



http://journaliss.ir

مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه با غلاف مسلح به الیاف پلیمری کربن

سید علی رضوی طباطبایی^{*۱}

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، arazavi@usc.ac.ir

چکیده

مهاربندهای کمانش‌تاب به دلیل داشتن شکل‌پذیری بالا و عملکرد تقریباً یکسان در حالت‌های کششی و فشاری، از سیستم‌های مرسوم در کشورهای پیشرفته هستند. یکی از قابلیت‌های مهم این نوع مهاربندها، انعطاف در انتخاب طول هسته مهاربند است. مزیت تغییر در طول مهاربند این است که امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت را فراهم می‌کند. در این پژوهش، از الیاف پلیمری کربن به عنوان یک نوع غلاف جایگزین غلاف فولادی در مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه استفاده شده است. در جزئیات پیشنهادی، مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه مانند یک میراگر فلزی در انتهای مهاربند در قاب قرار می‌گیرد. قسمت الاستیک به گونه‌ای طراحی شده است که با لحاظ نمودن یک ضریب اطمینان، در کشش تسلیم نشود و در فشار هم کمانش کلی در کل مهاربند رخ ندهد. با کاهش طول مهاربند کمانش‌تاب، سختی آن افزایش یافته و سختی بعد از تسلیم مهاربند نیز به طور قابل توجهی بیش‌تر از مهاربند کمانش‌تاب معمولی می‌شود. برای ارزیابی عملکرد این مهاربند، دو نوع آزمایش انجام شده است. در آزمایش اول، یک نمونه مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه با غلاف بتنی و الیاف پلیمری کربن تحت بارگذاری تک‌محوری قرار گرفته است. در آزمایش دوم، یک نمونه مهاربند کامل با قطعه کمانش‌تاب و ادامه آن تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف پلیمری کربن به جای غلاف فولادی باعث تسهیل پیش‌ساختگی این نوع مهاربندها و حصول رفتار لرزه‌ای و جذب انرژی مناسب در این نوع مهاربندها می‌شود.

واژگان کلیدی

مهاربند کمانش‌تاب با طول کوتاه، لایه‌های الیاف پلیمری کربن، آزمایش چرخه‌ای

Reduced Length Buckling-Restrained with Carbon Fiber Reinforced Polymer Encasing

S.A. Razavi

Abstract

Buckling restrained braces (BRBs) have gained significant popularity in advanced engineering due to their high ductility and nearly identical behavior under tension and compression. A key advantage of BRBs lies in the flexibility to adjust the length of the brace core, allowing for independent selection of stiffness and strength. In this research, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is employed as an alternative to steel encasing in reduced length buckling restrained braces. The proposed design incorporates the reduced length BRB as a metallic damper at the end of the brace within the frame. The elastic portion is designed to remain elastic under tension with a safety factor and to prevent overall buckling under compression. By reducing the length of the BRB, its stiffness increases, and the post-yield stiffness becomes significantly higher compared to conventional BRBs. To evaluate the performance of this brace, two types of tests were conducted. In the first test, a reduced length BRB specimen with a concrete encasing and CFRP was subjected to a uniaxial load. In the second test, a complete brace specimen with a short buckling restrained portion and the rest of brace was subjected to cyclic loading. The results demonstrate that using CFRP instead of steel encasing facilitates the prefabrication of these braces and leads to desirable seismic behavior and proper energy dissipation.

Keywords

Reduced Length Restrained Braces, Carbon Fiber Reinforced Polymer Layers, Cyclic Testing



اعضای مهاربندی در طول عمر یک سازه با نیروهای کششی و فشاری مواجه می‌شوند، اما مسئله اصلی در این المان‌ها، وقوع کمانش در مواجهه با نیروهای فشاری می‌باشد. مهاربندهای کمانش‌تاب (BRB)^۱ با توجه به شکل‌پذیری بالا و رفتار تقریباً یکسان در کشش و فشار، دارای نمودار چرخه‌ای پایدار هستند و همچنین مدت‌ها است که در کشورهای پیشرفته دنیا به کار گرفته می‌شود. یکی از بهبودها بر روی این سیستم، استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب با طول کم‌تر نسبت به نوع متعارف این سیستم است. منحصربه‌فردترین مزیت این روش امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت است. از دیگر مزیت‌های کاهش طول قسمت کمانش‌تاب، می‌توان به مواردی از قبیل کاهش هزینه ساخت، انعطاف در موقعیت نصب و افزایش سختی پس از تسلیم اشاره کرد [۱-۳].

مهاربندهای کمانش‌تاب از یک هسته مرکزی فولادی و پوشش پیرامونی از مصالح بتن یا فولاد تشکیل یافته‌اند. این هسته به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که عضو فشاری و کششی هم‌زمان به مرحله تسلیم برسد. برای جلوگیری از کمانش در فشار، هسته فولادی درون یک پوشش یا غلاف قرار می‌گیرد. مهاربندهای کمانش‌تاب دارای نقاط ضعف متعددی نیز هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به اضافه‌مقاومت محدود، تغییرشکل‌های ماندگار زیاد و تمرکز تغییرمکان نسبی زیاد در برخی طبقات اشاره نمود [۱].

۱-۱- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های آزمایشگاهی درباره استفاده از پوشش‌های الیاف پلیمری (FRP)^۲ در مهاربندهای کمانش‌تاب انجام شده است. در سال ۲۰۱۸ رضوی و همکاران^۳ به امکان‌سنجی استفاده از لایه‌های الیاف پلیمری کربن (CFRP)^۴ به جای پوشش فلزی در مهاربندهای کمانش‌تاب پرداختند [۴]. در این پژوهش استفاده از لایه‌های الیاف پلیمری کربن به عنوان پوشش مهاربندهای کمانش‌تاب با طول کوتاه (RLBRB)^۵ به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و پس از معرفی و ذکر مزیت‌های این روش، نتایج آن ارائه شد.

دوسیچکا^۵ و همکاران [۵ و ۶] طی تحقیقی تقویت و بهبود رفتار اعضای فولادی لاغر به صورت درجا را با بهره‌گیری از ایده

و عملکرد مطلوب مهاربندهای کمانش‌تاب به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نمونه‌های آزمایش‌شده دارای هسته فولادی A36 با مقطع نبشی متقارن $L50 \times 50 \times 6.25$ به طول ۲۴۳۰ mm می‌باشد که با قوطی $100 \times 100 \times 6.25$ ساخته شده از جنس FRP به طول ۱۸۳۰ mm پوشش داده شده است. استفاده از قوطی‌های FRP به جای قوطی فولادی باعث کاهش وزن و سهولت در اجرا شده است. نبشی (هسته) در گوشه قوطی قرار گرفته و در نهایت مجموعه با دو لایه عرضی الیاف GFRP دورپیچ می‌شود. انتخاب الیاف شیشه به دلیل مزیت اقتصادی آن بوده است. روی نبشی با لایه سیلیکونی به ضخامت 0.8 mm دورپیچ شده است، تا هسته بتواند جداگانه نسبت به غلاف تغییرشکل دهد. وزن کل غلاف به اندازه خود هسته است. نتایج این تحقیق نشان داد انتهای نبشی در نزدیکی اتصال به جک بارگذاری به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در محلی که قوطی FRP ختم شده، دچار چرخش شده است. همچنین مد خرابی فشاری از کمانش کلی به جاری شدن در محل مفصل پلاستیک در کناره اتصال تبدیل شده است. با تشکیل مفصل پلاستیک یک نیروی افزاینده‌ای در پوشش FRP رخ می‌دهد که باعث پارگی در ناحیه انتهایی پوشش شده است. به دلیل ضعف جزئیات‌بندی، نمونه پیشنهادشده توسط دوسیچکا و همکاران^۵ نتوانسته است رفتار یک مهاربند کمانش‌تاب متعارف را به جای بگذارد.

۱-۲- انگیزه پژوهش

در مهاربندهای کمانش‌تاب متداول غلاف، اکثر طول هسته را پوشش می‌دهد، اما می‌توان غلاف را صرفاً بر روی طول محدودی از مهاربند در نظر گرفت. در مهاربند پیشنهادی در این پژوهش، قسمت تسلیم‌شونده به یک انتهای مهاربند هدایت شده و غلاف بر روی آن قرار می‌گیرد. در طرح پیشنهادی مدنظر است که مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه، مانند یک میراگر فلزی در انتهای مهاربند در مجموعه قاب قرار گیرد. قسمت الاستیک به نحوی طراحی می‌شود که با لحاظ نمودن ضریب اطمینان، در اثر بروز حداکثر نیروهای مورد انتظار در هسته، قسمت کمانش‌تاب در کشش دچار تسلیم نشده و در فشار نیز کل مهاربند کمانش نکرده و دچار تسلیم نشود. در مجموعه مهاربند، هسته عنصر کنترل‌شونده توسط تغییرمکان^۶ و ادامه مهاربند عضو کنترل‌شونده توسط نیرو^۷ می‌باشد. کاهش طول مهاربند کمانش‌تاب مزایای

^۶ Displacement-Controlled

^۷ Force-Controlled

^۱ Buckling Restrained Braces

^۲ Fiber Reinforced Polymer

^۳ Carbon Fiber Reinforced Polymer

^۴ Reduced Length Restrained Braces

^۵ Dusicka



(۲) $A_c \geq \frac{P_u}{\phi F_{yc}}$
نیروی محوری ایجادشده در مهاربند تحت ترکیب بارهای متعارف است.

