

## کاربرد مصالح FRP در بادبندهای کمانش ناپذیر

محمد رضا روح پرور<sup>۱\*</sup>، حسن حاجی کاظمی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۱۴	<p>در این مقاله، برای نخستین بار قابلیت و امکان بکارگیری مصالح FRP به عنوان پوسته‌ی بادبند کمانش ناپذیر جهت جلوگیری از کمانش بادبند، با انجام آزمایش فشار روی نمونه‌های مختلف در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس آزمایش‌هایی روی نمونه‌های مختلف بادبند با پوسته GFRP و بادبند بدون پوسته با طول ثابت ۸۰۰ میلیمتر انجام گردید و نتایج جالب توجهی بدست آمد. در آزمایش نمونه‌ی بادبند بدون پوسته، حداکثر نیروی فشاری محوری تحمل شده توسط بادبند ۵۲،۴۵ کیلو نیوتن ثبت گردید که از نیروی تسلیم کششی هسته‌ی فلزی، یعنی ۱۹۸ کیلو نیوتن کمتر بود و دچار کمانش کلی گردید. اما در آزمایش نمونه‌ی بادبندی که با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته محصور شده بود، نیروی محوری فشاری تحمل شده توسط هسته ۲۰۰ کیلو نیوتن ثبت گردید که بیشتر از نیروی تسلیم کششی هسته بود و مشخص شد که این نوآوری، شرایط بادبند کمانش ناپذیر را تأمین نموده است؛ ضمن اینکه هیچگونه کمانشی در بادبند مشاهده نشد. همچنین بررسی سطح زیر منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه‌ها، نشان داد که ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌ی بادبندی که با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته محصور شده بود، نسبت به سایر نمونه‌ها از افزایش قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۲۳	
واژگان کلیدی: بادبند کمانش ناپذیر، کمانش کلی و موضعی، مصالح FRP، پوسته GFRP.	

### ۱- مقدمه

و پایداری خود را از دست می دهند. لذا برای جلوگیری از کمانش ستون‌ها و بادبندها یا باید لاغری آنها را کاهش داد و یا به طرق دیگر مانع کمانش گردید و بدیهی است که جلوگیری از کمانش عضو، سبب افزایش تحمل فشاری آن تا حد تسلیم خواهد گردید. تکنیک جلوگیری از کمانش کلی و موضعی در بادبند سازه‌ی فولادی، مقوله‌ای به نام بادبندهای کمانش ناپذیر را به وجود آورده است. بدلیل جدید بودن مقوله‌ی بادبندهای کمانش ناپذیر که از سال ۲۰۰۱ پیشنهادات ارزنده‌ای در آیین نامه‌ی AISC ارائه و

سهولت اجرایی و کارایی مؤثر بادبندها به ویژه در ساختمانهای فولادی، آنها را به عنوان روشی مناسب برای مهار نیروهای جانبی مطرح ساخته است. معمولاً بادبندها هم در معرض نیروهای کششی و هم در معرض نیروهای فشاری قرار داشته و طراحی آنها بر اساس بیشترین بار وارده و غالباً نیروهای فشاری صورت می گیرد. وقتی بادبندها در معرض نیروهای فشاری بزرگ قرار می گیرند، کمانش کرده

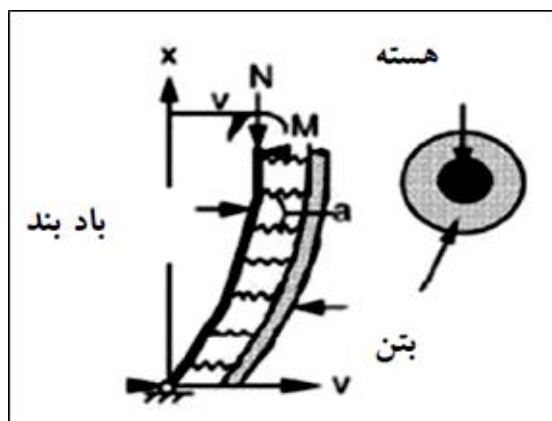
\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mr\_rouhparvar@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، پردیس بین الملل دانشگاه فردوسی

مشهد

۲. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

که در آن  $v$  تغییر شکل غلاف بتنی و  $\delta$  تغییر شکل در وسط دهانه می‌باشد. اندرکنش بادبند، غلاف و ملات بین آنها به عوامل متعددی بستگی دارد که مهمترین آنها سختی خمشی آنهاست. نیروی وارد بر بادبند سبب کمانش آن گردیده و در غلاف نیز خمش ناشی از کمانش به وجود می‌آید، گویا نیروی جانبی گسترده‌ای بر غلاف وارد می‌شود.



شکل ۱- آنالیز بادبند کمانش‌ناپذیر و نیروهای سیستم [۶]

با فرض اینکه تغییر شکل در بادبند و بتن برابر می‌باشد، مقدار شدت بار جانبی فوق با چهار بار مشتق‌گیری از رابطه (۱) و جاگذاری در معادله‌ی لنگر و مشتق ثانی، به صورت رابطه (۲) بدست می‌آید که در این رابطه  $E_C I_C$  سختی خمشی بتن می‌باشد.

$$p = \frac{n^4 \pi^4}{l^4} \delta E_C I_C \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (2)$$

با تقسیم شدت بار فوق به معادله‌ی تغییر شکل در رابطه (۱)، ضریبی شبیه ثابت فنر به نام نسبت نیروی گسترده‌ی لازم در واحد تغییر شکل غلاف بتنی که ضریب مقاومت نامیده می‌شود، بشرح رابطه (۳) حاصل می‌شود.

$$\alpha = \frac{p}{v} = \frac{n^4 \pi^4}{l^4} E_C I_C \quad (3)$$

وقتی تغییر شکل هسته فولادی توسط غلاف بتنی مهار می‌شود، معادله‌ی لنگر خمشی به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود.

$$M(x) = -Rx + \int_0^x \alpha v \cdot x \, dx + Nv \quad (4)$$

از سال ۲۰۰۵ مقرراتی برای اجرا و همچنین طراحی بادبندهای کمانش‌ناپذیر مطرح گردیده است، هنوز روابط طراحی کاملی ارائه نشده و بعضاً به انجام آزمایش موکول گردیده است [۱].

