



افزایش شکل پذیری اتصالات بتن آرمه با استفاده از ورقه های FRP

داود مستوفی نژاد، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان *

سید بهزاد طلایی طباء، دانشجوی دکترای سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان **

* تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۱، نمابر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیکی: dmostofi@cc.iut.ac.ir

** تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۳۸۱۹، نمابر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیکی: talaeitaba@yahoo.com

چکیده

شکل پذیری اتصالات را می توان یکی از مهمترین عوامل مؤثر در رفتار سازه های بتن آرمه دانست؛ با این وجود معمولاً اتصالات از این نظر دچار ضعف هستند. از این رو بحث تقویت اتصالات از مسائل مورد توجه در مهندسی عمران می باشد. در تحقیق حاضر با انتخاب سه نمونه مبنا (کنترل) و تعریف بیش از ۸۰ نمونه برای تقویت آن سه نمونه، سعی در افزایش شکل پذیری اتصالات بوده است. چیدمان های مختلف آرماتور طولی و عرضی و همچنین حالت های مختلف قرارگیری FRP برای نمونه ها در نظر گرفته شد، و اتصالات مورد بررسی تماماً با نرم افزار ANSYS مدل سازی و آنالیز غیرخطی شدند.

نتایج این آنالیزها نشان داد که با استفاده از صفحات FRP می توان شکل پذیری اتصالات را به صورت قابل ملاحظه (تا ۷۷٪) افزایش داد؛ ضمن اینکه مقاومت خمشی اتصالات نیز به صورت چشمگیر نسبت به نمونه مبنا افزایش می یابد. همچنین نتایج تحقیق حاضر حاکی از رفتار بسیار نامناسب اتصالات با نسبت زیاد آرماتور طولی تیر بود؛ به گونه ای که حتی تقویت های به کار رفته نیز نمی توانست از رفتار غیر شکل پذیر آنها جلوگیری کند.

کلید واژه ها: بتن آرمه، شکل پذیری، اتصالات، تقویت، ورقه های FRP.

۱- مقدمه

یکی از مسائل تعیین کننده رفتار سازه های بتنی در مقابل بار زلزله، رفتار اتصال و شکل پذیری مناسب آن است. در حقیقت شرط رسیدن به شکل پذیری کافی در تیرها و ستون ها آن است که اتصال از مقاومت و شکل پذیری کافی در تحمل بارهای نهایی تیر و ستون برخوردار باشد. از این دیدگاه آئین نامه های طراحی سازه های بتن آرمه، ضوابط خاصی را برای آرماتورگذاری ناحیه اتصال ارائه می کنند. لیکن اجرای این ضوابط در عمل دشوار است. از این رو تقویت اتصالات سازه های بتنی موجود از مسائل مورد توجه محققین به شمار می آید [۱]. در دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، ژاکت های فولادی برای تقویت اتصالات به کار گرفته می شد؛ با این وجود در اواخر دهه ۱۹۹۰ و

در سال‌های اخیر، از کامپوزیت‌های FRP برای تقویت اتصالات استفاده شده است.

مسلماً در سال ۲۰۰۰ به بررسی مقاومت خمشی و شکل‌پذیری اتصالات تقویت شده با ورقه‌های FRP پرداخت. از مهم‌ترین نتایج تحقیق وی می‌توان به افزایش شکل‌پذیری اتصالات تقویت شده تا ۴۳٪ اشاره کرد [۲]. پروین و گراناتا در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ دو دسته تحقیق مجزا در زمینه تقویت اتصالات انجام دادند؛ دسته اول به صورت آزمایشگاهی و دسته دوم به صورت مدل‌سازی اجزاء محدود بوده است. در تحقیقات این محققین بیشتر به مقوله افزایش مقاومت خمشی اتصال توجه شده است [۳ و ۴].

