

شبیه‌سازی اجزاء محدود اتصالات دارای نبشی نشیمن و بالایی پیچی تحت بارگذاری چرخه‌ای

آذین آل کجاف^۱، نادر فنائی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، aalkajbaf@mail.kntu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir

چکیده

این مقاله به ارائه روشی برای مدل‌سازی اتصالات دارای نبشی نشیمن و بالایی پیچی تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط نرم افزار اجزاء محدود آباکوس می‌پردازد. در این راستا چهار نمونه اتصال که تفاوت آن‌ها در اندازه نبشی، خصوصیات مصالح اعضاء و طول مقیاسی پیچ، به معنای فاصله میان خط پیچ متصل کننده نبشی به ستون و ساق نبشی و حضور یا عدم حضور ورق واشر می‌باشد، شبیه‌سازی شده و رفتار چرخه‌ای کامل این نمونه‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، صحت سنجی شده و در ادامه ضریب اصلاح نیروی برشی تسلیم نبشی‌ها، به دست آمده است. در تحقیق آزمایشگاهی رابطه‌ای برای بدست آوردن نیروی تسلیم در نبشی‌ها ارائه شده، اما به دلیل آن که این رابطه برای تمام نمونه‌ها از جواب با دقت کافی برخوردار نبوده، یک ضریب اصلاحی ارائه گردیده است. در مطالعه آزمایشگاهی تعداد محدودی نمونه برای به دست آوردن ضریب اصلاح وجود داشته و همچنین به دلیل کمبود نمونه یک ضریب کلی برای نبشی‌های دارای ورق واشر و بدون ورق واشر به دست آمده است. برای بالا بردن دقت این ضریب، در این مقاله از نمونه‌های تحلیلی بیشتری استفاده شده است و همچنین این ضرایب برای دو حالت نبشی دارای ورق واشر و بدون آن محاسبه شده‌اند. به این منظور دو نمونه از مدل‌ها انتخاب شده و بر روی ضخامت نبشی آن‌ها، تحلیل پارامتریک صورت گرفته است. این مدل‌ها تحت شرایط یکسانی با مدل دارای نبشی با ضخامت اصلی تحلیل شده‌اند و نیروی برشی که در آن‌ها باعث تسلیم شده به دست آمده است. با تقسیم نیروی برشی تسلیم به دست آمده از تحلیل بر نیروی برشی تئوری و استفاده از برازش خطی میان مقادیر به دست آمده، رابطه‌ای برای اصلاح نیروی برشی تسلیم نبشی‌ها محاسبه شده است که تابع ضخامت آن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اتصال پیچی، نبشی نشیمن و بالایی، بارگذاری چرخه‌ای، مدل‌سازی اجزاء محدود

۱- مقدمه

بعد از خسارت شدیدی که در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج به قاب‌های خمشی فولادی وارد شد، تحقیقات زیادی برای یافتن اتصالاتی جایگزین برای این قاب‌ها که در نواحی لرزه‌خیز واقع شده‌اند انجام شد [۱]. قاب‌های خمشی که پیش از زلزله نورتریج استفاده می‌شدند معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شدند که تحت اثر بارهای لرزه‌ای شدید، در دو سر تیرها مفصل‌های پلاستیک تشکیل شود. اما تحقیقات نشان داد که این قاب‌ها در ناحیه اتصال جوشی تیر به ستون دچار گسیختگی پیش از موعد شده و مفصل پلاستیکی در تیرها تشکیل نمی‌گردد. پس از زلزله نورتریج دستورالعمل‌های طراحی اتصالات صلب تیر به ستون اصلاح شدند تا با تشکیل مفصل‌های پلاستیک پایدار در تیرها، از شکست ترد جوش جلوگیری شود. با این حال، طراحی‌های جدید مستلزم هزینه‌های زیاد بودند. همچنین تشکیل مفصل پلاستیک در تیر همراه با تسلیم یا وقوع کماتش در آن بود که باعث تغییر شکل غیرالاستیک در قاب و جابجایی‌های دائمی می‌شد [۲].

