالشتک FREB

بالشتک های FREB را می توان به دو روش متصل و اتکایی (غیر متصل) به کار برد [۱۸]. با نصب صفحات انتهایی فولادی به وجوه فوقانی و تحتانی بالشتک های FREB می توان آن ها را به روش متصل نیز استفاده کرد. اگرچه بالشتک های FREB متصل سبک تر از بالشتک های الاستومری متداول SREB هستند لیکن وجود صفحات انتهایی در آن ها به معنای تحمیل هزینه ساخت قالب به فرآیند تولید بالشتک می باشد. بالشتک های اتکایی آندسته از بالشتک ها می باشند که فاقد صفحات فولادی انتهایی در بالا و پایین هستند. حذف صفحات فولادی انتهایی موجب کاهش بیشتر وزن بالشتک شده و امکان تولید آن ها را از برش نوارهای طویل و یا صفحات بزرگ الاستومر مسلح به الیاف بدون نیاز به ساخت قالب میسر می کند. بالشتک های FREB را می توان در عمل بدون ایجاد هیچ گونه پیوستگی و یا اتصال مکانیکی مانند پیچ و مهره با سطوح تماس فوقانی و تحتانی استفاده کرد. در این شرایط نیروی برشی بوسیله اصطکاک موجود در سطح تماس بین بالشتک و تکیه گاه های آن رد و بدل می شود. به دلیل شرایط مرزی غیرمتصل و همچنین

سختی خمشی ناچیز لایه های تسلیح الیافی، در اثر نیروهای برشی وارده وجوه فوقانی و تحتانی بالشتک از سطوح تکیه گاه بطور موضعی بلند می شوند. چنین تغییر شکلی را به اصطلاح تغییر شکل شبه غلتان می نامند [۲۶]. چنانچه بالشتک از ابعاد هندسی مناسبی برخوردار باشد ظرفیت باربری جانبی خود را حفظ نموده و تغییر شکل شبه غلتان پایداری را تجربه خواهد نمود. در این شرایط با حذف نیروی جانبی، تغییر شکل جانبی برگشت پذیر بوده و بالشتک به موقعیت قبل از تغییر شکل خود باز می گردد. حداقل حد ایمن تغییر شکل شبه غلتان پایدار تا آنجاست که وجوه قائم اولیه بالشتک در تماس کامل با سطوح تکیه گاه های فوقانی و تحتانی آن قرار گیرند [۲۶].

۳-۲. رفتار بالشتک ها در برابر بارهای قائم و جانبی

هنگامی که یک بالشتک لاستیکی تحت فشار قائم قرار می گیرد ورقه های لاستیکی آن تمایل به انبساط جانبی به سمت بیرون پیدا می نمایند. اما ورقه های فولادی در بالشتک های SREB و یا لایه های تسلیح الیافی در بالشتک های FREB با ایجاد محصور شدگی (فشار جانبی) در لایه های لاستیک مانع انبساط جانبی آن ها می شوند. در این حالت تنش فشاری در بالشتک با توزیعی سهمی شکل دارای حداکثر مقدار خود در مرکز جداساز خواهد بود. به دلیل اثر محصور کنندگی ورقه های فولادی یا لایه های الیاف و ویژگی تراکم ناپذیری لاستیک (ضریب پواسون حدود 0/5) شرایط تنش فشاری سه محوری (فشار هیدرواستاتیکی) در لایه های لاستیکی بالشتک ایجاد می گردد. به این دلیل، وقتی بالشتک تحت فشار قرار می گیرد، درصد الاستیسیته ی ظاهری جداساز، از درصد الاستیسیته ی ظاهری خود لاستیک بسیار بیش تر خواهد بود [۱۸]. در زمان اعمال بار افقی به بالشتک، از آنجا که ورقه های فولادی و یا لایه های تسلیح الیافی تغییر شکل برشی ورقه های لاستیکی را محدود نمی کنند، تغییر شکل بالشتک عمدتاً تابع تغییر شکل برشی ورقه های لاستیک موجود در آن بوده و به همین دلیل بالشتک از سختی افقی نسبتاً کوچکی برخوردار می باشد. در تغییر شکل های جانبی بزرگ همچنان در مرکز جداساز شرایط تنش فشاری سه محوری ادامه می یابد. بنابراین، علاوه بر حفظ قابلیت باربری میزان کاهش ارتفاع جداساز هم کمتر می شود. از این رو می توان گفت بخش مرکزی بالشتک از نقطه نظر تحمل بار

همان لایه، در یک بالشتک نواری دارای عرض $2a$ که ضخامت هر یک از لایه‌های لاستیکی آن t_e می‌باشد ضریب شکل از رابطه $(S_1 = \frac{2a}{2t_e} = \frac{a}{t_e})$ محاسبه می‌گردد. ضریب شکل S_2 یکی دیگر از پارامترهای هندسی موثر بر عملکرد بالشتک‌ها می‌باشد. ضریب مذکور در مقاله حاضر بصورت نسبت بعد بالشتک در امتداد برش وارده به ضخامت کل لایه‌های لاستیکی آن (t_r) تعریف شده است. در یک بالشتک نواری که تحت نیروی برشی در امتداد عرض بالشتک قرار گرفته است ضریب شکل S_2 برابر است با $(S_2 = \frac{2a}{t_r})$. ضریب شکل S_2 در کلیه بالشتک‌های در نظر گرفته شده است در این تحقیق برابر عدد ۴ می‌باشد.

لازم به ذکر است ضخامت لایه الیاف، t_f ، در کلیه بالشتک‌های الیافی 0.55 mm و ضخامت صفحات فولادی در تمامی بالشتک‌های SREB برابر $t_s = 3$ mm در نظر گرفته شده است. ضمناً ضخامت کل لایه‌های الاستومر، t_r ، در تمامی بالشتک‌های مورد مطالعه 100 mm بوده و عرض بالشتک‌ها $2a = 400$ mm می‌باشد. مشخصات مصالح بکار رفته در بالشتک‌ها (مدول‌های الاستیک و ضرایب پواسن) طبق فرضیات بکار رفته در مرجع [۱۸] در جدول ۲ ارائه شده است. مدول بالک ماده لاستیک $K_e = 1900$ MPa در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است همه بالشتک‌ها در تحلیل‌های انجام شده تحت بار قائم 3 MPa قرار گرفته‌اند. در تحلیل اجزای محدود هر یک از بالشتک‌ها تحت جابه‌جایی افقی به اندازه H 1.5 قرار گرفته‌اند که H ارتفاع کل بالشتک موردنظر است.

جدول ۱. مشخصات هندسی بالشتک‌های مورد مطالعه

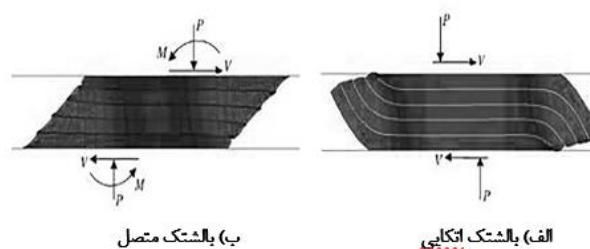
ضریب شکل S_1	40	30	20	10
تعداد لایه های لاستیک N_e	20	15	10	5
تعداد لایه های تسلیح N_r	19	14	9	4
ضخامت هر لایه الاستومر t_e (mm)	5	6.67	10	20

جدول ۲. مشخصات مصالح بالشتک‌ها [۱۷]

الیاف	ورق فولادی	لاستیک
$E_f = 131.5$ GPa	$E_s = 200$ GPa	$E_e = 1.2$ MPa
$\nu_f = 0.2$	$\nu_s = 0.3$	$G_e = 0.4$ MPa

بالشتک‌های مورد بررسی به کمک نرم‌افزار المان محدود MSC MARC [۲۷] مدل‌سازی شده‌اند. علت استفاده از این نرم

دارای اهمیت ویژه‌ای بوده و این ناحیه را ستون موثر می‌نامند. شرایط تعادل و مکانیزم انتقال تنش در بالشتک‌های اتکایی متفاوت از بالشتک‌های متصل می‌باشد. در یک بالشتک اتکایی با افزایش تغییر مکان جانبی نقطه اثر برآیند تنش‌های فشاری در سطوح تماس بالشتک بگونه‌ای جابه‌جا می‌شود که کوپل ناشی از آن با لنگر واژگونی ناشی از نیروهای برشی وارده بر سطوح فوقانی و تحتانی بالشتک متعادل گردد (شکل ۳ الف). در بالشتک‌های متصل بدلیل ثابت باقی ماندن سطح تماس بالشتک با تکیه‌گاه، نقطه اثر بار فشاری قائم ثابت باقی می‌ماند و با افزایش جابه‌جایی جانبی کوپل ناشی از نیروهای فشاری قائم همراه با لنگر ناشی از نیروهای برشی به عنوان لنگرهای واژگونی عمل کرده که باید با لنگر متمرکز ایجاد شده در تکیه گاه‌های بالشتک متعادل شوند (شکل ۳ ب) [۲۶].