در تحقیق حاضر با استفاده از این ورقه‌ها سعی بر افزایش شکل‌پذیری اتصالات بوده است. ایده به کار رفته در تقویت اتصالات، جلوگیری از شکست اتصال در باربری نهایی و همچنین فراهم ساختن زمینه‌ای برای شکل‌پذیر شدن رفتار اتصال بوده است.

۲- نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر

۲-۱- نمونه‌های کنترل

در این تحقیق سه نمونه اتصال کناری به عنوان نمونه مبنا (کنترل) تعریف گردید. ابعاد مقطع تیر و ستون در این نمونه‌ها برابر ۴۰۰×۴۰۰ mm، کل ارتفاع ستون ۶ متر و طول تیر از هر ستون ۲ متر در نظر گرفته شد. همچنین آرماتورگذاری طولی و عرضی این اتصالات در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول منظور از ناحیه اتصال، ناحیه مورد نظر آئین‌نامه ACI برای تیر و ستون است که در آن ناحیه باید آرماتورهای عرضی به صورت متراکم‌تر قرار داده شود. برای این نمونه‌ها طول این ناحیه در تیر برابر ۸۰۰ mm و در ستون برابر ۵۰۰ mm محاسبه شده است.

جدول ۱: ابعاد و آرماتورگذاری اتصالات مبنا

نام نمونه	نسبت آرماتور طولی تیر	نسبت آرماتور طولی ستون	آرماتور عرضی تیر در ناحیه اتصال	آرماتور عرضی تیر در سایر نواحی	آرماتور عرضی ستون در ناحیه اتصال	آرماتور عرضی ستون در سایر نواحی
Base	$(0.3\rho_{\max})$	4%	$\Phi 10 @ 75$	$\Phi 10 @ 175$	$\Phi 10 @ 100$	$\Phi 10 @ 400$
Base-b	$(\rho_{\max})$	4%	$\Phi 12 @ 50$	$\Phi 12 @ 50$	$\Phi 10 @ 100$	$\Phi 10 @ 400$
Base-s	$(0.3\rho_{\max})$	4%	$\Phi 10 @ 175$	$\Phi 10 @ 175$	$\Phi 10 @ 400$	$\Phi 10 @ 400$

همانگونه که در جدول ۱ مشخص است، در دو نمونه اول و سوم که با نام‌های Base و Base-s شناخته می‌شود، تیر ضعیف و ستون قوی وجود دارد؛ با این تفاوت که در نمونه Base، مقدار آرماتورهای عرضی ناحیه اتصال مطابق ضوابط خاص مناطق زلزله‌خیز بر اساس آئین‌نامه ACI 318 رعایت شده و در نمونه Base-s این ضوابط رعایت نشده است.

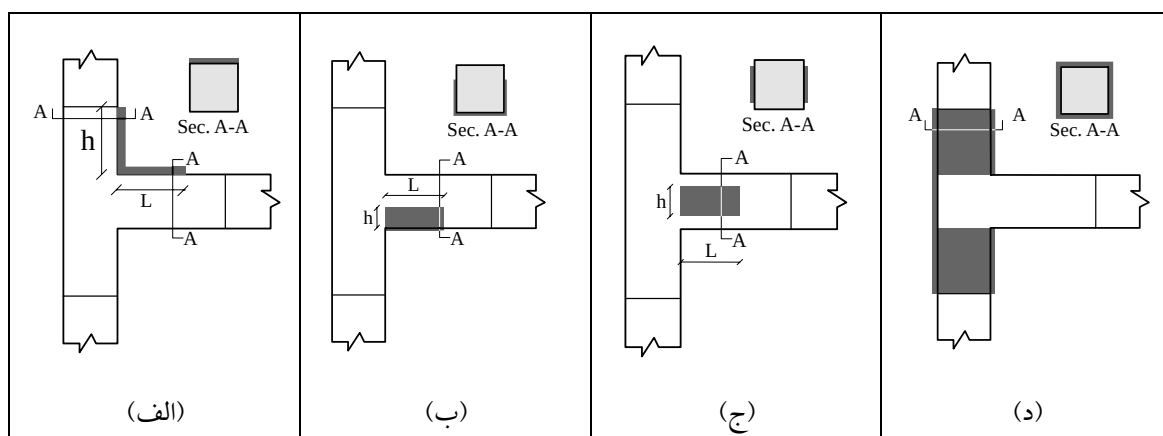
نمونه Base-b یک نمونه مبنا است که در آن آرماتورگذاری عرضی در ناحیه اتصال، بر اساس ضوابط خاص

