



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



ارائه رابطه محاسباتی برای برآورد تنش در الیاف بکار رفته در مهاربند کمانش تاب با غلاف CFRP

*سید علی رضوی طباطبائی^۱، بیژن شورچه^۲

چکیده

مهاربندهای کمانش تاب در طراحی لرزه‌ای بسیاری از انواع سازه بکار گرفته می‌شوند. این نوع مهاربند به لحاظ سنتی از یک هسته فولادی و غلاف فولادی که با بتن پر می‌شود، تشکیل شده است. حذف غلاف فولادی می‌تواند مزایای چشمگیری داشته باشد؛ بطوری که در مطالعات انجام شده مزیت و مطلوبیت جایگزینی غلاف فولادی با لایه‌های CFRP به اثبات رسیده است. در این مطالعه فرمول تحلیلی برآورد نیروی حاصل از کمانش هسته فلزی با مقدار بدست آمده از آنالیز عددی حاصل از ۲۷ مدل که در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است، مقایسه شده و فرمولی جهت برآورد مقدار دقیق‌تر نیرو با استفاده از فرمول تحلیلی پیشنهاد می‌گردد. مدلها با پوشش ۷۰٪، ۵۰٪ و ۴۰٪ طول غلاف توسط لایه CFRP و تعداد لایه یک، دو و سه در نظر گرفته شده است. در ادامه تنش لایه‌های CFRP بدست آمده از فرمول تحلیلی با مقدار عددی حاصل از نرم‌افزار مقایسه شده و فرمول تحلیلی تنشهای CFRP با استفاده از نتایج عددی تدقیق گردیده است. نتایج حاصل از این مطالعه، فرمول کالیبره شده تحلیلی جهت برآورد مقدار نیروی وارد از هسته به غلاف و همچنین تنش بوجود آمده در لایه‌های CFRP را ارائه می‌کند که می‌تواند در طراحی بهینه لایه‌های CFRP بکار گرفته شود.

واژگان کلیدی:

مهاربند کمانش تاب، لایه الیاف کربنی، تحلیل چرخه‌ای، آنالیز اجزای محدود

^۱ استادیار گروه عمران دانشگاه علم و فرهنگ، arazavi@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه دانشگاه علم و فرهنگ



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



۱- مقدمه

با بررسی اجمالی خسارتهای وارده بر سازه‌ها در زلزله‌های گذشته مشخص می‌شود که سازه‌های فولادی به جهت شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی عملکرد بهتر و اقتصادی‌تری نسبت به سایر سازه‌ها دارند. امروزه از سیستم‌های مختلفی برای مقابله با بارهای جانبی وارد بر ساختمانهای فولادی استفاده می‌شود که استفاده از سیستم مهاربندی، قدمت بیشتری نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای دارد. قابهای مهاربندی شده به دلیل صرفه‌جویی در مصرف مصالح و نیز سادگی طراحی و اجرا، از محبوبیت زیادی در میان مهندسان سازه برخوردار است و به طور گسترده‌ای در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهاربندهای کمانش‌تاب به طور گسترده در ساختمان بکار گرفته می‌شود بطوریکه تحت بارهای لرزه‌ای علاوه بر سختی بالا، قابلیت جذب انرژی و شکل پذیری بالایی دارد. مهاربند کمانش‌تاب از سه قسمت تشکیل شده است: (۱) هسته فولادی، (۲) غلاف و (۳) ماده جداکننده. به دلیل وجود غلاف رفتار مهاربند در کشش و فشار مشابه می‌باشد و از کمانش مهاربند جلوگیری می‌کند. غلاف معمولاً از تیوب فولادی پر شده با بتن می‌باشد. به طور معمول در این تیپ مهاربندها بتن در داخل غلاف ریخته می‌شود و ممکن است همگنی و عملکرد مطلوب بتن ایجاد نگردد. همچنین نیروی نرمالی که از طریق هسته به غلاف وارد می‌شود، در طول مهاربند ثابت نبوده و باعث نیاز به مقاومت و سختی خمشی متغیری در طول مهاربند می‌شود که در نهایت باعث بکارگیری مقطع غیر اقتصادی برای غلاف خواهد شد. با توجه به معایب ذکر شده می‌توان غلاف فولادی را حذف نمود و جهت پایداری بجای آن می‌توان از قطعات بتنی پیش‌ساخته به صورت ساندویچی و دورپیچ شده با FRP استفاده نمود. FRP دارای مقاومت بالا و وزن سبک بوده و با دورپیچ کردن قطعات بتنی پیش‌ساخته می‌تواند از کمانش کلی و محلی مهاربند جلوگیری کند. همچنین می‌توان با تعداد دورپیچهای بیشتر FRP مقاومت متغیر در طول مهاربند تامین نمود و این امر منجر به طرح اقتصادی‌تر خواهد شد. با توجه به اثبات قابلیت جایگزینی غلاف فولادی با لایه‌های FRP در مهاربندهای کمانش‌تاب، با کمک مدل‌های عددی و با در نظر گرفتن درصد پوشش مختلف در طول مهاربند، نیروی نرمال وارد بر غلاف و تنش لایه‌های FRP با مقدار عددی مقایسه شده و در ادامه ضرایب اصلاح جهت برآور مقدار دقیق تنش از طریق فرمول تحلیلی پیشنهاد گردیده است. اکیز و الطویل رفتار فشاری ستونهای فولادی را با بکارگیری ماسه سیمان و لایه‌های FRP با جلوگیری از کمانش کلی ستون و هدایت ستون به سمت شکست فشاری بهبود دادند (Ekiz and El-Tawil, 2008). تعداد لایه‌های طولی متغیر و یک لایه عرضی در نظر گرفته شده است نتایج این مطالعه نشان می‌دهد افزایش تعداد لایه‌های طولی باعث افزایش پایداری و ظرفیت ستون خواهد شد. در نمونه‌ها با تعداد چهار عدد و یا بیشتر لایه طولی، کرنش ۳/۳- ۴/۶ درصد بدون کمانش تجربه شده است. مد شکست در این حالت خرابی در ملات و خرابی در FRP در انتهای نمونه می‌باشد. دوسیچکا و وایلی با هدف کاهش وزن مهاربند و با بکارگیری غلافهای FRP و هسته آلومینیمی L شکل و دورپیچ کردن غلاف FRP با لایه‌های FRP شیشه، مهاربند کمانش‌تاب جدیدی ارائه کردند. از لایه‌های سیلیکون بر روی هسته فولاد جهت کاهش اصطکاک بین غلاف FRP و هسته فولادی استفاده شده است. شکست مقطع در انتهای مهاربند به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک اتفاق افتاده و از کمانش کلی مهاربند جلوگیری شده و باعث تسلیم هسته در نزدیکی اتصال شده است. تشکیل مفصل پلاستیک باعث افزایش نیرو در لایه‌های FRP شیشه شده و در نهایت باعث شکست آن می‌شود



