

بررسی آزمایشگاهی اثر خاموت‌های ابداعی دست‌ساز ساخته شده از FRP در مقایسه با خاموت‌های فلزی در اتصالات بتن مسلح، تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی

محمد کاظم شربتدار* (استادیار)

احمد دالوند (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

میثم جلالی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (نهار ۱۳۹۳)
دوری ۲-۳، شماره ۱/۲، ص ۱۲۵-۱۳۵، (پادداشت فنی)

استفاده از الیاف پلیمری FRP یکی از کارآمدترین روش‌های کاهش اثرات خوردگی بر سازه‌هاست. از آنجایی که تأثیر خوردگی بر خاموت‌های فلزی به علت قطر پایین آنها و همچنین نزدیکی آنها به سطح بیش از میلگردهای طولی است، در این نوشتار، یک پژوهش آزمایشگاهی بر روی اثر جایگزینی خاموت‌های ساخته شده از الیاف FRP به جای خاموت‌های فلزی تحت بارگذاری چرخه‌یی صورت گرفته است. به این منظور، سه اتصال بتنی ساخته آزمایش شد. از ۳ اتصال ساخته شده، یک اتصال به عنوان اتصال مرجع دارای میلگرد طولی و خاموت فلزی بود. میلگردهای طولی کلیه‌ی نمونه‌ها، فلزی و خاموت‌های دو نمونه‌ی باقی‌مانده از جنس FRP ساخته شده در محل بودند. سه نمونه‌ی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار گرفتند. مطابق نتایج به دست آمده ملاحظه شد که خاموت‌های FRP دارای عملکرد مناسبی در مقایسه با خاموت‌های فلزی بودند.

msharbatdar@semnan.ac.ir
ahmad.dalvand@gmail.com
mei.jalali@yahoo.com

واژگان کلیدی: اتصال بتنی، خاموت FRP، چشمه‌ی اتصال، شکل‌پذیری.

۱. مقدمه

بیشتر سازه‌های نفتی و گازی کشور ایران، در مناطق جنوبی قرار دارند. خاک این مناطق به شدت خورنده است و باعث صدمه دیدن این تأسیسات می‌شود. یک سازه‌ی بتن آرمه‌ی معمولی که به میلگردهای فولادی مسلح است، چنانچه در زمان طولانی در مجاورت عوامل خورنده نظیر نمک‌ها، اسیدها و کاربورها قرارگیرد، قسمتی از مقاومت خود را از دست خواهد داد. به علاوه، فولادی که در داخل بتن زنگ می‌زند، بر بتن اطراف خود فشار می‌آورد و باعث خرد شدن و ریختن پوسته‌ی بتن می‌شود. به دلیل قطر بیشتر میلگردهای طولی نسبت به خاموت‌ها، اثرات خوردگی در آنها کمتر از خاموت‌هاست و لذا می‌توان از میلگردهای طولی فلزی استفاده کرد. خاموت‌ها به دلیل قطر کمتر و نزدیکی بیشتر به محیط خارج در مقابل عوامل خورنده، آسیب‌پذیرتر هستند و استفاده از خاموت‌های مقاوم در برابر خوردگی نظیر خاموت‌های FRP مناسب است. تولید خاموت‌های پیش‌ساخته به دلیل فناوری خاص تولید و در دسترس نبودن و همچنین قیمت بالای آنها برای پروژه‌های کوچک توجیه اقتصادی ندارد. ارائه‌ی یک روش ساخت مؤثر خاموت FRP، که علاوه بر کم هزینه بودن دارای عملکرد خوبی در برابر نیروهای وارده باشد، ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از میلگردهای ساخته شده از الیاف FRP در اشکال میلگرد طولی

و خاموت به منظور استفاده در پل‌ها،^[۱] و ساختمان‌ها،^[۲،۳] رو به افزایش است. همچنین چندین آیین‌نامه‌ی طراحی به همین منظور ارائه شد.^[۴-۸] عامل مؤثر در انجام این پژوهش‌ها، عملکرد خوب الیاف FRP در محیط‌های خورنده است.^[۶-۸] الیاف FRP دارای خواصی نظیر نسبت مقاومت کششی به وزن زیاد، مقاومت خستگی مناسب، مقاومت زیاد در برابر خوردگی نسبت به فولاد است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۹، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف میلگردهای GFRP بر روی رفتار تیرهای بتنی صورت گرفت و در آن مشخص شد که مقررات آیین‌نامه‌ی موجود دارای خطای کمی با نتایج آیین‌نامه‌ی هستند.^[۹] در پژوهش دیگری هم (۲۰۰۱) یک مدل تئوری بر مبنای تغییر شکل برشی برای تیرهای دارای میلگرد FRP ارائه شد.^[۱۰]

در سال ۲۰۰۹ نیز رفتار لرزه‌یی اتصال تیر به ستون خارجی بهسازی شده با FRP بررسی شد و نتایج نشان دادند که ورقه‌های CFRP مقاومت برشی اتصال و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند.^[۱۱] همچنین در سال ۲۰۱۱، اثر استفاده از خاموت‌ها و میلگردهای طولی FRP در رفتار لرزه‌یی اتصالات بتنی بررسی شد و مطابق بررسی‌های انجام شده مشخص شد که اتصالات دارای میلگرد طولی و خاموت FRP قابلیت تحمل دررفت‌های بالاتر از ۳٪ را نیز دارند.^[۱۲]

ضوابط آیین‌نامه‌ی ACI-440-1R اشاره‌یی به بحث شکل‌پذیری در سازه‌های

* نویسنده مسئول

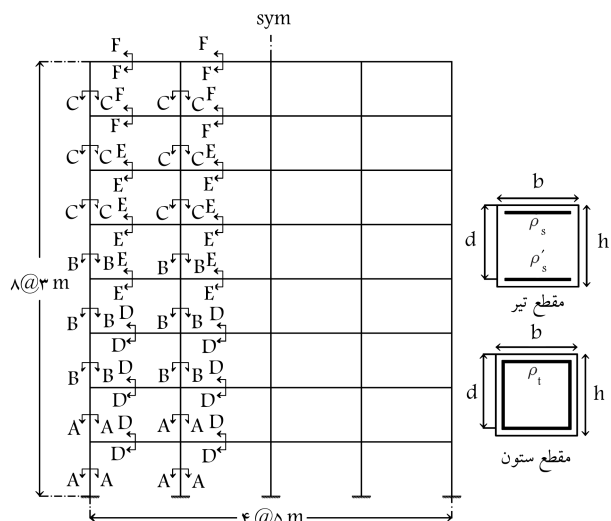
تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۱، اصلاحیه ۱/۱۳۹۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۱/۳۰.

دارای خاموت FRP را ندارد.^[5] یکی از مشکلات استفاده از میلگرد طولی فلزی به همراه خاموت‌های شبکه‌یی قیمت بالا و در دسترس نبودن شبکه‌های FRP و همچنین عدم صرفه‌ی اقتصادی در پروژه‌های کوچک است. استفاده از خاموت‌های ارائه‌شده در این نوشتار علاوه بر ارزان‌تر بودن نسبت به انواع کارخانه‌ها، دارای راحتی نصب و اجرا و انطباق با هر نوع چینش میلگردهای طولی اعم از مثلثی و مستطیلی و دایره‌یی است. در این نوشتار دو اتصال بتنی با استفاده از خاموت‌های FRP و میلگرد طولی فلزی ساخته و آزمایش شد. فواصل خاموت‌های FRP در این دو نمونه‌ی اتصال با هم متفاوت است. در یک اتصال فواصل خاموت‌ها در ناحیه‌ی ویژه‌ی تیر و ستون 5° mm و در اتصال دیگر فواصل خاموت‌ها در ناحیه‌ی ویژه‌ی تیر و ستون 10° mm است. در ادامه، نمودارهای لنگر-تغییرمکان و همچنین منحنی لنگر-انحنای لنگر-کنش خاموت‌های FRP و همچنین منحنی جذب انرژی اتصالات رسم شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. انتخاب قاب نمونه به منظور طراحی اتصال