مناطق زلزله‌خیز رعایت گردیده است؛ ولی نسبت فولادهای طولی تیر آن برابر حداکثر فولاد مجاز آئین‌نامه‌ای در نظر گرفته شده است.

۲-۲- نمونه‌های تقویت شده

در تحقیق حاضر ۴ حالت کلی برای تقویت نمونه‌های مبنا تعریف شد. این ۴ حالت عبارتند از:

- ۱- ورقه‌های L شکل روی اتصال (شکل ۱-الف)
- ۲- ورقه‌های U شکل زیر تیر (شکل ۱-ب)
- ۳- ورقه‌های چسبیده در دو طرف تیر (شکل ۱-ج)
- ۴- دورپیچ ستون (شکل ۱-د).



شکل ۱: حالت‌های تقویت مورد استفاده در تحقیق حاضر

از ترکیب این ۴ حالت و در نظر گرفتن ورقه‌های FRP در طول‌ها و زوایای مختلف، برای نمونه مبنا Base، ۲۷ حالت تقویت و برای نمونه‌های Base-s و Base-b، هر یک ۲۳ حالت تقویت تعریف شد. در جدول ۲ تمام این نمونه‌ها معرفی شده‌اند. به این ترتیب جمعاً ۸۳ نمونه برای بررسی تأثیرات استفاده از ورقه‌های FRP بر شکل‌پذیری اتصالات تعریف گردید.

ضخامت ورقه‌های CFRP به کار رفته برابر ۳ mm و حداکثر مقاومت و مدول الاستیسیته این ورقه‌ها در راستای الیاف به ترتیب برابر ۹۳۵ MPa و ۶۲ GPa مشابه مشخصات معرفی شده در مرجع [۵] در نظر گرفته شد. این نمونه‌ها پس از تعریف با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به صورت سه بعدی مدل‌سازی و به صورت غیرخطی آنالیز شدند.

۳- مدل‌سازی غیرخطی نمونه‌های مورد مطالعه

برای مدل‌سازی غیرخطی نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر از نرم‌افزار ANSYS استفاده شد. برای مدل‌سازی بتن از المان SOLID65 استفاده شد. این المان قابلیت وارد کردن ترک خوردگی و خردشدگی بتن را دارا است. همچنین می‌توان در سه راستای دلخواه آرماتور را به صورت نسبتی از حجم المان تعریف کرد. از این خاصیت برای مدل‌سازی آرماتورهای عرضی استفاده شد. از طرفی آرماتورهای طولی با استفاده از المان خربایی

LINK8 در بین گره‌های مربوط به بتن مدل‌سازی شدند.