علی‌رغم تحمل و انتقال بار در بادبند کمانش‌ناپذیر توسط هسته، طراحی پوسته‌ی این نوع بادبندها نقش بسیار اساسی داشته و باید شرایط سختی و مقاومت به طور توأم در آن منظور شوند. زیرا آنها هستند که مانع کمانش هسته خواهند بود [۲ و ۳].

تا کنون در اکثر طراحی‌های مربوط به پوسته‌های بادبند کمانش‌ناپذیر از قطعات بتنی، ملات و گاهی از فولاد استفاده شده است که رایج‌ترین آنها بتن و بتن آرمه می‌باشد. معمولاً بتنی که مانع کمانش هسته می‌باشد، درون قوطی فولادی که غلاف گفته می‌شود ریخته می‌شود. قوطی فوق هم به عنوان قالب و هم به عنوان عامل نگهدارنده‌ی پوسته محسوب گردیده و در اکثر محاسبات بادبندهای کمانش‌ناپذیر، بتن مذکور به همراه غلاف بیرونی به عنوان پوسته به حساب می‌آید [۴ و ۵].

سنگینی پوسته‌ی بتنی به همراه غلاف آن، آماده کردن قالب، مشکلات بتن‌ریزی، مدت زمان لازم برای نگهداری و مراقبت از بتن در سنین اولیه، مشکلات حمل و نقل به علت سنگینی قطعات فوق و مشکلات عدیده‌ی اجرایی دیگر سبب پژوهش حاضر گردیده است. این مقاله برای نخستین بار، استفاده از مصالح FRP به عنوان پوسته یا عامل مهار کمانش در بادبندهای کمانش‌ناپذیر را پیشنهاد نموده است.

## ۲- روابط بنیادی نظری

### ۲-۱- کمانش کلی بادبندهای کمانش‌ناپذیر

در آنالیز کمانش الاستیک بادبند متشکل از میله‌ی فولادی احاطه‌شده در داخل بتن مسلح، شکل (۱)، معادله تغییر شکل بادبند محصور شده با بتن، به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [۶].

$$v = \delta \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (1)$$

برای محاسبه‌ی ظرفیت کمانش الاستیک بادبندهای کمانش‌ناپذیر ساخته شده با مصالح FRP می‌توان همانند ظرفیت کمانش الاستیک بادبندهای کمانش‌ناپذیر مرکب از بتن و غلاف فولادی استفاده نمود. البته در این حالت سختی هسته‌ی فولادی و سختی پوسته FRP در تحمل و انتقال بار سهیم خواهند بود. در حالت کلی می‌توان رابطه (۱۰) را برای محاسبه‌ی ظرفیت کمانش الاستیک مذکور پیشنهاد کرد.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_{FRP} I_{FRP}\} \quad (10)$$

در اینجا  $E_s I_s$  سختی خمشی بادبند و  $E_{FRP} I_{FRP}$  سختی خمشی پوسته FRP است. این رابطه، مشابه با رابطه (۹) بوده که قبلاً برای غلاف فولادی و پوسته‌ی بتنی بدست آمده بود. در اینجا نیز مانند بادبندهای کمانش‌ناپذیر معمولی بایستی الزامات مندرج در فصل شانزدهم آیین‌نامه‌ی (AISC(2005 رعایت گردد.

بادبندها هم در معرض بارهای کششی و هم بارهای فشاری بوده و حداکثر بار بادبندهای کمانش‌ناپذیر، برابر با بار کششی قابل تحمل توسط هسته‌ی بادبند می‌باشد [۸]. لذا در محاسبه‌ی این بادبندها، حداکثر بار طراحی همان بار کششی هسته‌ی بادبند بوده و برای این منظور به جای  $N_{cr}$  در رابطه (۱۰) می‌توان بار کششی بادبند در حالت تسلیم را مطابق رابطه (۱۱) جایگزین نمود.

$$N_y = \frac{\pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_{FRP} I_{FRP}\} \quad (11)$$

بدیهی است در مرحله‌ی تسلیم بادبند، سختی قسمت فولادی بادبند برابر صفر فرض می‌گردد و در این صورت سختی لازم برای پوسته FRP قابل محاسبه می‌گردد.

$$E_{FRP} I_{FRP} = \frac{N_y l^2}{\pi^2} \quad (12)$$

در رابطه‌ی فوق تأثیر سخت شونده‌ی کرنشی چرخه‌ای منظور نشده است. اگر فرض شود که سخت شونده‌ی فوق، مقاومت فشاری بادبند را به اندازه‌ی ۳۰٪ افزایش دهد و ضریب مقاومت برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شود رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد [۱].

که در آن  $M(x)$  لنگر خمشی در محل مقطع،  $R$  عکس-العمل در مفصل،  $x$  فاصله مفصل تا مقطع و  $N$  نیروی محوری است.