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



(Dusicka and Wiley, 2008). در مطالعه‌ای که توسط رضوی و همکاران انجام شده ابتدا مبانی طراحی مهاربند کمناش تاب CFRP ارائه گردیده سپس با بکارگیری تست آزمایشگاهی ایده جایگزینی غلاف فولادی با لایه‌های CFRP مورد بررسی قرار داده شده است (Razavi et al, 2018). مشخص گردید که لایه های CFRP قابلیت نگهداری غلافهای بتنی و هسته فولادی جهت ممانعت از کمناش محلی و کلی را دارا است. قابلیت جذب انرژی مهاربند تا کرنش ۳/۵ درصد برای زلزله طراحی بدون خرابی تحت بارگذاری چرخه‌ای وجود داشته است. همچنین برای سطح بارگذاری خیلی بیشتر از زلزله طراحی و رسیدن هسته بتنی به کرنش ۵ درصد، شکست مهاربند تحت خستگی رخ داده است. بشیری و توفیق با استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی یک مهاربند کمناش تاب مورد بررسی قرار دادند و نوارهای CFRP را جایگزین غلاف فولادی کردند. با استفاده از نتایج عددی مدل نمونه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. تست چرخه‌ای بر روی مهاربند کمناش تاب بر روی یک قاب فولادی با مقیاس نیم انجام شد. با ۵۰ درصد دورپیچ سطح مهاربند با CFRP که به طور مناسبی جانمایی شده است عملکرد مطلوب مهاربند بدست آمده است. علاوه بر این رفتار چرخه‌ای مهاربند الزامات AISC 341-22 را برای تست قاب جزء برآورده کرده است. تقارن منحنی جابجایی نیرو ظرفیت بالای جذب انرژی مهاربند را نشان می‌دهد و دارای وزن سبکتری نسبت به حالت متداول دارد (Bashiri and Toufigh, 2020).

۲- مبانی طراحی مهاربند کمناش تاب با الیاف کربن

مبانی طراحی مهاربند کمناش تاب با هسته فولادی و غلاف بتنی و الیاف کربنی بر اساس روش پیشنهادی رضوی و همکاران انجام شده است (Razavi, et al, 2008) و مراحل مختلف آن به طور خلاصه در

جدول ۱ آورده شده است. وقتی که هسته فلزی به تسلیم می‌رسد غلاف بتنی و الیاف کربن عملکرد کلی و محلی هسته را کنترل می‌کنند. زمانی که هسته به ماکزیمم نیروی فشاری و یا حد تسلیم می‌رسد مهاربند باید پایداری خود را حفظ نماید. این الزام توسط واتانابه و همکاران فرمول‌بندی شده است (Watanabe, et al, 1998). در مهاربند کمناش تاب با الیاف کربن ظرفیت کمناش توسط غلافهای بتنی تأمین می‌شود. الزامات ساخت غلاف بتنی معمولاً ظرفیت کمناش مورد نیاز را تأمین خواهد کرد و این معیار به سادگی برقرار شده و معیار حاکم طراحی نخواهد بود. وجود فاصله بین هسته و غلاف در حالت فشاری باعث ایجاد نیروی خروج از مرکز و ایجاد خمش $P-\delta$ در مهاربند خواهد شد. بر اساس معیار ACI-318-19 فرمول ۱ جهت برآورده کردن این الزام در نظر گرفته می‌شود.