جدول ۲: نمونه های تعریف شده برای تقویت اتصالات مبنا

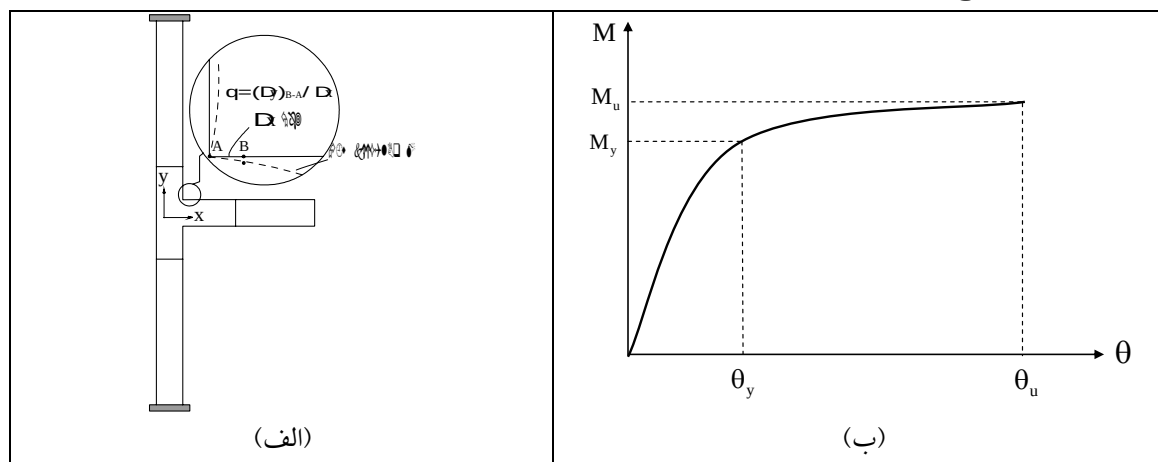
نام اتصال	نمونه مبنا			ورقه‌های L شکل		ورقه‌های U شکل		ورقه‌های چسبیده در دو طرف تیر		ورقه‌های دورپیچ شده به ستون
	Base	Base-b	Base-s	L (mm)	h (mm)	L (mm)	h (mm)	L (mm)	h (mm)	
S1	✓			400	500					No
S2	✓			700	500					No
S3	✓			400	500					No
S4	✓			700	500					No
S5; S5-s; S5-b	✓	✓	✓							Yes
S6; S6-b; S6-s	✓	✓	✓	400	500					Yes
S7; S7-b; S7-s	✓	✓	✓	700	500					Yes
S8; S8-b; S8-s	✓	✓	✓			400	200			No
S9; S9-b; S9-s	✓	✓	✓			400	400			No
S10; S10-b; S10-s	✓	✓	✓			700	200			No
S11; S11-b; S11-s	✓	✓	✓			700	400			No
S12; S12-b; S12-s	✓	✓	✓			400	200			Yes
S13; S13-b; S13-s	✓	✓	✓			400	400			Yes
S14; S14-b; S14-s	✓	✓	✓			700	200			Yes
S15; S15-b; S15-s	✓	✓	✓			700	400			Yes
S16; S16-b; S16-s	✓	✓	✓					400	200	No
S17; S17-b; S17-s	✓	✓	✓					400	400	No
S18; S18-b; S18-s	✓	✓	✓					700	200	No
S19; S19-b; S19-s	✓	✓	✓					700	400	No
S20; S20-b; S20-s	✓	✓	✓					400	200	Yes
S21; S21-b; S21-s	✓	✓	✓					400	400	Yes
S22; S22-b; S22-s	✓	✓	✓					700	200	Yes
S23; S23-b; S23-s	✓	✓	✓					700	400	Yes
S17-1; S17-1-b; S17-1-s	✓	✓	✓					400	400	No
S19-1; S19-1-b; S19-1-s	✓	✓	✓					700	400	No
S21-1; S21-1-b; S21-1-s	✓	✓	✓					400	400	Yes
S23-1; S23-1-b; S23-1-s	✓	✓	✓					700	400	Yes

توضیح: ۱- در نمونه‌های مشخص شده با زمینه تیره جهت قرارگیری الیاف در اطراف تیر موازی با محور طولی تیر است؛ ۲- دو نمونه S3 و S4 مشابه S1 و S2 هستند؛ با این تفاوت که در انتهای طول تقویت شده تیر یک پوشش U شکل به طول ۱۰۰mm در زیر تیر قرار دارد.