شکل ۳. تغییر شکل بالشتک‌های الاستومری اتکایی (غیر متصل) و بالشتک الاستومری متصل

۳. روش تحقیق

در این مطالعه دو گروه بالشتک الاستومری FREB و SREB اتکایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بالشتک‌های هر گروه بر اساس ضریب شکل از یکدیگر متمایز می‌شوند. برای بررسی عملکرد بالشتک‌ها از مدل اجزای محدود دو بعدی استفاده شده است. مدل مذکور مناسب تحلیل بالشتک‌های نواری بوده و حتی در شبیه سازی رفتار بالشتک‌های مربعی نیز تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۸].

۳-۱. بالشتک‌های مورد مطالعه و مدل‌سازی اجزای محدود آن‌ها

در جدول ۱ خلاصه مشخصات هندسی بالشتک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. ضریب شکل S_1 طبق تعریف برابر است با نسبت مساحت هریک از لایه‌های لاستیک در پلان به مساحت جانبی

در معادله فوق C_{10} ضریب ثابتی است که مقدار آن برابر با نصف مدول برشی اسمی لاستیک در نظر گرفته می شود. پارامتر D_1 مبین قابلیت تراکم پذیری ماده بوده و از آزمایش فشار خالص حجمی لاستیک بدست می آید. در مدل نئوهوکین D_1 از رابطه $\frac{2}{K_e}$ محاسبه می شود، که K_e مدول حجمی (مدول بالک) لاستیک می باشد که با توجه به رفتار نسبتاً تراکم ناپذیر لاستیک معمولاً در حد 1900 MPa در نظر گرفته می شود [۱۸]. در معادله (۲) پارامتر J_{e1} نشانگر کرنش های ارتجاعی حجمی ماده بوده و I_1 نامتغیر اول کرنش های انحرافی است که از رابطه (۳) بر حسب تغییر شکل های کششی اصلی $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ ناشی از کرنش های اسمی ε_i بدست می آید [۱۴].

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (۳)$$

برای لاستیک به دلیل خاصیت تقریباً تراکم ناپذیر ضریب پواسون در حدود ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در مدل سازی لایه های الیاف و صفحات فولادی نوع ماده ایزوتروپ با رفتار ارتجاعی خطی در نظر گرفته شده است. بنابراین، مشخصات ماده تنها با تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن تعریف می شود. در تعریف شرایط مرزی بالشتک ها تمام درجات آزادی تکیه گاه تحتانی بسته شده است. در تکیه گاه فوقانی فقط درجات آزادی دورانی بسته می باشد و تکیه گاه مذکور می تواند تحت بار و جابه جایی اعمالی در دو امتداد افقی و قائم جابه جا شود.

به دلیل شرایط تکیه گاهی غیر متصل (اتکایی) بالشتک ها در تعریف نوع تماس در نظر گرفته شده بین لایه های لاستیک و تکیه گاه های فوقانی و تحتانی گزینه Touching موجود در برنامه انتخاب شده است. با فعال نمودن گزینه مذکور در سطوح تماس مورد نظر، تنها دو دسته تنش قابلیت انتقال را خواهند داشت. تنش های مذکور عبارتند از الف- تنش های برشی (که بدلیل تعریف مدول اصطکاک کولمب با ضریب اصطکاک واحد در سطوح تماس بین دو جسم منتقل می گردند)، و ب- تنش های نرمال فشاری که هنگامیکه دو جسم به یکدیگر فشرده میشوند مقدار داشته و زمانیکه دو جسم در آستانه جدا شدن از یکدیگر قرار می گیرند، مقادیر تنش های نرمال مذکور به صفر می گرایند. بالشتک های الیافی مورد نظر ابتدا تحت اثر بار قائم فزاینده ای که

افزار قابلیت مناسب آن در مدل سازی رفتار پیچیده لاستیک به عنوان یک ماده نسبتاً غیرقابل تراکم در تغییر شکل های بزرگ با قابلیت به هنگام سازی خودکار هندسه مش اجزای محدود توسط نرم افزار می باشد. در مدل اجزای محدود لایه های لاستیک توسط المان Solid چهار وجهی کرنش مسطح مدل شده اند. در بالشتک های FREB لایه های الیاف به کمک المان های خرپایی دو بعدی مدل شده اند.

رفتار ارتجاعی غیرخطی ماده الاستومری (لاستیک) بالشتک را میتوان توسط مدل هایپرالاستیک که بر مبنای توابع انرژی کرنشی ماده تعریف می شوند بیان نمود. در یک مدل هایپرالاستیک رابطه بین تنش و تابع انرژی کرنشی بصورت زیر بیان می شود [۱۴].

$$T = \frac{\partial U}{\partial E}, T_{ij} = \frac{\partial U}{\partial e_{ij}} \quad (۱)$$

در رابطه فوق T تانسور دوم تنش پیولا-کرشهف^۶ بوده و E تانسور کرنش گرین-لاگرانژ^۷ می باشد. توابع انرژی متعددی با توجه به رفتار لاستیک مورد نظر ابداع شده اند که جزئیات متداول ترین آن ها را می توان در مرجع [۱۴] مطالعه نمود. در مقاله حاضر از مدل نئوهوکین^۸ که یکی از ساده ترین مدل های موجود بوده و توسط محققین متعددی (به عنوان مثال مراجع ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۲۵) در تحلیل اجزای محدود بالشتک های الاستومری بکار رفته است استفاده بعمل آمده است.

یکی از ویژگی های مدل نئوهوکین، امکان محاسبه مستقیم ضرایب مدل بر اساس مدول های برشی و بالک الاستومر است. در مقابل، ضرایب ثابت سایر مدل های هایپرالاستیک معمولاً باید از طریق برازش نتایج آزمایشگاهی انجام شده بر روی ماده الاستومری تعیین شوند. در مدل سازی های اولیه مبتنی بر روش اجزای محدود، که بر مشخصات فرض شده ماده الاستومری در مرحله طراحی استوارند، استفاده از مدل نئوهوکین امری رایج محسوب می شود. در این مدل تابع انرژی U بصورت زیر تعریف می گردد [۱۴].

$$U = C_{10}(I_1 - 3)^i + \frac{1}{D_1}(J_{e1} - 1)^2 \quad (۲)$$

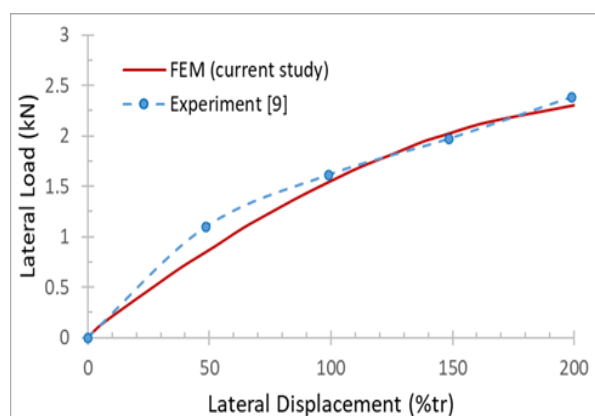
⁶ Piola-Kirchhoff

⁷ Green-Lagrange

⁸ Neo-Hookean

افزار در عرض واقعی بالشتک (70 mm) ضرب شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج اجزای محدود دارای انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی خصوصا در جابجایی‌های جانبی بزرگتر از $tr \cdot 10\%$ می‌باشد. در جابجایی‌های کوچکتر دقت نتایج کاهش یافته است. یکی از دلایل این اختلاف آن است که در مدل اجزای محدود بکار رفته در این پژوهش مدول برشی ماده الاستومری ثابت در نظر گرفته شده و از تغییرات احتمالی آن با کرنش برشی صرف نظر شده است.

