

# بررسی رفتار تیرهای وصله دار مسلح شده با میلگردهای GFRP به کمک آزمایش های استاتیکی و مودال

سید روح... موسوی (دانشجوی دکتری)

محمدرضا اصفهانی\* (استاد)

براعتلی محمدزاده (استادیار)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)  
دربی ۲ - ۲۹، شماره ی ۳، ص. ۲۵-۳۶

مقاومت پیوستگی تیرهای وصله دار مسلح شده با میلگرد GFRP به دلیل تفاوت در شکل سطح جانبی و مدول کشسانی ماده ی مسلح کننده نسبت به تیرهای مسلح شده با فولاد متفاوت است. در این نوشتار، اثر مدول کشسانی میلگردهای FRP در روابط مقاومت پیوستگی وارد و با نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه ی ACI 440.1R-03 مقایسه شده است. برای این منظور ۷ نمونه ی آزمایشگاهی تیرهای مسلح شده با میلگردهای GFRP ساخته شده است. در نمونه های مذکور، طول وصله، مقاومت بتن و میلگرد جانبی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده اند. در آزمایش استاتیکی، منحنی های بار-تغییر مکان برداشت شده اند تا به کمک آن مقاومت پیوستگی و شکل پذیری نمونه ها بحث و بررسی شوند. در بین هر گام بارگذاری استاتیکی، آزمایش مودال انجام می گیرد. با استفاده از این آزمایش تغییرات بسامدهای طبیعی در گام های خسارت ارزیابی و رابطه ی بین این تغییرات با پارامترهای وصله و شکل پذیری بررسی می شود. نتایج مقاومت پیوستگی نشان می دهند که رابطه ی اصلاح شده در این نوشتار مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین، شکل پذیری نمونه ها با افزایش میلگرد جانبی، طول وصله و مقاومت بتن زیاد شده است و در نمونه های شکل پذیرتر، افت بسامدها در گام های بارگذاری بیشتر بوده است.

**واژگان کلیدی:** آزمایش مودال، پیوستگی، شکل پذیری، طول وصله، بسامد، میلگرد جانبی، میلگردهای GFRP.

## ۱. مقدمه

می توان دگرگونی سیستم سازه یی و رفتار آن را پیش بینی کرد. استفاده از بسامدهای طبیعی، قدیمی ترین و معروف ترین روش در ارزیابی سیستم خسارت دیده است. این ویژگی بیشترین کاربرد را برای تخمین خسارت در گذشته و حال حاضر دارد. در سال ۱۹۷۹، نخستین پژوهش های وابسته به تخمین خسارت صورت گرفت،<sup>[۱]</sup> و بر اساس این روش پیشنهادی، با استفاده از تغییرات بسامدهای طبیعی سازه ی خسارت دیده، به کشف موقعیت خسارت پرداخته شد. از دیگر مشخصه های مهم دینامیکی سازه ها، شکل های مود است که در ارزیابی سیستم مورد استفاده قرار می گیرند. اندازه گیری شکل های مود مشکل تر از بسامدهای طبیعی است. مودهای به دست آمده از آزمایش مودال دارای مقداری اغتشاش هستند. برخی پژوهشگران برای کاهش این اغتشاشات و هموارسازی مودها، از روش تاوانی باقیمانده ی وزنی<sup>۱</sup> استفاده کردند.<sup>[۲]</sup> برخلاف اجزاء محدود که در آن مشخصه های سازه موجود است و هدف یافتن پاسخ هاست، در به هنگام سازی مدل اجزاء محدود، مشخصه های سازه ی آسیب دیده از روی پاسخ های آن به دست می آیند. همچنین در پژوهشی دیگر، کاهش سختی خمشی ناشی از ترک خوردگی تیرهای بتن مسلح را با کاهش مدول کشسانی شبیه سازی کردند. سپس، سختی خمشی تیرهای ترک خورده را از

در میان مواد جایگزین فولاد در سازه های بتن مسلح، استفاده از میلگردهای FRP به عنوان ماده ی مسلح کننده رو به گسترش است. این مواد بر خلاف دوام بالا، شکل پذیری خوبی در مقابل خوردگی و مقاومت کششی زیاد ندارند. بنابراین، باید تمهیداتی برای افزایش شکل پذیری سازه های بتنی مسلح شده با FRP در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، پیوستگی بین بتن و این میلگردها به علت تفاوت در سطح جانبی و مشخصات مکانیکی، با میلگردهای فولادی متفاوت است. در مقاومت پیوستگی پارامترهای زیادی از قبیل: مقاومت بتن، پوشش بتن، فاصله ی بین میلگردها، قطر میلگرد، میلگرد جانبی، شکل رویه ی میلگرد، و مشخصات مکانیکی میلگرد مؤثرند. به دلیل پیچیدگی پدیده ی پیوستگی، علی رغم سال ها تلاش و تحقیق، راه حل تئوریک پیدا نشده است که بتواند اثر همه ی پارامترها را در نظر بگیرد و بیشتر تحقیقات از طریق آزمایش و آزمون و خطا بوده است.

هنگامی که یک تیر تحت بارگذاری ترک می خورد، سختی کاهش و میرایی آن افزایش می یابد و در نتیجه پارامترهای ارتعاشی آن تغییر می کنند. از این تغییرات

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۰/۵/۱۹، پذیرش ۱۳۹۰/۶/۲۶

se.mu15@stu-mail.um.ac.ir  
esfahani@um.ac.ir  
mohamadzaad@um.ac.ir

در نمونه‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی، شیشه‌ی شیاردار (Ribbed) و دورپیچ شده با نخ (Thread wrapped) را بررسی کردند، و نتایج آنها نشان داد که نمونه‌های با میلگرد GFRP شیاردار همانند فولادی در مود شکافت (Splitting) پوشش بتن و نمونه‌های با GFRP دورپیچ شده با نخ در مود بیرون کشیدگی میلگرد (Pullout) گسیخته می‌شوند. آنها همچنین اثر سطح جانبی میلگرد در مقاومت پیوستگی را بررسی کردند، و در تمام نمونه‌ها مقاومت پیوستگی میلگردهای GFRP دو تا سه برابر کمتر از میلگردهای فولادی بوده است.<sup>[۱۹]</sup>

در این نوشتار، ابتدا اثر مدول کشسانی میلگردهای پلیمری در روابط مقاومت پیوستگی وارد شده است. پس از آن با انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی که با روابط مذکور طراحی شده‌اند، درستی رابطه‌ی پیشنهادی ارزیابی شده است. از طرف دیگر، تغییرات بسامدها در گام‌های بارگذاری از آزمایش مودال و شکل‌پذیری نمونه‌ها از آزمایش استاتیکی استخراج شده‌اند. در ادامه، رابطه‌ی بین شکل‌پذیری با تغییرات بسامدها و پارامترهای طول وصله، میلگرد جانبی، و مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. محاسبه‌ی مقاومت پیوستگی و طول وصله

محققان برای محاسبه‌ی طول وصله‌ی  $L_d$  بتن مسلح شده با میلگردهای فولادی معادله‌ی ۱ را پیشنهاد کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

$$L_d = \frac{T}{a\sqrt{f'_c}} = \frac{A_b f_y}{a\sqrt{f'_c}} \quad (1)$$

که در آن  $a$  از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$a = \gamma_1 \gamma_2 d_b \frac{C/d_b + 0.5}{C/d_b + 3.76} \quad (2)$$

در رابطه‌های ۱ و ۲،  $f_y$  تنش تسلیم میلگردهای فولادی (MPa)،  $A_b$  سطح مقطع یک میلگرد طولی ( $\text{mm}^2$ )،  $f'_c$  مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌یی بتن (MPa)،  $L_d$  طول وصله (mm)،  $d_b$  قطر میلگرد (mm) و  $C$  کوچک‌ترین سه مقدار  $C_x$ ،  $C_y$  و  $(C_s + d_b)/2$  است.  $C_x$  پوشش جانبی (mm)،  $C_y$  پوشش بالایی یا پایینی (mm) و  $C_s$  فاصله‌ی بین میلگردهای وصله شده (mm) است. در رابطه‌ی ۱، برای میلگردهای FRP به جای تنش تسلیم از تنش نهایی شکست  $f_{fu}$  استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۱ در صورتی قابل استفاده است که به منظور یکنواخت کردن تنش پیوستگی در طول وصله و افزایش شکل‌پذیری، مقداری میلگرد جانبی در طول وصله قرار داده شود. این مقدار میلگرد جانبی از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\frac{A_t}{S} = \frac{67C}{f_R A_b} \left\{ \frac{1.63M}{[(M+1)(0.88 + 0.12 \times (C_{Med}/C))]} - 1 \right\} \quad (3)$$

در این رابطه،  $C_{Med}$  عدد میانی سه مقدار  $C_x$ ،  $C_y$  و  $(C_s + d_b)/2$  است، همچنین  $f_R = 1$  برای  $R_r < 0.11$  و  $f_R = 1.6$  برای  $R_r \geq 0.11$  است.  $R_r$  سطح نسبی آج،  $A_t$  سطح مقطع یک ساق میلگرد جانبی ( $\text{mm}^2$ ) و  $S$  فاصله‌ی میلگردهای جانبی دور وصله (mm) است. پارامتر  $M$  نیز معرف توزیع تنش پیوستگی در طول وصله است. هر چه مقدار  $M$  به ۱ نزدیک‌تر باشد، توزیع تنش پیوستگی در طول وصله یکنواخت‌تر خواهد بود. برای مقادیر بزرگ  $M$ ، مقاومت پیوستگی در طول وصله به شدت کاهش می‌یابد. مقدار  $M$  از طریق رابطه‌ی ۴

