

Investigation on the Behavior of Concrete with Optimum Percentage of Steel Fiber, Microsilica, Fly Ash and Hybrid Fiber under Different Loading Pattern

J. Esfandiari* and O. Heidari

Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT

While the fibers in concrete cause soft rupture, the compressive and tensile samples are not ruptured after failure. This is one of the benefits of metallic fibers, especially the sinusoidal and hooked fibers: using these gives residents the opportunity to escape during an earthquake. In addition to positively impacting mechanical properties, metal fibers improve the matrix of concrete, provide ductility and response to impact load, and control crack width and propagation. Fly ash and micro-silica improve the durability and performance of concrete and are effective in protecting the environment: they can, thus, be used to replace cement. In this study, the samples' compressive and tensile strength was prepared: they were of non-fibrous concrete and concrete containing steel fibers with 6 different percentages (0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.5). They were also composed of metallic fiber and polypropylene in three different compositions (0.3PP + 0.8SF, 0.4PP + 0.4SF, and 0.15PP + 1.5SF). These were investigated: seismic parameters were extracted after achieving the optimal percentage (the percentage with the highest compressive and tensile strength given economic considerations) under the loading protocol SAC/BD 97.02. This allowed investigation of the curves of hysteresis, energy absorption, lateral displacement, and effects of the use of these fibers. The major properties of pozzolanic materials were considered in the last step of this research: fly ash and microsilica were added to concrete containing metal fibers with the optimum percentage of metallic fibers. These were compared with concrete containing metallic fibers and non-fiber concrete. Thereafter, the appropriate percentage of cement replacement was determined so as to better understand the effect of the use of fly ash and microsilica in preventing the buckling of buckling restrained braces.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 April 2019
Revise Date: 16 February 2020
Accept Date: 23 February 2020

Keywords:

Buckling restrained braces;
Metal fibers;
Polypropylene fibers;
Ductility;
Energy absorption

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.182908.1840

*Corresponding author: J. Esfandiari
Email address: j.esfandiari@iauksh.ac.ir

بررسی رفتار نمونه های بتنی ساخته شده با افزودنی های الیاف فلزی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف هیبریدی تحت الگوهای مختلف بارگذاری

جواد اسفندیاری^{۱*}، امید حیدری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

الیاف در بتن گسیختگی نرم را در پی دارد و نمونه های فشاری و کششی پس از شکست، از هم گسیخته نمی شوند، این موضوع از جمله محاسن الیاف فلزی خصوصاً الیاف موجدار سینوسی و قلابدار در هنگام وقوع زلزله می باشد، که فرصت لازم را برای فرار به ساکنین می دهد. الیاف فلزی علاوه بر تأثیر مثبت در ویژگی های مکانیکی، سبب بهبود ماتریس بتن، تأمین شکل پذیری و پاسخگویی به بار ضربه و نیز کنترل عرض و انتشار ترک می گردد. در این تحقیق با توجه به اینکه استفاده از خاکستر بادی و میکروسیلیس علاوه بر بهبود کارایی و دوام بتن در حفظ سلامت محیط زیست نیز مؤثر می باشد جهت جایگزینی به جای سیمان استفاده گردید. در ادامه با تهیه نمونه هائی، مقاومت فشاری و کششی بتن بدون الیاف، و بتن حاوی الیاف فولادی در شش درصد مختلف (0/4، 0/6، 0/8، 1، 1/2 و 1/5) و ترکیب الیاف فلزی و پلی پروپیلن در ۳ ترکیب مختلف (0/3PP+0/8SF و 0/4PP+0/4SF و 0/15PP+1/5SF) بررسی شده و پس از دستیابی به درصد بهینه (درصدی که بیشترین مقاومت فشاری و کششی را با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی ارائه دهد)، تحت پروتکل بارگذاری SAC/BD - 97/02 ضمن استخراج پارامترهای لرزه ای و بررسی منحنی های هیستریزس، جذب انرژی، تغییر مکان جانبی به تأثیرات استفاده از الیاف مذکور پرداخته شد. در مرحله آخر تحقیق با توجه به خواص عمده مواد پوزولانی، با افزودن خاکستریادی و میکروسیلیس به بتن حاوی الیاف فلزی در درصد بهینه الیاف فلزی بدست آمده، ضمن بررسی و مقایسه آن با بتن حاوی الیاف فلزی و بتن فاقد الیاف و تعیین درصد مناسب جایگزینی سیمان به تأثیر استفاده از خاکستریادی و میکروسیلیس در جلوگیری از کماتش بادبندهای کماتش ناپذیر پرداخته شد.

کلمات کلیدی: بادبندهای کماتش ناپذیر، الیاف فلزی، الیاف پلی پروپیلن، شکل پذیری، منحنی هیستریزس، جذب انرژی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2020.182908.1840	10.22065/JSCE.2020.182908.1840	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۲/۰۴	۱۳۹۸/۱۲/۰۴	۱۳۹۸/۱۱/۲۷	۱۳۹۸/۰۲/۰۴
جواد اسفندیاری				*نویسنده مسئول:		
j.esfandiari@iauksh.ac.ir				پست الکترونیکی:		

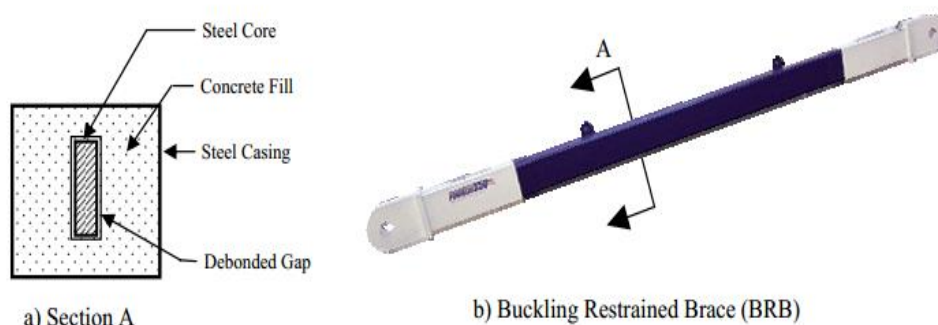
۱- مقدمه

مهاربندهای معمولی دارای سختی بالایی بوده اما تحت فشار کمانش کرده، شکل پذیری بسیار کمی دارند و به علت طراحی بر اساس عضو فشاری لاغر و کمانش عضوهای مهاربندی، مساحت مقطع افزایش می‌یابد. به جهت برطرف کردن این معایب در سالهای اخیر، سیستم مهاربندی جدیدی با عنوان مهاربند کمانش ناپذیر (BRB) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. قاب‌های مهاربندی با مهار بند کمانش ناپذیر (BRBF) یک رده خاص از قاب‌های مهار بندی شده هم مرکز (CBF) هستند، این مهار بند ها، شکل پذیری و جذب انرژی بیشتری در مقایسه با مهار بند های معمولی دارند زیرا با ایجاد رفتار یکسان عضو مهار بندی و تسلیم در فشار و کشش، از کمانش کلی مهار بند و کاهش مقاومت مربوط به آن در نیروها و تغییر شکل‌های مربوط به جابه جایی نسبی طرح، در طبقه‌ها جلوگیری می‌کند. در قاب‌های مهار بندی با مهار بند کمانش ناپذیر (BRBF) جذب انرژی، در طی چرخه‌های تسلیم پایدار کششی-فشاری صورت می‌پذیرد [۱].

قسمت اصلی مهاربند کمانش ناپذیر، هسته فلزی (معمولاً فولادی) است که با سازوکاری خارجی از کمانش آن در فشار جلوگیری می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای جلوگیری از کمانش هسته در فشار پیشنهاد شده است. متداولترین روش برای جلوگیری از کمانش هسته در فشار، قرار دادن هسته در غلاف فولادی و پر کردن غلاف با ملاتی پرکننده (مانند بتن) است [۲]. مهاربندهای کمانش ناپذیر طوری ساخته می‌شوند که هسته بتواند در راستای طولی مستقل از ساز و کار جلوگیری از کمانش، عمل کند. به بیان دیگر، تمام نیروی محوری که به مهاربند وارد می‌شود توسط هسته تحمل می‌شود. با جلوگیری از کمانش هسته، این المان می‌تواند در فشار همانند کشش جاری شده و بدین ترتیب توانایی جذب انرژی آن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۳].

فکر مهاربندهای کمانش ناپذیر نخستین بار در سال ۱۹۷۳، توسط Wakabayashi و همکاران، در ژاپن مطرح شد [۴]. این مهاربندها پس از زلزله کوبه ۱ (۱۹۹۵) به طور گسترده‌ای در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. در ژاپن مهاربندهای کمانش ناپذیر بیشتر به عنوان میراگرهای هیسترتیک در قابهای خمشی فولادی به کار می‌روند و برای طراحی آنها از فلسفه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر خسارت که توسط Wada مطرح شده استفاده می‌شود. در این فلسفه، طراحی به گونه‌ای انجام می‌شود که در هنگام زمین لرزه، سازه اصلی الاستیک باقی مانده و فقط میراگرها (مهاربندهای کمانش ناپذیر)، انرژی زمین لرزه را مستهلک می‌کنند بنابراین پس از زمین لرزه بزرگ انتظار داریم که سازه با تعویض مهاربندها به حالت اولیه خود بازگردد [۵].

در آمریکا، نخستین بار در سال ۲۰۰۰ از مهاربندهای کمانش ناپذیر استفاده شد. پس از آنکه مهندسان در آمریکا به ارزش مهاربندهای کمانش ناپذیر پی بردند، گروهی از محققان انجمن مهندسان سازه کالیفرنیا با همکاری موسسه فولاد آمریکا در سال ۱۹۹۹ ضوابط پیشنهادی برای قاب‌های مهار بندی شده کمانش ناپذیر را منتشر کردند. این مهاربندها از چهار قسمت قابل تفکیک از لحاظ رفتار و عملکرد تشکیل شده‌اند که در شکل (۱) نشان داده شده است [۶].



شکل ۱: قسمت‌های تفکیک شده‌ی مهاربند کمانش ناپذیر [۶].

