

Finite element analysis of elastomeric sliding isolator system (ESI)

Seyed Alireza Mozaheb¹, Farhad Behnamfar^{2*}

1- PhD student of civil engineering, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Professor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

This paper presents a new elastomeric sliding seismic isolator system. This isolator is made of a rubber core which is confined by sliding steel rings. In this system, the vertical load is applied directly on the rubber core. The friction mechanism existing in the mentioned system controls the lateral force due to winds, ambient vibrations and mild earthquakes, and also decreases transfer of lateral force to the superstructure during severe earthquakes. At the end of vibration, the elasticity of rubber creates a restoring force and decreases residual deformation of the bearing device. Features of the proposed system are assessed by means of the finite element software ANSYS and the stress distribution of various components is obtained under compression and compression-shear loading. Contact elements were used to model the contact surfaces, and Solid185 elements were used to simulate the rubber. The studies show that an appropriate vertical and lateral stiffness is created by interaction of the steel rings and the elastomeric core. In addition, under vertical loading, all the stress components are far less than the allowable limit. Due to lateral movement, a part of the vertical load is transferred to the steel rings which not only de-escalates the stress at the rubber core, but also increases damping due to friction in the system. Steel rings effectively enhance the vertical stiffness of the system by controlling the lateral strains experienced by the rubber material. In the specific sample being examined, a vertical load of 100 kN leads to a vertical stiffness value of 131 kN/mm in the system. Under a vertical load of 100 kN, the stress values s_x (along lateral displacement), s_z , and s_y in the rubber core, subjected to a 200% shear strain, were reduced by 25%, 50%, and 51%, respectively, compared to the scenario without lateral displacement.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 August 2023

Revise Date: 01 February 2024

Accept Date: 01 March 2024

Keywords:

Sliding-elastomeric isolator
vertical and lateral stiffness
confined rubber core
frictional damping
finite element analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.408072.3181>

*Corresponding author: Farhad Behnamfar.

Email address: farhad@iut.ac.ir

تحلیل سامانه جداساز الاستومری - لغزشی ESI

سیدعلیرضا مذهب^۱، فرهاد بهنام فر^{۲*}

۱- دانشجوی رشته دکتری عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در این مقاله، سامانه جداساز لرزه‌ای الاستومری-لغزشی جدیدی معرفی گردیده است. جداساز مزبور از یک هسته لاستیکی که بین حلقه‌های فولادی لغزشی محصور شده، تشکیل گردیده است. در این سامانه، بار قائم مستقیماً بر روی هسته لاستیکی وارد می‌گردد. مکانیزم اصطکاکی موجود در سامانه یادشده، نیروهای جانبی ناشی از باد، ارتعاشات محیطی و زلزله‌های خفیف را کنترل کرده؛ هنگام وقوع زلزله‌های شدید سبب کاهش انتقال نیروهای جانبی به سازه فوقانی می‌گردد. پس از پایان ارتعاشات ناشی از زلزله، قابلیت کشسانی لاستیک باعث ایجاد نیروی بازگشتی شده، تغییرشکل‌های پس‌ماند در تکیه‌گاه را به شدت کاهش می‌دهد. از دیگر مزایای این سامانه، سهولت ساخت و ارزان‌تر بودن نسبت به جداسازهای متداول است. در این مقاله به کمک نرم‌افزار اجزای محدود انسیس تنش‌های اجزای مختلف سامانه پیشنهادی تحت بارگذاری فشاری و فشاری-برشی مطالعه شده است. برای مدل‌سازی سطوح تماس از المان‌های *contact* و برای شبیه‌سازی لاستیک از المان‌های *Solid185* هشت گرهی با قابلیت ایرکشسانی استفاده شده است. مطالعات فوق نشان داد که سختی قائم و جانبی مناسبی توسط اندرکنش حلقه‌های فولادی و هسته الاستومری ایجاد می‌گردد؛ همچنین تحت بارگذاری قائم طراحی تمام تنش‌ها به مراتب کمتر از حد مجاز هستند. حلقه‌های فولادی با کنترل کرنش‌های جانبی لاستیک، سختی قائم سامانه را به صورت فوق‌العاده‌ای افزایش می‌دهند. به طوری که در نمونه مورد مطالعه تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن، مقدار سختی قائم سیستم به ۱۳۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌رسد. در اثر حرکت جانبی، بخشی از بار قائم به حلقه‌های فولادی منتقل شده که ضمن تنش‌زدایی از هسته لاستیکی، سبب افزایش میرایی اصطکاکی سامانه می‌گردد به طوری که در نمونه مورد مطالعه تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن، مقادیر تنش‌های S_x (در امتداد تغییرمکان جانبی) و S_z و S_y در هسته لاستیکی، تحت کرنش برشی ۲۰۰ درصد، به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد و ۵۱ درصد نسبت به حالت بدون تغییرمکان جانبی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جداساز الاستومری-لغزشی، سختی قائم و جانبی، هسته لاستیکی محصور، میرایی اصطکاکی، تحلیل اجزای محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.408072.3181	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.408072.3181	۱۴۰۳/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۱۱	۱۴۰۲/۱۲/۱۱	۱۴۰۲/۱۱/۱۲	۱۴۰۲/۰۶/۱۱
فرهاد بهنام فر farhad@iut.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

ایران کشوری لرزه خیز است که بر روی کمر بند لرزه خیز آلیپاید قرار دارد و تاکنون زمین لرزه های ثبت شده مختلف و در مواقعی ویران کننده، مناطق مختلف کشور را با خسارات و تلفات سنگینی روبه رو کرده است [۱]؛ لذا نیاز به طراحی و ساخت سامانه های جدید کنترل سازه در برابر حرکات قوی زمین لرزه برای سامانه های ساختمان ها در مناطق زلزله خیز بیش از گذشته احساس می شود.

به منظور رسیدن به هدف فوق می توان با اجازه دادن به ایجاد تغییر شکل های غیرکشسان اثر مطلوبی روی افزایش پیروود طبیعی ساختمان گذاشت و باعث به وجود آوردن میرایی حاصل از عمل جذب انرژی گردید؛ بدین وسیله شتاب در ترازهای پایین تر ساختمان کاهش می یابد. همچنین می توان شتاب ساختمان را در مقایسه با شتاب زمین کاهش داد و این در صورتی امکان دارد که ساختمان انعطاف پذیر ساخته شود که مسائلی را در بافت های ساختمانی مطرح می سازد. راه حل دیگر این است که در ساختمان های کوتاه و متوسط، انعطاف پذیری لازم را در سطح فونداسیون با استفاده از روش جداسازی پی به وجود آورد. اخیراً پیشرفت های به دست آمده در فناوری ساخت لاستیک این ایده را به صورت یک واقعیت عملی در آورده است. تکیه گاه های لاستیکی دارای دوام، قابلیت اعتماد، قیمت مناسب و کاربردی هستند. به کمک این تکیه گاه ها پیروود طبیعی ساختمان افزایش داده می شود تا بنا را از ارتعاشات حفاظت کنند. در این میان یکی از سامانه های جداسازی از پی که کاربرد گسترده ای پیدا کرده است، سامانه تکیه گاه های لاستیکی لایه لایه یا سامانه LRB^۱ است [۲].

مطالعات مناسبی نیز روی نوع اصطکاکی جداکننده ها انجام گرفته است. ویژگی جالب توجه این جداکننده ها در نیروهای اصطکاکی آنها است که سبب جذب انرژی زیادی می گردد. ساده ترین نوع آنها سامانه اصطکاکی خالص است که با علامت اختصاری P-F^۲ مشخص می گردد [۳]. سامانه های یاد شده از ارزان ترین و مؤثرترین وسایل برای کاهش نیروهای لرزه ای در ساختمان هستند. در همین رابطه مستقل و همکارانش [۴، ۵] نشان دادند در تکیه گاه های لغزشی که دارای ضریب اصطکاک کمی هستند، پاسخ شتاب با محتوای فرکانسی حرکت زمین تغییر نمی یابد که دلالت بر این دارد که تکیه گاه های لغزشی به طور مؤثری می توانند برای همه مناطق به کار روند، چه دارای خاک سخت یا نرم باشند و چه در فواصل گوناگونی از گسل های فعال قرار گرفته باشند. در سیستم های اصطکاکی مسئله برگشت پذیری از مباحث مهم مورد نظر طراحان است لذا بدین منظور تکیه گاه پاندول اصطکاکی^۳ (FPB) ارائه گردید [۶]. سیستم فوق بر اساس لغزش روی سطح مقعر عمل می کند. سطح فوق سبب ایجاد نیروی برگشتی با استفاده از وزن سازه فوقانی می گردد. مطالعات نشان داده است که نیروی برگشتی مذکور، علاوه بر وزن سازه فوقانی، وابسته به میزان تغییر مکان و سرعت لغزش و جنس سطح تماس است. بنابراین روابط نیرو-تغییر مکان غیرخطی است که تحت اثر نیرو های ناشی از زمین لرزه، اندرکنش FPB و سازه فوقانی پیچیده تر نیز می گردد [۶ و ۷]. لذا پیش بینی و مدلسازی رفتار هیستریزس سیستم یاد شده تحت ارتعاشات لرزه ای از مهم است. از طرفی مدلسازی وابسته به بارگذاری جانبی و ممان های حاصل از دوران سیستم فوق است. بدین منظور پنگ و همکاران [۸] مدل هیستریزس FPB را براساس تئوری بالانس ممان، فرموله کردند و آن را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی نمودند و خطاهای ناشی از ساده سازی و فرضیات آن را اصلاح کردند.

