



ارائه روش جدید استفاده از رولبرینگ‌ها در اطراف هسته در مهاربند کمانش‌تاب تمام‌فولادی

بهمن شروانی تبار^{۱*}، حامد افکاریان باقرزاده^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

*تبریز، صندوق پستی، ۷۱۳۷۹-۵۳۷۵۱ b.shervani@yahoo.com

چکیده

برای جلوگیری از حرکت‌های جانبی ناشی از زمین‌لرزه و باد، مهاربندهای مختلفی در سازه‌ها به‌کار گرفته می‌شود. یکی از انواع مهاربندها، مهاربندهای کمانش‌تاب (BRBs) است که شامل هسته فولادی و یک غلاف است. این غلاف ممکن است تمام‌فولادی یا فولادی-بتنی باشد؛ البته مصالح دیگری هم به‌کار گرفته می‌شود. در این تحقیق روش نوینی برای بهبود عملکرد مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی ارائه شده است. بدین ترتیب که یک صفحه مشبک پرشده از گریس به همراه رولبرینگ‌ها (استوانه‌های توپر کوچک فولادی)، در دو طرف هسته به غلاف متصل شده و هنگامی که هسته تحت بارهای وارد، به صورت غیرارتجاعی (غیرخطی) تغییر طول کششی و یا فشاری از خود نشان می‌دهد، این رفت و برگشت‌ها بر روی این رولبرینگ‌ها که در یک فضای پرشده از گریس قرار دارند، انجام می‌گیرد. لذا اصطکاک بین هسته و غلاف کاهش یافته و از انتقال نیروهای محوری به غلاف جلوگیری می‌شود. همچنین به‌علت روان‌تر شدن حرکت رفت و برگشتی هسته در داخل غلاف، احتمال گسیختگی زود هنگام هسته از بین می‌رود. انواع مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی با و بدون استفاده از روش جدید، توسط تحلیل اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته و مزایای روش جدید نشان داده شده است. کاهش نیروهای اصطکاکی وارد به غلاف، در نمونه‌های با رولبرینگ نسبت به نمونه‌های مشابه بدون رولبرینگ حداقل ۴۵ و حداکثر ۶۳ درصد است.

واژگان کلیدی

مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی، رولبرینگ، تحلیل اجزاء محدود، نیروهای اصطکاکی، اعوجاج هسته

Introducing a New Method of Using Roller Bearings Around the Core Plate of All-Steel Buckling Restrained Braces

B. Shervani Tabar^{1*}, H. Afkarian Bagherzadeh²

Abstract

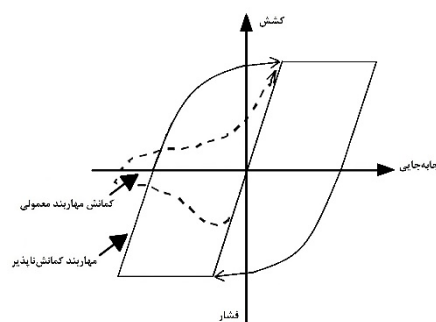
Various bracing systems can be used to withstand lateral displacements caused by earthquakes and wind. One of these systems is Buckling Restrained Braces (BRBs), which consist of a steel core known as a "core plate" and a buckling restraining mechanism (BRM) made of full steel, concrete-steel, or other materials. This study presents a novel method to enhance the performance of all-steel BRBs. In this new method, a lubricated perforated steel plate with roller bearings (small solid steel cylinders) is attached to both sides of the core plate within the BRM. During plastic elongation and contraction of the core plate due to tension or compression loads, these movements occur on the roller bearings, which are housed in a grease-filled space. As a result, the friction between the core plate and the BRM is reduced, preventing the transmission of axial forces to the BRM. Additionally, the reciprocating movement of the core plate inside the BRM is smoothed, eliminating the risk of premature core plate failure. Finite element analysis has been conducted to analyze various types of all-steel BRBs with and without the new method, demonstrating the advantages of the proposed approach. The inclusion of roller bearings in the samples reduces frictional forces on the sheath by at least 45% and up to 63% compared to similar samples without roller bearings.

Keywords

All-Steel Buckling Restrained Braces (BRBs), Roller Bearing, Finite Element Method, Frictional Forces, Core Deflection



یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای مقابله با زمین‌لرزه‌های احتمالی شدید، استفاده از سیستم مهاربندی است. استفاده از این سیستم در سازه‌ها، سختی جانبی مطلوبی را در برابر نیروهای لرزه‌ای فراهم می‌آورد. مهاربندها در حالت کلی به دو گروه مهاربندهای همگرا و واگرا تقسیم می‌شوند [۱]. در این میان، استفاده از مهاربندهای همگرا یکی از روش‌های مؤثر در برابر بارهای جانبی وارد به سازه به‌شمار می‌روند، در حالی که در مقابله با نیازهای شکل‌پذیری زیاد، رفتار غیرشکل‌پذیر از خود نشان می‌دهند. وقتی نیروی فشاری به آن‌ها وارد می‌شود، کاهش چشم‌گیری در سختی و ظرفیت مهاربند ایجاد شده که نهایتاً با ایجاد مفاصل پلاستیک، مهاربند دچار کماتش می‌شود. از طرفی رفتار نامتعادل در ظرفیت کششی و فشاری منجر به رفتار نامطلوب مهاربند می‌شود [۲]. یکی از روش‌های برطرف کردن معایب عملکردی در مهاربندهای همگرا، استفاده از سیستم مهاربندی به نام مهاربند کماتش‌تاب^۱ است. شکل (۱) رفتار این دو نوع مهاربند را مقایسه می‌کند.



شکل ۱- مقایسه رفتار مهاربندهای همگرای معمولی با مهاربندهای کماتش‌تاب [۳]

مهاربندهای کماتش‌تاب در واقع نوع جدیدی از مهاربندهای همگرای ویژه به‌شمار می‌روند که تحت فشار و کشش در حالت تسلیم رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند و دارای رفتار هیستریزیس متعادلی هستند.

در مهاربندهای کماتش‌تاب، هسته فولادی نیروی محوری را تحمل می‌کند و غلاف نیز با ایجاد تکیه‌گاه جانبی مانع کماتش کلی می‌شود. وقتی که مهاربند تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد، هسته دچار اعوجاج سینوسی شده و باعث اعمال نیروهای

عمودی و مماسی به غلاف یا مکانیزم مهارکننده می‌شود. به‌منظور کاهش نیروهای عمودی و مماسی وارد بر غلاف، یک لایه ماده جداکننده یا یک فضای خالی کوچک بین هسته فولادی و غلاف تعبیه می‌شود [۴].

نوع مهاربندی که امروزه به‌عنوان مهاربند کماتش‌تاب شناخته می‌شود، اولین بار توسط واتاناب^۲ و همکارانش در سال ۱۹۸۸ در کشور ژاپن ارائه شد [۵]. در سال‌های بعد نوع دیگری از این نوع مهاربندها معرفی شد که در آن‌ها ملات حذف گردیده و مکانیزم غلاف، کاملاً فولادی است. این نوع مهاربندها که دارای هسته و غلاف فولادی هستند، به مهاربندهای کماتش‌تاب تمام‌فولادی معروف‌اند.

سابلی^۳ و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از مهاربندهای کماتش‌تاب در سازه‌های سه و شش طبقه به بررسی پاسخ سازه در برابر تحریکات لرزه‌ای اعمال‌شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مهاربندهای کماتش‌تاب بر مشکلات مربوط به قاب‌های مهاربندی همگرا، به‌طور مؤثری فائق آمده و آن‌ها را حل نموده است [۶].

ایواتا^۴ (۲۰۰۴) چهار نمونه از مهاربندهای کماتش‌تاب پرکاربرد صنعتی را مورد آزمایش قرار داد؛ منحنی‌های هیستریزیس به‌دست‌آمده از این نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهند نمونه‌هایی که دارای ماده جداکننده هستند، رفتار مناسب‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. همچنین نمونه‌های مشابه با نمونه‌های ارائه‌شده توسط واتاناب مناسب‌ترین عملکرد را در بین نمونه‌های مورد آزمایش داشتند [۷].

کیانگ^۵ (۲۰۰۵) مطالعاتی را در رابطه با مهاربندهای کماتش‌تاب انجام داد. در این پژوهش انواع BRB و پیشرفت‌های مربوط به آن مورد بررسی و عملکرد خوب آن در مقابل زمین‌لرزه‌ها مورد تأیید قرار گرفته است [۸].

ترمبلی^۶ و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی بر روی مهاربندهای کماتش‌تاب تمام‌فولادی و فولادی-بتنی انجام دادند. آن‌ها با مطالعه تجربی بر روی شش نمونه مهاربند کماتش‌تاب با طول هسته و غلاف‌های متفاوت، عملکرد شکل‌پذیر و ثابتی را ملاحظه کردند [۹].

کورزکوا^۷ و ترمبلی (۲۰۰۹) مدل المان محدودی را جهت بررسی رفتار غیرارتجاعی چرخه‌ای مهاربندهای کماتش‌تاب

⁵ X. Qiang

⁶ R. Tremblay

⁷ A. Korzekwa

¹ BRBs

² A. Watanabe

³ R. Sabelli

⁴ M. Iwata

تمام فولادی ارائه کردند. در این مطالعه آن‌ها با مدل سازی عددی نمونه های آزمایش های قبلی **ترمبلی و همکاران** (۲۰۰۶)، توانستند به تقریب نسبتاً دقیقی از رفتار مهاربندهای کمانش تاب در فضای المان محدود دست یابند.