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



$$\frac{P_{max,c}\delta_{max,y}}{M_{cx}} + \frac{P_{max,c}\delta_{max,x}}{M_{cy}} \leq 1 \quad (1)$$

با کماتش هسته در مدهای بالا نیروهایی از هسته به غلاف بتنی مطابق

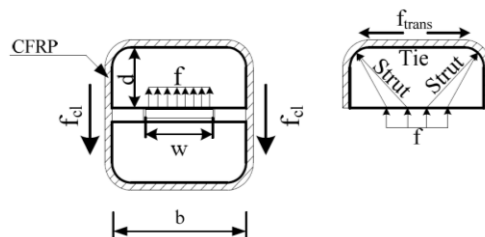
جدول ۱ (آیتم ۳) اعمال خواهد شد. برای برقراری معادله تعادل ممانها نیروی نرمال وارد بر هسته مطابق با فرمول ۲ بدست خواهد آمد

$$f = 4P_{max,c} \frac{g}{l_n} \quad (2)$$

که در آن g فاصله بین هسته و غلاف از یک سمت و l طول موج مدهای بالای کماتش و P_{max} بیشترین نیروی فشاری وارد بر هسته می‌باشد. جنا و جلفی در مطالعاتی که انجام دادند با بکارگیری مدل‌های آزمایشگاهی و عددی فرمولهای تحلیلی جهت برآورد طول موج کماتش هسته و نیروی نرمال وارد شده از هسته به غلاف ارائه کردند (فرمول (۳)) (Genna and Gelfi, 2012a, 2012b).

$$l_n = \sqrt{\frac{4\pi^2 E_t I_c}{P_y}} \quad (3)$$

که در آن E_t مدول الاستیسیته تانژانتی هسته، I_c ممان اینرسی هسته حول محور ضعیف و P_y نیروی تسلیم هسته می‌باشد. مطابق با شکل ۱ نیروی نرمال هسته تمایل به جدا کردن دو غلاف بتنی دارد که با توجه نوار پیچی توسط الیاف کربنی باعث ایجاد نیروی کششی در الیاف خواهد شد. تنش بوجودآمده در الیاف کربن مطابق با فرمولهای ۴ و ۵ بدست خواهد آمد که در آن f نیروی نرمال هسته، f_{cl} تنش وارد بر لایه الیاف کربن و t ضخامت لایه الیاف کربن می‌باشد.



شکل ۱- نیروی وارد بر غلاف و FRP



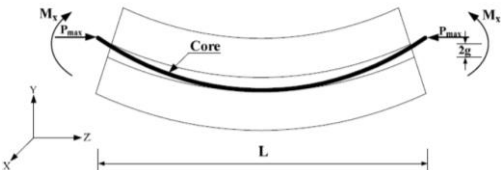
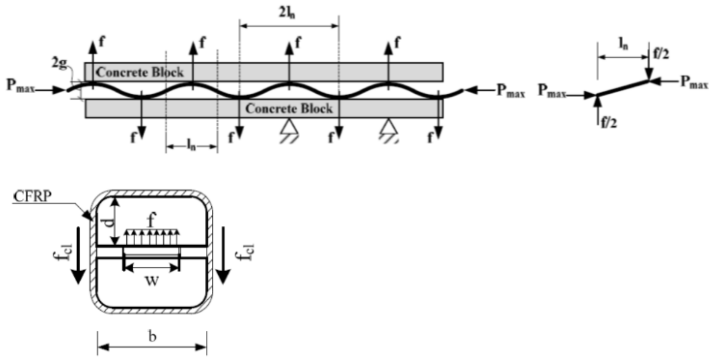
دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



$$f_{cl} = \frac{f}{4l_n t} \quad (۴)$$

$$f_{trans} = \frac{2b - w}{16l_n dt} f \quad (۵)$$

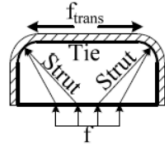
جدول ۱- مبانی طراحی مهاربند کمانش تاب

۱	بررسی کمانش کلی مهاربند کمانش تاب	
۲	بررسی پایداری خمشی غلاف	
۳	برآورد نیروی کلمپ در طرفین غلاف	



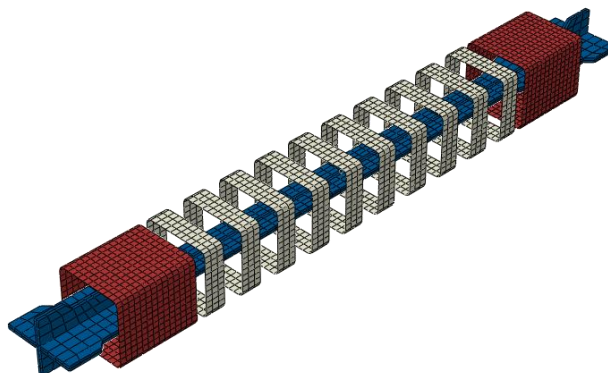
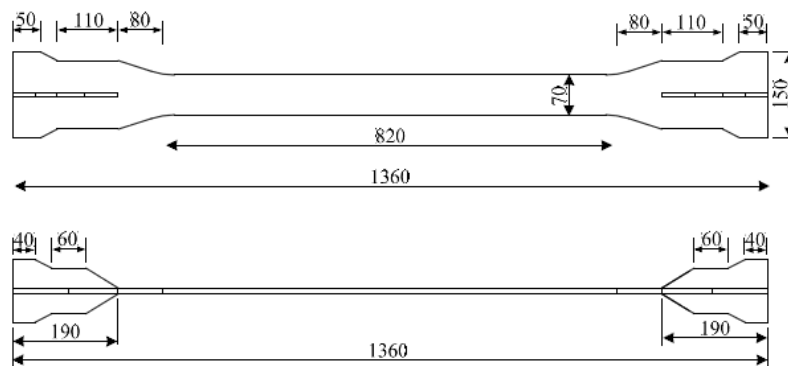
دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



