

# کاربرد ورق های پلی اتیلنی در بادبندهای کمانش ناپذیر

محمد باقر مهدیزاده<sup>۱</sup>، یوسف زندی<sup>۲</sup>، محمد قاسم وتر<sup>۳</sup>

(دریافت: ۸۸/۱۲/۱۰، پذیرش: ۸۹/۶/۲۱)

## چکیده

در پژوهش و نوآوری عملی حاضر، قابلیت و امکان بکارگیری ورق های پلی اتیلنی در بادبندهای کمانش ناپذیر (BRB) بررسی گردیده است. در بادبندهای کمانش ناپذیر رایج، پوسته بادبندهای کمانش ناپذیر که وظیفه آن جلوگیری از کمانش بادبند می باشد غالباً بتن یا ملاتی است که در داخل غلاف فولادی ریخته شده و مشکلاتی مانند سنگینی پوسته بتنی، آماده کردن قالب، مشکلات بتن ریزی، مدت زمان لازم برای نگهداری و مراقبت از بتن در سنین اولیه، حمل و نقل و مشکلات عدیده اجرائی دیگر را دارد. این پژوهش نشان می دهد که از ورق های پلی اتیلنی می توان به عنوان پوسته و یا عامل جلوگیری از کمانش بادبند، به جای پوسته بتنی و غلاف فولادی استفاده نمود. همچنین می توان از آنها در تقویت سازه های موجود در جهت افزایش توان باری بادبندهای نصب شده استفاده کرد. سبکی، اقتصادی بودن، امکان نصب سریع، کاهش شدید مشکلات اجرا، عدم نیاز به قالب بندی و صرفه جوئی در زمان به علت عدم نیاز به دوره مراقبت از بتن از مزایای این نوآوری محسوب می شود.

## کلمات کلیدی

بادبندهای کمانش ناپذیر، قاب های فولادی، پلی اتیلن

## Application of Polyethylene Sheets in Buckling Restrained Braces

M. B. Mahdizadeh, Y. Zandi, M. Gh. Vetr

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study about applicability of Buckling-restrained braces (BRBs) by polyethylene sheets. Buckling-restraining unit (encasing member), whose function is to prevent the brace from buckling, is almost tube that is filled by concrete or mortar and has many problems and difficulties as concreting, shuttering, curing, reinforcing, transporting and wasting of time. This research shows that polyethylene can be used as Buckling-restraining unit instead of steel tube and concrete or mortar. And also they can be used as a reducer of compressive forces at steel braces for strengthening the existing building. The advantages of this innovative and new method are save the time, light weighting, economic, easy and quick installation, decreasing the construction problems, no need to shuttering and curing.

### Keywords

Buckling Restrained Brace, Steel Frames, Polyethylene

۱.دکترای عمران، عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز (دانشکده فنی و مهندسی مرنده) mahdizadeh12@yahoo.com (نویسنده مسئول)

۲.عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، zandi\_engineer@yahoo.com

۳.عضو هیئت علمی پژوهشکده بین المللی زلزله شناسی، vetr2@yahoo.com



نیروهای فشاری بزرگ قرار می‌گیرند، کمانش کرده و پایداری خود را از دست می‌دهند. 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 سازه فولادی، مقوله‌ای به نام بادبندهای کمانش‌ناپذیرا به وجود آورده است. قاب‌های دارای بادبند‌های کمانش‌ناپذیر حالت خاصی از قاب‌های با بادبندهای هم‌محور یا هم‌گرا یعنی هستند. قاب‌های با بادبندهای کمانش‌ناپذیر شکل‌پذیری بیشتری داشته و از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردارند [۲۰].

از فلسفه‌های پژوهش و استفاده از بادبند‌های کمانش‌ناپذیر می‌تواند به موارد زیر اشاره نمود:

الف- مهمترین فلسفه استفاده از بادبندهای فولادی کمانش‌ناپذیر، افزایش توان فشاری آنها تا حد توان کششی است. بطوریکه بدون تغییر لاغری بادبند، ظرفیت فشاری عضو بیشتر از بار کمانش الاستیک آن می‌گردد. به عبارت دیگر همان نیرویی که بادبند فولادی می‌توانست در کشش تحمل کند همان نیرو را در فشار نیز تحمل می‌نماید. و از آنجائیکه مسئله لاغری سبب می‌شود مقطع بادبندها قوی و بزرگ انتخاب شوند با تکنیک بادبند‌های کمانش‌ناپذیر می‌توان از مقاطع کوچکتر و اقتصادی‌تری استفاده نمود.

ب- مقررات و آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس تئوری‌ها و تجربیات قبلی و مشاهده نتایج آنها در رویدادها و رخدادهای بعدی و اصلاح و تجدید نظر آنها به وجود آمده و از هر چند سال مورد بازبینی قرار می‌گیرند. سازه‌هایی که با آیین‌نامه‌های قبلی ساخته شده‌اند در مقایسه با مفاد آیین‌نامه جدید از ایمنی لازم، دوام و

تغییر شکل جانبی سازه‌ها که معمولاً از نیروهای وارد بر سازه اعم از نیروی زلزله و باد، نیروهای قائم و دیگر نیروها ناشی می‌شود یکی از مهمترین تغییر شکل‌ها بوده و محدود سازی آنها نیز بسیار حائز اهمیت و مورد توجه پژوهشگران و مهندسين قرار گرفته است. برای کاهش تغییر شکل‌های جانبی در سازه‌ها از دیوارهای برشی، بادبند‌ها، قاب‌های صلب و بعضاً از تکنیک‌های ترکیبی دیگری استفاده می‌شود. هر کدام از آنها ظرفیت جذب انرژی متفاوتی داشته و در طراحی سازه‌ها ملاک عمل قرار گرفته و در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی هر کشوری مقرراتی برای آنها وضع گردیده است.