کمینه‌سازی مشخصه‌های مودال تجربی و عددی به صورت تکراری تخمین زدند.<sup>[۲۱]</sup> در پژوهش دیگری نیز آزمایش مودال بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورقه‌های CFRP انجام شد، و در آن تغییرات بسامدها و برخی از شاخص‌های خسارت در فرایند ایجاد خسارت و تقویت بررسی شد.<sup>[۱]</sup> به عبارت دیگر، میزان اثربخشی مقاوم‌سازی از روی تغییرات مشخصه‌های ارتعاشی ارزیابی شده است. پژوهشگران دیگری نیز از رابطه‌ی میان تغییرات بسامد و شکل مودها با انرژی کرنشی مودال استفاده کردند و به معرفی شاخص‌هایی پرداختند تا موقعیت ترک در تیرها را شناسایی کنند.<sup>[۴،۵]</sup> در سال ۲۰۰۹ نیز یک روش ترکیبی بر پایه‌ی انرژی کرنشی مودال و نرمی مودال پیشنهاد شد که توانایی ارزیابی خسارت‌های منفرد و چندتایی را در سازه‌های تیری و صفحه‌یی داشته باشد.<sup>[۷]</sup> برخی پژوهشگران هم با ایجاد شکاف‌هایی با ابعاد مشخص در تیرهای چوبی، از روی تغییرات انرژی کرنشی مودال خسارت‌ها را شناسایی کردند.<sup>[۸]</sup> همچنین در سال ۱۹۹۹، در پژوهشی دیگر از تغییرات انحنای مودال به صورت یک شاخص خسارت استفاده شد تا خسارت‌های پل Z24 را در سوئیس ارزیابی کنند.<sup>[۹]</sup> در تیرهای نامعین، نیروهای داخلی به توزیع سختی بستگی دارند. بنابراین، در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ از یک روش تکراری در یافتن توزیع سختی تیرهای نامعین با استفاده از آزمایش مودال استفاده شد،<sup>[۱۰]</sup> و بر اساس آن می‌توان سفتی خمشی هر مقطع را به صورت تکراری از تقسیم لنگر داخلی تیر در آن مقطع بر انحنای متناظر آن به دست آورد.

در تحقیقاتی که بر روی تیرهای بتن مسلح فولادی انجام شده است، برای نخستین بار مشاهده شد که فولاد جانبی (خاموت)، وصله را در داخل بتن محصور می‌کند و کنترل ترک‌های ناحیه‌ی وصله، باعث افزایش مقاومت پیوستگی می‌شود.<sup>[۱۱]</sup> همچنین، پژوهشگران دیگری نیز برای تأمین شکل‌پذیری خمشی در تیرهای بتن مسلح وصله‌دار، استفاده از میلگرد جانبی در طول وصله را پیشنهاد کردند،<sup>[۱۲]</sup> و نشان دادند که اگر در طول وصله از میلگرد جانبی استفاده نشود، حتی در صورتی که از طول وصله‌ی زیادتری استفاده شود، شکست ناگهانی رخ داده و شکل‌پذیری کم خواهد بود. محققان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تیرهای وصله‌دار، رابطه‌ی برای در نظر گرفتن اثر میلگرد جانبی در مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه کردند.<sup>[۱۳]</sup> سپس، پژوهشگران دیگری تأثیر مقدار میلگرد جانبی در شکل‌پذیری تیرهای خمشی وصله‌دار را مطالعه کردند، و نشان دادند که از دیاد طول وصله مخصوصاً در بتن‌های مقاوم‌تر، لزوماً باعث افزایش مقاومت پیوستگی و شکل‌پذیری نمی‌شود. درحالی‌که با استفاده از مقداری میلگرد جانبی در طول وصله، می‌توان به مقاومت پیوستگی و شکل‌پذیری مناسب دست یافت.<sup>[۱۴]</sup>

در دو دهه‌ی اخیر، مطالعاتی روی مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP انجام شده است. برای مثال، با انجام آزمایش‌های بیرون‌کشی میلگرد، اثر قطر میلگرد، نوع میلگرد از لحاظ جنس و سطح جانبی و اثر میلگرد فوقانی در مقاومت پیوستگی و بر اساس آن، رابطه‌ی میان تنش پیوستگی و لغزش میلگرد پیشنهاد و اثر طول وصله در تیرهای مسلح شده با میلگردهای پلیمری بررسی شده است.<sup>[۱۵،۱۶]</sup> همچنین با آزمایش‌های بیرون‌کشی میلگرد، اثر موقعیت میلگرد و ضخامت پوشش در مقاومت پیوستگی میلگردهای GFRP برای دو نوع بتن معمولی و بتن خودتراکم بررسی شده است.<sup>[۱۷]</sup> براساس پژوهشی دیگر سه دسته تیر مسلح شده با میلگردهای فولادی، آرمید آج‌دار (AFRP) و شیشه‌ی ماسه پاشی شده و آج‌دار (GFRP) آزمایش شده و این نتیجه به دست آمده است که تنش پیوستگی میلگردهای پلیمری به طور عمده‌یی کمتر از میلگردهای فولادی است و مدول کشسانی مؤثرترین پارامتر در مقاومت پیوستگی است، و هر چه مدول کشسانی بیشتر شود، تنش پیوستگی نیز بیشتر می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> همچنین پژوهشگرانی اثر پوشش بتن، میلگرد جانبی و طول وصله

مقدار  $E_s$  و  $E_f$ ، به ترتیب،  $210 \times 10^3$  و  $41 \times 10^3$  مگاپاسکال هستند. پارامتر  $r_f$  همانند میلگردهای فولادی، عدد ۳ در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۲). مقدار دقیق  $r_f$  باید برای میلگردهای FRP با سطح جانبی متفاوت از طریق آزمایش‌های بیرون‌کشی میلگرد به دست آید.

$$M = Cosh(\alpha L_d) \sqrt{\frac{E_s}{E_f}} \sqrt{\frac{3f'_c}{d_b}} \quad (12)$$

### ۳. طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ۷ نمونه تیر در سر ساده‌ی بتنی مسلح‌شده با میلگردهای GFRP به طول ۲٫۳ متر (فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲ متر) طراحی و ساخته شده است. عرض و ارتفاع مقطع تیرها، به ترتیب ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. جزئیات دقیق‌تر نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای اطمینان از شکست تیرها به صورت پیوستگی، طول وصله طوری تعیین شده است که تنش لازم میلگرد برای ایجاد گسیختگی لغزشی کمتر از تنش آن در مود شکست خمشی (پارگی میلگرد یا خردشدن بتن) باشد. نمونه‌ها با دو نوع بتن با مقاومت‌های فشاری استوانه‌یی ۳۸ و ۶۸ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. طول وصله‌ی نمونه‌ها بر اساس رابطه ۱ محاسبه شده است. در نمونه‌های B-۱ تا B-۳ مقاومت بتن ۳۸ مگاپاسکال و نسبت میلگرد موجود بیشتر از مقدار بالانس است. بنابراین، در رابطه‌ی ۱ تنش میلگرد باید به گونه‌یی انتخاب شود که از تنش میلگرد در هنگام شکست فشاری بتن کمتر باشد تا به طور حتم لغزش میلگرد روی دهد. در نمونه‌های B-۵ و B-۶ مقاومت بتن ۶۸ مگاپاسکال و نسبت میلگرد موجود کمتر از مقدار بالانس است. بنابراین، در رابطه ۱ تنش میلگرد باید کمتر از مقاومت نهایی میلگردهای GFRP انتخاب شود؛ تا مود شکست پیوستگی قبل از پارگی میلگردها اتفاق افتد. نمونه‌های B-۴ و B-۷، به ترتیب با مقاومت‌های فشاری استوانه‌یی ۳۸ و ۶۸ مگاپاسکال و بدون وصله انتخاب شده‌اند، تا شکل‌پذیری تیرهای وصله‌دار و بدون وصله را در این دو رده‌ی بتن با هم مقایسه کنند. در نمونه‌های ساخته‌شده، پارامترهای میلگرد جانبی، مقاومت بتن و طول وصله به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند تا اثر آنها در تغییرات مشخصات ارتعاشی در گام‌های بارگذاری و شکل‌پذیری تیرها بررسی شود. نمونه‌های B-۱ و B-۲ دارای مشخصات یکسان هستند، با این تفاوت که نمونه‌ی B-۱ فاقد میلگرد جانبی و در نمونه‌ی B-۲ میلگرد جانبی بر اساس رابطه ۳ قرار داده شده است. در نمونه‌های B-۲ و B-۳، طول وصله بر اساس رابطه ۱ و مقدار میلگرد جانبی بر اساس رابطه ۳ انتخاب شده است؛ ولی قطر میلگرد در این دو نمونه متفاوت اختیار شده است. نمونه‌های B-۵ و B-۶ نیز دارای مشخصات یکسان هستند، ولی طول وصله‌ی آنها متفاوت انتخاب شده است. مقدار میلگرد جانبی در هر دو نمونه از رابطه ۳ قرار داده شده است. از آنجا که افزایش طول وصله موجب افزایش تغییرات تنش پیوستگی در طول میلگرد می‌شود، در نمونه‌ی B-۶ با طول وصله‌ی بزرگ‌تر، میلگرد جانبی بیشتری برای یکنواخت‌کردن تنش پیوستگی نیاز است.