	۴ برآورد نیروی کششی عرضی بر روی غلاف
---	---

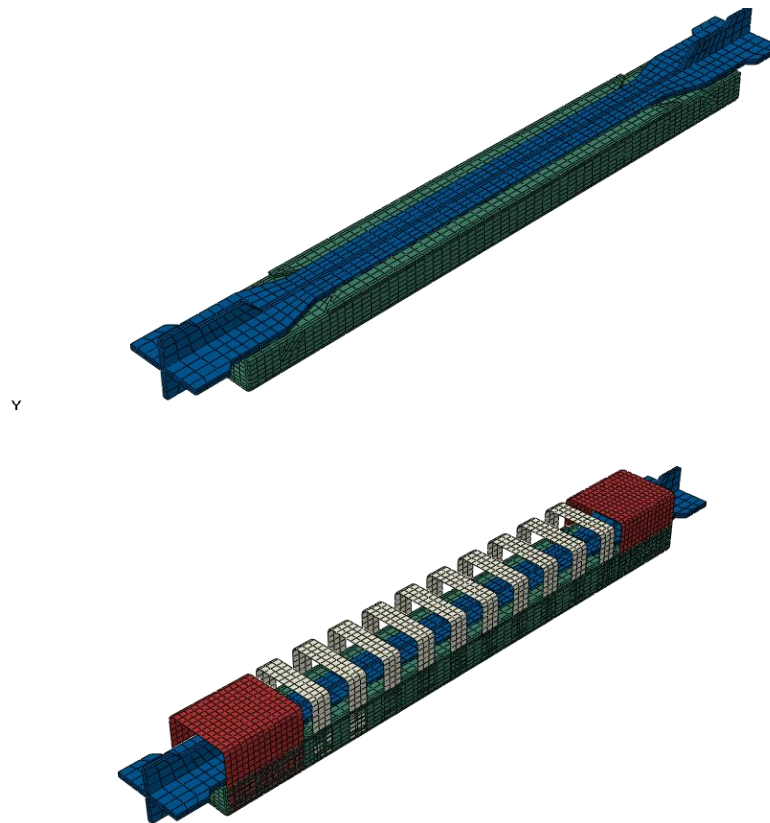
۳- مدلسازی اجزای محدود

در شکل ۲ مشخصات هندسی هسته و غلاف بتنی و نوارهای CFRP برای یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است که با تغییر عرض نوار و ضخامت آن در جدول ۲ مدل‌های مختلف و پارامترهای مورد نظر برای مدلسازی عددی مهاربند بدست آمده است. w عرض نوار CFRP و s فاصله خالی بین نوارها می‌باشد. در هر کدام از مدل‌های M1 تا M9 تعداد لایه‌ها از یک تا سه نوار افزایش داده شده و محاسبات برای آنها انجام شده است.





دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
 ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۲- مشخصات هندسی هسته فولادی، غلاف بتنی و نوارهای CFRP (نمونه M3)

جدول ۲- مشخصات مدل های اجزای محدود مورد بررسی

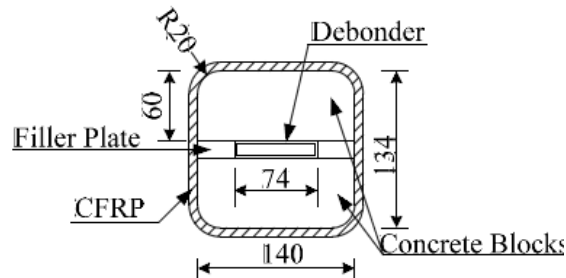
Models	w (cm)	s/w	s (cm)	w/L	CFRP Coverage Ratio
M1	8.200	0.5	4.100	0.1	0.67
M2	8.200	1	8.200	0.1	0.50
M3	8.200	1.5	12.300	0.1	0.40
M4	4.100	0.5	2.050	0.05	0.67
M5	4.100	1	4.100	0.05	0.50
M6	4.100	1.5	6.150	0.05	0.40
M7	2.050	0.5	1.025	0.025	0.67
M8	2.050	1	2.050	0.025	0.50
M9	2.050	1.5	3.075	0.025	0.40



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



مدل اجزا محدود بر اساس نمونه آزمایشگاهی رضوی و همکاران ایجاد شده است. شکل ۳ مقطع عمومی مهاربند را در وسط نشان می‌دهد که در آن هسته فولادی توسط دو غلاف ساندویچی بتنی جهت جلوگیری از کمزش محصور شده است و از لایه CFRP جهت اتصال دو غلاف بتنی استفاده گردیده است.