یک قاب خمشی ۸ طبقه با ۴ دهانه‌ی ۵ متری و ارتفاع طبقات ۳ متر به عنوان قاب مرجع برای طراحی اتصالات انتخاب شد. بار مرده و زنده فرض شده به منظور طراحی قاب به ترتیب ۲۷۵۰ kg/m و ۱۷۵۰ kg/m در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری و مدول کشسانی بتن به ترتیب ۳۰ MPa و ۲۰ GPa در نظر گرفته شده است. برای میلگردهای طولی مقاومت تسلیم ۴۰۰ MPa در نظر گرفته شده است. برش پایه‌ی طراحی با فرض بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) ۰/۳g محاسبه شد. وزن مؤثر در زلزله، مجموع بار مرده به علاوه ۲۰٪ بار زنده مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است.^[۱۳] این قاب با ضریب رفتار ۶ و بر مبنای آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا^[۱۴] طراحی شده است. در شکل ۱، ρ_s ، ρ'_s و ρ_t به ترتیب درصد میلگرد طولی ستون، درصد میلگرد کششی و فشاری تیر هستند و همچنین h ارتفاع مقطع، b عرض مقطع، d ارتفاع مؤثر مقطع هستند. در جدول ۱، درصد میلگرد مقاطع قاب و ابعاد آن نشان داده شده است. اتصال کناری واقع در طبقه‌ی پنجم به عنوان اتصال مینا انتخاب شد.



شکل ۱. قاب مرجع جهت طراحی اتصالات.

جدول ۱. درصد میلگرد و ابعاد مقاطع قاب مورد مطالعه.

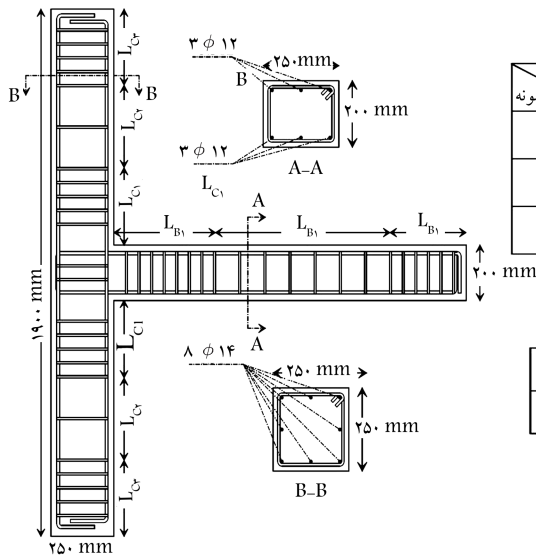
مقطع	b	h	d	ρ_t	ρ_s	ρ'_s
A-A	۶۰۰	۶۰۰	۵۵۰	۰/۰۲۲	-	-
B-B	۵۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۰/۰۱۹۷	-	-
C-C	۵۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۰/۰۱۲۴	-	-
D-D	۶۰۰	۴۰۰	۳۵۰	-	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۹
E-E	۵۰۰	۴۰۰	۳۵۰	-	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۵۱
F-F	۵۰۰	۴۰۰	۳۵۰	-	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۰۴

۲.۲. مشخصات نمونه‌ها

سه اتصال مورد مطالعه با ابعاد یکسان در مقیاس ۱:۲ ساخته شد. ارتفاع مقطع ستون ۲۵۰ mm با عرض ۲۵۰ mm و ارتفاع مقطع تیر ۲۰۰ mm با عرض ۲۵۰ mm در نظر گرفته شد. از سه اتصال ساخته‌شده، یک اتصال به عنوان نمونه‌ی مرجع (JSD) با میلگرد طولی و خاموت فلزی با رعایت ضوابط شکل‌پذیری ساخته شد. در هر سه نمونه از میلگردهای طولی فولادی استفاده شد. از دو نمونه‌ی اتصال دیگر، یک نمونه دارای خاموت‌های FRP (نمونه‌ی JFD) با رعایت ضوابط شکل‌پذیری، و نمونه‌ی دیگر دارای خاموت FRP (نمونه‌ی JFU) ولی با عدم رعایت ضوابط شکل‌پذیری ساخته شدند. مطابق شکل ۲، ستون هر سه اتصال ساخته‌شده دارای ۱۴φ۸ به‌عنوان میلگرد طولی با مساحت ۱۲۳۱ mm^۲ مدول کشسانی ۲۰۵ GPa هستند. از ۱۲φ۳ به مساحت ۳۳۹ mm^۲ در بالا و همچنین پایین تیر استفاده شد. خاموت‌های تیر در نمونه‌های JSD و JFD در ناحیه‌ی شکل‌پذیر به فاصله‌ی ۵۰ mm و در خارج از ناحیه‌ی شکل‌پذیر به فاصله‌ی ۱۰۰ mm نصب شدند. در نمونه‌ی JFU فواصل کلیه‌ی خاموت‌های تیر ۱۰۰ mm انتخاب شد. در ستون نمونه‌های JSD و JFD در ناحیه‌ی شکل‌پذیر فواصل خاموت‌ها ۵۰ mm و در خارج از ناحیه‌ی شکل‌پذیر فواصل خاموت‌ها ۱۵۰ mm منظور شد. سرانجام در نمونه‌ی JFU فواصل خاموت‌های ستون ۱۵۰ mm در نظر گرفته شد. در نمونه‌های JSD و JFD در ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال از دو خاموت استفاده شد، در صورتی‌که در نمونه‌ی JFU فقط یک خاموت در ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال تعبیه شد. به منظور قراردادن نمونه بر روی تکیه‌گاه و جلوگیری از خوردشدن بتن تکیه‌گاهی، ۴ صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۵ mm در بالا و پایین تکیه‌گاه‌ها قرار داده شد. به منظور اعمال نیروی محوری به انتهای ستون و جلوگیری از خوردشدن بتن و توزیع یکنواخت نیروی محوری از ۲ عدد صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۱۰ mm در دو انتهای ستون استفاده شد. همچنین، به منظور ایجاد سطحی صاف جهت اعمال بار از ۲ عدد صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۸ mm در محل اعمال بار استفاده شد.

۳.۲. خصوصیات مصالح

به منظور ساخت بتن نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی استوانه‌یی استاندارد بتن نمونه‌ها ۳۰ MPa بوده است. بیشینه‌ی بُعد دانه‌های استفاده‌شده در بتن ۱۰ mm بود. میلگردهای استفاده‌شده برای هر ۳ نمونه از نوع آج‌دار انتخاب شدند. میلگردهای طولی ستون‌ها دارای مقاومت تسلیم ۴۰۸ MPa و مقاومت نهایی ۴۷۰ MPa هستند. همچنین میلگردهای طولی استفاده‌شده در تیرها نیز دارای مقاومت تسلیم ۳۵۴ MPa و مقاومت نهایی ۵۴۲ MPa هستند.



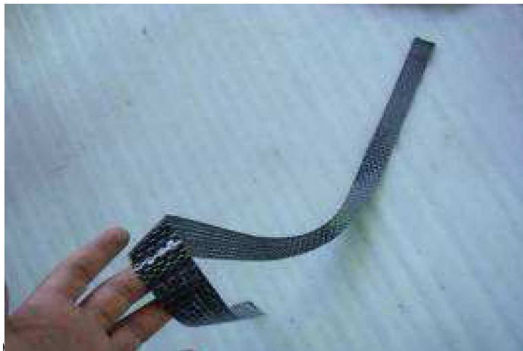
نمونه / ناحیه	L_{B1}	L_{B2}	L_{B3}	L_{C1}	L_{C2}	L_{C3}
JSD	at 50 mm	at 100 mm	at 50 mm	at 50 mm	at 150 mm	at 50 mm
JFD	at 50 mm	at 100 mm	at 50 mm	at 50 mm	at 150 mm	at 50 mm
JFU	at 100 mm	at 100 mm	at 50 mm	at 150 mm	at 150 mm	at 50 mm

L_{B1} (mm)	L_{B2} (mm)	L_{B3} (mm)	L_{C1} (mm)	L_{C2} (mm)	L_{C3} (mm)
450	650	300	275	300	275

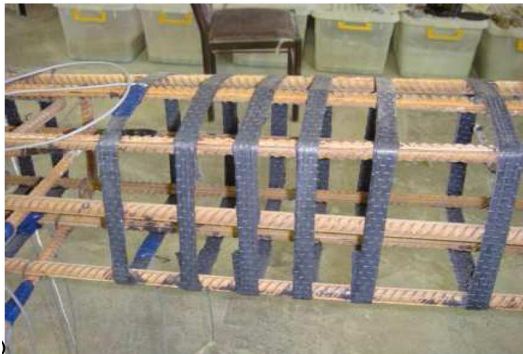
شکل ۲. جزئیات اتصال.