مدل اجزای محدود مذکور با حفظ لایه‌های الاستومری بالشتک و جایگزینی لایه‌های تسلیح الیافی با صفحات فولادی در شبیه سازی رفتار بالشتک‌های SREI اتکایی (غیر متصل) نیز بکار گرفته شده است. با توجه به آنکه رفتار صفحات تسلیح فولادی در بالشتک ارتجاعی خطی است، نتایج مدل اجزای محدود بکار رفته در تحلیل رفتار بالشتک‌های SREI مورد بررسی در مقاله حاضر نیز معتبر خواهند بود. در ادامه نتایج تحلیل‌های اجزای محدود انجام شده در این مقاله تبیین می‌شوند.



شکل ۴. مدل‌سازی رفتار نیرو-تغییر مکان جانبی بالشتک FREB مرجع [۹] توسط مدل اجزای محدود مقاله حاضر

۳-۲. سختی قائم بالشتک‌ها

با افزایش ضریب شکل S_1 اثر محصور کنندگی لایه‌های الاستومری بالشتک توسط لایه‌های الیاف و یا صفحات فولادی افزایش می‌یابد. بنابراین، سختی قائم بالشتک زیادتر می‌شود. شکل ۵ تغییرات سختی قائم با افزایش ضریب شکل S_1 را نشان داده

مقدار آن از صفر شروع شده و بصورت خطی تا بار هدف (یعنی نیروی قائم نظیر تنش فشاری متوسط ۳ MPa افزایش می‌یابد قرار می‌گیرند. سپس، در حالیکه مقدار بار قائم ثابت نگه داشته می‌شود، جابجایی‌های جانبی (از صفر تا حداکثر جابجایی مد نظر) توسط یک تابع خطی افزایشی به تکیه‌گاه فوقانی بالشتک اعمال می‌گردند. در تحلیل اجزای محدود، بالشتک‌ها تحت اثر جابه‌جایی‌های جانبی افزایشی که تنها در یک جهت وارد می‌شوند قرار داده شده‌اند. بارگذاری یکطرفه تامین کننده اهداف مورد نظر در این مقاله است. هنگامیکه بالشتک بارگذاری می‌گردد در میان اجزای مختلف تشکیل دهنده آن رفتار صفحات فولادی (در بالشتک‌های SREB) و یا لایه‌های تسلیح الیافی (در بالشتک‌های FREB) ارتجاعی خطی باقی می‌ماند. تنها این ماده الاستومری بالشتک است که رفتاری حساس به تاریخچه کرنش‌های وارده از خود نشان می‌دهد. با توجه به یکسان بوده ماده الاستومری بکار رفته در تمامی بالشتک‌های مورد مطالعه، اثر نرخ کرنش در این مطالعه منظور نشده و به همین دلیل بارگذاری جانبی بصورت یکطرفه انجام شده است. بدیهی است در مواردی که هدف مطالعات شبیه‌سازی حلقه‌های هیسترتیک نیرو-جابجایی بالشتک‌ها و بررسی اثر نرخ کرنش بر رفتار بالشتک‌ها باشد، اعمال بارگذاری رفت و برگشتی ضرورت خواهد یافت. نکته دیگر آن که، در مدل اجزای محدود ارائه شده هیچ‌گونه معیار خرابی مصالح تعریف نشده است.

مدل اجزای محدود بکار رفته در تحلیل بالشتک‌های FREI این مقاله از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۹] صحت سنجی شده است. در مرجع مذکور بالشتک‌های FREB با پلان مربعی شکل با طول ضلع ۷۰ mm و ارتفاع کل لایه‌های الاستومری $tr = 19$ mm با شرایط مرزی اتکایی (غیر متصل) تحت آزمایشات دینامیکی رفت و برگشتی با دامنه‌های مختلف تا 200% ضخامت tr قرار گرفته‌اند. مشخصات مصالح اجزای بالشتک‌ها همان مقادیر درج شده در جدول ۲ است. نقاط آبی رنگ نشان داده شده در شکل ۴ مختصات نقطه انتهایی حلقه هیستریزس آزمایشگاهی نظیر هر دامنه جابجایی را نشان داده و خط‌چین عبور داده شده از آن‌ها نشان دهنده پوش منحنی هیستریزس آزمایشگاهی است. منحنی قرمز رنگ نشان داده شده در شکل ۴ نتایج مدل اجزای محدود دوبعدی بالشتک‌هاست که مقادیر نیروهای خروجی از نرم

۳-۳. رابطه نیرو - تغییر مکان جانبی

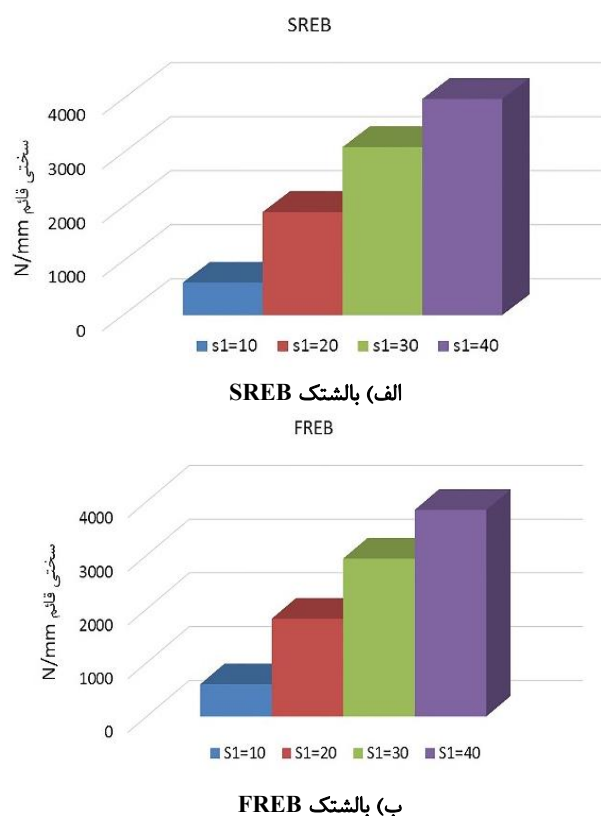
در بالشتک‌های اتکایی بدلیل عدم تشکیل لنگر خمشی در تکیه-گاه‌های بالشتک و وجود تغییر شکل شبه غلتان، سختی جانبی با افزایش تغییر مکان جانبی، کاهش می‌یابد. شکل ۶ رابطه نیرو-جابه-جایی جانبی در بالشتک‌های FREB و SREB را برای ضریب شکل-های $S_1 = 10$ و $S_1 = 40$ نشان می‌دهند. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود پاسخ‌های جانبی هردو نوع بالشتک اتکایی، غیر خطی بوده و بالشتک FREB نسبت به بالشتک SREB، سختی جانبی کمتری را داراست. این امر به دلیل عدم وجود سختی خمشی در لایه‌های تسلیح الیافی بوده که باعث می‌گردد تا بالشتک‌های FREB از انعطاف پذیری جانبی بیشتری برخوردار باشند.

با مقایسه اشکال ۷ و ۸ ملاحظه می‌گردد تغییر شکل شبه غلتان که عامل اصلی کاهش سختی موثر جانبی یک بالشتک اتکایی قلمداد می‌گردد در بالشتک‌های FREB مشهودتر می‌باشد (وجه جانبی بالشتک‌های FREB به سطوح تکیه‌گاهی بسیار نزدیک‌تر شده‌اند). کاهش سختی جانبی به معنای افزایش پیروم موثر لرزه جداسازی بالشتک و افزایش کارایی آن می‌باشد. با توجه به شکل ۶ در یک جابه‌جایی جانبی یکسان به بالشتک‌های FREB نیروی برشی به مراتب کمتری نسبت به بالشتک SREB وارد می‌گردد. در جابه‌جایی جانبی $1.5H$ نیروی برشی وارده در بالشتک FREB با ضریب شکل $S_1 = 10$ حدود ۲۵٪ کمتر از بالشتک SREB با همان ضریب شکل می‌باشد. در بالشتک FREB با ضریب شکل $S_1 = 40$ به دلیل اختلاف ارتفاع قابل توجه H بین دو بالشتک، نیروی برشی حدود ۶۰٪ کمتر از بالشتک FREB با ضریب شکل ۴۰ می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت با ابعاد هندسی (ارتفاع کل) حتی کوچکتر، نیروی انتقالی به روسازه در بالشتک FREB کمتر می‌باشد. مطابق شکل ۶ به ازای یک نسبت نیروی جانبی یکسان، بالشتک FREB جابه‌جایی جانبی بیشتری را تجربه خواهد نمود که این امر بدلیل انعطاف‌پذیری جانبی بیشتر بالشتک مذکور می‌باشد. به ازای یک تغییر مکان جانبی ثابت، در هر دو نوع بالشتک FREB و SREB با افزایش ضریب شکل S_1 مقدار سختی جانبی افزایش یافته است.