### ۴. چگونگی آزمایش

در آزمایش‌های صورت‌گرفته، ابتدا خسارت‌هایی در گام‌های مختلف بارگذاری استاتیکی ایجاد می‌شود. سپس، در هر مرحله با استفاده از آزمایش مودال، مشخصه‌های ارتعاشی تیر خسارت‌دیده برداشت می‌شوند. هدف از آزمایش استاتیکی، بررسی

برای بتن مسلح‌شده با فولاد محاسبه می‌شود.

$$M = Cosh(\alpha L_d) \sqrt{r \frac{f'_c}{d_b}} \quad (4)$$

که در آن پارامتر  $r$  به مشخصات هندسی آج میلگردها بستگی دارد. در پژوهشی در سال ۱۹۹۸<sup>[۱۳]</sup> مقدار  $r$  در رابطه ۴ برای میلگردهای فولادی آچار برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. مقاومت پیوستگی در طول وصله با استفاده از رابطه‌ی پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۵<sup>[۱۴]</sup> از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$u_{Esf} = \frac{T}{\pi d_b L_d} = u_c \frac{1 + \sqrt{M}}{\sqrt{1,85 + 0,7024 \sqrt{M}}} \times \left( 0,88 + 0,12 \frac{C_{Med}}{C} \right) (1 + 0,15 f_R \frac{A_t A_b}{CS}) \quad (5)$$

در این رابطه،  $u_c$  پیشینه‌ی تنش پیوستگی موضعی بر حسب مگاپاسکال در هنگام شکست است، که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$u_c = 2,7 \sqrt{\frac{C/d_b + 0,5}{C/d_b + 3,6}} \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

درستی رابطه‌ی ۵ برای میلگردهای فولادی از طریق ۲۸۴ نتیجه‌ی آزمایشگاهی ارزیابی شده است.<sup>[۱۴]</sup> در این تحقیق، میانگین مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی به محاسباتی برابر ۲۱٪ و انحراف معیار آن ۰٫۱۲۸ است که بر دقت بالای رابطه‌ی ۵ دلالت دارد.<sup>[۱۴]</sup> از آنجا که مدول کشسانی میلگردهای GFRP خیلی کمتر از میلگردهای فولادی است و سطح جانبی آنها نیز متفاوت است، چگونگی توزیع تنش پیوستگی در طول وصله نسبت به میلگردهای فولادی تغییر می‌کند و رابطه ۴ باید اصلاح شود. در برخی پژوهش‌ها نشان داده شده است که تنش پیوستگی میلگردهای FRP کمتر از میلگردهای فولادی است،<sup>[۱۸]</sup> و کاهش تنش پیوستگی به دلیل مدول کشسانی کم میلگردهای پلیمری است، ولی تاکنون رابطه‌یی ارائه نشده است که اثر مدول کشسانی را در مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP وارد کند. تغییرات تنش پیوستگی در طول وصله از رابطه ۷ به دست می‌آید.<sup>[۱۳]</sup>

$$u(x) = a \cdot Cosh(jx) \quad (7)$$

در این رابطه، مبدأ سنجش  $x$  در وسط وصله انتخاب شده است. مقدار پیشینه‌ی تنش پیوستگی در انتهای وصله و کمینه‌ی تنش پیوستگی در وسط آن رخ می‌دهد. طبق نتایج پژوهش پیشین،  $M$  از رابطه‌های ۸ و ۹ محاسبه می‌شود:

$$u_{Max}(x = \frac{L_d}{2}) = a \cdot Cosh(\frac{j \cdot L_d}{2}), \quad u_{Min}(x = 0) = a \quad (8)$$

$$M = \frac{u_{Max}}{u_{Min}} = Cosh(\frac{j \cdot L_d}{2}) \quad (9)$$

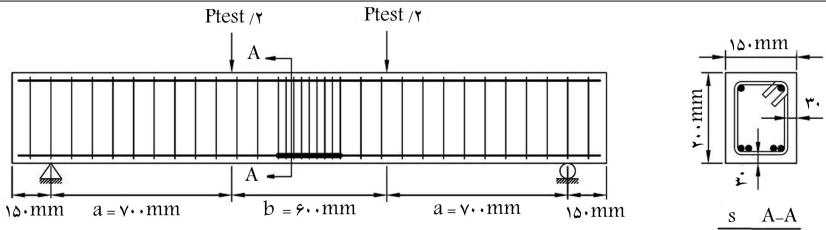
در این روابط،  $j$  عامل سختی است که از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$j_{FRP} = \sqrt{\frac{r_f f'_c \pi d_b}{A_b E_f}} = \sqrt{\frac{r_f f'_c}{d_b} \cdot \frac{4}{E_f}} \quad (10)$$

از جایگزینی رابطه‌ی ۱۰ در رابطه‌ی ۹، پارامتر  $M$  برای میلگردهای FRP به دست می‌آید (رابطه ۱۱).

$$M = Cosh(\frac{L_d}{2} \sqrt{\frac{r_f f'_c}{d_b} \cdot \frac{4}{E_f}}) = Cosh(\frac{L_d}{2} \sqrt{\frac{E_s}{E_f} \cdot \frac{4}{E_s} \cdot \frac{r_f f'_c}{d_b}}) \quad (11)$$

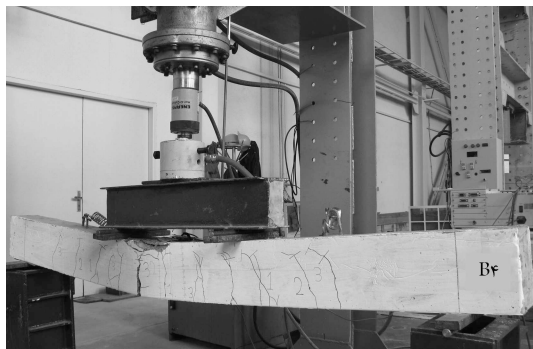
جدول ۱. جزئیات طول وصله‌ها و تعداد میلگردهای جانبی برای نمونه‌های آزمایشگاهی.



عنوان نمونه	C	C <sub>Med</sub>	d <sub>b</sub>	a	f' <sub>c</sub>	L <sub>d</sub>	M	A <sub>t</sub> /S	میلگردهای جانبی در طول وصله
B-۱	۳۰	۳۰	۱۰	۳۸,۱۸	۳۹,۷*	۱۸۰	-	-	-
B-۲	۳۰	۳۰	۱۰	۳۸,۱۸	۳۸,۰*	۱۸۰	۲,۰۳۶	۲,۳۶۹	۸φ۸@۲۱
B-۳	۲۱	۳۰	۱۶	۴۲,۵	۳۸,۸*	۲۷۹	۲,۶۷۹	۰,۹۰۲	۵φ۸@۵۵
B-۴	۳۰	-	۱۰	-	۳۷,۶*	-	-	-	-
B-۵	۳۰	۳۰	۱۰	۳۸,۱۸	۷۰,۶**	۱۲۵	۱,۹۱۳	۱,۷۹۳	۵φ۸@۲۸
B-۶	۳۰	۳۰	۱۰	۳۸,۱۸	۶۹,۸**	۱۶۱	۲,۶۴۲	۴,۶۴۲	۷φ۱۲@۲۴
B-۷	۳۰	-	۱۰	-	۶۳,۷**	-	-	-	-

\* به طور متوسط مقاومت بتن ۳۸ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

\*\* به طور متوسط مقاومت بتن ۶۸ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. دستگاه‌های آزمایش استاتیکی.

جدول ۲. گام‌های بارگذاری استاتیکی نمونه‌ها.

گام‌های بارگذاری استاتیکی	L <sup>۰</sup>	L <sup>۱</sup>	L <sup>۲</sup>	L <sup>۳</sup>
بار استاتیکی بر حسب کیالونیوتن	وزن تیر	۱°	۲°	۳°

تا مشخصه‌های دینامیکی آزمایشگاهی برداشت شوند. در آزمایش مودال تجربی از چکش ضربه برای اعمال نیروی محرک به سازه و از شتاب‌سنج پیزوالکتریک برای دریافت پاسخ سازه استفاده می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده، ۲۳ درجه‌ی آزادی برای تیر بتنی در نظر گرفته شده است. شتاب‌سنج در درجه‌ی آزادی هشتم به صورت ثابت قرار می‌گیرد و تمام درجات آزادی با چکش ضربه تحریک می‌شوند. سپس، تحریک‌ها و پاسخ‌ها به یک تحلیل‌گر دو کاناله<sup>۴</sup> منتقل می‌شوند تا نسبت پاسخ به نیروی اعمال شده اندازه‌گیری شود. این نسبت در حوزه‌ی بسامد، به تابع پاسخ بسامدی<sup>۵</sup> موسوم است.<sup>[۴]</sup> از آنجا که با تحریک یکی از درجات آزادی و نصب شتاب‌سنج در یک درجه‌ی آزادی دیگر که دامنه‌ی حرکت مودهای آن غیر صفر است، می‌توان به راحتی بسامدها را برداشت کرد، درجه‌ی آزادی هشتم به‌عنوان

مقاومت پیوستگی، شکل‌پذیری و ایجاد خسارت است و هدف از آزمایش مودال بررسی رابطه‌ی بین تغییرات مشخصه‌های ارتعاشی و مشخصه‌های وصله در گام‌های مختلف خسارت است. در ادامه، چگونگی آزمایش‌های استاتیکی و مودال شرح داده خواهند شد.

