

بررسی رفتار لرزه ای اتصالات خمشی ماهیچه ای فولادی

محسن گرامی^۱، سجاد آزادی^۲

۱ و ۲- دانشکده مهندسی دانشگاه سمنان

Sajjad.Azadi@Gmail.com

خلاصه

گسترده‌گی آسیب دیدگیهای اتصالات ساختمانهای فولادی، پس از زلزله‌ی ۱۹۹۴ نورتریج، بوضوح وجود نقایص اساسی را در طراحی و شیوه‌های ساخت قابهای خمشی فولادی ویژه، به اثبات رسانید. بمنظور کاهش خسارت اتصالات خمشی، استراتژیهای متفاوتی جهت معرفی اتصالات بهبود یافته‌ی جدید، مطرح گردید. عمده‌ترین استراتژی «تقویت اتصال» یا «تضعیف موضعی» تیر در مجاورت اتصال می‌باشد. در میان انواع اتصالات بهبود یافته، «اتصالات ماهیچه‌ای» برای بهسازی، تعمیر و یا ساخت و ساز جدید، می‌توانند بسیار مؤثر باشند. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی اشکال مختلف این اتصالات نشان دهنده‌ی مؤثر بودن آنها در انتقال مفصل پلاستیک تیر به بیرون از ناحیه‌ی ماهیچه و شکل‌پذیری رضایتبخش آنهاست. در این مقاله ضمن بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات ماهیچه‌ای نتیجه‌گیری شده است که ظرفیت چرخش پلاستیک آنها عمدتاً بسیار فراتر از نیاز طراحیست و این اتصالات بخوبی می‌توانند اهداف طراحی را برآورده نمایند.

کلمات کلیدی: اتصالات خمشی ماهیچه ای، ظرفیت چرخش پلاستیک، بهسازی لرزه ای، قابهای خمشی فولادی.

مقدمه

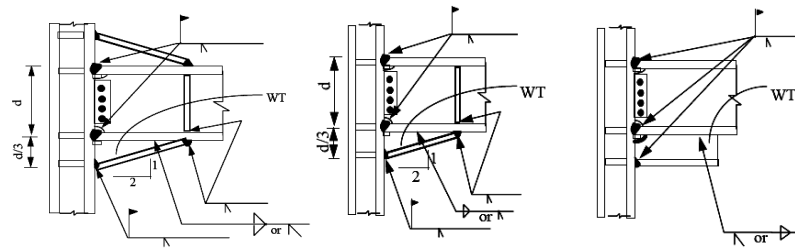
برای داشتن جذب انرژی پلاستیک قابل توجه، وقوع تسلیم ضروری است و شکست ترد اتصال مانع از این می‌شود که اتصالات خمشی جوشی، رفتار غیر الاستیک مورد نظر را برای مقاومت در برابر بارهای زلزله از خود نشان بدهند. رفتار غیر الاستیک اتصال، عمدتاً به تشکیل مفصل پلاستیک در تیر نسبت داده می‌شود. بنابراین، لازمه‌ی رفتار غیرالاستیک مطمئن و مورد انتظار، اطمینان یافتن از تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت مطلوب، در تیر و عدم وقوع شکست ترد، در اتصال می‌باشد. در سازه‌های آسیب دیده‌ی نورتریج، تنها شواهد اندکی دال بر اینکه نواحی پلاستیک واقعاً تشکیل شده باشند، وجود دارد، که شاید، یکی از دلایل مهم آن، نحوه‌ی در نظر گرفتن محل تشکیل مفصل پلاستیک در طراحی اتصالات بوده است. طراحی اتصالات قبل از نورتریج، به نحوی انجام می‌شده است که مفصل پلاستیک، در بر ستون، یعنی جایی که بالاترین قیود و تنشهای سه محوره وجود دارد، بوقوع بپیوندد. تنشهای سه محوره، تأثیر شدیدی در کاهش شکل‌پذیری و بروز رفتار ترد دارند. داده‌های مربوط به کشش و افزایش طول فولاد، از نمونه‌های کششی یک محوره که بصورت آهسته بارگذاری شده اند، حاصل شده است. تحت چنین شرایطی، فولاد میتواند ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش طول، نشان بدهد. هنگامیکه فولاد بصورت همزمان در دو یا سه جهت بارگذاری شود، قادر نخواهد بود شکل‌پذیری ذاتی خود را به نمایش بگذارد و به جای رفتار شکل-پذیر، بدون نشان دادن افزایش طول، دچار شکست ترد می‌شود [۱]. بنابراین، بمنظور حصول شکل‌پذیری در قابهای خمشی ویژه‌ی فولادی، تنشهای حداکثر، باید در ناحیه‌ی تنش یک محوره، که شکل‌پذیری فولاد قابل تأمین است، اتفاق بیفتد. دو رویکرد که باعث بوجود آمدن چنین وضعیتی می‌شوند، بصورت موفقیت‌آمیزی آزمایش شده است. رویکرد اول، تقویت موضعی اتصال است که رفتار مطلوب را با کاهش سطح تنش در اتصال و انتقال مفصل پلاستیک، به ناحیه‌ی تنش یک محوره، بوجود می‌آورد. دومین رویکرد، کاهش عمدی و سنجیده‌ی ظرفیت تیر، و انتقال مفصل به محدوده‌ای با امکان بروز رفتار شکل‌پذیر است، که این کار، از طریق حذف مقداری از مصالح بال تیر در محدوده‌ی مورد نظر انجام می‌شود [۲].