رفتار سازه‌های فولادی در حین زلزله‌های بزرگ غالباً بهتر از رفتار سازه‌های ساخته شده با دیگر مصالح می‌باشد. از مزایای سازه‌های فولادی، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و طاقت فولاد بوده و علاوه بر آن خاصیت قابل‌پیش‌بینی گسیختگی آن نسبت به بتن مسلح و مصالح بنائی است. همچنین امکان تعویض و تعمیر اجزای صدمه‌دیده در این سازه‌ها ارجحیت آنها را افزایش داده است. از طرفی تخریب ساختمان‌ها و اجزای سازه‌ای در یک زلزله، سبب اتلاف وقت و هزینه و خدمت‌رسانی گردیده و خسارات کمتر سازه‌های فولادی در زمین‌لرزه‌ها که غالباً به توانایی ظرفیت استهلاک انرژی توسط بادبندها بستگی دارد سبب افزایش کاربرد آنها گردیده است. زیرا با افزایش ظرفیت استهلاک انرژی ایمنی سازه نیز افزایش می‌یابد.

سهولت اجرائی و کارائی موثر بادبند‌ها به‌ویژه در ساختمانهای فولادی، آنها را به عنوان روشی مناسب برای مهار نیروهای جانبی مطرح ساخته است. معمولاً بادبندها هم در معرض نیروهای کششی و فشاری قرار داشته و طراحی آنها بر اساس بیشترین بار وارده و غالباً نیروهای فشاری صورت می‌گیرد. وقتی بادبند‌ها در معرض



استحکام کافی برخوردار نیستند لذا سازه های قبلی نیاز به تقویت دارند. لزوم این تقویت به علت فرسوده شدن مصالح ، خراب شدن عضو ، ترک برداشتن و عوامل دیگر نیست بلکه در اثر تغییرات اعمال شده در آیین نامه و درک بیشتر و بهتر ما از رفتار و عملکرد سازه می باشد. لذا یکی از موارد کاربرد بادبندهای کمانش ناپذیر لزوم تقویت بادبندهای قبلی به علت تغییر آیین نامه ها و افزایش توان باربری آنها تا حد انتظار در آیین نامه جدید می باشد.

پ- علت اصلی ابداع و توسعه بادبندهای کمانش ناپذیر، رفتار هیسترتیک پایدار، شکل پذیری کافی و ظرفیت اتلاف انرژی زیاد آنهاست. زیرا سیستمهای مهاربندی شده هم محور معمولی ، شکل پذیری کم و ظرفیت جذب انرژی پائینی نسبت به سیستمهای دارای بادبندهای کمانش ناپذیر دارند [۳].

ت- علاوه بر رفتار هیسترتیک پایدار بادبندهای کمانش ناپذیر، مزیت مهم آنها در سیستمهای مقاوم در برابر زلزله، کنترل آسیب و خسارت وارده می باشد. در قاب های دارای بادبندهای کمانش ناپذیر که به طور صحیح طراحی می شوند، رفتار غیر الاستیک نخست در بادبندها به وقوع می پیوندد، و اعضای دیگر یعنی ستونها، تیرها و اتصالات باید در محدوده الاستیک باقی مانده و یا حداقل آسیب را ببینند. این رفتار برخلاف دیگر سیستمهای شکل پذیر لرزه ای است. به عنوان مثال در قاب های خمشی یا در قاب های باد بندی شده خارج از محور اتلاف انرژی با رفتار غیر الاستیک تیرها با تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها، صورت می گیرد در حالیکه در بادبندهای کمانش ناپذیر، نیازی به تشکیل مفاصل در تیرها نبوده و تیرها نیز مثل ستونها در محدوده الاستیک قرار می گیرند.

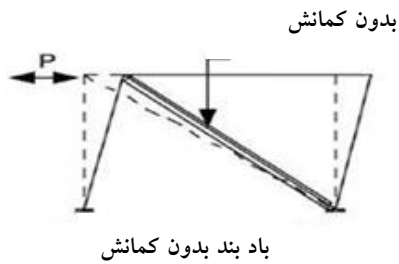
ث- در قاب های خمشی مذکور در بند قبلی، خسارت وارده، به علت تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها در تمام قابها توزیع می گردد که تعمیر و مرمت آنها مشکل است. در حالیکه در قاب های با بادبندهای کمانش ناپذیر، خسارت در بادبندها متمرکز گردیده و تعمیر و مرمت بادبندها در صورت لزوم نسبت به بقیه اعضا ساده تر و راحت تر می باشد [۴].

ج- استفاده از بادبندهای کمانش ناپذیر ضریب رفتار سازه فولادی را نسبت به سازه های معمولی تغییر می دهد. این ضریب که نقش مهمی در محاسبه نیروی زلزله دارد، در صورت افزایش ضریب رفتار سازه، مقدار نیروی محاسباتی زلزله کاهش می یابد [۵].

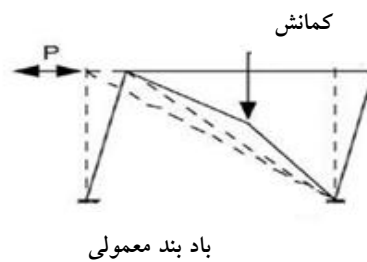
چ- فلسفه دیگر کاربرد بادبندهای کمانش ناپذیر، خطاهای محاسباتی و طراحی است که گاهی نه تنها طراح بلکه کنترل کننده نیز مرتکب این خطای ناخواسته گردیده و سازه به اجرا در آمده است و در نتیجه تقویت بادبند ضروری گردیده است که در این صورت استفاده از تکنیک بادبندهای کمانش ناپذیر گزینه مناسبتری خواهد بود.

#### ۲- رفتار بادبندهای کمانش ناپذیر

بادبند ها ی هم مرکز معمولی در اثر نیروهای کششی و فشاری رفتار هسترتیک نامتقارن از خود نشان می دهند و وقتی به صورت یکنواخت یا متناوب به صورت فشاری مطابق شکل (۱a) بارگذاری می گردند کاهش مقاومت قابل توجهی از خود نشان می دهند. هرگاه کمانش بادبند فولادی مهار گردیده و مقاومت یکسانی هم در کشش و هم در فشار تامین گردد، ظرفیت جذب انرژی بادبند افزایش می یابد [۱، ۲، ۱۱-۶].



(b)



(a)

شکل (۱): رفتار بادبند معمولی و بادبند کمانش ناپذیر [۱]

۳- قسمت مانع کمانش (پوسته) که وظیفه آن جلوگیری از کمانش هسته است.