#### ۱.۴. آزمایش استاتیکی

در این آزمایش، تیرهای مسلح شده با FRP تحت بار استاتیکی ۴ نقطه‌یی خمشی بر روی تکیه‌گاه‌های ساده قرار می‌گیرند. تغییرمکان وسط تیر با خط‌کش اندازه‌گیری تغییرمکان (LVDT) و نیرو با نیروسنج<sup>۲</sup> به دستگاه ثبت داده<sup>۳</sup> منتقل می‌شوند و خیز تجربی تیر در وسط دهانه برداشت می‌شود. با استفاده از نمودار بار-تغییرمکان به دست آمده از آزمایش استاتیکی، مقاومت پیوستگی و شاخص شکل‌پذیری تیرهای مسلح شده با FRP محاسبه می‌شود. همچنین در مراحل مختلف بارگذاری، مشاهدات ثبت و چگونگی گسترش ترک‌ها ترسیم می‌شود؛ تا چگونگی شکست تیر مشخص شود. شکل ۱، چگونگی استقرار لوازم سنجش نیرو و تغییرمکان را بر روی تیر نشان می‌دهد.

بار استاتیکی با هدف ایجاد خسارت بر روی سازه وارد می‌شود. گام‌های بارگذاری استاتیکی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. با انتخاب این گام‌های بارگذاری می‌توان سازه را در حالت‌های مختلف رفتاری بررسی کرد.

#### ۲.۴. آزمایش مودال

این آزمایش در ابتدا بر روی سازه‌ی سالم و در بین گام‌های بارگذاری بر روی سازه‌ی خسارت دیده، به منظور بررسی رفتار ارتعاشی سازه در حالت‌های مختلف انجام شده است. بنابراین بعد از هر گام بارگذاری، باربرداری انجام می‌شود و در شرایطی که نمونه با فزاینده‌ی به صورت آویزان در آورده شده است، آزمایش مودال صورت می‌گیرد

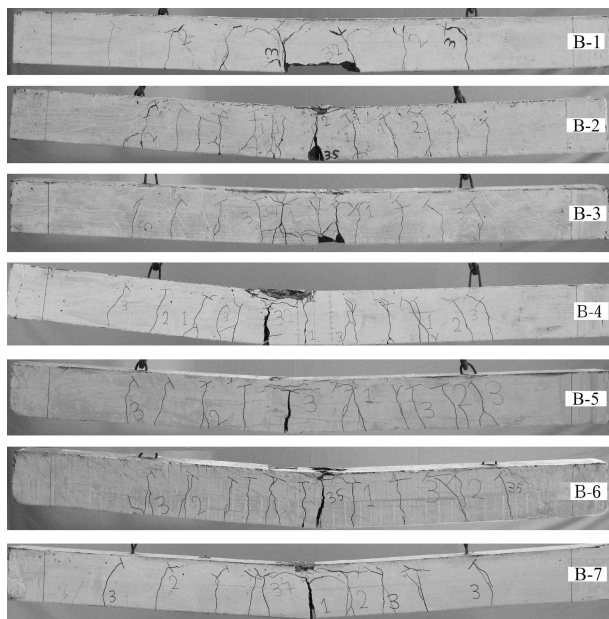
## ۵. نتایج آزمایشگاهی

### ۱.۵. چگونگی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی

نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری و چگونگی شکست نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در نمونه‌ی B-۱ محل وصله با میلگردهای جانبی مهار نشده است، بنابراین، مود شکست شکافت و ترکیدگی<sup>۶</sup> پوشش بتن خواهد بود. در هنگام آزمایش این نمونه، ترک‌های اولیه در دو انتهای وصله ایجاد شده‌اند. با افزایش بارگذاری، مؤلفه‌ی تنش تماسی قائم بر میلگردها موجب بروز ترک‌هایی در راستای میلگرد می‌شود، در ادامه‌ی بارگذاری با افزایش تنش تماسی و لغزش میلگردها، عرض ترک‌های دو انتهای وصله افزایش و با ترکیدگی پوشش بتن در ناحیه‌ی وصله، شکست نهایی انجام و بار به شدت افت می‌کند.

در نمونه‌ی B-۲، محل وصله با میلگردهای جانبی مهار شده است. بنابراین، مؤلفه‌ی تنش تماسی قائم بر میلگردها با میلگردهای جانبی مهار می‌شود و لغزش میلگرد بدون ترکیدگی پوشش میلگردها اتفاق می‌افتد. در این نمونه، تعداد ترک‌ها و تغییر شکل نسبت به نمونه‌ی B-۱ بیشتر است. با افزایش بارگذاری و توزیع ترک‌ها در تیر، لغزش میلگرد شروع می‌شود و پس از آن ترک انتهای وصله گسترش می‌یابد. با لغزش میلگرد و بازشدگی ترک انتهای وصله، انحناى تیر افزایش و بالأخره با خرد شدن بتن در ناحیه‌ی فشاری بار به شدت افت می‌کند. در این نمونه، به علت محصورشدگی، لغزش میلگرد به کندی انجام می‌شود که باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود. در نمونه‌ی B-۲ هیچ‌گونه ترکی در امتداد میلگردهای طولی در پهلو و زیر تیر مشاهده نشده است. بنابراین، لغزش میلگرد ناشی از مود شکست بیرون‌کشیدگی<sup>۷</sup> میلگرد بوده است.

شکست نمونه‌ی B-۳ تقریباً مشابه نمونه‌ی B-۱ است، با این تفاوت که در نمونه‌ی B-۳ به علت وجود میلگردهای جانبی، گسترش ترک در امتداد وصله به صورت تدریجی انجام می‌گیرد. در این نمونه، ترک‌های اولیه از دو انتهای وصله

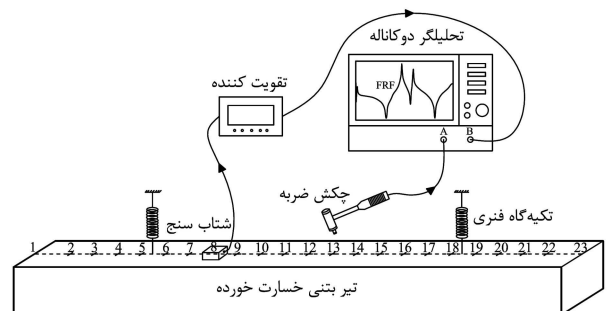


شکل ۴. چگونگی ترک‌خوردگی و شکست نمونه‌های آزمایشگاهی.

نمونه ارائه شده است. این تذکر لازم است که دامنه‌ی حرکت درجه‌ی آزادی هشتم در هیچ‌یک از ۵ مود اول نوسان صفر نخواهد شد. همچنین، دامنه‌ی این درجه‌ی آزادی در مود دوم و پنجم از سایر درجات آزادی بیشتر است.

وجود ترک و خسارت در سازه، سبب کاهش سختی و افزایش میرایی آن می‌شود. این ویژگی به کاهش بسامدهای طبیعی و تغییر مودهای نوسانی سازه می‌انجامد. از آنجاکه در یک تیر شکل‌پذیر، فاصله‌ی بین تغییرشکل حد سرویس تا تغییرشکل نهایی شکست زیاد است، در این فاصله ترک‌های گسترده و کنترل‌شده‌ی رخ می‌دهد که با کاهش بسامدهای طبیعی وابسته است.

معمولاً یک سازه‌ی واقعی به محیط اطرافش متصل است. بنابراین، مشخصات دینامیکی سازه علاوه بر خود سازه به شرایط مرزی آن نیز بستگی دارد. وقتی اندازه‌گیری FRF در آزمایشگاه مدنظر باشد، معمولاً سازه به گونه‌ی آماده‌سازی می‌شود تا شرایط مرزی آزاد و یا گیردار برای آن شبیه‌سازی شود. پیاده‌سازی کامل شرایط مرزی آزاد و یا گیردار عملاً ممکن نیست. این شرایط را می‌توان با دقت معقولی در آزمایشگاه به صورت تقریبی پیاده کرد. ایجاد شرایط مرزی گیردار در آزمایشگاه مشکل است، ولی شرایط مرزی آزاد با تعلیق سازه از تکیه‌گاه نرم مانند فنر شبیه‌سازی می‌شود. در این حالت یک یا چند مود حرکت جسم صلب نیز تولید می‌شود. بسامد طبیعی مودهای صلب به اندازه‌ی کافی از اولین مود کشسان سازه کوچک‌تر هستند.<sup>[۲۰]</sup> برای تشخیص درست بسامد، هر مود در صورتی که نمودار FRF چند شاخه‌ی شده باشد، با استفاده از نرم‌افزار STAR شکل مود مربوط به هر قله‌ی تشدید استخراج می‌شود. از روی شکل مود ترسیم‌شده مشخص خواهد شد که هر قله‌ی بسامدی مربوط به کدام مود است. شکل‌های ۲ و ۳ دستگاه‌های آزمایش مودال و چگونگی ارتباط لوازم سنجش را نشان می‌دهند.



شکل ۲. چگونگی انتقال نیرو و پاسخ به تحلیل‌گر دو کاناله.



شکل ۳. دستگاه‌های آزمایش مودال.

ایجاد شده‌اند و پس از افزایش بارگذاری و ایجاد ترک‌های تدریجی، ترک‌های خمشی در امتداد طول وصله به هم ملحق شده‌اند و پس از شکافت پوشش بتن بار افت کرده است.