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروهای اصطکاکی ایجاد شده حین تماس هسته و غلاف فولادی و همچنین فاصله بین هسته و غلاف در عملکرد مهاربندهای کمانش تاب مؤثر هستند؛ بنابراین ضریب اصطکاک بین هسته و غلاف فولادی در عملکرد کلی مهاربند مؤثر است [۱۰].

هویدایی و رافضی (۲۰۱۲) به بررسی پارامترهای مؤثر در طراحی و عملکرد مهاربندهای کمانش تاب تمام فولادی نظیر تأثیر نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ ، فضای خالی بین هسته و غلاف و ضریب اصطکاک بین آن‌ها پرداختند. آن‌ها با انجام تحلیل المان محدود روی ۱۳ نمونه مدل سازی شده نشان دادند که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان، نسبت $\frac{P_e}{P_y} \geq 1.4$ برای مهاربندهای کمانش تاب تمام فولادی کافی خواهد بود [۱۱].

شروانی تبار و جنگ آرا (۲۰۱۵) مطالعاتی را در زمینه مهاربندهای کمانش تاب انجام دادند و به منظور کاهش اصطکاک بین هسته و غلاف یک روش جدید را پیشنهاد داده و مؤثر بودن آن را با تحلیل المان محدود نشان دادند. در این روش، ماده جداکننده و فضای خالی بین هسته و غلاف با یک شبکه فلزی پر شده از گریس جایگزین گردید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با این روش میزان کمانش موضعی هسته، نیروهای اصطکاکی بین هسته و غلاف و نیروهای محوری انتقال یافته به غلاف کاهش یافته و عملکرد مهاربند بهبود می یابد [۱۲].

جیانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی نوع جدیدی از مهاربندهای کمانش تاب جهت حذف اثرات کمانش موضعی، دو مقطع T شکل را به عنوان عناصر مهارکننده صفحه هسته به جای بتن پر شده یا ملات معرفی کردند [۱۳].

یون^۲ و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی کاربرد مهاربندهای کمانش تاب در طراحی ساختمان های مقاوم در برابر زلزله به عنوان یک عنصر سازه ای، نشان دادند که نه تنها به استحکام و سختی سازه می افزاید، بلکه قابلیت جذب انرژی را در سطح بسیار مطلوبی فراهم می کند [۱۴].

چیگویی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد لرزه ای مهاربندهای کمانش تاب سه هسته ای پرداختند. در این تحقیق مهاربندهای تک هسته ای و سه هسته ای با تنش های تسلیم متفاوت مقایسه گردید و نشان داده شد که مهاربند کمانش تاب سه هسته ای تحت بارگذاری های چرخه ای جذب و اتلاف انرژی را افزایش می دهد [۱۵].

کیو^۴ و همکاران (۲۰۲۲) ترکیب مهاربندهای کمانش تاب معمولی و مهاربندهای کمانش تاب حاوی آلیاژ حافظه دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ترکیب مذکور می تواند در عملکرد بهتر سازه ها مؤثر باشد [۱۶].

أولاه^۵ و همکاران (۲۰۲۲) طی یک مقاله مروری به بررسی چالش های مرتبط با طراحی، ساخت، اجرا و هزینه های مهاربندهای کمانش تاب پرداختند [۱۷].

کاظمی و جانکوسکی^۶ (۲۰۲۳) به ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب های با مهاربند کمانش تاب فولادی دارای هسته ای از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر حداکثر گشتاور و چرخش لولاهای اعضای سازه با استفاده از این روش کاهش و سطح عملکرد سازه مورد بررسی بهبود می یابد [۱۸].

ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی مهاربند کمانش تاب از نوع خودمحمور با هدف کنترل بهتر پاسخ های سازه ای تحت زلزله هایی با سطوح شدت مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می تواند به طور مؤثری جابه جایی را در طبقات پایین تر محدود کند [۱۹].

۲- مسئله کمانش کلی در مهاربندهای کمانش تاب

تمامی مهاربندهای کمانش تابی که در اشکال مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند، از یک مفهوم خاص تبعیت می کنند. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود طرح کلی مهاربندهای کمانش تاب از یک هسته فولادی شکل پذیر تشکیل یافته است که این هسته فولادی، هم تحت کشش و هم تحت فشار به تسلیم می رسد.

⁵ R. Ullah

⁶ R. Jankowski

⁷ Ch. Zhang

¹ T. Jiang

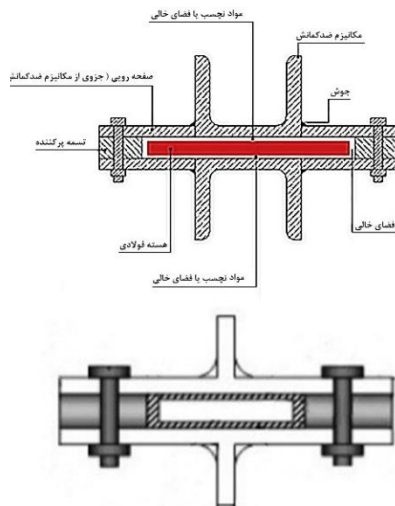
² Zh. Yun

³ A. Chigoi

⁴ C. Qiu



به جای بتن موجود در غلاف از صفحات فولادی با مقاومت زیاد استفاده می‌شود که می‌توانند سختی خمشی مورد نظر غلاف را تأمین نمایند؛ این صفحات در این تحقیق صفحه اصلی غلاف نامیده می‌شوند. هسته در داخل این دو صفحه قرار می‌گیرد و در دو طرف، هسته توسط دو لقمه طولی محدود می‌شود. دو صفحه اصلی غلاف و دو لقمه طولی با پیچ و مهره‌هایی به یکدیگر متصل می‌شوند و غلاف را تشکیل می‌دهند.

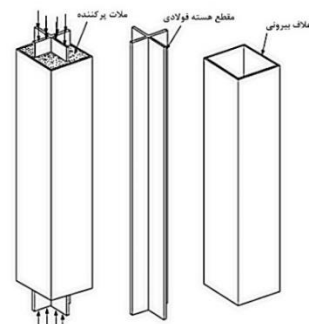


شکل ۴- مهارندهای کمانش تاب تمام فولادی [۸ و ۲۰]

به‌منظور رعایت اثرات پواسون و کاهش نیروهای محوری اعمالی به غلاف می‌توان در کنار روش‌های رایج در مدل‌های مشابه قبلی، از روش روغن‌کاری نیز استفاده نمود. در این روش سطوح هسته و غلاف روغن‌کاری می‌شوند تا اصطکاک بین آن‌ها به حداقل برسد. روش جدید معرفی شده در این مقاله، یعنی استفاده از رولربرینگ‌ها در اطراف هسته، در مهارندهای تمام فولادی قابل استفاده خواهد بود.

بارگذاری چرخه‌ای به‌صورت تغییر مکان محوری هسته فولادی انجام می‌پذیرد و در آن هر سیکل شامل یک کشش و فشار کامل با توجه به تغییر مکان مورد نظر است. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای در آیین‌نامه (AISC 341-16 (2010) به‌صورت زیر است [۲۱]: (در بخش ۵-۱ تشریح نمونه‌ها به توضیح این علائم پرداخته می‌شود).

$$\begin{aligned} \Delta_b &= \pm \Delta_{by} & \text{۲- سیکل در} \\ \Delta_b &= \pm 0.5 \Delta_{bm} & \text{۲- سیکل در} \\ \Delta_b &= \pm \Delta_{bm} & \text{۲- سیکل در} \\ \Delta_b &= \pm 1.5 \Delta_{bm} & \text{۲- سیکل در} \\ \Delta_b &= \pm 2 \Delta_{bm} & \text{۲- سیکل در} \end{aligned}$$



شکل ۲- طرح کلی مهارندهای کمانش تاب [۴]

برای جلوگیری از کمانش کلی مهاربند، تحت بارهای فشاری، هسته فولادی شکل‌پذیر در داخل یک پوشش فولادی توخالی قرار می‌گیرد. درون این پوشش فولادی توخالی از بتن یا ملات پر می‌شود تا سختی خمشی مناسب جهت مقابله با کمانش تأمین گردد. وقتی هسته دچار کمانش می‌شود نیروهایی را به پوشش فولادی وارد می‌کند. به‌منظور جلوگیری از انتقال نیروهای اعمالی به پوشش فولادی، یک لایه ماده جداکننده یا یک فضای خالی کوچک بین هسته و پوشش فولادی تعبیه می‌شود. همچنین باید اثرات پواسون را در محاسبات در نظر گرفت. به این دلیل که وقتی هسته تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد دچار افزایش سطح مقطع می‌شود. بنابراین باید در راستای عرض هسته نیز فضای خالی کوچکی تعبیه شود تا هسته بتواند کرنش‌های وارده را به‌صورت یکنواخت تحمل نماید.