۴- قسمت جداکننده هسته و پوسته، که امکان لغزش آزادانه هسته را در داخل پوسته فراهم کرده و وقتی هسته در اثر فشار تسلیم می شود، انبساط عرضی هسته را امکان پذیر می نماید. برای اینکار معمولاً مقداری ماده غیر چسبنده لازم است تا به عنوان قسمت جداکننده استفاده شود. در غیر اینصورت، بایستی یک درز بین دو قسمت قرار داده شود [۱ و ۲ و ۱۲].

شکل (۳) مقاطع انواع بادبندهای کمانش ناپذیر را نشان می دهد.

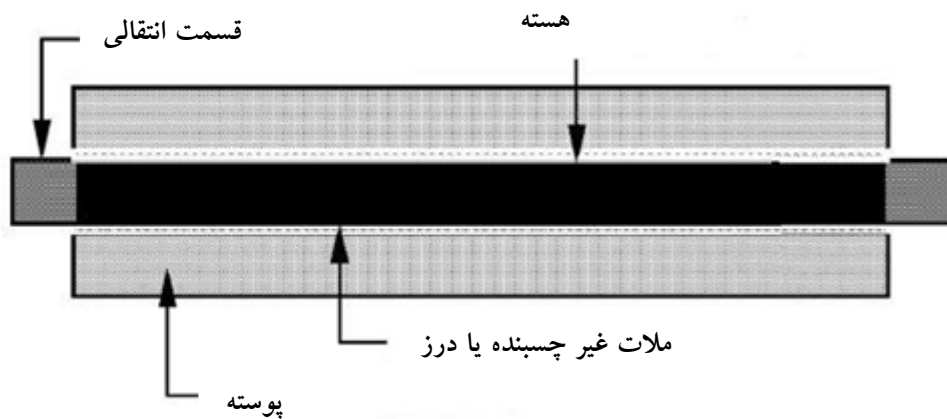
#### ۲-۱- اجزاء بادبند کمانش ناپذیر و انواع مقاطع آنها

بادبند کمانش ناپذیر از دو مولفه اصلی تشکیل شده است، یکی هسته فولادی که کل نیروی محوری بادبند را تحمل میکند و دیگری پوسته ای که از کمانش هسته در برابر نیروهای فشاری جلوگیری کرده و امکان تسلیم هسته را هم در فشار و هم در کشش فراهم می کند.

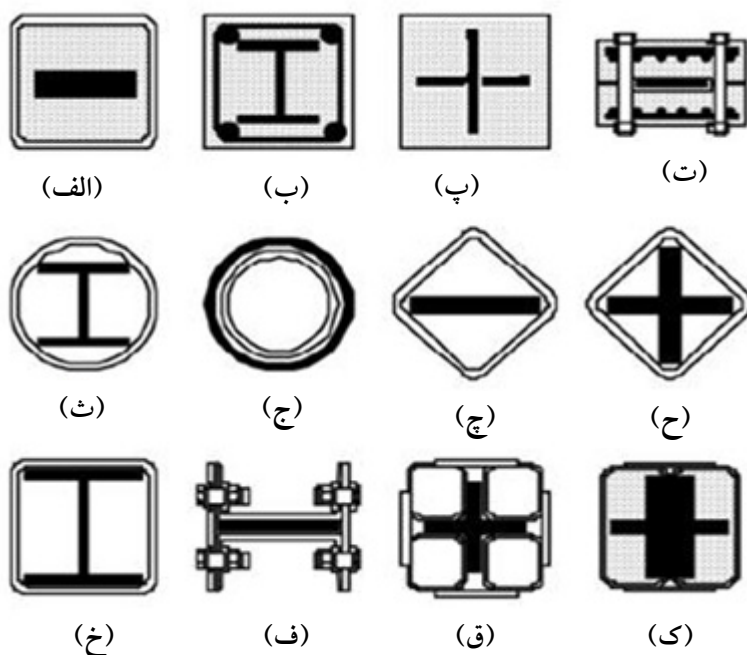
بادبند کمانش ناپذیر، مطابق شکل (۲)، معمولاً از چهار جزء زیر تشکیل یافته است:

۱- قسمت حمل کننده بار محوری که هسته نامیده می شود.

۲- قسمت انتقالی (انتھائی) سخت شده یا projection که هسته را به قسمت اتصالی یا گره متصل می کند.



شکل (۲): اجزای اصلی بادبند کماتش ناپذیر



شکل (۳): مقاطع عرضی انواع بادبندهای کماتش ناپذیر [۱]

## ۲-۲- کماتش کلی بادبندهای کماتش ناپذیر

بین آنها به عوامل متعددی بستگی دارد که مهمترین آنها سختی خمشی آنهاست. نیروی وارد بر بادبند سبب کماتش آن گردیده و در غلاف نیز خمش ناشی از کماتش به وجود می آید، گویا نیروی جانبی گسترده ای بر غلاف وارد می شود.

در آنالیز کماتش الاستیک بادبند متشکل از میله فولادی احاطه شده در داخل بتن مسلح، شکل (۴)، معادله تغییر شکل بادبند محصور شده با بتن به صورت رابطه (۱) نوشته می شود [۱].

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

که در آن  $v$  تغییر شکل غلاف بتنی و  $\delta$  تغییر شکل در وسط دهانه می باشد. اندرکنش بادبند و غلاف و مالات

با استفاده از معادله (۴)، معادله دیفرانسیل اولر به صورت رابطه (۵) نوشته می شود:

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

که در آن:

$$k^2 = N/E_s I_s, \quad \beta = \alpha/E_s I_s$$

با فرض اینکه هر دو انتها مفصلی است و با حل معادله فوق رابطه های (۶) بدست می آیند.

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

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

از حل معادلات فوق طول مد کمانشی تعیین می گردد:

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

با استفاده از معادلات (۷) و (6b) می تواند  $N_{cr}$  به دو قسمت زیر تفکیک گردد:

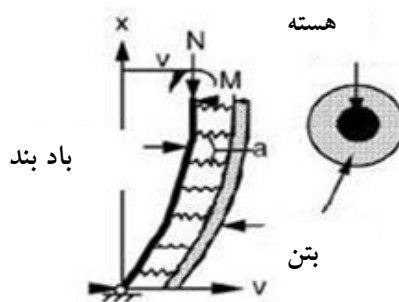
$$N_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 E_s I_s}{l^2} + \frac{E_s I_s}{\frac{l^4}{n^4 \pi^4} n^2 \pi^2} l^2$$

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

قسمت دوم معادله (۸) سهم غلاف بتنی را در کمانش نشان میدهد. با جا گذاری معادله (۳) به جای  $\alpha$  در معادله (۸) بار کلی کمانش به صورت رابطه (۹) بدست می آید:

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

که در آن  $E_c I_c$  سختی خمشی بتن و  $E_s I_s$  سختی خمشی هسته فولادی می باشد. فرمول اخیر نشان می دهد که ظرفیت کمانش الاستیک بادبند مرکب به صورت مجموع سهم دو قسمت مجزا می باشد.