نمونه‌ی B-۴ فاقد وصله است. در این نمونه پس از ایجاد ترک‌های خمشی و گسترش آنها، با خرد شدن بتن در فشار بار افت می‌کند و پس از آن با افزایش انحنای و باز شدن یکی از ترک‌ها، پارگی میلگرد رخ می‌دهد. در نمونه‌های B-۵ و B-۶ اولین ترک‌ها از محل انتهایی وصله ایجاد می‌شوند. در این نمونه‌ها به خاطر وجود میلگرد جانبی و مقاومت بالای بتن، ترک‌ها به صورت کاملاً تدریجی پخش می‌شوند، به گونه‌ی که B-۶ بیشترین پخش ترک را در بین تمام نمونه‌ها داشته است. با ادامه‌ی بارگذاری، لغزش میلگرد با باز شدن یکی از ترک‌های انتهایی وصله به صورت تدریجی انجام و پس از شکست ناشی از بیرون‌کشیدگی میلگرد، بار به صورت تدریجی افت می‌کند. در نمونه‌ی B-۷ نیز وصله وجود ندارد، ولی از لحاظ مقاومت فشاری با B-۴ متفاوت است. در این تیر با گسترش ترک‌های خمشی و افزایش کرنش میلگردها، پارگی ماده‌ی مسلح‌کننده به طور آنی رخ داده و بلافاصله با افزایش انحنای، شکست فشاری بتن اتفاق افتاده است. این نمونه دارای بیشترین ظرفیت باربری است، ولی شکست آن به صورت ترد انجام شده است.

## ۲.۵. شکل‌پذیری و مقاومت پیوستگی نمونه‌های آزمایشگاهی

در شکل ۵، رابطه‌ی نیرو-تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌ها در گام‌های مختلف بارگذاری ارائه و همچنین پوش نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌ها ترسیم شده است. نمودارهای بار-تغییرمکان شکل ۵ از سه بخش تشکیل شده‌اند. بخش اول که دارای سختی بسیار بالایی است، مربوط به رفتار تیر قبل از ترک خوردگی است. در این قسمت تیر با ممان اینرسی مقطع تبدیل‌یافته‌ی ترک‌نخورده در مقابل بارها مقاومت می‌کند. این قسمت نمودار صعودی و دارای شیب تند است که تغییرمکان‌های ناچیزی را نشان می‌دهد. در بخش دوم، تیر ترک‌خورده و شیب آن ملایم و صعودی است. بخش سوم، شاخه‌ی نزولی نمودار است که ناحیه‌ی نرم‌شوندگی پس از شکست تیر را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها از نسبت تغییرمکان متناظر با ۸۵٪ نیروی بیشینه (روی شاخه‌ی نزولی منحنی بار-تغییرمکان) به تغییرمکان متناظر با نیروی بیشینه (حد رفتار کشسان) استفاده شده است.<sup>[۲۱]</sup> شاخص مذکور از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$i = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (13)$$

برای محاسبه‌ی  $\Delta_y$  در رابطه‌ی ۱۳، ابتدا خطی بر ناحیه‌ی صعودی منحنی بار-تغییرمکان برآزش داده می‌شود. این خط تقریباً نشان‌دهنده‌ی رفتار کشسان است. تغییرمکان متناظر با بیشینه‌ی نیروی آزمایش روی خط مذکور، مقدار  $\Delta_y$  را مشخص می‌کند. نمونه‌ی B-۱ فاقد میلگرد جانبی است. در این نمونه  $\Delta_y$  و  $\Delta_{0.85}$  به هم نزدیک هستند و پس از نقطه‌ی بیشینه، منحنی با شیب تند افت کرده است. این بدان معنی است که این نمونه شکل‌پذیر نیست و شکست ترد دارد. نمونه‌های B-۴ و B-۷ دارای مقاومت فشاری متفاوت و بدون وصله هستند. هدف از طرح این نمونه‌ها، مقایسه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های وصله‌دار و بدون وصله بوده است. در نمونه‌ی B-۴ انهدام فشاری بتن رخ داده است ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ) و در نمونه‌ی B-۷ شکست در اثر پارگی میلگرد اتفاق افتاده است ( $\rho_f < \rho_{fb}$ ). از آنجا که شیب ناحیه‌ی برگشتی نمودار نمونه‌ی B-۷ بسیار تند است، مشخص می‌شود که رفتار بسیار ترد بوده است. بنابراین، شکست بتن در ناحیه‌ی فشاری رفتار مناسب‌تری

نسبت به پاره شدن میلگردهای FRP نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نمونه‌هایی که در ناحیه‌ی وصله‌ی آنها از میلگرد جانبی استفاده شده است، شکل‌پذیری بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون وصله داشته‌اند.

در ادامه، مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی نمونه‌ها ( $u_{test}$ ) محاسبه شده است و سپس با مقاومت‌های پیوستگی محاسبه‌شده از رابطه‌ی ۵ و ۳-۴ ACI<sup>[۲۲]</sup> (به ترتیب  $u_{ESf}$  و  $u_{ACI}$ ) مقایسه می‌شوند. مقاومت پیوستگی ( $u_{test}$ ) برای نمونه‌ها از معادله‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$u_{test} = \frac{A_b f_{test}}{\pi d_b L_d} \quad (14)$$

با توجه به اینکه طول وصله طوری تعیین شده است که تنش میلگردها همواره کوچک‌تر از تنش معادل شکست فشاری باشد و گسیختگی لغزشی روی دهد، می‌توان تنش میلگردها را از روابط کشسان-خمیری مقاطع خمشی بتن مسلح به دست آورد. این مسئله را قبلاً پژوهشگران استفاده و توصیه کرده‌اند.<sup>[۱۳،۱۲]</sup>

$$f_{test} = \frac{M_{test}}{A_f j d} \quad (15)$$

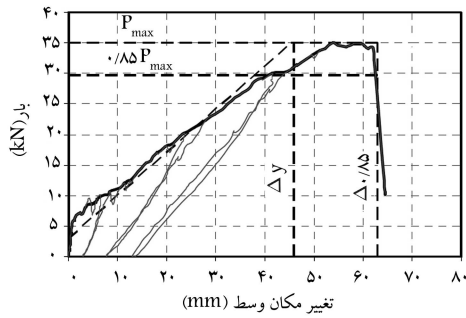
در این رابطه،  $M_{test}$  لنگر نهائی شکست و برابر با  $0.7 P_{test} l$  است. همچنین،  $A_f$  سطح مقطع میلگردهای کششی FRP و  $j d$  بازوی لنگر مقاوم مقطع است.

## ۳.۵. نتایج آزمایش استاتیکی

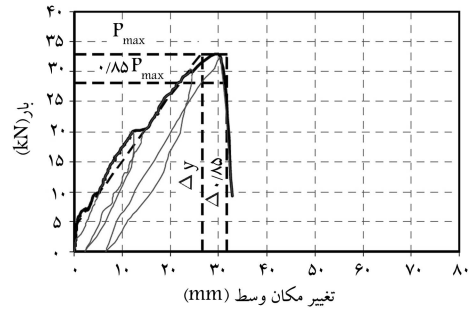
نتایج شکل‌پذیری و مقاومت پیوستگی نمونه‌ها در جدول ۳ درج شده‌اند. در ستون‌های ۸ و ۹ این جدول، نسبت تنش پیوستگی آزمایشگاهی به تنش پیوستگی محاسباتی ( $u_{test}/u_{ESf}$ ) و نسبت تنش پیوستگی آزمایشگاهی به تنش پیوستگی آیین‌نامه‌ی آمریکا ( $u_{test}/u_{ACI}$ ) آمده است. میانگین نسبت ( $u_{test}/u_{ESf}$ ) برای تمام نمونه‌ها ۱/۱۵ و انحراف از معیار ۰/۲۵ است. این مقادیر نشان می‌دهند که رابطه‌ی پیشنهادی با دقت نسبتاً خوبی و بهتر از ۳-۴ ACI<sup>[۲۲]</sup>، مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP را پیش‌بینی می‌کند. در ستون ۱۲ این جدول، شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایش‌شده در این پژوهش آمده است. با توجه به ستون ۱۲ جدول ۳، مشاهده می‌شود که شکل‌پذیری نمونه‌ی بدون میلگرد جانبی B-۱ برابر ۱/۱۷ و شکل‌پذیری نمونه‌ی دارای میلگرد جانبی B-۲ برابر ۱/۳۷ است و نشان می‌دهد که میلگرد جانبی در طول وصله باعث افزایش شکل‌پذیری شده است. میلگرد جانبی در طول وصله، باعث تغییر مود شکست از شکافت پوشش بتن در نمونه‌ی B-۱ به بیرون‌کشیدگی میلگرد در نمونه‌ی B-۲ شده است. این تغییر مود باعث ایجاد لغزش میلگرد به صورت کنترل‌شده در نمونه دارای میلگرد جانبی B-۲ شده است که شکل‌پذیری آن را افزایش داده است.

در نمونه‌ی B-۷ (بدون وصله) به علت پارگی میلگرد، یک شکست ترد و با شکل‌پذیری کم اتفاق افتاده است. در نمونه‌های B-۵ و B-۶ (وصله‌دار) که از لحاظ قطر میلگرد و مقاومت بتن با B-۷ مشابه‌اند، به علت لغزش میلگرد در هنگام شکست شکل‌پذیری بالایی به دست آمده است.