به‌عنوان یک فرض اولیه انتخاب α مابین $0/2$ و $0/3$ و γ در حدود $0/15$ تا $0/25$ مناسب است. بر حسب انتخاب مقادیر مختلف α و γ پیشنهادشده، سختی معادلی (K_{eq}) بین $2/1$ تا $3/2$ برابر (K_{core}) ایجاد می‌شود.

بر اساس ملاحظات خستگی هسته ورق تخت و غیرصلیبی انتخاب می‌شود. نسبت عرض به ضخامت هسته بر اساس توصیه ضوابط لرزه‌ای بهتر است شرایط فشرده لرزه‌ای را برآورده نماید. انتخاب نسبت عرض به ضخامت بین 6 تا 8 بر اساس یافته‌های ایواتا^۲ و همکاران توصیه می‌شود [۹].

پس از تعیین مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات (Δw) بر اساس تحلیل الاستیک با ضرب ضریب تشدید تغییرمکان (C_d)، تغییرمکان واقعی طبقات محاسبه می‌شود. مقدار ضریب تشدید تغییرمکان در سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم مهاربندی کمانش‌تاب متداول کم‌تر است، اما در غیاب آن می‌توان اعداد پیشنهادی آیین‌نامه‌ای که محافظه‌کارانه هستند (5 یا $5/5$) را استفاده نمود.

(۳) $\Delta_m = C_d \Delta_w$
در صورت عدم کفایت مهاربند انتخابی در کنترل تغییرمکان می‌توان طول هسته را کاهش داد. در صورتی که کاهش طول میسر نباشد، باید سطح مقطع هسته را افزایش داد. به‌عنوان یک توصیه کلی در روند طراحی، بهتر است سعی شود تغییرمکان نسبی تمامی طبقات تقریباً برابر باشند. به‌منظور یکسان‌سازی توزیع تغییرمکان جانبی در ارتفاع ساختمان می‌توان طول و مساحت هسته را تغییر داد. بر اساس تغییرمکان واقعی طبقه، تغییرمکان واقعی مهاربند از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

(۴) $\Delta_b = \Delta_m \cos \theta$
که در آن (θ) زاویه مهاربند با افق می‌باشد. کرنش و تغییرشکل محوری هسته قطعه کمانش‌تاب با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

(۵) $\epsilon_c = [C_d \Delta_{bw} - \gamma R_y (\frac{F_{ysc}}{E})(1 - \alpha)L] \frac{1}{L_c}$
در رابطه فوق عبارت اول داخل کروشه، کل تغییرشکل محوری مهاربند کمانش‌تاب متناظر با زلزله طرح است. عبارت دوم داخل کروشه، تغییرشکل قسمت الاستیک مهاربند در باری متناظر با تسلیم قطعه تسلیم‌شونده مهاربند (RLBRB) است. با

متعددی در پی دارد. در طراحی و تناسب‌بندی سازه‌ها امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت، مطلوبیت زیادی دارد. در مهاربند کمانش‌تاب می‌توان به‌منظور تنظیم مقاومت، سطح مقطع و جهت تنظیم سختی، طول را تغییر داد. یکی از معایب سیستم‌های مهاربند کمانش‌تاب متداول، سختی پس‌ازتسلیم کم آن‌ها است که می‌تواند منجر به تغییر مکان‌های حداکثر و ماندگار شود [۲]. در صورت کاهش طول مهاربند کمانش‌تاب به دلیل افزایش سختی این قطعه، سختی بعد از تسلیم مهاربند نسبت به مهاربند کمانش‌تاب متداول افزایش می‌یابد. در مطالعات آزمایشگاهی صورت‌گرفته توسط ترمبلی^۱ و همکاران [۷] و مطالعات اجزای محدود صورت‌گرفته توسط رضوی و همکاران [۸] نیز افزایش سختی پس از تسلیم مهاربند کمانش‌تاب با کاهش طول قسمت تسلیم‌شونده به اثبات رسیده است.

در این پژوهش با انجام آزمایش بر روی این نوع از مهاربند، با استفاده از پوشش‌های الیاف پلیمری کربن به‌جای غلاف فولادی رفتار لرزه‌ای مطلوب و جذب انرژی بالاتر نسبت به مهاربند با غلاف فولادی مشاهده شد.

۲- مبانی طراحی

به‌منظور طراحی مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه باید مراحل زیر به‌ترتیب طی شود. لازم به ذکر است که روند طراحی در بیش‌تر موارد به‌صورت سعی و خطا در ابعاد می‌باشد.

مهاربند معادل، عضوی با سطح مقطع هسته و طولی برابر با طول کل مهاربند است. برای اصلاح سختی این مهاربند لازم است طبق رابطه (۱) با انتخاب ضرایب فرضی برای ضرایب اصلاح (α) و (γ) که به‌ترتیب برابر (L_c/L) و (A_c/A) هستند، محاسبه شود.

(۱) $K_{eq, core} = \frac{1}{\alpha - \alpha\gamma + \gamma} K_{core}$
در رابطه فوق (L_c) و (A_c) به‌ترتیب طول و مساحت هسته و (L) طول کل مهاربند و (A) مساحت قسمت خارج از هسته است. در تعیین سختی از رابطه (۱) مشخصات ورق اتصال و نواحی انتقالی مشابه قسمت الاستیک انتخاب شده است که فرضی منطقی می‌باشد. در صورت نیاز به تدقیق سختی مهاربند معادل، می‌توان ضریب افزایش سختی متناسب با جزئیات ناحیه انتقالی و ورق اتصال را در سختی کل مهاربند ضرب نمود. ضریب اصلاح مربوط به ناحیه انتقالی و ورق اتصال معمولاً عددی بین $1/1$ تا $1/5$ می‌باشد. پس از مدل‌سازی و طراحی سازه بر اساس نیروهای تحت ترکیبات بارگذاری متعارف، مساحت هسته از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

² Iwata

¹ Tremblay

۳- روند تست‌ها و جزئیات نمونه‌ها

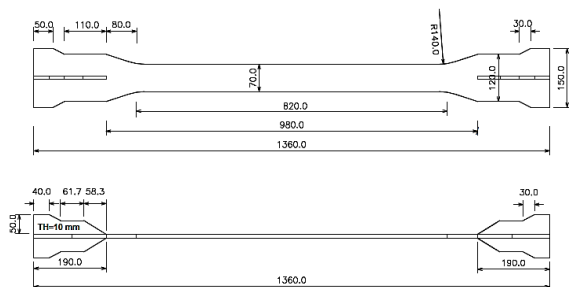
جهت درک بهتر از عملکرد مهاربند کمانش‌تاب با طول کوتاه دو نمونه ساخته و دو نوع آزمایش متفاوت انجام شده است. نمونه اول شامل یک نوع مهاربند کمانش‌تاب با طول کوتاه است که تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفته است.

در نمونه اول، غلاف از نوع بتنی و با پوشش الیاف پلیمری کربن در نظر گرفته شده است. با توجه به قرارگیری حجم وسیع بتن محصورشده توسط این الیاف و قابلیت آن در محصورنمودن هسته، انتظار می‌رود با توجه به نیروی عمود بر سطح زیاد هسته در مهاربند کمانش‌تاب با طول کوتاه، این نوع غلاف کارایی مناسبی داشته باشد.

در نمونه دوم به منظور بررسی رفتار یک مهاربند کامل، قطعه کمانش‌تاب در امتداد یک قطعه مهاربندی الاستیک با طول کوتاه و ادامه آن مورد آزمایش رفت و برگشتی قرار گرفته است.

۳-۱- جزئیات نمونه اول

هسته مهاربند در قسمت میانی از یک مقطع با پهنای ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است. شکل (۱) نمای از کنار و از بالای هسته را نشان می‌دهد.



شکل ۱- جزئیات هسته مهاربند کمانش‌تاب با غلاف بتنی با پوشش الیاف پلیمری کربن

هسته از طریق جوش شیاری با نفوذ کامل به دو صفحه انتهایی ۳۰۰ میلی‌متر در ۳۰۰ میلی‌متر با ضخامت ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل (۲) متصل می‌شود و صفحات انتهایی توسط شش پیچ M22 پرمقاومت به صفحات بالایی و پایینی دستگاه تک‌محوری وصل می‌گردد.