^۱ Kobe

تاکنون آزمایشهای متعددی بر روی انواع مختلف مهاربندهای کمانش ناپذیر انجام شده است. نتایج این آزمایشات نشان می دهد که سختی غیرالاستیک مهاربندهای کمانش ناپذیر نسبتاً کم بوده و در هر چرخه، نسبت به چرخه پیش، کاهش می یابد. نکته قابل توجه در مورد مهاربندهای کمانش ناپذیر آن است که مقاومت این مهاربندها در فشار، بیش از مقاومت آنها در کشش است. دلیل این پدیده انتقال نیروی محوری در فشار از هسته به ساز و کار جلوگیری از کمانش است [۷].

به منظور بررسی تأثیر استفاده از الیاف در بتن غلاف هسته مهاربندهای کمانش ناپذیر ابتدا به مقدمه ای در خصوص سابقه تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می پردازیم.

بتن ساده (معمولی) یک ماده شکننده با استحکام کششی پائین است، مقاومت ضعیف در بازشدن ترک و انتشار آن از جمله نقاط ضعف بتن معمولی است. در بتن با مقاومت بالا با افزایش استحکام آن، شکنندگی بتن افزایش می یابد، استفاده از الیاف کوتاه که پخش آنها تصادفی اما در سطح گسترده است به منظور بهبود خواص کششی مقطع کامپوزیت بتن خصوصاً پس از ترک خوردگی مقطع است می باشد، در مجموع کاربرد الیاف در افزایش شکل پذیری و کنترل عرض و انتشار ترک، افزایش قدرت خمشی و سختی و کاهش انحنای (خیز) تیرهای بتنی می باشد. یکی از الیاف پرکاربرد، الیاف فولادی است که هدف از استفاده آن در بتن، توانایی انتقال تنش در سراسر مقطع ترک خورده می باشد. ضمناً افزایش مقاومت فشاری می تواند موجب افزایش توانایی کنترل گسترش ترک، کاهش میزان تمرکز تنش در نوک ترک، تغییر جهت و یا زاویه ترک و نیز به تأخیر انداختن نرخ رشد ترک گردد [۸-۱۰].

افزایش مقاومت زیرساخت های عمرانی در برابر اثرات زلزله و انفجار یک موضوع قابل اهمیت می باشد و با توجه به افزایش حملات تروریستی یا بلایای طبیعی از جمله زلزله و طوفان، انجام تحقیقات در خصوص افزایش مقاومت بتن به دلیل کاربرد گسترده آن از ضروریات طراحی می باشد. در صورت وقوع چنین وقایعی در زیرساخت های عمرانی و مهندسی نه تنها اموال عمومی، بلکه جان انسان ها نیز در خطر است که در این جا استفاده از مصالح جدید که دارای جذب انرژی بالا، روش موثری برای جلوگیری از فروپاشی و یا تخریب زیرساخت ها و نجات جان ساکنین خواهد بود. یکی از این روش ها که منجر به افزایش شکل پذیری نیز می گردد، استفاده از الیاف در بتن می باشد. ضمناً با این ترتیب در اندازه گیری انرژی شکست، ظرفیت جذب انرژی قابل توجهی حاصل می شود. [۱۱، ۱۲].

استفاده از الیاف و میکروسیلیس بطور همزمان، دارای اثر مثبت در بار شبه استاتیک به دو دلیل یعنی افزایش اتصال بین الیاف فلزی و ماتریس سیمان (نقش مستقیم)، پراکندگی بهتر الیاف در مرحله دوم (نقش غیر مستقیم) می باشد، چون بتن مقاومت بالا شکننده تر از بتن معمولی است و از این منظر استفاده از بتن با مقاومت بالا محدودیت دارد بنابراین استفاده از میکروسیلیس که سبب کاهش شکنندگی بتن می گردد توصیه می شود، و در مجموع میکروسیلیس به دلیل فعالیت تند پوزولانی از جمله مواد معدنی مورد نیاز برای تولید بتن مقاومت بالا بکار می رود. و علاوه بر بارهای شبه استاتیک، در بار دینامیکی نیز به جهت عملکرد بهتر ارجح است از الیاف و میکروسیلیس بطور همزمان استفاده گردد [۱۳].

مقدار الیاف در بتن به دلیل نا مشخص بودن چگالی الیاف (چگالی حجمی)، معمولاً وزن الیاف را به نسبت یک مترمکعب بتن می سنجند و این تعریف دقیق تر و کاربردی تر است. به طور کلی محتوای حجم الیاف جهت بهبود مقاومت های فشاری و کششی می تواند تا ۲٪ حجمی به مخلوط بتن معمولی اضافه گردد، برای درصد الیاف بالاتر از مقدار فوق، احتمال پدیده (Balling) و یا گلوله شدن الیاف و کاهش کارایی وجود دارد ضمناً الیاف بیشتر از درصد بهینه سبب کاهش کارایی بتن تازه می گردد. ضمن اینکه مواد افزودنی معدنی بسیار ریز مانند میکروسیلیس هر چند در بهبود دوام بتن موثرند، اما می تواند اثر منفی بر تقاضای آب و کارایی داشته باشد مگر اینکه با افزودن مواد افزودنی کاهنده آب مانند فوق روان کننده کارایی را بالا ببریم [۱۴].

استفاده از الیاف فولادی می تواند نقش تقویت کننده مکمل آرماتورهای فولادی را در روش سنتی ایفا نماید، که این کامپوزیت می تواند در سازه های صفحه نازک (پوسته ها) کاربرد داشته باشد. ضمناً آزمایش افت جریان (اسلامپ) برای ارزیابی کارایی بتن با الیاف فلزی روش ضعیفی بوده و پیشنهاد می گردد برای ارزیابی کارایی بتن حاوی الیاف فلزی، از روش اسلامپ معکوس و آزمون قیف ۷ شکل و یا می توان از روش زمان VB وی بی استفاده نمود، ضمناً روش آزمون زمان VB روش تجربی است و نمی تواند خواص بتن تازه را در شرایط

تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک تأمین نماید و ACI توصیه می‌کند از روش اسلامپ معکوس جهت تشخیص کارائی بتن تازه FRC استفاده گردد. نکته حائز اهمیت اینکه در شکست نمونه‌ها، چنانچه نمونه از ناحیه سنگدانه شکسته شود نشان دهنده حالت ایده آل و چنانچه از ناحیه خمیر سیمان شکسته شود حالت غیر قابل قبول شناخته می‌شود [۱۵،۱۴].

الیاف فولادی و ماتریس بتن با هم از طریق یک رابط ضعیف پیوند می‌خورند که درک رفتار واقعی با مدل مکانیکی بتن با الیاف فلزی (SFRC) بسیار اهمیت دارد، زیرا خواص این کامپوزیت تا حد زیادی متأثر از باند سطحی (منطقه رابط) الیاف و ماتریس بتن است. هنگامی که این کامپوزیت با الیاف کم مسلح می‌گردد یعنی (تحت مسلح) است می‌گوئیم بطور انحصاری الیاف پس از وقوع ترک خوردگی وارد عمل می‌شوند. پدیده خزش نیز باعث کاهش مقاومت الیاف به دلیل ماتریس پائین‌تر می‌گردد گرچه این کاهش مقاومت به نوع الیاف، آجدار بودن و طول الیاف بستگی دارد که در میان الیاف با مقاومت بالا الیاف فولادی موجدار بالاترین مقاومت را در باند سطحی نشان می‌دهند [۱۶-۱۸].

در تحقیقات سال‌های اخیر الیاف فلزی در مقایسه با سایر الیاف، بیشترین کاربرد در بتن مقاومت بالا داشته است. هدف از اضافه کردن الیاف بتن، افزایش چقرمگی (Toughness) و ظرفیت جذب انرژی، مقاومت در برابر اثرات ضربه، مقاومت برشی، مقاومت خمشی و دیگر خواص مکانیکی آن است، خواص کامپوزیت تقویت شده با الیاف فولادی کوتاه تا حد زیادی به محتوای الیاف (مقدار الیاف)، نسبت ظاهری الیاف (نسبت طول به قطر)، جهت گیری الیاف، خواص ماتریس بتن بستگی دارد. در واقع با استفاده از الیاف کوتاه و میکروسیلیس در بتن و بتن مسلح، یک پیوند سطحی قوی بین الیاف و ماتریس در جهت افزایش مقاومت کششی و انعطاف پذیری ایجاد می‌شود. جهت گیری الیاف عمدتاً بطور تصادفی و عمود بر جهت جریان (ویبره) می‌باشد [۱۹، ۲۰].

اخیراً الیاف مصنوعی پلاستیکی در سطح گسترده در شاتکریت با روش تر بکار می‌رود بدین ترتیب که الیاف به پیش مخلوط بتن اضافه شده و سپس بتن تازه با نازل، توسط هوای فشرده با سرعت معینی به سطح موردنظر پاشیده می‌شود. نکته حائز اهمیت این که هرچه ذرات درشت دانه تر و نسبت شن و ماسه به سیمان بیشتر باشد ریزش بیشتر خواهد بود. در اینجا استفاده از مواد معدنی مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس، به دلیل ریزدانه بودن ریزش مصالح را کمتر می‌کند ضمن این که استفاده از دانه بندی ریزتر یعنی (حداکثر سنگدانه ۲۰ میلی متر توصیه می‌شود) [۲۱].

مقاومت فشاری و استحکام کششی دو پارامتر مهم در طراحی سازه هستند، گرچه بتن به طور معمول بر پایه نیروی کششی طراحی نمی‌شود اما شناخت و درک صحیحی از استحکام کششی بتن به عنوان یکی از پارامترهای مهم جهت تخمین (برآورد) سطح بار تحت ترک خوردگی ضروری است. از منظر طراحی در بتن معمولی و غیر مسلح (مانند سدها، دال‌ها، باند فرودگاه تحت تنش خمشی) توانائی بتن به مقاومت در برابر نیروهای کششی، دارای اهمیت بیشتری در مقایسه با ظرفیت بتن در مقابله با نیروهای فشاری دارد [۲۲].