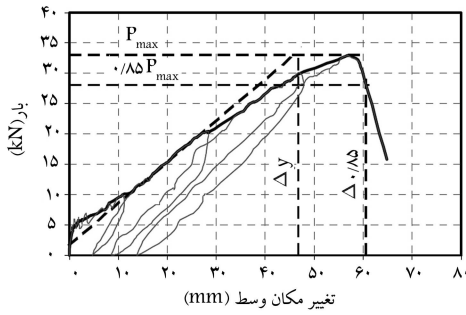
از نمودارهای شکل ۵ و ستون ۱۲ جدول ۳ مشاهده می‌شود که شکل‌پذیری نمونه‌های وصله‌دار و دارای میلگرد جانبی در طول وصله، از نمونه‌های بدون وصله بهتر است. با توجه به ستون ۱۲ در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که شکل‌پذیری نمونه‌ی B-۶ با طول وصله‌ی ۱۶/۱ سانتی‌متر بیشتر از شکل‌پذیری نمونه‌ی B-۵ با طول



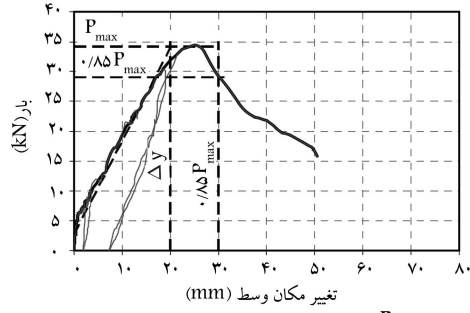
ب) نمونه B-۲



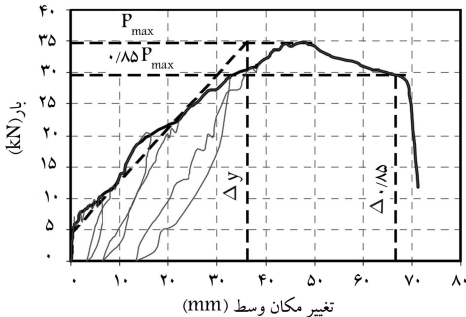
الف) نمونه B-۱



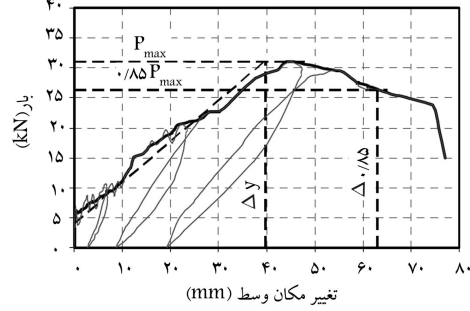
د) نمونه B-۴



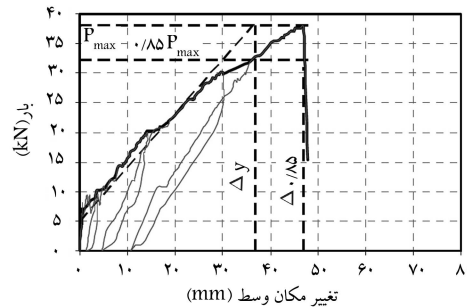
ج) نمونه B-۳



و) نمونه B-۶



ه) نمونه B-۵



ز) نمونه B-۷

شکل ۵. نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها.

مربوط به قله‌های تشدید، بسامدهای طبیعی سازه‌اند. اما هر قله‌یی در نمودار FRF لزوماً نمایانگر یک مود نیست. همچنین، یک نمودار FRF توانایی نمایش کلیه بسامدها را ندارد و دامنه‌ی آن محدود است.<sup>[۴]</sup> در هر یک از شکل‌های ۶ و ۷، نمودارهای FRF برای سه مرحله‌ی بارگذاری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلونیوتن در خسارت‌های مختلف ناشی از ترک خوردگی تیر B-۶ آورده شده‌اند. در شکل ۶، درجه‌ی آزادی بیستم و در شکل ۷، درجه‌ی آزادی یکم با چکش ضربه تحریک شده‌اند. بسامدهای طبیعی سازه را می‌توان از روی یکی از نمودارهای FRF پیدا

ورده می‌یابد. بنابراین، شکل‌پذیری با افزایش طول وصله افزایش می‌یابد.

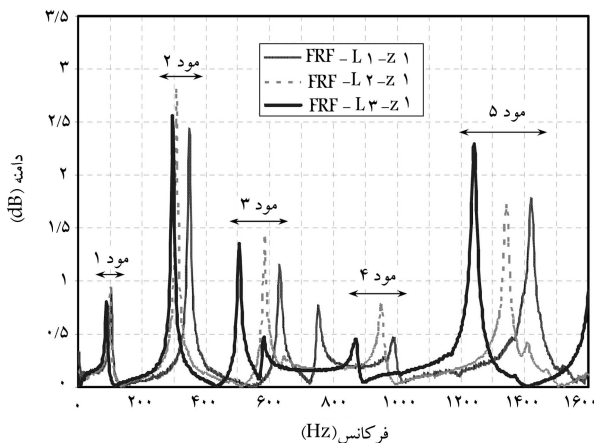
#### ۴.۵. نتایج آزمایش مودال

به طور معمول، نمودار دامنه‌ی مقادیر FRF بر حسب بسامد به‌عنوان بهترین نمودار در تعیین بسامدها و مودهای ارتعاشی سازه به کار می‌آید. در این نمودار، بسامد

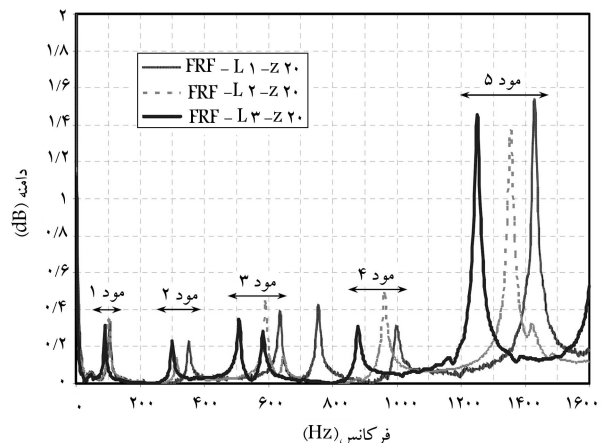


جدول ۳. مقایسه‌ی مقاومت پیوستگی و شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی.

عنوان نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
$f_u$ (MPa)	۷۲۵	۷۲۵	۶۷۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵
$P_{test}$ (kN)	۳۲	۳۵	۳۴٫۲	۳۱	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸	۳۴٫۸
$f_{test}$ (MPa)	۴۸۰٫۱	۵۲۵٫۲	۲۰۴٫۲	۴۶۵٫۱	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲	۵۲۲٫۲
$u_{test}$ (MPa)	۶٫۶۷	۷٫۲۹	۲٫۹۳	۹٫۳۰	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸
$u_{Esf}$ (MPa)	۵٫۰۲	۵٫۵۰	۳٫۹۱	۷٫۴۱	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸	۷٫۵۸
$u_{ACI}$ (MPa)	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۴۳	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۸۹
میانگین				۱٫۱۵	۲٫۴۱							
انحراف معیار				۰٫۲۵	۰٫۷۶							



شکل ۷. منحنی‌های FRF درجه‌ی آزادی یکم نمونه‌ی B-۶.

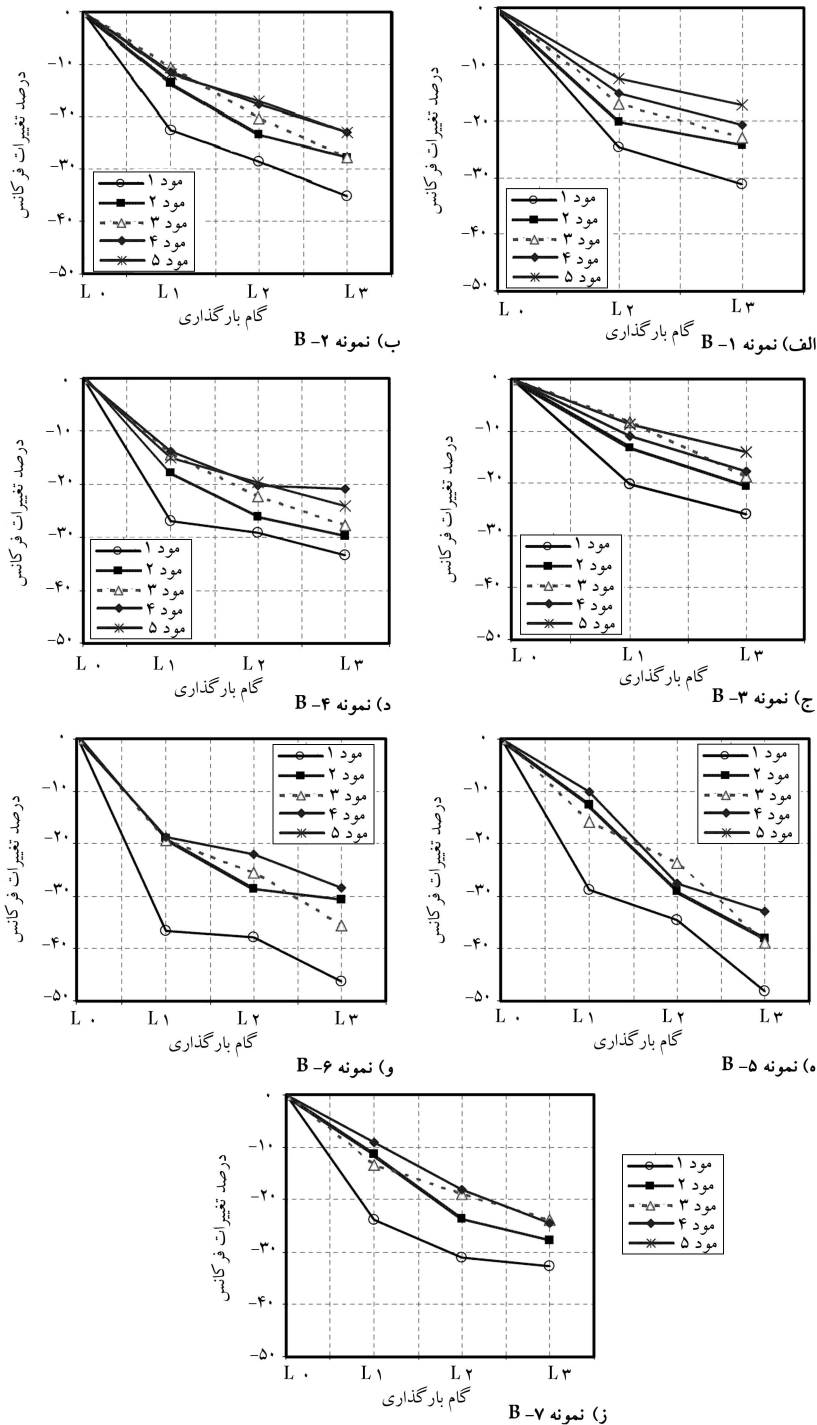


شکل ۸. منحنی‌های FRF درجه‌ی آزادی بیستم نمونه‌ی B-۶.