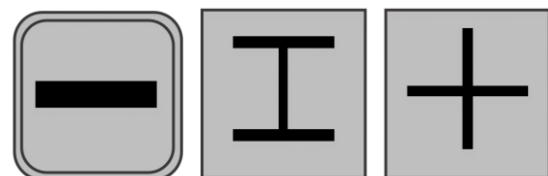
مهارندهای کمانش تاب با توجه به نوع ساخت شامل دو

دسته هستند:

(۱) مهارندهای کمانش تاب بتنی-فولادی

(۲) مهارندهای کمانش تاب تمام فولادی

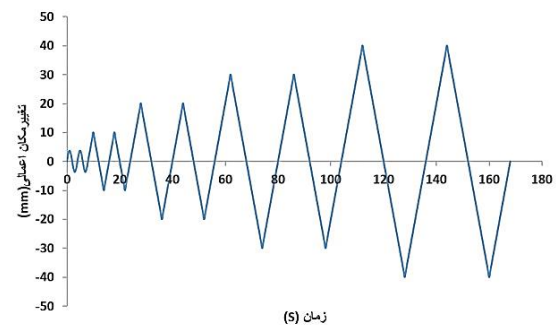
دسته اول از یک هسته فولادی به همراه یک غلاف فولادی (پوشش فولادی توخالی) پر شده از بتن یا ملات به همراه مواد جداکننده نظیر لاستیک (رزین)، پلی اتیلن، گریس، سیلیکون و نوار ماستیک ساخته می‌شود. در شکل (۳) نمونه‌ای از مقاطع مورد استفاده در این نوع مهاربندها ملاحظه می‌شود.



شکل ۳- مهارندهای کمانش تاب بتنی-فولادی

در مهارندهای کمانش تاب تمام فولادی از یک هسته فولادی به همراه یک غلاف تمام فولادی استفاده می‌شود. در شکل (۴) مقطع دو نوع از این مهاربندها نشان داده شده است. در این روش

هسته فولادی مهاربندهای کمانش‌تاب باید نیروهای فشاری و کششی محوری را بدون این که دچار کمانش و یا شکست شود، تحمل نماید [۲۱]. در شکل (۵) می‌توان نمودار بارگذاری اعمالی به نمونه‌ها را مطابق با آیین‌نامه AISC 341-16 ملاحظه نمود.



شکل ۵- نمودار بارگذاری اعمال‌شده به نمونه‌ها

۲-۱- معیار کمانش کلی

پایداری کلی مهاربندهای کمانش‌تاب با استفاده از تئوری بار کمانشی اولیه^۱ به‌دست می‌آید. با توجه به این که سختی خمشی هسته فولادی در مقایسه با سختی خمشی غلاف عددی ناچیز است، بنابراین در محاسبه بار بحرانی از سختی خمشی هسته فولادی جهت اطمینان صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه داریم:

$$p_{cr} = p_e \approx \frac{\pi^2 E I_{tube}}{(KL)^2} \quad [۴] \quad (۱)$$

که در این رابطه KL طول مؤثر مهاربند و E و I_{tube} به‌ترتیب مدول الاستیک و ممان اینرسی مکانیزم مهارکننده کمانش است. و **اتاناب** در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد داد به‌منظور پایداری کلی مهاربند باید بار کمانشی اولیه P_e از بار تسلیم هسته فولادی P_y بیش‌تر باشد. لذا **واتاناب** جهت مقاصد طراحی این نسبت را با درنظر گرفتن ضریب اطمینان به ۱/۵ افزایش داد [۵].

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1.5. \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، P_y نیز از حاصل ضرب تنش تسلیم هسته در سطح مقطع آن به‌دست می‌آید. اینوا^۲ در سال ۲۰۰۱ در مقاله خود تحت عنوان الزامات سخت‌شوندگی برای مهاربندهای کمانش‌تاب سعی کرد پارامترهای مؤثر در محاسبه سختی خمشی غلاف را در محاسبات خود لحاظ کند [۲۲]:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 + \frac{\pi^2 E_B (a+g) D}{2 \sigma_y L_B^2} = \beta \quad (۳)$$

در رابطه (۳) ارائه‌شده توسط اینوا، L_B و σ_y و D به‌ترتیب طول، تنش تسلیم غلاف و عمق مکانیزم مهارکننده کمانش هستند. در این رابطه g مقدار فضای خالی و a تغییرشکل جانبی اولیه در

مرکز مهاربند است. رابطه (۳) که با استفاده از مشخصات هندسی و مشخصات مواد مورد استفاده در مهاربند به‌دست آمده است، نشان می‌دهد در صورتی که نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ از پارامتر β بزرگ‌تر باشد، کمانش کلی در مهاربند اتفاق نخواهد افتاد [۱۱].

۲-۲- معیار کمانش موضعی

بار بحرانی مربوط به کمانش موضعی هسته فولادی در مدهای بالاتر در محدوده الاستیک، از رابطه زیر به دست می‌آید [۴]:

$$p_{cr} = 2\sqrt{\beta E_i I_i} \quad (۴)$$

در این رابطه β ثابت فنر توزیع‌شده و E_i و I_i به‌ترتیب مدول یانگ و ممان اینرسی هسته فولادی است. لذا به‌منظور جلوگیری از کمانش موضعی هسته فولادی در مدهای بالاتر باید بار بحرانی کمانشی به‌دست‌آمده از رابطه (۴) از نیروی تسلیم هسته بیش‌تر باشد. در رابطه زیر A_i بیانگر سطح مقطع هسته است [۴].

$$p_{cr} = 2\sqrt{\beta E_i I_i} \geq \sigma_y A_i \quad (۵)$$

۳- معرفی روش جدید استفاده از رولربرینگ‌ها در اطراف هسته فولادی

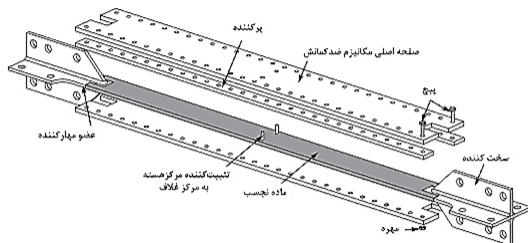
با توجه به شرایط خاص عمل‌آوری ملات و زمان‌بر بودن این روش در مهاربندهای بتنی-فولادی و همچنین احتمال وجود حفره‌های هوا (ناشی از مشکل در ویریه کردن و نیز وجود حباب‌های هوای اتفاقی) در داخل ملات یا بتن محصورکننده، همواره نیاز به یک مهاربندی که هم عملکرد مناسب تحت فشار و کشش داشته باشد و هم از سهولت در نصب و اجرا برخوردار باشد، احساس می‌شود. بنابراین مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی با حذف ملات، زمینه سهولت هرچه بیش‌تر در نصب و اجرا را فراهم آورده‌اند. از مزایای مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی می‌توان به محاسبات دقیق، شکل‌پذیری بیش‌تر، حذف ماده پرکننده ملات یا بتن، امکان حذف ماده جداکننده و مونتاژ و دیمونتاژ آسان اشاره نمود. در مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی از دو صفحه فولادی برای غلاف، با مقاومت مشخص و سخت‌کننده‌های طولی در صورت لزوم استفاده می‌شود که هم امکان محاسبات دقیق وجود دارد و هم از نصب و اجرای آسان‌تری برخوردار هستند.

در مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی (شکل ۴) ماده جداکننده می‌تواند حذف شده و به جای آن اندکی فضای خالی تعبیه گردد که هسته بتواند به راحتی کرنش‌های اعمالی را

² K. Inoue

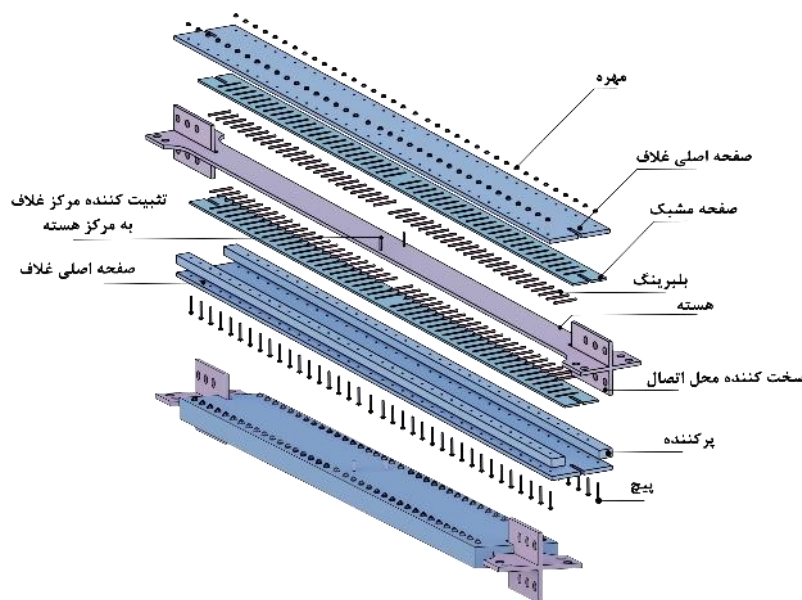
¹ Euler's buckling load theory

که جزئیات آن را می‌توان در شکل (۶) مشاهده کرد. در روش جدید ارائه‌شده در این تحقیق، که جزئیات آن در شکل (۷) نشان داده شده است، سعی بر آن شده با قرار دادن صفحات مشبک به همراه رولبرینگ‌ها که تمام فضای خالی آن‌ها را گریس پر کرده، اصطکاک بین هسته و غلاف را به حداقل ممکن رساند.