با استفاده از معادله (۴)، معادله‌ی دیفرانسیل اویلر به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود.

$$\frac{d^4 v}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 v}{dx^2} + \beta v = 0 \quad (5)$$

که در آن:  $\beta = \alpha / E_s I_s$  ،  $k^2 = N / E_s I_s$

با فرض اینکه هر دو انتها مفصلی است و با حل معادله فوق رابطه‌های (۶a) و (۶b) بدست می‌آیند.

$$N^2 = 4\alpha E_s I_s \quad (6a)$$

$$N_{cr} = \frac{2n^2 \pi^2}{l^2} E_s I_s \quad (6b)$$

از حل معادلات فوق طول مد کمانشی تعیین می‌گردد.

$$\frac{l}{n} = \pi \sqrt{\frac{E_s I_s}{\alpha}} \quad (7)$$

با استفاده از معادلات (۷) و (۶a)،  $N_{cr}$  می‌تواند به دو قسمت زیر تفکیک گردد.

$$N_{cr} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} E_s I_s + \frac{E_s I_s}{\frac{l^4}{n^4 \pi^4} n^2 \pi^2} l^2 = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} E_s I_s + \frac{l^2 \alpha}{n^2 \pi^2} \quad (8)$$

قسمت دوم معادله (۸)، سهم غلاف بتنی در کمانش را نشان می‌دهد. با جاگذاری معادله (۳) به جای  $\alpha$  در معادله (۸) بار کلی کمانش به صورت رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$N_{cr} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_c I_c\} \quad (9)$$

که در آن  $E_c I_c$  سختی خمشی بتن و  $E_s I_s$  سختی خمشی هسته‌ی فولادی می‌باشد. فرمول اخیر نشان می‌دهد که ظرفیت کمانش الاستیک بادبند مرکب به صورت مجموع سهم دو قسمت مجزا می‌باشد [۷].

## ۲-۲- محاسبه‌ی سختی خمشی لازم برای پوسته

### FRP در بادبندهای کمانش‌ناپذیر

جهت اتصال ورق‌های GFRP به هسته‌ی فلزی بادبند از بست‌های فلزی نگهدارنده استفاده شده است. بدین منظور، بسته به نوع نمونه‌های آزمایش، ورق‌های GFRP به موازات جداره‌های هسته‌ی فلزی بادبند (حول محور ضعیف ورق‌ها) یا عمود بر جداره‌ها (حول محور قوی ورق‌ها) در دو طرف هسته قرار گرفته سپس با استفاده از بست‌های فلزی در موقعیت خود تثبیت می‌گردند. شکل (۲)، مربوط به یکی از نمونه بادبندهای این پژوهش می‌باشد که در محیط آزمایشگاه ساخته شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ورق GFRP

مشخصات	مرجع آزمون	واحد	مقدار
دانسیته	ASTM D 792	g/cm <sup>3</sup>	۱/۸۶
قابلیت جذب آب	ASTM D 570	%	۰/۲۰
مقاومت کششی	ASTM D 638	MPa	۶۰۰
مدول کششی	ASTM D 638	GPa	۲۷
مقاومت خمشی	ASTM D 790	MPa	۴۶۰
مدول خمشی	ASTM D 790	GPa	۲۶
مقاومت فشاری	ASTM D 695	MPa	۵۴۷
مدول فشاری	ASTM D 695	GPa	۱۷
ازدیاد طول در اثر گسیختگی	ASTM D 3916	%	۲/۵۰
مقاومت برشی ورق کوتاه	ASTM D 4475	MPa	۵۰
مقاومت ضربه ای	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	۲۷۹
سختی	ASTM D 2583	barcol	۵۰

$$E_{FRP}I_{FRP} = \frac{N_y l^2}{\pi^2} \times \frac{1.30}{0.85} \quad (۱۳)$$

و بالأخره رابطه طراحی به صورت رابطه (۱۴) در می‌آید.

$$E_{FRP}I_{FRP} = 1.5 \frac{N_y l^2}{\pi^2} \quad (۱۴)$$

### ۳- آزمایشات

به منظور پژوهش در قابلیت بکارگیری مصالح FRP به عنوان پوسته یا عامل جلوگیری از کمانش در بادبندهای کمانش‌ناپذیر، آزمایش‌هایی در "مرکز پژوهش متالورژی رازی" روی نمونه‌های مختلف بادبند با پوسته GFRP و بادبند بدون پوسته انجام گردید که در ادامه به نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و نتایج بدست آمده اشاره شده است.

#### ۳-۱- مواد و ویژگی‌های آنها

##### الف- تسمه‌ی فولادی

در تمامی آزمایش‌های این پژوهش، از تسمه‌ی فولادی St-60 با تنش تسلیم کششی ۴۴۰ مگا پاسکال به عنوان هسته‌ی فلزی بادبند استفاده شده است. ضریب لاغری هسته حول محور کمانش در همه‌ی آزمایش‌ها یکسان و برابر (  $\frac{kl}{r} = 308$  ) می‌باشد که بر مبنای ضریب کمانش (  $k = 1$  ) محاسبه گردیده است.

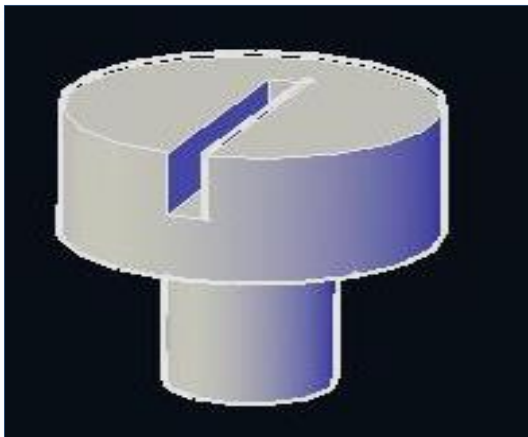
##### ب- ورق GFRP

در این پژوهش از ورق‌های FRP با الیاف شیشه ( Glass Fiber ) [۷]، تولید شده در "شرکت کامپوزیت آسیا" به عنوان پوسته‌ی بادبند استفاده گردیده است. جدول ۱، مشخصات فیزیکی و مکانیکی ورق‌های GFRP، اقتباس شده از شرکت مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته

عرض ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۹ میلیمتر با سطح مقطع ۴۵۰ میلیمتر مربع به عنوان هسته‌ی بادبند صورت گرفت. جهت ممانعت از کمانش موضعی در محل تکیه‌گاهها از فیکسچرهای فولادی استفاده شد. مطابق شکل (۴) نیروی محوری فشاری به صورت تدریجی بر نمونه اعمال و همانگونه که انتظار می‌رفت، قبل از رسیدن تنش فشاری نمونه به حد تنش تسلیم کششی هسته، دچار کمانش کلی گردید.