مقاومت فشاری و استحکام کششی و خمشی در بتن با کارائی فوق‌العاده بالا با دوز بیشتر الیاف، افزایش می‌یابد در حالیکه طول الیاف اثر ناچیزی بر مقاومت فشاری دارد اما در هر صورت وجود الیاف از شکست ترد و ناگهانی جلوگیری می‌کند و علاوه بر این طول الیاف بلند در خمش و طول الیاف کوتاه تر در فشار تأثیر مثبت دارد. بتن الیافی مقاومت بالا با توجه به تخلخل کمتر و تراکم بیشتر مخلوط (میکروساختار) در دوز بالاتر دارای دوام بهتری است، بدون آنکه از خواص بتن تحت شرایط محیطی شدید یون‌های کلر کاسته شود اما طول الیاف تأثیری در دوام بتن ندارد. جهت جبران کاهش مقاومت ناشی از استفاده مواد پوزولانی کند واکنش و تردی و شکنندگی بتن مقاومت بالا، استفاده از الیاف فولادی در بتن ضروری به نظر می‌رسد. ضمن اینکه میکروسیلیس در محافظت بتن در برابر خوردگی بسیار موثر است. افزودن میکروسیلیس به دلیل ذرات ریز و کروی شکل آن باعث کاهش تخلخل و افزایش تراکم و ماتریس بتن و نتیجتاً پیوند بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان شده که نهایتاً منجر به بهبود خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و دوام خواهد شد. هم‌چنین میکروسیلیس، سبب بهبود وضعیت پراکندگی الیاف در داخل بتن می‌گردد [۲۳].

بمنظور کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای، تلاش می‌شود که مواد معدنی دوستدار محیط زیست تولید گردد تا ضمن مصرف انرژی کمتر، تصاعد دی‌اکسید کربن به حداقل ممکن برسد، یکی از این مواد معدنی خاکستر بادی است. سالانه یک میلیارد تن خاکستر بادی در

نیروگاه های حرارتی سطح دنیا تولید می گردد به عنوان مثال خاکستر بادی که از جمله این مواد معدنی است در افزایش دوام بتن، خصوصاً در محیط های تهاجمی و حملات سولفات ها و کلرید ها و کنترل واکنش های قلیایی سنگدانه ها ب مدت طولانی و مقاومت در مقابل آتش سوزی و نیز کاهش تغییر شکل دراز مدت (خزش) و در نتیجه جلوگیری از کاهش نیروی پیش تنیدگی بتن، مؤثر است. بهترین راه حل برای استفاده همزمان این در محصول (سیمان + خاکستر بادی) فعال نمودن خاکستر بادی با فعال قلیائی است، که میتوان از پودر سیلیکات سدیم، میکروسیلیس و ملات سرباره جهت فعال نمودن استفاده کرد، که در این تحقیق از میکروسیلیس استفاده گردید [۲۵،۲۴].

در این تحقیق، به تأثیر استفاده از بتن الیافی در درصد بهینه، بر روی جذب انرژی، شکل پذیری و کماتش جانبی غلاف هسته بادبندهای کماتش ناپذیر مورد بررسی پرداخته شده است.

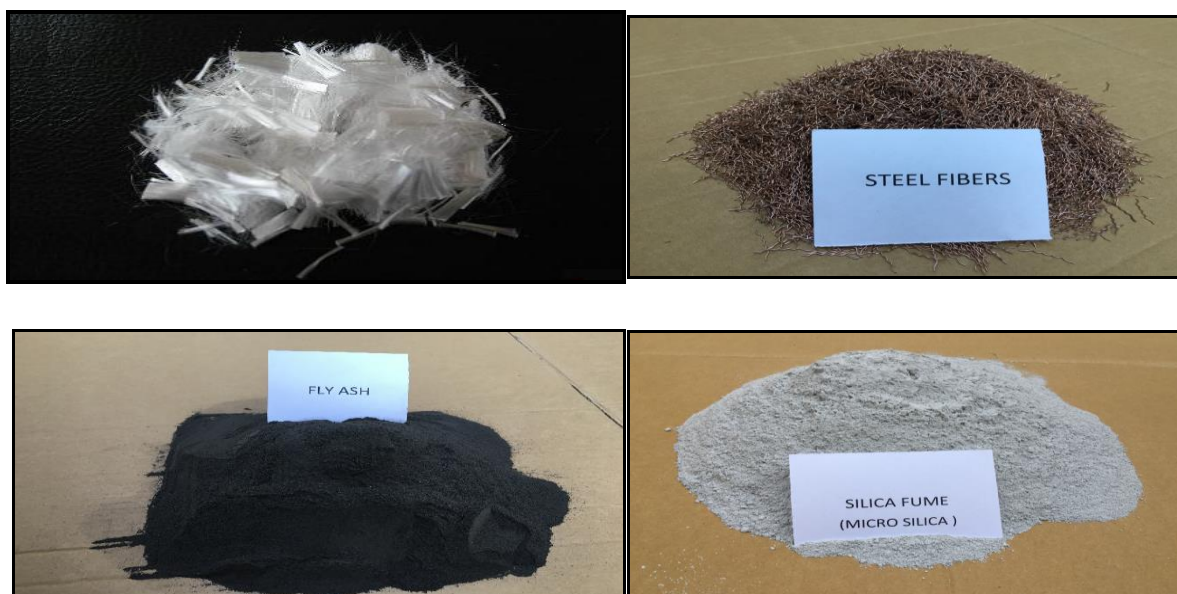
۲- مشخصات مصالح و روشهای مورد استفاده در تحقیق

۲-۱- مشخصات و ویژگیهای مصالح سنگی مورد استفاده جهت ساخت قسمت بتنی نمونه ها

در این تحقیق از مصالح سنگی درشت دانه معدن سنگ شکن شرکت راکن واقع در کرمانشاه - اسلام آباد - حمیل - روستای انجیرک تالاندشت با دانه بندی ۰-۲۵ میلیمتری و مصالح ریزدانه (ماسه) از مصالح رودخانه ای سیمره استفاده شده است. جهت ساخت نمونه های بتنی از سیمان تیپ ۲ شرکت سامان غرب، الیاف فلزی داخلی موجدار سینوسی و الیاف پلی پروپیلن شرکت میسون، خاکستر بادی (Fly Ash) و میکروسیلیس شرکت کلینیک بتن ایران، آب شرب شهرک صنعتی بیستون و فوق روان کننده شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است.

۲-۲- مشخصات و مزایای کلی الیاف مورد استفاده جهت ساخت قسمت بتنی نمونه ها

در این تحقیق با توجه به مزایای مشروحه زیر تصمیم گرفته شد تا تأثیر استفاده از الیاف مختلف (که در ادامه به تفصیل راجع به آنها بحث خواهد گردید) در جلوگیری از کماتش بادبندهای کماتش ناپذیر بررسی گردد و باتوجه به این موضوع مطابق شکل (۲) از الیاف پلی پروپیلن الیاف فلزی، میکروسیلیس و خاکستر بادی در بتن ها مطابق مشخصات مندرج در جداول (۱)، (۲)، (۳) و (۴) استفاده گردید.



شکل ۲: الیاف پلی پروپیلن، الیاف فلزی، میکروسیلیس و خاکستر بادی.

۲-۲-۱- الیاف پلی پروپیلن^۲ (Poly propylene fiber)

جدول ۱: مشخصات الیاف پلی پروپیلن.

پایه رزین	Poly olefin	مدول الاستیسیته ^۲ N/mm ²	۳۵۰۰-۳۹۰۰
نوع	Staple	بافت سطحی	صاف و بدون آج
طول (mm)	۱۲	درصد افزایش طول	۸۰
قطر اسمی (μm)	۲۳	درصد جذب رطوبت	۰
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۰/۹۱	دمای ذوب (°C)	۱۶۵
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰	درجه اشتعال	۳۶۰
هدایت الکتریکی	بسیار پایین	مقاومت در برابر حملات قلیائی و نمک	بالا
غوطه وری در آب (sec)	۳-۵	رنگ ظاهری	سفید

۲-۲-۲- الیاف فولادی^۳ (SF)

جدول ۲: مشخصات الیاف فلزی سینوسی (موجی).

نام محصول	SFRC-ECR312	وزن مخصوص (gr/cm ³)	۷/۸
استاندارد محصول	ASTM A820	مقاومت خمشی GPa	۲۰۳
مقاومت کششی MPa	> ۱۱۰۰	درجه ذوب (°C)	۱۵۱۶
طول الیاف (mm)	۲۵	مقاومت در برابر خوردگی	بالا
قطر الیاف (mm)	۰/۷۵	مقاومت در برابر قلیایی	بالا
نسبت ابعاد	۳۳/۳	جذب آب	ندارد
رنگ	مسی رنگ	استحکام نهایی (MPa)	۱۱۴۰
شکل ظاهری	موجی (سینوسی)	ازدیاد طول (%)	< 3

۲-۲-۳- میکرو سیلیس^۴ (MS)

جدول ۳: مشخصات میکرو سیلیس.

نام محصول	Micro silica	وزن مخصوص (gr/cm ³)	۰/۴۵ تا ۰/۳۲
استاندارد محصول	ASTM C1240	مقاومت سایشی	افزایش
میزان مصرف	۳ تا ۷ درصد وزن سیمان	شکل دانه ها	کروی و غیر کریستاله (آمورف)
حالت فیزیکی	پودر پوزولان	مقاومت فشاری	افزایش
اندازه دانه ها	قطر متوسط ۰/۱ میکرون افزایش	مقاومت خمشی	افزایش
نفوذپذیری	کاهش	مقاومت کششی	افزایش
حمله فسفاتها	افزایش مقاومت در برابر فسفاتها	رنگ و شکل ظاهری	پودر سفید مایل به خاکستری
سطح مخصوص (m ² /g)	۱۳ تا ۳۰	جذب آب	کاهش جذب آب تا ۱/۵ برابر نسبت به بتن شاهد
نقطه ذوب (°C)	۱۲۳۰	اندازه ذرات (nm)	۲۲۹
نفوذ یون کلر	افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر	نحوه بسته بندی	در بسته های ۲۵ و ۴۵ کیلوگرمی

^۲ Poly propylene fiber^۳ Steel fiber^۴ Micro silica

۲-۴-۲- خاکستر بادی (Fly Ash) Δ (FA)

جدول ۴: مشخصات خاکستر بادی (Fly Ash).