عملکرد نامناسب اتصالات جوشی باعث شد تا محققان در طراحی‌های خود به اتصالات پیچی رو بیاورند. رفتار اتصال پیچی نسبت به اتصال جوشی پیچیده‌تر است، زیرا دارای مؤلفه‌های بیشتری چون پیچ، ورق یا نبشی در ناحیه اتصال می‌باشد. با این وجود اگر اتصال پیچی به شکل مناسبی طراحی شود، دارای شکل‌پذیری بالاتر و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری است [۳]. همچنین در این اتصالات می‌توان آسیب را به اعضای که قابل تعمیر یا تعویض هستند، محدود کرد. برای مثال می‌توان از اتصالات نبشی بالایی و پایینی پیچی استفاده نمود که در آن‌ها نبشی‌ها متحمل آسیب شده و انرژی وارده به سازه را مستهلک می‌کنند. برای اینکه بتوان به نحو مناسبی از نبشی‌های پیچی در اتصالات قاب‌های خمشی استفاده کرد، باید سختی، مقاومت، ظرفیت استهلاک انرژی و رفتار خستگی کم چرخه آن‌ها تعیین گردد. در گذشته تحقیقات گسترده‌ای بر روی اتصالات دارای نبشی بالایی و پایین انجام شده است.

یک سری مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای این اتصالات پیشنهاد شده که هماهنگی خوبی میان آن‌ها و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده است. کیشی و چن (۱۹۹۰) [۴] رابطه لنگر-چرخش را برای اتصالات نیمه صلب تیر به ستون فولادی دارای نبشی جان و نبشی نشیمن و نبشی بالایی ارائه دادند. برنوزی (۱۹۹۸) [۵] دو روش مختلف برای تخمین زدن رفتار اتصالات دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیشنهاد داد. او یک بار مدل‌ها را تحت اثر بارگذاری تک آهنگ (مونوتونیک) و بار دیگر تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای (سیکلیک) قرار داد. تحقیقات دیگری نیز به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی با اتصالات پیچی انجام شده است [۶، ۷]. نتایج تحقیقات نشان داد که ظرفیت اتلاف انرژی اتصالات دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی به قابلیت آن‌ها در تحمل خستگی کم چرخه بستگی دارد. همچنین سایر ویژگی آن‌ها چون مد گسیختگی، ظرفیت لنگر پلاستیک و سختی اولیه آن‌ها به خصوصیات هندسی و محل قرار گیری پیچ‌ها و مهره‌ها بستگی دارد. شن و آستانه اصل به صورت آزمایشگاهی رفتار هیستریزس اتصالات تیر به ستون دارای نبشی پیچی را مطالعه کردند [۳، ۸]. در تحقیق ایشان که نبشی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های تک آهنگ و چرخه‌ای قرار گرفتند، مدهای گسیختگی و رفتار غیرالاستیک تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و ظرفیت اتلاف انرژی بررسی شد و مشاهده گردید که مقاومت نهایی اتصال دو تا سه برابر ظرفیت تسلیم اتصال می‌باشد و همچنین تغییر شکل‌های به وجود آمده در نبشی‌ها با ضخامت آن‌ها رابطه دارد.