شکل ۳- شمای کلی فیکسچر فولادی

**ب- آزمایش فشار نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف در کل طول آزاد هسته**  
در این آزمایش از تسمه‌ی فولادی به طول ۸۰۰ میلیمتر، عرض ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۹ میلیمتر با سطح مقطع ۴۵۰ میلیمتر مربع به عنوان هسته‌ی فلزی بادبند و از ورقهای GFRP به طول ۶۹۰ میلیمتر، عرض ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۲۰ میلیمتر حول محور ضعیف که دو طرف هسته، موازی جداره در کل طول آزاد هسته قرار گرفته بودند و با استفاده از بستهای فلزی در موقعیت خود تثبیت شده بودند، به عنوان پوسته‌ی بادبند استفاده گردید. برای ممانعت از کمانش موضعی در محل تکیه‌گاهها از فیکسچرهای فولادی استفاده شد و مطابق شکل (۵) نیروی محوری فشاری به صورت تدریجی بر نمونه اعمال گردید. در این آزمایش قبل از رسیدن تنش فشاری نمونه به حد تنش تسلیم کششی هسته، کمانش کلی رخ داد. ضمن

### ج- فوم پلی اتیلن

یکی از اجزای سازنده‌ی بادبندهای کمانش ناپذیر، مصالح جداکننده و انبساطی می‌باشد که در فضای خالی بین هسته‌ی فلزی و پوسته‌ی بادبند قرار می‌گیرد. این مصالح لغزنده که انتقال برش بین هسته و پوسته را به طور مؤثری حذف کرده و یا آنرا به حداقل می‌رساند، از موادی مانند لاستیک، پلی اتیلن و ... انتخاب می‌شود. در آزمایشات پژوهش حاضر، از فوم پلی اتیلن با ضخامت ۱۰ میلیمتر به عنوان مصالح جداکننده و انبساطی بادبند استفاده شده است. این ماده‌ی اسفنجی از ترکیب پلی اتیلن فشرده و حبابهای ریز هوا با ساختاری نرم و انعطاف پذیر بدست آمده که سبکی، عایق بودن و ضربه گیری از خصوصیات بارز آن محسوب می‌شود.

### ۳-۲- ابزار و تجهیزات آزمایشگاه

#### الف- دستگاه آزمون فشار

تمام آزمایش‌های این پژوهش با در نظر گرفتن تمهیدات لازم توسط دستگاه آزمون فشار با قدرت بارگذاری ۲۰ تن و دقت تمام انجام شده و نیرو به صورت تدریجی بر نمونه‌ها اعمال گردیده است. حداکثر فاصله‌ی آزاد میان فک بالا و فک پایین جک، ۱۰۰۰ میلیمتر اندازه‌گیری شد. همچنین میزان تغییر طول ایجاد شده در اثر بارگذاری نمونه‌ها، توسط سیستم متصل به دستگاه و با دقت یک صد هزارم میلیمتر، اندازه‌گیری و ثبت شده است.

#### ب- فیکسچر

برای جلوگیری از کمانش موضعی نمونه‌ها در محل تکیه‌گاهها مطابق شکل (۳)، از دو فیکسچر فولادی ساخته شده در آزمایشگاه که شیار به طول ۸۰ میلیمتر، عرض ۱۰ میلیمتر و عمق ۵۰ میلیمتر در وسط آنها تعبیه شده بود استفاده گردید که در دو انتهای نمونه‌ها قرار می‌گرفتند.

### ۳-۳- آزمایشهای تحقیق

**الف- آزمایش فشار نمونه‌ی بادبند بدون پوسته**  
این آزمایش بر روی تسمه‌ی فولادی به طول ۸۰۰ میلیمتر،

رسیدن تنش فشاری نمونه به حد تنش تسلیم کششی هسته بدون بوجود آمدن هیچگونه کمانشی، قطعه ساخته شده حالت بادبند کمانش‌ناپذیر به خود گرفت.

### ۳-۴- نتایج

هدف از انجام آزمایش‌های این پژوهش، اثبات بکارگیری ورقهای GFRP، به عنوان پوسته در بادبندهای کمانش‌ناپذیر می باشد؛ لذا نمونه‌ها فقط تحت بار محوری فشاری قرار گرفته‌اند. چنانچه نیروی فشاری قابل تحمل توسط نمونه‌های بادبند با پوسته GFRP برابر نیروی تسلیم کششی هسته‌ی فولادی یعنی:

$$N_y = 440MPa(50mm \times 9mm) = 198kN \quad (۱۵)$$

یا بیش از آن باشد، عملکرد ورق‌های مذکور اثبات می‌شود.

#### الف- نمونه‌ی بادبند بدون پوسته

در آزمایش نمونه‌ی بادبند بدون پوسته، حداکثر نیروی فشاری محوری تحمل شده توسط هسته به مقدار ۵۲/۴۵ کیلونیوتن ثبت گردید که از نیروی تسلیم کششی هسته یعنی ۱۹۸ کیلونیوتن کمتر است. از آنجا که ضریب لاغری هسته حول محور کمانش برابر  $(\frac{kl}{r} = 308)$  می‌باشد [۱۰]، وقوع کمانش کلی در هسته‌ی فلزی قابل پیش‌بینی بود (شکل (۴)). نتایج آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ب- نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور

##### ضعیف در کل طول آزاد هسته

نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف در کل طول آزاد هسته نشان می‌دهد سختی خمشی پوسته (EI) از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در تأمین ظرفیت فشاری هسته می باشد؛ بگونه‌ای که نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف و طول ۶۹۰ میلی‌متر، با تحمل حداکثر بار ۵۵/۴۷ کیلونیوتن دچار کمانش کلی گردید (شکل (۵)) و چنین استنتاج شد که سختی خمشی انتخاب شده برای پوسته مناسب نبوده و جوابگوی حالت بادبند کمانش‌ناپذیر نمی‌باشد.