نام محصول	Flay Ash	وزن مخصوص (gr/cm^3)	حدود ۲/۳
نسبت آب به سیمان	۱۰٪ کاهش با کارایی	وزن حجمی (gr/cm^3)	حدود ۰/۹
زمان گیرش	۳۰ تا ۶۰ دقیقه افزایش	سایز دانه ها	سایز ۹۰٪ دانه ها کوچکتر از ۴۵ میکرون
کارایی	افزایش	دمای هیدراتاسیون	کاهش
مقاومت فشاری بلند	۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش	ترکهای پلاستیک	کاهش
نفوذپذیری	۲ تا ۵ برابر کاهش	جمع شدگی بتن	کاهش
حمله سولفاتها	افزایش مقاومت در برابر	رنگ و شکل ظاهری	خاکستری روشن و به صورت پودر خشک
نفوذ یون کلر	افزایش مقاومت در برابر	نحوه بسته بندی	در بسته های ۳۰ کیلوگرمی

۲-۳- ماده جداکننده ۶ (UB)

برای جدا کردن سطح پیرامونی هسته فلزی از غلاف بتنی بادبند کمانش ناپذیر از یک فیلم پلاستیکی (Plastic film)^۷ به ضخامت

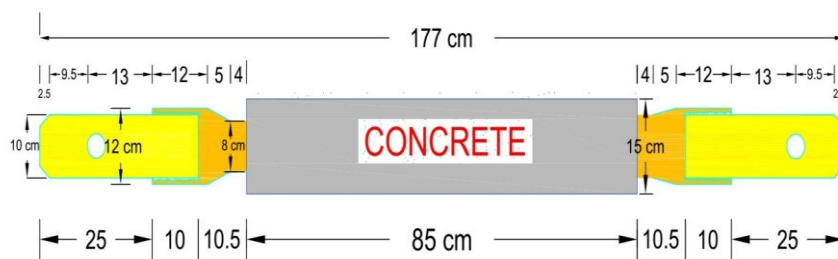
۰/۲ میلیمتر استفاده شده است شکل (۳)



شکل ۳: ماده جداکننده (Unbounded material).

۲-۴- هسته بادبند فلزی استفاده شده در این مقاله

در این مقاله برای کلیه اعضاء از فولاد ST37 با مدول یانگ $1.06 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ، نسبت پواسون ۰/۳، تنش تسلیم $2400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ و تنش نهایی $3700 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ استفاده شده است. هسته مرکزی بادبندهای فلزی استفاده شده در این مقاله از فولاد با مقطع مستطیلی به ابعاد $10 \times 80 \times 1270$ میلیمتر ساخته شده که جهت جلوگیری از افزایش ضخامت بادبند و صفحه اتصال مطابق شکل (۴) در نزدیکی اتصال با شیب حدود ۴۰ درصد (حدود ۲۲ درجه) در هر دو طرف به دو عدد پلیت با ابعاد $10 \times 100 \times 350$ میلیمتر به شکل^۸ (Sleeve) متصل شده است. جزئیات این بادبند در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۴: نمای هسته بادبند کمانش ناپذیر.

^۵Fly Ash^۶Unbounded material^۷Plastic film^۸Sleeve

۲-۵- قاب فلزی استفاده شده در این مقاله

قاب ساخته شده در این مقاله مطابق شکل (۵) به ارتفاع ۱۲۰۰ میلیمتر و به طول ۱۴۰۰ میلیمتر می باشد.



شکل ۵: نمای از قاب ساخته شده با بادبندهای کمانش ناپذیر.

۲-۶- طرح اختلاط استفاده شده در این مقاله

با توجه به اهداف کلی این تحقیق و پس از معرفی مصالح مورد استفاده، نسبت ها و وزن مواد تشکیل دهنده بتن در طرح اختلاط کلی برای یک متر مکعب بتن براساس روش آئین نامه ACI211 بدست آمد و با توجه به هدف این تحقیق که بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن، ماکرو سازه ای، فلزی سینوسی در بتن بر رفتار بادبندهای کمانش ناپذیر با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی است ابتدا طرح اختلاط با توجه به حجم بتن مورد نیاز برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی (مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۸۵ میلی متری) و با لحاظ ۲۵ درصد جهت پیش بینی افت و پرت مصالح و درصد بهینه الیاف و سایر مواد مضاف، تهیه وبر اساس آن نسبت ها و اوزان مواد تشکیل دهنده بتن، مطابق طرح اختلاط مندرج در جدول (۵) تعیین گردید.

جدول ۵: طرح اختلاط بتن الیافی مورد استفاده در پایان نامه.

ردیف	نوع مصالح	(کیلو گرم)	وزن مصالح مورد نیاز جهت ساخت مترمکعب بتن	(مترمکعب)	حجم نمونه بتنی	(مترمکعب / کیلوگرم)	وزن مخصوص	وزن یک نمونه جهت ساخت یک مترمکعب (کیلوگرم)	وزن مصالح جهت ساخت یک نمونه (کیلوگرم)	وزن مصالح جهت ساخت یک نمونه با لحاظ افت ۲۵٪ (کیلوگرم)	وزن مصالح جهت ساخت یک نمونه با لحاظ افت ۲۵٪ (کیلوگرم)
1	سیمان	۴۰۷	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۷/۷۳۸	۹/۶۷۳	۱۹/۳۴۵				
2	شن درشت	۴۰۷	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۷/۷۳۸	۹/۶۷۳	۱۹/۳۴۵				
3	شن ریز	۳۳۲	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۶/۳۱۲	۷/۸۹۰	۱۵/۷۸۰				
4	ماسه	۱۰۱۱	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۱۹/۲۲۲	۲۴/۰۲۷	۴۸/۰۵۴				
5	آب	۲۱۶	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۴/۱۰۷	۵/۱۳۳	۱۰/۲۶۷				
6	فوق روان کننده	۰/۸۱۷	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۳۹				
7	جمع وزن مصالح سنگی مورد	۲۳۷۳/۸۱۷	۰/۰۱۹۰۱۳	*	۴۵	۵۶	۱۱۳				
8	الیاف پلی پروپیلن	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۹	۹۱۰	۰/۰۲۶	۰/۰۳۲	۰/۰۶۵				
9	الیاف فلزی	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۸۵	۷۸۰۰	۲/۲۲۴	۲/۷۸۱	۵/۵۶۱				
10	خاکستر بادی (Fly Ash)	۹۱/۵۷۵	۰/۰۱۹۰۱۳	۲۳۰۰	۱/۷۴۱	۲/۱۷۶	۴/۳۵۳				
11	میکروسیلیس	۳۰/۵۲۵	۰/۰۱۹۰۱۳	۳۸۵	۰/۵۸۰	۰/۷۲۵	۱/۴۵۱				
12	الیاف فلزی	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۰۰۱۵۲	۷۸۰۰	۱/۱۸۶	۱/۴۸۳	۲/۹۶۶				

۲-۶-۱- نمونه برداری آزمونه ها

پس از انجام آزمایش های اسلامپ بتن تازه طبق استاندارد BS EN 12350-2:2009 و آزمایش وزن واحد حجم بتن تازه طبق استاندارد BS EN 12350-1:2009 شروع به نمونه برداری کرده و به ازای هر در صد الیاف ، برای آزمایش اندازه گیری مقاومت فشاری (۷) نمونه مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلیمتری) و برای تعیین مقاومت کششی (۶) نمونه استوانه ای 300×150 میلیمتری مطابق استاندارد های زیر ساخته شدند. نمونه های اخذ شده در شکل (۶) نشان داده شده است :

۲-۶-۲- نحوه نشانه گذاری آزمونه ها

در این تحقیق آزمونه های آزمایشگاهی به شرح زیر نشانه گذاری شدند:

از سمت چپ: حروف لاتین نام الیاف دو رقم اول درصد الیاف و اعداد ۱۱ الی ۶ شماره نمونه ها را نشان می دهد. به عنوان مثال PP 0153 یعنی نمونه شماره سه بتن با ۰٫۱۵ درصد الیاف پلی پروپیلن SF 086 یعنی نمونه شماره شش بتن با ۰٫۸ درصد الیاف فولادی. شکل (۶).



شکل ۶: تصاویری از ساخت و عمل آوری نمونه ها.

۲-۷- آزمایش

۲-۷-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در این تحقیق تعیین مقاومت فشاری نمونه ها با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی از نوع دیجیتال تمام اتوماتیک انجام پذیرفته و محدوده سرعت بارگذاری طبق استاندارد BS EN 12390-3:2009 بین 0.4 تا 0.8 مگاپاسکال در ثانیه می باشد [۲۷].

در شکل (۷) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری و نحوه شکستن نمونه ها نشان داده شده است و خلاصه نتایج در جدول (۶) ذکر گردیده است :



شکل ۷: دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری و نحوه شکستن نمونه ها.

۲-۷-۲- آزمایش مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه ها با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی از نوع دیجیتال تمام اتوماتیک ، شکل (۸) ، انجام پذیرفته، بار را بطور پیوسته وبدون تغییرات ناگهانی با سرعت ثابت در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۰۰ پوند بر اینچ مربع در دقیقه (بین ۶۸۹ تا ۱۳۸۰ کیلوپاسکال در دقیقه) تا گسیختگی نمونه تحت تنش کششی دو نیم شدن اعمال گردید حداکثر بار اعمال شده در زمان گسیختگی که توسط دستگاه آزمایش نشان داده شد ثبت گردید و خلاصه این آزمایشات در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۶ : خلاصه نتایج مقاومت فشاری نمونه ها.

مخلوط بتنی	درصد	متوسط مقاومت فشاری ۷ روزه	متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه	متوسط مقاومت فشاری ۵۶ روزه
PP00	0	۳۵۳/۳	۴۲۴/۳	۴۷۵/۶
SF	۰/۸	۳۹۰	۵۲۵	۵۵۶
FA225+MS75+SF08	۲۲/۵	۱۹۴	۳۲۶	۳۷۱
	۷/۵			
	۰/۸			
PP015+SF1.5	۰/۱۵	۳۱۳	۳۹۸	۴۴۲
	۱،۵			

جدول ۷ : خلاصه نتایج مقاومت کششی نمونه ها.