شکل (۴): آنالیز بادبند کمانش ناپذیر و نیروهای سیستم [۱]

با فرض اینکه تغییر شکل در بادبند و بتن برابر می باشد، مقدار شدت بار جانبی فوق با چهار بار مشتق گیری از رابطه (۱) و جاگذاری در معادله لنگر و مشتق ثانی، به صورت زیر بدست می آید. که در این رابطه  $E_c I_c$  سختی خمشی بتن می باشد.

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

با تقسیم شدت بار فوق به معادله تغییر شکل در رابطه (۱)، ضریبی شبیه ثابت فنر به نام نسبت نیروی گسترده لازم در واحد تغییر شکل غلاف بتنی که ضریب مقاومت نیز نامیده می شود به شرح رابطه (۳) حاصل می شود:

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

وقتی تغییر شکل هسته فولادی توسط غلاف بتنی مهار می شود، معادله لنگر خمشی به صورت رابطه (۴) نوشته می شود:

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

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

### ۳- هدف از پژوهش و نوآوری حاضر

مهمترین هدف این پژوهش، مطالعه تجربی امکان استفاده از ورق های پلی اتیلنی در بادبندهای کمانش ناپذیر به عنوان پوسته یا عامل مانع کمانش آنها می باشد. در این پژوهش، ورق های مذکور به عنوان عامل مهار کمانش بادبندها برای اولین بار معرفی می گردند. این مصالح نه تنها وزن بادبندهای کمانش ناپذیر را کاهش می دهند بلکه سبب افزایش سرعت و سهولت اجرا می گردند. ضمناً اثر سختی خمشی بویژه ممان اینرسی در این نوع از بادبندها بررسی گردیده است.

بادبندهای کمانش ناپذیر به دلیل رفتار لرزه ای بهتر، امکان پذیر بودن اجرا و جا دادن آسان آن، برای ساختمانهای فولادی بلند مرتبه جدید و هم برای بهینه سازی رفتار لرزه ای ساختمانهای موجود چشم انداز مناسبی را نشان می دهند.

علیرغم اینکه تحمل و انتقال بار در بادبند کمانش ناپذیر، توسط هسته صورت می گیرد، طراحی پوسته BRB ها نیز 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.

تاکنون در اکثر طراحی های مربوط به پوسته های بادبند های کمانش ناپذیر از قطعات بتنی، ملات و گاهی نیز از فولاد استفاده شده است که رایج ترین آنها بتن و بتن آرمه می باشد. معمولاً بتنی که مانع کمانش هسته می باشد، خود در داخل قوطی فولادی که غلاف گفته میشود ریخته میشود. قوطی فوق هم به عنوان قالب و هم به عنوان عامل نگهدارنده پوسته محسوب گردیده و در اکثر محاسبات بادبندهای کمانش ناپذیر، بتن مذکور به همراه غلاف بیرونی به عنوان پوسته به حساب می آید.

سنگینی پوسته بتنی به همراه غلاف آن، آماده کردن قالب، مشکلات بتن ریزی، مدت زمان لازم برای نگهداری و

مراقبت از بتن در سنین اولیه، مشکلات حمل و نقل به علت سنگینی قطعات فوق و مشکلات عدیده اجرایی دیگر سبب پژوهش حاضر گردید. در این پژوهش به جای پوسته بتن آرمه به همراه غلاف مربوط به خود، از پوسته پلی اتیلنی استفاده میگردد و نیازی به غلاف فولادی نیست.

سبکی، اقتصادی بودن، امکان نصب سریع، کاهش مشکلات اجرا، عدم نیاز به قالب بندی لازم، صرفه جویی در زمان به علت عدم نیاز به دوران مراقبت از بتن، امکان تقویت آسان و اقتصادی و سریع سازه های فولادی ساخته شده قبل از تغییر آیین نامه زلزله، از مزایای این نوآوری محسوب می شود.

### ۴- مصالح مورد آزمایش

#### ۴-۱- فولاد

در این پژوهش از ورق های فولادی از نوع ST-37 هم به عنوان مصالح هسته و هم برای ورق های انتهائی استفاده می گردد.

#### ۴-۲- پلی اتیلن (PE)

پلی اتیلن ها از اتیلن پلیمریزه ساخته شده و به دو گروه عمده تقسیم می شوند. گروه اول در زیر فشار شدید به نام HDPE و گروه دیگر در زیر فشار متوسط به نام LDPE به عمل می آیند. پلی اتیلن یکی از رایجترین مواد ترموپلاستیک با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب و با قیمت ارزان میباشد [۱۳].

پلی اتیلن وزن مخصوص پایینی در حدود ۰.۹۱ تا ۰.۹۶ تن بر متر مکعب داشته، کریستالین بوده و مقاومت فشاری خوبی حتی در دماهای زیر صفر دارد. پلی اتیلن از نوع HDPE، ماده سفت و سختی بوده و ضریب اصطکاک و مقاومت سایشی پایینی دارد. رنگ آن سفید و یا بدون رنگ است. پلی اتیلن آب جذب نمی کند و در دماهای ۱۲۰

درجه سانتی گراد بالای صفر و ۱۰۰ درجه سانتی گراد زیر صفر قابلیت کاربرد دارد. جدول (۱) مشخصات فیزیکی پلی اتیلن (HDPE) را نشان می دهد.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی پلی اتیلن [۱۳و۱۴]

مقدار	واحد	خاصیت
32	MPa	مقاومت کششی
25	MPa	مقاومت خمشی
32	MPa	مقاومت فشاری با تغییر شکل ۱۰ درصد
120	°C	حد اکثر دمای قابل استفاده
-100	°C	حداقل دمای قابل استفاده
23	MPa	مقاومت برشی
1379	MPa	مدول الاستیسیته در خمش
941	Kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص
1.25×10 <sup>-4</sup>	1/°F	ضریب انبساط خطی
130	°C	دمای تغییر شکل

روی قطعات مختلفی از بادبند‌های با هسته فولادی و پوسته با جنس های پلی اتیلنی انجام گردید که در ادامه به نحوه و انجام آزمایش ها و نتایج بدست آمده اشاره می شود.