در پی زلزله‌ی نورتریج و آسیبهایی ناشی از آن، معیارهای طراحی اتصالات قابهای خمشی ویژه، مورد تجدیدنظر و بازنگری واقع شده و به دنبال آن، انواع گوناگونی از اتصالات خمشی فولادی، معرفی گردید. اتصالات خمشی تقویت شده با ماهیچه، یکی از این انواع جدید اتصالات هستند، که در آنها، استراتژی تقویت موضعی اتصال، اتخاذ شده است. عمده‌ترین ترکیب‌بندیهای پیشنهاد شده برای این نوع اتصال، عبارتند از: ماهیچه‌ی مثلثی در پایین اتصال، ماهیچه‌های مثلثی در بالا و پایین اتصال و ماهیچه‌ی مستقیم در پایین اتصال (شکل (۱)) [۳]. به طور کلی، نتایج آزمایشات بر روی این نوع اتصالات، نشان می‌دهد که این نوع اتصالات عموماً به چرخش‌های پلاستیک بزرگی دست یافته و ظرفیت دورانی بالایی دارند. افزایش عمق تیر در اثر

^۱ استادیار و پژوهشگر فوق دکترای سازه

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

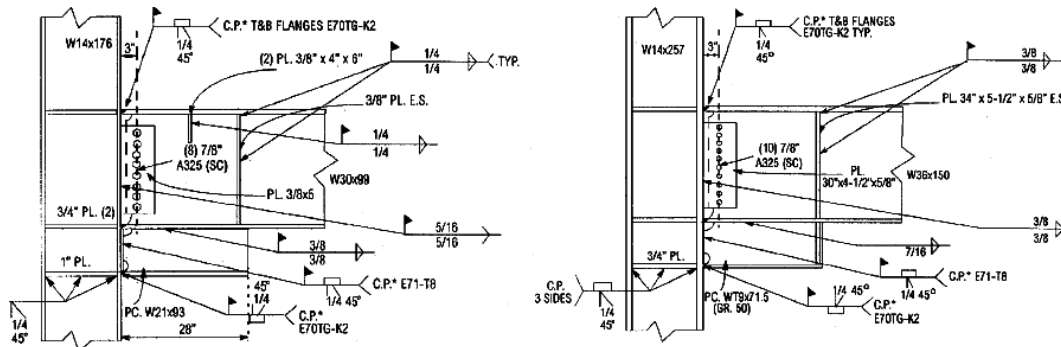
اجرای ماهیچه، ممکن است، از نظر معماری تأثیرات نامطلوبی داشته باشد؛ این موضوع، در مورد اتصالات با ماهیچه ی بالا و پایین از اهمیت بیشتری برخوردار است. هزینه ی این اتصالات نیز، نسبت به سایر انواع اتصالات، بسیار بالا بوده و در این میان، اتصالات دارای ماهیچه ی فوقانی و تحتانی، با وجود داشتن ظرفیت پلاستیک بسیار خوب و گیرداری بسیار بالا، بیشترین هزینه را نسبت به انواع دیگر دارند [۴]. مقداری از هزینه ها با حذف جوش بین بالهای تیر و ستون، قابل کاهش است، ولی، عملکرد اتصال در این حالت، مورد آزمایش قرار نگرفته است. بعلاوه، جوش دادن ماهیچه به تیر، در کارخانه، می تواند قسمتی از هزینه های نصب کارگاهی را کاهش دهد. بمنظور حداقل کردن هزینه ی اتصال ماهیچه ای، استفاده از ماهیچه ی مستقیم با انتهای آزاد، توسط SAC پیشنهاد گردیده است [۵]. در مجموع، به علت هزینه ی بالای این اتصالات، عمدتاً، تمایل به استفاده از این نوع اتصالات در عملیات بهسازی و یا تعمیر ساختمانهای آسیب دیده، وجود دارد.



شکل ۱- انواع اتصالات ماهیچه ای: (الف) ماهیچه های مثلثی بالا و پایین اتصال. (ب) ماهیچه ی مثلثی پایین اتصال. (ج) ماهیچه ی مستقیم پایین اتصال.

ظرفیت چرخش پلاستیک و مود گسیختگی اتصالات ماهیچه ای

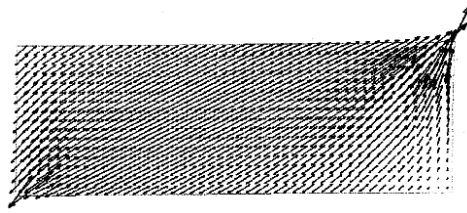
در فاز اول پروژه ی SAC، دو اتصال UCSD و UCB، با ماهیچه ی مستقیم و جزئیات نشان داده شده در شکل (۲)، مورد آزمایش واقع شد [۶]. در نمونه ی UCSD، شکست جوش، از نوک ماهیچه، که بیشترین تمرکز تنش در آنجا اتفاق می افتد، آغاز شده، و به محض جدا شدن کامل ماهیچه از تیر، جوش شیار ی بال فوقانی تیر دچار شکست ترد گردید. چرخش پلاستیک، در این اتصال، تنها ۰.۰۲ رادیان بود. در نمونه ی UCB، بمنظور ممانعت از شکست جوشهای گوشه ی نوک ماهیچه، سخت کننده های جان تیر، تا جان ماهیچه امتداد داده شده بود. در این نمونه، پس از تسلیم قابل توجه اتصال، بال فوقانی تیر در سراسر عرض خود، در مجاورت جوش شیار ی، دچار شکست گردید. حداکثر چرخش پلاستیک حاصله، در نمونه ی UCB، تنها ۰.۱۵ رادیان بود. بدلیل عملکرد غیر رضایت بخش هر دو نمونه، آزمایشات بیشتری انجام نشد.



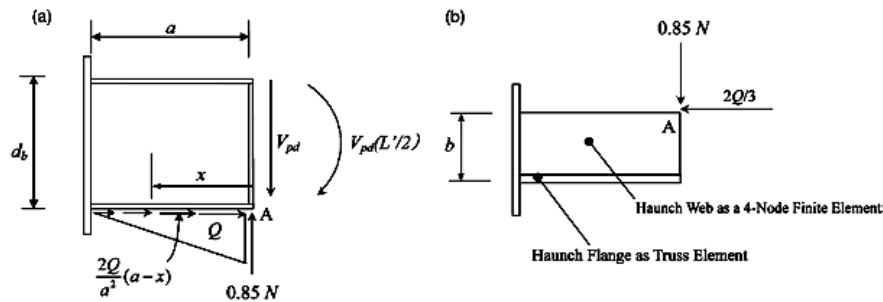
شکل ۲- نمونه های آزمایشی SAC [۶]: (الف) نمونه ی UCSD. (ب) نمونه ی UCB.