مخلوط بتنی	درصد الیاف	متوسط مقاومت کششی ۷ روزه kg/cm ²	متوسط مقاومت کششی ۲۸ روزه kg/cm ²	متوسط مقاومت کششی ۵۶ روزه kg/cm ²
PP00	0	۲۴/۳	۳۵/۷	۳۹/۶
SF	۰/۸	۳۰	۴۵	۴۷
FA225+MS75+SF08	۲۲/۵	۱۷	۲۷	۳۲
	۷/۵			
	۰/۸			
PP015+SF1.5	۰/۱۵	۳۵	۴۵	۴۸
	۱،۵			



شکل ۸: گسیختگی بتن در آزمایش کشش برزیلی

در ادامه با توجه به درصد بهینه و طرح اختلاط بدست آمده ، جدول (۸) ، اقدام به ساخت نمونه ها گردید :

جدول ۸ : مشخصات بادبند کمانش ناپذیر.

گروه	نمونه	درصد الیاف	عرض غلاف (cm)	ارتفاع غلاف (cm)	طول غلاف (cm)	ابعاد هسته فولادی (cm) (ضخامت × عرض × طول)
G1	PP001	۰	۱۵	۱۵	۸۵	۱۷۷*۸*۱
	PP002					
G2	SF081	۰,۸	۱۵	۱۵	۸۵	۱۷۷*۸*۱
	SF082					
G3	PP015+SF1.51	۰,۱۵	۱۵	۱۵	۸۵	۱۷۷*۸*۱
	PP015+SF1.52	۱,۵				
G4	FA225+MS75+SF081	۲۲,۵	۱۵	۱۵	۸۵	۱۷۷*۸*۱
	FA225+MS75+SF082	۷,۵				
		۰,۸				

۲-۸- باز کردن و عمل آوری نمونه ها

نمونه ها با توجه به طرح اختلاط و درصد بهینه بدست آمده ناشی از آزمایشات مقاومت فشاری و کششی ساخته شد و سپس نشانه گذاری شد و به مدت ۴۸ ساعت مرتب آبپاشی گردید واز نمونه ها با چتایی و نایلون ، جهت جلوگیری از تبخیر آب سطحی ، محافظت گردید. بعد از گذشت ۴۸ ساعت از زمان ساخت نمونه ها ، قالب ها باز شده و جهت تکمیل عملیات عمل آوری ، نمونه ها در کنار هم بصورت منظم چیده و عملیات آبپاشی و محافظت از رطوبت سطحی تا ۲۸ روز ادامه یافت و به محل آزمایشگاه حمل و به شکل (۹) Sort شد.



شکل ۹: نمایی از بادبندهای کمانش ناپذیر استفاده شده در این مقاله.

۹-۲- مراحل نصب بادبندهای کمانش ناپذیر در آزمایشگاه

جهت نصب بادبندهای کمانش ناپذیر، ابتدا مجموعه اتصالات ابتدایی، شکل (۱۴) روی شاسی (قسمت نارنجی رنگ) قرار گرفته و ۸ عدد پیچ و مهره ۲۷ به طول ۱۴۰ میلیمتر بسته شده و محکم گردید. سپس سازه پیش بینی شده جهت جلوگیری از تغییر مکان جانبی روی شاسی قرار گرفت و ۸ عدد پیچ و مهره ۲۷ به طول ۱۴۰ میلیمتر آن بسته و محکم شد سپس دو عدد ساپورت اتصالات انتهایی، قسمت سفید رنگ، در جای خود قرار گرفت و دو عدد پین ۳۰ به طول ۱۳ سانتیمتر در محل خود قرار گرفت. در مرحله بعدی اتصالات ورق انتهایی، در محل خود قرار گرفت که از یک طرف به انتهای پیستون اعمال نیرو با ۳۵ به طول ۱۴ سانتیمتر متصل شد و از سمت دیگر به دو عدد ساپورت بوسیله ۲ عدد پین ۳۰ به طول ۱۳ سانتیمتر متصل شد و در ادامه بادبندها، در محل خود و بین پلیت های ابتدایی و انتهایی در هر طرف قرار گرفته و در هر طرف با یک عدد پین ۴۰ به طول ۵/۵ سانتیمتر به این پلیت ها وصل شد و عملیات نصب پایان یافت. نمونه شکل تکمیل شده بادبند کمانش ناپذیر و هسته بادبند در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰: نمایی از بادبند کمانش ناپذیر و LVDT های نصب شده.



شکل ۱۱: نمایی از هسته بادبند کمانش ناپذیر و LVDT های نصب شده.

۲-۱۰- معرفی وسایل آزمایش و جانمایی وسایل اندازه گیری و اعمال بار به بادبندهای کمانش ناپذیر در آزمایشگاه

در این آزمایش جهت اندازه گیری میزان تغییر مکان نقاط مختلف بادبند در اثر بارگذاری، ۳ عدد ترانسفورماتور تفاضلی متغییر خطی^۹ (LVDT) در ۳ نقطه مختلف قرارداد شده است. یک نوع رایج از مبدل الکترومکانیکی است که می تواند حرکت یا جابجایی خطی را به سیگنال الکتریکی تبدیل نماید. تغییر مکان در دستگاهی به نام Data Logger متناسب با بار اعمالی ثبت می شود. LVDT1 جهت ثبت تغییر مکان های قسمت فوقانی بادبند LVDT2 جهت ثبت تغییر مکان های جانبی بادبندهای کمانش ناپذیر و LVDT3 جهت میزان تغییر مکان احتمالی Base Plate در نظر گرفته شده است شکل (۱۲).



شکل ۱۲: جانمایی LVDT های نصب شده جهت اندازه گیری تغییر مکان ناشی از اعمال بار به بادبندهای کمانش ناپذیر.

^۹Linear variable differential transformer

۲-۱۱- معرفی روش اعمال بار به بادبندهای کمانش ناپذیر

جهت اعمال بار به نمونه های بادبند کمانش ناپذیر، از پروتکل بارگذاری SAC/BD-97/02 استفاده شده است [۲۶]. که خلاصه مراحل بارگذاری مطابق جدول (۹) خواهد بود:

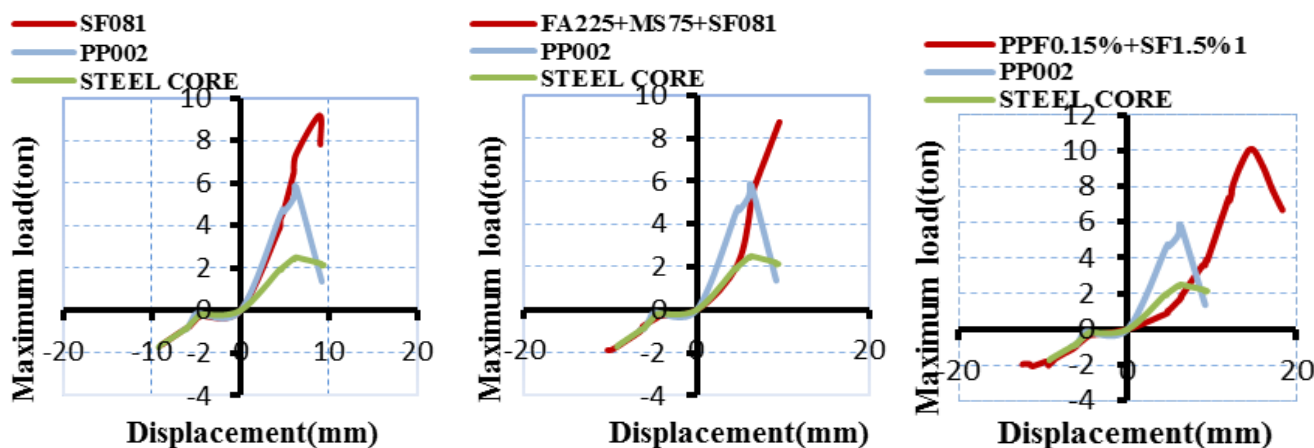
جدول ۹: خلاصه مراحل بارگذاری طبق پروتکل بارگذاری SAC/BD-97/02.

گام های بارگذاری	تعداد چرخه های بارگذاری در هر گام	مجموع چرخه ها از ابتدا	ارتفاع قاب (میلی متر)	حداکثر تغییر مکان زاویه ای (رادیان)	مجموع بازه های تغییر شکلی (رادیان)	میزان تغییر مکان (میلی متر)
۱	۶	۶	۱۲۰۰	۰/۰۰۳۷۵	۰/۰۲۲۵	۴/۵
۲	۶	۱۲	۱۲۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۸۲۵	۶
۳	۶	۱۸	۱۲۰۰	۰/۰۰۷۵	۰/۱۷۲۵	۹
۴	۴	۲۲	۱۲۰۰	۰/۰۱	۰/۲۵۲۵	۱۲
۵	۲	۲۴	۱۲۰۰	۰/۰۱۵	۰/۳۱۲۵	۱۸
۶	۲	۲۶	۱۲۰۰	۰/۰۲	۰/۳۹۲۵	۲۴
۷	۲	۲۸	۱۲۰۰	۰/۰۳	۰/۵۱۲۵	۳۶

۳- تأثیر الیاف بر خواص بتن الیافی

۳-۱- تأثیر الیاف بر منحنی های (Back bone curve)

با اتصال نقاط اوج هر چرخه (لوپ) هیستریزس، نمودار Back bone Curve بدست می آید. شکل (۱۳)



شکل ۱۳: مقایسه منحنی های Back bone Curve بادبندهای کمانش ناپذیر با غلاف هسته بتن الیافی و بدون الیاف.

۳-۲- تأثیر الیاف بر پارامترهای لرزه ای

خلاصه نتایج تنش تسلیم، تنش نهایی، حداکثر مقاومت جانبی و ضریب شکل پذیری نمونه بادبندهای کمانش ناپذیر وهسته فولادی در جدول (۱۰) نشان داده شده است:

جدول ۱۰: خلاصه نتایج تنش تسلیم، تنش نهایی، حداکثر مقاومت جانبی و ضریب شکل پذیری نمونه بادبندهای کمانش ناپذیر.