جدول ۲. مشخصات میلگردهای به کاررفته در اتصال.

شماره	موقعیت	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)
۱۴	میلگرد طولی ستون	۴۰۸	۴۷
۱۲	میلگرد طولی تیر	۳۵۴	۵۴۲
۶	خاموت (نمونه‌ی مرجع)	۲۶۰	۲۹۰



الف) الیاف FRP بریده شده برای ساخت خاموت های دست ساز FRP



ب) خاموت های نصب شده بر روی تیر.

خاموت های فلزی به کاررفته دارای مقاومت تسلیم ۲۶۰ MPa و مقاومت نهایی ۲۹۰ MPa هستند. در جدول ۲، مشخصات مقاومتی خاموت ها و میلگردهای فلزی (آزمایش کشش مستقیم) نشان داده شده است.

شکل ۳. خاموت های ابداعی دست ساز ساخته شده از FRP

۴.۲. خصوصیات FRP و رزین به کار برده شده جهت ساخت خاموت. خاموت های دست ساز ابداعی با استفاده از الیاف FRP نوع کربن ساخته شده اند. مشخصات مکانیکی الیاف توسط شرکت سازنده در جدول ۳ ارائه شده است. این الیاف به صورت صفحه است، که بعد از محاسبه ی سطح مقطع مورد نیاز، با توجه به ضخامت ۰/۱۱ mm این الیاف از قطعه ی اصلی بریده شدند. سپس نوارهای بریده شده با استفاده از رزین اپوکسی اشباع، و در محل های مشخص شده بر روی میلگرد طولی نصب شدند. طول نوارهای بریده شده از صفحه ی اصلی، به گونه یی انتخاب شد که هر نوار یک دور کامل با لایه ی زیرین خود هم پوشانی داشته باشد. خاموت ها پس از نصب به مدت ۵ روز در دمای اتاق قرار گرفتند، تا چسب اپوکسی به مقاومت برسد (شکل ۳).

جدول ۳. خصوصیات صفحات الیاف کربنی CFRP به کار برده شده.

نام تجاری محصول	نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	کرنش نهایی (%)	ضخامت هر لایه از الیاف (mm)
YC-N200	کربن مقاومت بالا	۳۵۵۰	۲۳۵	۱/۵	۰/۱۱

۳. طراحی خاموت‌های FRP

طبق ضوابط آیین‌نامه‌ی ACI-۴۴۰-۱R^[۱۵] از ضریب تقلیل مقاومت برشی ۰٫۷۵ به منظور کاهش نیروی مقاوم اسمی (V_n) استفاده می‌شود. همچنین مطابق این آیین‌نامه، باید رابطه‌ی $\phi V_n \geq V_u$ برقرار باشد که در این رابطه V_n نیروی برشی مقاوم اسمی و V_u نیروی برشی وارده طبق آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸-۰۵^[۱۴] است. مقاومت برشی یک مقطع دارای میلگرد طولی فلزی و خاموت فلزی ناشی از مقاومت برشی بتن به‌علاوه مقاومت برشی تأمین‌شده توسط خاموت‌های فلزی است. در صورتی که مقطع دارای میلگرد طولی فلزی و خاموت FRP باشد، سهم مقاومت برشی تأمین‌شده توسط خاموت‌های FRP جایگزین سهم خاموت‌های فلزی در مقاومت برشی مقطع می‌شود.

به منظور محاسبه‌ی مقاومت برشی تأمین‌شده توسط خاموت‌های FRP می‌توان از رابطه‌ی ۱ مطابق آیین‌نامه‌ی ACI-۴۴۰-۱R استفاده کرد:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (۱)$$

که در این رابطه، V_f نیروی برشی تحمل‌شده توسط خاموت‌های FRP، A_{fv} سطح مقطع خاموت‌های FRP، s و d به ترتیب فاصله‌ی بین خاموت‌ها و عمق مؤثر مقطع هستند. f_{fv} نیز تنش مؤثر در خاموت‌های FRP است، که طبق پیشنهاد آیین‌نامه‌ی ACI-۴۴۰-۱R به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$f_{fv} = 0.704 E_f \quad (۲)$$

که در آن، E_f مدول کشسانی خاموت‌های FRP است. آیین‌نامه‌ی ACI-۴۴۰-۱R توصیه می‌کند که مقدار کمیته‌ی خاموت برشی مورد استفاده در مقطع، به میزان رابطه‌ی ۳ باشد:

$$A_{fv, \min} = 0.35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad (۳)$$

به منظور طراحی خاموت FRP معادل میلگرد فلزی به کاررفته در نمونه‌ی مرجع، با استفاده از روابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه، سطح مقطع موردنیاز برای خاموت‌های FRP مطابق رابطه‌ی ۴ با فرض کرنش ۰٫۴٪ برای خاموت‌های FRP محاسبه شدند (جدول ۴):

$$A_f = \frac{A_s F_y}{0.704 E_f} \quad (۴)$$

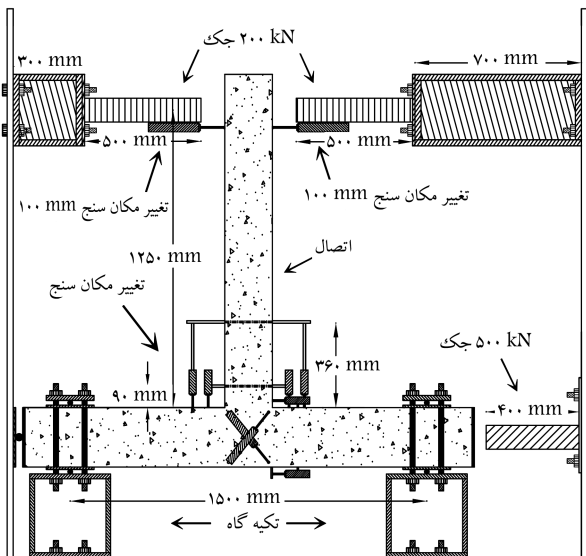
که در این رابطه، A_s سطح مقطع یک ساق خاموت فلزی و A_f سطح مقطع معادل خاموت FRP است. در شکل ۳، خاموت‌های نصب‌شده بر روی اتصالات نشان داده شده است.

۴. تنظیم نمونه‌ها برای آزمایش

جزئیات نمونه‌ها برای انجام آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور تعیین طول مفاصل خمیری و همچنین کرنش چشمه‌ی اتصال و دوران تیر و ستون

جدول ۴. مساحت معادل خاموت FRP.

مدول کشسانی الیاف FRP (GPa)	تنش تسلیم خاموت فلزی (MPa)	سطح مقطع یک ساق خاموت (mm ²)
۲۳۵	۲۶۰	۷٫۸
		۲۸٫۳



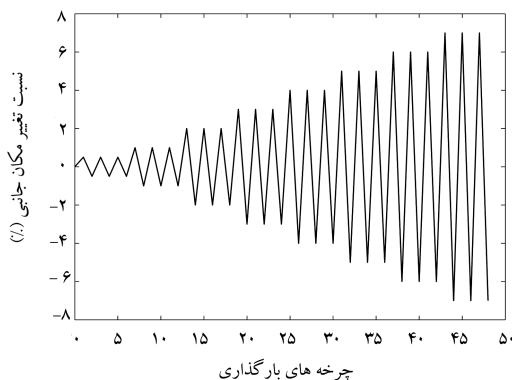
شکل ۴. جزئیات تنظیم نمونه‌ها برای آزمایش (Test Set-up).