مکانیسم انتقال نیرو در اتصالات ماهیچه ای و مدل دستک معادل

لی و یوانگ، در مطالعه ی خود دریافتند که ماهیچه ی جوشی مستقیم، بمیزان خیلی زیادی مکانیسم انتقال نیرو در اتصال را تغییر داده و توسط تئوری تیر که با مقطع مرکب از تیر و ماهیچه به عنوان یک مقطع یکپارچه رفتار می کند، نمی توان به نحو قابل اطمینانی مکانیسم انتقال نیرو را در اتصال ماهیچه ای، پیش بینی نمود [۵]. آنها دریافتند که، بر خلاف انتظار ناشی از تئوری تیر، یک نوار مایل در جان ماهیچه ی مستقیم بعنوان دستک عمل می کند (شکل (۳))، بعلاوه، بال ماهیچه نیز، تحت تنشهای بالایی نبوده و به عنوان سخت کننده ی جان ماهیچه عمل می کند. بر مبنای این مطالعات، لی و یوانگ، یک مدل تحلیلی ساده سازی شده، ارائه نمودند (شکل (۴)). مدل پیشنهادی، جان و بال ماهیچه را به ترتیب، به صورت یک المان محدود چهارگره ی مستطیلی تنش صفحه ای و یک المان خریا ایده آل سازی می نماید. با این ایده آل سازی، نیروهای اندرکنش برشی و قائم، در فصل مشترک تیر و ماهیچه، از شرایط تعادل نیروها و سازگاری تغییرشکلها، قابل تعیین است. این موضوع، باعث تبدیل مسأله ی طراحی، به یک مسأله ی ساده ی استاتیکی می شود. یو و همکاران نیز، بطور مشابه، عدم برقراری تئوری تیر را برای اتصالات خمشی با ماهیچه ی مثلثی، نشان دادند [۷].



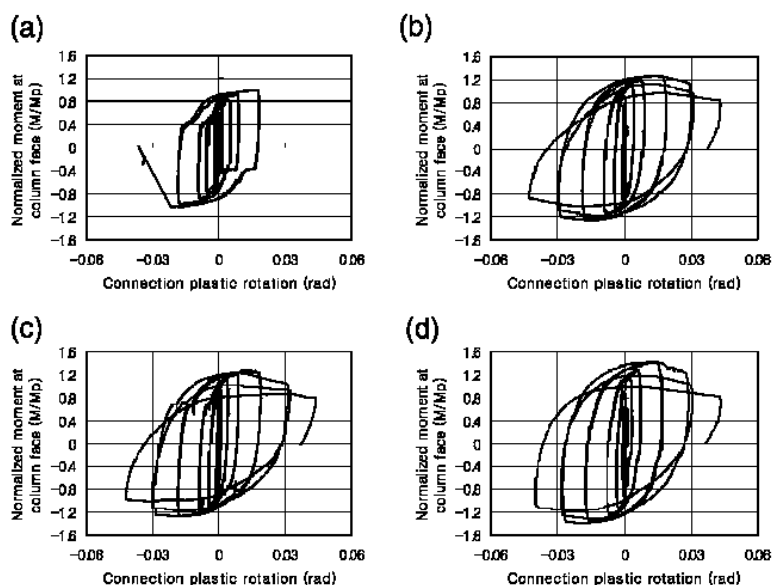
شکل ۳- توزیع تنش اصلی در جان ماهیچه ی مستقیم.



شکل ۴- مدل اندرکنش ساده سازی شده ی بین تیر و ماهیچه: (الف) تیر. (ب) ماهیچه [۵].