ذکر این مطلب ضروری است که جداکننده های پیشرفته، عموماً ترکیبی از المان های P-F و تکیه گاه های لاستیکی لایه لایه هستند که می توان در این مورد از سامانه EDF^۴ [۹] سامانه جداکننده اصطکاکی برگشت کننده یا سامانه R-FBI^۵ [۱۰] و سامانه اصطکاکی-

¹ Laminated Rubber Bearings

² Pure-Friction

³ Friction Pendulum Bearing

⁴ Electricite De France

⁵ Resilient- Friction Base Isolator

لغزشی برگشت کننده یا سامانه $SR-F^1$ [۱۱] نام برد. به عنوان نمونه سامانه R-FBI شامل لایه‌های متحدالمرکز از صفحات پوشیده شده از تفلون^۶ بود که لایه‌های فوق در تماس اصطکاکی با یکدیگر بودند و در مرکز آن هسته مرکزی لاستیکی قرار داشت. این سامانه، ترکیبی از خصوصیات مفید میرایی اصطکاک و برگشت کنندگی لاستیک بود؛ همچنین هسته لاستیکی سبب توزیع سرعت و تغییر مکان جانبی در طول ارتفاع تکیه‌گاه R-FBI می‌گردید. هسته مزبور توانایی باربری عمودی نداشت و به حلقه‌های لغزشی محکم جوش خورده بود. برای اینکه بین لایه‌های لغزشی، تغییر مکان جانبی به صورت مناسبی توزیع گردد در میان هسته لاستیکی از میله‌ای فولادی استفاده شده بود [۱۲، ۱۳]. این سامانه تأثیر فراوانی در کاهش ترازهای بزرگی از شتاب سازه فوقانی داشت بدون اینکه سبب به وجود آمدن تغییر مکان‌های بزرگ در پی یا تغییر مکان‌های پس ماند گردد [۱۰]. اثر سامانه R-FBI در کاهش پاسخ سازه فوقانی با افزایش شتاب‌های اوج زمین افزایش می‌یافت و تغییر مکان‌های پی به اصطکاک نامتقارن ناشی از نشست‌های کوچک و متفاوت سازه حساس نبود و وارد شدن شتاب عمودی نیز تأثیر قابل توجهی بر پاسخ افقی سامانه نداشت. در میان گونه‌های مختلف جداسازهای اصطکاکی، سامانه R-FBI تحت بارگذاری‌های گوناگون زلزله‌های مخرب عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده است [۱۴]. یکی از چالش‌های سیستم یاد شده تعیین ساده سازی پاسخ سیستم سازه‌ای قرار گرفته بر روی آن بود به گونه‌ای که بتوان رفتار غیر خطی پیچیده آن را به کمک تحلیل‌های خطی تشخیص داد به این منظور هانگ و کیم [۱۵] عملکرد سیستم R-FBI را بر روی ساختمانی چند طبقه را بررسی کردند آنان توابع پاسخ را در محیط فرکانس را با توجه به فرآیند راندم ایستا فرموله کردند و برای اینکه پاسخ بخش روسازه سازه چند طبقه جدا شده به وسیله سیستم R-FBI تخمین بزنند؛ از تکنیک خطی سازی معادل^۸ برای خطی کردن معادلات حرکت غیر خطی ناشی از عملکرد موازی برگشت کنندگی لاستیک و اثر اصطکاک صفحات تفلونی استفاده کردند. در این روش تابع چگالی طیفی توانی^۹ در رابطه‌های پاسخ تغییر مکانی و پاسخ شتاب سازه N درجه آزاد مورد استفاده قرار گرفت. کارایی و دقت نتایج حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با روش آنالیز تاریخچه زمانی نشان داد که بین بیشینه پاسخ‌ها تطابق خوبی برقرار است.

در ایران نیز پورمحمد و همکاران [۱۶] ایده جداساز الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی را مطرح کردند در این سامانه به جای صفحات فولادی متوالی در جداسازهای الاستومری مسلح LRB از صفحات فولادی توخالی در داخل لاستیک برای مسلح کردن آن استفاده شده بود. از تماس حلقه‌های فولادی به یکدیگر توسط لاستیک جلوگیری شده بود؛ لذا این سامانه فاقد مکانیزم لغزشی بود و حلقه‌های فلزی به منظور افزایش سختی قائم نسبت به سختی افقی به کار رفته بودند. آنان پیشنهاد کردند که از این سامانه برای جداسازی سازه‌های سبک استفاده شود. جداساز فوق الذکر بر اساس ایجاد فضای تنش هیدرواستاتیک داخلی عمل می‌کرد. در مطالعه فوق الذکر روش ساخت، آزمایشها و نحوه محاسبه سختی قائم سیستم یاد شده را ارائه شده بود؛ همچنین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و عددی رابطه ریاضی ارائه شده برای محاسبه سختی قائم جداسازهای مورد نظر صحت سنجی شده بود. در مطالعه فوق عملکرد جداساز پیشنهادی با جداسازهای الاستومری مسلح LRB مقایسه گردیده بود و مطرح گردید که می‌توان از جداساز مزبور برای جداسازی لرزه‌ای کف‌های طبقات استفاده کرد. نتایج عددی و آزمایشگاهی مطالعه فوق نشان دهنده عملکرد مناسب که سیستم مورد نظر برای جداسازی لرزه‌ای بود. همچنین پیشنهاد گردید که تغییر شکل‌های قائم و برشی به عنوان معیار کنترل کیفیت در نظر گرفته شود.

مذهب و بهنام فر [۱۷] با ترکیب مفاهیم نهفته در سامانه‌های الاستومری و سامانه‌های لغزشی، سامانه ESI^{10} را پیشنهاد دادند. جداساز مزبور از یک هسته لاستیکی مرکزی، محصور در حلقه‌های فولادی تشکیل شده بود در این سامانه، بارگذاری قائم به طور مستقیم به هسته لاستیکی وارد می‌گردید و حلقه‌های فولادی تنها نقش محصور کنندگی داشته و بار قائم به آن‌ها وارد نمی‌گردید. آنان در مطالعه

⁶ Sliding Resilient- Friction

⁷ Teflon- coated

⁸ Equivalent linearization technique

⁹ Spectral density functions

¹⁰ Elastomeric-Sliding seismic Isolation system

آزمایشگاهی خود با مقایسه سامانه پیشنهادی با سامانه جداکننده لاستیکی چندلایه LRB نشان دادند که وجود حلقه‌ها سبب جلوگیری از تغییر شکل جانبی هسته لاستیکی، تحت اثر بارگذاری قائم می‌گردد و علاوه بر اینکه سبب افزایش سختی قائم می‌شوند، تأثیر کمی نیز بر افزایش سختی جانبی سامانه دارند. دلیل اصلی اینکه سختی قائم نمونه سامانه ESI از سختی نمونه سامانه LRB بیشتر بود، خاصیت تراکم ناپذیری هسته لاستیکی محصور در حلقه‌های فولادی بود. از طرفی تحت بارگذاری قائم در اثر فشارهای هیدرواستاتیک، لاستیک به حلقه‌های فولادی تکیه می‌کند و در اثر تماس جانبی هسته لاستیکی به حلقه‌های فولادی بخشی از بار قائم به حلقه‌ها منتقل گردیده سبب ایجاد نیروی اصطکاکی بین حلقه‌ها می‌گردد که منبع اصلی جذب انرژی در این سامانه است؛ همچنین هنگام بارگذاری جانبی توأم با بار قائم، فاصله بین صفحه بارگذاری و حلقه‌ها کاهش یافته و با برقراری تماس موضعی بین حلقه‌ها و صفحه بارگذاری، سبب افزایش میرایی اصطکاکی می‌گردد. آنان نتیجه گرفتند که حلقه‌های فولادی با کنترل کرنش‌های جانبی لاستیک، علاوه بر افزایش فوق‌العاده‌ای در سختی قائم سامانه، سبب تولید مکانیزم جذب انرژی مناسبی نیز می‌گردند؛ به طوری که آزمایش‌ها نشان داد که متوسط نسبت میرایی معادل حداقل ۶۷ درصد بیش از سامانه LRB است که نیاز به میراکننده اضافی را برطرف می‌کند. تحت آزمایشات انجام شده در این تحقیق مدول الاستیسیته، مدول برشی و نسبت میرایی معادل سامانه ESI محاسبه و با سامانه LRB گردید.

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس به بررسی رفتار سامانه ESI تحت اثر بار قائم و تغییر مکان جانبی پرداخته و نشان داده شده است که در این نوآوری، ترکیب المان‌های لاستیکی و لغزشی سبب ایجاد مزایای فراوانی در اصلاح رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌گردد. تولید سختی جانبی مناسب این سامانه نیروی جانبی ناشی از باد، ارتعاشات محیطی و زلزله‌های خفیف کنترل می‌کند و در هنگام وقوع زلزله‌های شدید، با پذیرش تنش و کرنش‌های متعارف در جداساز، سبب کاهش انتقال نیروهای جانبی به سازه فوقانی می‌گردد و پس از پایان ارتعاشات ناشی از زلزله، خاصیت کشسانی مصالح لاستیکی باعث ایجاد نیروی بازگشتی شده، تغییر شکل‌های پس‌ماند در تکیه‌گاه را به شدت کاهش می‌دهد.

۲- معرفی سامانه پیشنهادی (جداساز الاستومری - لغزشی ESI)

سیستم جداساز الاستومری - لغزشی ESI از هسته لاستیکی مرکزی تشکیل شده است که بین صفحه بارگذاری و در داخل حلقه‌های فولادی جانبی کاملاً محصور گردیده است به گونه‌ای که بین حلقه‌ها و هسته لاستیکی تماس کامل برقرار است (شکل ۱). به کمک این طرح، تحت بار قائم، فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی ایجاد می‌شود و عدم امکان انبساط جانبی آن، سبب ایجاد تنش حلقوی در حلقه‌های فولادی و انتقال بخش زیادی از بار قائم به صورت جانبی به حلقه‌ها می‌گردد. به عبارتی محصور شدن هسته لاستیکی سبب افزایش سختی قائم لاستیک به دلیل خاصیت تراکم ناپذیری لاستیک می‌شود. در این سیستم هسته‌ی رابط فولادی بین صفحه بارگذاری فوقانی و هسته لاستیکی مرکزی، قرار گرفته است. قطر هسته فولادی در حد هسته لاستیکی با رواداری مناسب است به طوری که بتواند به راحتی از بین حلقه‌ها حرکت کند. وجود هسته فولادی فوق با ایجاد فاصله بین حلقه‌ها و صفحه بارگذاری موجب عدم انتقال مستقیم بار قائم به حلقه‌ها می‌گردد. این عمل باعث کاهش نیروی اصطکاکی جانبی بین حلقه‌ها و تسهیل حرکت جانبی آن‌ها می‌گردد؛ در نتیجه سختی جانبی سامانه کاهش می‌یابد. مکانیزم اصطکاکی موجود در سیستم مورد نظر، نیروی جانبی ناشی از باد، ارتعاشات محیطی و زلزله‌های خفیف را کنترل کرده، هنگام وقوع زلزله‌های شدید، سبب کاهش انتقال انرژی آن به سازه فوقانی می‌گردد. پس از پایان ارتعاشات ناشی از زلزله، فنریت مصالح لاستیکی باعث ایجاد نیروی بازگشتی شده، تغییر شکل‌های پس‌ماند در تکیه‌گاه را به شدت کاهش می‌دهد. حلقه‌های لغزشی محصور کننده در سیستم پیشنهادی ضمن جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های ناموزون و بزرگ در لاستیک، سختی قائم قابل توجهی به سیستم می‌دهد. ترکیب المان‌های لغزشی و الاستومری به صورت موازی در این سیستم سبب گردیده است که هم از قابلیت انعطاف پذیری و ابرکشسانی لاستیک برای افزایش پیروی سازه و ایجاد نیروی بازگشتی استفاده گردد و هم سبب ارتقای توان جذب انرژی توسط المان‌های لغزشی شود که سبب بی‌نیازی سیستم از میراکننده^{۱۱} اضافی می‌گردد. قابل ذکر است اتصالات قطعات جداساز الاستومری