شکل ۶- مهاربند کمانش تاب تمام فولادی [۲۳]

به صورت یکنواخت تحمل نماید (جهت رعایت اثر پواسون)؛ اما اغلب علاوه بر فضای خالی از پوشش‌های تفلونی نیز بر روی هسته استفاده می‌شود. بنابراین وقتی هسته دچار کمانش موضعی می‌شود، با ایجاد موج‌های کمانشی و تماس با غلاف فولادی، نیروهای اصطکاکی در غلاف ایجاد می‌شود. این نیروهای اصطکاکی ایجادشده باعث انتقال نیروهای محوری و برشی به غلاف شده و عملکرد کلی مهاربند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در طی سالیان اخیر محققان با آزمایش‌هایی که انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که هرچه نیروهای اصطکاکی کاهش یابد، نیروهای محوری انتقال‌یافته به غلاف نیز کاهش می‌یابد که علاوه بر بهبود عملکرد مهاربند، احتمال کمانش غلاف قبل از به تسلیم رسیدن هسته مهاربند نیز کم‌تر می‌شود. لذا با استفاده از روش‌هایی مانند روغن‌کاری و یا استفاده از مواد نجیب مثل تفلون اصطکاک را کاهش می‌دهند

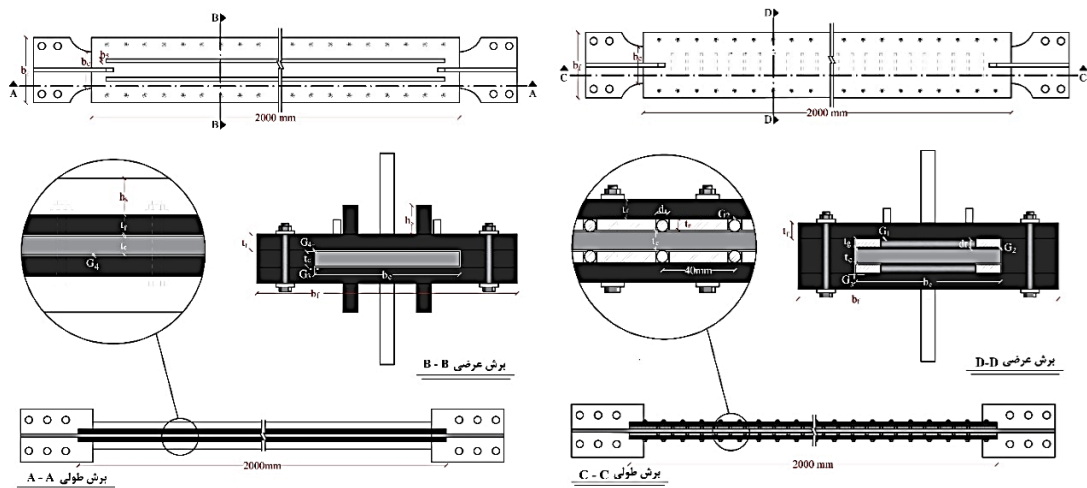


شکل ۷- در پایین تصویر سه بعدی BRB با روش جدید و در بالا اجزای آن نشان داده شده است (نمونه‌های S4 تا S8)

اثر کمانش هسته را تحمل نماید. سپس در صورت رسیدن هسته به مرحله سیلان، تغییر طول قابل ملاحظه‌ای در هسته اتفاق می‌افتد؛ در نتیجه غلتیدن هسته روی رولبرینگ‌ها انجام می‌شود. از آنجایی که در وسط هسته دو عدد پین تثبیت‌کننده^۱ هسته و غلاف را به هم وصل کرده‌است، بنابراین حرکت غلاف و هسته نسبت به هم، در مرکز صفر بوده و در دو انتها ماکزیمم است؛ به همین علت غلتیدن نیز در دو انتها بیش‌تر اتفاق می‌افتد. چون سطوح تماسی هسته و غلاف مورد نظر پر از گریس هستند، اصطکاک مماسی به حداقل ممکن می‌رسد.

به این صورت که دو صفحه مشبک بین صفحات اصلی غلاف و هسته قرار می‌گیرد. طول این صفحات مشبک با طول صفحات اصلی غلاف برابر بوده ولی عرض کم‌تری دارند. این صفحات به صفحات اصلی غلاف جوشکاری می‌شوند و جایگاهی برای رولبرینگ‌ها هستند. در صفحه مشبک فضاهای خالی مستطیل شکلی در فواصل یکسان جهت قرارگیری رولبرینگ‌ها تعبیه می‌شود که در آن رولبرینگ هم باعث تبدیل اصطکاک لغزشی به اصطکاک غلتشی می‌شود و هم وقتی هسته دچار اعوجاج می‌شود در مرحله اول رولبرینگ می‌تواند نیروی عمودی وارد به غلاف در

¹ Stopper



شکل ۸: شمای کلی جزئیات BRB

الف: بدون رولربرینگ (نمونه‌های S1 تا S3) - ب: با رولربرینگ (نمونه‌های S4 تا S8)

نماید. همچنین روش ضمنی از دقت بیش‌تری نسبت به روش صریح برخوردار است و طبیعتاً با افزایش دقت مدل، زمان انجام تحلیل نیز افزایش می‌یابد. در روش‌های غیرارتجاعی نرم‌افزار بعد از هر نمو، سختی سازه را محاسبه می‌کند و نتایج دقیق‌تری نیز به‌دست می‌آید [۲۴]. با توجه به این که بارگذاری چرخه‌ای مشخص‌شده برای مهاربندهای کمانش‌تاب در آیین‌نامه AISC 341-16 به‌صورت شبه‌استاتیکی است، به‌منظور دقت هر چه بیش‌تر در تحلیل از روش ضمنی غیرارتجاعی استفاده می‌شود که در آن از روش نیوتن-رافسون جهت حل معادلات استفاده شده است.

۴-۱- تشریح نمونه‌ها

هشت نمونه جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفتند. در این میان سه نمونه با توجه به پارامترهای به‌دست‌آمده توسط محققان قبلی مدل‌سازی شده و پنج نمونه دیگر نیز با استفاده از روش پیشنهادی جدید مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.

مشخصات سازه‌ای نمونه‌های مدل‌سازی شده در شکل‌های (۸-ب) و (۸-الف) و جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. همه نمونه‌ها از سطح مقطع هسته 10×10 میلی‌متر مربع تشکیل شده‌اند. سخت‌کننده‌های متصل‌شده به هسته جهت اطمینان از الاستیک بودن رفتار هسته در قسمت‌های انتهایی نیز در ابعاد 10×10 میلی‌متر هستند. طول مهاربندهای کمانش‌تاب در تمامی نمونه‌ها ۲ متر فرض شده است. ابعاد صفحه اصلی و سخت‌کننده غلاف یا همان مکانیزم مهارکننده کمانش نیز با توجه

رولربرینگ‌ها در داخل سوراخ‌های مستطیلی شکل دو صفحه مشبک جوش‌شده به دو صفحه اصلی غلاف قرار می‌گیرند؛ از یک طرف به هسته و از طرف دیگر هم به صفحه اصلی غلاف تکیه دارند. البته فواصل میلی‌متری وجود دارد، اما فقط هر رولربرینگ می‌تواند در محل خود (در داخل سوراخ مستطیل شکل پر از گریس که جایگاه رولربرینگ است) بگلتد و امکان بیرون آمدن از فواصل میلی‌متری وجود ندارد. در طول غلاف پستانک‌هایی جهت تزریق گریس (گریس‌خورها) تعبیه می‌شوند که این تزریق و کنترل پر بودن گریس موجود در داخل غلاف، باید در بازه‌های زمانی مشخص (سالانه و همچنین بعد از هر زلزله) انجام گیرد. صفحه مشبک نیز مطابق جزئیات شکل (۸-ب) توسط جوش به مکانیزم مهارکننده کمانش (غلاف) متصل می‌شود. در نتیجه هسته می‌تواند کرنش‌های غیرخطی بیش‌تری را تحمل نماید. اصولاً جنس فولاد مورد استفاده در رولربرینگ‌ها و صفحه مشبک باید سخت‌تر از فولاد مورد استفاده در هسته باشد؛ در این مدل جهت مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با مدل‌سازی‌ها و آزمایش‌های قبلی و ترسیم هرچه صحیح‌تر رفتار غیرارتجاعی، در کلیه اعضای مهاربند، از یک نوع فولاد استفاده شده است.

۴- تحلیل المان محدود

به‌منظور ارزیابی هر چه بهتر و دقیق‌تر رفتار چرخه‌ای و کمانشی مهاربندهای کمانش‌تاب از تحلیل المان محدود تحت نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است که معادلات حاکم را در هر نمو به‌صورت ضمنی تحلیل می‌کند و کاربر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله را تعیین کند یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده

به در نظر گرفتن مقدار نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ متغیر است. مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۱- جدول مشخصات سازه‌ای هسته و غلاف نمونه‌ها

نمونه‌ها	مکانیزم مهارکننده کمانش (غلاف)					
	صفحه اصلی			سخت کننده		
	$b_c(mm)$	$t_c(mm)$	$b_f(mm)$	$t_f(mm)$	$b_s(mm)$	$h_s(mm)$
S1	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۰	۱۰	۱۹
S2	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۲	۱۰	۲۰
S3	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۱	۱۰	۲۰
S4*	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۹	-	-
S5	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۲	-	-
S6	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۱	-	-
S7	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۰	-	-
S8	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۱۰	-	-

جدول ۲- مشخصات نمونه‌ها (برحسب mm)