لی و همکاران، با پیروی از روش طراحی پیشنهادی لی و یوانگ [۵]، سه نمونه اتصال خمشی خارجی، طراحی نموده و آنها را مورد آزمایش قرار دادند [۶]. در این سه نمونه، از ماهیچه ی مستقیم، به طول 600 و عمق 220 میلیمتر، تیر $H600 \times 200 \times 11 \times 17$ ($F_y = 236 \text{ MPa}$)، و ستون $H400 \times 408 \times 21 \times 21$ ($F_y = 325 \text{ MPa}$)، استفاده شده، و یک نمونه نیز (PN600-SB)، به عنوان نمونه ی مینا و با تبعیت از جزئیات قبل از نوتریج ساخته شده است. با توجه به اینکه عمده ی نیروی قائم فصل مشترک تیر و ماهیچه در نزدیکی نوک ماهیچه تمرکز می یابد (شکل ۳)، در این سه نمونه، از یک جفت سخت کننده ی عرضی جان تیر، در نوک ماهیچه، استفاده شده است. به دلیل پایین بودن سطح تنش خمشی در تراز بال تحتانی تیر، ورقهای پیوستگی در این تراز اجرا نشده است. این سه نمونه اتصال ماهیچه ای، بجز جزئیات مورد استفاده بمنظور اجتناب از ترک خوردگی جوشهای گوشه ی نوک ماهیچه، در سایر موارد مشابه بوده اند؛ انتهای ماهیچه ی نمونه ی SH600-H&T به صورت مقطع متغیر و در مجاورت نوک ماهیچه دارای سوراخ بوده است. نمونه ی SH600-H&PE دارای یک جفت سخت کننده ی جان تیر با امتداد یافتگی جزئی در جان ماهیچه، و یک سوراخ، در مجاورت نوک ماهیچه، بوده است. در نمونه ی SH600-FE نیز، یک جفت سخت کننده ی جان تیر، به صورت کامل تا بال ماهیچه امتداد یافته است. بنابراین از میان سه نمونه ی دارای ماهیچه، نمونه ی SH600-FE، دارای بزرگترین درجه ی گیرداری و قید، در نوک ماهیچه، بوده است. نمونه ها، به صورت استاتیکی و برطبق پروتکل استاندارد بارگذاری SAC2000 مورد آزمایش واقع شده اند. پاسخهای چرخه ای همه ی نمونه ها، در شکل (۵) ارائه شده است [۶]. هر سه نمونه ی دارای ماهیچه، سطوح رضایت بخشی از شکل پذیری، از خود نشان داده، و هیچ یک از آنها، در طی آزمایش دچار شکست ترد نشده است. به علت پیچش جانبی شدید، در دریافت طبقه ی ۵ درصد، آزمایش خاتمه یافته است. در این نمونه ها، ترکیب لبه ی شیب دار با سوراخ نزدیک نوک ماهیچه، یا یک جفت سخت کننده با امتداد یافتگی جزئی یا کامل در جان ماهیچه، به صورت موفقیت آمیزی از آغاز ترک در نوک ماهیچه ممانعت بعمل آورده است. در نمونه ی PN600-SB (از نوع پیش از نوتریج)، شکست پیش رس بال فوقانی تیر بوقوع پیوسته، و چرخش پلاستیک این نمونه، تنها ۰.۱۲ رادیان بوده است. در جدول (۱) دامنه های کماتش اندازه گیری شده در دریافت طبقه ی ۴ درصد ارائه شده است. مشاهده می شود که دامنه های کماتش جانبی پیچشی (LTB)، بسته به علامت ممان خمشی و همچنین جزئیات نوک ماهیچه، در نمونه های مختلف، به میزان زیادی تغییر یافته است. در خمش منفی، ماهیچه ی نمونه های SH600-FE و SH600-H&PE، متناسب با درجه ی گیرداری ایجاد شده توسط نوک ماهیچه، در فراهم آوردن قید برای بال تحتانی تیر، و در نتیجه، کاهش دامنه ی LTB و FLB، مؤثر بوده است. در خمش مثبت، عکس این موضوع مشاهده شده است؛ یعنی دامنه ی LTB، با افزایش درجه ی گیرداری نوک ماهیچه، افزایش یافته است. مفهوم این موضوع آن است که، حضور ماهیچه در زیر بال تحتانی تیر، نه تنها هیچگونه اثر مهارکنندگی بر بال فوقانی تیر ندارد، بلکه برعکس، هرچه قید نوک ماهیچه افزایش یابد، مرکز پیچش مقطع یکپارچه ی تیر و ماهیچه به سمت پایین جابه جا می شود. البته، با در نظر گرفتن این موضوع که معمولاً دال کف مهار جانبی پیوسته ای برای بال فوقانی فراهم می آورد، این موضوع به عنوان یک مسئله ی طراحی، چندان مسئله ساز نخواهد بود.

در جدول (۲)، زاویه ی کرنش اصلی نمونه ی SH600-H&PE بر پایه ی اندازه گیریهای کرنش سنج، ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که در سراسر پاسخ، جان ماهیچه ی مستقیم، بصورت یک دستک، با زاویه ی حدوداً ۳۰ درجه، عمل می کند. شکل (۶)، موقعیت کرنش سنجها و پاسخهای چرخه ای اندازه گیری شده در عمق تیر و ماهیچه را برای این نمونه، نشان می دهد [۶]. در صورت برقراری تئوری کلاسیک تیر، محور خنثی باید تقریباً در محل کرنش سنج شماره ی (۵) واقع می شد. ولی همانگونه که از شکل پیداست، پاسخ چرخه ای کلی، جایی میان دو کرنش سنج (۳) و (۴) تغییر علامت می دهد و این بدان معناست که محور خنثی فقط اندکی به پایین جابه جا شده، و بنابراین تئوری کلاسیک تیر برقرار نیست.

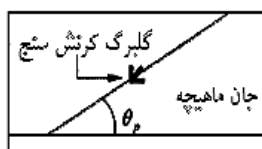


شکل ۵- پاسخ چرخه‌ای نمونه‌ها: (الف) نمونه‌ی PN600-SB، (ب) نمونه‌ی SH600-H&T، (ج) نمونه‌ی SH600-H&PE، (د) نمونه‌ی SH600-FE.

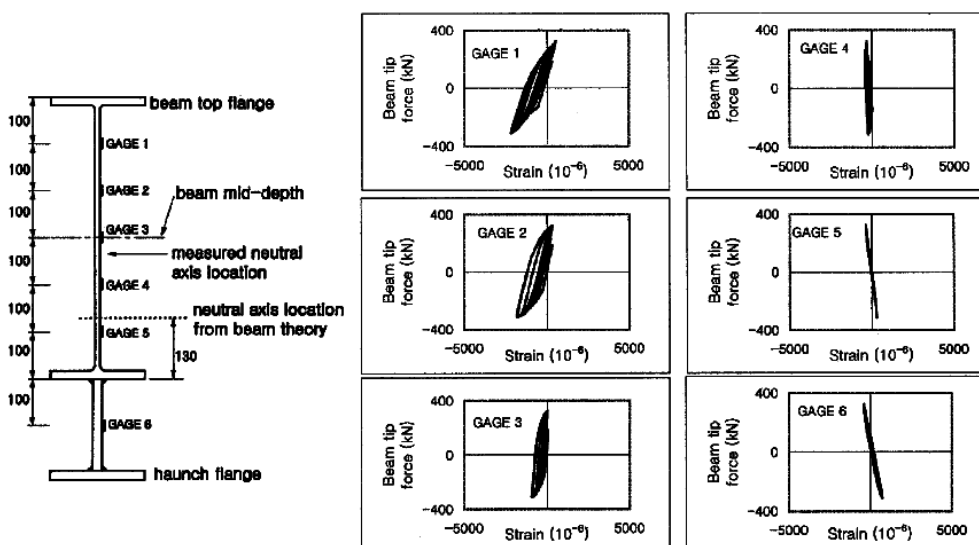
جدول ۱- دامنه‌های کمانش در دررفت طبقه‌ی ۴ درصد.