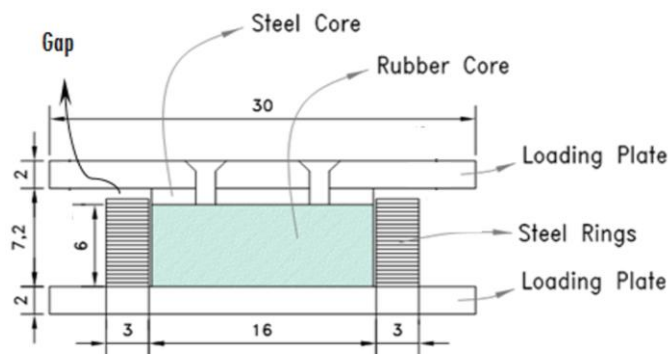
¹¹ Damper

معمول (مانند سیستم LRB) نیاز به دقت زیادی برای تنظیم ضخامت لایه‌های لاستیکی و انجام پروسه پرهزینه ولکانیزاسون^{۱۲} بین لایه‌های متعدد فولادی و لاستیک دارد؛ لیکن در سیستم ESI این عمل فقط برای اتصال هسته لاستیکی به هسته فولادی فوقانی و صفحه بارگذاری فولادی تحتانی صورت می‌گیرد که باعث صرفه‌جویی در هزینه و سهولت ساخت می‌شود. همچنین پس از وقوع زلزله‌های شدید تمام اجزای سیستم ESI قابل کنترل بوده و به جای کل سیستم فقط قطعات آسیب‌دیده احتمالی را می‌توان تعویض کرد. در صورت وقوع آتش‌سوزی نیز حلقه‌های فلزی مانع رسیدن اکسیژن به هسته لاستیکی شده میزان آسیب‌پذیری آن را کاهش می‌دهند.

در این مطالعه برای تحلیل سامانه ESI، نمونه‌ای با قطر ۲۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. جزئیات سامانه ESI در شکل ۱ و جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: مشخصات جداکننده (برحسب سانتیمتر)

قطر خارجی حلقه‌ها	قطر داخلی حلقه‌ها	ضخامت حلقه‌ها	تعداد حلقه‌ها	قطر هسته فولادی فوقانی	قطر هسته لاستیکی	ارتفاع هسته لاستیکی
۲۲	۱۶	۰/۳	۲۰	۱۶	۱۶	۶



شکل ۱: شمای سامانه ESI (برحسب cm)

۳- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی سامانه موردنظر از نرم‌افزار ANSYS 14 [۱۷] استفاده گردید. مدت‌زمان حل یک مسئله توسط نرم‌افزار فوق به عوامل مختلفی مانند پیچیدگی مسئله، نوع المان‌بندی و مشخصات سخت‌افزاری رایانه مورد استفاده بستگی دارد. چالش‌های این مطالعه عبارتند از: تحلیل سه‌بعدی سامانه برای مصالح غیرخطی لاستیک، المان‌های غیرخطی تماسی بین اجزای مختلف سامانه، جداشدگی و فشردگی حلقه‌ها به هم.

در این تحلیل المان‌های contact سطح به سطح برای مدل‌سازی سطوح تماس استفاده گردیده است که شامل سطوح تماسی بین حلقه‌های فولادی با یکدیگر و بین سطح جانبی حلقه‌های فولادی و هسته لاستیکی است. برای این منظور از المان‌های ۴ گرهی CONTA173 و المان‌های TARGET170 استفاده شده است [۱۸]. به منظور مدل‌سازی فولاد و لاستیک از المان Solid185 هشت گرهی استفاده گردیده است. به طوری که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در راستاهای X و Y و Z است. المان یادشده دارای قابلیت‌های پلاستیسیته، ابرکشسانی^{۱۳} و کرنش‌های بزرگ است. همچنین قابلیت ترکیب فرمول‌هایی را دارد که برای شبیه‌سازی تغییرشکل

¹² Vulcanization bonding process

¹³ Hyper elasticity

مواد تراکم ناپذیر یا تقریباً تراکم ناپذیر مناسب است [۱۸]. الاستومرها عموماً با مدل‌های ابرکشسان^{۱۴} مدل‌سازی می‌شوند؛ زیرا در تئوری، رفتار ماده الاستیک محسوب می‌شود؛ لیکن روابط تنش و کرنش به شدت غیرخطی هستند و رفتار ماده ایزوتروپیک و ایزوترمال است. به عبارتی دیگر ضرایب انبساط حرارتی، تنش و کرنش در تمام جهات یکسان است. در این مصالح دستیابی به یک حل همگرا و دقیق در هر تحلیل غیرخطی یک چالش محسوب می‌شود. تغییر حجم در این مصالح بسیار کم بوده، تقریباً تراکم ناپذیر هستند؛ لذا حداقل نسبت پواسون در این دست از مصالح برابر ۰/۴۹۹ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای مدل‌سازی هسته لاستیکی از مدل‌های ابرکشسان استفاده گردیده است [۱۹]؛ مدل‌های ابرکشسان برخلاف سایر مدل‌های بیان‌کننده رفتار مصالح بر اساس رابطه بین تنش و کرنش نوشته نشده‌اند و بیان ریاضی این مدل‌ها به شکل رابطه چگالی انرژی کرنشی (W) و نامتغیرهای^{۱۵} تانسور کرنش (I₁, I₂, I₃) یا سه نسبت کشیدگی اصلی^{۱۶} تانسور کوشی-گرین^{۱۷} به صورت زیر است [۱۸].

$$W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (۱)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (۲)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (۳)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (۴)$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (۵)$$

$$\bar{I}_1 = J^{-\frac{2}{3}} I_1 \quad (۶)$$

$$\bar{I}_2 = J^{-\frac{4}{3}} I_2 \quad (۷)$$

$$\bar{\lambda}_p = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_p \quad p=1,2,3 \quad (۸)$$

که برای ماده تراکم ناپذیر $J=1$ است.

چندین مدل برای شبیه‌سازی مصالح ابرکشسان با استفاده از روش اجزاء محدود وجود دارد. برخی از معروف‌ترین آن‌ها شامل مدل‌های مونی-ریولین^{۱۸}، آگدن^{۱۹}، یه‌او^{۲۰}، آرودا-بویس^{۲۱} می‌باشند. انتخاب بهترین مدل ماده، نقشی کلیدی در موفقیت تحلیل ایفا می‌کند. بهترین مدل ماده می‌بایست بهترین برازش را در محدوده تنش-کرنش مورد انتظار، داشته باشد [۱۹]. انتخاب بهترین مدل ماده، بر اساس فرآیند آزمون و خطا و با استفاده از برازش نتایج تست و پایداری حل انجام شده است و در نهایت برای مدل‌سازی هسته لاستیکی از مدل مونی-ریولین با فرم ذیل استفاده شده است [۱۸].

¹⁴ Hyperelastic

¹⁵ Invariants

¹⁶ The principal stretches

¹⁷ Cauchy-Green

¹⁸ Mooney-Rivlin model

¹⁹ Ogden model

²⁰ Yeoh model

²¹ Arruda-Boyce model

$$W = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^M \frac{1}{d} (J - 1)^{2k} \quad (9)$$

که فرم دوجمله‌ای آن به شکل ذیل است:

$$W_{(2)} = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (10)$$

مدل فوق علاوه بر قابلیت برازش مناسب، دارای همگرایی نسبتاً مطلوبی نیز هست و شبکه‌بندی المان نیز به‌گونه‌ای انجام گردیده است تا از بروز قفل‌شدگی برشی المان جلوگیری به عمل آید. المان‌های شش‌وجهی خطی هشت‌گره‌ی نمی‌توانند خمش را مدل‌سازی کنند زیرا لبه‌های المان پس از تغییرمکان مستقیم باقی می‌ماند و در خلال فرآیند خمش، المان کشیده شده سبب شود فرآیند سختی بیش از اندازه‌ای در یک مود تغییرمکانی رخ دهد که اغلب تحت عنوان قفل‌کنندگی برشی^{۲۲} یا برش مزاحم^{۲۳} تشریح می‌شود. لازم به توضیح است در مسائلی که ضریب پواسون به سمت ۰.۵ میل می‌کند (مانند مصالح ابرکشسان)، المان‌بندی ممکن است واقعاً قفل کند؛ به‌عبارتی دیگر در المان‌بندی انجام‌شده هیچ تغییرمکانی رخ نخواهد داد [۲۰]. در این مطالعه با توجه به موارد فوق با افزایش تعداد المانها و با رعایت نسبت ابعاد مناسب، به‌ویژه به هنگام بروز خمش و در نقاطی که دارای گرادیان زیادی از تنش است؛ به تحلیل مدلها پرداخته شد.

۴- بررسی رفتار اجزای سامانه پیشنهادی (ESI) تحت بارگذاری

در این بخش به بررسی رفتار سامانه پیشنهادی تحت اثر بارگذاری‌های فشاری و فشاری-برشی مختلف پرداخته شده است.

۴-۱- بررسی رفتار اجزای سامانه پیشنهادی تحت بارهای فشاری قائم مختلف

تنش، سختی و تغییرشکل‌های نمونه پیشنهادی تحت بارهای فشاری مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. در مرحله نخست با توجه به تنش مجاز در لاستیک و برآورد تنش متوسط در سامانه موردنظر، بار فشاری ۲۰۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شد. تحت بارگذاری یادشده، تغییرمکان قائم سامانه برابر ۱/۲۵ میلی‌متر به دست آمد که کمتر از فاصله صفحه بارگذاری و حلقه‌ها ناشی از حضور هسته فولادی است، لذا تماسی بین صفحه بارگذاری و حلقه‌ها برقرار نمی‌گردد و مانع انتقال بار قائم به حلقه‌های فولادی می‌شود. در این حالت میزان سختی قائم سامانه تحت بار قائم ۲۰۰ کیلونیوتن برابر با ۱۶۰ کیلونیوتن بر میلی‌متر به دست آمد و حداکثر تنش قائم S_y در هسته لاستیکی سامانه برابر ۱۱/۲ مگاپاسکال محاسبه گردید که بیش از تنش مجاز لاستیک است. قابل ذکر است این مقدار به صورت موضعی و در لبه‌های فوقانی لاستیک، در محل تماس لاستیک و حلقه فوقانی ایجاد شده است. تحت بارگذاری فوق، تنش متوسط در لاستیک برابر ۹/۹۴ مگاپاسکال به دست آمد و حداکثر تغییرشکل قائم در هسته لاستیکی، در بخش فوقانی لاستیک و در نزدیکی حلقه فوقانی رخ داده است و مقدار آن برابر ۱/۵۱ میلی‌متر است. همچنین کمترین تغییرشکل در حلقه‌های فولادی و بخش تحتانی لاستیک ایجاد شده است.