از مهم‌ترین مسائلی که در تحقیق حاضر به آن توجه شده است، وارد شدن لغزش مهارهای آرماتورهای طولی تیر در مدل‌سازی می‌باشد. به این منظور بر اساس مدل پیشنهادی سروشیان و همکاران، در ناحیه اتصال بین آرماتورها و بتن المان‌های فنر غیرخطی COMBIN39 قرار گرفت [۶].

برای مدل‌سازی ورقه‌های FRP از المان‌های SOLID45 استفاده شد و ماده FRP به صورت یک ماده غیر ایزوتروپیک (ANISO) تعریف گردید.

شرایط مرزی مدل‌های ساخته شده به صورت گیرداری ستون در بالا و پائین و اعمال بار متمرکز در انتهای آزاد تیر در نظر گرفته شد (شکل ۲- الف). مدل‌سازی‌های انجام شده در مراحل مختلف با نتایج آزمایشگاهی و تئوریک موجود مقایسه گردید و نتایج قابل قبولی مشاهده شد [۷].



شکل ۲: (الف) تعریف دوران در بررسی نتایج آنالیز؛ (ب) نمودار لنگر- دوران به صورت شماتیک

۴- تعریف شکل پذیری در نتایج آنالیزهای انجام شده

ارائه معیار سنجش شکل پذیری برای اتصالات دشوار است. در تحقیق حاضر با استفاده از تغییر مکان‌های قائم دو نقطه A و B در شکل ۲- الف و تقسیم تفاضل این دو بر طول AB دوران اتصال محاسبه گردید. همچنین از منحنی لنگر- دوران ($M - \theta$) مطابق شکل ۲- ب استفاده شد و معیار شکل پذیری به صورت $\frac{\theta_u}{\theta_y}$ محاسبه گردید. منظور از θ_u و θ_y به ترتیب، دوران نهایی اتصال و دوران نظیر تسلیم آرماتورهای طولی تیر می‌باشد.