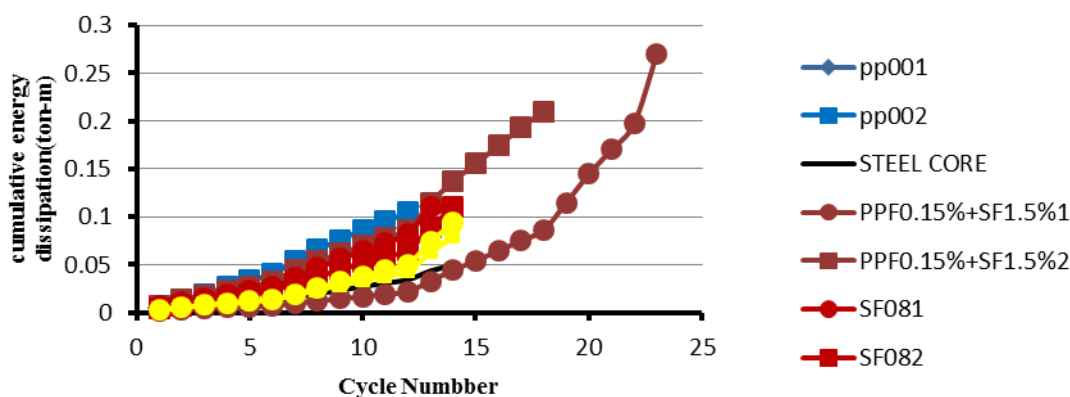
نمونه ها	نقطه بار	جهت بار	نیرو و تغییر مکان تسلیم		حداکثر نیرو و جابجایی		نیرو و تغییر مکان نهایی		μ
			V_y (ton)	Δ_y (mm)	V_{max} (ton)	Δ_{max} (mm)	V_u (ton)	Δ_u (mm)	
PP00	1	positive	3/05	8/9	4/10	9/16	4/10	9/16	1/03
	2		5/46	6/16	5/81	6/34	5/81	6/34	1/03
SF08	1	positive	8/43	8/57	9/18	8/94	7/81	9/06	1/06
	2		7/15	8/53	7/92	9/36	6/91	9/42	1/10
FA225+MS75+SF08	1	positive	6/80	9/58	8/76	9/58	8/76	9/58	1/00
	2		5/84	8/80	7/60	9/12	6/73	8/97	1/02
PP015+SF1/5	1	positive	5/96	14/02	10/1	14/72	6/67	18/38	1/31
	2		7/1	8/52	7/60	8/97	5/72	12/23	1/44
STEEL CORE	1	positive	2/04	4/69	2/50	6/37	2/15	9/45	1/36

در این جدول:

Δ_y : تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم
 Δ_u : تغییر مکان جانبی نسبی نهایی
 μ : ضریب شکل پذیری
 V_y : نیروی جانبی نسبی تسلیم
 V_{max} : نیروی جانبی نسبی ماکزیمم
 V_u : نیروی جانبی نسبی نهایی

۳-۳- تأثیر الیاف بر منحنی های جذب انرژی تجمعی و کمانش جانبی

مقایسه میزان انرژی مستهلک شده تجمعی (مساحت زیر منحنی های هیستریزس) برای نمونه های آزمایشگاهی مورد مطالعه در سیکل های مختلف بارگذاری در شکل (۱۴) به همراه نتایج انرژی مستهلک شده تجمعی هسته فولادی بادبندها نشان داده شده است. خلاصه موارد مذکور در جدول (۱۱) آورده شده است.

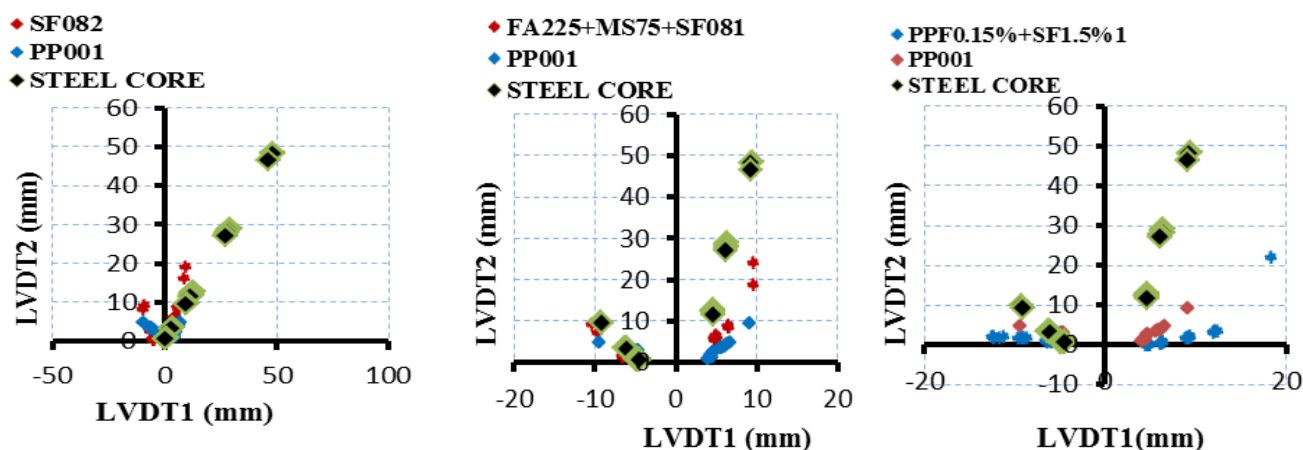


شکل ۱۴: نمودارهای انرژی تجمعی مستهلک شده نمونه بادبندهای کمانش ناپذیر.

جدول ۱۱: میزان انرژی مستهلک شده و تغییر مکان افقی و جانبی نمونه بادبندهای کمانش ناپذیر.

نمونه ها	تعداد نمونه ها	نوع بار	LVDT1		LVDT2		مساحت سطح زیر نمودار هیستریزیس
			مقادیر بارگذاری	نسبت	مقادیر بارگذاری	نسبت	
PP00	1	positive	9/16	1/00	9/26	1	0/1100
	2		6/22	0/68	4/25	0/46	0/1043
SF08	1	positive	8/94	0/98	14/25	1/54	0/1102
	2		9/24	1/01	18/95	2/05	0/1102
FA225+MS75+SF08	1	positive	9/67	1/06	24/06	2/60	0/0935
	2		9/21	1/00	17/82	1/92	0/0788
PP015+SF1 /5	1	positive	18/38	2/01	21/9	2/37	0/2102
	2		12/33	1/35	19/22	2/08	0/2693
STEEL CORE	1	positive	9/45	1/03	48/46	5/23	0/0498

در ادامه با توجه به شکل (۱۵) و با استفاده از نتایج حاصل از LVDT1 (ثابت کننده تغییر مکان افقی) و LVDT2 (ثابت کننده تغییر مکان جانبی)، به تأثیر استفاده از الیاف در میزان تغییر مکان جانبی بادبندهای کمانش ناپذیر پرداخته شد.

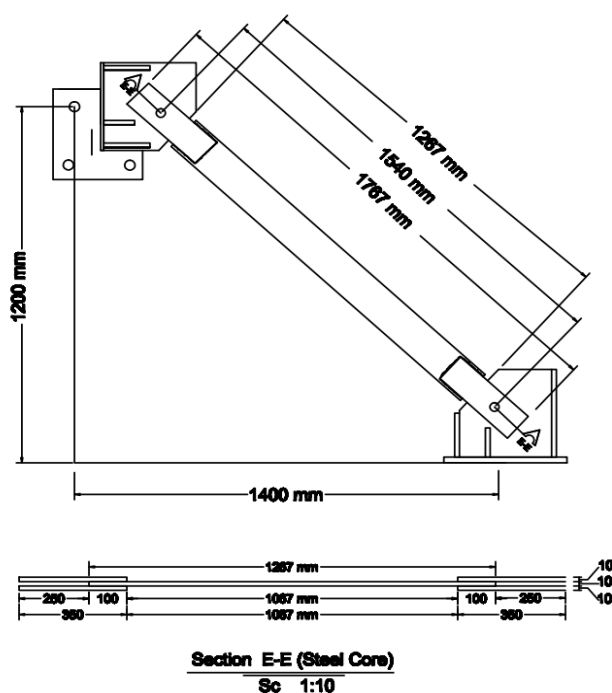


شکل ۱۵: نمودارهای تغییر مکان جانبی نمونه بادبندهای کمانش ناپذیر.

۳-۴- نتایج مدل سازی و صحت سنجی

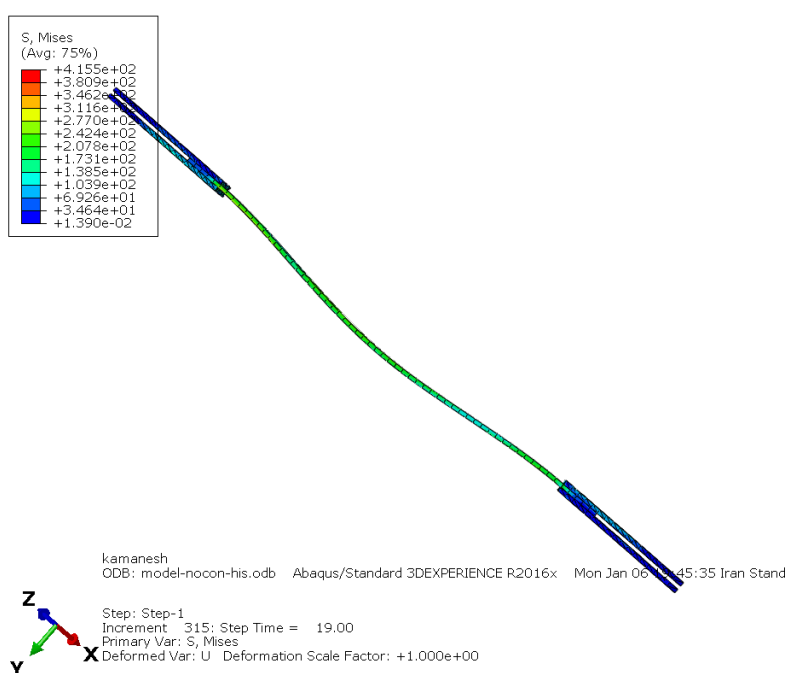
در این بخش جهت صحت سنجی، مدل سازی المان محدود یک نمونه مهاربند ساخته شده در آزمایشگاه انجام گردید. مهاربند مورد نظر یک نمونه از چند نمونه مهاربند ساخته شده در آزمایشگاه می باشد که مورد بررسی قرار گرفته است. مهاربند در نظر گرفته شده درون یک قاب فلزی به ارتفاع ۱۲۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۴۰۰ میلیمتر می باشد. شکل ۱۶ جزئیات مهاربند در نظر گرفته شده را به صورت شماتیک مورد نمایش قرار داده است.