اتصال، تغییر مکان سنج‌هایی (LVDT) مطابق شکل ۴ در محل‌های نشان داده‌شده نصب شد. از دو عدد LVDT به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان بالای تیر استفاده شد. همه‌ی ابزارهای اندازه‌گیری به منظور ثبت اطلاعات آنها، به دستگاه ثبت اطلاعات متصل شدند.

از دو جک ۲۰۰ kN، که به صورت افقی در بالای نمونه قرار داده شده‌اند، به منظور اعمال بار چرخه‌یی به انتهای تیر استفاده شد. به منظور اعمال بار محوری به ستون، یک جک ۵۰۰ kN در انتهای ستون قرار داده شد و انتهای دیگر ستون به تکیه‌گاه مفصلی متصل شد. نیروی محوری ثابت ۳۵۰ kN اعمال شده به ستون در طول آزمایش، ۲۰٪ بیشینه‌ی ظرفیت فشاری ستون بود که از طریق رابطه‌ی ۵ محاسبه شده است:

$$P_n = 0.85 f'_c (A_g - A_s) + A_s f_y \quad (۵)$$

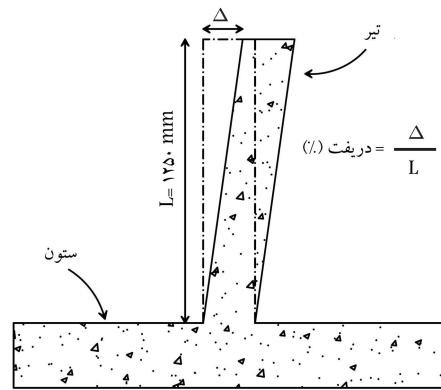
فاصله‌ی محل اعمال نیروی افقی به انتهای تیر تا بر ستون ۱۲۵۰ mm است. نیروی افقی اعمالی به تیر به صورت کنترل تغییر مکان با ۳ چرخه با دررفت ۰٫۷٪ با تغییر مکان ۶٫۲۵ mm آغاز شد تا ترک‌های کشسان خمشی نمایان شدند. در ادامه، ۳ چرخه با دررفت ۱٪ به تیر اعمال شد. مراحل بعدی بارگذاری شامل ۳ چرخه در هر دوره‌ی بارگذاری افزایشی مطابق شکل ۵ بود. مطابق شکل ۶، دررفت نسبی برابر



شکل ۵. تاریخچه‌ی بارگذاری اعمالی.

استهلاک انرژی خوب و رفتاری شکل‌پذیر هستند. همان طوری که از نمودارها مشخص است، نمونه JFD دارای رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به دو نمونه دیگر است. اولین تسلیم‌شدگی میلگردهای طولی تیر در نمونه JSD در لنگر ۱۴/۹kN.m و تغییرمکان ۱۱/۳۷mm، در نمونه JFD در لنگر ۱۵/۲kN.m و تغییرمکان ۹/۸۹mm و در نمونه JFU در لنگر ۱۸/۹۳kN.m و تغییرمکان ۱۲/۴۴mm رخ داده است. در نمونه JFD، در تغییرمکان کمتری نسبت به دو نمونه دیگر دچار تسلیم‌شدگی میلگردهای طولی شده است، به طوری که تغییرمکانی که در آن اولین تسلیم‌شدگی در نمونه JFD رخ داده است، نسبت به تغییرمکان تسلیم‌شدگی نمونه‌های JSD و JFU به ترتیب ۱۳٪ و ۲۰٪ کاهش نشان می‌دهد. میزان شکل‌پذیری نمونه که بر اساس نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان جاری شدن (Δ_u / Δ_y) تعریف می‌شود، در نمونه‌های JSD، JFD و JFU به ترتیب ۷/۵، ۸/۶ و ۶/۸ است. در محاسبه ضریب شکل‌پذیری اتصالات، تغییرمکان نهایی ۸۵mm در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده ترک‌های اولیه در اتصالات، بارگذاری اعمالی به اتصالات از دررفت ۰/۵٪ آغاز شد. کلیه اتصالات در این تغییرمکان دچار ترک‌هایی در ناحیه عرض تیر شدند. در نمونه JSD در دررفت ۱٪ نخستین ترک‌ها در ناحیه چشمه اتصال و تشکیل ترک‌های مورب دنباله‌دار به صورت قطری کامل در ناحیه چشمه اتصال به شکل ضرب‌دری ملاحظه شد. برای نمونه JFD و JFU، نخستین ترک‌ها در ناحیه چشمه اتصال در دررفت ۱٪ ملاحظه شد. در شکل ۹، منحنی تغییرات کرنش قطری در چشمه اتصال، که به وسیله LVDT‌های ضرب‌دری تعبیه شده در چشمه اتصال اندازه‌گیری شده‌اند، نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که نتایج نشان داده شده در شکل ۹ به صورت تغییر طول LVDT در هر لحظه بخش بر فاصله بین دو انتهای LVDT است. برای اتصالات JSD، JFD و JFU به ترتیب بیشینه کرنش فشاری ثبت شده به وسیله LVDT‌های قطری ناحیه چشمه اتصال در انتهای بارگذاری ۱، ۱/۸ و ۲ درصد به دست آمد. همچنین بیشینه کرنش کششی LVDT‌های قطری ناحیه چشمه اتصال در انتهای بارگذاری به ترتیب ۱/۶۵، ۱/۷۸ و ۱/۷۶ درصد محاسبه شد. با ادامه بارگذاری، روند گسترش عرض ترک‌ها ادامه یافت. در دررفت‌های ۲ تا ۷ درصد، تعداد ترک‌ها بیشتر شد و عرض ترک‌های قبلی نیز افزایش یافت. در انتها، ترک‌های برشی مورب در تیر و در نزدیکی اتصال آن به ستون رخ داد. همچنین گسترش ترک‌ها و افزایش عمق آن‌ها در ناحیه چشمه اتصال ادامه یافت، که این روند تا انتهای بارگذاری تکرار شد. در ادامه، با رسیدن به دررفت ۷٪ آزمایش به پایان رسید.



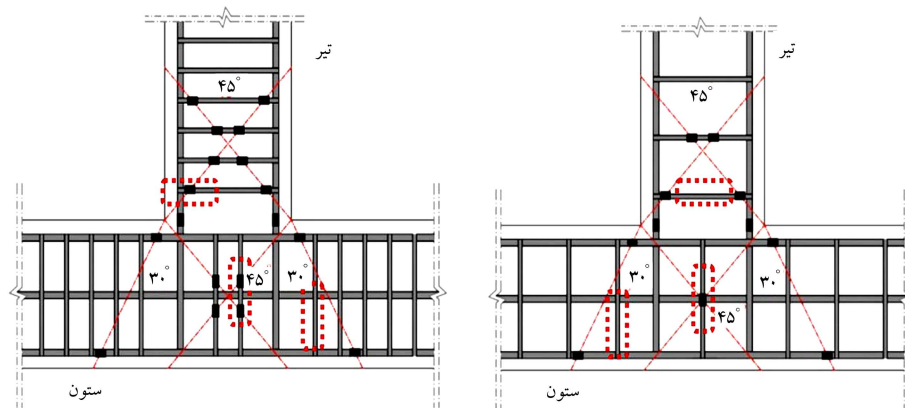
شکل ۶. دررفت اعمالی.

با خارج قسمت جابجایی وارده به انتهای تیر بخش بر فاصله محل اعمال بار تا بر ستون است. در اتصالات بتنی به منظور ثبت اطلاعات بر روی خاموت‌ها و همچنین میلگردهای طولی تیر و ستون، در هر ۳ نمونه (مطابق شکل ۷) کرنش‌سنج‌هایی نصب شد.