تا کنون از نبشی‌های نشیمن و بالایی پیچی در انواع جدیدی از قاب‌های خمشی مقاوم در برابر زلزله استفاده شده است. رایکلز (۲۰۰۱) [۹] با الهام گرفتن از اتصالات پس‌کشیده بتنی مانند مطالعات کوراما (۱۹۹۹) [۱۰، ۱۱] ایده استفاده از اعضای پس‌کشیده را در اتصالات به کار رفته در قاب‌های خمشی فولادی مطرح کرد. این اتصالات که به آن‌ها اتصالات مرکزگرا نیز گفته می‌شود از دو قسمت اصلی شامل اعضای پس‌کشیده و اعضای اتلاف کننده انرژی تشکیل می‌شوند. رایکلز با توجه به رفتار هیستریزس مناسب نبشی، از نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی برای استهلاک انرژی در اتصال استفاده نمود. او نمونه‌هایی را تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بررسی کرد و نشان داد که قاب‌های خمشی دارای اتصالات مرکزگرا عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به قاب‌های خمشی معمولی با اتصالات جوشی دارند. مطالعات دیگری بر روی اتصالات مرکزگرا با نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی توسط گارلوک و همکاران او انجام شد [۱۲، ۱۳]. ایشان همچنین تحقیقاتی را بر روی اتصالات نبشی به منظور پیدا کردن خصوصیات مصالح و ابعاد هندسی مناسب که بهترین عملکرد را در اتصالات قاب خمشی مرکزگرا داشته باشند، انجام دادند [۱۴].

هدف اصلی این مقاله، ارائه روش دقیق مدل‌سازی اتصالات دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. با توجه به توضیحات قبل، قاب‌های دارای این اتصالات عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به قاب‌های دارای اتصالات جوشی دارند و البته رفتارشان پیچیده‌تر است. این مقاله به بیان روش مدل‌سازی اتصالات دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی می‌پردازد که می‌تواند برای تحقیقات آینده در این زمینه مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل آن که ممکن است بررسی تمام جنبه‌های یک موضوع در آزمایشگاه ممکن نباشد و یا اینکه سخت و پرهزینه باشد، مدل‌سازی اجزاء محدود روش تحلیلی مناسبی است و در این مطالعه نیز از روش مدل‌سازی اجزاء محدود برای مدل کردن اتصالات استفاده شده است. در این راستا چهار نمونه اتصال تیر به ستون دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مدل‌سازی

شده‌اند. تفاوت نمونه‌ها در ابعاد هندسی و خصوصیات مصالح نبشی و پیچ‌ها می‌باشد. رفتار هیستریزیس نمونه‌های شبیه‌سازی شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی مطالعه انجام شده توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] صحت سنجی شده است. در مطالعه گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] رابطه‌ای تئوری برای محاسبه نیروی برشی متناظر مکانیزم تسلیم در نبشی‌ها ارائه شده است. اما از آنجا که نیروی برشی تسلیم محاسبه شده از این رابطه در مقایسه با نیروی برشی تسلیم به دست آمده از آزمایش، برای تمام نمونه‌ها از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد، یک ضریب اصلاحی توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] محاسبه و ارائه شده است. با توجه به اینکه در آزمایش آن‌ها تعداد نمونه‌ها محدود بوده و همچنین تنها یک ضریب اصلاحی برای نبشی‌های دارای ورق و بدون ورق و با افزایش تعداد نمونه‌های تحلیلی، ضریب اصلاح دقیق‌تری محاسبه شود و علاوه بر آن دو ضریب مختلف برای نبشی‌های دارای ورق و بدون ورق و با افزایش تعداد نمونه‌ها گردد. برای این منظور دو نمونه از مدل‌ها انتخاب شده و بر روی ضخامت آن‌ها یک تحلیل پارامتریک صورت گرفته است. این مدل‌ها تحت اثر بارگذاری تک آهنگ قرار گرفته‌اند و نیروی برشی تسلیم به دست آمده از آن‌ها بر نیروی برشی محاسبه شده تسلیم تئوری، تقسیم شده است. با استفاده از برازش خطی میان نسبت‌های بدست آمده، رابطه‌ای برای اصلاح نیروی تسلیم تئوری نبشی‌ها ارائه شده است که تابع ضخامت نبشی می‌باشد.