جدول ۲: مقادیر تنش، سختی و تغییرشکل در نمونه پیشنهادی

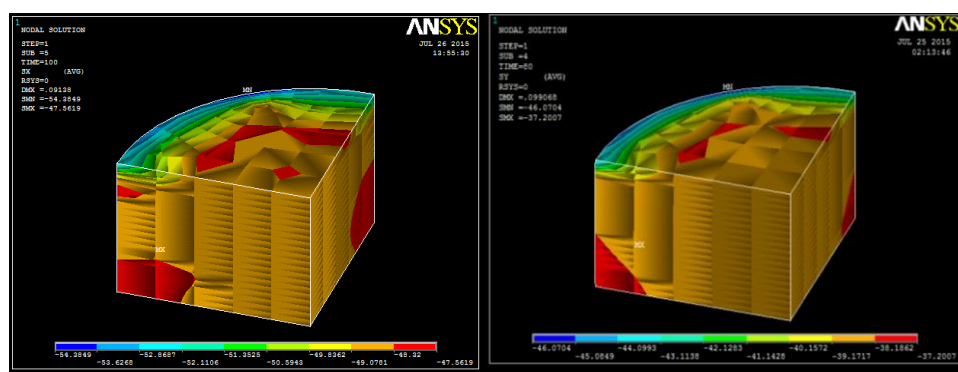
نیروی قائم	حداکثر تغییرشکل قائم صفحه	سختی (kN/mm)	فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی	تنش S_y در هسته لاستیکی	تنش S_x در هسته لاستیکی	تنش متوسط S_y در هسته	تنش S_y در فولاد	تنش S_x در فولاد

²² shear locking

²³ parasitic shear

(kN)	بارگذاری (mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	لاستیکی (MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
۲۰۰	۱/۲۵	۱۶۰	۱۱/۱	۱۱/۲	۱۱	۹/۹۴	۱۵/۲	۴۱/۳
۱۰۰	۰/۷۶	۱۳۱/۵۸	۵/۵	۴/۶	۵/۴	۴/۹	۷/۴۵	۱۶/۵

هنگامی که به سامانه بار قائم ۲۰۰ کیلونیوتن وارد می‌گردد، میزان فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی برابر ۱۱/۱ مگاپاسکال به دست آمد که نزدیک به تنش قائم در لاستیک است. حداکثر تنش‌های S_x و S_y در حلقه‌های فولادی ایجاد می‌گردد و مقدار آن‌ها به ترتیب برابر ۴۱/۳ و ۱۵/۲ مگاپاسکال است که بسیار کمتر از تنش مجاز فولاد است. در صورتی که بار قائم به ۱۵۰ کیلونیوتن کاهش یابد، تنش متوسط در هسته لاستیکی به میزان ۷/۴۶ مگاپاسکال خواهد بود که در مرز تنش مجاز است و برای بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن، تنش متوسط برابر ۴/۹ مگاپاسکال می‌شود که تقریباً برابر تنش محاسباتی هسته لاستیک تحت بار قائم است. تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن حداکثر تغییر مکان قائم در سطح صفحه بارگذاری برابر ۰/۷۶ میلی‌متر است و سختی سامانه تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن معادل ۱۳۱/۵۸ کیلونیوتن بر میلی‌متر است. شکل ۲ توزیع تنش جانبی S_x و S_y را در هسته لاستیکی تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف مشاهده می‌گردد حداکثر تنش S_x و S_y در هسته لاستیکی به ترتیب برابر ۵/۴ و ۴/۶ مگاپاسکال است که کمتر از تنش مجاز است.

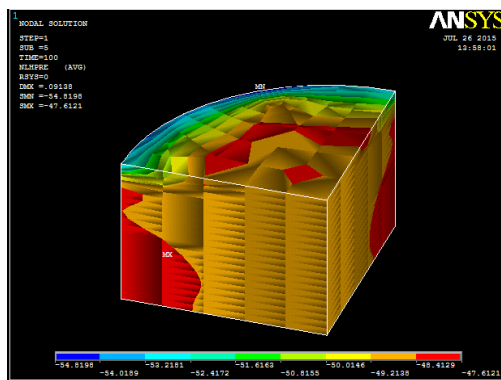


ب

الف

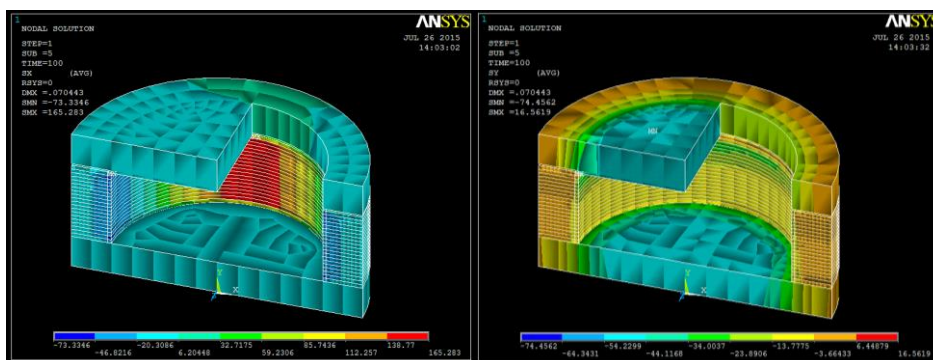
شکل ۲: رفتار هسته لاستیکی سامانه تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن الف- تنش S_x ب- تنش S_y (kg/cm^2)

شکل ۳ توزیع فشار هیدرواستاتیک را در هسته لاستیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تحت بارگذاری فوق، حداکثر فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی برابر ۵.۵ مگاپاسکال است که در لبه فوقانی هسته لاستیکی ایجاد شده و در حد مجاز است.



شکل ۳: نحوه توزیع فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی (kg/cm^2)

شکل ۴ توزیع تنش جانبی S_x و S_y را تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن در اجزای فولادی سامانه پیشنهادی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد حداکثر مقدار تنش‌های S_x و S_y به ترتیب برابر ۱۶/۵ و ۷/۴۵ مگاپاسکال به دست آمده است که بسیار کمتر از تنش مجاز هستند.



ب

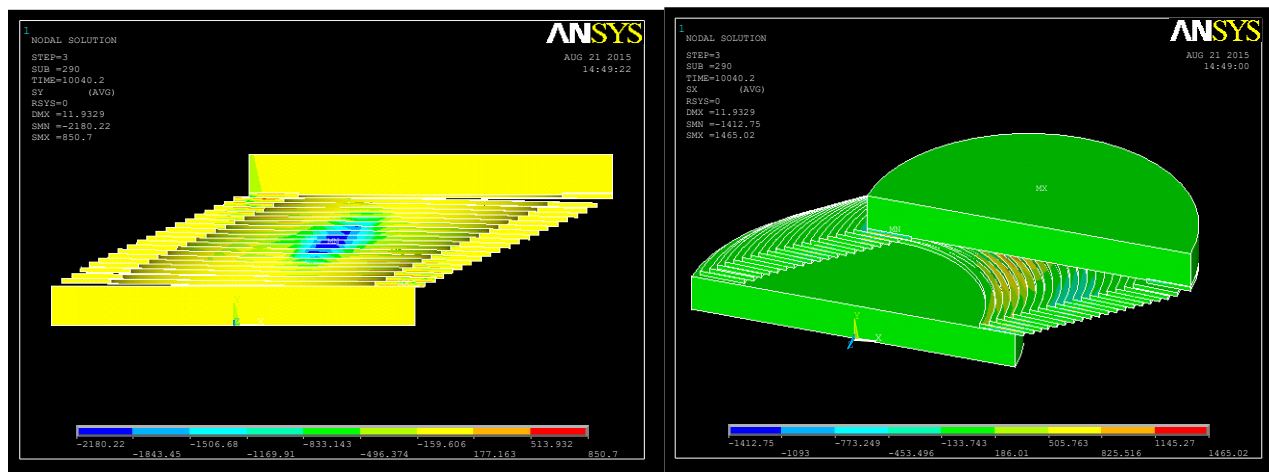
الف

شکل ۴: نحوه توزیع تنش در اجزای فولادی سامانه تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن الف- جانبی S_x ب- تنش جانبی S_y (kg/cm^2)

مطالعه فوق نشان داد که وجود حلقه‌ها باعث رفتار مناسب لاستیک محصور گردید و تنش‌های نرمال، فشار هیدرواستاتیک و تنش متوسط (۴/۹ مگاپاسکال) در لاستیک نزدیک به هم هستند؛ لذا محاسبه تنش متوسط در لاستیک مبنای مناسبی برای طراحی هسته لاستیکی در برابر بار قائم است.

۴-۲- بررسی رفتار سامانه ESI تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن و تغییر مکان برشی

تحت اثر بار جانبی ۴۰/۲ کیلونیوتن حداکثر تغییر مکان جانبی فوق برابر ۱۱/۹۳ سانتی‌متر به دست آمده است که نشان‌دهنده کرنش برشی در حدود ۲۰۰ درصد و سختی جانبی ۰/۳۳۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر است. شکل ۵ توزیع تنش S_x و S_y را در بخش‌های فولادی سامانه نشان می‌دهد. مقدار S_x و S_y تحت اثر کرنش برشی ۲۰۰ درصد، به ترتیب به مقدار ۱۴۶/۵ و ۲۱۸ مگاپاسکال رسیده است. جدول ۳ بیشینه تنش در حلقه‌های فولادی نمونه ESI تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن و کرنش برشی ۲۰۰٪ را نشان می‌دهد.