شکل ۳ - مقطع مهاربند

هسته فولادی مهمترین بخش مهاربند کمزش تاب می‌باشد. به منظور افزایش شکل پذیری از فولاد ST-37 استفاده گردیده است. نوع المان هسته C3D8I در نظر گرفته شده است. غلاف بتنی همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است به صورت دو قطعه بتنی بوده که به صورت ساندویچی و با کمک CFRP به هسته فولادی در برابر کمزش کمک می‌کند. لازم است بین هسته و بتن از یک ماده جداکننده استفاده گردد که در اینجا هوا می‌باشد. فاصله بین قطعات بتنی ۱۴ میلی‌متری بوده که با توجه به ضخامت یک سانتی‌متری هسته، فاصله بین هسته و بتن دو میلی‌متر در پایین و دو میلی‌متر در بالا بدست خواهد آمد. لایه CFRP به صورت نوارهای عرضی (شکل ۲) دو قطعه بتنی را به صورت ساندویچی محاط می‌کنند. از المانهای Shell جهت مشبندی لایه CFRP استفاده گردیده است. غلاف محصور کننده هسته فلزی از ترکیب قطعات بتنی پیش‌ساخته که توسط لایه‌های CFRP به صورت عرضی دورپیچ شده‌اند، تشکیل می‌شود. ضخامت لایه‌های CFRP برابر ۰/۱۷۶ میلی‌متر لحاظ شده است. مدل رفتاری بتن الاستیک خطی بوده و مشخصات مکانیکی مصالح بکار گرفته شده در جدول ۳ مشخص شده است. در مدل رفتاری فولاد همزمان سخت شوندگی کینماتیک و ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات مواد

Compressive strength of concrete	50 MPa
Steel type	ST-37
CFRP tensile strength	4116 MPa
CFRP elastic modulus	240 GPa

۴- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

مدل اجزا محدود متناظر با مدل آزمایشگاهی (شکل ۴) که توسط رضوی و همکاران توسعه داده شد (Razavi et al, 2018) مورد ارزیابی قرار گرفت. پروتکل بارگذاری بر اساس



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



جدول ۴ به مدل اجزا محدود اعمال گردید و در نهایت نتایج مدل آزمایشگاهی و اجزا محدود با هم مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل اجزا محدود قابلیت مدلسازی مدل آزمایشگاهی را با دقت مطلوب دارا می‌باشد (شکل ۵).



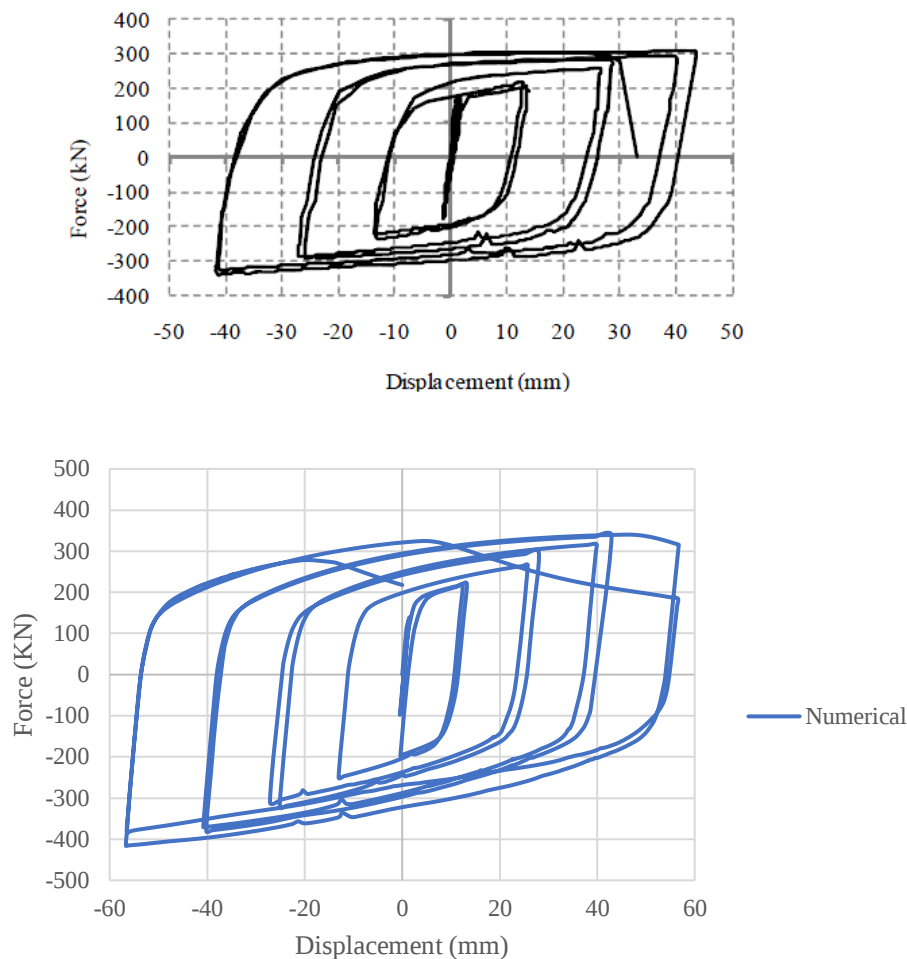
شکل ۴- مدل آزمایشگاهی توسعه داده شده توسط رضوی و همکاران (Razavi et al, 2018)

جدول ۴- پروتکل بارگذاری

Number of cycle	Amplitude (mm)	
2	Δ_{by}	1.35
2	$0.5\Delta_{bm}$	7.63
2	$1\Delta_{bm}$	15.27
2	$1.5\Delta_{bm}$	22.9
2	$2\Delta_{bm}$	30.54