۲- مدل‌سازی اجزاء محدود اتصالات دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی

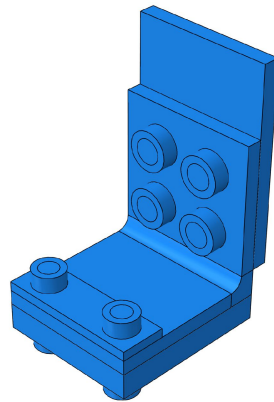
در این مطالعه چهار نمونه اتصال تیر به ستون دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی که توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده‌اند، انتخاب شده و مدل سه بعدی آن‌ها با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود غیر خطی آباکوس [۱۵] مدل شده است. گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] رفتار نبشی‌ها را در اتصال تیر به ستون دارای نبشی پیچی به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. هدف تحقیق آن‌ها بررسی تأثیر عواملی چون اندازه نبشی و طول مقیاسی پیچ (به معنای فاصله میان خط پیچ متصل کننده نبشی به ستون و ساق نبشی) بر روی سختی، مقاومت، ظرفیت اتلاف انرژی و مقاومت در برابر خستگی کم چرخه اتصال می‌باشد. گارلوک و همکاران هفت نمونه اتصال را که تفاوت آن‌ها در ابعاد هندسی و خصوصیات مصالح نبشی بود، آزمایش کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که طول مقیاسی پیچ تمام خصوصیات مورد بررسی اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اتصالات با طول مقیاسی پیچ کوچکتر، استهلاک انرژی بالاتری دارند ولی عمر خستگی آن‌ها کوتاه‌تر است.

۲-۱- مدل‌سازی هندسه

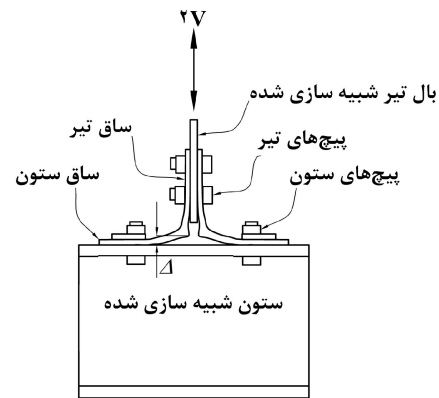
پیکربندی آزمایشگاهی نمونه‌ها در شکل ۱(الف) نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای دو نبشی می‌باشند که به صورت پشت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این حالت ستون شبیه‌سازی شده به صورت افقی در زیر دو نبشی قرار دارد. بار جانبی به مقدار ۲۷ از طریق محرک به یک سپری که شبیه‌سازی کننده بال تیر می‌باشد، وارد می‌گردد. در این تحقیق آزمایشگاهی ستون از مقطع 176×14 W تشکیل شده است.

به دلیل تقارنی که در پیکربندی آزمایش وجود دارد در شبیه‌سازی اجزاء محدود، تنها نیمی از نمونه مدل شده است. در شکل ۱(ب) پیکربندی در مدل اجزاء محدود نشان داده شده است. در این مدل تحلیلی، ستون به صورت یک ورق با ضخامتی برابر با بال ستون در پیکربندی آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

در شکل ۲ پارامترهای هندسی نبشی‌ها نشان داده شده و مقادیر متناظر با آن‌ها در جدول ۱ آمده است. در این جدول سایر خصوصیات مربوط به نمونه‌ها شامل ابعاد مقطع نبشی‌ها، حضور یا عدم حضور ورق و نوع پیچ ذکر شده است.