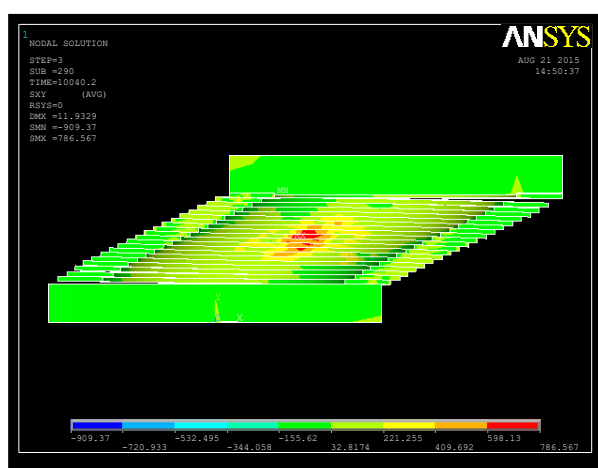
ب

الف

شکل ۵: نحوه توزیع تنش در المان‌های فولادی تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن و کرنش برشی ۲۰۰ درصد الف- S_x ب- S_y (kg/cm^2)

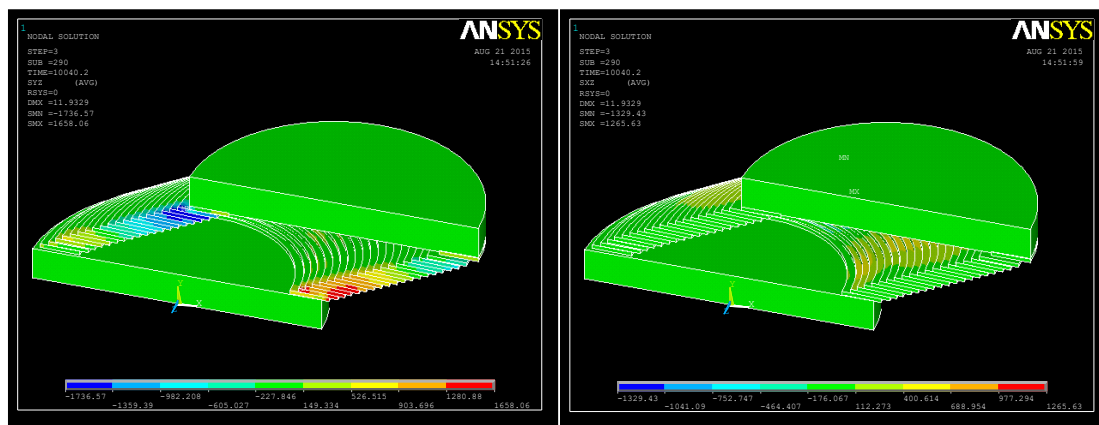
جدول ۳: بیشینه تنش در حلقه‌های فولادی نمونه ESI تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش برشی ۲۰۰٪

بیشینه تنش S_y در حلقه های فولادی (MPa)	بیشینه تنش S_x حلقه های فولادی (MPa)	بیشینه تنش S_{xy} حلقه های فولادی (MPa)	بیشینه تنش S_{xz} حلقه های فولادی (MPa)	بیشینه تنش S_{yz} حلقه های فولادی (MPa)
۲۱۸	۱۴۶.۵	۹۰.۹	۱۳۲.۹	۱۷۳.۸



شکل ۶: نحوه توزیع تنش S_{xy} در المان‌های فولادی تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن و بار جانبی ۴۰.۲ کیلونیوتن (kg/cm^2)

شکل ۶ نحوه توزیع تنش S_{xy} را در بخش‌های فولادی سامانه نشان می‌دهد. با بررسی تصویر مذکور مشخص می‌گردد که حداکثر مقدار تنش فوق تحت اثر کرنش برشی ۲۰۰ درصد، برابر ۹۰/۹ مگاپاسکال است.



ب

الف

شکل ۷: نحوه توزیع تنش در المان‌های فولادی تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن و بار جانبی ۴۰.۲ کیلونیوتن الف - S_{xz} ب - S_{yz} (kg/cm^2)

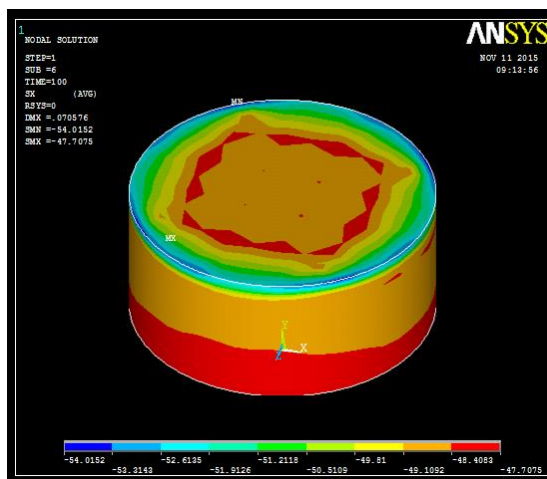
شکل ۷-الف توزیع تنش S_{xz} را در بخش‌های فولادی سامانه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌گردد مقدار تنش فوق تحت اثر کرنش برشی ۲۰۰ درصد، به مقدار ۱۳۲/۹ مگاپاسکال می‌رسد. شکل ۷-ب توزیع تنش S_{yz} را در بخش‌های فولادی سامانه نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر مزبور مشخص می‌گردد که مقدار تنش فوق تحت اثر کرنش برشی ۲۰۰ درصد، به مقدار ۱۷۳/۸ مگاپاسکال می‌رسد.

۳-۴- بررسی و مقایسه تنش در هسته لاستیکی سامانه ESI تحت کرنش‌های برشی مختلف با بار فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن

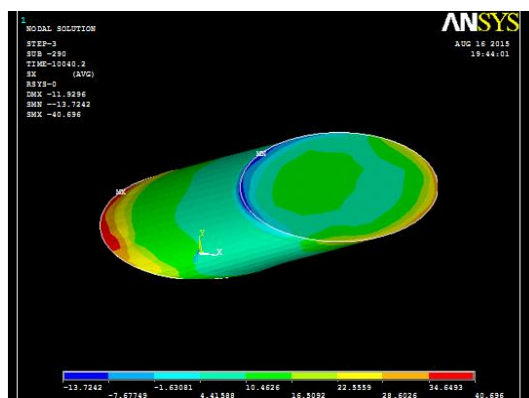
شکل ۸ نحوه توزیع تنش S_x وارد بر هسته لاستیکی را تحت بار ۱۰۰ کیلونیوتن نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد حداکثر تنش S_x در حالت بدون کرنش جانبی، برابر ۵/۴ مگاپاسکال است و تحت کرنش ۱۰۰ درصد کاهش یافته، به ۳/۶۷ مگاپاسکال رسیده است که حاکی از تنش‌زدایی در هسته لاستیک در اثر کرنش جانبی است؛ به طوری که میزان تنش S_x نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. تحت کرنش ۲۰۰ درصد حداکثر مقدار تنش فوق ۴/۰۷ مگاپاسکال است که ۲۵ درصد کاهش را نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی نشان می‌دهد. جدول ۴ مقادیر تنش در هسته لاستیکی نمونه ESI تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش‌های برشی مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقادیر تنش در هسته لاستیکی نمونه ESI تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش‌های برشی مختلف

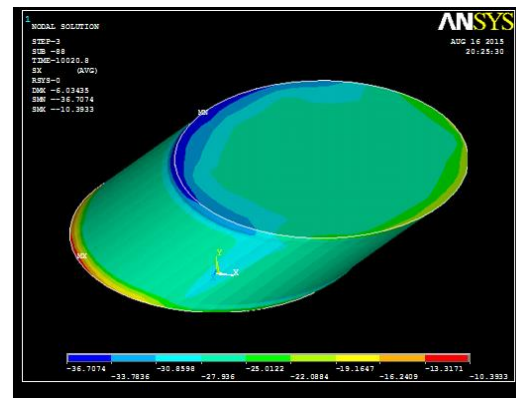
کرنش برشی	فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_z در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_y در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_x در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_{yz} در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_{xz} در هسته لاستیکی (MPa)	بیشینه تنش S_{xy} در هسته لاستیکی (MPa)
۰٪	۵.۴۴	۵.۴	۵.۵۳	۵.۴	۰.۰۸۸	۰.۰۴۴	۰.۰۸۸
۱۰۰٪	۴.۰۶	۴.۱۶	۴.۳۵	۳.۶۷	۰.۱۵	۰.۱۸	۰.۹۶
۲۰۰٪	۲.۲۵	۲.۶۴	۲.۷۶	۴.۰۷	۰.۲۶	۰.۵۴	۲.۰۸



الف

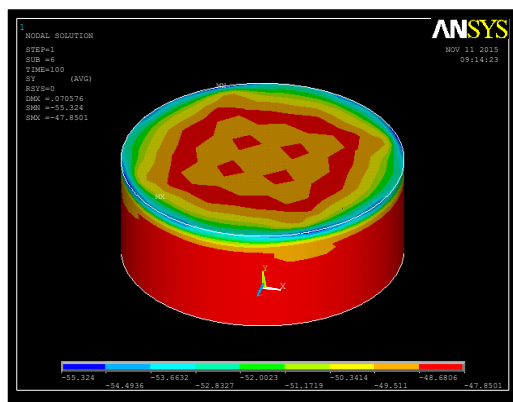


ج



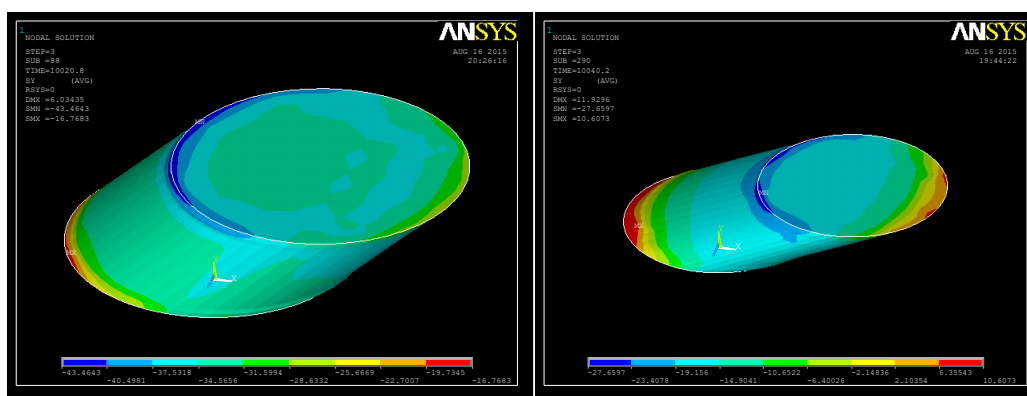
ب

شکل ۸: توزیع تنش S_x تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن الف- بدون کرنش برشی ب- با کرنش برشی ۱۰۰٪ ج- با کرنش برشی ۲۰۰٪ (kg/cm^2)



شکل ۹: نحوه توزیع تنش S_v تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن بدون حرکت جانبی

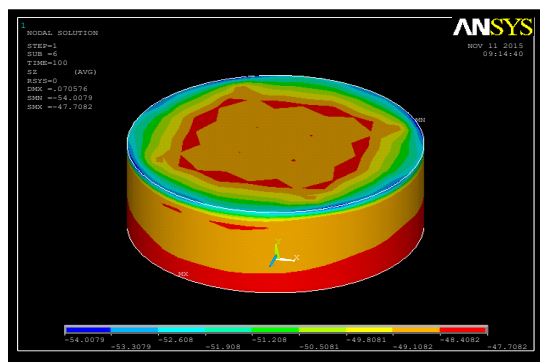
شکل ۹ و شکل ۱۰ نحوه توزیع تنش S_v را در هسته لاستیکی سامانه پیشنهادی، تحت بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌گردد حداکثر مقدار تنش وارد بر هسته لاستیکی در حالت بدون کرنش جانبی برابر $5/53$ مگاپاسکال است و تحت کرنش ۱۰۰ درصد حداکثر مقدار تنش S_v برابر $4/35$ مگاپاسکال است که ۲۱ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش یافته است. تحت کرنش ۲۰۰ درصد مقدار تنش فوق، $2/76$ مگاپاسکال به دست آمده است که نصف میزان تنش قائم در حالت بدون کرنش جانبی است لذا در مجموع می‌توان گفت که با افزایش کرنش جانبی، تنش زدایی در هسته لاستیکی افزایش یافته است.