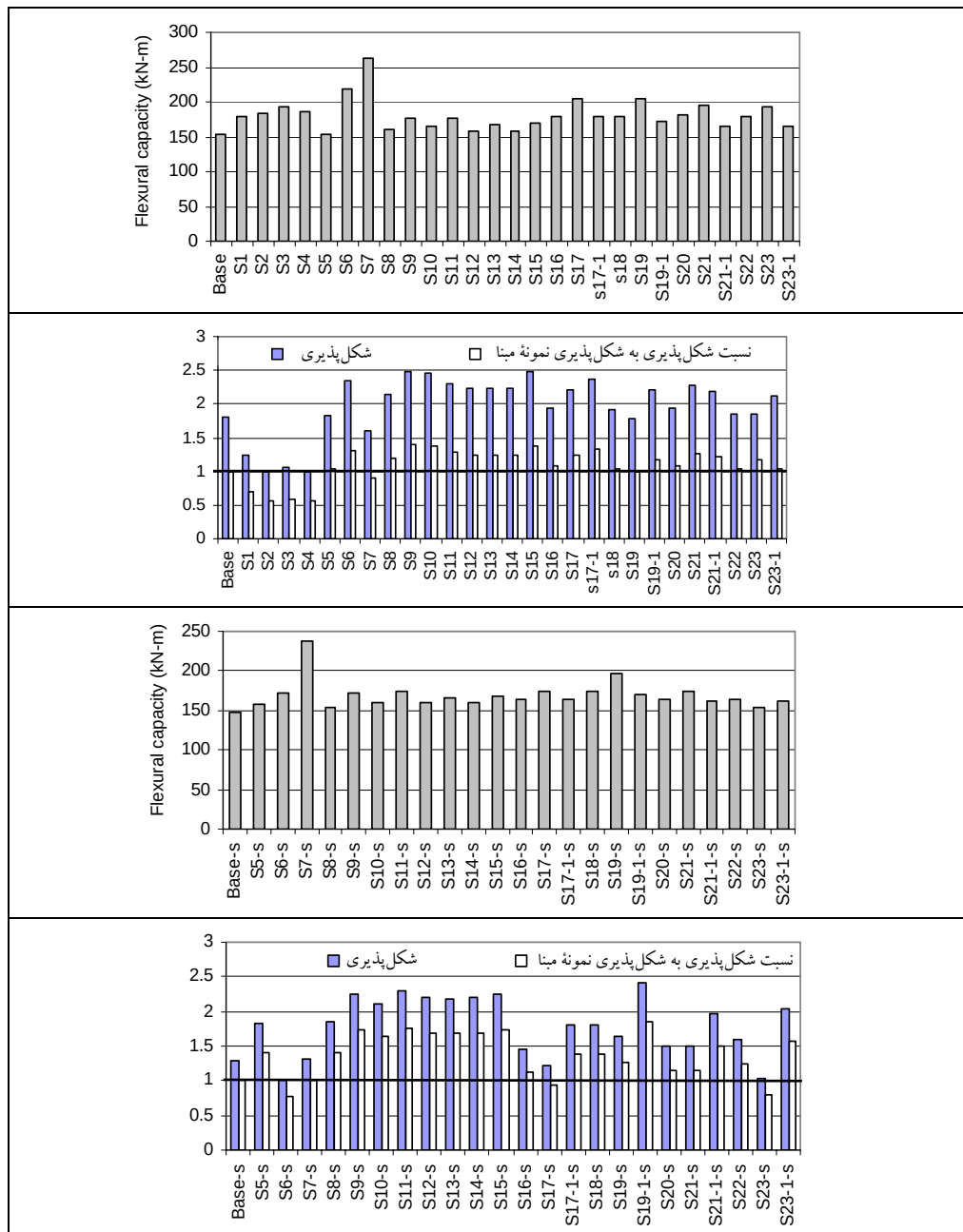
۵- نتایج بدست آمده

پس از انجام آنالیز غیر خطی نمونه‌های مورد مطالعه که هر یک با یک رایانه در حد P4 2400، زمانی بین ۲ تا ۷ ساعت به خود اختصاص می‌داد، کلیه نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آنجا که منحنی لنگر- دوران به شدت وابسته به تعداد زیرگام‌های پیش رفته در حل غیرخطی می‌باشد، در بعضی از موارد آنالیزهای متعددی برای رسیدن به بهترین آنالیز ممکن انجام می‌گردید [۷].

در شکل ۳ مقدار لنگر خمشی قابل تحمل برای هر نمونه و همچنین شکل پذیری محاسبه شده برای دو دسته از نمونه‌های مورد بررسی ارائه گردیده است. این دو دسته مربوط به نمونه‌های تقویت شده اتصالات مبنای Base و Base-s هستند. ذیلاً نتایج بدست آمده از آنالیز اتصالات تقویت شده مربوط به هر یک از اتصالات مبنای به طور جداگانه و مختصراً مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- نتایج مربوط به تقویت اتصال مبنای Base

در بین نمونه‌های تقویت شده اتصال مبنای Base، در ۴ نمونه S1، S2، S3 و S4 و همچنین نمونه S7 شکل پذیری اتصال کاهش یافته است. از مجموع حالت‌های تقویت شده از اتصال مبنای Base نتایج زیر



شکل ۳: مقادیر لنگر قابل تحمل و شکل پذیری در اتصالات تقویت شده دو اتصال مبنای Base و Base-s

شایان ذکر هستند:

۱- قرارگیری ورقه‌های FRP در ناحیه کشش تیر سبب کاهش شکل‌پذیری گردید. نتایج آنالیز این نمونه‌ها نشان داد که آرماتور طولی تیر درست در مقطعی پس از طول تقویت شده تیر تسلیم می‌شود و تیر در چنین مقطعی دچار شکست می‌گردد. به این ترتیب می‌توان علت کاهش شکل‌پذیری ۴ نمونه S1 تا S4 را ضعف خمشی تیر در

تحميل بار اتصال تقویت شده دانست.