اینکه توان باربری فشاری نمونه نسبت به آزمایش قبل اندکی افزایش یافت.

#### ج- آزمایش فشار نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP

##### حول محور قوی در نصف میانی طول آزاد هسته

در این آزمایش از تسمه‌ی فولادی به طول ۸۰۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۹ میلی‌متر با سطح مقطع ۴۵۰ میلی‌متر مربع به عنوان هسته‌ی فلزی بادبند و از ورقهای GFRP به طول ۳۵۰ میلی‌متر، عرض ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر حول محور قوی که دو طرف هسته، عمود بر جداره در نصف میانی طول آزاد هسته قرار گرفته بودند و با استفاده از بست‌های فلزی در موقعیت خود تثبیت شده بودند، به عنوان پوسته‌ی بادبند استفاده گردید. برای ممانعت از کمانش موضعی در محل تکیه‌گاهها از فیکسچرهای فولادی استفاده شد و مطابق شکل (۶) نیروی محوری فشاری به صورت تدریجی بر نمونه اعمال گردید. در این آزمایش قبل از رسیدن تنش فشاری نمونه به حد تنش تسلیم کششی هسته، کمانش در قسمت‌هایی که توسط پوسته GFRP پوشش داده نشده بود رخ داد؛ ضمن اینکه توان باربری فشاری نمونه نسبت به هر دو آزمایش قبل افزایش پیدا کرد.

#### د- آزمایش فشار نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP

##### حول محور قوی در کل طول آزاد هسته

جهت انجام این آزمایش از تسمه‌ی فولادی به طول ۸۰۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۹ میلی‌متر با سطح مقطع ۴۵۰ میلی‌متر مربع به عنوان هسته‌ی فلزی بادبند و از ورقهای GFRP به طول ۶۹۰ میلی‌متر، عرض ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر که دو طرف هسته و عمود بر جداره در کل طول آزاد هسته قرار گرفته بودند و با استفاده از بست‌های فلزی در موقعیت خود تثبیت شده بودند، به عنوان پوسته‌ی بادبند استفاده گردید. برای ممانعت از کمانش موضعی احتمالی، همانند قبل از فیکسچرهای فولادی استفاده شد. سپس مطابق شکل (۷) نیروی محوری فشاری به صورت تدریجی بر نمونه اعمال گردید که در نهایت با

آزمایش نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته و طول ۶۹۰ میلی‌متر به دلیل پوشش کامل طول آزاد هسته و همچنین سختی خمشی مناسب پوسته (EI)، توانست بار ۲۰۰ کیلونیوتن که از نیروی تسلیم کششی هسته یعنی ۱۹۸ کیلونیوتن بیشتر می‌باشد را بدون ایجاد کوچکترین کمانشی تحمل نماید (شکل (۷)) و نشان داد که شرایط بادبند کمانش ناپذیر را تأمین نموده است.

### ۳-۵- نمودارهای نیرو- تغییر مکان

همان‌گونه که از نمودارهای نیرو- تغییر مکان مشخص می‌باشد، ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته، نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر بوده به طوری که سطح زیر دیاگرام‌ها مؤید این مطلب می‌باشد.

### ۴- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با

#### محاسبات نظری

برای مقایسه‌ی سختی خمشی پوسته‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی با سختی خمشی حاصل از محاسبات نظری به ترتیب زیر عمل می‌شود:

#### الف- نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف

طبق رابطه‌ی (۱۴) و همچنین با توجه به مقادیر  $N_y = 198kN$  و  $L = 0.80m$  جهت محاسبه‌ی سختی خمشی مورد نیاز پوسته GFRP خواهیم داشت:

$$E_{GFRP} I_{GFRP} = 1.50 \frac{N_y l^2}{\pi^2} \Rightarrow$$

$$E_{GFRP} I_{GFRP} = 1.50 \frac{198 \times 0.80^2}{\pi^2}$$

$$= 19.26 kN.m^2$$

از طرفی برای پوسته‌ی بکار گرفته شده در این نمونه، از دو ورق GFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است که موازی جداره‌ی هسته در دو طرف آن قرار گرفته بودند. لذا ممان اینرسی پوسته برابر است با:

$$I_{GFRP} = 2(50 \times \frac{20^3}{12}) = 66667 mm^4$$

جدول ۲- نتایج آزمایش نمونه‌ی بادبند بدون پوسته

نمونه آزمایش	بادبند بدون پوسته
نمای کلی از مقطع نمونه	
طول هسته	800 mm
سطح مقطع هسته	50×9 mm <sup>2</sup>
طول پوسته واقع در هر طرف هسته	-
سطح مقطع پوسته واقع در هر طرف هسته	-
مدول الاستیسیته خمشی هسته	200GPa
مدول الاستیسیته خمشی پوسته	-
سختی خمشی هسته حول محور ضعیف	0.6075 kN.m <sup>2</sup>
حداقل سختی خمشی محاسباتی پوسته	-
سختی خمشی واقعی پوسته	-
نیروی تسلیم کششی هسته	198 kN
حداکثر نیروی محوری فشاری تحمل شده توسط هسته	52.45 kN
حداکثر تغییر مکان قائم نمونه	2.35 mm
نوع کمانش نمونه	کمانش کلی

#### ج- نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی

##### در نصف میانی طول آزاد هسته

نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در نصف میانی طول آزاد هسته نشان می‌دهد یکی دیگر از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در تأمین ظرفیت فشاری هسته طول پوسته می‌باشد؛ بگونه‌ای که نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی و طول ۳۵۰ میلی‌متر، با تحمل حداکثر بار ۶۹/۹۹ کیلونیوتن فقط در قسمت‌هایی که توسط پوسته پوشش داده نشده بود، دچار کمانش کلی شد (شکل (۶)). بنابراین کاهش طول پوسته مانع دستیابی به شرایط بادبند کمانش ناپذیر گردیده است.