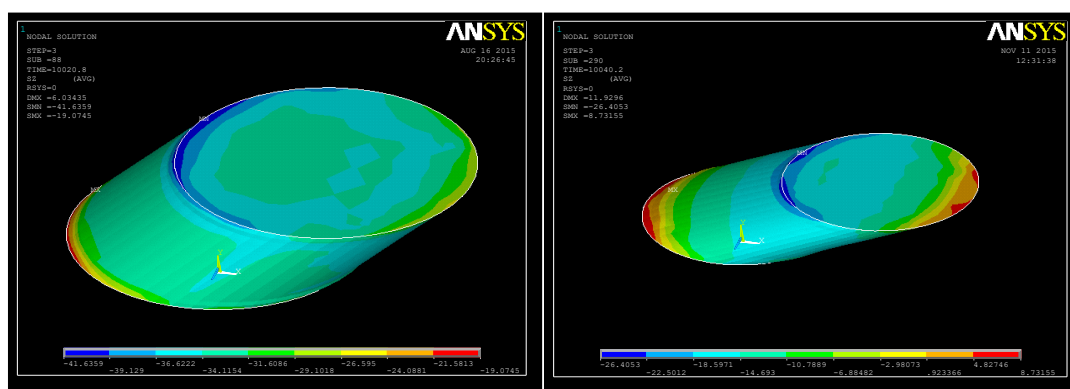
ب

الف

شکل ۱۰: توزیع تنش S_v تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن الف- تحت کرنش برشی ۱۰۰ درصد ب- تحت کرنش برشی ۲۰۰ درصد (kg/cm^2)



الف

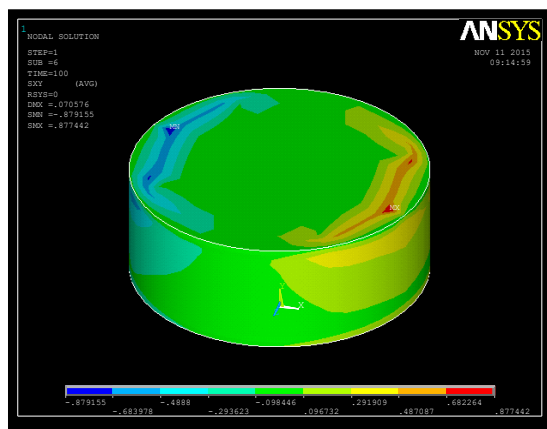


ج

ب

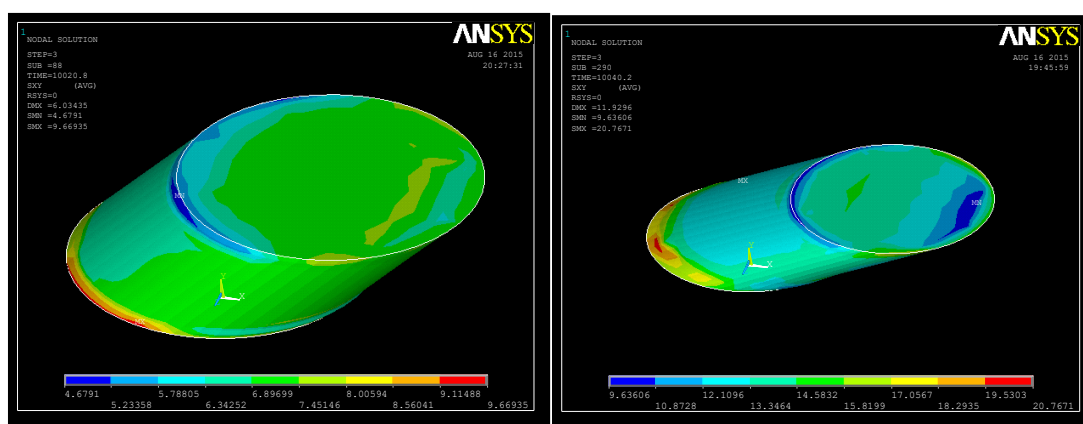
شکل ۱۱: نحوه توزیع تنش S_z تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن الف-بدون کرنش جانبی ب- با کرنش برشی ۱۰٪ ج- با کرنش برشی ۲۰٪ (kg/cm^2)

شکل ۱۱ نحوه توزیع تنش S_z را در هسته لاستیکی تحت نیروی فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن به نمایش می‌گذارد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد حداکثر مقدار تنش وارد بر لاستیک در صورتی که تحت تغییرمکان جانبی قرار نگیرد برابر ۵/۴ مگاپاسکال است و برای کرنش جانبی ۱۰ درصد، حداکثر مقدار تنش فوق ۴/۱۶ مگاپاسکال است که نشان‌دهنده کاهش ۲۳ درصدی تنش S_z نسبت به حالت بدون تغییرمکان جانبی است و تحت کرنش برشی ۲۰ درصد حداکثر تنش فوق ۲/۶۴ مگاپاسکال است که کمتر از نصف میزان تنش قائم، در حالت بدون کرنش جانبی است به عبارتی مقدار تنش S_z (تحت کرنش برشی ۲۰ درصد) ۵۱ درصد نسبت به حالت بدون تغییرمکان جانبی کاهش یافته است لذا با افزایش کرنش جانبی، در هسته لاستیک تنش‌زدایی صورت پذیرفته است.



شکل ۱۲: مقادیر تنش S_{xy} تحت نیروی ۱۰۰ کیلو نیوتن بدون کرنش برشی (kg/cm^2)

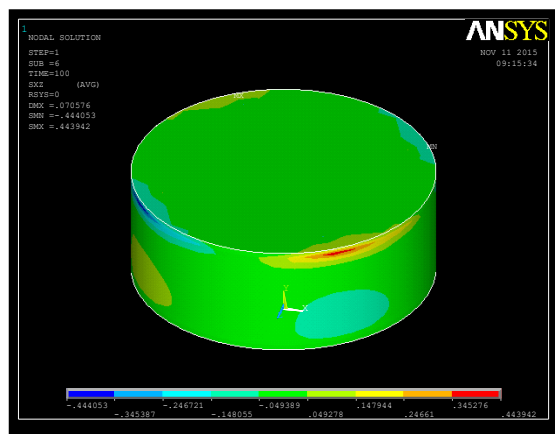
شکل ۱۲ توزیع تنش S_{xy} را در هسته لاستیکی تحت بار ۱۰۰ کیلو نیوتن در حالتی که سیستم تحت کرنش برشی قرار ندارد. نشان می دهد. مشاهده می گردد که در این حالت حداکثر مقدار تنش وارد بر لاستیک برابر $0/088$ مگاپاسکال است که مقدار ناچیزی است. شکل ۱۳ توزیع تنش S_{xy} را تحت بار ۱۰۰ کیلو نیوتن با کرنش های برشی ۱۰۰ و ۲۰۰ درصد نشان می دهد. مشاهده می گردد که تحت کرنش برشی ۱۰۰ درصد، حداکثر مقدار تنش $0/96$ مگاپاسکال است و برای کرنش برشی ۲۰۰ درصد، حداکثر مقدار تنش، $2/08$ مگاپاسکال است لذا مقادیر تنش S_{xy} در هسته لاستیکی با افزایش کرنش جانبی افزایش یافته است. قابل ذکر است مقادیر تنش S_{xy} در هسته لاستیکی، کمتر از حد مجاز است.



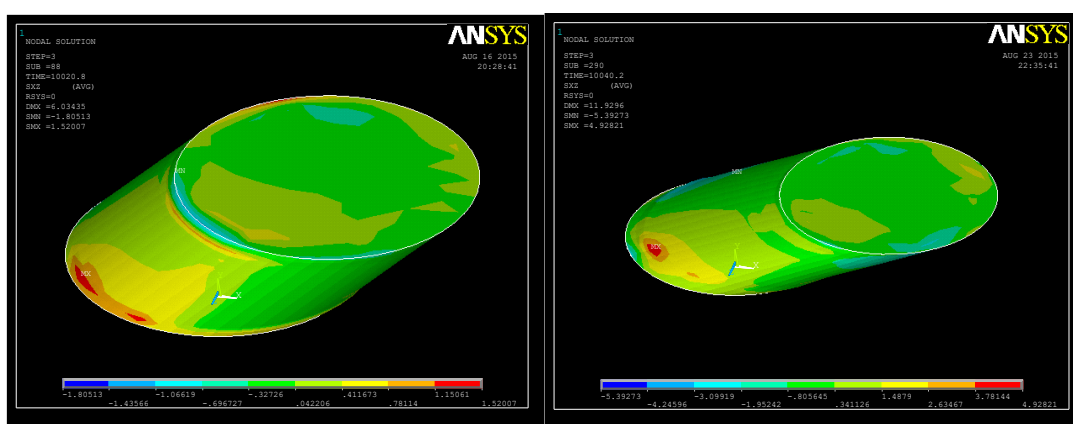
ب

الف

شکل ۱۳: توزیع تنش S_{xy} تحت نیروی ۱۰۰ کیلو نیوتن الف - تحت کرنش برشی ۱۰۰% ب - تحت کرنش برشی ۲۰۰% (kg/cm^2)



الف

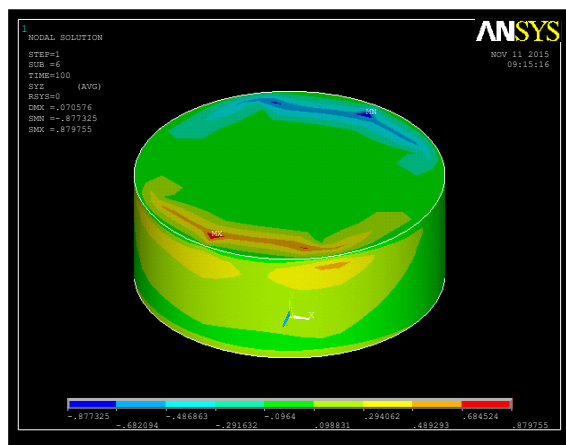


ج

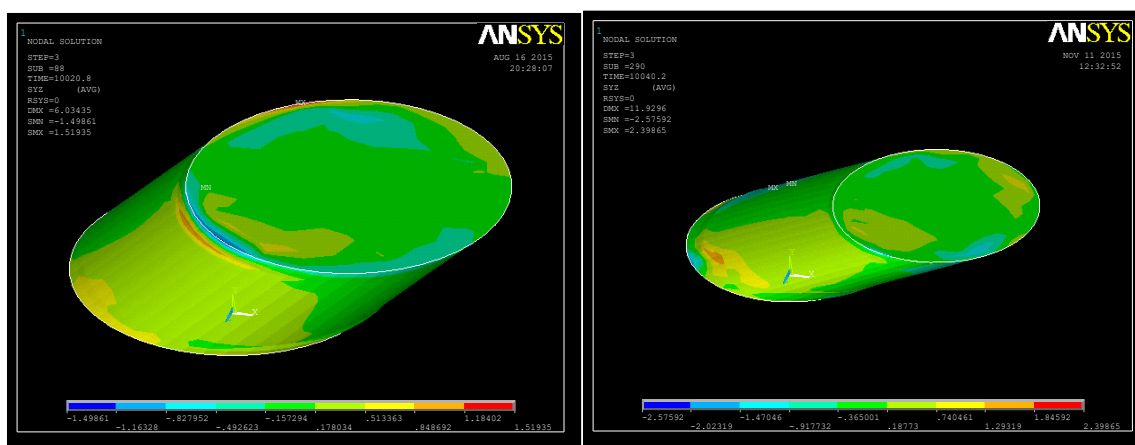
ب

شکل ۱۴: توزیع تنش S_{xz} تحت نیروی ۱۰۰ کیلونیوتن الف- بدون کرنش جانبی ب- تحت کرنش برشی ۱۰۰٪ ج- تحت کرنش برشی ۲۰۰٪ (kg/cm^2)