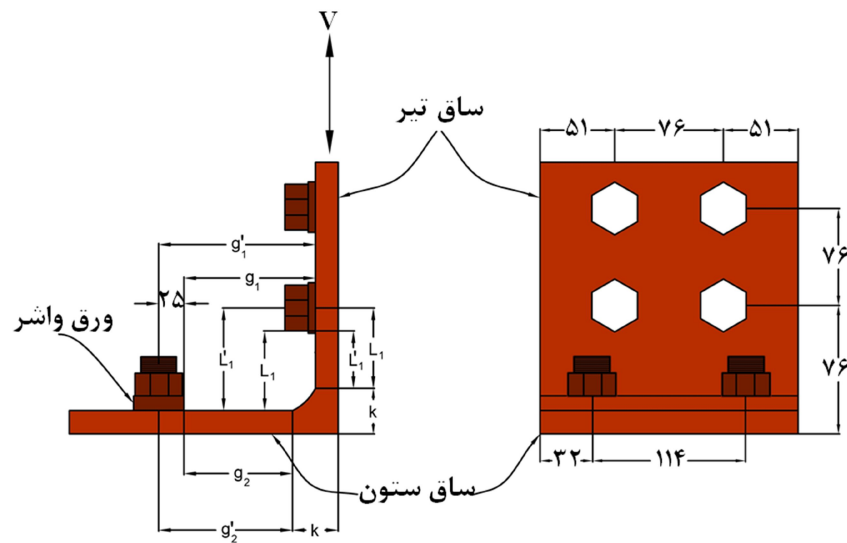


(ب)



(الف)

شکل ۱: الف) پیکربندی آزمایشگاهی در مطالعه گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴]، ب) پیکربندی در مدل اجزاء محدود



شکل ۲: ابعاد و پارامترهای هندسی نمونه‌ها

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها [۱۴]

نمونه	مقطع نبشی (mm)	t (mm)	g ₁ (mm)	g ₂ (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	واشر پیچ	پیچ ستون
L8-58-4	L۲۰۳×۲۰۳×۱۵/۹	۱۶/۴	۷۸/۹	۶۳/۵	۳۴/۴	۱۹/۱	ورق	A۳۲۵
L8-58-4-NW	L۲۰۳×۲۰۳×۱۵/۹	۱۶/۳	۸۳/۸	۶۸/۳	۳۴/۵	۱۹/۱	استاندارد	A۳۲۵
L8-34-4	L۲۰۳×۲۰۳×۱۹/۰	۱۹/۲	۹۱/۹	۷۶/۲	۳۱/۶	۱۵/۹	ورق	A۴۹۰
L8-34-6	L۲۰۳×۲۰۳×۱۹/۰	۱۹/۳	۱۲۷	۱۱۱	۳۱/۵	۱۵/۹	ورق	A۴۹۰

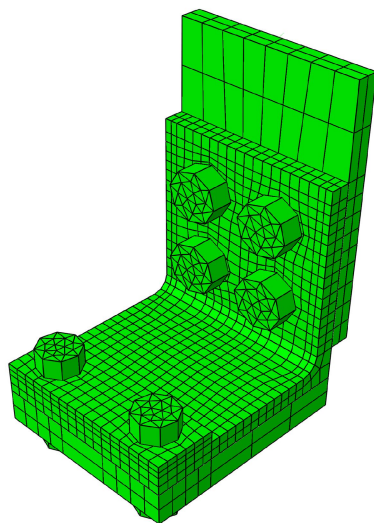
در تمامی نمونه ها عرض نبشی‌ها برابر ۱۷۸ میلی‌متر می‌باشد و به غیر از یکی از نمونه‌ها، در بقیه از ورق و اشتر استفاده شده است. مطابق آنچه در مطالعه گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] نیز به آن اشاره شده است، این واشرها به دو دلیل در نمونه‌ها به کار رفته‌اند، یکی آن که مکان تقریبی شکل گیری مفصل پلاستیک در ساق ستون نبشی را مشخص کنند و دیگر اینکه نیروی اهرمی وارده بر پیچ‌ها را کاهش دهند. در نمونه L8-58-4-NW که دارای ورق و اشتر نمی‌باشد، فواصل g_1 و g_2 تا لبه پیچ در نظر گرفته شده‌اند. نبشی توسط چهار پیچ $A325$ با قطر ۳۲ میلی‌متر به تیر متصل شده است. پیچ‌هایی که نبشی را به ستون متصل می‌کنند، دارای قطر ۲۵ میلی‌متر بوده و در نمونه‌های با نبشی به ضخامت ۱۵/۹ و ۱۹ میلی‌متر به ترتیب از نوع $A325$ و $A490$ می‌باشند.