#### د- نمونه‌ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی

##### در کل طول آزاد هسته

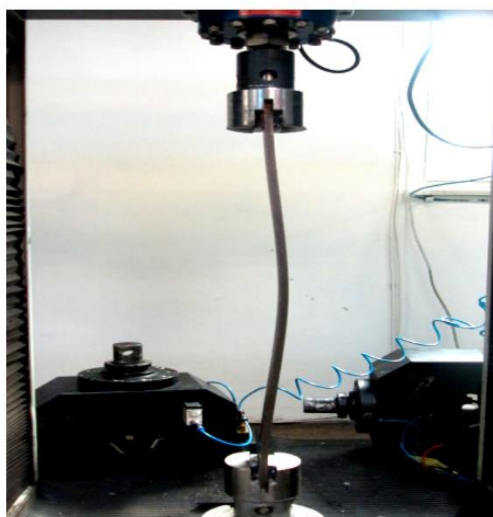
برای پوسته‌های بکار گرفته شده در این نمونه‌ها، از دو ورق GFRP به عرض ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است که عمود بر جداری هسته در دو طرف آن قرار گرفته بودند. لذا ممان اینرسی پوسته برای هر نمونه برابر است با:

$$I_{GFRP} = 2(30 \times \frac{70^3}{12}) = 1715000 \text{ mm}^4$$

همچنین مطابق جدول ۱، مدول الاستیسیته‌ی خمشی ورق GFRP برابر  $E_{GFRP} = 26 \text{ GPa}$  می‌باشد. لذا سختی خمشی انتخاب شده برای پوسته‌ی نمونه‌ها در آزمایشگاه برابر خواهد بود با:

$$E_{GFRP}I_{GFRP} = 1715000 \text{ mm}^4 \times 26 \text{ kN/mm}^2 = 44.59 \text{ kN.m}^2 > 19.26 \text{ kN.m}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود سختی خمشی انتخاب شده برای پوسته GFRP نمونه‌های فوق، بیش از سختی خمشی محاسباتی بوده که این عامل نقش بسزایی در ممانعت از کمانش کلی آنها بر عهده دارد. عدم ایجاد کمانش در آزمایش نمونه با پوسته‌ی کامل شکل (۷) و همچنین عدم کمانش قسمت پوسته‌دار در آزمایش نمونه با نصف پوسته شکل (۶)، تأییدکننده‌ی مطلب مذکور می‌باشد.



(ب) بعد از بارگذاری

همچنین مطابق جدول ۱، مدول الاستیسیته‌ی خمشی ورق GFRP برابر  $E_{GFRP} = 26 \text{ GPa}$  می‌باشد. لذا سختی خمشی انتخاب شده برای پوسته‌ی نمونه در آزمایشگاه برابر خواهد بود با:

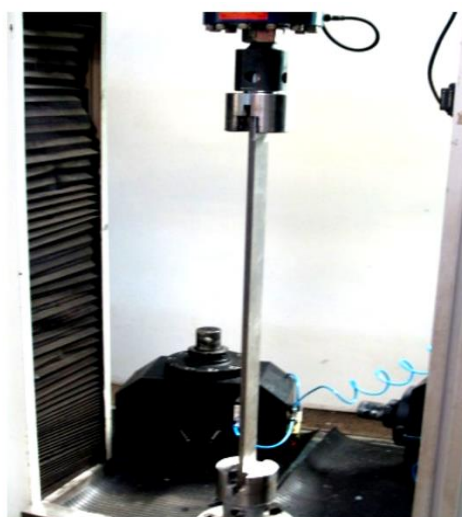
$$E_{GFRP}I_{GFRP} = 66667 \text{ mm}^4 \times 26 \text{ kN/mm}^2 = 1.73 \text{ kN.m}^2 \ll 19.26 \text{ kN.m}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود سختی خمشی انتخاب شده برای پوسته GFRP نمونه‌ی فوق، خیلی کمتر از سختی خمشی محاسباتی بوده که همین عامل می‌تواند در کمانش نمونه بسیار مؤثر باشد؛ به طوری که کمانش کلی رخ داده در آزمایش نمونه‌ی بادبند مذکور مؤید این مطلب می‌باشد.

**ب- نمونه‌های بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی**

همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد سختی خمشی مورد نیاز پوسته GFRP برابر است با:

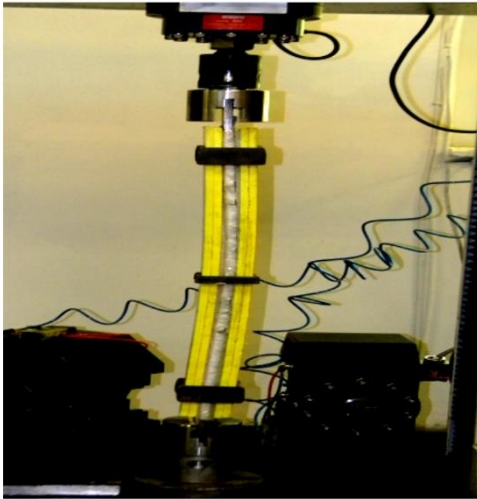
$$E_{GFRP}I_{GFRP} = 1.50 \frac{N_y l^2}{\pi^2} \Rightarrow E_{GFRP}I_{GFRP} = 1.50 \frac{198 \times 0.80^2}{\pi^2} = 19.26 \text{ kN.m}^2$$