شکل ۱۴ توزیع تنش S_{xz} را تحت بار ۱۰۰ کیلونیوتن در هسته لاستیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در حالت بدون کرنش جانبی حداکثر مقدار تنش وارد بر هسته لاستیکی، برابر ۰/۰۴۴ مگاپاسکال است که مقدار ناچیزی است و می‌توان آن را در اثر تغییر شکل جانبی حلقه‌ها دانست. برای کرنش برشی ۱۰۰ درصد حداکثر مقدار تنش فوق ۰/۱۸ مگاپاسکال است و در کرنش برشی ۲۰۰ درصد حداکثر مقدار تنش فوق ۰/۵۴ مگاپاسکال است. همچنان که مشاهده می‌گردد مقادیر تنش S_{xz} در هسته لاستیکی در تمام موارد ناچیز بوده و پارامترهای طراحی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

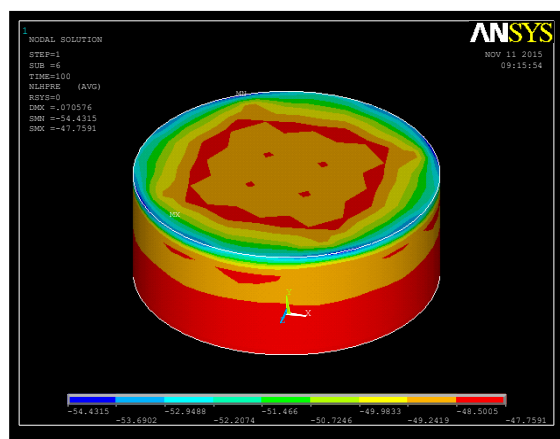


الف

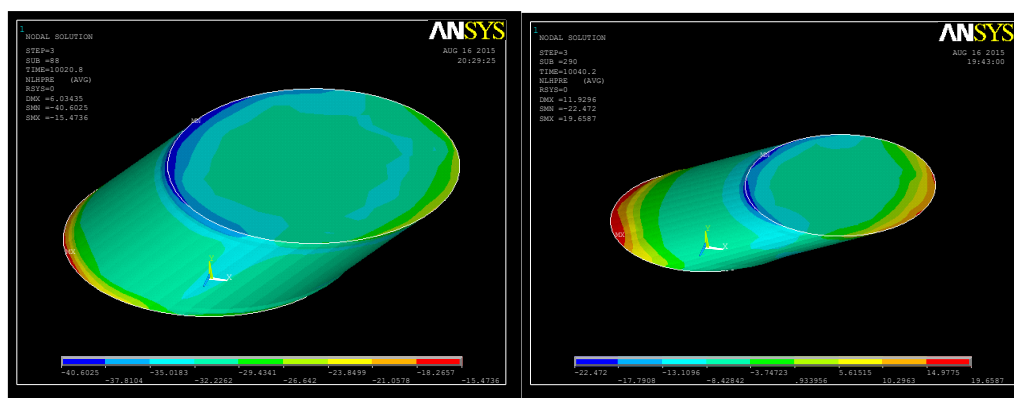


شکل ۱۵: توزیع تنش Syz تحت نیروی ۱۰۰ کیلونیوتن الف- بدون کرنش برشی ب- با کرنش برشی ۱۰۰٪ ج- با کرنش برشی ۲۰۰٪ (kg/cm^2)

شکل ۱۵ توزیع تنش Syz در هسته لاستیکی را تحت بار ۱۰۰ کیلونیوتن نشان می‌دهد. در حالت عدم وجود کرنش جانبی حداکثر مقدار تنش فوق ۰/۰۸۸ مگاپاسکال است و برای کرنش برشی ۱۰۰ درصد و ۲۰۰ درصد حداکثر مقدار تنش Syz به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۲۶ مگاپاسکال است. لذا همچنان که مشاهده می‌گردد، مقادیر تنش Syz در هسته لاستیکی در تمام موارد ناچیز بوده و پارامترهای طراحی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.



الف



ب

ج

شکل ۱۶: توزیع فشار هیدرواستاتیک الف- بدون کرنش برشی ب- کرنش برشی ۱۰۰ درصد ج- با کرنش برشی ۲۰۰ درصد (kg/cm^2)

شکل ۱۶ نحوه توزیع فشار هیدرواستاتیکی را در هسته لاستیکی، تحت بار قائم ۱۰۰ کیلونیوتن به نمایش می‌گذارد. در حالت بدون کرنش جانبی حداکثر مقدار فشار هیدرواستاتیکی وارد بر سامانه، برابر ۵/۴۴ مگاپاسکال است و برای کرنش برشی ۱۰۰ درصد برابر ۴/۰۶ مگاپاسکال است و نشان‌دهنده بیش از ۲۵ درصد کاهش نسبت به حالت بدون تغییرمکان جانبی است. در کرنش برشی ۲۰۰ درصد حداکثر مقدار فشار هیدرواستاتیک برابر ۲/۲۵ مگاپاسکال است که بیش از ۵۳ درصد کاهش را نسبت به حالت بدون تغییرمکان جانبی نشان می‌دهد.

۵- نتایج و بحث

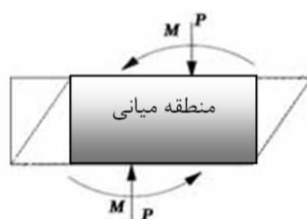
مطالعات تحلیلی انجام‌شده بر روی سامانه پیشنهادی نشان داد که عملکرد حلقه‌ها، باعث رفتار مناسب هسته لاستیکی محصور، شده است. با توجه به تراکم ناپذیری لاستیک، تنش‌های اصلی و فشار هیدرواستاتیک و تنش متوسط در لاستیک، نزدیک به هم است؛ از طرفی تحت بارگذاری فشاری محض، میزان حداکثر فشار هیدرواستاتیک در هسته لاستیکی برابر ۱۱ درصد بیش از تنش متوسط است. فشار فوق فقط در بخش محدودی از لبه فوقانی لاستیک ایجاد می‌گردد. لذا محاسبه تنش متوسط در لاستیک با لحاظ کردن ضریب

مناسب طراحی مبنای مناسبی برای طراحی هسته لاستیکی در برابر بار قائم است. به عبارتی استفاده از فرمول (۱۱) در تحلیل لاستیک تحت بار قائم مبنای مناسبی دارد.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (11)$$

که در آن σ میزان تنش متوسط در هسته لاستیکی و P و A به ترتیب کل بار قائم و سطح فوقانی هسته لاستیکی می‌باشند. تحلیل اجزای محدود سامانه نشان داد که تنش برشی در لاستیک تحت بار فشاری، مقدار ناچیزی است و قابل صرف نظر کردن است و هنگامی که نمونه تحلیلی تحت بار فشاری (۱۰۰ کیلو نیوتن) و کرنش برشی ۲۰۰ درصد قرار گرفت، مقدار فشار هیدرواستاتیک در لبه‌های هسته لاستیکی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این مقدار در لبه فوقانی برابر ۲/۲۴۷ مگاپاسکال است که کمتر از نصف فشار هیدرواستاتیک وارده تحت بار فشاری تنها است. لذا استفاده از فرمول (۱۱) در لاستیک مبنای مناسبی برای طراحی هسته لاستیکی هم در برابر بار قائم و هم در برابر بار جانبی است. با بررسی تنش در هسته لاستیکی مشخص گردید که مقادیر تنش S_x (در امتداد تغییر مکان جانبی) تحت بار فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش برشی ۱۰۰ درصد، ۳۲ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش می‌یابد؛ همچنین تنش فوق تحت بار فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش برشی ۲۰۰ درصد، ۲۵ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش یافته است. حداکثر مقدار تنش‌های S_y و S_z نیز تحت بار فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش ۱۰۰ درصد، به ترتیب ۲۳ و ۲۱ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش یافته‌اند. همچنین حداکثر مقدار تنش‌های S_y و S_z این تنش تحت بار فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش ۲۰۰ درصد، کمتر از نصف میزان آن‌ها در حالت بدون کرنش جانبی است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که هسته لاستیکی با افزایش کرنش جانبی، تنش‌زدایی شده و بخشی از بار وارد بر آن به حلقه‌های فولادی منتقل می‌شود.

مطالعات تحلیلی نشان داد که مقادیر تنش‌های برشی تحت بار قائم ناچیز است. لیکن کلیه تنش‌های برشی چه در حلقه‌های فولادی چه در هسته لاستیکی با افزایش کرنش برشی افزایش می‌یابد. باین حال مقادیر تنش‌های S_{xz} و S_{yz} در هسته لاستیکی تحت کرنش‌های برشی مختلف باز هم ناچیز است ولی تنش S_{xy} تحت کرنش برشی ۱۰۰ و ۲۰۰ درصد به ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۲/۰۸ مگاپاسکال است که هر دو در حد مجاز است. با بررسی فشار هیدرواستاتیکی در سامانه پیشنهادی مشخص گردید که مقادیر فشار هیدرواستاتیکی در هسته لاستیکی تحت بار فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتن و کرنش برشی ۱۰۰ درصد بیش از ۲۵ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش یافته است. مقادیر فشار فوق تحت کرنش برشی ۲۰۰ درصد نیز بیش از ۵۳ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش یافته است.