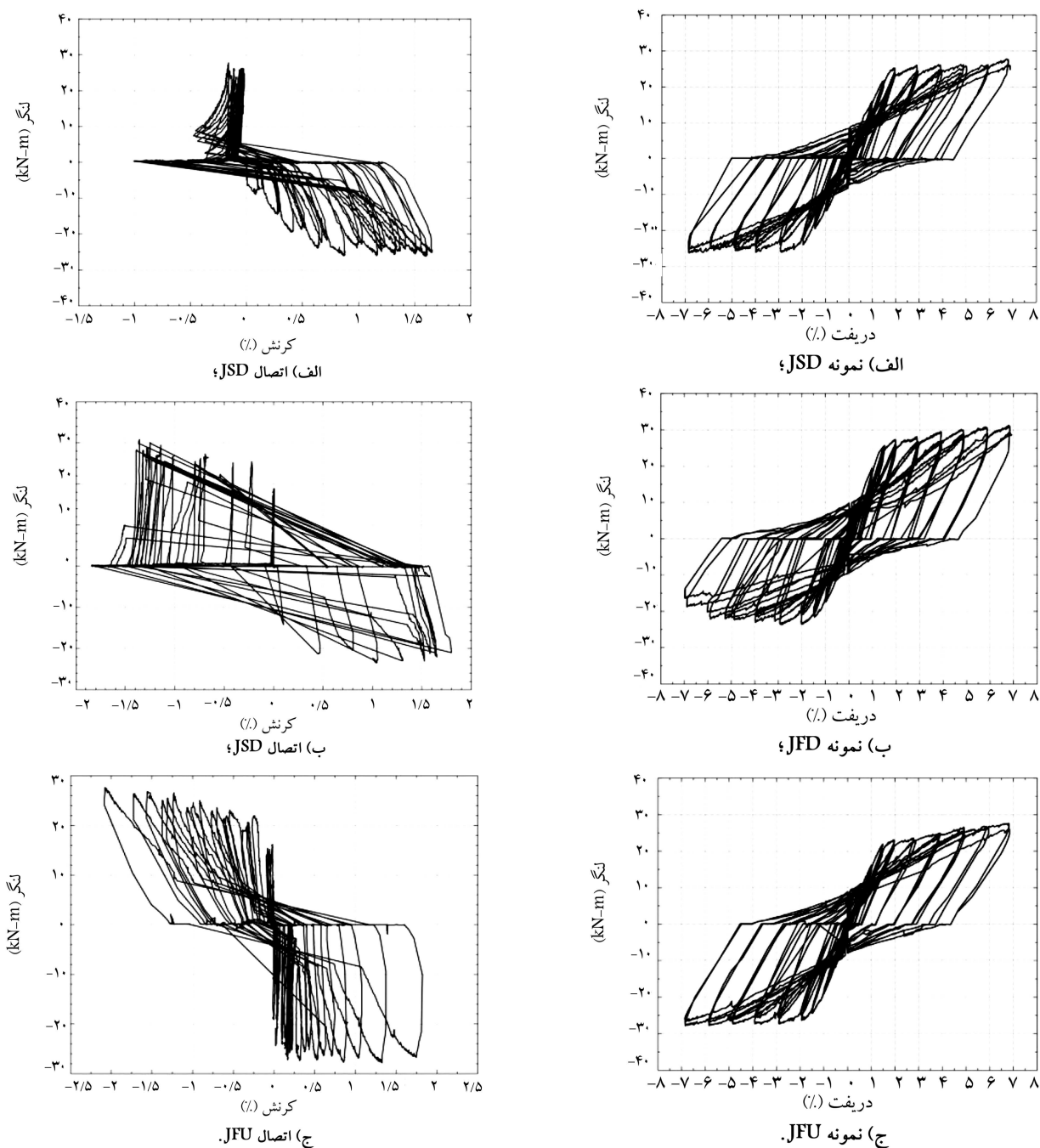
۵. مشاهدات و نتایج آزمایش

۱.۵. رفتار چرخه‌یی اتصالات

در شکل ۸، منحنی لنگر-دررفت ۳ نمونه اتصال نشان داده شده است. این منحنی بیانگر رفتار پایدار اتصالات تا دررفت ۷٪ است. دو نمونه JSD و JFD دارای رفتار تقریباً مشابهی هستند. در هر ۳ نمونه، مفصل خمیری به دلیل رعایت ایده تیر ضعیف-ستون قوی در تیر تشکیل شده‌اند و به دلیل قوی‌تر بودن ستون نسبت به تیر، کرنش‌های خمیری کمتری در ناحیه چشمه اتصال به وجود آمده است. انهدام کلیه اتصالات در ناحیه تیر رخ داده است. در طول اعمال کلیه تغییرمکان‌ها، کاهش مقاومت در هر ۳ نمونه به چشم نمی‌خورد و نمونه‌ها تغییرمکان‌های بالا را بدون افت مقاومت سپری کرده‌اند. نمونه‌های JSD، JFD و JFU در تغییرمکان نهایی ۸۵mm در انتهای تیر به ترتیب لنگر نهایی ۲۶/۶kN.m، ۳۱/۳kN.m و ۲۷/۹kN.m را تحمل کردند. نمونه JFD دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۱۸٪ بیشتر از نمونه JSD و ۱۲٪ بیش از نمونه JFU بود. مطابق شکل ۸، نمونه‌ها به دلیل زیاد بودن فاصله بین سیکل‌های متوالی، دارای



شکل ۷. محل نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی میلگردها و خاموت‌ها.



شکل ۸. منحنی لنگر-دریفت اتصالات.

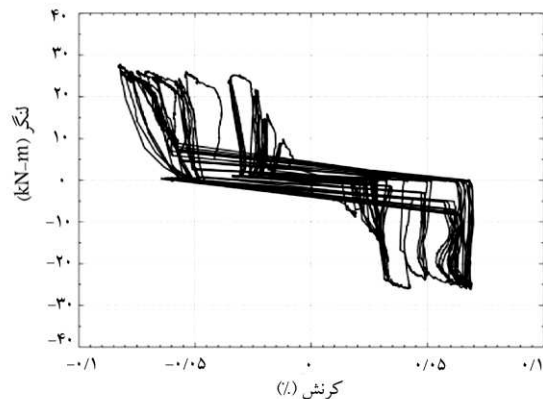
شکل ۹. کرنش فشاری و کششی LVDT‌های قطری در ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال.

نمودار، کرنش خاموت فلزی در نمونه‌ی JSD به مقدار بیشینه‌ی ۰/۰۸۳٪ و کرنش خاموت‌های FRP در نمونه‌های JFU و JFD به ترتیب به مقدار بیشینه‌ی ۰/۰۸۸٪ و ۰/۰۶۱٪ در انتهای بارگذاری رسید. در شکل ۱۲، منحنی کرنش خاموت در چشمه‌ی اتصال بر حسب لنگر وارده به اتصال نشان داده شده است. بیشینه‌ی کرنش نمونه‌های JSD، JFU و JFD در انتهای بارگذاری به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۱۹ و ۰/۰۶ درصد است. در شکل ۱۳، منحنی لنگر-کرنش اولین خاموت ستون نشان داده شده است. مطابق این شکل، بیشینه‌ی کرنش خاموت‌ها در نمونه‌های JSD، JFU و JFD در پایان بارگذاری به ترتیب ۰/۰۶۸، ۰/۰۵۱ و ۰/۰۷۴ و

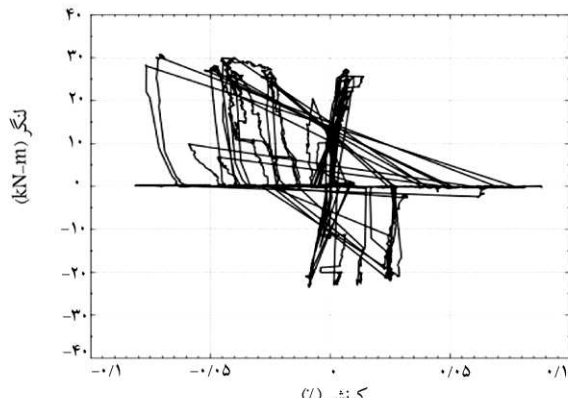
در شکل ۱۰، نحوه‌ی ترک‌خوردگی اتصالات در پایان آزمایش‌ها نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود، شکل گسیختگی در کلیه‌ی نمونه‌های اتصال به‌صورت برشی است که با وقوع ترک‌های ۴۵ درجه در ناحیه‌ی ابتدایی اتصال تیر به ستون رخ داده است.