دامنه‌ی کمانش جانبی - پیچشی (LTB) (cm)		نمونه
خمش مثبت (بال فوقانی تیر در فشار)	خمش منفی (بال تحتانی تیر در فشار)	
5.0	5.0	SH600-H&T
3.0	7.0	SH600-H&PE
2.5	8.0	SH600-FE

جدول ۲- زاویه‌ی کرنش اصلی محاسبه شده در ماهیچه، در نمونه‌ی SH600-H&PE.



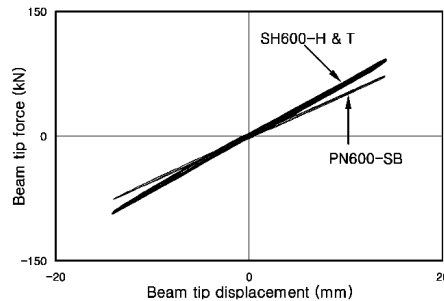
نسبت دررفت طبقه	θ_p (°)
0.75	29.4
1	30.8
1.5	31.7
2	32.4
3	34.8



شکل ۶- پاسخهای چرخه‌ای کرنش خمشی نمونه‌ی SH600-H&PE در عمق تیر [۶].

ناحیه ی پانلی دوگانه و تأثیر آن بر سختی قاب

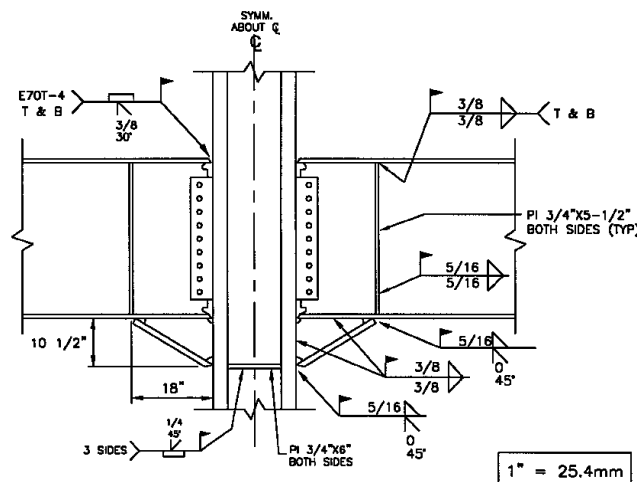
با افزودن ماهیچه به زیر تیر، ناحیه ی پانلی، گسترش یافته و یک ناحیه ی پانلی دوگانه تشکیل می شود و قسمتی از تیر که در ناحیه ی ماهیچه قرار دارد، تقویت می شود. افزایش سختی جانبی قاب، بعنوان یک اثر جانبی این موضوع، مورد انتظار است. در شکل (۷)، مقایسه ای میان سختیهای جانبی اندازه-گیری شده، انجام شده است؛ مشاهده می شود که از این تقویت جانبی یکطرفه، حدود ۲۵ درصد افزایش در سختی جانبی قاب، حاصل شده است [۷].



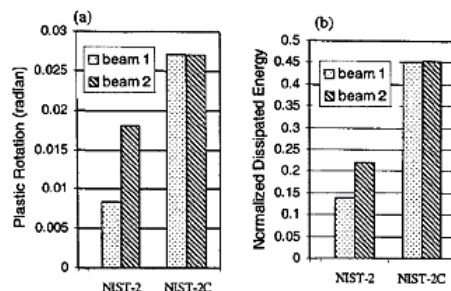
شکل ۷- مقایسه ی سختی جانبی الاستیک نمونه های SH600-H&T و PN600-SB.

بهسازی اتصالات خمشی با ماهیچه های فولادی

در سال ۲۰۰۰، بمنظور بررسی اثربخشی استفاده از ماهیچه ی مثلثی جوشی، در بهسازی لرزه ای اتصالات خمشی قبل از نورتریج، مطالعاتی توسط یوانگ و همکاران، در دانشگاه کالیفرنیا، انجام گردید [۸]. دلیل اینکه در پروژه های بهسازی ساختمانهای موجود، بدون برداشتن دال بتنی اطراف ستون، اصلاح بال فوقانی و جوش آن، امکان پذیر نیست و همچنین، از آنجایی که عمده ی خسارت گزارش شده، در بال تحتانی بوقوع پیوسته است، طرح بهسازی پیشنهادی، صرفاً بمنظور اصلاح بال تحتانی تیر و جوشهای آن بوده است. در این مطالعه، دو نمونه اتصال خمشی دوطرفه (NIST-2C و NIST-2)، مورد آزمایش واقع شده است. هر دو نمونه، از ابتدا بمنظور بهسازی، برطبق آئین نامی UBC85 طراحی، و ساخته شده اند. این نمونه ها، با استفاده از تکنیکهای ساختمان سازی قبل از نورتریج، از یک ستون W14×426 (A572 Gr.50) و دو تیر W36×150 (A36)، ساخته شده و مورد بازرسی قرار گرفته اند. جوشکاری شیاری بال تیر، با استفاده از الکتروود E70T-4، با پشت بندهای فولادی باقیمانده در محل، انجام شده است. این اتصالات، پس از پذیرفته شدن در تستهای اولتراسونیک، اصلاح گردیده اند. برای اصلاح آنها، از الکتروودهای E71T-8 استفاده شده است. شکل (۸) هندسه ی ماهیچه و جزئیات جوش آن را نشان می دهد [۸]. در نمونه ی NIST-2C، یک دال بتنی ساندویچی سبک با اثر کامپوزیتی معادل ۱۲ درصد اثر کامپوزیت کامل، بکار رفته است. در این نمونه، ضخامت بتن سبک، ۸۳ میلیمتر و مقاومت مشخصه ی آن ۳۴.۵ مگاپاسکال بوده است. برای انجام آزمایش، از پروتکل ATC-24 استفاده شده و آزمایش بصورت شبه استاتیک انجام شده است. در نمونه ی NIST-2، در دریافت ۱.۷ درصد، تسلیم قابل توجه و تسلیم بال تحتانی در خارج از ناحیه ی ماهیچه، بوقوع پیوسته است. در دریافت طبقه ی ۲.۵ درصد، تیرها دچار کمانش شده، و جوش شیاری بال فوقانی تیرهای دوطرف، دچار شکست شده است. عملکرد نمونه ی NIST-2C، بسیار عالی بوده و هر دو تیر آن، بدون شکست، قادر به رسیدن به دریافت طبقه ی ۳.۳ درصد بوده اند. در این نمونه، هر دو بال تیرها دچار کمانش موضعی شده اند، ولی بدلیل حضور دال بتنی، دامنه ی کمانش بالهای فوقانی کوچکتر بوده است. در شکل (۹)، ظرفیتهای چرخش پلاستیک و استهلاك انرژی دو نمونه نشان داده شده است.