آزمایش ها با جکی به قدرت ۱۵۰ تن و با تمهیدات و دقت تمام انجام و برای مشخص کردن تغییر طول نمونه ها از تغییر طول سنج به دقت یک صدم میلی متر استفاده گردیده و بار وارد بر نمونه ها به صورت تدریجی اعمال می شد. ورق های پلی اتیلنی از نوع HDPE تهیه گردیده و هسته انتخاب شده در همه نمونه ها از ورق فولادی با حد تسلیم اسمی ۲۴۰ مگا پاسکال، به ضخامت یک، عرض ۱۰، طول ۹۸ سانتی متر و سطح مقطع هسته بادبند ۱۰ سانتی متر مربع بوده و لذا مقاومت کششی قطعه مزبور حدود ۲۴۰ کیلو نیوتن خواهد بود.

هسته فولادی از دو انتها به دو ورق انتهائی به ابعاد 12×12×1cm جوش شده و به منظور جلوگیری از کماتش موضعی در محل های اتصال از دو سخت کننده به ضخامت یک، به طول ۱۰ و عرض ۵ سانتی متر استفاده گردید. طول کلی قطعه مورد آزمایش به همراه ورق های انتهائی ۱۰۰ سانتی متر می باشد.

پوسته پلی اتیلن به عرض ۱۰۰ و به ضخامت ۴۵ میلی متر و به طول ۸۵ سانتی متر و مدول الاستیسیته آن برابر با ۱۳۷۹ مگا پاسکال اندازه گیری گردید.

ضریب لاغری هسته که در همه آزمایش ها یکسان است، حول محور کماتش برابر با ۳۳۹ بوده و بر مبنای ضریب کماتش K=1 محاسبه گردیده است.

هدف پژوهش حاضر، اثبات بکارگیری ورق های پلی اتیلنی در بادبند‌های کماتش ناپذیر میباشد و لذا، تمامی نمونه ها فقط تحت بار فشاری (تا حد تسلیم) آزمایش گردیدند. در واقع اگر مقاومت فشاری نمونه های محصور شده با ورق های پلی اتیلنی برابر با 240kN یعنی برابر با

پلی اتیلن با دستگاههای برش فولاد و چوب قابل ماشینکاری بوده و نیازی به خنک کاری در حین ماشینکاری ندارد. چسباندن پلی اتیلن بسیار مشکل و لوازم خاصی برای اینکار لازم است. این ماده با اکثر روش های جوشکاری قابل اتصال بوده و در مقایسه با دیگر مواد مشابه، پلی اتیلن نسبتاً ارزان میباشد.

#### ۵- آزمایش های انجام شده

به منظور پژوهش در عملکرد بادبند‌های کماتش ناپذیر با پوسته های پلی اتیلنی و مقایسه آن با بادبند های معمولی، آزمایش هایی در آزمایشگاه دانشکده فنی دانشگاه تبریز



واضح تری دیده می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها پس از تشریح روند آنها در جدول (۲) آمده است.



مقاومت تسلیم کششی هسته و یا بیشتر باشد عملکرد ورق‌های مذکور اثبات می‌گردد.

اولین آزمایش (نمونه A1) مربوط به هسته فولادی، یعنی قطعه بدون پوسته می‌باشد که در شکل (۵) به صورت

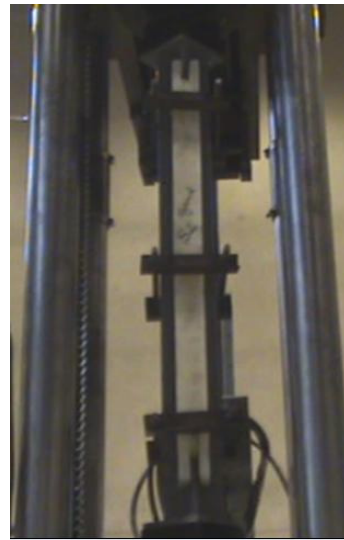


شکل (۵): نمونه A1، بادبند یا هسته تحت آزمایش فشار محوری (قبل و بعد از کماتش)

شده چندین هدف وجود داشت که یکی از آنها (و مهمترین آنها) اثبات امکان بکارگیری مواد پلی اتیلنی به عنوان پوسته بادبندهای کماتش ناپذیر بوده و دومین هدف اساسی، تعیین و یا تخمین ابعاد و اندازه پوسته می‌باشد. برای این منظور در بادبندهای مورد آزمایش نه تنها از ماده پلی اتیلن استفاده شد بلکه ممان اینرسی آن نیز در آزمایش‌های مختلف تغییر داده شد تا سختی پوسته‌ها (EI) نیز بررسی و مطالعه گردد.

پس از آزمایش اول که به بادبند بدون پوسته مربوط میشد، آزمایش‌های بعدی به نمونه‌های پوسته دار مربوط بوده و در شکل‌های (۶) و (۷) دیده می‌شوند.

در آزمایش‌های بعدی که به بادبند‌های پوسته دار مربوط می‌شود، ابعاد پوسته باید طوری باشد که در برابر کماتش هسته مقاومت نماید. اگر ابعاد پوسته، مخصوصاً سطح مقطع آن بیش از اندازه لازم باشد اقتصادی نخواهد بود. اگر چه از محاسبات و فرمول‌های قبلی می‌توان برای ابعاد پوسته مقطعی را حدس زد، ولی در عمل و آزمایش نتایج دقیقتری می‌توان استنباط نموده و از طرفی در محاسبات مذکور غلاف اطراف پوسته نیز مطرح است (در بادبند‌های کماتش ناپذیر رایج، از پوسته بتنی با غلاف فولادی استفاده میشود)، در حالیکه در این روش ابداعی نیازی به غلاف فولادی نیست. لذا در آزمایش‌های انجام



شکل (۶): بادبند با پوسته پلی اتیلنی با محور قوی ، قبل و بعد از کمانش (نمونه S2)



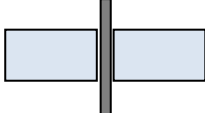


شکل (۷): بادبند با پوسته پلی اتیلنی با محور ضعیف، قبل و بعد از کمانش (نمونه S1)

ناپذیر نمی باشد لذا جهت ورق های مذکور تغییر و حول محور قوی آزمایش گردیدند که در این مرحله جواب مورد نظر یعنی بار فشاری برابر با 254KN حاصل شد که از مقاومت کششی هسته بیشتر میباشد و بدین ترتیب قطعه ساخته شده حالت بادبند کمانش ناپذیر به خود گرفت. در جدول (۲) نتایج آزمایش ها درج شده است.