و جدول ۳ مقادیر سختی‌های قائم بالشتک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در سطر آخر جدول ۳ نسبت سختی بالشتک‌ها ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر سختی قائم در بالشتک‌های FREB و بالشتک‌های SREB معادل آن‌ها مقادیر قابل مقایسه‌ای دارند. این امر نشان می‌دهد لایه‌های تسلیح الیافی در تامین سختی قائم بالشتک‌ها دارای عملکرد مناسبی می‌باشند.

جدول ۳. سختی قائم (kN/mm) بالشتک‌های مورد مطالعه

بالشتک	$S_1 = 10$	$S_1 = 20$	$S_1 = 30$	$S_1 = 40$
FREB	0.60	1.82	2.94	3.85
SREB	0.60	0.20	0.32	4.01
$\frac{\text{FREB}}{\text{SREB}}$	1	0.95	0.95	0.96

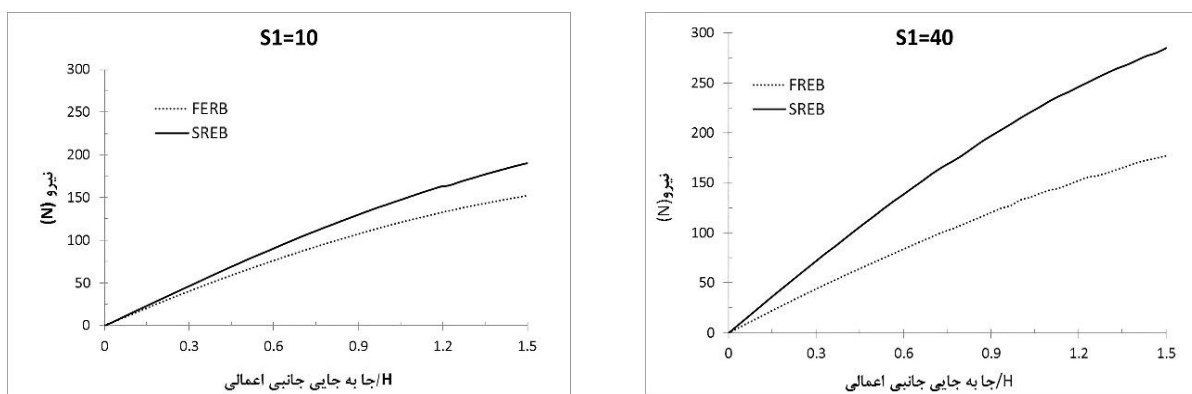
شکل ۵. سختی قائم در بالشتک‌های مورد مطالعه با ضرایب شکل S_1 مختلف

۴. نتایج

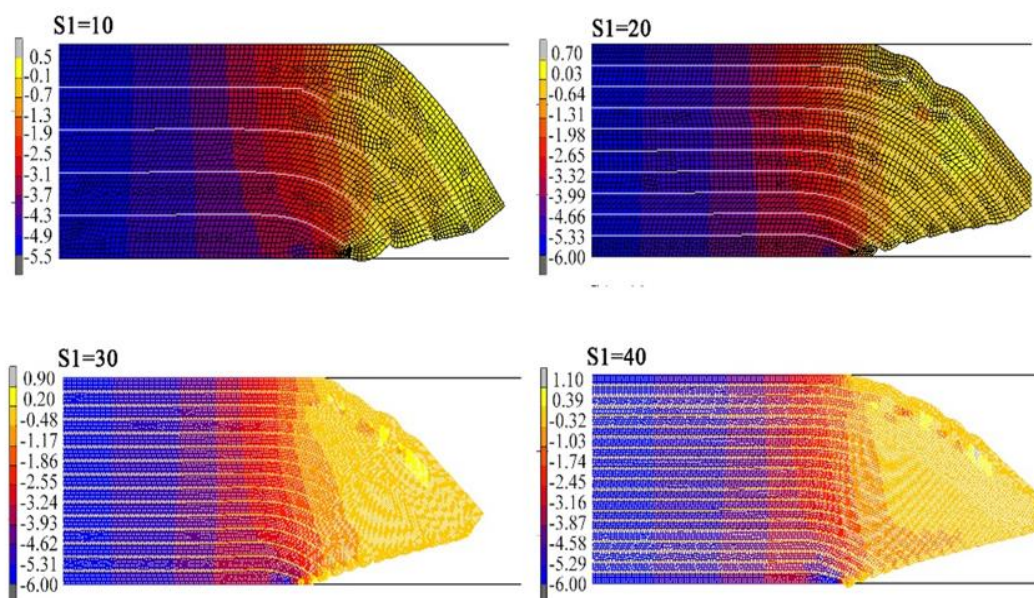
۴-۱. وضعیت توزیع تنش‌های داخلی

برای هر المان تعریف شده لاستیک محوره‌های محلی ۱ و ۲ که عمود بر هم می‌باشند توسط نرم افزار تعریف می‌شوند. محور ۱ به موازات لایه‌های تسلیح داخلی و محور ۲ عمود بر آن در نظر گرفته شده است. قبل از بارگذاری بالشتک (وضعیت قبل از تغییر شکل) امتداد محوره‌های ۱ و ۲ به ترتیب در امتدادهای افقی و قائم می‌باشد. پس از بارگذاری و وقوع تغییر شکل در لایه‌های لاستیک و

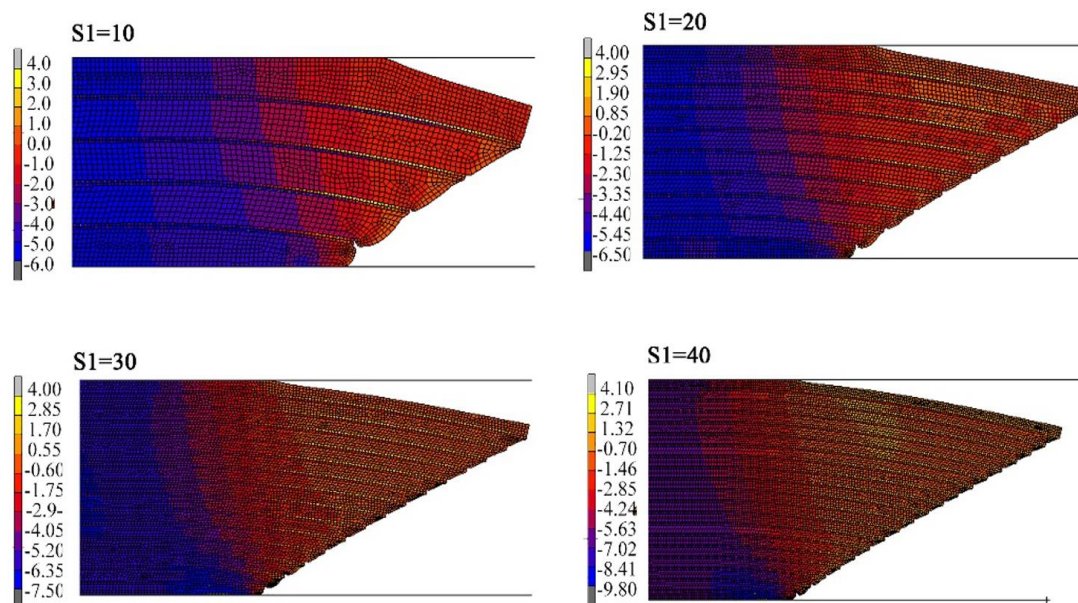
تسلیح داخلی، محور ۱ در امتداد مماس بر منحنی تغییر شکل لایه تسلیح داخلی بالشتک قرار گرفته و امتداد محور ۲ عمود بر آن می‌باشد. شکل‌های ۷ و ۸ وضعیت تنش‌های نرمال σ_{22} در لایه‌های لاستیکی بالشتک‌های مورد مطالعه در جابه‌جایی جانبی $1/5H$ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل تقارن فقط نیمی از بالشتک‌ها نشان داده شده‌اند. امتداد تنش‌های σ_{22} عمود بر راستای لایه‌های تسلیح الیافی و یا صفحات تسلیح فولادی می‌باشد.