کم کردن عبارت دوم از عبارت اول، تغییر شکل قطعه تسلیم شونده محاسبه و با تقسیم آن بر طول همان قطعه، کرنش هسته قطعه RLBRB محاسبه می‌شود. طول هسته پیش‌تر بر اساس پارامتر α فرض شده است. کنترل طول هسته از رابطه (۶) با لحاظ نمودن بحرانی‌ترین پروتکل بارگذاری ASCE 7-22 [۱۰] و پروتکل AISC 341-22 [۱۱] انجام می‌پذیرد.

با توجه به این که در مهاربندهای کمانش‌تاب در حالت استفاده از هسته با طول کوتاه، پدیده خستگی چرخه پایین موضوعیت پیدا می‌کند، رابطه زیر برای جلوگیری از وقوع این نوع خستگی توسعه داده شده است.

$$L_c \geq \frac{\lambda r^{cl}}{e f_f} \Delta_{bm} \quad (6)$$

که در آن (c) و $(e f_f)$ به ترتیب ضریب توانی شکل‌پذیری خستگی و ضریب شکل‌پذیری خستگی در رابطه خستگی کم‌چرخه هستند که بر اساس آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های فولادی توسط کافین‌منسن^۱ [۱۲] پیشنهاد شده است. ضرایب (λ') تکرار چرخه‌ای است که بر اساس الگو و تعداد تکرار بارهای چرخه‌ای به دست می‌آید. در صورتی که طول قسمت تسلیم‌شونده کافی نباشد، بروز گسیختگی کم‌چرخه محتمل است و باید طول هسته افزایش یافته و پارامتر α بروزسانی شده و طراحی از گام دوم تکرار شود.

حداکثر بار محوری مورد انتظار که طبق AISC 341-22 [۱۱] به مقاومت محوری تطبیق‌یافته نام‌گذاری شده است، از روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شود.

$$P_{abs,T} \geq \omega R_y P_{ysc} \quad (7)$$

$$P_{abs,C} \geq \beta \omega R_y P_{ysc} \quad (8)$$

که در آن ضرایب (ω) و (β) به ترتیب ضریب اصلاح سخت‌شوندگی کرنش و ضریب اصلاح مقاومت فشاری هستند. نکته حائز اهمیت آن است که ضرایب (ω) و (β) در مهاربند پیشنهادی به دلیل پدیده سخت‌شوندگی کرنشی و تراز بالاتر کرنش‌ها نسبت به مهاربندهای کمانش‌تاب متداول بالاتر است. این ضرایب بر اساس نتایج آزمایش صورت‌گرفته بر روی مهاربند کمانش‌تاب با طول کوتاه و پوش منحنی هیستریزس قابل استخراج است. در غیاب وجود آزمایش، لحاظ نمودن ضریب $1/8$ برای ω و $1/3$ برای β پیشنهاد می‌شود.

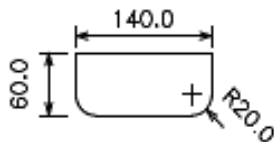
¹ Coffin-Manson

است. بافت ظاهری الیاف مورد استفاده در شکل (۴) نشان داده شده است.



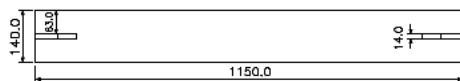
شکل ۴- بافت ظاهری الیاف پلیمری کربن مورد استفاده در غلاف مهاربند کمانش تاب

مقطع هر یک از قطعات بتنی مستطیلی به پهنای ۱۴۰ میلی متر و ارتفاع ۶۰ میلی متر است. کنج های بیرونی قطعه که با الیاف پوشیده خواهد شد، به منظور تأثیر بهتر محصورکنندگی الیاف با شعاع ۲۰ میلی متر گرد می شود. جزئیات مقطع و نمای غلاف بتنی در شکل (۵) نشان داده شده است.

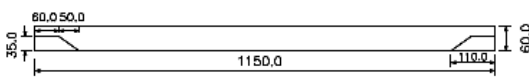


شکل ۵- مقطع قالب مورد نیاز برای ساخت غلاف پیش ساخته بتنی

طول غلاف با در نظر گرفتن فاصله طولی مورد نیاز بین هسته و غلاف و عدم اتکای انتهای غلاف به لبه سخت کننده ۱۱۵۰ میلی متر انتخاب می شود. شکل (۶) نمای از بالا و نمای جانبی غلاف بتنی را نشان می دهد. نحوه استقرار غلاف نسبت به هسته و صفحات انتهایی در شکل (۷) و مقطع غلاف در شکل (۸) نشان داده شده است.

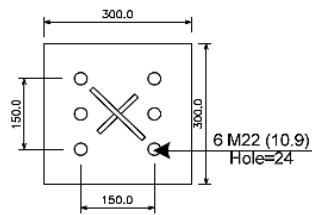


الف) نمای از بالا



ب) نمای از کنار

شکل ۶- جزئیات غلاف نمونه کمانش تاب با غلاف بتنی



شکل ۷- جزئیات صفحه انتهایی مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی

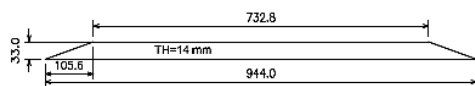
در مهاربندهای کمانش تاب متداول، مصالح پرکننده غلاف معمولاً دارای رده مقاومتی ۵۰ مگاپاسکال و بالاتر هستند. مقاومت بتن بر روی میزان ترک خوردگی، سختی سطحی و مدول الاستیسیته آن تأثیرگذار است [۹]. با توجه به دامنه های کرنشی بالا و نیروی عمود بر سطح زیادی که از طرف هسته به غلاف بتنی وارد می شود، در این نمونه طرح اختلاط برای دستیابی به بتنی با مقاومت مشخصه ۲۸ روزه نمونه مکعبی ۵۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مشاهدات متعدد حاکی از آن است که در غلاف های متداول بتنی، خردشدگی موضعی بتن غلاف به خصوص در دو انتها رخ داده است، که این خود از معایب مهاربندهای کمانش تاب متداول است [۱۳]. با توجه به محدود بودن هندسه و حجم غلاف، برای جلوگیری از بروز شکست در بتن، در یک طرح ابداعی، در غلاف های بتنی این تحقیق، از مفتول های فولادی به منظور افزایش سختی سطحی و همچنین افزایش مقاومت کششی موضعی بتن استفاده شده است. شکل (۳) نمونه ای از فیبرهای مصرفی را نشان می دهد.



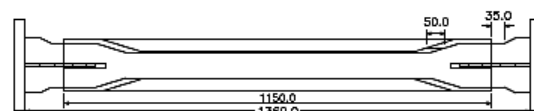
شکل ۸- نمونه فیبر مورد استفاده در طرح اختلاط بتن

الیاف مورد استفاده در این نمونه از پلیمر کربن و با وزن واحد سطح $200 \text{ (gr/m}^2\text{)}$ بوده و ضخامت اسمی آن برابر ۱۷۶ میلی متر به ازای هر لایه می باشد. لازم به ذکر است وزن واحد سطح الیاف از ضرب چگالی در ضخامت آن حاصل می شود. مقاومت کششی نهایی الیاف پلیمری کربن مورد استفاده برابر 4116 (MPa) ، مدول الاستیسیته آن برابر 240 (GPa) و کرنش گسیختگی آن $1/72\%$

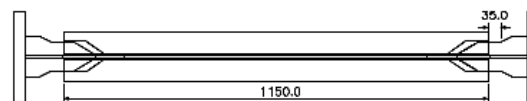
به منظور تأمین فاصله مورد نیاز بین هسته و غلاف از دو پرکننده فولادی استفاده می‌شود. استفاده از پرکننده فولادی علاوه بر دارابودن استحکام کافی باعث تنظیم دقیق‌تر فاصله بین هسته و غلاف می‌شود. ضخامت این پرکننده‌ها ۱۴ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل (۹) جزئیات پرکننده بر روی غلاف را نشان می‌دهد. طراحی غلاف متأثر از حالت‌های مختلف حدی است که در جدول (۱) مشخصات آن آورده شده است.