در دومین سری از آزمایش ها از ورق پلی اتیلن در حول محور ضعیف استفاده گردید بطوریکه عرض پلی اتیلن با عرض هسته یکسان و برابر با ۱۰ سانتی متر بود ولی مقاومت فشاری تحمل شده توسط این BRB ساخته شده برابر با 149KN بدست آمد که از مقاومت کششی هسته یعنی 247KN کمتر است. و چنین استنتاج گردید که سختی پوسته انتخاب شده جوابگوی حالت بادبند کمانش

جدول (۲): نتایج آزمایش ها

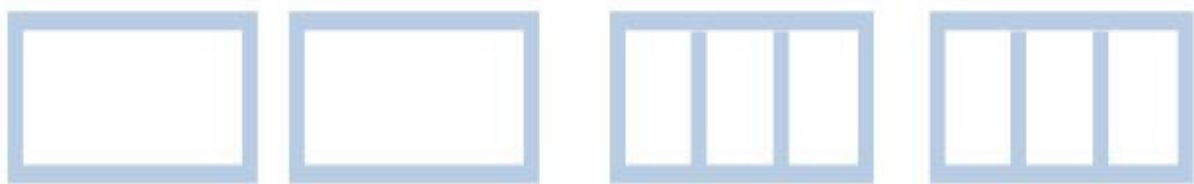
نوع نمونه	بادبند بدون پوسته	بادبند با پوسته پلی اتیلن با محور ضعیف	بادبند با پوسته پلی اتیلن با محور قوی
نام نمونه	A1	S1	S2
شکل ظاهری مقطع نمونه			
سطح مقطع هسته (mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000
ابعاد پوسته (mm×mm)	-----	100×45	100×45
سطح مقطع هر طرف پوسته (mm <sup>2</sup> )	-----	4500	4500
مدول الاستیسیته هسته (MPa)	200000	200000	200000
مدول الاستیسیته پوسته (MPa)	-----	1379	1379
سختی هسته حول محور ضعیف (EI) (kNm <sup>2</sup> )	1.667	1.667	1.667
سختی محاسباتی پوسته (EI) (kNm <sup>2</sup> )	-----	12.9	50.7
حداکثر بار کششی هسته در حد تسلیم (kN)	247	247	247
حداکثر بار فشاری وارد بر قطعه (kN)	91	149	254
حد اکثر تغییر طول نمونه در جهت قائم (mm)	8.62	1.45	1.26
نوع کمانش و یا تسلیم	کمانش هسته	کمانش کلی	تسلیم هسته
وجود حالت کمانش ناپذیر (ضد کمانش)	-----	-----	✓

اینکه ورق های مذکور در این حالت عامل صد در صد مانع کماتش نیستند ولی توان باربری فشاری بادبند را به مقدار قابل توجهی (حدود ۶۰ در صد) افزایش داده و سبب استهلاک انرژی می گردند.

اما برای جلوگیری از کماتش کلی قطعه BRB باید سختی خمشی پوسته یعنی حاصل ضرب ممان اینرسی و مدول الاستیسیته (EI) به اندازه ای باشد که نیروی فشاری قابل تحمل توسط بادبند، حداقل به اندازه نیروی کششی باشد. مدول الاستیسیته HDPE برابر با ۱۳۷۹ مگاپاسکال و مقدار آن در این آزمایش ها ثابت می باشد. پس برای افزایش سختی پوسته، بایستی ممان اینرسی آن افزایش یابد. به همین دلیل جهت ورق ها در نمونه های S2 عوض شده و حول محور قوی آزمایش گردیدند. در این حالت بدون تغییر سطح مقطع و وزن ورق ها، ممان اینرسی آنها افزایش یافت.

با بکاربردن ورق های مذکور با سختی کافی می توان کماتش بادبندها را محدود نموده و غلاف فولادی و ملات یا بتن داخل آن را حذف نمود. کفایت سختی ورق ها و ممان اینرسی لازم به ضریب لاغری و مدول الاستیسیته بستگی دارد.

برای افزایش ممان اینرسی و کاهش وزن و نهایتا اقتصادی نمودن پوسته های پلی اتیلنی، می توان از مقاطع دیگری مانند مقاطع شکل (۸) استفاده نمود.



شکل (۸): مقاطع پیشنهادی برای پوسته های پلی اتیلنی در بادبندهای کماتش ناپذیر

عملیات دیگر غلاف فولادی زمان و هزینه بسیار بالایی لازم دارد. و لذا در یک دید کلی، مواد HDPE در مقایسه با BRB های معمولی اقتصادی و سریع الاجرا می باشند [۱۶ و ۱۵].

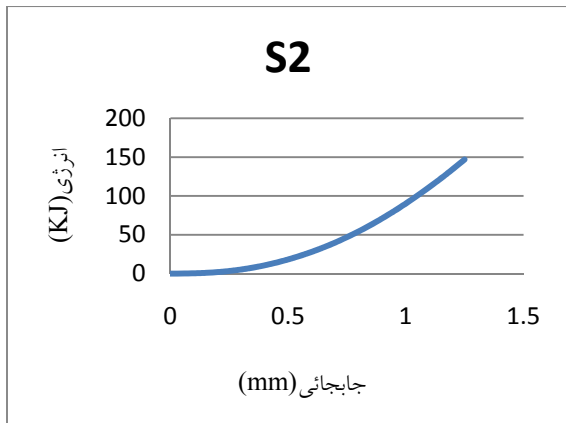
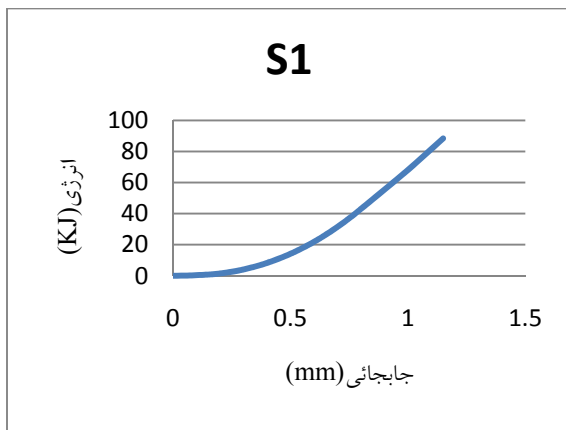
براساس فلسفه بادبندهای کماتش ناپذیر، ابعاد، اندازه ها و مشخصات پوسته بادبند کماتش ناپذیر باید طوری باشد که بادبند تا بار متناظر با مقاومت کششی تسلیم هسته، کماتش نکند. دو نوع کماتش برای قطعه مورد نظر متصور است یکی کماتش کلی بادبند (به همراه هسته و پوسته) و دیگری کماتش موضعی.