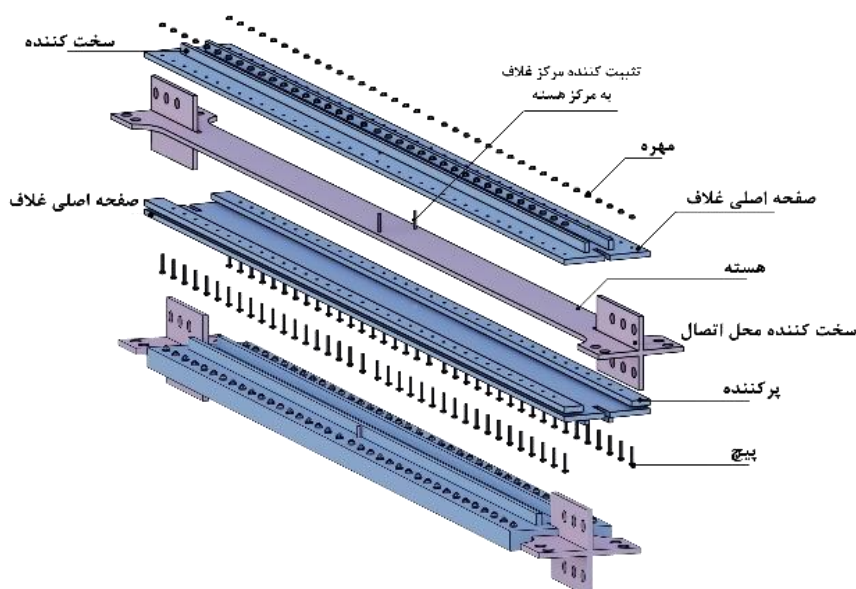
نمونه‌ها	S1	S2	S3	S4*	S5	S6	S7	S8
ضخامت صفحه مشبک tg	-	-	-	۶	۶	۶	۶	۶
قطر رولربرینگ dr	-	-	-	۶/۵	۶/۵	۶/۵	۶/۵	۸
لقی رولربرینگ در جهت ضخامت	-	-	-	۰/۵	۰	۰/۵	۲	۰/۵
هسته G1	-	-	-	-	-	-	-	-
فاصله هسته از صفحه مشبک G2	-	-	-	۱	۰/۵	۱	۲/۵	۲/۵

* باید توجه داشت که غلاف نمونه S4 ضعیف‌تر از S6 است که در جداول ۱ و ۲ مشخص شده‌است.

جدول ۳- مشخصات هندسی مربوط به محاسبه نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ نمونه‌ها

نمونه‌ها	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
$I_r(mm^4)$	۹۲۴۷۶۳	۱۲۵۴۸۲۷	۱۲۵۶۲۹۳	۹۰۳۹۶۰	۱۳۷۴۸۴۰	۱۲۵۲۶۸۰	۱۲۶۲۱۰۰	۱۲۶۲۱۰۰
$P_e(N)$	۴۵۵۸۹۰	۶۱۸۶۰۴	۶۱۹۳۲۷	۴۴۵۶۳۴	۶۷۷۷۶۹	۶۱۷۵۴۶	۶۲۲۱۹۰	۶۲۲۱۹۰
$P_y(N)$	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰
$\frac{P_e}{P_y}$	۱/۲۳	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۲	۱/۸۳	۱/۶۷	۱/۶۸	۱/۶۸





شکل ۹- در پایین تصویر سه بعدی BRB تمام فولادی و در بالا اجزای آن نشان داده شده است (نمونه‌های S1 تا S3).

واضح است که سخت‌کننده غلاف، عمود بر صفحه اصلی غلاف و در راستای طولی به آن جوشکاری شده و یکپارچه گردیده است. نمونه‌های S1، S2 و S3 همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، بدون رولربینگ هستند. در این سه نمونه از فضای خالی بین غلاف و هسته استفاده شده و گریس‌خورهایی در غلاف تعبیه می‌شود و توسط آن‌ها فضای خالی مذکور با گریس پر می‌شود. ضریب اصطکاک بین هسته و غلاف در این نمونه‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در بقیه نمونه‌ها علاوه بر صفحات مشبک، چون از رولربینگ هم استفاده شده است، ضریب اصطکاک برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک در سه نمونه اول با توجه به مطالعات قبلی به دست آمده ۰/۱ در نظر گرفته شده است و در روش جدید پیشنهادی این ضریب ۰/۰۵ لحاظ شده است. این کاهش در ضریب اصطکاک باعث کاهش انتقال نیروهای اصطکاکی تا ۵۷ درصد در نمونه S5 (نسبت به نمونه S2) شده است. ضریب اصطکاک لغزشی بین دو سطح فولادی در حالت روغن‌کاری شده ۰/۱ الی ۰/۰۵ است که در اینجا با استفاده از تحقیق بهزاد رافعی و نادر هویدایی مقدار ۰/۱ در نظر گرفته شده است [۱۱]. حال اگر رولربینگ‌ها در نظر گرفته شود، اصطکاک لغزشی به اصطکاک غلتشی تبدیل می‌شود. و ضریب اصطکاک حدوداً به یک‌دهم یا کم‌تر کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش برای رعایت احتیاط و عوامل ناشناخته (مثل سفت شدن گریس در هوای سرد)، ضریب اصطکاک فقط به ۰/۵ ضرب شده است یعنی ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

ضریب اصطکاک فلز روی فلز در حالت روغن‌کاری شده برابر ۰/۰۷ و برای فولاد روی فولاد در حالت روغن‌کاری شده برابر ۰/۰۶ است که در مراجع مربوط به اصطکاک لغزشی آمده است. در تحقیق نادر هویدایی و بهزاد رافعی [۱۱] این ضریب اصطکاک را با رعایت احتیاط کمی افزایش داده‌اند و یک‌دهم (۰/۱) در نظر گرفته‌اند. در پژوهش پیش رو نیز ضریب اصطکاک برابر یک‌دهم (۰/۱) در نظر گرفته شده است. در حالتی که رولربینگ قرار داده می‌شود (و مابین دو صفحه فولادی روغن‌کاری شده قرار می‌گیرند و هنگام حرکت این رولربینگ‌ها مابین دو صفحه می‌غلطند) اصطکاک بسیار کاهش می‌یابد که در این تحقیق برای رعایت احتیاط فقط به عدد یک‌دهم (۰/۵) ضرب شده است. در نمونه‌های S3 تا S8 صفحات مشبک به وسیله جوشکاری به صفحات اصلی غلاف، متصل شده‌اند. این امر باعث شده است که فاصله دو صفحه اصلی از یکدیگر، نسبت به سه نمونه اول بیش‌تر شود. که این موجب افزایش ممان اینرسی غلاف در این نمونه‌ها شده و در نتیجه نیاز به استفاده از سخت‌کننده‌ها (پشت‌بند) نیست.

ضخامت صفحه مشبک ۶ میلی‌متر انتخاب شده است که به صفحه اصلی غلاف توسط جوش متصل می‌شود. رولربینگ‌ها در سوراخ‌های مستطیلی این صفحه قرار می‌گیرند و تمامی فضاهای خالی با گریس پر می‌گردد. قطر رولربینگ‌های مورد استفاده و عرض سوراخ‌های مستطیلی صفحه مشبک، باید با هم هم‌خوانی داشته باشند؛ به‌طوری که عرض سوراخ‌های مستطیلی حدود دو

میلی متر از قطر رولربرینگ‌ها بیش تر باشد. طول رولربرینگ‌ها نیز در تمامی نمونه‌های پیشنهادی برابر با ۶۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

در تحقیق **نادر هویدایی و بهزاد رافضی** [۱۱]، تنش تسلیم ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. لذا در این تحقیق نیز، همین مقدار برای تنش تسلیم انتخاب گردید. فولاد مورد استفاده از نوع G40/21 – 350wt بوده و دارای تنش تسلیم $F_y = 370 \text{ Mpa}$ ، $F_u = 570 \text{ Mpa}$ و مدول الاستیک 200 Gpa است. به منظور تعریف محدوده غیرارتجاعی فولاد از سخت‌شوندگی ترکیبی استفاده شده است. بدین منظور با توجه به مطالعات قبلی، درحالت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، یک تغییر ماکزیمم در تنش تسلیم برابر با $Q_{\infty} = 110 \text{ Mpa}$ و ضریب نرخ $b = 4$ و در حالت سینماتیک، مدول اولیه سخت‌شوندگی سینماتیک $C = 8000 \text{ Mpa}$ و ضریب نرخ $\gamma = 75$ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این نکته که برای طول‌های بلند مهاربندهای کمانش‌تاب، کرنش هسته معمولاً بین ۱ الی ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود، دریافت طراحی طبقه متناظر با کرنش ۱ درصد لحاظ می‌شود. لذا تغییر مکان متناظر با کرنش ۱ درصد، ۲۰ میلی متر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پروتکلی که به منظور بارگذاری چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب در آیین‌نامه AISC 341-16 ارائه شده است، مقادیر تغییر مکان‌های بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتکل به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}\Delta_b &= \pm 1.0 \Delta_{by} = \pm 3.7 \text{ mm} \\ \Delta_b &= \pm 0.5 \Delta_{bm} = \pm 10 \text{ mm} \\ \Delta_b &= \pm 1.0 \Delta_{bm} = \pm 20 \text{ mm} \\ \Delta_b &= \pm 1.5 \Delta_{bm} = \pm 30 \text{ mm} \\ \Delta_b &= \pm 2.0 \Delta_{bm} = \pm 40 \text{ mm}\end{aligned}$$

تمامی عناصر سه‌بعدی و جامد شکل‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. جهت انجام تحلیل شبه‌استاتیکی^۱ بر روی نمونه‌ها از تحلیل استاتیکی جنرال^۲ استفاده می‌شود که در آن افزایش اولیه و بیشینه در طول تحلیل ثابت و برابر با ۰/۲۵ و افزایش کمینه برای گام‌ها نیز برابر با ۱E-۷ در نظر گرفته می‌شود. همچنین می‌توان خروجی‌های مورد نیاز جهت مقایسه نمونه‌ها را در این مازول تعریف نمود. از روش سطح به سطح در تعریف تمامی سطوح تماسی استفاده شده است و به منظور مدل‌سازی جوش در نمونه‌ها از اندرکنش گره استفاده شده است.