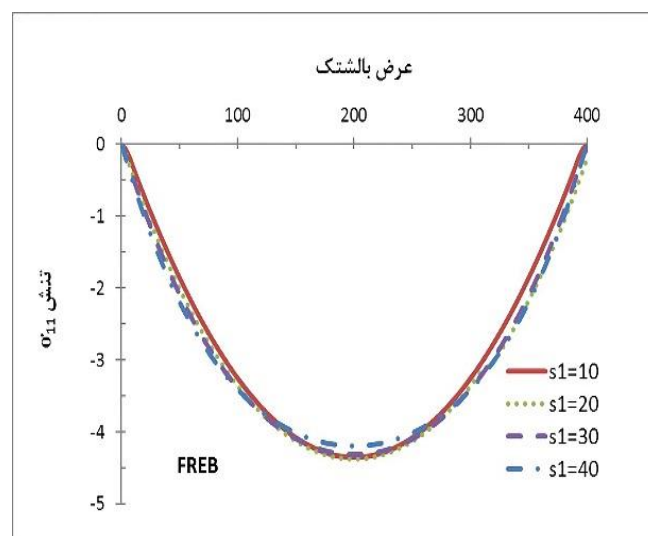
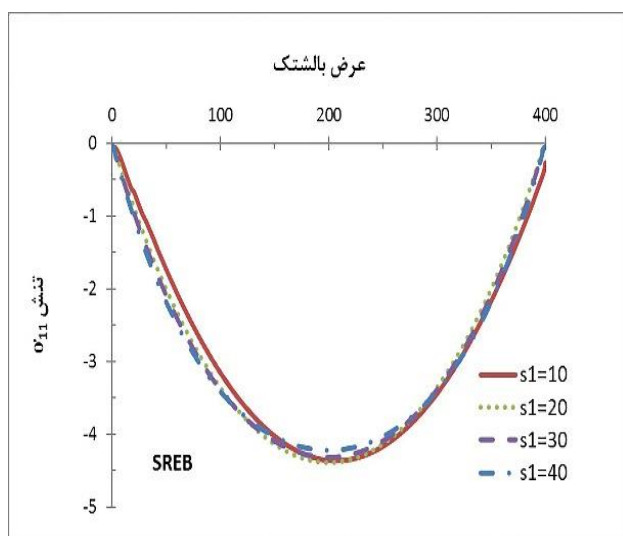
شکل ۶. نمودار نیرو-جابه‌جایی جانبی دو بالشتک FERB و SREB (دارای مقادیر $S1$ برابر ۱۰ و ۴۰)، در جابه‌جایی $1/5H$



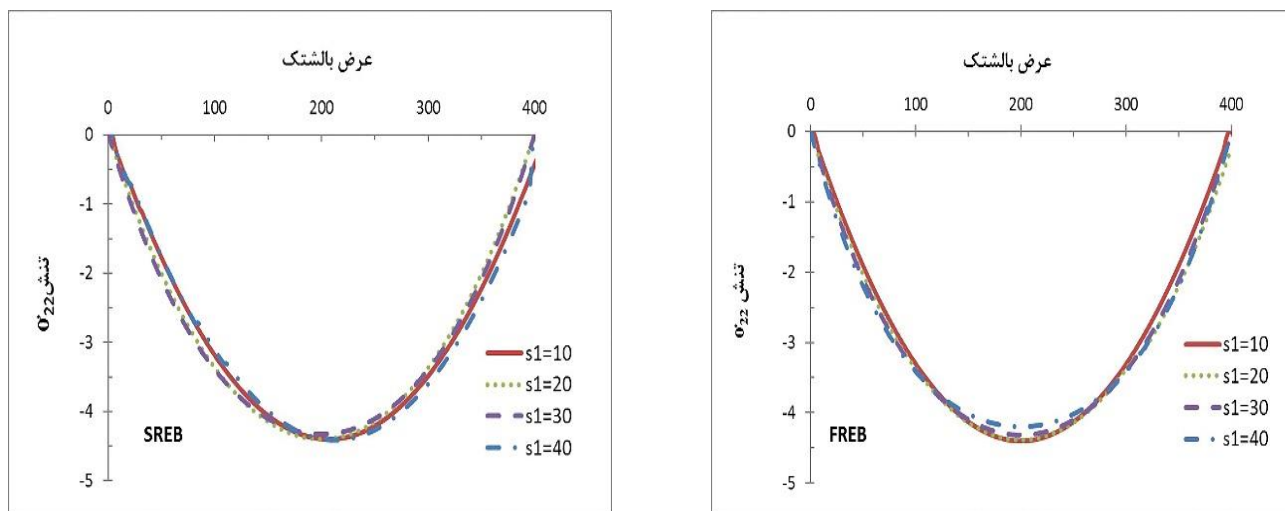
شکل ۷. کانتور تنش σ_{22} در نیمه سمت راست بالشتک‌های FERB بر حسب MPa تحت جابه‌جایی $1/5H$



شکل ۸. کانتور تنش در نیمه سمت راست بالشتک های SREB بر حسب MPa تحت جابه جایی ۱.۵H



شکل ۹. تنش σ_{11} بر حسب Mpa در لایه میانی بالشتک های FREB و SREB در اثر فقط بار قائم



شکل ۱۰. تنش σ_{22} برحسب MPa در لایه میانی بالشتک‌های FREB و SREB در اثر فقط بار قائم

می‌گردد به طوریکه حداکثر مقدار آن به ۱/۵ MPa نیز می‌رسد. با افزایش ضریب شکل مقدار تنش‌های کششی و فشاری در هردو گروه بالشتک افزایش می‌یابد این افزایش در بالشتک‌های SREB محسوس‌تر می‌باشد. با افزایش جابه‌جایی جانبی اعمالی، عرض ناحیه میانی نمودارها که در معرض تنش‌های فشاری می‌باشد کاهش می‌یابد. این ناحیه میانی همان محدوده ستون موثری است که وظیفه انتقال بارهای ثقلی وارده را بر عهده دارد. با افزایش جابه‌جایی جانبی اعمالی ناحیه ستون موثر در بالشتک SREB به نسبت بالشتک FREB کوچکتر می‌باشد.

۳-۴. کرنش‌های برشی ایجاد شده در لایه‌های الاستومری

نمودار کرنش‌های برشی حاصل در لایه‌های لاستیکی واقع در میانه ارتفاع بالشتک‌های مورد مطالعه در مقادیر مختلف جابه‌جایی‌های جانبی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ رسم شده است. مقدار بیشینه کرنش برشی در بالشتک‌های FREB با ضرایب شکل S_1 برابر ۱۰ و ۴۰ درجابه‌جایی‌های نظیر، تقریباً مشابه می‌باشد. با افزایش جابه‌جایی جانبی از ۰.۵H به ۱.۵H مقدار کرنش برشی در بالشتک‌های مذکور حدود ۱۳۰٪ افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ در بالشتک‌های FREB تنش‌های برشی فقط در ناحیه میانی عرض بالشتک رخ می‌دهند. این ناحیه همان ناحیه‌ای است که علیرغم

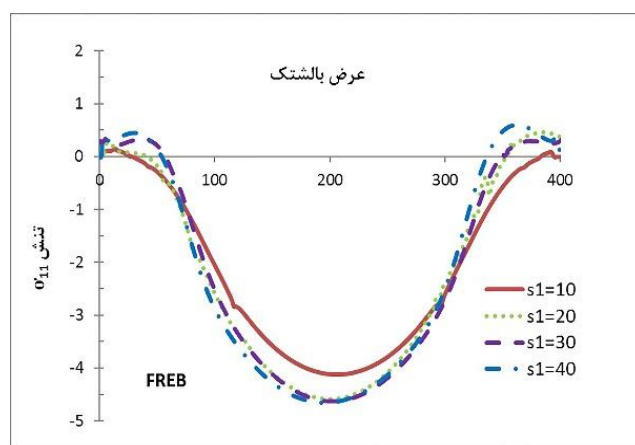
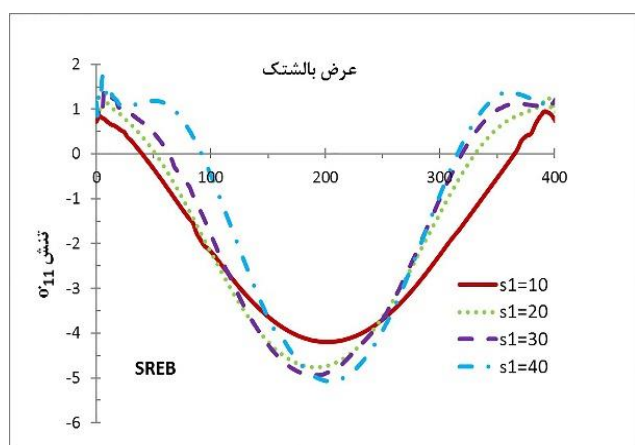
۲-۴. توزیع تنش‌های σ_{11} و σ_{22} در عرض بالشتک‌ها

وضعیت توزیع تنش در امتداد عرضی بالشتک‌ها تحت اثر فقط بار قائم (شکل‌های ۹ و ۱۰) و همچنین اثر همزمان بار قائم و جابه‌جایی جانبی اعمالی (شکل‌های ۱۱ و ۱۲)، در یکی از لایه‌های لاستیک واقع در میانه ارتفاع بالشتک‌ها در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ منحنی تنش‌های نرمال σ_{11} (موازی با امتداد لایه‌های تسلیح) و شکل ۱۰ منحنی تنش‌های نرمال σ_{22} (عمود بر امتداد لایه‌های تسلیح) واقع در لایه لاستیکی میانی بالشتک‌ها را قبل از اعمال تغییر مکان جانبی نشان می‌دهند.