کوماتش موضعی معمولا در دو انتهای بادبند و در محل بین انتهای پوسته و ورق های انتهائی یعنی قسمت projection روی می دهد. در آزمایش های انجام شده، برای جلوگیری از کماتش موضعی، از ورق های سخت کننده استفاده شد که این امر در بادبند های معمولی نیز اجرا می گردد. در ضمن در هیچیک از نمونه های مورد آزمایش، هیچگونه کماتش موضعی مشاهده نگردید.

نمونه A1 که شامل فقط هسته فولادی بود به صورت کلی کماتش کرده و حداکثر بار وارد بر آن 91KN بود. نمونه S1 که شامل ورق های پلی اتیلنی بودند نیز به صورت کلی کماتش نمودند. در نمونه فوق ورق های الحاقی حول محور ضعیف نصب شده بودند. نمونه S1 حد اکثر بار 149 KN را که از مقاومت کششی بادبند کمتر بود تحمل نمودند لذا نمونه های فوق حالت بادبند کماتش ناپذیری ندارند. ولی بار تحمل شده توسط آن از مقاومت فشاری هسته بادبند یعنی 91KN بیشتر می باشد یعنی با

آماده نمودن و نصب ورق های HDPE زمان بر نبوده و تخصص یا مهارت نصب زیادی نمی طلبد در حالیکه آماده سازی، اختلاط، قالب بندی، بتن ریزی و نگهداری بتنی و همچنین آماده سازی و جوشکاری و





شکل (۱۰): دیاگرام های انرژی-جابجائی در نمونه های مورد آزمایش

مندرج در بند ۱۶ و پیوست های R و T آیین نامه (2005) AISC نیز رعایت گردد [۱۷, ۱۸].

به علت جدید بودن مقوله بادبندهای کمانش ناپذیر که از سال ۲۰۰۱ پیشنهادات ارزنده ای در آیین نامه مذکور ارائه و از سال ۲۰۰۵ مقرراتی برای اجرا و همچنین طراحی بادبندهای کمانش ناپذیر مطرح گردیده است روابط طراحی کاملی هنوز ارائه نشده و بعضا به انجام آزمایش موکول گردیده است [۱۸].

بادبندها هم در معرض بارهای کششی و هم بارهای فشاری بوده و حداکثر بار بادبند های کمانش ناپذیر، برابر با بار کششی قابل تحمل توسط هسته بادبند می باشد لذا در محاسبه این بادبندها، حداکثر بار طراحی همان بار کششی هسته بادبند بوده و برای این منظور به

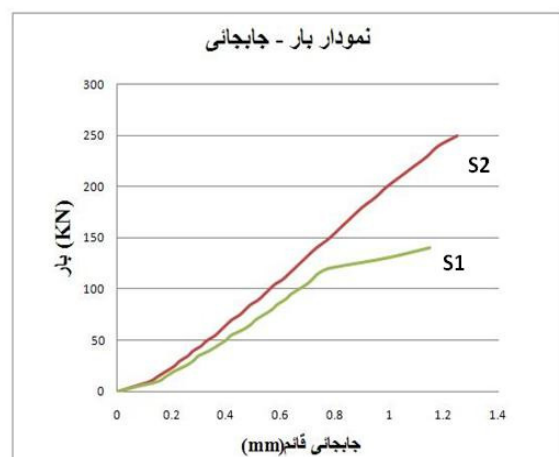
دیاگرام های نیرو- تغییر مکان و همچنین انرژی- تغییر مکان در هر ۲ نمونه در دیاگرام های (۱) و (۲) آمده است. دیاگرام های نیرو- تغییر طول، نشان میدهند که ظرفیت جذب انرژی در نمونه پلی اتیلنی با محور قوی به علت داشتن سختی بیشتر، نسبت به نمونه دیگر بیشتر است. سطح زیر دیاگرام ها موید این مطلب است.

برای محاسبه ظرفیت کمانش الاستیک BRB ساخته شده با مواد پلی اتیلنی می توان همانند ظرفیت کمانش الاستیک BRB مرکب از بتن و غلاف فولادی استفاده نمود. البته در این حالت سختی هسته فولادی و سختی پوسته پلی اتیلنی در تحمل و انتقال بار سهیم خواهند بود.

در حالت کلی می توان رابطه (۱۰) را برای محاسبه ظرفیت کمانش الاستیک مذکور پیشنهاد نمود.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_p I_p\} \quad (10)$$

در اینجا  $E_s I_s$  سختی خمشی بادبند و  $E_p I_p$  سختی خمشی ورق های پلی اتیلنی است. این رابطه شبیه رابطه (۹) می باشد که برای غلاف فولادی و پوسته بتنی قبلا اثبات شده بود. در اینجا نیز مثل بادبندهای کمانش ناپذیر معمولی بایستی الزامات



شکل (۹): دیاگرام های نیرو - تغییر مکان در نمونه های مورد آزمایش

جای  $N_{cr}$  در رابطه (۱۰) می توان بارکششی بادبند در حالت تسلیم را مطابق رابطه (۱۱) جایگزین نمود.

$$N_y = \frac{\pi^2}{l^2} \{E_s I_s + E_p I_p\} \quad (11)$$

بدیهی است در مرحله تسلیم بادبند، سختی قسمت فولادی بادبند برابر صفر فرض می گردد و در این صورت سختی لازم برای پوسته پلی اتیلنی قابل محاسبه می گردد.