همچنین به منظور مشکلاتی که در همگرایی نتایج تحلیل وجود دارد، از پایدارسازی خودکار^۳ در تعریف اندرکنش بین سطوح تماسی استفاده شده و ضریب آن در تمامی نمونه‌ها، ۴E-۴ لحاظ شده است.

شرایط مرزی در آیین‌نامه AISC 341-16 برای آزمایش بارگذاری چرخه‌ای در نظر گرفته شده است؛ به این صورت که تغییر شکل‌های محوری در یک طرف مهاربند بسته می‌شود و بارگذاری چرخه‌ای، مطابق با پروتکل ارائه‌شده در آیین‌نامه AISC 346-16، به طرف دیگر مهاربند اعمال می‌شود. تمامی عناصر مهاربندها به صورت مستقل با المان آجری هشت گرهی با استفاده از یکپارچگی کاهش یافته مش‌بندی شده‌اند. با توجه به این که مش‌بندی‌های ارائه شده توسط **نادر هویدایی و بهزاد رافضی** در سال ۲۰۱۲ مورد تأیید قرار گرفته‌اند، مش‌بندی در مقطع تمامی نمونه‌ها از مدل المان محدود ارائه‌شده توسط آن‌ها انتخاب شده است [۱۱].

همچنین آنالیز حساسیت مش‌بندی نیز بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفته است. بدین ترتیب که جهت به‌دست آوردن اندازه مناسب مش‌بندی در تحلیل، اندازه مش‌بندی که در تحلیل نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، ۱/۲ برابر کاهش و ۲ برابر افزایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل نمونه‌ها نشان دادند که اختلاف بسیار ناچیزی بین مش‌بندی انتخابی با مش‌بندی‌های درشت‌تر و ریزتر وجود دارد و نتایج به‌دست آمده از تحلیل تحت نرم‌افزار آباکوس مستقل از ابعاد مش‌بندی است. لذا ابعاد انتخابی مش جهت تحلیل نمونه‌ها مناسب است.

۵- ارائه نتایج تحلیل و تفسیر آن‌ها

منحنی‌های هیستریزس برای هر یک از نمونه‌ها به‌دست آورده شده است که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. محور عمودی این منحنی‌ها با استفاده از مجموع نیروهای به‌دست آمده از گره‌های انتهایی هسته فولادی محاسبه شده‌اند و محور افقی با تغییر مکان اعمالی طبق پروتکل آیین‌نامه AISC 341-16 متناظر هستند. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، منحنی‌های هیستریزس در همه نمونه‌ها به غیر از نمونه‌هایی که دچار کمانش کلی می‌شوند، دارای تقارن هستند و رفتار چرخه‌ای مطلوبی از خود نشان می‌دهند. سطح زیر منحنی نمودار هیستریزس نشان‌دهنده میزان اتلاف انرژی است. با مقایسه

³ Automatic Stabilization

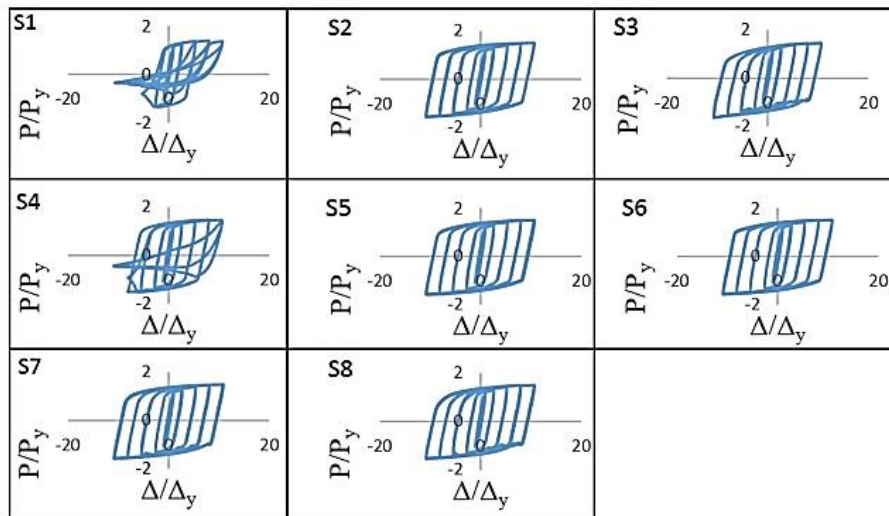
¹ General static analysis

² Quasi- static analysis



منحنی‌های هیستریزیس به‌دست‌آمده از نمونه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که اتلاف انرژی یا به عبارت دیگر سطح زیر منحنی

نمودار هیستریزیس در نمونه S4، افزایش قابل‌توجهی (بیش‌تر از دو برابر) نسبت به نمونه S1 نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- منحنی‌های هیستریزیس به‌دست‌آمده از نمونه‌ها

روش جدید استفاده از رولبرینگ‌ها در اطراف هسته در حالت کلی برای نمونه‌هایی که دچار کماتش کلی نمی‌شوند، عملکرد کلی مهاربند را $\frac{2}{3}$ الی $\frac{4}{2}$ درصد بهبود می‌بخشد. مهم‌ترین مزیت ایجادشده در سیستم جدید این است که اصطکاک بسیار کاهش یافته و در نتیجه نیروهای محوری منتقل‌شده به غلاف به حداقل رسیده و احتمال کماتش کلی سیستم مهاربند بسیار کاهش می‌یابد. همچنین کماتش‌های موضعی هسته با تنظیم فاصله بین رولبرینگ‌ها و هسته تا حدودی قابل‌تنظیم خواهد بود. ضریب اصطکاک در سه نمونه اول با توجه به مطالعات قبلی به‌دست‌آمده $\frac{0}{1}$ در نظر گرفته شده است و در روش جدید پیشنهادی این ضریب $\frac{0}{5}$ لحاظ شده است. این کاهش در ضریب اصطکاک باعث کاهش انتقال نیروهای اصطکاکی تا ۵۷ درصد در نمونه S5 (نسبت به نمونه S2) شده است.

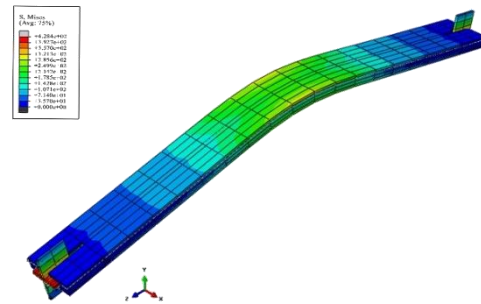
همان‌طور که ذکر شد، ضریب اصطکاک لغزشی بین دو سطح فولادی در حالت روغن‌کاری‌شده $\frac{0}{1}$ الی $\frac{0}{5}$ است که در اینجا با استفاده از تحقیق بهزاد رافضی و نادر هویدایی مقدار $\frac{0}{1}$ در نظر گرفته شده است [۱۱]. حال اگر رولبرینگ‌ها در نظر گرفته شود اصطکاک لغزشی به اصطکاک غلتشی تبدیل می‌شود و ضریب اصطکاک حدوداً به یک‌دهم یا کم‌تر کاهش پیدا می‌کند. یعنی اگر مقدار ضریب اصطکاک در نظر گرفته‌شده برای حالت لغزشی را بخواهیم به ضریب اصطکاک در حالت غلتشی تبدیل

کنیم، عدد آن را بایستی در عدد $\frac{0}{1}$ یا حتی عددی بزرگ‌تر ضرب نماییم. در این پژوهش برای رعایت احتیاط و عوامل ناشناخته (مثل سفت شدن گریس در هوای سرد)، ضریب اصطکاک فقط به $\frac{0}{5}$ ضرب شده است (نصف گردیده است) یعنی $\frac{0}{5}$ در نظر گرفته شده است.

کوماتش کلی مهاربندهای کوماتش‌تاب به نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ وابسته است. با توجه به تحقیقاتی که محققان در این زمینه انجام داده‌اند، در مهاربندهای کوماتش‌تاب باید رابطه $\frac{P_e}{P_y} \geq 1.4$ برقرار باشد. از میان همه نمونه‌ها، نمونه‌های S1 و S4 دارای نسبتی کم‌تر از $\frac{1}{4}$ هستند. این نمونه‌ها مطابق انتظار در طی بارگذاری‌های چرخه‌ای دچار کوماتش کلی می‌شوند، درحالی‌که در بقیه نمونه‌ها غلاف دچار کوماتش کلی نشده و نیروهای وارد به غلاف در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. کوماتش کلی نمونه S1 اولین بار در سیکل پنجم بارگذاری چرخه‌ای اتفاق می‌افتد. در صورتی که در نمونه S4 اولین کوماتش کلی در سیکل هشتم بارگذاری چرخه‌ای است. این بدان معنی است که در روش پیشنهادی جدید نیروهای وارد به غلاف کاهش می‌یابد. شکل (۱۱) تغییر شکل هسته را در کوماتش کلی نمونه S4 نشان می‌دهد.

اعوجاج وارد می‌شود، در نمونه‌های S1 و S4 بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است. به این دلیل که نمونه‌های مذکور دچار کمناش کلی شده و طبیعتاً نیروی محوری منتقل شده به غلاف در آن‌ها از سایر نمونه‌ها بیش‌تر خواهد بود. در نمونه‌هایی که توسط روش پیشنهادی جدید مدل‌سازی شده‌اند به‌علت این که هسته بر روی رول‌برینگ‌ها می‌غلطد، در نتیجه نیروهای محوری انتقالی به غلاف نسبت به نمونه‌های قبلی به‌صورت محسوسی کاهش می‌یابد.