شکل ۹- جزئیات پرکننده فولادی بر روی غلاف‌های بتنی

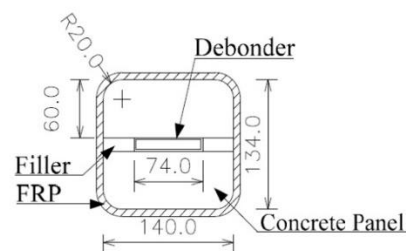


الف) نمای از بالا



ب) نمای از کنار

شکل ۷- نحوه استقرار غلاف نسبت به هسته نمونه کمانش‌تاب با غلاف بتنی



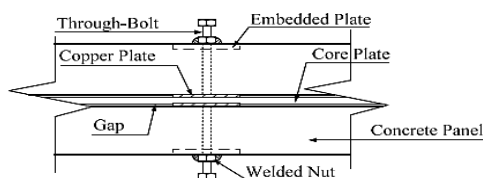
شکل ۸- مقطع کل غلاف

جدول ۱- معیارهای طراحی غلاف بتنی با پوشش CFRP (نمونه اول)

حالت حدی	واحد	تقاضا	ظرفیت	لایه CFRP	ضخامت کلی لایه (mm)
پایداری کلی مهاربند	-	3.5	7.01	۱ لایه طولی	۱۷۶
نیروی هم‌آور*	kN	81.81	121.86	۲ لایه عرضی	۳۵۲
خمش کلی غلاف	kN-m	2.4	13.37	۲ لایه طولی	۳۵۲
خمش موضعی طولی	kN-m	1.00	2.78	۱ لایه طولی	۱۷۶
خمش موضعی عرضی	kN-m	0.98	1.52	۳ لایه عرضی	۵۲۸

*Clamping Force

سیستم نگهدارنده نمونه اول در شکل (۱۰) و نمای مهاربند سرهم‌بندی‌شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- سیستم نگهدارنده غلاف بر روی هسته در غلاف بتنی

در جدول فوق منظور از لایه طولی در راستای طول مهاربند و لایه عرضی عمود بر محور مهاربند می‌باشد. همچنین نیروی هم‌آور نیرویی است که توسط الیاف CFRP واقع در جداره غلاف تأمین شده و مانع از جداسدن دو قطعه بتنی مهاربند در راستای عمود بر صفحه قطعات می‌شود و از تقسیم آن بر مساحت الیاف، تنش هم‌آور حاصل می‌شود.

۳-۲- ساخت نمونه اول

برای قالب‌بندی قطعات غلاف از دو پانل MDF به پهنای ۱۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. این دو قطعه با تعبیه دو پرکننده فولادی در کناره‌های آن و ساندویچ کردن هسته، مجموعه غلاف را تشکیل می‌دهد. جزئیات به کاررفته برای

۳-۲-۱- پروتکل بارگذاری نمونه اول

با فرض قابی با ارتفاع ۳ متر و طول ۵ متر و الگوی مهاربند ۸ شکل، تغییر مکان محوری کل مهاربند در نسبت تغییر مکان جانبی ۱/۵ درصد برابر است با ۲۸/۸ میلی متر با فرض مقطع Pipe 150×10 برای قسمت الاستیک، تغییر مکان خالص تجربه شونده توسط قطعه کمانش تاب برابر است با ۲۸/۱۵ میلی متر. بر این مبنا جدول (۲) جزئیات پروتکل بارگذاری را نشان می دهد.

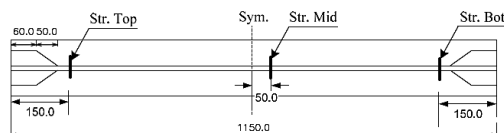


شکل ۱۱- اجرای پوشش الیاف پلیمری کربن بر روی نمونه کمانش تاب با غلاف بتنی

جدول ۲- پروتکل بارگذاری نمونه اول مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی

دامنه چرخه	واحد	Δ_{by}	$0.5\Delta_{bm}$	Δ_{bm}	$1.5\Delta_{bm}$	$2\Delta_{bm}$
تعداد چرخه	-	2	2	2	2	2
دریافت طبقه (Δ/h)	%	0.07	0.75	1.50	2.25	3
جابه جایی طبقه (Δ_m)	mm	2.1	22.5	45.0	67.5	90
جابه جایی RLBRB (Δ_{rb})	mm	1.35	13.80	28.15	42.46	56.3
ϵ_c	%	0.16	1.68	3.43	5.18	6.86
$\eta = \sum \Delta pl / \Delta y$	-	-	74	232	475	843

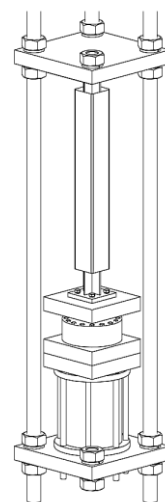
به منظور اندازه گیری تغییر مکان های ایجاد شده هشت عدد LVDT و همچنین شش عدد کرنش سنج بر روی الیاف پلیمری کربن نصب شده است. این کرنش سنج ها در جداره غلاف نصب شده اند و معرف تنش های هم آور دو غلاف هستند. جدول (۳) مشخصات ادوات اندازه گیری را نشان می دهد. شکل (۱۳) موقعیت کرنش سنج ها و شکل (۱۴) نمونه ای از کرنش سنج های نصب شده روی غلاف را نشان می دهد.



شکل ۱۳- موقعیت کرنش سنج های واقع در جداره غلاف بتنی با پوشش الیاف پلیمری کربن

۳-۲-۲- نصب و انجام آزمایش تک محوری

شکل (۱۲) نحوه استقرار نمونه در سامانه انجام آزمایش را نشان می دهد.

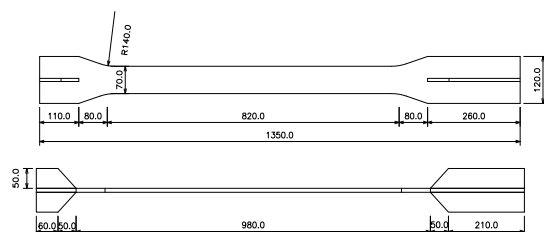


شکل ۱۲- سامانه انجام آزمایش نمونه اول کمانش تاب با غلاف بتنی

جدول ۳- مشخصات کرنش سنج‌های نصب شده بر روی نمونه اول با غلاف بتنی

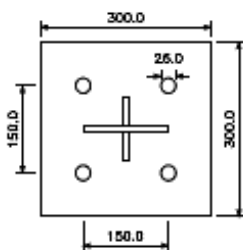
موقعیت	هدف	کرنش سنج
پایین	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.1
وسط	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.2
بالا	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.3
پایین	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.4
وسط	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.5
بالا	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف	STR.6

هسته مهاربند مشابه نمونه اول در قسمت میانی از یک مقطع با پهنای ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است. شکل (۱۶) نمای از کنار و از بالای هسته را نشان می‌دهد



شکل ۱۶- جزئیات هسته مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی با پوشش الیاف پلیمری کربن (نمونه دوم)

مشابه جزئیات قبلی، هسته از طریق جوش شیاری با نفوذ کامل به یک صفحه انتهایی (شکل (۱۷)) متصل می‌شود و صفحات انتهایی توسط چهار پیچ M24 پرمقاومت از رده ۱۲.۹ به مفصل انتهایی در یک سمت و صفحه انتهایی لوله در سمت دیگر متصل می‌گردد.



شکل ۱۷- جزئیات صفحه انتهایی مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی (نمونه دوم)

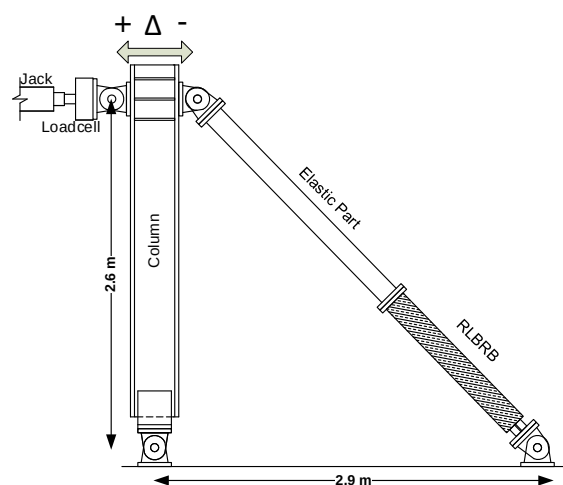
غلاف از دو قطعه بتنی به پهنای ۱۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر تشکیل شده است، که در نهایت پس از قرارگیری به حالت ساندویچی یک مستطیل ۱۷۳/۵ میلی‌متر در ۱۴۰ میلی‌متر را تشکیل می‌دهد. شکل (۱۸) مقطع غلاف را نشان می‌دهد.