۲.۵. کرنش خاموت‌های اتصال

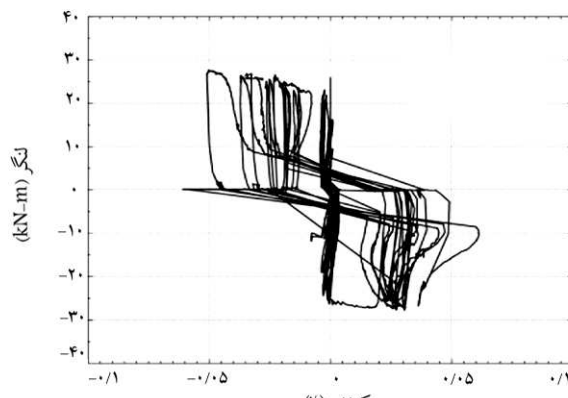
در شکل ۱۱، منحنی کرنش اولین خاموت تیر که در فاصله‌ی ۵۰ mm از بر ستون اتصال قرار دارد، بر حسب لنگر وارده نشان داده شده است. مطابق این



الف) اتصال JSD؛

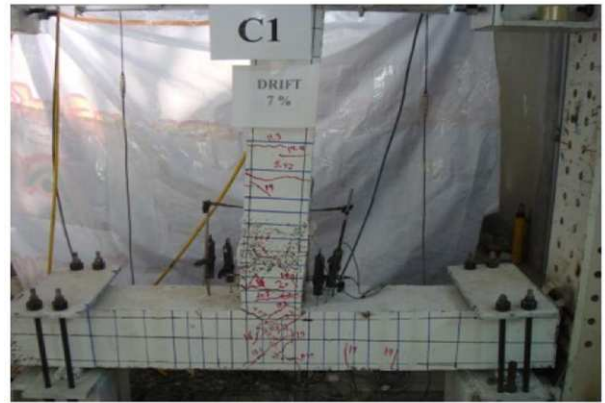


ب) اتصال JSD؛



ج) اتصال JFU.

شکل ۱۱. کرنش اولین خاموت تیر در اتصالات.



الف) اتصال JSD؛



ب) اتصال JSD؛



ج) اتصال JFU.

شکل ۱۰. نمونه‌ی اتصالات در انتهای بارگذاری.

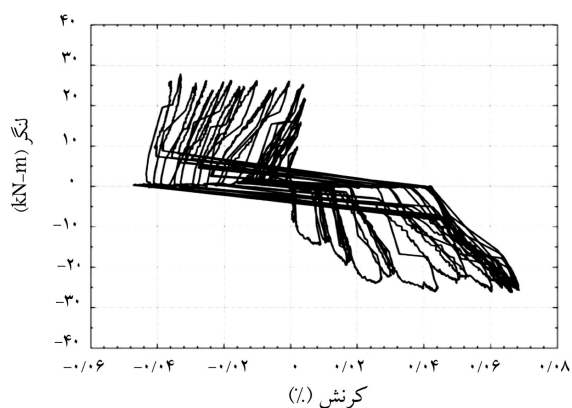
جدول ۵. کرنش بیشینه نمونه‌ها برای اولین خاموت تیر و ستون خاموت واقع در چشمه‌ی اتصال.

نمونه	بیشینه‌ی خاموت اول تیر (%)	بیشینه‌ی کرنش خاموت چشمه‌ی اتصال (%)	بیشینه‌ی کرنش خاموت اول ستون (%)
JSD	۰٫۰۸۲	۰٫۱۹	۰٫۰۶۸
JFD	۰٫۰۸۸	۰٫۲۴	۰٫۰۵۱
JFU	۰٫۰۶۱	۰٫۰۶	۰٫۰۷۴

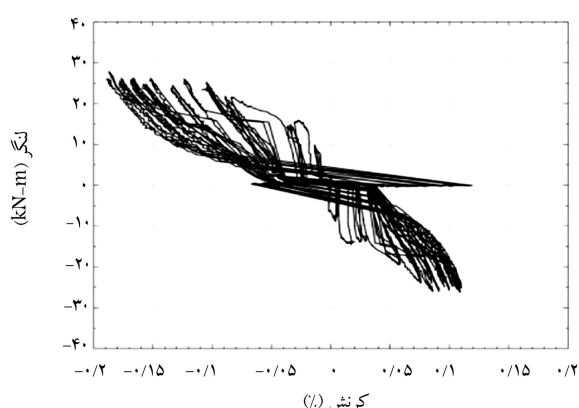
درصد است. در جدول ۵، مقادیر بیشینه کرنش وارد بر هر نمونه برای اولین خاموت تیر و ستون و همچنین خاموت واقع در چشمه‌ی اتصال نشان داده شده است.

۳.۵. لنگر انحنا

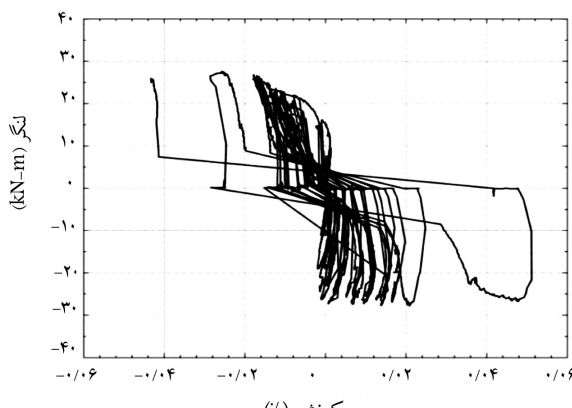
منحنی لنگر-انحنا برای یک مقطع بتن‌آرمه، ویژگی‌های خمشی غیرخطی آن مقطع را به‌طور دقیق بیان می‌کند. در واقع این منحنی نشان می‌دهد که برای یک مقطع مشخص بتنی همراه با توزیع معین میلگردهای طولی، به ازای یک نیروی محوری



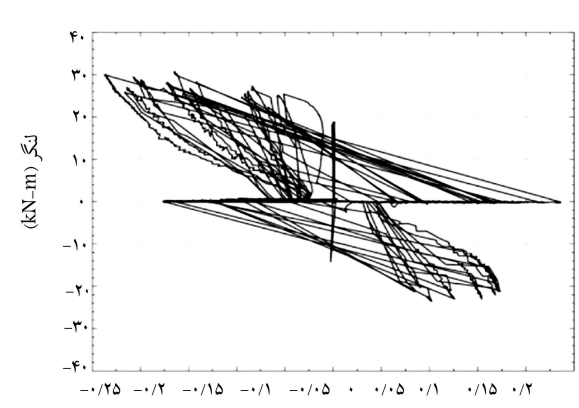
الف) اتصال JSD؛ کرنش (%)



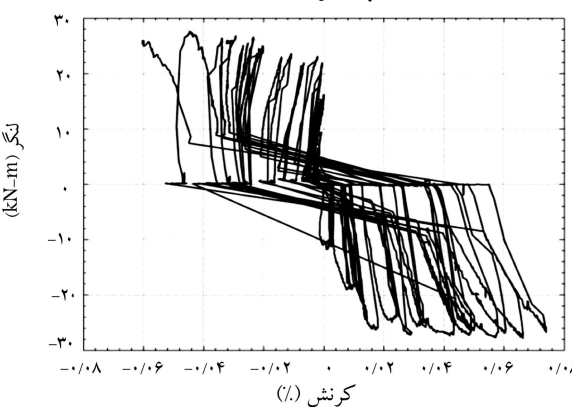
الف) اتصال JSD؛ کرنش (%)



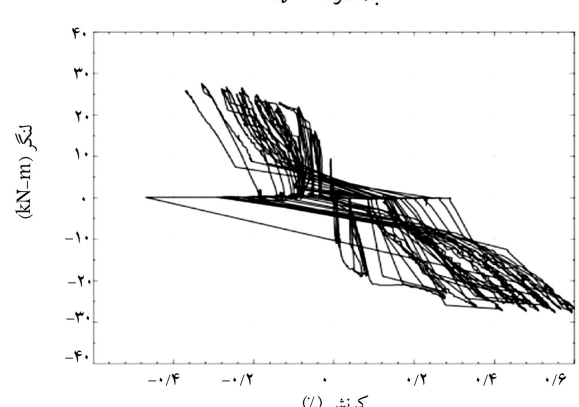
ب) نمونه JFD؛ کرنش (%)



ب) نمونه JFD؛ کرنش (%)



ج) اتصال JFU؛ کرنش (%)



ج) نمونه JFU؛ کرنش (%)

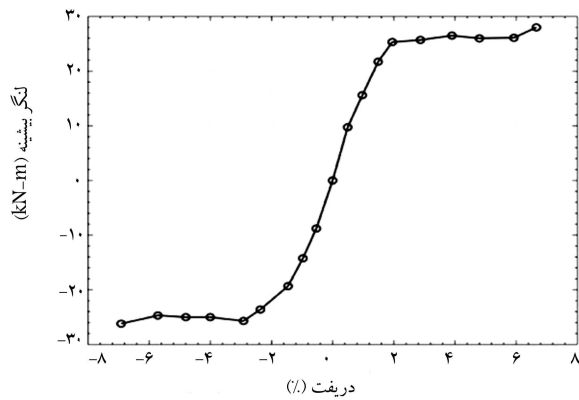
شکل ۱۳. منحنی لنگر-کرنش اولین خاموت ستون.