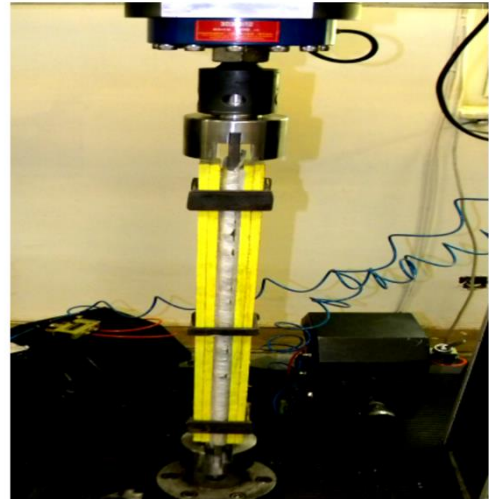
(الف) قبل از بارگذاری

شکل ۴- نمونه‌ی بادبند بدون پوسته تحت نیروی محوری فشاری



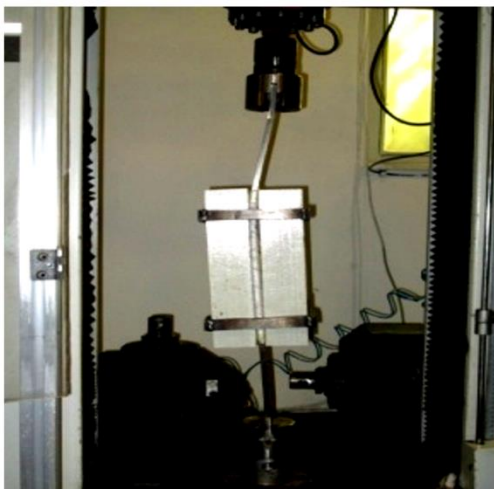


(ب) بعد از بارگذاری

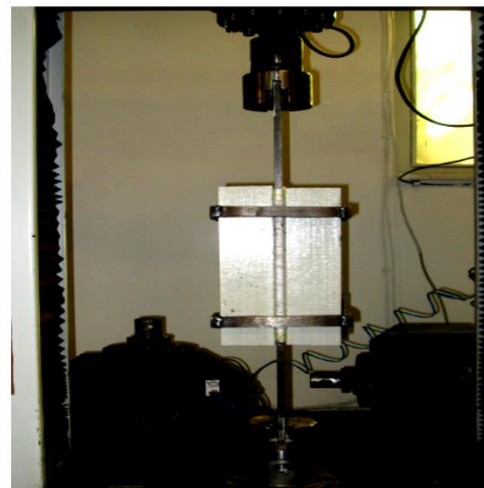


(الف) قبل از بارگذاری

شکل ۵- نمونه ی بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف در کل طول آزاد هسته تحت نیروی محوری فشاری



(ب) بعد از بارگذاری

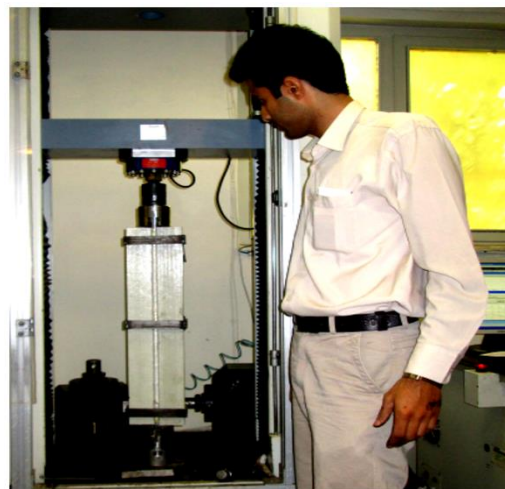


(الف) قبل از بارگذاری

شکل ۶- نمونه بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در نصف میانی طول آزاد هسته تحت نیروی محوری فشاری




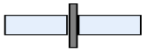
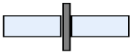
(ب) بعد از بارگذاری

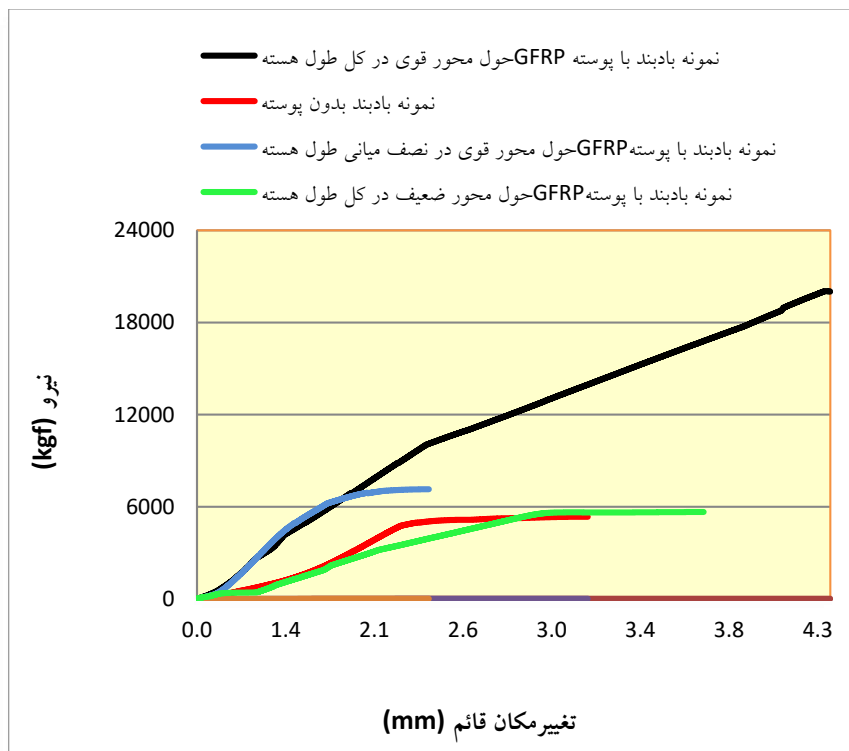


(الف) قبل از بارگذاری

شکل ۷- نمونه ی بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته تحت نیروی محوری فشاری