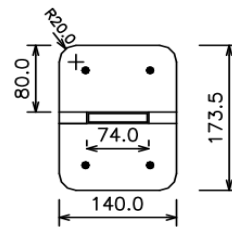
شکل ۱۴- نمونه اول کمانش تاب با غلاف بتنی در سامانه انجام آزمایش تک محوری

۳-۳- جزئیات نمونه دوم

به منظور بررسی رفتار یک مهاربند کامل، شامل قطعه کمانش تاب با طول کوتاه و قطعه الاستیک آن مورد آزمایش رفت و برگشتی قرار گرفته است. نمای کلی این نمونه در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

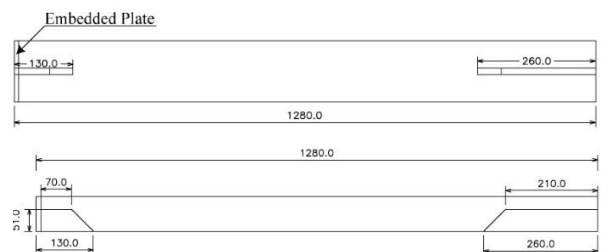


شکل ۱۵- نمای جانبی کلی نمونه دوم (مهاربند کامل)



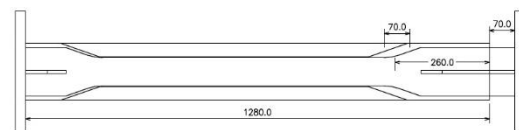
شکل ۱۸- مقطع غلاف بتنی (نمونه دوم)

تعداد لایه‌های الیاف پلیمری کربن بر اساس مبانی محاسباتی ذکر شده در توضیحات نمونه پیشین و مشابه نمونه قبلی انتخاب شده است. الیاف عرضی اضافه در این نمونه به دلیل بلندتر بودن طول سخت‌کننده‌ها در سمت پایین و همچنین مجاورت غلاف به لوله و ایجاد خمش کلی در غلاف به طولی برابر با ۵۰۰ میلی‌متر در هر دو انتها افزایش یافته است. جزئیات غلاف در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

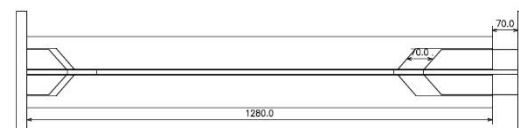


شکل ۱۹- نمای از کنار و بالای غلاف (نمونه دوم)

همچنین نحوه استقرار غلاف نسبت به هسته و صفحات انتهایی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در این نمونه تمامی فاصله طولی بین هسته و غلاف در یک سمت تأمین شده است.



الف) نمای از بالا



ب) نمای از کنار

شکل ۲۰- مجموعه غلاف و هسته (نمونه دوم)

طراحی لوله مشتمل بر لحاظ کردن معیارهای کنترل تیرستونی و کمانش کلی است. با انتخاب لوله به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر ضریب اطمینان برای پایداری کلی مهاربند (رابطه واتاناب^۱) برابر ۷/۹۵ و برای کنترل رابطه تیرستونی برابر ۱/۲۱ می‌باشد. لوله توسط جوش شیاری با نفوذ کامل به دو صفحه انتهایی مشابه صفحات انتهایی هسته و توسط چهار پیچ M24 رده ۱۲.۹ به قطعه کمانش‌تاب متصل می‌شود.

به منظور تأمین پایداری نمونه در جهت خارج از صفحه، ادوات خاص مهار جانبی در وسط ارتفاع ستون بارگذاری، طراحی شده است. این مهار جانبی در عین این که قیدی در برابر حرکت داخل صفحه ایجاد نمی‌کند، قابلیت محدود کردن حرکت خارج از صفحه را دارد. مهار جانبی از یک ستون قوی، یک المان رابط و یک ادوات مهار قوطی‌شکل که کل ستون را دربرمی‌گیرد، تشکیل شده است.

۳-۱-۳-۳- ساخت نمونه دوم

روند ساخت هسته و غلاف مشابه نمونه اول می‌باشد. به منظور اتصال غلاف به لوله مطابق شکل (۲۱) از یک صفحه انتهایی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر که توسط میلگردهای U شکل در بتن غلاف مدفون شده است، استفاده شده است. شکل (۲۲) مراحل مختلف ساخت نمونه را نشان می‌دهد.

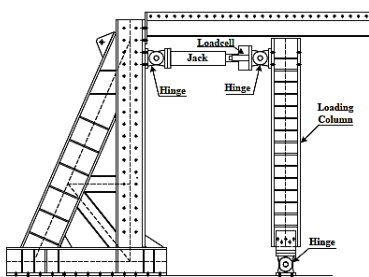


شکل ۲۱- قالب غلاف و آرماتورهای طولی و آرماتور صفحه انتهایی



شکل ۲۲- مونتاژ نمونه (استقرار غلاف رویی بر روی غلاف زیرین و بستن دو غلاف با گیره)

^۱ Vatanabe



شکل ۲۳- قاب عکس العمل و سامانه اعمال بار به نمونه دوم

شکل (۲۴) نحوه اسقرار نمونه و اتصال آن به ستون بارگذاری و موقعیت کرنش سنج ها و ابزارهای نصب شده بر روی نمونه را نشان می دهد. همچنین نمای از نزدیک ادوات مهار جانبی در شکل (۲۵) و مشخصات کرنش سنج ها در جدول (۶) ارائه شده است. به منظور اندازه گیری تغییر مکان های ایجاد شده در نمونه از هشت عدد LVDT در این سامانه مطابق جدول (۵) استفاده شده است.

۳-۳-۲- پروتکل بارگذاری نمونه دوم

پروتکل بارگذاری بر اساس ضوابط پیوست K3 ملاحظات طرح لرزه ای AISC 341-22 تعیین شده است. از طرفی به دلیل کاهش تغییر مکان نسبی، نسبت به نمونه های پیشین چرخه $2\Delta_{bm}$ در جهت اطمینان به پروتکل بارگذاری افزوده شد. جزئیات پروتکل بارگذاری در جدول (۴) درج شده است.

در صورتی که پس از اتمام پروتکل استاندارد، گسیختگی ناشی از خستگی رخ ندهد، آزمایش با چرخه های با دامنه $1.5\Delta_{bm}$ تا بروز خستگی ادامه می یابد. با توجه به پروتکل انتخابی و طول مهاربند، شاخص خستگی تا انتهای دومین چرخه $2\Delta_{bm}$ به مقدار یک می رسد و این بدان معنا است که تا انتهای اعمال پروتکل، گسیختگی ناشی از خستگی کم چرخه رخ نخواهد داد.

۳-۳-۳- نصب نمونه و انجام آزمایش قاب کامل

شکل (۲۳) قاب عکس العمل ساخته شده برای اعمال نیرو به نمونه قاب جزء را نشان می دهد. این سامانه مشتمل بر قاب عکس العمل، جک هیدرولیکی، نیروسنج کشش فشار و سه مفصل خمشی است. مفاصل خمشی قادر هستند مسیر نیرو را از جک بدون اعمال خمش ناخواسته به نمونه تأمین نمایند.

جدول ۴- پروتکل بارگذاری نمونه دوم

$2\Delta_{bm}$	$1.5\Delta_{bm}$	Δ_{bm}	$0.5\Delta_{bm}$	Δ_{by}	واحد	دامنه چرخه
2	2	2	2	2	-	تعداد چرخه
2.5	1.875	1.25	0.625	0.07	%	دریافت طبقه (Δ/h)
64.25	48.19	32.13	16.06	2.55	mm	جابه جایی طبقه (Δ_m)
45.16	33.87	22.58	11.29	1.79	mm	جابه جایی مهاربند (Δ_b)
44.71	33.42	22.13	10.84	1.34	mm	جابه جایی RLBRB (Δ_{rb})
5.45	4.08	2.70	1.32	0.16	%	ε_c
630	372	181	57	-	-	$\eta = \sum \Delta pl / \Delta y$

جدول ۵- مشخصات LVDT های نصب شده بر روی نمونه دوم

سنسور	مشخصات	هدف	موقعیت
LVDT1	تغییر مکان سنج ۳۰۰ میلی متر	تغییر مکان ستون بارگذاری نسبت به تیر شاهین	بالای ستون
LVDT2	تغییر مکان سنج ۲۰۰ میلی متر	تغییر مکان صفحه وسط مهاربند نسبت به انتهای پایین	موازی غلاف
LVDT3	تغییر مکان سنج ۲۰۰ میلی متر	تغییر مکان غلاف نسبت به صفحه انتهایی	پایین غلاف
LVDT4	تغییر مکان سنج ۵۰ میلی متر	تغییر مکان داخل صفحه کل مهاربند در وسط	وسط مهاربند
LVDT5	تغییر مکان سنج ۲۵ میلی متر	تغییر مکان خارج صفحه کل مهاربند در وسط	وسط مهاربند
LVDT6	تغییر مکان سنج ۲۵ میلی متر	تغییر مکان انتهای غلاف در جهت داخل صفحه مهاربند	پایین مهاربند
LVDT7	تغییر مکان سنج ۲۵ میلی متر	تغییر مکان انتهای غلاف در جهت صفحه مهاربند	پایین مهاربند
LVDT8	تغییر مکان سنج ۱۰ میلی متر	لغزش صفحه تکیه گاه روی کف قوی	پایین غلاف