کرد، در حالی که برای استخراج شکل‌های مود باید تمام درجات آزادی سازه تحریک شوند. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش بارگذاری و شدیدتر شدن خسارت‌ها، قله‌های نمودار به سمت عقب حرکت می‌کنند و بسامدهای طبیعی سازه کاهش می‌یابند. در این دو نمودار، مقادیر بسامدهای طبیعی (موقعیت قله‌ها) یکسان و مقادیر بزرگی تابع FRF متفاوت هستند. در شکل ۸، درصد تغییرات نسبی بسامدهای طبیعی سازه برای نمونه‌های B-۱ تا B-۷ در ۵ مود اول نوسان نشان داده شده است. در نمودارهای این شکل با افزایش بارگذاری، تغییرات نسبی بسامدها افزایش یافته است. بیشترین افت بسامد در گام بارگذاری L1 ایجاد شده است و در گام‌های L2 و L3 شدت افت بسامدها کمتر شده است. اگرچه بر اساس شکل‌های ۶ و ۷، مودهای بالاتر تغییرات بیشتری را در گام‌های خسارت نشان می‌دهند؛ ولی در شکل ۸، بسامد مود یکم نسبت به دیگر مودها درصد تغییرات نسبی بیشتری را در گام‌های مختلف خسارت نشان می‌دهد. در این نمودارها با افزایش بارگذاری و ایجاد خسارت‌های بیشتر، مودهای بالاتر درصد تغییرات نسبی

کمتری را نشان می‌دهند. بنابراین، در مواردی که محدودیت اندازه‌گیری بسامدهای بالاتر وجود دارد، بهتر است در بررسی خسارت از شاخص‌هایی استفاده شود که بر اساس تغییرات نسبی بسامدها بنا شده‌اند. از مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به نمونه‌های B-۱ تا B-۷ مشاهده می‌شود که مود شکست احتمالی نیز در میزان افت بسامدها مؤثر است. نمونه‌های B-۱ و B-۳ با مود شکست پوشش بتن در ناحیه‌ی وصله دارای کمترین افت بسامد و نمونه‌های B-۲، B-۵، B-۶ و B-۷ با مود شکست بیرون‌کشیدگی میلگرد دارای بیشترین افت بسامد هستند. میزان افت بسامد در نمونه‌های B-۴ و B-۷ با مود شکست خمشی نیز در حد وسط است. در شکل ۹، میزان تغییرات نسبی بسامد نمونه‌های B-۱ تا B-۷ برای مودهای مختلف مقایسه شده است. در نمونه‌ی B-۱ (وصله‌دار بدون میلگرد جانبی در طول وصله) که کمترین شکل‌پذیری را در بین تمام نمونه‌ها دارد، کمترین میزان افت بسامد طبیعی نیز در تمامی مودها رخ داده است. از طرف دیگر، نمونه‌های B-۵ و B-۶ که دارای بیشترین شکل‌پذیری بوده‌اند، افت بسامد طبیعی بیشتری نیز داشته‌اند. بنابراین، هر چه شکل‌پذیری بالاتر باشد،





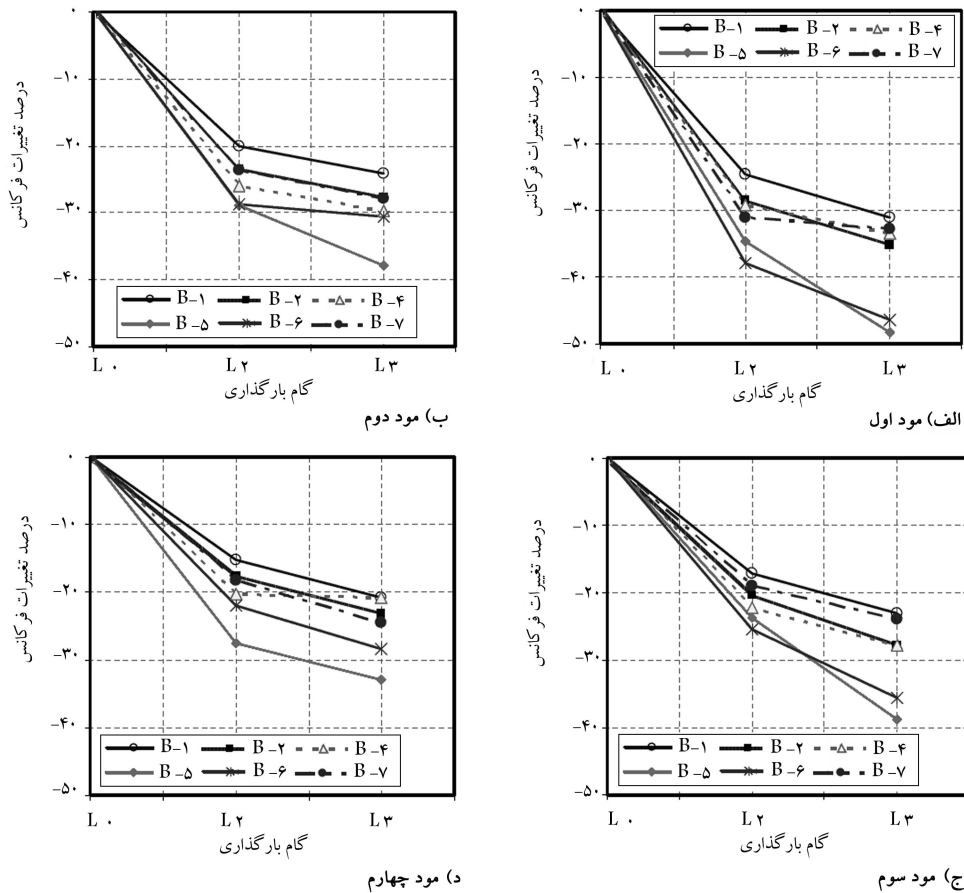
شکل ۸. درصد تغییرات نسبی بسامد طبیعی نمونه‌ها در گام‌های مختلف بارگذاری.

نهایی می‌شود و این موضوع افزایش بیشتر شکل‌پذیری و افت بیشتر بسامدها را به دنبال خواهد داشت.

در نمونه‌های ترد، خسارت‌های اصلی پس از رسیدن به بیشینه بار و به صورت آنی رخ می‌دهند، در حالی که در نمونه‌های شکل‌پذیر، خسارت‌ها به صورت تدریجی پیش از رسیدن به بیشینه بار و پس از آن ایجاد می‌شوند. بنابراین، از آنجا که آزمایش مودال در گام‌های بارگذاری قبل از بار بیشینه انجام شده است، میزان افت بسامدها در حالت‌های رفتاری شکل‌پذیر مشهودتر بوده است.

میزان پخش ترک‌های کنترل‌شده در گام‌های بارگذاری بیشتر و افت بسامدها شدیدتر خواهد بود.

در شکل ۱۰، میزان تغییرات نسبی بسامد نمونه‌های وصله‌دار با میلگرد جانبی در طول وصله مقایسه شده‌اند. در این نمودار، نمونه‌های با مقدار میلگرد جانبی بیشتر در طول وصله، افت بسامد بیشتری داشته‌اند و نمونه‌ی B-۳ با کمترین مقدار میلگرد جانبی در طول وصله، کمترین افت بسامد را داشته است. بنابراین، افزایش میلگرد جانبی در ناحیه‌ی وصله باعث پخش بیشتر ترک‌ها و کنترل آنها تا شکست



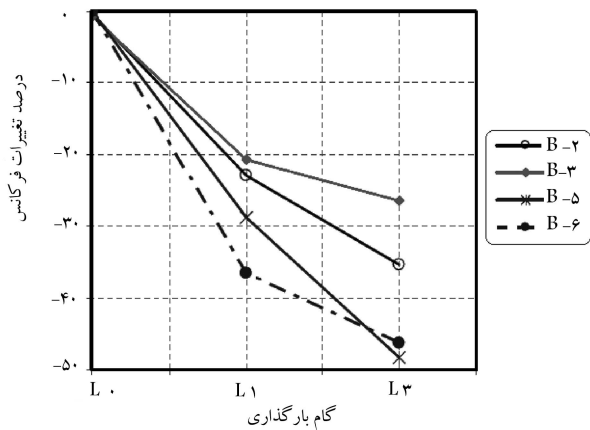
شکل ۹. مقایسه‌ی تغییرات نسبی بسامد طبیعی نمونه‌ها.

ACI 440.1R-03 مقایسه شده است. همچنین، پارامترهای تأثیرگذار در شکل پذیری و تغییرات بسامدهای طبیعی نمونه‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. از تحلیل و بررسی روابط تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی این نتایج به دست آمده است:

۱. با در نظر گرفتن اثر مدول کشسانی میلگردهای FRP در رابطه‌ی پیشنهادی ذکر شده، می‌توان مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار مسلح شده با میلگردهای پلیمری را به خوبی پیش‌بینی کرد. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت پیوستگی حاصل از رابطه‌ی اصلاح شده، هم از لحاظ میانگین و هم از لحاظ پراکندگی داده‌ها مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین، نتایج مناسب‌تری را نسبت به آیین‌نامه‌ی ACI 440.1R-03 نشان می‌دهد.