برای کلیه اعضاء فولادی از فولاد st37 با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰٫۳، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۷۰ مگا پاسکال استفاده گردید. به منظور بارگذاری نمونه المان محدود از روش کنترل تغییر مکان استفاده شده است و بارگذاری به صورت بارگذاری رفت و برگشتی مطابق با پروتکل SAC/BD-97 [۲۶] به نمونه ها وارد گردید. جابجایی های یک سمت مهاربند صفر در نظر گرفته شده و در سمت دیگر بار به صورت افقی به مهاربند اعمال گردید.

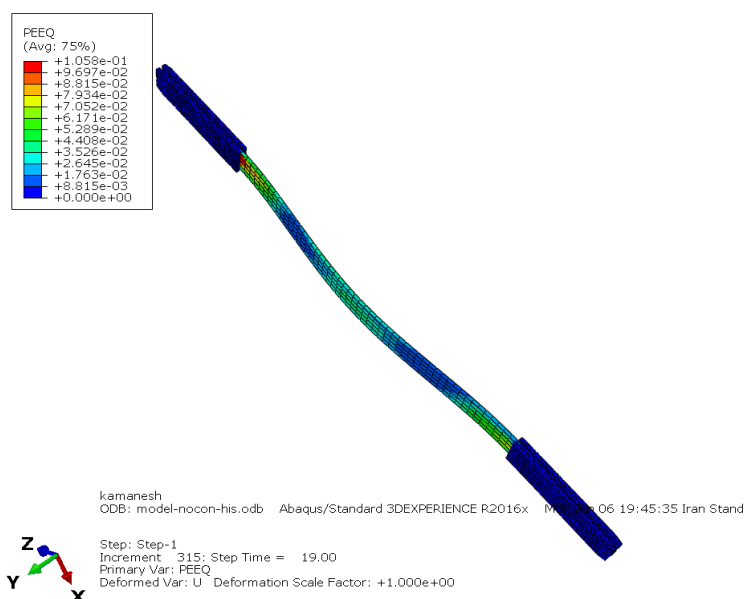


شکل ۱۶: جزئیات مهاربند در نظر گرفته شده در آزمایشگاه

پس از انجام بارگذاری بر روی نمونه مهاربند در نظر گرفته شده و انجام تحلیل به مقایسه نتایج به دست آمده پرداخته شده است. شکل های ۱۷ و ۱۸ کانتورهای تغییر شکل در نمونه مدل سازی شده را نمایش می دهند. در نمونه بدون غلاف فولادی مهاربند کمانش نموده و از ظرفیت باربری آن در فشار به شدت کاسته شده است. با توجه به کانتورهای تنش و کرنش رخ داده در نمونه ملاحظه گردید که در دو انتهای هسته مرکزی مهاربند شکست به وجود آمده است. همچنین در سمتی که بارگذاری بر روی مهاربند قرار داده شد، کرنش پلاستیک بیشتر می باشد و این موضوع نشان می دهد تنش در این قسمت از مهاربند بیشتر بوده است.

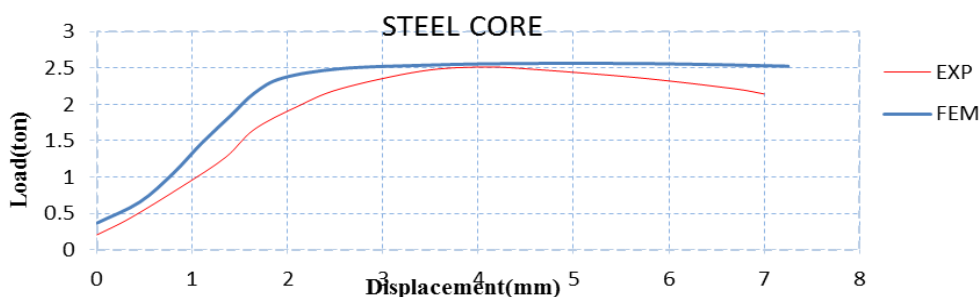


شکل ۱۷: کمانش رخ داده در نمونه هسته فولادی.



شکل ۱۸: کرنش پلاستیک در نمونه هسته فولادی.

در نمونه بدون غلاف فولادی مهاربند کمانش نموده و از ظرفیت باربری آن در فشار به شدت کاسته شده است. در شکل ۱۹ مقایسه منحنی های بک بون^{۱۰} نمونه آزمایشگاهی و نمونه المان محدود را برای دو نمونه مهاربند کمانش تاب مدل سازی شده نمایش داده شده است.



شکل ۱۹: مقایسه نمودارهای بک بون نمونه آزمایشگاهی و نمونه المان محدود.

با مقایسه نمودارهای بک بون دو نمونه ملاحظه می شود نتایج دو نمونه از تقریب مناسبی برخوردارند. به دلیل اینکه ماکزیمم نمودارهای هیستریزیس در لوپ های اول رخ نداده است لذا نمودار نیرو در جابجایی صفر بر روی مبدا قرار نگرفته و بیشتر از صفر می باشد.

۳-۴-۱- تحلیل بر اساس تئوری پایداری

بر اساس تحلیل کمانش اوپلر، بار بحرانی حول محور ضعیف برای یک عضو فشاری (هسته فولادبادبند) به صورت زیر می باشد.

$$P_{cr-core} = n^2 * \pi^2 * (EI)_{core} / (KL)^2 \quad (1)$$

که در آن KL طول مؤثر هسته بادبند، EI سختی خمشی حول محور ضعیف و n شماره مود کمانشی می باشد.

با توجه به ابعاد قاب (ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر و طول دهانه ۱۴۰ سانتیمتر) داریم:

$$40/6 = \alpha \quad \text{Tan} \alpha = 120/140$$

¹⁰ Backbone

$$P_{Brace} = V_{Story} * \cos\alpha \rightarrow V_{Story} = 1/317 P_{Brace} \quad (2)$$

بیعت تمایل دارد که همواره با کمترین انرژی ممکن، کمانش را ایجاد کند. با توجه به این موضوع، در بسیاری از حالات، مود اول کمانش در ستون باعث تخریب آن می شود بنابراین: $n=1$

همانطور که در رابطه (۱) مشهود است، اگر به طریقی بتوان به مودهای کمانشی بالاتر دست یافت تحمل باربری بادبند سریعاً و به صورت مربعی افزایش می یابد. بر همین اساس اگر هسته فولادی فوق داخل مواد پرکننده احاطه شود، کمانش های مودهای بالاتر بعد از تسلیم عضو روی خواهد داد. چنانچه $(EI)_{core}$ سختی هسته فولادی، $(EI)_{mantel}$ سختی بتن احاطه کننده هسته و لوله پوشش نهایی حول محور ضعیف و n شماره مود کمانشی باشد، بار بحرانی بادبند کمانش ناپذیر حول محور ضعیف به صورت رابطه ۳ خواهد بود:

$$P_{cr-DB} = n^2 * \pi^2 * [(EI)_{core} + (EI)_{mantel}] / KL^2 \quad (3)$$

از آنجا که کمانش حول محور ضعیف هسته فولادی بادبند بسیار کمتر از پوشش بتن احاطه کننده هسته فولادی می باشد، از سختی هسته فولادی حول محور ضعیف بادبند صرف نظر شده و بنابراین طبق رابطه ۴ بار بحرانی بادبند وابسته به بار بحرانی بتن پوشش احاطه کننده هسته فولادی خواهد بود:

$$P_{cr-DB} = n^2 * \pi^2 * (EI)_{mantel} / (KL)^2 \quad (4)$$

البته انتظار می رود در یک طراحی مناسب برای بادبند کمانش ناپذیر، بار تسلیم هسته فولادی خیلی کمتر از بار بحرانی کل بادبند کمانش ناپذیر در رابطه (۳) باشد. در نتیجه هسته بادبند کمانش ناپذیر در کشش و فشار تسلیم می گردد. بنابراین طبق ضوابط رابطه (۵)، تحلیل بر روی بادبند کمانش ناپذیر این در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. طول کلی بادبند ۱۷۷۰ میلیمتر و طول پوشش ۸۵۰ میلیمتر و سطح مقطع هسته فولادی ۱۰*۸۰ میلیمتر مربع لحاظ گردید. ابعاد پوشش نهایی با بتن به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰ میلیمتر مربع در نظر گرفته شده است.

$$(P_y)_{core} = (\sigma_y A)_{core} < P_{cr-DB} \quad (5)$$

لنگر اینرسی و بار بحرانی هسته فولادی تنها و بدون پوشش بتن حول محور ضعیف به صورت روابط ۶، ۷ و ۸ محاسبه گردید.

$$I = 1/12 b h^3 = 1/12 * 8 * 1^3 = 2/3 cm^4 \quad (6)$$

$$P_{cr-core} = n^2 * \pi^2 * (EI)_{core} / (KL)^2 = 1 * 3/14^2 * (2100000 * 2/3) / (1 * 0.85)^2 = 1911 kg \quad (7)$$

$$V_{Story} = 1/317 P_{Brace} = 1/317 * 1911 = 2517 kg \quad (8)$$

با توجه به مطالب فوق الذکر انتظار داریم بار تسلیم هسته فولادی بسیار پایین تر از بار بحرانی کل بادبند کمانش ناپذیر باشد. طبق تحلیل بار بحرانی حداکثر برابر ۲،۵۱۷ تن حاصل شده است که با تقریب مناسبی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی و عددی در این پژوهش می باشد.