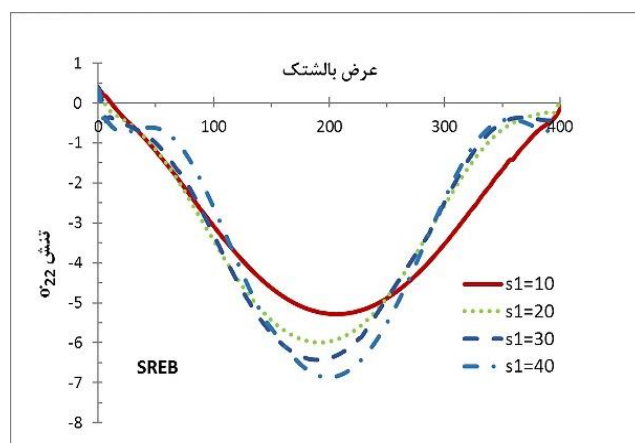
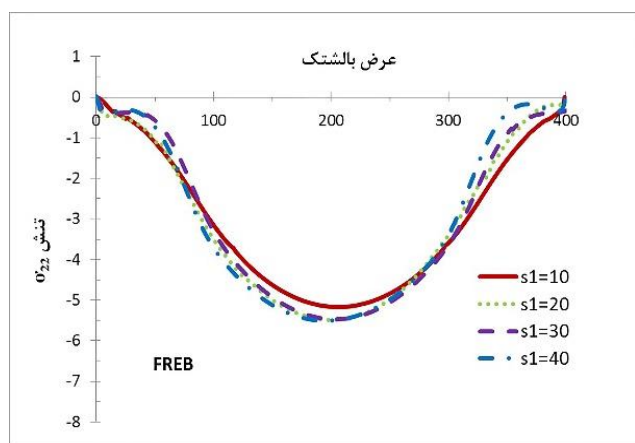
همان گونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود تحت اثر فقط بار قائم، مقادیر تنش در بالشتک‌های SREB و FREB مشابه هم می‌باشند و تغییرات ضریب شکل S_1 اثر محسوسی در نمودار تنش‌های نرمال σ_{11} و σ_{22} ندارد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منحنی‌های تنش در حالتیکه بالشتک‌ها تحت اثر جابه‌جایی جانبی ۱/۵H قرار گرفته‌اند ارائه شده است. همانگونه که در این اشکال مشاهده می‌شود با اعمال جابه‌جایی جانبی مقادیر تنش در بالشتک‌ها تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود در دو انتهای بالشتک‌ها تنش‌های کششی ایجاد می‌شود. مقدار تنش کششی σ_{11} در بالشتک FREB ناچیز بوده و مقدار بیشینه آن در جابه‌جایی ۱/۵H است. در بالشتک‌های SREB تنش کششی σ_{11} به مراتب بزرگتری ایجاد

در بالشتک ندارد. در بالشتک‌های SREB مقادیر کرنش‌های برشی متاثر از جابجایی جانبی و نیز ضریب شکل S_1 بالشتک می‌باشد. با افزایش ضریب شکل S_1 از ۱۰ به ۴۰ مقدار بیشینه کرنش برشی در جابجایی‌های جانبی یکسان بالشتک‌ها بطور میانگین حدود ۲۷٪ افزایش یافته است که دلیل این امر را می‌توان در وجود سختی خمشی در لایه‌های تسلیح فلزی دانست.

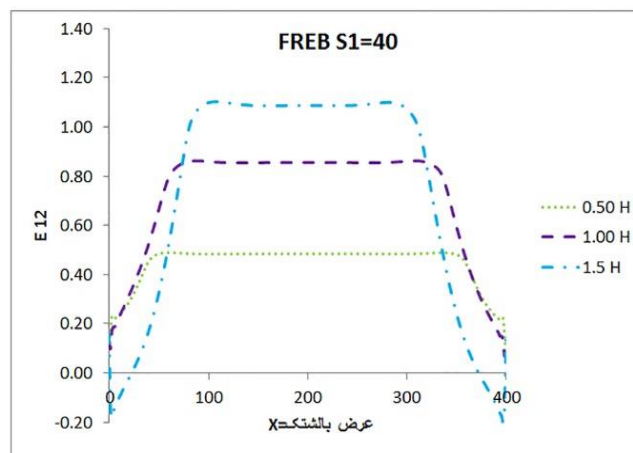
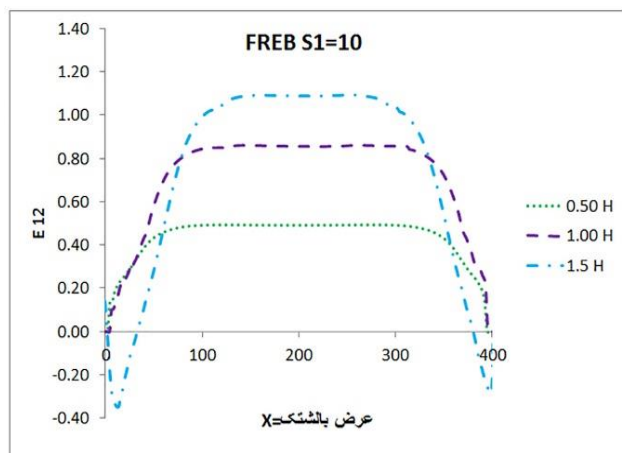
جابجایی‌های جانبی وارده همچنان تحت تماس با تکیه گاه‌های بالا و پایین خود می‌باشد. در نواحی که بدلیل تغییر شکل شبه غلتان از سطح تکیه‌گاه جدا شده است مقادیر تنش‌های برشی کاهش یافته است (ابتدا و انتهای بالشتک). در بالشتک‌های FREB به دلیل عدم صلبیت خمشی در لایه‌های تسلیح الیافی تغییرات ضریب شکل S_1 اثر محسوسی در نمودار کرنش‌های برشی حاصل



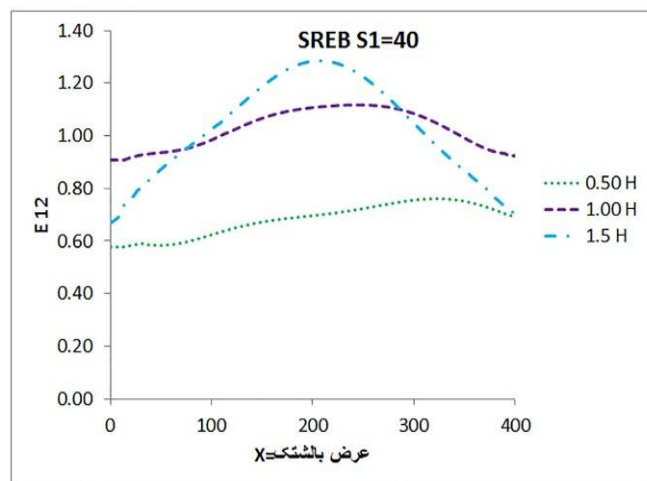
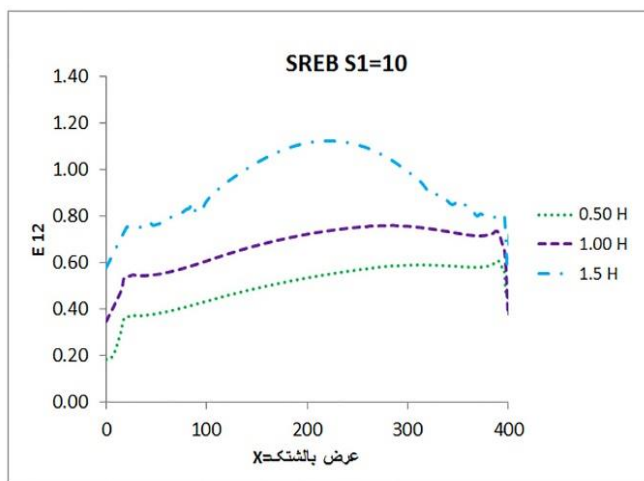
شکل ۱۱. تنش σ_{11} برحسب MPa در لایه میانی بالشتک‌های FREB و SREB در اثر بار قائم و جابجایی جانبی $H/۵$