شکل ۸- جزئیات اتصال با ماهیچه ی جوشی [۸].



شکل ۹- ظرفیت چرخش پلاستیک و استهلاک انرژی همپایه شده‌ی نمونه‌ها.

دال بتنی، در فراهم آوردن مهار جانبی برای بال فوقانی، مؤثر بوده است. به نحویکه، تحت خمش مثبت، کمانش پیچشی رخ نداده است، ولی تحت چنین شرایطی، هنوز هم امکان وقوع کمانش موضعی بال وجود خواهد داشت.

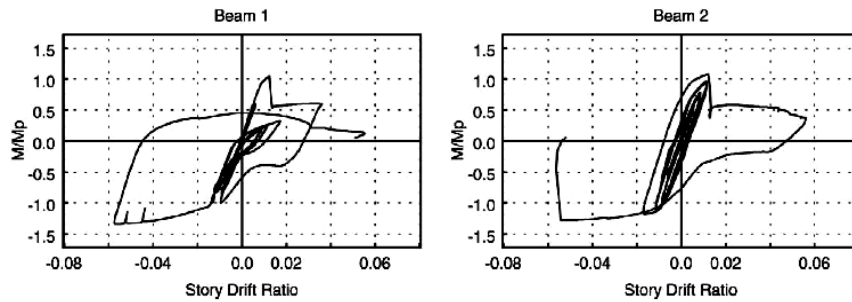
چی و همکاران، در یک مطالعه‌ی موردی، به تحقیق در رابطه با بهسازی لرزه‌ای اتصالات خمشی یک ساختمان ۱۳ طبقه در ایالت لس آنجلس، با استفاده از ماهیچه‌های جوشی مثلثی، پرداختند [۹]. قابهای خمشی و اتصالات این ساختمان، دارای بعضی ویژگیهای متفاوت از اتصالات خمشی قبل از نورتیج، از جمله: عرض کوتاه دهانه (۴٫۵۷ متر)، فاصله‌ی محوری ورقهای مضاعف با جان ستون و عدم تماس مستقیم آنها با جان، جوشکاری کامل تیرها به ستون و عدم استفاده از برشگیرهای کلاهک‌دار برای اتصال تیرهای فولادی به دال بتنی، بوده‌اند. بمنظور حفظ قابلیت بهره‌برداری ساختمان در طی عملیات بهسازی، روش افزودن ماهیچه به بالای تیر و تخلیه‌ی جوش موجود بالهای فوقانی تیر، بعنوان قسمتی از طرح بهسازی، مورد پذیرش واقع نشد. اگرچه حضور دال کامپوزیت ممکن است به ممانعت از شکست جوش موجود بال فوقانی کمک کند، ولی کرنش تیر، در نزدیکی جوش شیاری، ۲۰ تا ۳۰ برابر کرنش تسلیم بوده است. بنابراین، به دلیل نگرانی از شکست جوش، یک جفت ورق پشت‌بند به زیر بال فوقانی تیر اضافه شده‌است. طراحی اتصالات ماهیچه‌ای برپایه‌ی راهنمای AISC صورت گرفته است. این راهنما، توصیه می‌کند که زاویه‌ی ماهیچه نسبت به افق، 30 ± 5 درجه باشد. با این زاویه، بدلیل دهانه‌ی خیلی کوتاه تیر و شرایط تیر قوی-ستون ضعیف موجود از قبل، تقویت ستون لازم می‌شود. بنابراین، بمنظور اجتناب از تقویت پرهزینه‌ی ستون، زاویه‌ی ۵۲ درجه، بنحوی که نسبت $\Sigma M_{pb}^* / \Sigma M_{pc}^*$ در حدود ۱ بدست بیاید، مورد استفاده واقع شده‌است. در مجموع، شش نمونه اتصال خمشی دو طرفه‌ی داخلی (LAC-1 تا LAC-6)، شامل یک ستون تک و دو تیر متصل به دو بال آن مورد آزمایش واقع شده‌است. نمونه‌های LAC-1 و LAC-2، شبیه‌سازی اتصالات خمشی قبل از نورتیج طبقات سوم و نهم، نمونه‌های LAC-3 و LAC-5، بهسازی نمونه‌ی LAC-1، و نمونه‌های LAC-4 و LAC-6، بهسازی نمونه‌ی LAC-2 بوده‌اند. بهسازی شامل استفاده از یک ماهیچه در زیر هر تیر و دو ورق پشت‌بند در زیر بال فوقانی تیر بوده‌است. در انتهای ماهیچه نیز، از یک جفت ورق سخت‌کننده‌ی جان تیر استفاده شده‌است. ورقهای پشت‌بند و ورقهای مضاعف در یک امتداد واقع شده‌اند. پروتکل بارگذاری SAC با مقادیر مساوی و به صورت مختلف‌العلامه به انتهای تیرهای هر نمونه اعمال شده‌است.