از لحاظ ضخامت صفحات اصلی غلاف S2 با S5 (با ضخامت ۱۲ میلی‌متر) و نمونه‌های S3 با S6 (با ضخامت ۱۱ میلی‌متر) قابل مقایسه است. در نمونه‌های S7 و S8 هرچند که ضخامت صفحات اصلی غلاف کاهش یافته است (ضخامت ۱۰ میلی‌متر) ولی به‌علت وجود صفحات مشبک فاصله این دو صفحه اصلی بیش‌تر شده و ممان اینرسی افزایش یافته و در نتیجه نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ مناسب بوده و کمناش کلی اتفاق نیفتاده است. بنابراین S7 و S8 قابل مقایسه با S3 هستند. مقدار کاهش انتقال نیروهای اصطکاکی به غلاف در نمونه S5 نسبت به نمونه S2 برابر ۵۷ درصد، در نمونه S6 نسبت به نمونه S3 برابر ۶۳ درصد و در نمونه‌های S7 و S8 نسبت به نمونه S3 به‌ترتیب برابر ۴۵ و ۵۵ درصد است. بنابراین در حالت کلی، در صورتی که فاصله رول‌برینگ‌ها با هسته به حداقل ممکن برسد، نیروهای اصطکاکی وارده به غلاف را می‌توان با استفاده از روش جدید تا ۶۳ درصد کاهش داد.

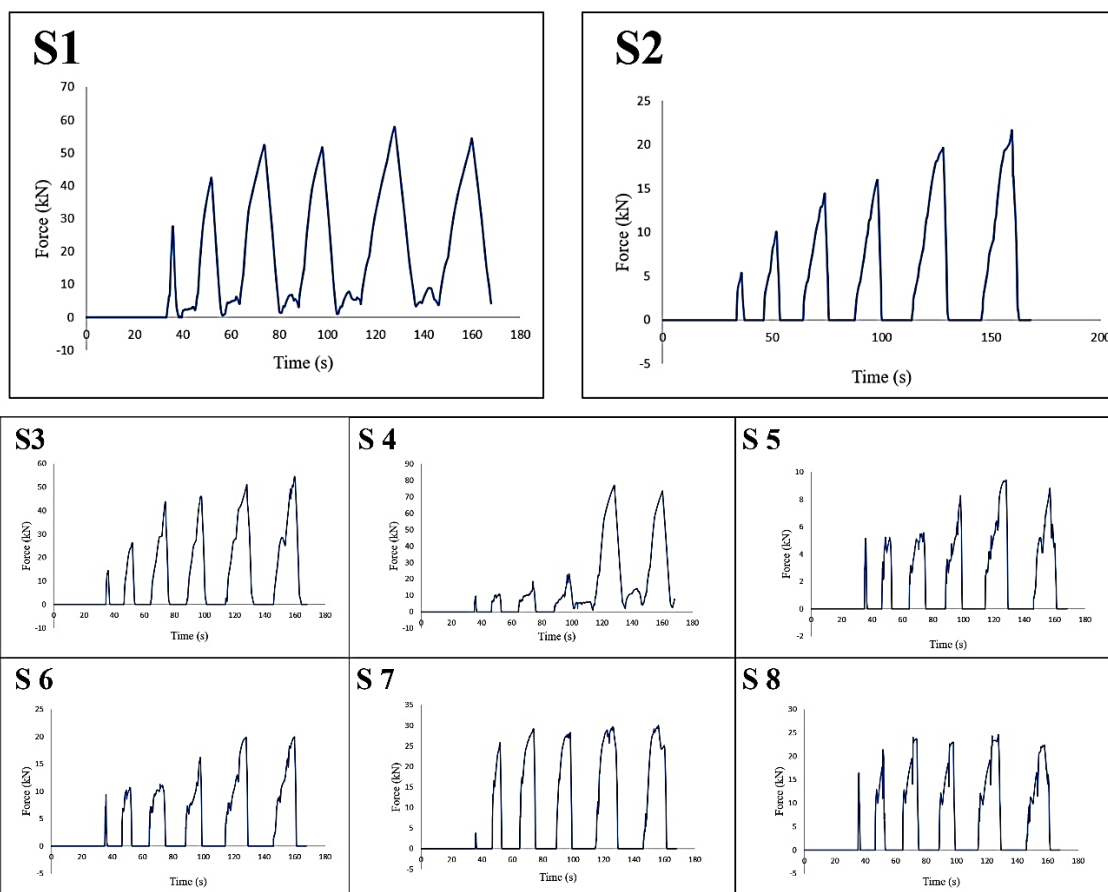


شکل ۱۱- تغییر شکل هسته در کمناش کلی سیستم‌مهاربند در نمونه S4

نمودار ماکزیمم نیروهای اصطکاکی ایجادشده در غلاف در طول بارگذاری چرخه‌ای، برای تمامی نمونه‌ها در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) قابل ملاحظه است، هسته تحت نیروهای فشاری به‌وجودآمده دچار اعوجاج می‌شود که در تماس با غلاف باعث ایجاد نیروهای اصطکاکی می‌گردد. در واقع این نیروهای به‌وجودآمده در غلاف (به هنگام اعوجاج هسته)، باعث ایجاد نیروهای محوری در غلاف می‌شوند. مقادیر عددی ماکزیمم نیروهای اصطکاکی ایجادشده در غلاف در طول بارگذاری چرخه‌ای محاسبه شده است که در جدول (۴) قابل مشاهده است. واضح است وقتی هسته تحت کشش قرار می‌گیرد، نیروهای اصطکاکی به‌وجود نخواهد آمد. ماکزیمم نیروی وارده به غلاف در تمام نمونه‌ها، عمدتاً در دو سیکل آخر بارگذاری رخ می‌دهد. ماکزیمم نیرویی که توسط هسته به غلاف به هنگام

جدول ۴- نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نمونه‌ها

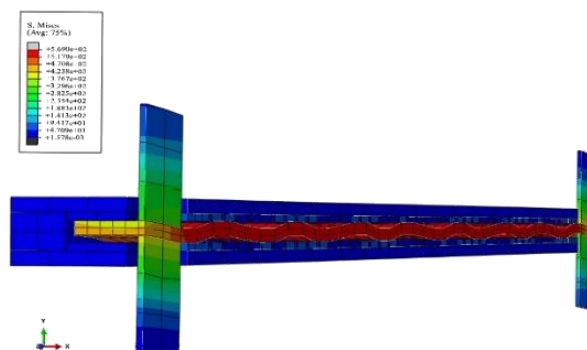
نمونه‌ها	S1*	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
سطح زیر نمودار منحنی هیستریزیس (انرژی جذب‌شده) (kN-m)	۷۹/۳۸	۲۳۵/۴۱	۲۲۴/۶۶	۱۶۷/۶۵	۲۴۱/۳	۲۴۰/۹۶	۲۳۴	۲۳۴/۰۹
اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک (kN-m)	۰/۳	۲/۷۷	۷/۳	۰/۶	۰/۷	۱/۳۶	۲/۶۲	۲/۱۲
ماکزیمم نیروهای اصطکاکی ایجادشده (kN)	۵۷/۹	۲۱/۷	۵۴/۵	۷۷/۱	۹/۴	۱۹/۹	۳۰	۲۴/۵



شکل ۱۲- نمودار ماکزیمم نیروهای اصطکاکی ایجادشده در غلاف در طول بارگذاری چرخه‌ای

هر چه بیش‌تر اصطکاک در این نوع مهاربندها فراهم شود. در روش جدید پیشنهادی، هسته فولادی توسط صفحات مشبک الحاقی و رولربرینگ‌ها احاطه شده و کلیه فضاهای خالی (فضای بین دو صفحه مشبک و هسته و فضای اطراف رولربرینگ‌ها در داخل سوراخ‌های مستطیلی) با گریس پر شده‌اند. هشت نمونه مهاربند کمانش‌تاب تمام‌فولادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از این هشت نمونه، سه نمونه مهاربند کمانش‌تاب تمام‌فولادی معمولی و پنج نمونه مطابق روش جدید دارای صفحات مشبک و رولربرینگ‌ها هستند. تحلیل اجزاء محدود غیرارتجاعی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بر روی همه نمونه‌ها صورت گرفته است و تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی مطابق با آیین‌نامه AISC 341-16 قرار گرفته‌اند. منحنی هیستریزس برای هرکدام از نمونه‌ها ترسیم شده است. نتایجی که از تحلیل اجزاء محدود این نمونه‌ها به‌دست آمده است عبارتند از:

در مهاربندهای کمانش‌تاب نوع جدید، نیروهای وارد به غلاف به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در نمونه‌های جدید از انتقال نیروهای اصطکاکی به غلاف کاسته



شکل ۱۳- نحوه اعوجاج سینوسی هسته در راستای ضخامت در نمونه S7

۶- نتیجه‌گیری

مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی نوع جدیدی از سیستم‌های مهاربندی به‌شمار می‌روند که تحت اثر نیروهای فشاری و کششی، رفتار مقارنی از خود نشان می‌دهند. میزان اصطکاک بین هسته و مکانیزم مهارکننده کمانش (غلاف) یکی از عواملی است که در عملکرد مهاربندهای کمانش‌تاب تمام‌فولادی تأثیرگذار است. در این مقاله سعی شده است با ارائه روشی جدید موجبات کاهش

می‌شود. به این صورت که در مرحله اول رولبرینگ‌ها نیروهای عمودی ناشی از کمانش سینوسی هسته را به صفحات اصلی غلاف انتقال می‌دهند. سپس در تداوم تغییر مکان‌ها، غلتیدن روی رولبرینگ‌ها باعث می‌شود که نیروهای اصطکاکی وارد به غلاف کاهش چشم‌گیری داشته باشند. نیروهای اصطکاکی وارد به غلاف در نمونه‌های S5، S6، S7 و S8 که از نمونه‌های با رولبرینگ هستند، نسبت به نمونه‌های مشابه بدون رولبرینگ به ترتیب ذیل کاهش می‌یابد: در نمونه S5 نسبت به نمونه مشابه S2 برابر ۵۷ درصد و در نمونه‌های S6، S7 و S8 نسبت به نمونه S3 به ترتیب برابر ۶۳، ۴۵ و ۵۵ درصد کاهش می‌یابد.