۴ - نتیجه گیری

۱- بیشترین تعداد سیکل بارگذاری در نمونه ۱ PPF0/15%+SF1/5% با ۲۳ سیکل و کمترین تعداد سیکل بارگذاری در نمونه بدون الیاف PP002 با ۱۲ سیکل بارگذاری مشاهده شد. دلیل این امر آنست که کمانش هسته میانی در مدهای بالاتر این امکان را فراهم آورد تا مفاصل محوری فشاری تشکیل شده در طول هسته میانی توزیع شود و مساله خستگی در تیر بتواند گسیختگی هسته را موجب شود.

- ۲- بیشترین میزان جذب انرژی در سیکل ۲۳ نمونه $PPF0/15\%+SF1/5\%$ به میزان 0.072 تن - متر و کمترین میزان جذب انرژی در سیکل ۶ نمونه $PPF0/15\%+SF1/5\%$ به میزان 0.008 تن - متر روئیت شد و همچنین کمترین میزان انرژی جذب شده به میزان 0.08 تن - متر در نمونه $FA225+MS75+SF082$ مشاهده شد که 0.71 برابر نمونه بدون الیاف است که به دلیل تأثیر مثبت الیاف استفاده شده می باشد.
- ۳- کمترین میزان جذب انرژی تجمعی در نمونه $FA225+MS75+SF082$ به میزان 0.08 تن - متر به ثبت رسید. کمترین میزان جذب انرژی تجمعی نمونه بدون الیاف در نمونه $PP002$ به مقدار 0.1 تن - متر نشان داده شد و پارگی و شکستگی ناشی از خستگی در تعداد سیکل های بارگذاری کم به نمونه های بدون الیاف اجازه نداد که عملکرد برجسته خود را حفظ نمایند علاوه بر این در ۶ سیکل ابتدایی که رفتار نمونه ها الاستیک است ، بیشترین میزان جذب انرژی مستهلک شده تجمعی مربوط به نمونه های بدون الیاف شد و نتوانستند عملکرد خود را به خوبی حفظ کنند و در مجموع به دلیل خستگی در سیکل های پائین تری گسیخته شدند.
- ۴- بیشترین میزان نیروی تسلیم فشاری در نمونه $SF081$ به میزان $8/43$ تن در تغییر مکان $8/57$ میلیمتر مشاهده شد که حدود $1/54$ برابر نمونه بدون الیاف $PP002$ به مقدار $5/46$ تن در تغییر مکان $6/16$ میلیمتر اتفاق افتاد . به دلیل استفاده از تمامی ظرفیت بعد از تسلیم بادنند ، نیاز به طراحی بادنند به عنوان یک عضو فشاری نیست که همیشه معضل کمانش را با خود دارد. طراحی فشاری بادنند به دلیل خطر کمانش ، عموماً الاستیک و به روش تنش مجاز طراحی می گردد این موضوع باعث طراحی بیشتر از نیاز و بزرگی مقاطع بادنند می گردد که می تواند سبب افزایش سختی جانبی و متعاقب آن افزایش مقاطع تیرها ، ستون ها ، اتصالات و ابعاد پی سهزه ها و هزینه ها می گردد تمامی این معضلات با استفاده از بادنندهای کمانش ناپذیر شکل پذیر پیشنهادی می تواند شدیداً کاهش یابد.
- ۵- ماکزیمم ظرفیت حمل بار در چرخه های پیایی در نمونه $PPF0/15\%+SF1/5\%$ به میزان $10/10$ تن مشاهده گردید که حدود $1/74$ برابر نمونه بدون الیاف $PP002$ به مقدار $5/81$ تن می باشد. تئوری های شکست و مطالعات مقاومت مصالح بیان می دارند که در صورت محبوس نمودن اعضای فشاری ، ظرفیت باربری به دلیل سخت شدگی بالا در ناحیه پلاستیک افزایش می یابد.
- ۶- بیشترین میزان تغییر مکان افقی در نمونه $PPF0/15\%+SF1/5\%$ به مقدار $18/38$ میلیمتر مشاهده شد که حدود ۲ برابر بیشترین میزان تغییر مکان افقی در نمونه بدون الیاف $PP001$ می باشد اضافه نمودن الیاف حتی در ترکیب خاکستر بادی (Fly Ash) ، میکروسیلیس و الیاف فولادی تأثیر بسیار مثبتی در حداکثر میزان تغییر مکان جانبی نمونه ها دارد . که به دلیل تأثیر مثبت الیاف در افزایش شکل پذیری می باشد.
- ۷- بیشترین میزان شکل پذیری به میزان $1/44$ در نمونه $PPF0/15\%+SF1/5\%$ ۲ مشاهده گردید که $1/4$ برابر ماکزیمم شکل پذیری در نمونه بدون الیاف می باشد همچنین کمترین میزان شکل پذیری در نمونه $FA225+MS75+SF082$ به مقدار ۱ مشاهده شد که 0.97 نمونه بدون الیاف است که به دلیل تأثیر مثبت الیاف در افزایش تغییر مکان جانبی می باشد. از آنجا که بادنندهای شکل پذیر در کشش و فشار به تسلیم می رسند می توانند به صورت تک در هر دهانه بکار روند و بازشوهای مناسب معماری را فراهم نمایند.
- ۸- بیشترین افت مقاومت در انتهای سیکل های بارگذاری مربوط به نمونه بدون الیاف $PP002$ به مقدار $74/32$ درصد و کمترین افت مقاومت در انتهای سیکل های بارگذاری به میزان $2/93$ درصد مربوط به نمونه $SF082$ و همچنین بیشترین افت مقاومت بعد از ماکزیمم بار محوری ثبت شده مربوط به نمونه بدون الیاف $PP001$ به میزان $30/83$ درصد و کمترین میزان افت مقاومت در نمونه $PP002$ به میزان $1/21$ درصد ثبت گردید . به علت فشار جانبی وارد شده زیاد به بتن پوشش و شکست آنها در بادنند ، کمانش موضعی رخ می دهد این بار باعث ایجاد فرورفتگی در سطح تماس هسته میانی و بتن می شود تکرار این بارگذاری کمانش موضعی هسته میانی در ابتدای ژاکت بتنی است و این کمانش باعث ایجاد دوران زیادی در محل اتمام ژاکت و طبله کردن غلاف فلزی می گردد.
- ۹- به نظر می رسد که استفاده از ترکیب خاکستر بادی (Fly Ash) ، میکروسیلیس و الیاف فلزی سینوسی تأثیر منفی در پارامترهای لرزه ای بادنندهای کمانش ناپذیر دارد و استفاده از این ترکیب در بتن غلاف این بادنندها توصیه نمی شود .

مراجع

[1] ANSI, A. (2005). AISC 341-05: Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

- [2] Iwata, M., Kato, T., & Wada, A. (2000). Buckling-restrained braces as hysteretic dampers. *Behavior of Steel Structures in Seismic Areas*, 33-38.
- [3] Uang, C. M., Nakashima, M., & Tsai, K. C. (2004). Research and application of buckling-restrained braced frames. *International Journal of Steel Structures*, 4(4), 301-313.
- [4] Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama, H., & Morisono, T. (1973). Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading—Parts 1 & 2. In *Summaries of technical papers of annual meeting (Vol. 6, pp. 121-128)*. Architectural Institute of Japan.
- [5] BILLINGS, I. (1989). 3rd US-Japan workshop on the improvement of building structural design and construction practices, 29 July-1 August 1988 Tokyo, Japan. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 22(2), 73-75.
- [6] Saif Hussain, S. E., Paul Van Benschoten, S. E., Al Satari, M., & Lin, S. Buckling Restrained Braced Frame (BRBF) Structures: Analysis, Design and Approvals Issues.
- [7] Black, C., Aiken, I. D., & Makris, N. (2002). Component testing, stability analysis, and characterization of buckling-restrained unbonded braces (TM). Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [8] Ning, X., Ding, Y., Zhang, F., & Zhang, Y. (2015). Experimental study and prediction model for flexural behavior of reinforced SCC beam containing steel fibers. *Construction and Building Materials*, 93, 644-653.
- [9] Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82.
- [10] Zile, E., & Zile, O. (2013). Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers. *Cement and concrete research*, 44, 18-24.
- [11] Tran, N. T., Tran, T. K., Jeon, J. K., Park, J. K., & Kim, D. J. (2016). Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 79, 169-184.
- [12] Tran, T. K., & Kim, D. J. (2013). Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 50, 62-73.
- [13] Nili, M., Ghorbankhani, A. H., AlaviNia, A., & Zolfaghari, M. (2016). Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts. *Construction and Building Materials*, 107, 264-271.
- [14] Shah, A. A., & Ribakov, Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Materials & Design*, 32(8-9), 4122-4151.
- [15] Grabois, T. M., Cordeiro, G. C., & Toledo Filho, R. D. (2016). Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 284-292.
- [16] Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T., & Kim, D. J. (2014). Effect of shrinkage reducing agent on pullout resistance of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 49, 59-69.
- [17] Cunha, V. M., Barros, J. A., & Sena-Cruz, J. M. (2011). An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 64-76.
- [18] Abrishambaf, A., Barros, J. A., & Cunha, V. M. (2013). Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research*, 51, 57-66.
- [19] Deeb, R., Karihaloo, B. L., & Kulasegaram, S. (2014). Reorientation of short steel fibres during the flow of self-compacting concrete mix and determination of the fibre orientation factor. *Cement and Concrete Research*, 56, 112-120.
- [20] Dügenci, O., Haktanir, T., & Altun, F. (2015). Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 82-88.
- [21] Kaufmann, J., Frech, K., Schuetz, P., & Münch, B. (2013). Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications. *Construction and Building Materials*, 49, 15-22.
- [22] Behnood, A., Verian, K. P., & Gharehveran, M. M. (2015). Evaluation of the splitting tensile strength in plain and steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength. *Construction and Building Materials*, 98, 519-529.
- [23] Abbas, S., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, 429-441.
- [24] Rashad, A. M. (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, 1005-1025.
- [25] Bagheri, A., Zanganeh, H., Alizadeh, H., Shakerinia, M., & Marian, M. A. S. (2013). Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. *Construction and building materials*, 47, 1402-1408.
- [26] Venture, S. J. (1997). Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens. Rep. No. SAC/BD-97, 2.
- [27] EN, B. (2009). 12390-3: 2009. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 12390-5.