$$E_p I_p = \frac{N_y l^2}{\pi^2} \quad (12)$$

در رابطه فوق تاثیر سخت شوندهگی کرنشی چرخه ای منظور نشده است. اگر فرض شود که سخت شوندهگی فوق، مقاومت فشاری بادبند را به اندازه ۳۰ درصد افزایش دهد و ضریب مقاومت برابر با ۰.۸۵ در نظر گرفته شود رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد [۱۸].

$$E_p I_p = \frac{N_y l^2}{\pi^2} \times \frac{1.30}{0.85} \quad (13)$$

و بالاخره رابطه طراحی به صورت رابطه (۱۴) در می آید.

$$E_p I_p = 1.5 \frac{N_y l^2}{\pi^2} \quad \text{با} \quad (14)$$

استفاده از رابطه اخیر، سختی خمشی لازم برای ورقهای پلی اتیلنی برابر خواهد بود با:

$$E_p I_p = 27 \text{ kN.m}^2$$

سختی خمشی برای نمونه  $S_1$  که ورقها حول محور ضعیف قرار داده شده است برابر با  $12.9 \text{ kN.m}^2$  می باشد که از مقدار سختی لازم کمتر بوده و به همین علت حالت کماتش ناپذیری ندارد. مقدار سختی خمشی برای نمونه  $S_2$  که ورقها حول محور قوی قرار داده شده

برابر با  $50.7 \text{ kN.m}^2$  و بزرگتر از سختی لازم می باشد و به همین علت حالت مانع کماتش به خود گرفته است.

تاثیر تکیه گاه های جانبی، مشخصات و فواصل آنها در پژوهش های بعدی می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۷- نتیجه گیری و پیشنهادات

- می توان از پوسته و یا ورق های پلی اتیلنی به عنوان پوسته بادبندهای کماتش ناپذیر استفاده کرد. برای این منظور باید سختی پوسته یعنی EI کافی باشد. کفایت سختی به لاغری عضو بادبند بستگی دارد.
- می توان از ورق های پلی اتیلنی به عنوان افزایشده مقاومت فشاری بادبندها استفاده کرد.
- دیاگرام های نیرو- تغییر طول، نشان می دهند که ظرفیت جذب انرژی در نمونه با محور قوی به علت داشتن سختی زیاد، نسبت به نمونه های بعدی بیشتر است.
- سختی پوسته های بادبندهای کماتش ناپذیر، بویژه ممان اینرسی آنها نقش تعیین کننده ای در تحمل بار فشاری وارده دارند. لذا می توان به جای استفاده از ورق های با مقطع مستطیلی از مقاطعی توخالی استفاده نمود تا علاوه بر کاهش وزن، ممان اینرسی آنها افزایش یابد.
- بادبندهای کماتش ناپذیر با پوسته پلی اتیلنی با سختی کافی، نسبت به بادبندهای کماتش ناپذیر با پوسته بتنی و غلاف فولادی، سبک، اقتصادی تر، سهل الاجرا بوده و در مدت زمان کمتری قابل نصب می باشند.
- این روش برای تقویت بادبندهای موجود روش بهینه ای بوده و مشکلاتی مانند بتن ریزی، قالب بندی، مراقبت و نگهداری در زمان سخت شدن بتن را ندارند.

10. Ravi Kumar G, Satish Kumar S.R, Kalyanaraman V. Behaviour of frames with Non-Buckling bracings under earthquake loading. *Journal of Constructional Steel Research* 63 (2007) 254-262
11. Sabelli R, Mahin S, Chang C. Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces. *Engineering Structures* 25 (2003) 655-666
12. Young K. Ju, Myeong-Han Kim, Jinkoo Kim, Sang-Dae Kim. Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length. *Engineering structures* 31 (2009) 507-516
13. Vasile C and Pascu M. *Practical Guide to Polyethylene*. 2005
14. James L. White, David D. Choi. *Polyolefines – Processing, Structure Development, and properties*. First edition, 2004
15. اختراع تحت عنوان "بادبندهای بدون کمانش با پوسته های پلی اتیلنی و پلی آمیدی" به شماره ثبت 58943 مورخه ۱۳۸۸/۲/۱۵ توسط محمد باقر مهدیزاده و یوسف زندی.
16. Mahdizadeh, Mohammad Bagher, Investigation of Buckling Restrained Braces with Precast Elements, Ph.D. thesis, Karadeniz Technical university, Turkey, 2010.
17. American Institute of Steel Construction (AISC) / Structural Engineers Association of California (SEAOC). (2001). Recommended Provisions for Buckling Restrained Braced Frames" October 2001. Revised July, 2003.
18. American Institute of Steel Construction (AISC). (2005). "ANSI/AISC 341-05, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Including Supplement No. 1 dated November 16, 2005".
19. Bozorgnia, Bertero, *Earthquake Engineering Handbook*, Chapter 16, Steel Buckling Restrained Braced Frames, 2005.
1. Qiang Xie. State of the art of buckling-restrained braces in Asia. *Journal of Constructional Steel Research* 61 (2005) 727-748
۲. محمد قاسم وتر، علیرضا رضائیان "رفتار لرزه ای، تحلیل و طراحی قابهای با مهاربندی هم مرکز شکل پذیر بر اساس نتایج آزمایشگاهی" نشریه علمی-پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم-بهار ۱۳۸۷
3. Frederick F, Tajirian, Ian D. Aiken, Isao Kimura. 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, October 6-10, 2003
4. Oguz, C; Celik, Michel Bruneau. Seismic behavior of bidirectional-resistant ductile end diaphragms with buckling restrained braces in straight steel bridges. *Engineering Structures* 31 (2009) 380-393
5. Asgarian B, Shokrgozar HR. BRBF response modification factor. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 290-298
6. Di Sarno L, Elnashai AS. Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 452-465
7. Aydina E, M.H. Boduroglu. Optimal placement of steel diagonal braces for upgrading the seismic capacity of existing structures and its comparison with optimal dampers. *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008) 72-86
8. Shawn Kiggins, Chia-Ming Uang. Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system. *Engineering Structures* 28 (2006) 1525-1532
9. Hyunhoon Choi, Jinkoo Kim. Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum. *Engineering Structures* 28 (2006) 304-311