عملکرد هر دو نمونه‌ی LAC-1 و LAC-2 مشابه بوده است. در هر دوی این نمونه‌ها، شکست ترد جوش شیاری بوقوع پیوسته، و متوسط دررفت طبقه، ۱٫۳ درصد بوده است. در هیچ یک از چهار نمونه‌ی بهسازی شده، هیچگونه شکست جوش شیاری مشاهده نشده است و ماهیچه‌ی جوش شده به‌مراه ورقهای پشت‌بند، بنحو مؤثری از شکست جوش در این نمونه‌ها، ممانعت نموده است. همه‌ی این نمونه‌ها، یک مود شکست شکل‌پذیر، به‌مراه تسلیم و کمانش از خود نشان داده، و میانگین زاویه‌ی دررفت طبقه‌ی آنها ۴٫۴ درصد بوده است. درشکلهای (۱۰) و (۱۱)، نمودارهای ممان همپایه شده‌ی تیر در مقابل نسبت دررفت طبقه برای نمونه‌های پیش از نورتیج و نمونه‌های بهسازی شده، نشان داده شده‌است (ممان تیر بر حسب ممان پلاستیک تیر همپایه شده است). در شکل (۱۲) نیز، زاویه‌های دررفت طبقه، برای همه‌ی نمونه‌ها نشان داده شده‌است [۹].

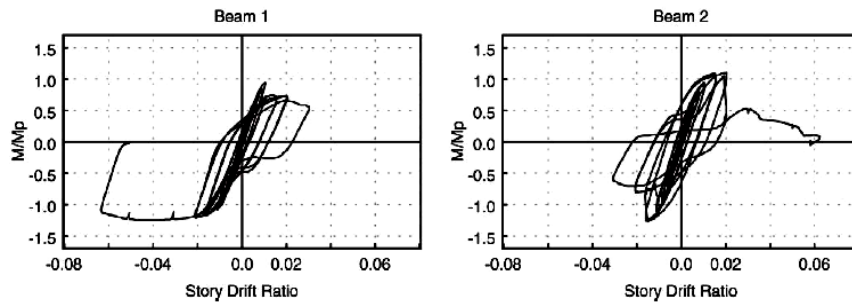
بمنظور ارزیابی عملکرد اتصالات قبل از نورتیج و اتصالات بهسازی شده، همه‌ی نمونه‌ها با استفاده از برنامه‌ی المان محدود ABAQUS، مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. با استفاده از نتایج این آنالیزها، اندیس PEEQ محاسبه شده‌است. این اندیس، که بصورت کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) تقسیم بر کرنش تسلیم مصالح تیر (ϵ_y)، تعریف می‌شود، نماینده‌ی نیاز کرنش موضعی می‌باشد. کرنش پلاستیک معادل نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}} \quad (1)$$

در این رابطه، ϵ_{ij} مؤلفه‌ی کرنش پلاستیک در جهت تعیین شده بوسیله‌ی i و j می‌باشد. در شکل (۱۳)، مقایسه‌ای میان اندیس PEEQ در عرض بال فوقانی تیر، در محل جوش شیاری، برای نمونه‌های مختلف انجام شده است. حداکثر مقدار اندیس PEEQ، در اتصال پیش از نورتیج ۱۴ بوده است، که فقط با افزودن ماهیچه (نمونه‌ی LAC-3NR) به مقدار تقریبی ۸، کاهش یافته است. هنگامیکه ورقهای پشت‌بند نیز افزوده شده‌اند، اندیس PEEQ، بمقدار بیشتری کاهش یافته، و به مقداری در حدود ۵ رسیده است. کرنشهای کششی در بالهای فوقانی نمونه‌های بهسازی شده پایین بوده است، که این موضوع نشان می‌دهد که ورقهای پشت‌بند و ماهیچه، در کاهش نیاز کرنش بسیار مؤثر بوده‌اند.

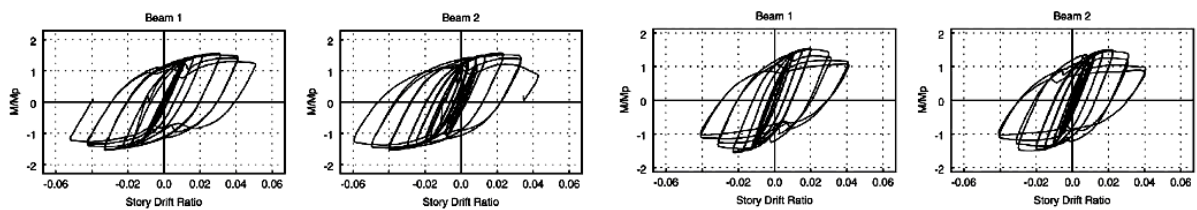


(a) Specimen LAC-1.



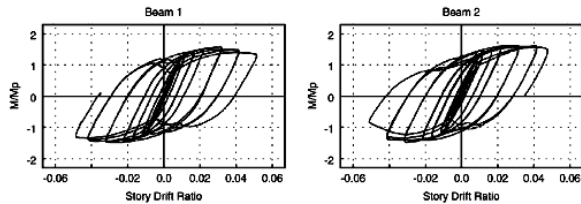
(b) Specimen LAC-2.

شکل ۱۰- پاسخ هیستریزس نمونه‌های اتصال خمشی قبل از نورتریج.

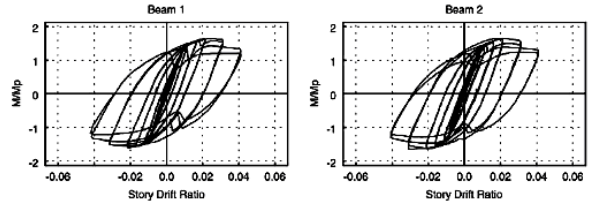


(a) Specimen LAC-3.

(c) Specimen LAC-4.