شکل ۱۲. تنش σ_{22} برحسب MPa در لایه میانی بالشتک‌های FREB و SREB در اثر بار قائم و جابجایی جانبی $H/۵$



شکل ۱۳. توزیع کرنش برشی E_{12} در لایه لاستیکی واقع در میانه ارتفاع بالشتک‌های FREB

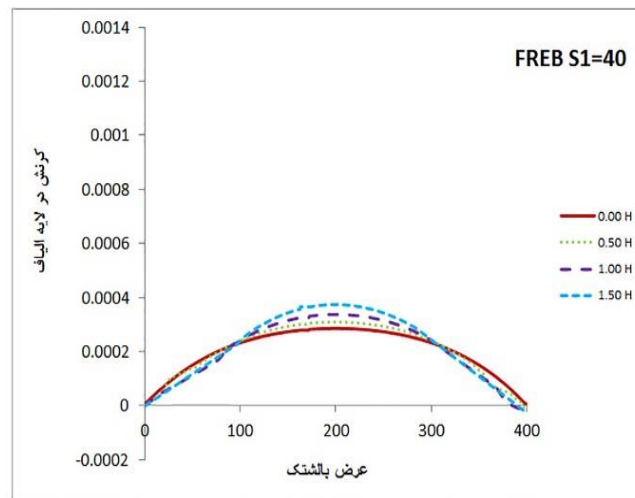
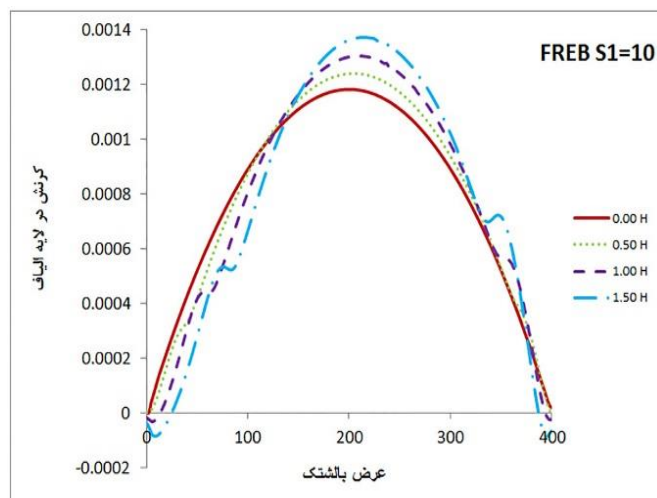


شکل ۱۴. توزیع کرنش برشی E_{12} در لایه لاستیکی واقع در میانه ارتفاع بالشتک‌های SREB

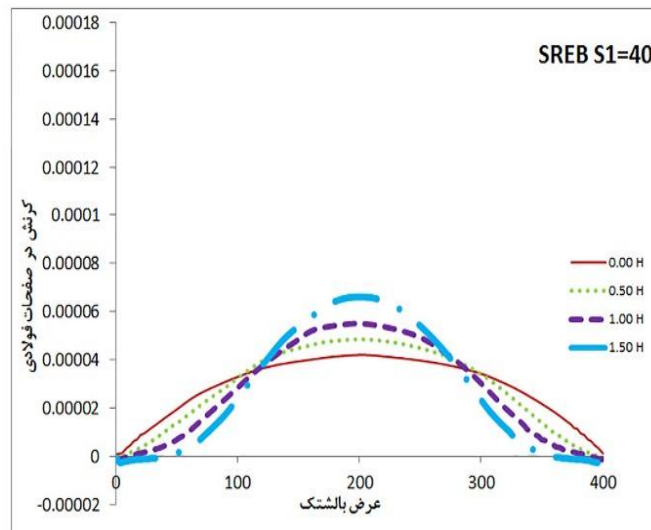
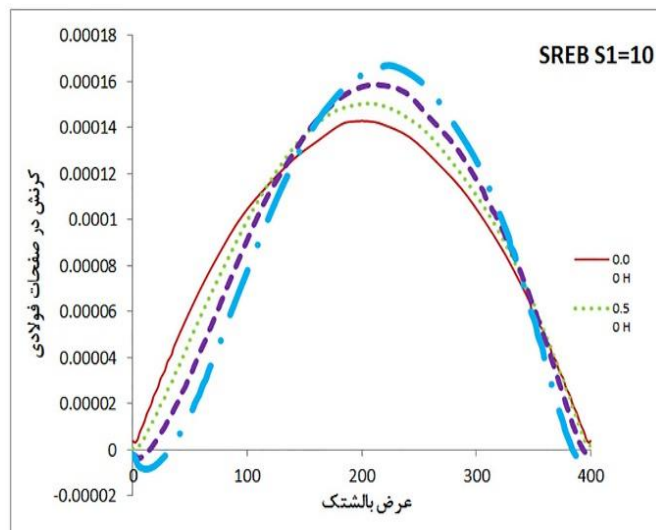
همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش ضریب شکل S_1 مقدار بیشینه کرنش کششی در صفحات فولادی و یا لایه‌های الیاف کاهش می‌یابد. در بالشتک‌های FREB و SREB با ضریب شکل $S_1 = 10$ به دلیل اینکه ضخامت لایه‌های لاستیک حدود ۴ برابر بیشتر از بالشتک نظیر آن‌ها با ضریب شکل $S_1 = 40$ می‌باشد، لایه‌های الیاف یا صفحات فولادی تحت کرنش‌های کششی بیشتری (حدوداً ۳/۵ برابر) واقع می‌شوند تا شرایط محصور شدگی را در لایه نسبتاً ضخیم‌تر لاستیک فراهم نمایند.

۴-۴. کرنش‌های کششی در لایه‌های تسلیح

نمودار کرنش کششی در راستای طول الیاف و صفحات تسلیح در بالشتک‌های FREB و SREB با ضرایب شکل S_1 برابر ۱۰ و ۴۰ به ترتیب در اشکال ۱۵ و ۱۶ رسم شده است. با افزایش جابه‌جایی جانبی مقدار بیشینه کرنش کششی در نمودارها افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه کرنش کششی در لایه‌های تسلیح الیافی بیشتر از صفحات فولادی می‌باشند. در توجیه این امر می‌توان به بیشتر بودن سختی محوری صفحات فولادی نسبت به سختی محوری لایه‌های تسلیح الیافی اشاره نمود.