در نمونه‌های مدل‌سازی شده توسط مطالعات قبلی، وقتی هسته فولادی تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد، اعوجاج هسته در قسمت‌های انتهایی مهاربند شدیدتر است. به این دلیل که وقتی هسته با غلاف برخورد می‌کند، اصطکاک ایجاد شده بین هسته و غلاف، مانع از انتقال یکنواخت موج‌های کمانشی در طول هسته می‌شود و احتمال کمانش کلی مهاربند قبل از به تسلیم رسیدن هسته افزایش می‌یابد. همچنین تنش‌ها در طول هسته به صورت یکنواخت توزیع نمی‌شوند. ولی در نمونه‌های جدید پیشنهادی، هسته با غلتیدن روی رولبرینگ‌ها، موج‌های کمانشی ایجاد شده را در طول خود پخش می‌کند. به عبارت دیگر هسته در نمونه‌های جدید تغییر شکل‌های غیرخطی بیش‌تر و یکنواختی را تحمل می‌کند. همچنین با استفاده از این روش از تجمع موج‌های کمانشی در قسمت‌های انتهایی هسته کاسته می‌شود.

به منظور محدود کردن دامنه اعوجاج سینوسی هسته در طول مهاربند، تفاضل بین ضخامت صفحه مشبک و قطر رولبرینگ‌ها در حدود ۰/۵ میلی‌متر مناسب است (یعنی قطر رولبرینگ ۰/۵ میلی‌متر بیش‌تر بوده و به عبارت دیگر رولبرینگ‌ها ۰/۵ میلی‌متر بیرون‌زدگی دارند). همچنین فاصله بهینه بین رولبرینگ‌ها و هسته فولادی، صفر (در نمونه S5) الی ۰/۵ میلی‌متر (در نمونه S6) پیشنهاد می‌شود (به طوری که ملاحظه شد در نمونه‌های S5 و S6 نسبت به نمونه‌های S7 و S8 کاهش بیش‌تری در اصطکاک رخ داده است).

اتلاف انرژی در نمونه‌های مدل‌سازی شده با روش جدید نسبت به نمونه‌های قبلی به دست آمده، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سطح زیر منحنی هسیتیزیس در نمونه‌های جدید در مجموع سیکل‌های بارگذاری چرخه‌ای از مساحت بیش‌تری برخوردار است.

از معایب سیستم پیشنهادی، گران بودن هزینه اجرای آن است. ولی استفاده از آن در ساختمان‌های حساس و با اهمیت زیاد مانند مراکز امداد رسانی، اتاق کنترل در پتروشیمی‌ها، ساختمان بانک مرکزی و... توجیه اقتصادی دارد.

مزایای روش پیشنهادی: در این تحقیق قطر رولبرینگ‌ها ۶/۵ میلی‌متر و ضخامت صفحه مشبک (که مقر این رولبرینگ‌ها است) برابر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لذا اگر بیرون‌آمدگی رولبرینگ‌ها را با فاصله آزاد دو طرف هسته برابر بگیریم، رولبرینگ‌ها به هسته تکیه می‌کنند و در عین حال فاصله اطراف هسته نیز همچنان وجود دارد که در اینجا پر از گریس است. یعنی غلاف روی هسته می‌تواند از لحاظ بعد عمود بر محور طولی نیز بدون حرکت باشد. از طرف دیگر وقتی که لغزش هسته نسبت به غلاف، به غلتش این رولبرینگ‌ها تبدیل می‌شود اصطکاک بسیار کاهش می‌یابد.

در این روش هسته اعوجاج کم‌تری خواهد داشت زیرا به علت وجود رولبرینگ‌ها، که در طول هسته مانند تکیه‌گاه عمل می‌کنند، طول آزاد آن کاهش می‌یابد. از طرفی به علت کم بودن فاصله رولبرینگ‌ها، در صورت اعوجاج نیز، مقدار آن بسیار کم خواهد بود.

۷- پیشنهادها

با توجه به عملکرد مطلوب نمونه‌های مدل‌سازی شده با استفاده از روش جدید، آزمایش‌های علمی در مقیاس‌های واقعی می‌تواند صحت نتایج به دست آمده را راستی‌یابی نماید.

۸- تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان استخراج شده است. بدین وسیله از زحمات مشاورین محترم این پایان‌نامه، آقایان دکتر عبدالحسین فلاحتی و دکتر نادر هویدایی که در ارتقای کیفی این پژوهش مؤثر بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.



- Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(1), pp. 239-256, (2020).
- [14] Zhou, Y., Shao, H., Cao, Y. and Lui, E.M., "Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review", *Journal of Engineering Structures*, 112991, p. 246, (2021).
- [15] Chigoi, A., C., Rahgozar, M.A. and Izadinia, M., "Seismic Performance of Three-core Buckling-Restrained Braces An Experimental Investigation", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(1), pp. 157-167, (2022).
- [16] Qiu, C., Cheng, L., & Du, X. "Performance-based plastic design of multi-story hybrid braced frames with buckling-restrained braces and shape memory alloy braces." *Journal of Constructional Steel Research* 198, 107576, (2022).
- [17] Ullah, R., Vafaei, M., Alih, S. C., & Waheed, A. "A review of buckling-restrained braced frames for seismic protection of structures." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103203, (2022).
- [18] Kazemi, F., and R., Jankowski. "Seismic performance evaluation of steel buckling-restrained braced frames including SMA materials." *Journal of Constructional Steel Research* 201, 107750, (2023).
- [19] Zhang, C., S. Zong, Z. Sui, and X. Guo. "Seismic performance of steel braced frames with innovative assembled self-centering buckling restrained braces with variable post-yield stiffness." *Journal of Building Engineering* 64, 105667, (2023).
- [20] Usami, T., Ge, H., and Luo, X., "Experimental and analytical study on high-performance buckling restrained brace dampers for bridge engineering", *Proceeding of 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, San Francisco, October 15-16, (2009).
- [21] AISC 341-16 (American Institute of Steel Construction). *Seismic provisions for structural steel buildings*, Chicago, IL; (2010).
- [22] Inoue, K., Sawaizumi, S. and Higashibata, Y., "Stiffening requirements for unbonded braces encased in concrete panels", *Journal of structural engineering*, 127(6), pp. 712-719, (2001).
- [23] Wang, C.-L., Usami, T., and Funayama, J., "Evaluating the influence of stoppers on the low-cycle fatigue properties of high-performance buckling-restrained braces", *Journal of Engineering Structures*, 41, pp. 167-176, (2012).
- [24] ABAQUS. Standard Documentation version 6.10. Pawtucket, RI Timoshenko, S., (1976), "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132.
- [1] Uang, C.-M. and Nakashima, M. "Steel buckling-restrained braced frames", *Earthquake engineering from engineering seismology to performance-based engineering*, 4(2), pp. 20-134, CRC press, Boca Raton, (2004).
- [2] Sabelli, R. and Lopez, W. "Design of buckling-restrained braced frames", *Modern Steel Construction*, 44(3), pp. 67-74, (2004).
- [3] Ko, E., Kimura, I., Clark, P., Aiken, I. and Kasai, K., "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices", in *Proceedings, 68th annual convention*, Santa Barbara, CALIFORNIA, SEAOC Structural engineers association of California, October (1999).
- [4] Black, C., Aiken, I.D. and Makris, N. "Component testing, stability analysis, and characterization of buckling-restrained unbonded braces" (TM). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Report No. PEER 2002/08, Univ. of California, Berkeley, CA, (2002).
- [5] Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E., Wada, A. and Fujimoto, M. "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", in *Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering*, pp. 719_24, (1988).
- [6] Sabelli, R., Mahin, S. and Chang, C. "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces", *Engineering Structures*, 25(5), pp. 655-666, (2003).
- [7] Iwata, M. "Applications-design of buckling restrained braces in Japan", in *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Canadian Association for Earthquake Engineering (CAEE) Vancouver, Canada, pn. 3208 (2004).
- [8] Xie, Q., "State of the art of buckling-restrained braces in Asia", *Journal of constructional steel research*, 61(6), pp. 727-748, (2005).
- [9] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. and DeVall, R. "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), pp. 183-198, (2006).
- [10] Korzekwa, A. and R. Tremblay, "Numerical simulation of the cyclic inelastic behaviour of buckling restrained braces", in *Behaviour of steel structures in seismic areas*, CRC Press, pp. 671-676, (2009).
- [11] Hoveidae, N. and Rafezy, B. "Overall buckling behavior of all-steel buckling restrained braces", *Journal of constructional steel research*, 79, pp. 151-158, (2012).
- [۱۲] شروانی تبار، بهمن و جنگ آرا، جعفر، ۱۳۹۴، به حداقل رسانی نیروهای ناشی از اصطکاک و اعوجاج هسته در مهاربندهای کمانش ناپذیر، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز.
- [13] Jiang, T., Dai, J., Yang, Y., Liu, Y. and Bai, W., "Study of a new-type of steel buckling-restrained brace",