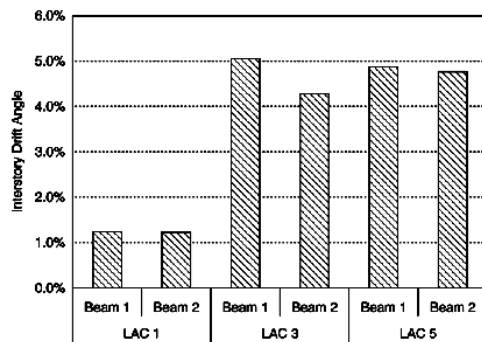


(b) Specimen LAC-5.

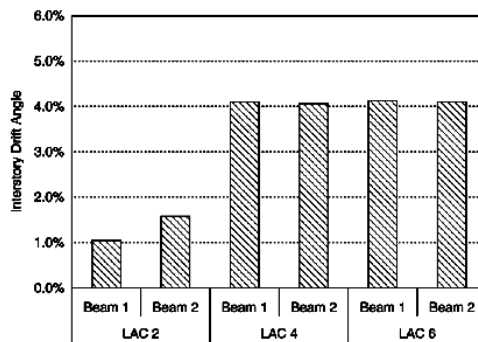


(d) Specimen LAC-6.

شکل ۱۱- پاسخ هیستریزس نمونه‌های بهسازی شده.

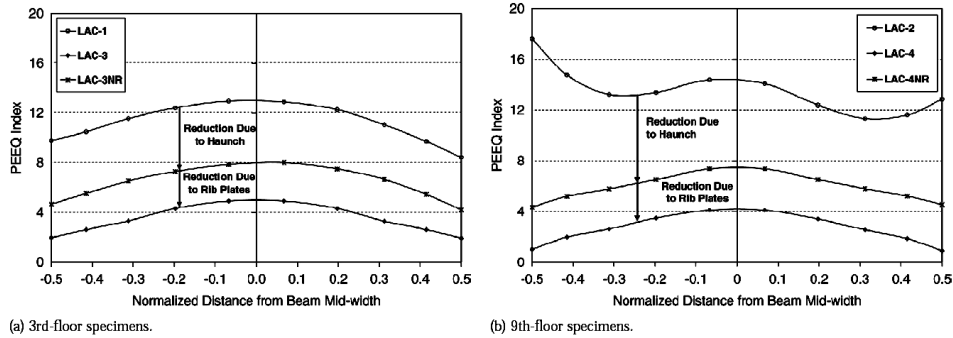


(a) 3rd-floor specimens.



(b) 9th-floor specimens.

شکل ۱۲- مقایسه‌ی زاویه‌ی دریفت طبقه.



شکل ۱۳- مقایسه ی اندیس PEEQ در دریفت ۱,۵ درصد.

نتیجه گیری

از بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با اتصالات ماهیچه ای، نتایج زیر قابل حصول است:

- تئوری کلاسیک تیر که با مقطع مرکب از تیر و ماهیچه به عنوان یک مقطع یکپارچه رفتار می کند، نمی تواند به نحو مناسبی توزیع تنش را در اتصالات ماهیچه ای پیش بینی نماید.
- نمونه های دارای ماهیچه ی مستقیم که با استفاده از روش پیشنهاد شده توسط لی و یوانگ طراحی شده اند، مفصل پلاستیک تیر را به نحو مؤثری، به محلی دور از نوک پشت بند انتقال داده و بدون شکست، سطوح رضایت بخشی از شکل پذیری از خود نشان می دهند.
- ترکیب لبه ی شیبدار ماهیچه ی مستقیم و سوراخ ایجاد شده در نزدیکی نوک ماهیچه و یا یک جفت سخت کننده که به صورت کامل و یا جزئی در جان تیر امتداد یافته اند، از شکست در نوک ماهیچه، به صورت موفقیت آمیزی ممانعت به عمل می آورند.
- حضور دال بتنی، مود کمانش تیر را تغییر داده و از کمانش جانبی پیچشی به واسطه ی اثر مهار، ممانعت به عمل می آورد، ولی ممکن است، تحت خمش مثبت، کمانش موضعی بال همچنان رخ بدهد.
- راهنمای طراحی لرزه ای AISC پیشنهاد می نماید که زاویه ی ماهیچه نسبت به افق به 30 ± 5 درجه محدود شود، در حالیکه مطالعه ی چی و همکاران، نشان می دهد که روش طراحی AISC برای زوایای تمایل تا ۵۰ درجه نیز قابل اعمال است.

مراجع

- 1) Miller D. K.(1998): "Lessons Learned From the Northridge Earthquake", *Journal of Engineering Structures*.
- 2) Roeder C. W.(April 2002): "Connection Performance for Seismic Design of Steel Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*.
- 3) Federal Emergency Management Agency, SAC Joint Venture, "FEMA-267 Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Welded Steel Moment Frame Structures", *Report No. SAC-95-02, 1995*.
- 4) Federal Emergency Management Agency, SAC Joint Venture, "Interim Guidelines Advisory No.2 Supplement to FEMA-267 Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Welded Steel Moment Frame Structures", *Report No. SAC-99-01, June 1999*.
- 5) Lee C. H., Uang C. M.(September 2001), "Analytical Modeling and Seismic Design of Steel Moment Connections with Welded Straight Haunch", *Journal of Structural Engineering*.
- 6) Lee C. H., Jung J. H., Oh M. H., Koo. E. S.(2003): "Cyclic Seismic Testing of Steel Moment Connections Reinforced with Welded Straight Haunch", *Journal of Engineering Structures*.
- ۷) آزادی سجاد، "بررسی انواع جدید اتصالات سازه های فولادی"، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی سازه به راهنمایی دکتر محسن گرامی، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۵.
- 8) Uang C. M., Yu Q. S. K., Noel S., Gross J.(January 2000): "Cyclic Testing of Steel Moment Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch", *Journal of Structural Engineering*.
- 9) Chi B., Uang C. M., Chen A.(2006): "Seismic Rehabilitation of Pre-Northridge Steel Moment Connections: A Case Study", *Journal of Constructional Steel Research*.