شکل ۲۵- جزئیات مهارجانبی نمونه قاب جزء (نمونه دوم)



شکل ۲۴- مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی در سامانه انجام آزمایش قاب جزء (نمونه دوم)

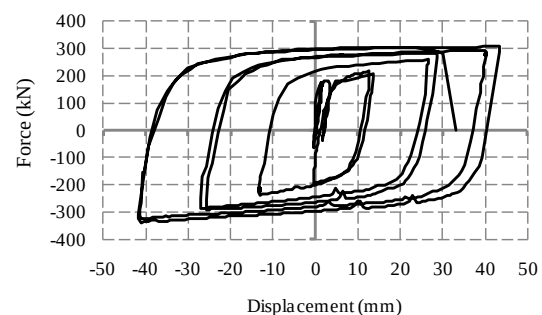
جدول ۶- مشخصات کرنش سنج های نصب شده بر روی نمونه دوم

سنسور	هدف	موقعیت
STR.1	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در بالا ۱ (Clamping)	غلاف بالا
STR.2	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در وسط ۱ (Clamping)	غلاف وسط
STR.3	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در پایین ۱ (Clamping)	غلاف پایین
STR.4	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در بالا ۲ (Clamping)	غلاف بالا
STR.5	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در وسط ۲ (Clamping)	غلاف وسط
STR.6	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در پایین ۲ (Clamping)	غلاف پایین
STR.7	کرنش عرضی ایجاد شده در غلاف در بالا (خمش عرضی)	غلاف بالا
STR.8	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در وسط ۱ (Clamping)	غلاف وسط
STR.9	کرنش ایجاد شده در جداره غلاف در پایین ۱ (Clamping)	غلاف پایین
STR.10	کرنش ایجاد شده در وسط مهاربند در لوله ۱	نزدیک انتهای لوله ربع اول
STR.11	کرنش ایجاد شده در وسط مهاربند در لوله ۲	نزدیک انتهای لوله ربع دوم
STR.12	کرنش ایجاد شده در وسط مهاربند در لوله ۳	نزدیک انتهای لوله ربع سوم
STR.13	کرنش ایجاد شده در وسط مهاربند در لوله ۴	نزدیک انتهای لوله ربع چهارم
STR.14	کرنش ایجاد شده در سر بالای لوله ۱	نزدیک بالای لوله نصف اول
STR.15	کرنش ایجاد شده در سر بالای لوله ۲	نزدیک بالای لوله نصف دوم

۴- نتایج آزمایش و بحث روی نتایج

۴-۱- نتایج تست نمونه اول

همان‌طور که در شکل (۲۶) نیز مشخص است، این نمونه رفتار پایدار متقارن با شیب سخت‌شوندگی همواری از خود نشان داده و تا تغییر مکان ۴۲/۴۶ میلی‌متر این رفتار ادامه دارد. اما در ادامه همان‌طور که انتظار می‌رفت، در اولین چرخه کششی تغییر مکان ۵۶/۳ میلی‌متر و در تغییر مکان ۳۰ میلی‌متر دچار گسیختگی ناشی از خستگی کم‌چرخه شد؛ که در نمودار به‌صورت بریدگی ناگهانی نشان داده شده است. بارگذاری، بعد از گسیختگی هسته خاتمه یافت.



شکل ۲۶- نمودار نیرو-تغییر مکان مهاربند کمانش تاب نمونه اول

این نمونه حداکثر کرنش ۵/۱۸٪ را تجربه کرده است، که با توجه به تراز کرنش تجربه‌شده، مکانیسم جداکننده بسیار خوب عمل کرده است. همچنین نسبت تغییرشکل پلاستیک تجمعی به تغییرشکل الاستیک (η) تا انتهای آزمایش ۴۹۵ می‌باشد که عدد مناسبی است. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده مهاربند در خلال آزمایش برای چرخه‌های مختلف در جدول (۷) درج شده است. مقدار حداکثر نسبت شکل‌پذیری برابر ۴۲ می‌باشد.

جدول ۷- پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در نمونه اول مهاربند کمانش تاب با غلاف بتنی

No	Cycle	ϵ_c (%)	μ	ω	β	$\beta\omega$
1	0.5 Δ_{bm}	1.65	13	1.17	1.01	1.19
2	0.5 Δ_{bm}	1.58	13	1.23	1.10	1.36
3	Δ_{bm}	3.28	26	1.48	1.11	1.64
4	Δ_{bm}	3.32	27	1.62	1.08	1.76
5	1.5 Δ_{bm}	4.95	40	1.68	1.17	1.96
6	1.5 Δ_{bm}	5.18	42	1.75	1.17	2.05
7	1.5 Δ_{bm}	4.02	32	1.47	NA	NA

همان‌طور که در شکل (۲۷) مشخص است، در این نمونه گسیختگی در وسط نمونه و به‌صورت شکل‌پذیر رخ داده است و باریک‌شدگی در ناحیه میانی کاملاً مشهود است.



الف) نمای بالا



ب) نمای از کنار



ت) نمای از بالای قسمت گسیخته‌شده



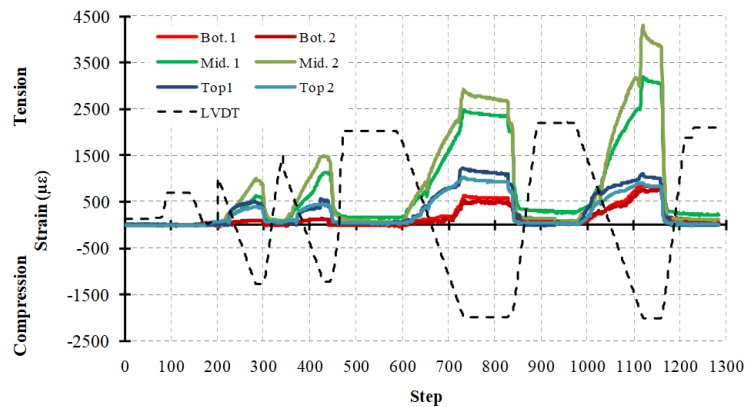
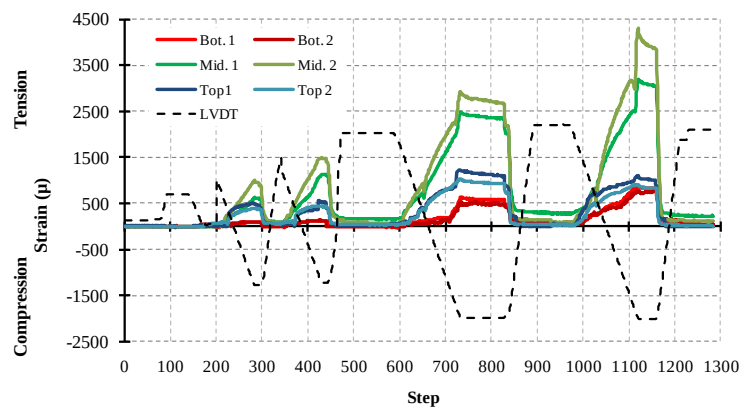
پ) نمای از کنار قسمت گسیخته‌شده

شکل ۲۷- وضعیت هسته مهاربند کمانش تاب اول بعد از آزمایش

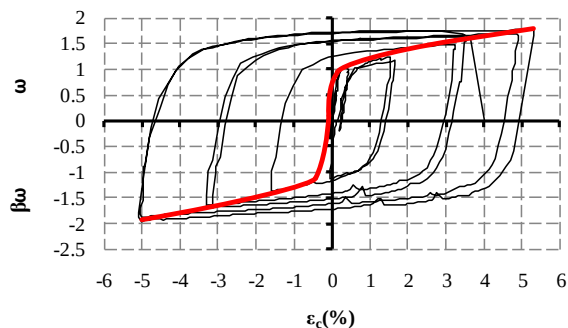
توزیع کرنش باقی مانده بر روی هسته در نواحی مختلف مطابق جدول (۸) می باشد. در این جدول (ϵ_T) و (ϵ_W) به ترتیب کرنش در راستای ضخامت و پهنای هسته و (ϵ_L) کرنش طولی هسته است.