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۵- نمودار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود

۵- بحث و بررسی نتایج

شکل ۶ کماتش مدهای بالا را برای مدل‌ها نشان می‌دهد. به طور کلی مقدار طول موج کماتش حاصل از تحلیل اجزای محدود با مقادیر تحلیلی همخوانی مناسبی دارد. اگر چه در مدل تحلیلی موج منظمی در طول کل هسته مهاربند فرض می‌شود، ولی نتایج نشان می‌دهد که طول موج و شکل کلی موج منظم نبوده و همین امر باعث توزیع نیروی نامنظمی از طرف هسته به غلاف بتنی می‌گردد. جهت برآورد مقدار نیرو که از هسته به غلاف وارد می‌شود موقعیت مکانی نیروها با حروف f1 تا f4 در شکل ۷ مشخص شده است. همچنین شکل ۸ توزیع نیروی نرمال از هسته به غلاف را نشان می‌دهد.



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



	1 CFRP layer	2 CFRP layer	3 CFRP layer
Model- 1			
Model- 2			
Model- 3			
Model- 4			
Model- 5			



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران

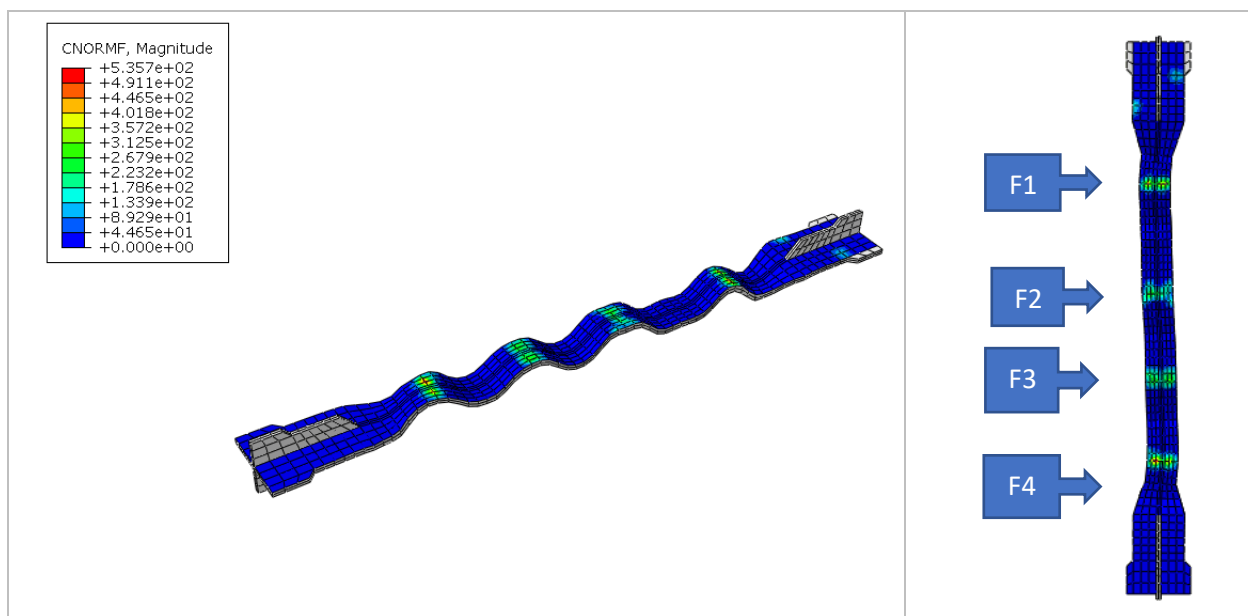


	1 CFRP layer	2 CFRP layer	3 CFRP layer
Model- 6			
Model- 7			
Model- 8			
Model- 9			

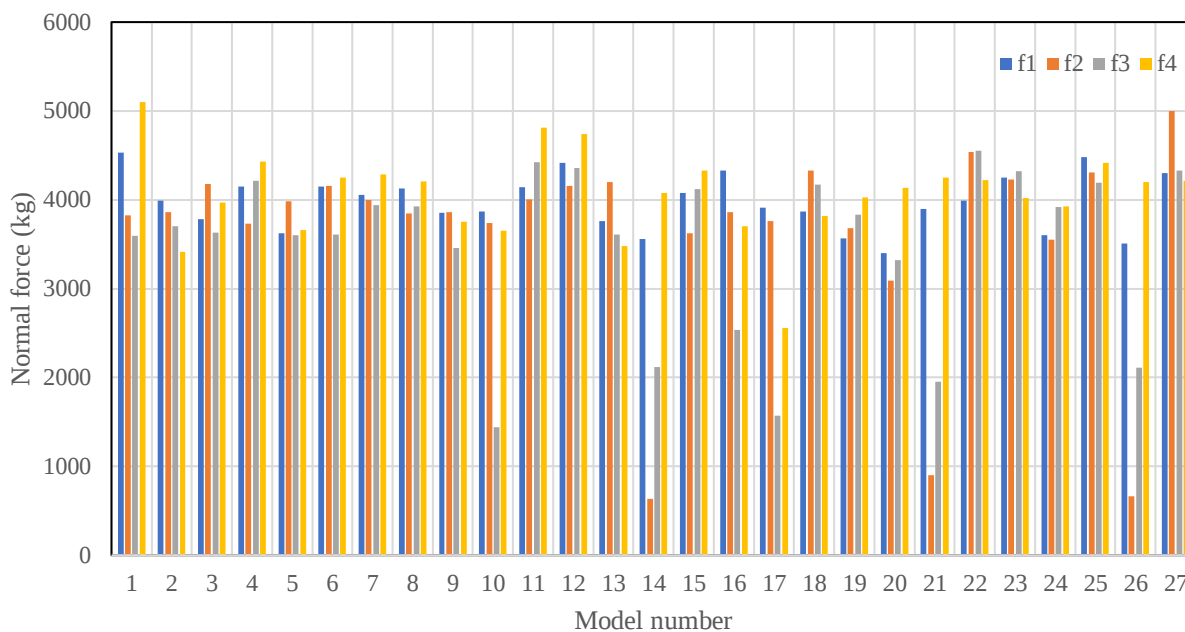
شکل ۶- مدهای کمانش مدلها



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۷- موقعیت مکانی نیروهای F1 تا F4



شکل ۸- توزیع نیروهای نرمال وارد از هسته به غلاف



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



نیروی نرمال وارد از هسته به غلاف بتنی بدست آمده از آنالیز عددی انطباق بسیار بالایی با نتایج تحلیلی دارد. محاسبه تحلیلی نیروی نرمال هسته بر اساس فرمولهای (۲) و (۳)، ۴۸۳۰ کیلوگرم بدست خواهد آمد.