۲- در بقیه حالت‌ها اعم از ورقه‌های U شکل زیر تیر یا ورقه‌های چسبیده در طرفین تیر، با افزایش شکل‌پذیری بین ۲ تا ۳۹٪ روبرو بودیم. همچنین در این حالات مقاومت خمشی اتصال بین ۴ تا ۷۲٪ بهبود یافت. در این حالت‌ها با قرارگیری الیاف در راستای عمود بر محور تیر، تأثیر بهتری بر شکل‌پذیری مشاهده شد. این نوع قرارگیری ورقه‌ها سبب ایجاد رفتاری مشابه آرماتورهای عرضی می‌شود. بیشترین مقدار افزایش شکل‌پذیری مربوط به نمونه S9 بود که در آن زیر تیر و دو طرف تیر به طور کامل پوشیده شده بود.

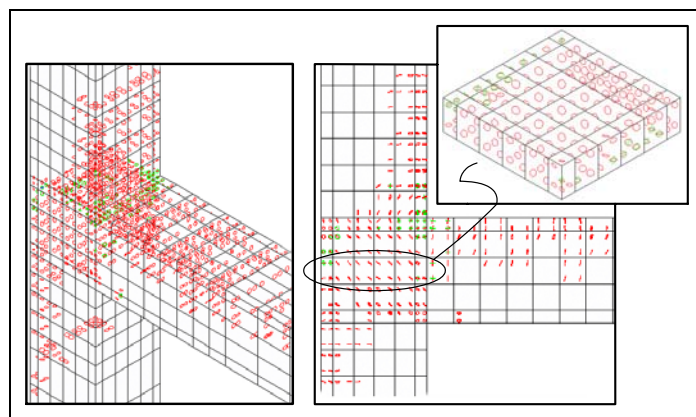
۳- دورپیچ شدن ستون در این دسته از اتصالات تنها شرایط انتهایی تیر را در اتصال مشابه حالت گیردار می‌ساخت که تأثیر این مسأله در شکل‌پذیری نمونه‌های مورد بحث چندان زیاد نبود.

۲-۵- نتایج مربوط به تقویت اتصال مبنای Base-s

در نمونه‌های تقویت شده اتصال مبنای Base-s نیز نتایج مشابهی با آنچه در نمونه‌های مربوط به اتصال Base دیده شد، بدست آمد. در بین حالت‌های استفاده شده برای تقویت اتصال مبنای Base-s، شکل‌پذیری بین ۷ تا ۷۷ درصد و مقاومت خمشی این اتصالات بین ۳ تا ۳۳٪ افزایش داشت. به طور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از ورقه‌های FRP، ضعف شکل‌پذیری ناشی از کمبود آرماتورهای عرضی ناحیه اتصال جبران شده است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده نمونه مبنای Base-s که در آن آرماتورهای عرضی اتصال، ضوابط خاص مناطق زلزله خیز را ارضاء نمی‌کنند، ۲۵٪ کاهش شکل‌پذیری ایجاد شده است؛ این در حالی است که مقاومت خمشی اتصال تنها ۳/۴٪ کاهش داشته است.

۳-۵- نتایج بدست آمده از اتصال مبنای Base-b

در نمونه Base-b و تمام حالت‌های تعریف شده برای تقویت این اتصال، شکست برشی هسته اتصال مشاهده گردید (شکل ۴). این شکست سبب عدم دستیابی به یک رفتار شکل‌پذیر می‌گردید. علت بروز چنین رفتاری ضعف اتصال در تحمل بار وارده بود. شایان ذکر است که در این نمونه‌ها آرماتور طولی تیر در حد ρ_{max} بود که این مسأله مقاومت خمشی زیادی را در اتصال می‌طلبد. همانگونه که در شکل ۴ مشخص است، المان‌های هسته اتصال با ترک خوردگی برشی با زاویه ۴۵ درجه دچار شکست شده‌اند.