جدول ۸- کرنش های باقی مانده هسته نمونه اول

موقعیت	ϵ_T (%)	ϵ_W (%)	ϵ_L (%)
پایین	7.59	2.00	-9.59
وسط	-24.34	-22.0	46.34
بالا	7.76	1.85	-9.61

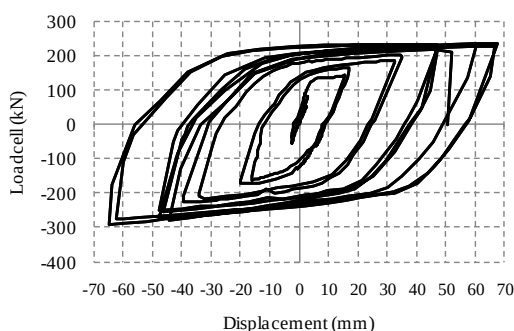


شکل ۲۸- تاریخچه کرنش ایجاد شده بر روی جداره غلاف نمونه کمانش تاب با غلاف بتنی



شکل ۲۹- منحنی پوش مهاربند کمانش تاب اول

سطح بیرونی غلاف و سطح در تماس با هسته و همچنین دو انتهای آن دچار هیچ گونه خرابی و خردشدگی ولو به صورت موضعی نشدند. علاوه بر این، الیاف پلیمری کربن کاملاً سالم باقی مانده است. در شکل (۲۹) منحنی پوش حاصل شده از منحنی هیستریزس مهاربند کمانش تاب اول برای مقاصد طراحی نشان داده شده است.



شکل ۳۰- نمودار نیرو-تغییر مکان مهاربند کماتش تاب نمونه دوم

جدول ۹- پارامترهای به دست آمده از آزمایش تحت قاب

No	Cycle	ϵ_c (%)	μ	ω	β	$\beta\omega$
1	$0.5\Delta_{bm}$	1.35	11	1.17	1.13	1.32
2	$0.5\Delta_{bm}$	1.49	12	1.37	1.03	1.41
3	Δ_{bm}	2.86	23	1.54	1.15	1.76
4	Δ_{bm}	3.17	25	1.68	1.10	1.84
5	$1.5\Delta_{bm}$	3.77	30	1.79	1.15	2.06
6	$1.5\Delta_{bm}$	4.08	33	1.85	1.13	2.08
7	$2\Delta_{bm}$	4.71	38	1.89	1.19	2.25
8	$2\Delta_{bm}$	5.50	44	1.94	1.23	2.39
9	$1.5\Delta_{bm}$	4.07	33	1.92	1.16	2.24
10	$1.5\Delta_{bm}$	4.50	36	1.88	1.21	2.28
11	$1.5\Delta_{bm}$	4.41	35	1.74	NA	NA

وضعیت هسته بعد از آزمایش در شکل (۳۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است، هسته دچار کماتش داخل و خارج صفحه گردید. دامنه کماتش در مدهای بالاتر از 0.4 میلی‌متر تا $4/1$ میلی‌متر متغیر است. کماتش‌های موضعی در سمت آزاد هسته شدیدتر از انتهای مقید آن می‌باشند.

غلاف بتنی به‌طور محسوسی توانسته است دامنه‌های کماتش در مدهای بالاتر را محدود نماید و تغییر شکل و بازشدگی غلاف در آن‌ها بسیار کم‌تر از غلاف فولادی است. دلیل این امر سختی بالای حجم توپر و بزرگ غلاف بتنی نسبت به گزینه فولادی و در نتیجه محدود ماندن تغییر شکل غلاف است.

یکی از یافته‌های این آزمایش آن است که به دلیل استفاده از غلاف بتنی بین هسته و غلاف به علت شکل قالب‌بندی بتن و صاف و صیقلی بودن سطح داخلی آن و عدم تغییر شکل در خلال عملیات سرهم‌بندی و ساخت (بر خلاف غلاف فولادی) ساده‌تر تنظیم شده و فاصله به‌طور یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود. این درحالی است که در غلاف فولادی نیاز به واشرگذاری و باز و بسته‌کردن پیچ و تنظیم فاصله است. از این جهت در غلاف‌های بتنی پیش‌ساخته می‌توان نسبت به ایجاد یک فاصله ثابت در طول کل سطح مشترک هسته و غلاف اطمینان حاصل نمود.

۲-۴- نتایج تست نمونه دوم

همان‌طور که در شکل (۳۰) مشخص است، این نمونه نیز مانند نمونه اول دارای منحنی هیستریزیس پایدار و متقارن است. این نمونه تا پایان تغییر مکان $65/25$ میلی‌متر رفتار مناسبی از خود نشان داد و در ادامه توانست دو چرخه کامل با تغییر مکان $48/19$ میلی‌متر و یک چرخه کششی با تغییر مکان $48/19$ را تحمل نماید. در اثنای چرخه کششی سوم با تغییر مکان $48/19$ ، نمونه دچار پارگی شد. حداکثر نیروی فشاری ایجاد شده در مهاربند برابر است با 415 (kN)، حداکثر نیروی کششی ایجاد شده در آن برابر است با 338 (kN) و حداکثر نسبت نیروی اصطکاک در این نمونه برابر $1/23$ می‌باشد. پارامترهای اندازه‌گیری شده مهاربند مطابق جدول (۹) است.



الف) نمای از بالا



ب) نمای از کنار



ت) نمای از بالای قسمت گسیخته شده



پ) نمای از کنار قسمت گسیخته شده

شکل ۳۱- وضعیت هسته مهاربند کمانش تاب نمونه قاب کامل

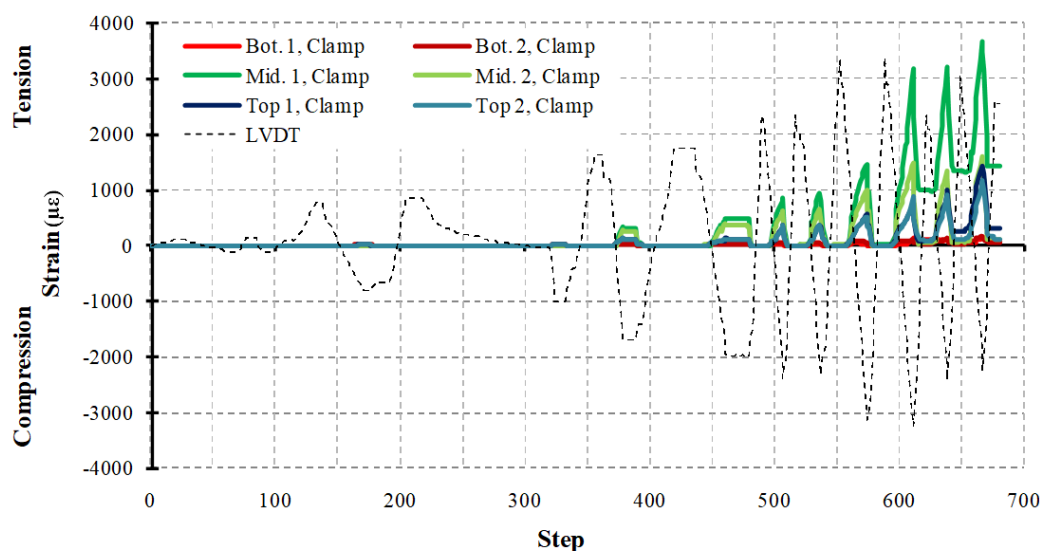
مقدار کرنش حداکثر ۳۶۰۰ میکروکرنش است که مربوط به وسط غلاف بوده که ۱۵۰۰ میکروکرنش آن مربوط به ترک چسب است. شکل (۳۲) تاریخچه کرنش‌های ایجاد شده بر روی غلاف این نمونه را نشان می‌دهد. در شکل (۳۳) منحنی پوش حاصل شده از منحنی هیستریزیس نمونه مهاربند کامل نشان داده شده است. در مجموع از آزمایش مهاربند کامل نتیجه می‌شود که در صورت تأمین مسیر نیروی مناسب برای کل اجزای مهاربند، مهاربند پیشنهادی به خوبی قادر است رفتار لرزه‌ای مطلوب و جذب انرژی مورد نظر را فراهم نماید. منحنی آزمایش مهاربند کامل نسبت به منحنی تک‌محوری دارای شیب الاستیک و پس‌از تسلیم کم‌تری می‌باشد که عمدتاً به دلیل وجود عضو الاستیک و سایر المان‌ها در مسیر نیرو و انعطاف‌پذیری بودن ستون و قاب عکس‌العمل است.

توزیع کرنش باقی‌مانده بر روی هسته در نواحی مختلف مطابق جدول (۱۰) می‌باشد.