شکل ۱۲. کرنش خاموت ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال.

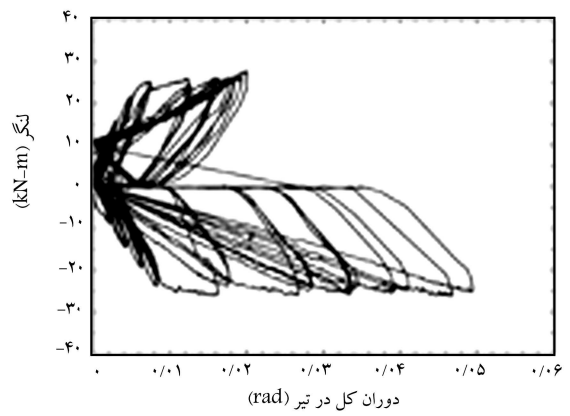
۴.۵. پوش منحنی لنگر-دریفت

در شکل ۱۵، منحنی پوش لنگر-دریفت ملاحظه می‌شود. نمونه‌ها دارای منحنی پوش با نرخ افزایشی چندگانه هستند. مطابق شکل ۱۵ الف، نمونه‌ی JSD تا دریفت ۲٪ تقریباً دارای افزایش خطی است. از دریفت ۲٪ تا دریفت ۷٪ منحنی پوش دچار شکستگی شده است. این نمونه از دریفت ۲٪ تا ۶٪ افزایش چندانی در مقدار لنگر نشان نمی‌دهد. در شاخه‌ی منفی، منحنی از دریفت ۳٪ تا دریفت ۶٪ کاهش نشان می‌دهد؛ ولی در دریفت ۷٪ افزایش مقاومت دارد. همان‌طور که در شکل ۱۵ ب نشان داده شده است، نمونه‌ی JFD نیز تا دریفت ۲٪ دارای

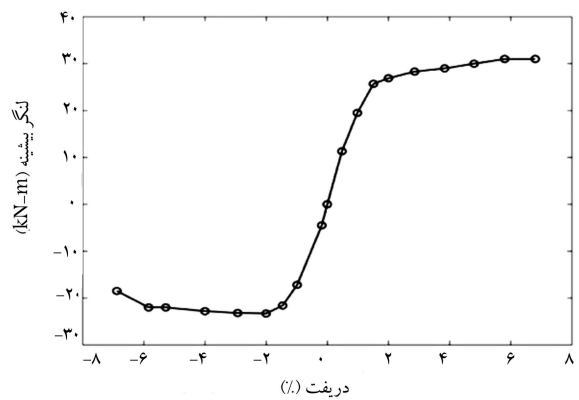
خاص، مقطع در هر انحناء نسبت به وضعیت اولیه‌ی خود دارای چه لنگری خواهد بود. برای تعیین منحنی لنگر-انحناء باید شکل هندسی مقطع، محل میلگردها و قطر آنها، منحنی‌های تنش-کرنش فولاد و بتن، نیروی محوری اعمالی به مقطع و جهت لنگر معلوم باشد. در شکل ۱۴، منحنی لنگر-انحناء مقطع تیر اتصال واقع در ۵۰ mm بر ستون نشان داده شده است. بیشینه‌ی دوران مقطع برای نمونه‌های JSD، JFD و JFU، به ترتیب برابر ۵/۰، ۵۸/۰ و ۵۷/۰ رادیان است. نمونه‌ی JFD دارای انحنای مقطع بزرگ‌تری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر است. بیشینه‌ی زاویه‌ی انحناء برای نمونه‌ی JFD، نسبت به نمونه‌های JSD و JFU، به ترتیب ۱۶ و ۲ درصد بیشتر است.



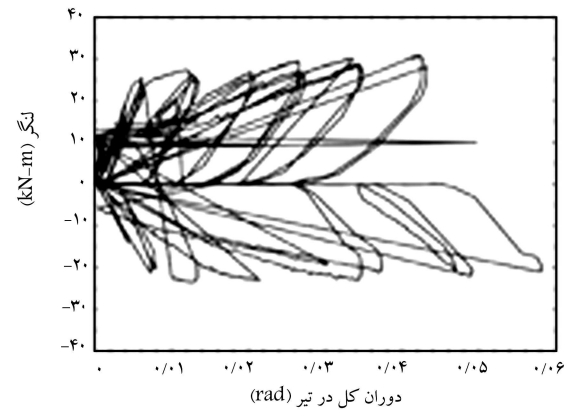
الف) منحنی پوش لنگر - دررفت نمونه JSD



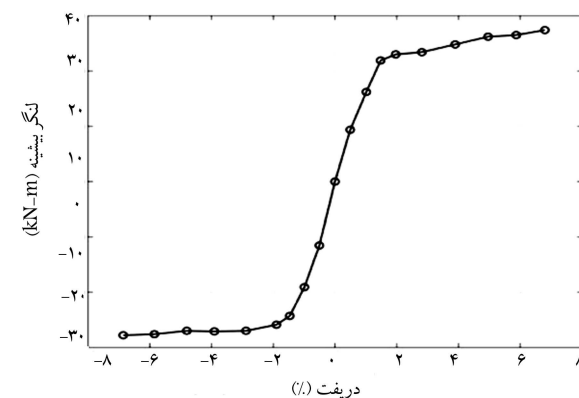
الف) اتصال JSD؛ دوران کل در تیر (rad)



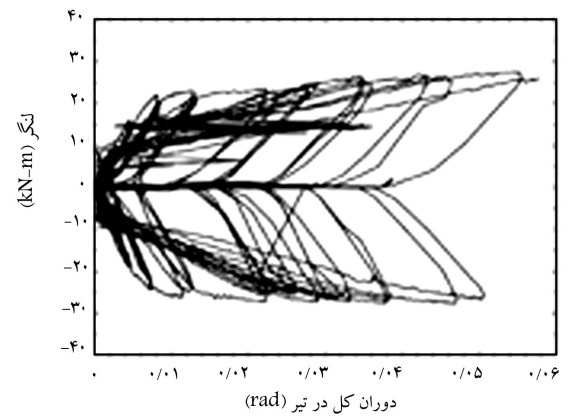
ب) منحنی پوش لنگر - دررفت نمونه JFD



ب) نمونه JFD؛ دوران کل در تیر (rad)



ج) منحنی پوش لنگر - دررفت نمونه JFU



ج) نمونه JFU؛ دوران کل در تیر (rad)

شکل ۱۵. منحنی پوش لنگر دررفت اتصالات.

شکل ۱۴. منحنی لنگر - انحناء تیر اتصالات.

مثبت و به میزان ۱۲/۳٪ بیش از نمونه مرجع است. نمونه JFU دارای بیشینه مقدار لنگر منفی است، که به میزان ۶٪ بیش از نمونه مرجع است.