برای مدل‌های

جدول ۲ با درصد پوشش مختلف و تعداد لایه‌های CFRP مختلف از یک تا سه، تنش بوجود آمده در نوارها بر اساس روش عددی بدست آمد و همچنین مقدار این تنش از روش تحلیلی برآورد گردید. اساس روش تحلیلی فرمول (۲) می‌باشد ولی با توجه به درصد پوشش لایه‌های CFRP این فرمول به صورت تجمعی برای کل طول مهاربند به صورت رابطه (۶) مورد بازبینی قرار گرفته است که در آن f نیروی نرمال هسته برای یک موج کمانش، n تعداد نقطه تماس هسته به غلاف بتنی، w عرض نوار CFRP، s فاصله بین نوارها، L_t طول هسته و t ضخامت لایه CFRP می‌باشد. در جدول ۵ مقدار عددی و تحلیلی تنش آورده شده است.

$$f_{ana,CFRP} = \frac{nf}{2\left(\frac{w}{w+s}\right)L_t t} \quad (۶)$$

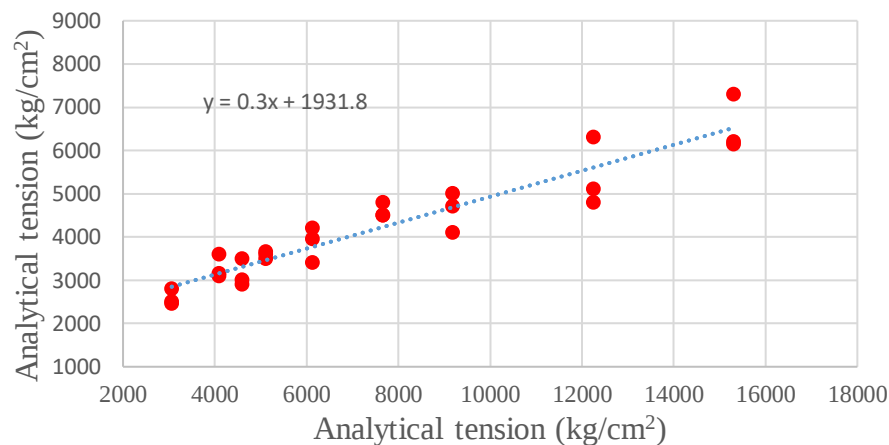
جدول ۵- مقادیر عددی و تحلیلی تنش لایه‌های CFRP

No. CFRP layers	Analytical tension (kg/cm ²)			Numerical tension (kg/cm ²)		
	1	2	3	1	2	3
Model-1	9181	4591	3060	5000	3000	2800
Model-2	12240	6121	4080	6300	3950	3600
Model-3	15300	7651	5101	6150	4800	3650
Model-4	9181	4591	3060	4700	2900	2500
Model-5	12240	6121	4080	4800	3400	3150
Model-6	15300	7651	5101	6200	4500	3600
Model-7	9181	4591	3060	4100	3500	2460
Model-8	12240	6121	4080	5100	4200	3100
Model-9	15300	7651	5101	7300	4400	4400

جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر تحلیلی اعداد بزرگتری را برای تنش لایه‌ها برآورد می‌کنند. رگرسیون بین مقادیر عددی و تحلیلی در شکل ۹ نشان داده شده است که می‌تواند جهت محاسبه مقادیر دقیق‌تری از مقدار تنش لایه‌های CFRP در نظر گرفته شود.