شکل ۴: شکست برشی هسته در اتصالات با آرماتور طولی تیر در حد ρ_{max}

همچنین در نتایج آنالیز در شکل ۳ مشاهده می‌شود که لنگر قابل تحمل برای اتصال Base-b، معادل لنگر نظیر تیر با آرماتور طولی $0.5\rho_b$ است.

۶- نتیجه گیری

بر اساس آنالیزهای انجام شده در تحقیق حاضر نتایج زیر قابل ذکر هستند:

- ۱- در اتصالات بتن آرمه کناری با آرماتور طولی تیر در حد $0.3\rho_{max}$ ، به کار بردن ورقه‌های FRP در ناحیه کششی تیر سبب افزایش مقاومت خمشی و کاهش شکل‌پذیری اتصال می‌شود.
- ۲- استفاده از ورقه‌های FRP در دو طرف تیر و به صورت U شکل در زیر تیر، سبب افزایش شکل‌پذیری اتصال می‌شود. در این حالت‌ها افزایش ارتفاع ورقه در دو پهلوی تیر به شکل‌پذیری کمک می‌کند. همچنین قرار گیری الیاف در این حالت در راستای عمود بر محور طولی تیر توصیه می‌گردد.
- ۳- استفاده از دورپیچ ستون به دلیل آنکه سبب سخت شدن ستون در ناحیه اتصال می‌شود، می‌تواند رفتار کلی اتصال را بهبود بخشد.
- ۴- بی‌توجهی به ضوابط خاص آرماتورهای عرضی اتصال در مناطق زلزله خیز، می‌تواند سبب کاهش ۲۵ درصدی شکل‌پذیری آن گردد. در این موارد با استفاده از ورقه‌های FRP می‌توان این ضعف را جبران کرد و حتی از حد شکل‌پذیری تأمین شده با رعایت ضوابط خاص این آرماتورها نیز فراتر رفت.
- ۵- قراردادن آرماتور طولی تیر بیش از $0.5\rho_b$ می‌تواند سبب ایجاد شکست برشی در هسته اتصال گردد. در این حالت تقویت اتصال، براساس این تحقیق تقریباً غیر ممکن است. شایان ذکر است که این مقدار آرماتور براساس آئین‌نامه ACI، شرط استفاده از بازتوزیع لنگر در تیرهای ممتد است.

مراجع

- [۱] طلائی‌طبا، سید بهزاد، افزایش شکل‌پذیری اتصالات بتن آرمه با استفاده از ورقه‌های FRP، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، بهار ۱۳۸۲.

- [2] Mosallam, A. S., "Strength and Ductility of Reinforced Concrete Moment Frame Connections Strengthened with Quasi-Isotropic Laminates," *Composites: Part B*, No. 31, 2000, pp. 481-497.

- [3] Parvin, A. and Granata, P., "Numerical Study of Structural Joints Reinforced With Composite Fabrics," *Structures and Materials*, 1998, pp. 411-421.
- [4] Parvin, A. and Granata, P., "Use of FRP Overlays at Beam-Column Connections," *Proceeding of 2nd International Conference on Composites in Infrastructure*, Vol. 1, pp. 213-220, 1998.
- [5] Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S. and Chansawat, Kasidit, "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates," Final Report for Oregon Department of Transportation Research Group, *Internet File*.
- [6] Soroushian, P., Obaseki, K., Nagi, M. and Rojas, Maximo C., "Pullout Behavior of Hooked Bars in Exterior Beam- Column Connections," *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 6, 1988, pp. 269-279.
- [7] مستوفی نژاد، داود، و طلائی طباء، سید بهزاد، "مدل سازی غیر خطی اتصالات بتن آرمه تقویت شده با ورقه های FRP"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، *ICCE 2003*، مجموعه مقالات، جلد دوم، صص. ۳-۱۰، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، بهار ۱۳۸۲.