شکل ۱۷: منطقه میانی به وجود آمده در اثر تغییر مکان برشی

با مقایسه سامانه پیشنهادی با سامانه‌های الاستومری متداول (LRB) مشخص می‌گردد هنگامی که سامانه‌های الاستومری مطابق شکل ۱۷ (در اثر کرنش‌های برشی) تحت لنگر خمشی و بار قائم قرار می‌گیرند، بار فشاری توسط منطقه میانی بین صفحات فوقانی و تحتانی آن‌ها تحمل می‌شود و لنگر خمشی حاصل از اثر P -delta نیز توسط بخشی از سامانه که خارج از این محدوده است تحمل می‌گردد [۲]. اما در سامانه ESI وجود حلقه‌های فولادی باعث کاهش تنش‌های ناشی از اثر لنگر خمشی فوق بر هسته لاستیکی می‌گردد

زیرا در هنگام افزایش تغییر مکان‌های برشی، سامانه به حلقه‌های فولادی تکیه می‌کند که باعث جبران سطح مقطع کاهش یافته لاستیک می‌گردد. به عبارتی حلقه‌های فوق باعث افزایش سطح مقطع سامانه و بهبود ظرفیت باربری سامانه می‌گردند. مطالعات تحلیلی نشان داد که تمامی تنش‌های نرمال در هسته لاستیکی سامانه ESI تحت بارگذاری جانبی حتی تحت کرنش برشی ۲۰۰ درصد، کمتر از تنش حاصل از بارگذاری فشاری تنها است؛ لیکن در سامانه LRB همان‌گونه که در شکل ۱۷ دیده می‌شود تنش‌های فوق در لایه‌های لاستیکی با افزایش کرنش برشی افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی رفتار سامانه جداسازی نوین ESI در برابر بار فشاری و بار فشاری توأم با تغییر مکان جانبی پرداخته شد. سیستم مورد نظر از هسته لاستیکی مرکزی محصور در داخل حلقه‌های فولادی لغزشی تشکیل گردیده است که در آن بارگذاری قائم به‌طور مستقیم به هسته لاستیکی وارد می‌گردد و حلقه‌های فولادی تنها نقش محصورکنندگی داشته و بار قائم به آن‌ها وارد نمی‌شوند. برای تحلیل سیستم فوق از نرم‌افزار ANSYS14 استفاده گردید و برای مدل‌سازی فولاد و لاستیک از المان Solid185 هشت گرهی استفاده شد. برای مدل‌سازی هسته لاستیکی از مدل ابرکشسان مونی-ریولین استفاده گردید و در مدل‌سازی سطوح تماس بین حلقه‌های فولادی با یکدیگر و بین سطح جانبی حلقه‌های فولادی و هسته لاستیکی از المان‌های contact سطح به سطح استفاده گردید.

مطالعات تحلیلی انجام شده بر روی سامانه پیشنهادی نشان داد که عملکرد حلقه‌ها باعث رفتار مناسب هسته لاستیکی محصور، شده است. با توجه به تراکم ناپذیر بودن لاستیک، تنش‌های اصلی و فشار هیدرواستاتیک و تنش متوسط در لاستیک نزدیک به هم است؛ از طرفی تحت بارگذاری فشاری، حداکثر فشار هیدرواستاتیک در بخش محدودی از لبه فوقانی لاستیک ۱۱ درصد بیش از تنش متوسط است. لذا محاسبه تنش متوسط در لاستیک با لحاظ کردن ضریب مناسب طراحی، مبنای مناسبی برای طراحی هسته لاستیکی در برابر بار قائم است.

تحلیل اجزای محدود سامانه نشان داد که تنش برشی در لاستیک تحت بار فشاری محض، مقدار ناچیزی است و قابل صرف نظر کردن است. با افزایش حرکت جانبی مقادیر تنش‌های s_x , s_y , s_z در هسته لاستیکی کاهش چشمگیری می‌یابند و می‌توان نتیجه گرفت که در هسته لاستیکی با افزایش کرنش جانبی، تنش‌زدایی رخ می‌دهد و بخشی از بار وارد بر آن به حلقه‌های فولادی منتقل می‌شود. مطالعات تحلیلی نشان داد که مقادیر تنش‌های برشی تحت بار قائم ناچیز است. لیکن کلیه تنش‌های برشی چه در حلقه‌های فولادی چه در هسته لاستیکی با افزایش کرنش برشی افزایش می‌یابند ولی مقادیر تنش فوق در حد مجاز است.

در سامانه ESI سختی قائم و جانبی مناسبی توسط اندرکنش حلقه‌های فولادی و هسته الاستومری ایجاد می‌گردد؛ همچنین تحت بارگذاری قائم طراحی تمام تنش‌ها به مراتب کمتر از حد مجاز هستند. حلقه‌های فولادی با کنترل کرنش‌های جانبی لاستیک، سختی قائم سامانه را به‌صورت فوق‌العاده‌ای افزایش می‌دهند. به طوری که در نمونه مورد مطالعه تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن، مقدار سختی قائم سیستم به ۱۳۱ کیلو نیوتن بر میلی‌متر می‌رسد. در اثر حرکت جانبی، بخشی از بار قائم به حلقه‌های فولادی منتقل شده که ضمن تنش‌زدایی از هسته لاستیکی، سبب افزایش میرایی اصطکاکی سامانه می‌گردد به طوری که در نمونه مورد مطالعه تحت اثر بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن، مقادیر تنش‌های s_x (در امتداد تغییر مکان جانبی) و s_z و s_y در هسته لاستیکی، تحت کرنش برشی ۲۰۰ درصد، به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد و ۵۱ درصد نسبت به حالت بدون تغییر مکان جانبی کاهش می‌یابد. مکانیزم اصطکاکی موجود در سامانه یاد شده، نیروهای جانبی ناشی از باد، ارتعاشات محیطی و زلزله‌های خفیف را کنترل کرده؛ هنگام وقوع زلزله‌های شدید سبب کاهش انتقال نیروهای جانبی به سازه فوقانی می‌گردد. پس از پایان ارتعاشات ناشی از زلزله، قابلیت کشسانی لاستیک باعث ایجاد نیروی بازگشتی شده، تغییر شکل‌های پس‌ماند در تکیه‌گاه را به‌شدت کاهش می‌دهد. از دیگر مزایای این سامانه، سهولت ساخت و ارزان‌تر بودن نسبت به جداسازهای متداول است. از طرفی با مقایسه سامانه ESI با سامانه‌های الاستومری متداول مشخص می‌گردد که وجود حلقه‌های فولادی در سامانه پیشنهادی باعث کاهش تنش‌های ناشی از اثر لنگر خمشی حاصل از اثر P-delta بر هسته لاستیکی می‌گردد زیرا در هنگام افزایش تغییر مکان‌های

برشی، سامانه به حلقه‌های فولادی تکیه می‌کند که باعث جبران سطح مقطع کاهش یافته لاستیک می‌گردد. به عبارتی حلقه‌های فوق باعث افزایش سطح مقطع سامانه و بهبود ظرفیت باربری سامانه می‌گردند. لیکن در سامانه LRB تنش‌های فوق در لایه‌های لاستیکی با افزایش کرنش برشی افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر حرکت جانبی در سیستم پیشنهادی سبب کاهش چشمگیر تنش‌های حاصل از بار قائم در هسته لاستیکی می‌گردد؛ لذا تحت حرکات جانبی امکان آسیب به هسته لاستیکی بسیار کمتر از سیستم متداول الاستومری است. نوآوری های این سامانه عبارتند از:

۱- استفاده از خصوصیت تراکم ناپذیری لاستیک برای افزایش سختی قائم سیستم.

۲- ترکیب المانهای لغزشی و الاستومری به صورت موازی در یک سیستم (به این وسیله هم می‌توان از انعطاف پذیری و خاصیت ابرکشسانی لاستیک برای افزایش پریود سازه و ایجاد نیروی بازگشتی استفاده کرد و هم سبب ارتقای توان جذب انرژی توسط المان های لغزشی شد).

۳- استفاده از هسته لاستیکی منفرد و کاهش پروسه پرهزینه ولکانیزاسیون که امروزه در سیستم های متداول الاستومری برای اتصال لایه‌های متعدد فولادی و لاستیک صورت می‌پذیرد.

مراجع

- [1] Shakib, H. and Alirezaei, M. (2012). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Tehran: Azarin Mehr, 697.
- [2] Kelly, J. M., and Konstantinidis, D. (2011). *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation*. John Wiley & Sons.
- [3] Li, L. (1984). Base isolation measure for aseismic buildings in China. *In Proceedings of the 8th World conference on earthquake engineering*. San Francisco: Prentice-Hall, 791-798.
- [4] Mostaghel, N., Hejazi, M., Tanbakuchi, J. (1983). Response of sliding structures to harmonic support motion. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 11(3), 355-366.
- [5] Mostaghel, N. and Tanbakuchi, J. (1983). Response of sliding structures to earthquake support motion. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 11(6), 729-748.
- [6] Zhang, J. Ding, Y. Guan, X. Ou, J. (2023). Mechanical properties of innovative prefabricated friction pendulum bearing with concrete-filled steel tube system. *Journal of Building Engineering*, 69, 106170.
- [7] Afrough, S. Yazdian, M. Tajammolian, H. (2018). Seismic Fragility Assessment of Steel Structures Supported on Friction Pendulum Isolators Subjected to Far-Field Ground Motions. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(2), 95-114.
- [8] Peng, T. Yan, B. Li, F. (2022). The hysteresis model of the friction pendulum bearing based on the moment balance theory. *Ain Shams Engineering Journal* 13(4), 101707.
- [9] Gueraud, R., Noel-Leroux, J. P., Livolant, M., Michalopoulos, A. P. (1985). Seismic isolation using sliding-elastomer bearing pads. *Nuclear Engineering and Design*, 84(3), 363-377.
- [10] Mostaghel, N. and Khodaverdian, M. (1988). Seismic response of structures supported on R-FBI system. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(6), 839-854.
- [11] Chen, Y. and Ahmadi, G. (1992). Stochastic earthquake response of secondary systems in base-isolated structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 21(12), 1039-1057.
- [12] Naeim, F. and Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- [13] Mostaghel, N. and Khodaverdian, M. (1987). Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI). *Earthquake engineering & structural dynamics*, 15(3), 379-390.

- [14] Fan, F. G., Ahmadi, G., Mostaghel, N., Tadjbakhsh, I. G. (1991). Performance analysis of aseismic base isolation systems for a multi-story building. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 10(3), 152-171.
- [15] Hong, W. K. and Kim, H. C. (2004). Performance of a multi-story structure with a resilient-friction base isolation system. *Computers and Structures*, 82, 2271-2283.
- [16] Pourmohammad, H., Ziaei, F. M., Ghafouri, A. M. (2006). Elastomeric Isolators with Steel Rings: A Theoretical, Experimental and Numerical Study. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 8(2), 135-144.
- [17] Mozaheb, S. A. and Behnamfar, F. (2018). A new elastomeric-sliding seismic isolation system. *Journal of Vibroengineering*, 20(2), 1063-1074.
- [18] ANSYS documentation, release 14. (2013), ANSYS Ltd.
- [19] Youssef, G. (2022). *Applied Mechanics of Polymers Properties, Processing, and Behavior*. First Edition. Amsterdam, Elsevier, 305.
- [20] Logan, D.L. (2016). *A first course in the finite element method*. 6, Boston, Cengage Learning, 992.