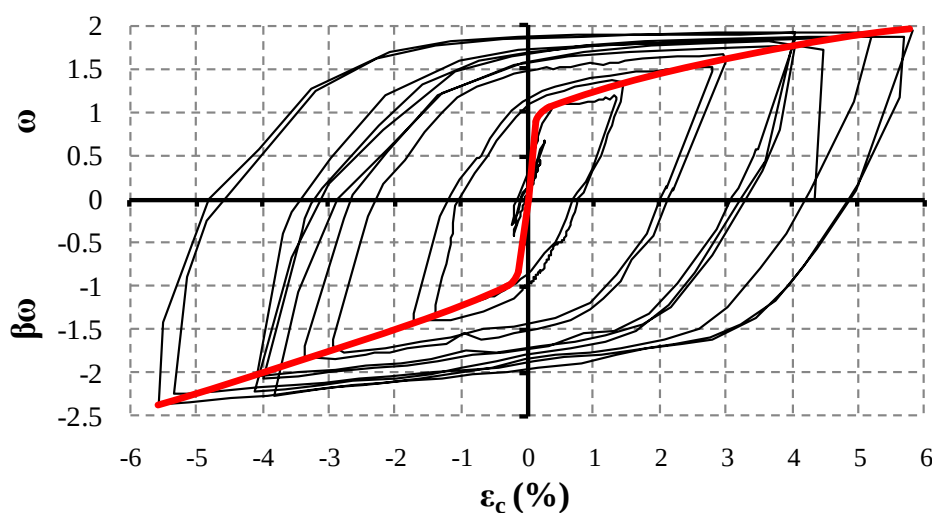
جدول ۱۰- کرنش‌های باقی‌مانده هسته نمونه دوم

موقعیت	ϵ_T (%)	ϵ_W (%)	ϵ_L (%)
پایین	5.96	8.5	-14.46
وسط	-11.09	-11.03	22.11
بالا	2.61	0.25	-2.86

در مجموع، تاریخچه این نمونه دارای مشاهدات و نتایج مشابهی با نمونه با غلاف بتنی تک‌محوری است؛ موارد زیر از جمله نتایج خاص این نمونه است:
دلیل مقادیر اندک کرنش در الیاف واقع در پایین مهاربند، قرارگیری کرنش‌سنج‌ها بر روی ناحیه انتقالی و تقریباً بدون کمانش هسته می‌باشد.



شکل ۳۲- تاریخچه کرنش ایجادشده بر روی جداریه غلاف نمونه مهاربند کامل



شکل ۳۳- منحنی پوش مهاربند کمانش تاب تحت قاب

۱۴۰۳، هزینه تمام شده یک مهاربند کمانش تاب با غلاف فولادی برابر با ۱۵ میلیون تومان است. همچنین با فرض قیمت هر متر مربع الیاف CFRP برابر با ۲ میلیون تومان، هزینه تمام شده یک مهاربند کمانش تاب با غلاف CFRP تقریباً برابر با ۱۶ میلیون تومان است.

لازم به ذکر است در این تحقیق تعداد لایه های CFRP به کاررفته در مهاربند آزمایشگاهی در جهت اطمینان، بیش تر از تقاضای طراحی لحاظ شده است و در صورت طراحی بهینه الیاف، هزینه مهاربند در حدود ۴۰٪ کاهش خواهد یافت. همچنین طرح پیشنهادی منحصر در استفاده از الیاف CFRP نیست و در صورت استفاده از الیاف دیگر نظیر GFRP، هزینه ها به طور

۵- مقایسه اقتصادی

با توجه به کارآمدی مهاربند پیشنهادی از نقطه نظر رفتار لرزه ای در این بخش به مقایسه اقتصادی این نوع مهاربند و مهاربند تمام فولادی پرداخته می شود. بدین منظور مقایسه اقتصادی بین یک مهاربند طول کوتاه با استفاده از غلاف CFRP و غلاف تمام فولادی صورت می گیرد.

در یک برآورد تقریبی میزان کلی مصرف فولاد در ساخت BRB با غلاف فولادی که توسط رضوی و همکاران [۲] با طول مشابه ساخته شده است، برابر با ۱۵۰ کیلوگرم است. با فرض هزینه مصالح فولادی و دستمزد ساخت برابر ۱۰۰۰۰۰ تومان در پاییز

قابل توجهی کاهش خواهد یافت. از این رو مهاربند کمانش تاب پیشنهادی از نظر اقتصادی نیز مزیت و مطلوبیت دارد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با استفاده از پوشش های الیاف پلیمری کربن به جای غلاف فلزی صورت گرفته است. به این منظور دو نوع آزمایش بر روی مهاربندهای کمانش تاب با طول کوتاه انجام شده است. در آزمایش اول، یک نمونه مهاربند با غلاف بتنی و پوشش الیاف پلیمری کربن تحت بارگذاری تک محوری قرار گرفته است. در آزمایش دوم، یک نمونه مهاربند کامل با قطعه کمانش تاب و ادامه آن تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است.

نمونه اول تا پایان دومین چرخه تغییر مکان متناظر ۴۲/۴۶ میلی متر رفتار مناسبی از خود نشان داد، در اولین چرخه کششی تغییر مکان متناظر ۵۶/۳ و در تغییر مکان ۳۰ میلی متر دچار گسیختگی شد. نمونه دوم تا پایان تغییر مکان ۶۴/۲۵ میلی متر رفتار مناسبی از خود نشان داد و در اثنای حلقه کششی چرخه سوم در تغییر مکان ۴۸/۱۹ میلی متر دچار پارگی شد.

در نمونه اول سطح بیرونی غلاف و سطح در تماس با هسته و همچنین دو انتهای آن دچار هیچ گونه خرابی و خردشدگی ولو به صورت موضعی نشدند. علاوه بر این، الیاف پلیمری کربن کاملاً سالم باقی ماندند.

نمونه با غلاف بتنی با توجه به دامنه کرنشی بالاتر دارای نیروهای اصطکاک محدودتری نسبت به نمونه های فولادی است. غلاف بتنی به طور محسوسی توانسته است دامنه های کمانش در مدهای بالاتر را محدود نماید و تغییر شکل و بازشدگی غلاف در آن ها بسیار کم تر از غلاف فولادی است. دلیل این امر سختی بالای حجم توپر و بزرگ غلاف بتنی نسبت به گزینه فولادی و در نتیجه محدود ماندن تغییر شکل غلاف است. با توجه به نتایج آزمایش مهاربند کامل، اگر مسیر مناسبی برای انتقال نیرو در تمام اجزای مهاربند وجود داشته باشد، مهاربند پیشنهادی می تواند رفتار لرزه ای مناسب و جذب انرژی کافی را ارائه دهد.

شیب الاستیک و پس از تسلیم منحنی آزمایش مهاربند کامل، کم تر از منحنی تک محوری است که نشان دهنده تأثیر عضو الاستیک و سایر المان ها در مسیر نیرو و انعطاف پذیری ستون و قاب است. به عنوان یک نتیجه کلی استفاده از الیاف پلیمری کربن می تواند به نحو مؤثری به توسعه مهاربند کمانش تاب طول کوتاه کمک نماید.



- [۱] رضوی طباطبائی، ع. (۱۴۰۰)، "طراحی لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب با طول کوتاه"، نشریه علمی سازه و فولاد، ۱۵ (۳۲)، ص، ۷۱-۸۰.
- [2] Tabatabaei, S.A.R., Mirghaderi, S.R., and Hosseini, A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces", *Engineering Structures*, 77, pp. 143-160.
- [۳] رضوی طباطبائی، ع.، و احتشامی معینی، م. (۱۴۰۰)، "ارزیابی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهارشده با مهاربند کمانش‌تاب با رویکرد تاب‌آوری"، نشریه علمی سازه و فولاد، ۱۵ (۳۴).
- [4] Razavi, S.A., Kianmehr, A., Hosseini, A., and Mirghaderi, S.R. (2018), "Buckling-restrained brace with CFRP encasing: Mechanical behavior and cyclic response", *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 27(6), pp. 675-689.
- [5] Dusicka, P., and Wiley, B. (2008), "Concept of buckling restraint of steel braces with fiber reinforced polymers", In *Structures Congress 2008: Crossing Borders*, pp. 1-7.
- [6] Dusicka, P., and Tinker, J. (2013), "Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces", *Journal of Composites for Construction*, 17(1), pp. 139-150.
- [7] Tremblay, R., Poncet, L., Bolduc, P., Neville, R., and DeVall, R. (2004), "Testing and design of buckling restrained braces for Canadian application", In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-16.
- [8] Shemshadian, M.E., Razavi, S.A., Hosseini, A., Mirghaderi, S.R., and Khan Mohammadi, M. (2011), "An analytical study of low cycle fatigue effects in buckling restrained braces", *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*.
- [9] Iwata, M., Ogawa, K., and Murai, M. (2010), "Comparison Tests of Buckling-Restrained Braces Using Steel Mortar Planks or Steel Alone for Restraining Parts", in *Pacific Structural Steel Conference*, Beijing, China, pp. 1482-1490.
- [10] ASCE/SEI 7-22. (2022), "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- [11] ANSI/AISC 341-22. (2022), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- [12] Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., and Fuchs, H.O. (2000), "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley and Sons.
- [13] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., and DeVall, R. (2006), "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), pp. 183-198.