جدول ۳- نتایج آزمایش نمونه‌های بادبند با پوسته GFRP

نمونه های آزمایش	بادبند با پوسته GFRP حول محور ضعیف در کل طول آزاد هسته	بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در نصف میانی طول آزاد هسته	بادبند با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته
نمای کلی از مقطع نمونه			
طول هسته	800 mm	800 mm	800 mm
سطح مقطع هسته	50×9 mm <sup>2</sup>	50×9 mm <sup>2</sup>	50×9 mm <sup>2</sup>
طول پوسته واقع در هر طرف هسته	690 mm	350 mm	690 mm
سطح مقطع پوسته واقع در هر طرف هسته	50×20 mm <sup>2</sup>	30×70 mm <sup>2</sup>	30×70 mm <sup>2</sup>
مدول الاستیسیته خمشی هسته	200 GPa	200 GPa	200 GPa
مدول الاستیسیته خمشی پوسته	26 GPa	26 GPa	26 GPa
سختی خمشی هسته حول محور ضعیف	0.6075 kN.m <sup>2</sup>	0.6075 kN.m <sup>2</sup>	0.6075 kN.m <sup>2</sup>
حداقل سختی خمشی محاسباتی پوسته	19.26 kN.m <sup>2</sup>	19.26 kN.m <sup>2</sup>	19.26 kN.m <sup>2</sup>
سختی خمشی واقعی پوسته	1.73 kN.m <sup>2</sup>	44.59 kN.m <sup>2</sup>	44.59 kN.m <sup>2</sup>
نیروی تسلیم کششی هسته	198 kN	198 kN	198 kN
حداکثر نیروی محوری فشاری تحمل شده توسط هسته	55.47 kN	69.99 kN	200 kN
حداکثر تغییر مکان قائم نمونه	3.37 mm	2.67 mm	4.3 mm
نوع کمانش نمونه	کمانش کلی	کمانش کلی در موقعیت بدون پوسته	بدون کمانش



شکل ۸- نمودارهای نیرو- تغییر مکان نمونه های تحقیق

۲- یکی از مهمترین علل اصلی ابداع و توسعه ی بادبندهای کمانش ناپذیر، ظرفیت جذب انرژی زیاد آنها می باشد. مشاهدات آزمایشگاهی و نیز بررسی نمودارهای نیرو- تغییر مکان نشان می دهد که ظرفیت جذب انرژی نمونه ی با پوسته GFRP حول محور قوی در کل طول آزاد هسته در مقایسه با نمونه ی با پوسته GFRP حول محور قوی در نصف میانی طول آزاد هسته به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین افزایش طول پوشش هسته توسط پوسته های FRP را می توان به عنوان افزایش مقاومت فشاری بادبندها تلقی نمود.

۳- طول پوشش بهینه ی هسته ی بادبند کمانش ناپذیر توسط پوسته GFRP، به اندازه کل طول آزاد هسته توصیه می گردد.

۴- بادبندهای کمانش ناپذیر با پوسته FRP به شرط داشتن سختی خمشی و طول پوشش کافی، نسبت به بادبند کمانش ناپذیر با پوسته بتنی و غلاف فولادی، سبکتر، اقتصادی تر، سهل الاجرا، دارای کارایی مکانیکی بسیار مفید و در مدت زمان کمتری قابل نصب می باشند.

اگرچه از روابط و محاسبات نظری می توان برای ابعاد پوسته مقطعی را حدس زد، ولی در عمل و آزمایش نتایج دقیق تری استنباط می شود. زیرا در محاسبات مذکور غلاف فلزی اطراف پوسته ی بتنی مطرح است؛ در حالی که در این پژوهش نیازی به غلاف فلزی نیست.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به آزمون های انجام شده بر روی نمونه های مختلف بادبند با پوسته GFRP می توان نتیجه گرفت:

۱- از ورق های FRP می توان به عنوان پوسته ی بادبندهای کمانش ناپذیر استفاده کرد. برای این منظور باید سختی خمشی پوسته، یعنی EI کافی باشد. کفایت سختی خمشی به لاغری هسته ی بادبند بستگی دارد و از آنجایی که مسأله ی لاغری سبب می شود مقطع بادبندها قوی و بزرگ انتخاب شوند، با استفاده از بادبندهای کمانش ناپذیر با پوسته FRP، می توان از مقاطع کوچکتر و اقتصادی تری استفاده نمود.

۵- روش ارائه شده در مقاله حاضر برای تقویت بادبندهای موجود، روشی بهینه بوده و مشکلاتی مانند بتن ریزی، قالب بندی، مراقبت و نگهداری در زمان سخت شدن بتن را ندارد.

## ۶- مراجع

- [1] American Institute of Steel Construction, (2005), "AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Building Chicago.
- [2] Jinkoo Kim, and Hyunhoon Choi, (2004), "Behavior and design of structures with buckling-restrained braces", Department of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Chunchun-dong, Jangan-gu, pp.440-746
- [3] Frederick F, Tajirian, Ian D. Aiken, Isao Kimura, (2003), "Application of Buckling- Restrained Braces in the United States", 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Yerevan, Armenia, pp. 6-10
- [4] Chia-Ming Uang, and Masayoshi Nakashima, (2004) "steel Buckling-Restrained braced Frames", CRC Press LLC.
- [5] R.T.Ranf, (2003) "Analysis and design comparison between unbounded and conventional bracing", CEE 513, Advanced Steel Design.
- [6] Qiang Xie, (2005), "State of the art of buckling-restrained braces in Asia", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, No.6, pp. 728-748
- [۷] مهدیزاده، محمدباقر و زندی، یوسف وتر و محمدقاسم (۱۳۸۹)، "کاربرد ورق های پلی اتیلنی در بادبندهای کمانش‌ناپذیر"، نشریه سازه و فولاد، دوره ۶، شماره ۷، بهار و تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۴۳-۵۷.
- [۸] نشریه شماره ۳۶۱، "تفسیر دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، ویرایش اول".
- [9] Razaqpur, A. G., and Kashef, A. H., (1993), "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings", Submitted to: Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa.
- [۱۰] ازهری، مجتبی میرقادری و سید رسول (۱۳۹۰)، "طراحی سازه های فولادی"، جلد چهارم، چاپ سوم، انتشارات ارکان.