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران

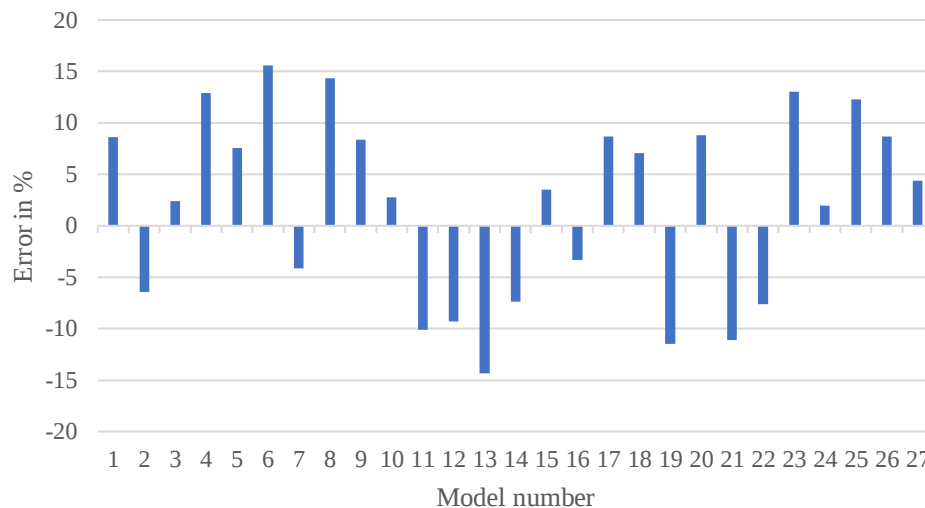


شکل ۹- رگرسیون مقادیر تنش تحلیلی و عددی

با توجه به شکل شکل ۹ می توان فرمول تحلیلی برآورد مقدار تنش نوارهای FRP را به صورت فرمول (۷) مورد بازنویسی قرار داد تا به مقدار عددی که برآورد دقیق تری از مقدار واقعی می باشد نزدیک شود که در آن A شیب و B عرض از مبدأ شکل ۹ می باشد.

$$f_{CFRP}^* = A \left[\frac{nf}{2 \left(\frac{w}{w+s} \right) L_t t} \right] + B \quad (7)$$

با مقایسه مقادیر تنش بر اساس فرمول بدست آمده با مقادیر عددی درصد خطای برآورد در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل فوق نشان می دهد فرمول تحلیلی کالیبره شده توانایی برآورد مقدار واقعی را با خطای ۱۵٪ خواهد داشت.



شکل ۱۰- درصد خطا برآورد مقدار تنش CFRP بر اساس فرمول تحلیلی

بر اساس نتایج این تحقیق مقادیر پارامترهای A و B به ترتیب برابر است ۰/۳ و ۱۹۳۱/۸ که می تواند برای برآورد دقیق تر تنش



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



کششی در لایه‌های CFRP به کار گرفته شده و با در اختیار داشتن این مقادیر می‌توان الیاف CFRP را دقیقتر طراحی نمود.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۲۷ مدل اجزای محدود با درصد پوشش الیاف CFRP مختلف و پهنا و فواصل متغیر مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل تنش حداکثر لایه‌های CFRP استخراج گردید و با مقادیر تحلیل مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد در صورتیکه شکل کمانش هسته در مدل عددی به مدل تحلیلی نزدیک باشد فرمول تحلیلی با خطای ۱۵ درصد می‌تواند نتایج عددی را برآورد نماید. همچنین با استفاده از رابطه پیشنهادی در این تحقیق می‌توان به کمک ضرایب ثابت A و B مقدار تنش واقعی در لایه‌های CFRP را برآورد نماید و از آن برای مقاصد طراحی استفاده نمود. از یافته‌های دیگر این پژوهش آن است که اگر چه شکل کمانش هسته در مدل تحلیلی منظم در نظر گرفته می‌شود ولی نتایج نشان می‌دهد که شکل کمانش ثابت نبوده و با تغییر نحوه آرایش نوارهای CFRP و تعداد لایه‌ها تغییر خواهد کرد و مقدار نیرویی که در محل تماس هسته به غلاف وارد می‌شود در طول مهاربند متغیر خواهد بود.

منابع

- 1- Genna, F., & Gelfi, P. (2012). Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling-restrained braces. I: Experimental and numerical results. Journal of structural engineering, 138(10), 1231-1243.
- 2- Genna, F., & Gelfi, P. (2012). Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling-restrained braces. II: Engineering analytical estimates. Journal of Structural Engineering, 138(10), 1244-1254.
- 3- Ekiz, E., & El-Tawil, S. (2008). Restraining steel brace buckling using a carbon fiber-reinforced polymer composite system: Experiments and computational simulation. Journal of Composites for Construction, 12(5), 562-569.
- 4- Bashiri, M., & Toufigh, V. (2020). Numerical and experimental investigation on a BRB confined with partially carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Engineering Structures, 223, 111150.
- 5- Razavi, S. A., Kianmehr, A., Hosseini, A., & Mirghaderi, S. R. (2018). Buckling-restrained brace with CFRP encasing: Mechanical behavior & cyclic response. Steel and Composite Structures, An International Journal, 27(6), 675-689.
- 6- Dusicka, P., & Wiley, B. (2008). Concept of buckling restraint of steel braces with fiber reinforced polymers. In Structures Congress 2008: Crossing Borders (pp. 1-7).
- 7- Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., & Fujimoto, M. (1988, August). Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. In Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering (Vol. 4, pp. 719-724).