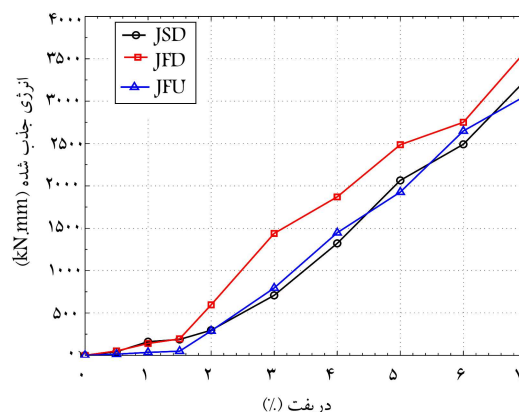
۵.۵. جذب انرژی

منحنی جذب انرژی هر اتصال می‌تواند از مجموع مساحت حلقه‌های هیترتزیس در دررفت‌هایی که بار کمتر از ۸۵٪ بیشینه بار نیست، به دست آید. در شکل ۱۶، انرژی جذب‌شده به وسیله ۳ اتصال نشان داده شده است. هر ۳ نمونه تا دررفت ۱/۵٪ تقریباً دارای مقدار جذب انرژی پایینی هستند، به طوری که در این دررفت

نرخ افزایش خطی است و از دررفت ۲٪ تا ۷٪ دارای نرخ افزایشی کمتری است. در انتهای دوره بارگذاری این نمونه در شاخه منفی دچار افت بار شده است. منحنی پوش لنگر - دررفت نمونه JFU نیز در شکل ۱۵ ج نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود، این نمونه تا دررفت ۱/۵٪ دارای شیبی تند و از دررفت ۱/۵٪ تا ۷ درصد دارای شیب کندتری است. در این نمونه تا انتهای بارگذاری هیچ‌گونه کاهش ظرفیتی ملاحظه نشده است. در جدول ۶ مقدار بیشینه لنگر مثبت و منفی برای هر نمونه نشان داده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، نمونه JFD دارای بیشینه مقدار لنگر

جدول ۶. بیشینه‌ی لنگر مثبت و منفی در نمونه‌ها.

نمونه	M_{\max}^+ (kN)	M_{\max}^- (kN)	تغییرات نسبت به نمونه‌ی مرجع (JSD)	
			M_{\max}^+ (%)	M_{\max}^- (%)
JSD	۲۷,۸۳	۲۶,۲۵	-	-
JFD	۳۱,۲۵	۲۳,۷۵	+۱۲,۳	-۹,۵۲
JFU	۲۷,۶۶	۲۷,۸۴	-۰,۶۱	+۶



شکل ۱۶. مقدار انرژی جذب شده در سیکل‌های مختلف.

مقادیر جذب انرژی برای نمونه‌های JSD، JFD و JFU به ترتیب ۱۸۷kN.mm، ۱۹۴kN.mm و ۲۸kN.mm است. از دریفت ۲٪ اختلاف بین مقدار انرژی جذب شده در نمونه‌ی JFD با دو نمونه‌ی دیگر به تدریج افزایش می‌یابد. نمونه‌های JSD و JFU دارای اختلاف کمی هستند، به طوری که بیشینه‌ی اختلاف بین مقادیر جذب انرژی دو نمونه ۱۹۱kN.mm است. نمونه‌ی JFD دارای بیشترین مقدار جذب انرژی در بین ۳ نمونه است، به طوری که بیشینه‌ی مقدار جذب انرژی برای این نمونه در دریفت ۷٪، ۳۶۱۰kN.mm است، که به ترتیب ۱/۱ برابر و ۱/۱۸ برابر برابر بیشینه‌ی انرژی جذب شده در دریفت ۷٪ برای نمونه‌های JSD و JFU است.

۶. نتیجه‌گیری

۱. مطابق آزمایش‌های انجام شده ملاحظه شد که در طول دوره‌ی بارگذاری کاهش مقاومتی در هر ۳ نمونه‌ی اتصال مشاهده نشده است و تقریباً هر ۳ اتصال دوره‌ی بارگذاری را بدون افت مقاومت سپری کرده‌اند. خاموت‌های FRP ساخته شده به صورت دست‌ساز دارای عملکرد مناسبی در مقایسه با خاموت‌های فلزی تحت بارهای چرخه‌یی هستند. به طوری که نمونه‌ی دارای خاموت FRP شکل‌پذیر نسبت به نمونه‌ی دارای خاموت فلزی شکل‌پذیر دارای اضافه‌ی ظرفیتی به میزان ۱۸٪ و نسبت به نمونه‌ی دارای خاموت FRP غیرشکل‌پذیر دارای اضافه‌ی ظرفیتی به میزان ۱۲٪ بود.

۲. بر پایه‌ی آزمایش‌های صورت گرفته، ضریب شکل‌پذیری (Δ_u/Δ_y) برای نمونه‌ی دارای خاموت FRP شکل‌پذیر به ترتیب ۱/۱۵ و ۱/۲۶ برابر نمونه‌ی دارای خاموت فلزی و نمونه‌ی دارای خاموت FRP غیرشکل‌پذیر است.

۳. نتایج آزمایش نشان داد که کرنش در خاموت‌های FRP تا مقدار ۰/۰۶٪ نیز رسیده است، که ۱/۵ برابر مقادیر مجاز آیین‌نامه‌یی است. کرنش بالا در خاموت‌های دست‌ساز FRP، نشان‌دهنده‌ی مزیت این خاموت‌ها نسبت به خاموت‌های متعارف FRP است.

۴. بررسی‌های انجام شده بر روی دوران مقطع تیر نشان داد که نمونه‌ی دارای خاموت FRP شکل‌پذیر دارای بیشینه‌ی زاویه‌ی دوران مقطع ۵۸Rad° است، که نسبت به نمونه‌ی دارای خاموت فلزی ۱۶٪ و نسبت به نمونه‌ی دارای خاموت FRP غیرشکل‌پذیر ۲٪ افزایش نشان می‌دهد.

۵. مطالعات انجام شده نشان داد که نمونه‌ی دارای خاموت FRP شکل‌پذیر دارای قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر است، به نحوی که بیشینه‌ی مقدار جذب انرژی برای این نمونه، ۳۶۱۰kN.mm است؛ که ۱/۱ برابر نمونه‌ی دارای خاموت فلزی و ۱/۱۸ برابر نمونه‌ی دارای خاموت FRP غیرشکل‌پذیر است.

منابع (References)

- Jalali, M., Sharbatdar, M.K., Chen J.F., Jandaghi Alaei, F., "Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars", *Construction and building materials*, **36**(11), pp.990-1000 (2012).
- Sharbatdar, M.K. "Concrete columns and beams reinforced with FRP bars and grids under monotonic and reversed cyclic loading", Ph.D. Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada (2003).
- Sharbatdar, M.K. and Saatcioglu, M. "Behavior of FRP reinforced concrete under simulated seismic loading", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada (2004).
- Sharbatdar, M.K. and Saatcioglu, M. "Flexural behavior of FRP reinforced concrete beams under reversed cyclic loading", *Fourth International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-IV*, Calgary, Canada (2004).
- ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI440.1R-03, American Concrete Institute, USA, 41 p. (2003).
- Canadian Standards Association, S806-02, *Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers*, CSA, Rexdale Ontario (May 2002).
- Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series 23, Tokyo (1997).

8. Nanni, A. "North America design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications, and unresolved issues", *FRP Composites in Civil Engineering*, **1**, Conference proceeding, Hong Kong (2001).
9. Barris, C., Torris, L., Turon, A. and Baena, M. "An experimental study of the flexural behavior of GFRP RC beams and comparison with prediction models", *Composite Structures*, **91**(3), pp. 286-295 (2009).
10. Ferreira, A., Camanho, P.P., Marques, A.T., Fernandes, A.A. "Modeling concrete beams reinforced with FRP rebars", *Composite Structures*, **53**, pp. 107-116 (2001).
11. Al-Salloum, Y.A., Alsayed, S.H., Almusallam, T.H. and Siddiqui, N.A. "Seismic behavior of FRP-upgraded exterior RC beam-column joints", *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3 (2009).
12. Sharbatdar, M.K., Saatcioglu, M. and Benmokrane, B. "Seismic flexural behavior of concrete connections reinforced with CFRP bars and", *Composite Structures*, **93**(10), pp. 2439-2449 (2011).
13. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800, 3rd edition, Building and Housing Research Center (2004).
14. ACI Committee 318, —it Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), Farmington Hills (MI): American Concrete Institute (2005).