شکل ۱۵. توزیع کرنش کششی در لایه های تسلیح واقع در میانه ارتفاع بالشتک های FREB با $S_1 = 10, 40$



شکل ۱۶. توزیع کرنش کششی در لایه های تسلیح واقع در میانه ارتفاع بالشتک های SREB با $S_1 = 10, 40$

۵. نتیجه گیری

با توجه به استفاده گسترده از بالشتک های SREB در سازه های مهم و پل ها، در این مطالعه نحوه جدیدی از کاربرد این بالشتک ها و بالشتک های FREB در سازه یعنی به صورت شرایط تکیه گاهی غیرمتصل تحت فشار قائم ۳ MPa، مورد بررسی قرار گرفته و مدل اجزای محدود آن ها باهم مقایسه شده اند. اهم نتایج به شرح زیر می باشند:

- ۱- در بالشتک SREB با افزایش جابه جایی جانبی اعمالی، عرض ناحیه ستون موثر برای تحمل نیروی قائم فشاری کاهش پیدا می کند و تمرکز تنش بیشتر در ناحیه میانی بالشتک می باشد. در حالی که در بالشتک FREB با افزایش جابه جایی به دلیل خاصیت شبه غلتان و ایجاد سطح تماس جدید ناشی از این امر، عرض ناحیه ستون موثر به نسبت بالشتک SREB کاهش کمتری دارد.
- ۲- مقدار بیشینه تنش های کششی عمود بر راستای لایه های

- [2] Kelly J.M. seismic isolation systems for developing countries. Earthquake spectra, (2002).18(3) 385-406.
- [3] Kelly, J.M., Karl E.B."A friction damped base isolation system with fail-safe characteristics. Earthquake Engineering & Structural Dynamics (1983); 11.1 33-56.
- [4] Kelly, J.M. Testing of a natural rubber base isolation system by an explosively simulated earthquake. Earthquake Engineering Research Center, 1980.
- [5] Skinner, R.I. William H.R., and Graeme H. M. An introduction to seismic isolation. John Wiley & Sons, 1993.
- [6] Kalfas, K.N., Mitoulis, S.A., & Katakalo, K. Numerical study on the response of steel-laminated elastomeric bearings subjected to variable axial loads and development of local tensile stresses. Engineering Structures. (2017); 134, 346-357.
- [7] Toopchi-Nezhad H., Tait M.J., and Drysdale R.G. Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators. Structural Control Health Monitoring (2008);15-6 :876-900.
- [8] Russo G., Pauletta M, Cortesia A. A study on experimental shear behavior of fiber-reinforced elastomeric isolators with various fiber layouts, elastomers and aging conditions. Engineering Structures (2013); 52:422-33.
- [9] Toopchi-Nezhad, H., Tait M.J., and Robert G.D. Lateral response evaluation of fiber-reinforced neoprene seismic isolators utilized in an unbonded application. Journal of Structural Engineering 134.10 (2008); 1627-1637.
- [10] Toopchi-Nezhad, H, Tait M.J., and Robert G.D. Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs (stable unbonded-fiber reinforced elastomeric isolators). Earthquake Engineering & Structural Dynamics 38.11 (2009); 1335-1357.
- [11] De Domenico, D., D. Losanno, and N. Vaiana. Experimental tests and numerical modeling of full-scale unbonded fiber reinforced elastomeric isolators (UFREIs) under bidirectional excitation. Engineering Structures 274 (2023): 115118.
- [12] Al-Anany Y, Tait M.J. A numerical study on the compressive and rotational behavior of fiber reinforced elastomeric isolators (FREI). Composite Structures (2015); 133: 1249-66.

تسلیح در بالشتک‌های FREB در مقایسه با بالشتک‌های SREB به میزان بسیار قابل توجهی کمتر می‌باشد. این امر به دلیل عدم وجود صلبیت خمشی در لایه‌های تسلیح الیافی است. افزایش تقاضای تنش کششی در پیوند بین لایه‌های الاستومر و صفحات فولادی استفاده از چسب‌های ترکیبی با کیفیت بالاتر و البته هزینه بیشتر را در تولید بالشتک‌های مذکور اجتناب ناپذیر می‌کند.

۳- در بالشتک‌های غیر متصل با افزایش جابه‌جایی افقی سختی جانبی موثر (سکانت) کاهش می‌یابد. این کاهش باعث افزایش پریود جداسازی بالشتک و افزایش کارایی آن به عنوان یک جداگر لرزه‌ای می‌شود. همچنین، کاربرد غیر متصل سبب کاهش برش وارده به روسازه توسط بالشتک می‌گردد. کاهش سختی جانبی در بالشتک‌های FREB بدلیل صلبیت خمشی ناچیز لایه‌های تسلیح بیشتر می‌باشد، بنابراین، با ضرایب شکل یکسان، بالشتک FREB به نسبت SREB نیروی کمتری به رو سازه منتقل می‌کند.

۴- تغییرات ضریب شکل S_1 اثر محسوسی در نمودار کرنش برشی بالشتک‌های FREB ندارد. در بالشتک SREB با افزایش ضریب شکل مقدار بیشینه کرنش برشی افزایش محسوسی می‌یابد.

۵- مقدار بیشینه کرنش کششی در لایه‌های تسلیح بالشتک‌ها با افزایش جابه‌جایی جانبی فزونی می‌یابد. با افزایش ضریب شکل S_1 کرنش‌های کششی درون‌صفحه‌ای در لایه‌های تسلیح بالشتک‌ها کمتر می‌شود. به دلیل کمتر بودن ضخامت لایه‌های تسلیح الیافی به نسبت صفحات فولادی و همچنین کمتر بودن مدول الاستیسته الیاف FRP از صفحات فولادی، مقادیر کرنش کششی در صفحات فولادی بالشتک‌های SREB به نسبت لایه‌های تسلیح الیافی در بالشتک‌های FREB بسیار کمتر می‌باشد.

به‌طور کلی بالشتک‌های FREB به نسبت بالشتک‌های SREB مشابه خود از انعطاف‌پذیری جانبی بیشتر (راندمان کاری بهتر) و تقاضای تنش داخلی کمتری برخوردار می‌باشند. بعلاوه، ضخامت و وزن تمام شده آن‌ها کمتر می‌باشد.

References

- [1] Kelly, J.M. Aseismic base isolation: review and bibliography. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 5.4 (1986): 202-216.

- [23] Losanno, D., Prakash, S., Medaglia, P., Parisi, F., Konstantinidis, D., Tubaldi, E., Ahmadi, H., Strauss, A., De Domenico, D., Vamvatsikos, D. and Lachanas, C. 3D Shaking Table Tests of a Full Scale 2-Storey Building with Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators. In International Workshop in Engineering Research Infrastructures for European Synergies (2025, May), 280-294. Cham: Springer Nature Switzerland.
- [24] Ghorbi, Ehsan, and Toopchi-Nezhad, Hamid. Seismic-isolation of a high-voltage power transformer with pseudo-rolling elastomeric isolators: Design, evaluation, and implementation. *Engineering Structures* 329 (2025): 119753.
- [25] Guidelines for the design and application of seismic isolation systems in buildings. Article 523, President Deputy Strategic Planning and Control (1389), in Persian.
- [26] Toopchi-Nezhad H. An introduction on unbonded fiber reinforced elastomeric isolators as a new generation of elastomeric seismic isolators. 2nd National Conference on Civil Engineering New Materials and Structures. (1392), Isfahan, Iran. In Persian
- [27] MSC. Marc. Santa Ana, CA: MSC Software Corporation; 2012. 113 (2012) 164–173.
- [13] Toopchi-Nezhad, H., Michael J.T., and Robert G.D. Simplified analysis of a low-rise building seismically isolated with stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36.7 (2009): 1182-1194.
- [14] Wang, L.R., and Lue, Z.H. Modeling method of constitutive law of rubber hyperelasticity based on finite element simulations. *Rubber Chemistry and Technology*, 76.1 (2003); 271-285.
- [15] Osgooei P.M., Tait M.J., and Konstantinidis D., Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolators (FREIs) under lateral loading in different directions *Composite Structures* 113 (2014); 164–173.
- [16] Ohsaki M., Miyamura T., Kohiyama M., Yamashita T., Yamamoto M., and Nakamura N. Finite-element analysis of laminated rubber bearing of building frame under seismic excitation. *Earthquake Eng Struct Dyn* (2015); 44 11 :1881–98.
- [17] Moghadam, S.R., & Konstantinidis, D. Finite element study of the effect of support rotation on the horizontal behavior of elastomeric bearings. *Composite Structures*. (2017); 163, 474-490.
- [18] Toopchi-Nezhad H., Tait M.J., and Drysdale R.G. Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: finite element analysis. *Composite Structures*. (2011); 31; 93 2 :850-9.
- [19] Ehsani, Behrang, and Toopchi-Nezhad, Hamid. Systematic design of unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Engineering Structures* 132 (2017): 383-398.
- [20] Van Engelen, Niel C. "Fiber-reinforced elastomeric isolators: A review." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125 (2019): 105621.
- [21] Saremi, Emad, and Toopchi-Nezhad, Hamid. Finite element modeling of horizontal load-displacement hysteresis loops in unbonded elastomeric isolators. *Structures*, vol. 34, pp. 2987-2995. Elsevier, 2021.
- [22] Sheikh, Hediye, Gaetano Pianese, Rajeev Ruparathna, Niel C. Van Engelen, and Gabriele Milani. "Non-linear time history analyses of a rigid block isolated with unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators (UFREIs): A comparison between 3D finite element and phenomenological models." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 54, no. 2 (2025): 449-470.