۲. استفاده از میلگرد جانبی باعث افزایش مقاومت پیوستگی و شکل پذیری تیرهای وصله‌دار با میلگرد FRP می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های وصله‌دار و دارای میلگرد جانبی در طول وصله نسبت به نمونه‌های مشابه بدون وصله، شکل پذیری بالاتری دارند. همچنین، در این نوشتار مشاهده شده است که با افزایش مقاومت بتن، شکل پذیری این نوع تیرها زیاد می‌شود.

۳. افزایش طول وصله باعث غیریکنواختی بیشتر تنش پیوستگی در طول آن می‌شود. بنابراین، افزایش طول وصله بدون استفاده از میلگرد جانبی شکل پذیری را زیاد نخواهد کرد. نتایج نشان می‌دهد که اگر در طول وصله، میلگرد جانبی



شکل ۱۰. تغییرات بسامد مود یکم نمونه‌های دارای میلگرد جانبی در محل وصله.

## ۶. نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی مقاومت پیوستگی، شکل پذیری و تغییرات پارامترهای ارتعاشی در فرایند ترک خوردگی تیرهای وصله‌دار مسلح شده با میلگردهای FRP انجام شده است. بدین منظور ۷ نمونه تیر آزمایش شده‌اند و نتایج مقاومت پیوستگی آنها با مقادیر محاسباتی حاصل از روابط پیشنهادی محققان [۱۳] و آیین‌نامه‌ی

با افزایش مقدار میلگرد جانبی در طول وصله، افت بسامدها شدیدتر می‌شود. از طرف دیگر، نمونه‌هایی که دارای کمترین و بیشترین شکل‌پذیری هستند، به ترتیب، کمترین و بیشترین میزان افت بسامد طبیعی را در هنگام بارگذاری و ایجاد خسارت نشان می‌دهند.

۶. درگام‌های بارگذاری روی تیرهای مسلح با میلگرد FRP، بسامد موده‌های بالاتر نسبت به موده‌های پایین‌تر افت بیشتری می‌کنند؛ در حالی که تغییرات نسبی بسامد موده‌های پایین بیشتر از موده‌های بالاست.

به منظور یک‌نواخت کردن تنش پیوستگی قرار داده شود؛ با افزایش طول وصله، شکل‌پذیری افزایش خواهد یافت.

۴. نتایج آزمایش مودال تیرهای مسلح با میلگرد FRP نشان می‌دهند که در نمونه‌های با مود شکست بیرون‌کشیدگی میلگرد، میزان افت بسامدها نسبت به نمونه‌های با مود شکست شکافت پوشش بتن شدیدتر است. همچنین، در نمونه‌های با مقاومت بتن بالاتر، افت بسامدها بیشتر بوده است.

۵. نمونه‌های وصله‌دار و دارای میلگرد جانبی در طول وصله نشان می‌دهند که

## پانویس‌ها

1. weighted residual penalty

۲. Load Cell

۳. Data Logger

۴. dual channel Analyzer

۵. Frequency Response Function

۶. Splitting

۷. Pullout

## منابع (References)

- Cawley, P. and Adams, R.D. "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **14**(2), pp. 49-57 (1979).
- Maeck, J. and De Roeck, G. "Dynamic bending and torsion stiffness derivation from modal curvatures and torsion rates", *Journal of Sound and Vibration*, **225**(1), pp. 153-170 (1999).
- Maeck, J., Abdel Wahab, M., Peeters, B., De Roeck, G., De Visscher, J., De Wilde, W.P., Ndambi, J.M. and Vantomme, J. "Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination", *Engineering Structures*, **22**(10), pp. 1339-1349 (2000).
- Baghiee, N., Esfahani, M.R. and Moslem, K. "Studies on damage and FRP strengthening of reinforced concrete beams by vibration monitoring", *Engineering Structures*, **31**(4), pp. 875-893 (2009).
- Kim, J.T. and Stubbs, N. "Nondestructive crack detection model and vibration-based system identification in structures", 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability (2000).
- Kim, J.T. and Stubbs N. "Crack detection in beam-type structures using frequency data", *Journal of Sound and Vibration*, **259**(1), pp. 145-160 (2003).
- Shih, H.W., Thambiratnam, D.P. and Chan, T.H.T. "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach", *Journal of Sound and Vibration*, **323**(3-5), pp. 645-661 (2009).
- Peterson, S.T. and et al. "Application of dynamic system identification to timber beams", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **127**(4), pp. 418-425 (2001).
- Abdel Wahab, M. and De Roeck, G. "Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario", *Journal of Sound and Vibration*, **226**(2), pp. 217-235 (1999).
- Goldfeld, Y. "Identification of the stiffness distribution in statically indeterminate beams", *Journal of Sound and Vibration*, **304**(3-5), pp. 918-931 (2007).
- Tepfers, R., *A Theory of Bond Applied to Overlapping Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars*, Publication 73:2, Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 328 pp, (1973).
- Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E. and Gosh, S.K. "Behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in high strength concrete", *ACI Structural Journal*, **96**(5), pp. 826-836 (1999).
- Esfahani, M.R. and Rangan, B.V. "Bond between normal strength and high-strength concrete (HSC) and reinforcing bars in splices in beams", *ACI Structural Journal*, **95**(3), pp. 272-280 (1998).
- Esfahani, M.R. and Kianoush, M.R. "Development/splice length of reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **102**(1), pp. 22-30 (2005).
- Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Gao, D. "Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars", *Construction and Building Materials*, **12**(8), pp. 453-462 (1998).
- Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Mukhopadhyaya, D. "Bond strength of glass FRP rebar splices in beams under static loading", *Construction and Building Materials*, **13**(7), pp. 383-392 (1999).
- Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. and Lachemi, M. "Bond strength of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars in normal and self-consolidating concrete", *Can. J. Civ. Eng.*, **32**(3), pp. 553-560 (2005).
- Mosley, C.P., Tureyen, A.K. and Frosch, R.J. "Bond strength of nonmetallic reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **105**(5), pp. 634-642 (2008).

19. Harajli, M. and Abouniaj, M. "Bond performance of GFRP bars in tension: Experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines", *ASCE, J. Compos. Constr.*, **14**(6), pp. 659-668 (2010).
20. Agilent Technologies, The Fundamentals of Modal Testing, Application Note 243-3, U.S.A, 56 pp, (2000).
21. Cohn, M.Z. and Bartlett, M. "Computer-simulated flexural tests of partially prestressed concrete sections", *ASCE Journal of Structural Division*, **108**(ST12), pp. 2747-2765 (1982).
22. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-03, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Detroit, 42 pp, (2003).

# STUDY ON BEHAVIOR OF LAP-SPLICED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH GFRP BARS BY STATIC AND MODAL TESTS

**S.R. Mousavi**

se\_mu15@stu-mail.um.ac.ir

**M.R. Esfahani**(corresponding author)

esfahani@um.ac.ir

**B. Mohammadzadeh**

mohamadza@um.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Ferdowsi University of Mashhad**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 25-36, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 April 2011; received in revised form 10 August 2011; accepted 17 September 2011.

## Abstract

Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars can be used as a reinforcing material by nature corrosion resistant. These bars have high tensile strength and appropriate durability but are linear elastic up to failure and not ductile. Also, the bond strengths of lap-spliced concrete beams reinforced with steel and GFRP bars are different because of the elastic modulus and the surface conditions of these bars. These parameters affect the non-uniformity of bond stress along the spliced length of lap-spliced concrete beams reinforced with GFRP bars. Different studies show that by using an appropriate amount of transverse reinforcement, satisfactory bond strength and ductility response can be obtained. Some studies concluded that the bond strength of FRP bars is less than that of steel bars and the modulus of elasticity is the most significant parameter in the reduction of bond strength. In this paper, a previous proposed equation which accounts for the modulus of elasticity of reinforcing bars in bond strength is modified for FRP bars. The modified equation is compared with experimental results and ACI440.1R-03 provisions. The results show that the bond strengths calculated with the modified equation correlate well with the experimental values. In the experimental part of the study, seven beam specimens were manufactured and tested. Laboratory specimens were designed with different parameters of splice length, concrete compressive strength, amount of transverse reinforcement along the splice length and the diameter of longitudinal bars. Static test is carried out for caus-

ing damage in different levels of loading. The cracks of the specimens were mapped and test observation was recorded during loading steps and at the time of failure. Also, the relationships of force versus mid-span displacement were obtained using the static tests. Then the bond strength and the ductility of specimens were analyzed. At each step of loading, a modal test was carried out to obtain the dynamic parameters of the specimens. Changes in the dynamic parameters are evaluated by modal test results between different steps of loading.

The results show that the ductility is increased by increasing of transverse reinforcement and splice length and concrete compressive strength. The bond failure mode alters from splitting to pullout due to an appropriate amount of transverse reinforcement. This alteration controls the slip of bars and increases the ductility. Frequency reduction of specimens with splitting failure is lower than that of specimens with pullout failure. Also, frequency reduction increases with increase in transverse reinforcement along splice length of lap-spliced beams. The spliced specimens with an appropriate amount of transverse reinforcement are more ductile than non-spliced specimens. This is mainly due to the slip of spliced bars in the lap-spliced specimens. In addition, frequency reduction of ductile specimens is more than that of brittle specimens in different loading steps.

**Key Words:** modal test, bond strength, ductility, splice length, frequency, transverse reinforcement, GFRP bars.