تمامی اعضای نمونه آزمایشگاهی از فولاد $A572$ گرید ۵۰ ساخته شده‌اند. تنش تسلیم (S_y) و تنش نهایی (S_u) در نمونه‌های دارای نبشی با ضخامت ۱۹ میلی‌متر به ترتیب برابر ۳۸۳ و ۵۴۵ مگاپاسکل می‌باشد. این مقادیر در نمونه‌های دارای نبشی با ضخامت ۱۵/۹ میلی‌متر به ترتیب برابر ۳۳۲ و ۵۴۳ مگاپاسکل می‌باشد. تنش‌های اسمی S_{nom} و کرنش‌های اسمی e_{nom} برای تعریف در برنامه آباکوس مطابق روابط (۱) و (۲) به تنش‌های واقعی S_{true} و کرنش‌های واقعی e_{true} تبدیل شده‌اند. مدول الاستیسیته، چگالی و نسبت پواسون تمام المان‌ها به ترتیب برابر ۲۰۰ گیگاپاسکل، ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳ تعریف شده است.

$$S_{true} = S_{nom} (1 + e_{nom}) \quad (1)$$

$$e_{true} = \ln(1 + e_{nom}) \quad (2)$$

در مدل آباکوس تماس میان اعضاء با استفاده از الگوریتم general contact تعریف شده است. بین سطوح تماسی، رفتار مماسی و عمودی در نظر گرفته شده است. رفتار عمودی سطوح به صورت hard contact تعریف شده است تا از فرورفتن دو سطح مجاور در یکدیگر جلوگیری شود و رفتار مماسی بین بدنه پیچ و سوراخ‌ها به صورت بدون اصطکاک تعریف شده است. برای سایر سطوح تماسی مطابق با دستورالعمل AISC (۲۰۱۰) [۱۶]، ضریب اصطکاک برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی آباکوس تمامی اعضاء با استفاده از المان سه بعدی C3D8R با انتگرال کاهش یافته مش‌بندی شده‌اند [۱۵]. شکل ۳ جزئیات مش‌بندی نمونه L8-34-6 را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نبشی و پیچ‌ها به دلیل آن که در معرض تنش و کرنش بزرگتری هستند، دارای مش‌های کوچکتری می‌باشند.



شکل ۳: جزئیات مش‌بندی نمونه L8-34-6

۲-۲- شرایط مرزی و بارگذاری

مطابق با آزمایش، سطح زیر ورق نماینده ستون در تمام جهات مقید شده و به علت اعمال شرایط تقارن در مدل‌سازی، جابه‌جایی ورق تیر در راستای عمود بر جهت اعمال بار بسته شده است.

در جدول ۲ پروتکل بارگذاری چرخه‌ای آزمایش ارائه شده است. بارگذاری چرخه‌ای شامل سیکل‌هایی با مقدار جابه‌جایی مشخص می‌باشد. در این جدول، دریافت متناظر با هر جابه‌جایی و تعداد دفعات تکرار آن ارائه شده است. در آزمایش سیکل با دریافت ۴٪ تا زمانی که منجر به شکست در نمونه شود ادامه می‌یابد، اما در مدل‌سازی اجزاء محدود برای کاستن از زمان تحلیل، این سیکل تنها یک بار به نمونه اعمال شده است. سایر سیکل‌ها به تعداد ارائه شده در جدول به نمونه‌ها وارد شده‌اند. در مدل‌سازی اجزاء محدود بارگذاری به صورت جابه‌جایی و به شکل متمرکز در نقطه‌ای در وسط ورق بال تیر اعمال شده است.

برای آنالیز مدل اجزاء محدود، از تحلیل گر صریح آباکوس استفاده شده است. این روش برای مدل‌هایی که دارای سطوح تماسی زیاد هستند و در آن‌ها تغییر شکل‌های بزرگ و افت خصوصیات مصالح رخ می‌دهد، مناسب است. تحلیل در چندین گام زمانی انجام شده است، به این صورت که در گام اول نیروهای ثقیلی به مدل اعمال شده است و سپس پروتکل بارگذاری در چندین گام با زمان‌های متناسب اعمال شده است تا بارها به صورت تدریجی و خطی وارد شوند.

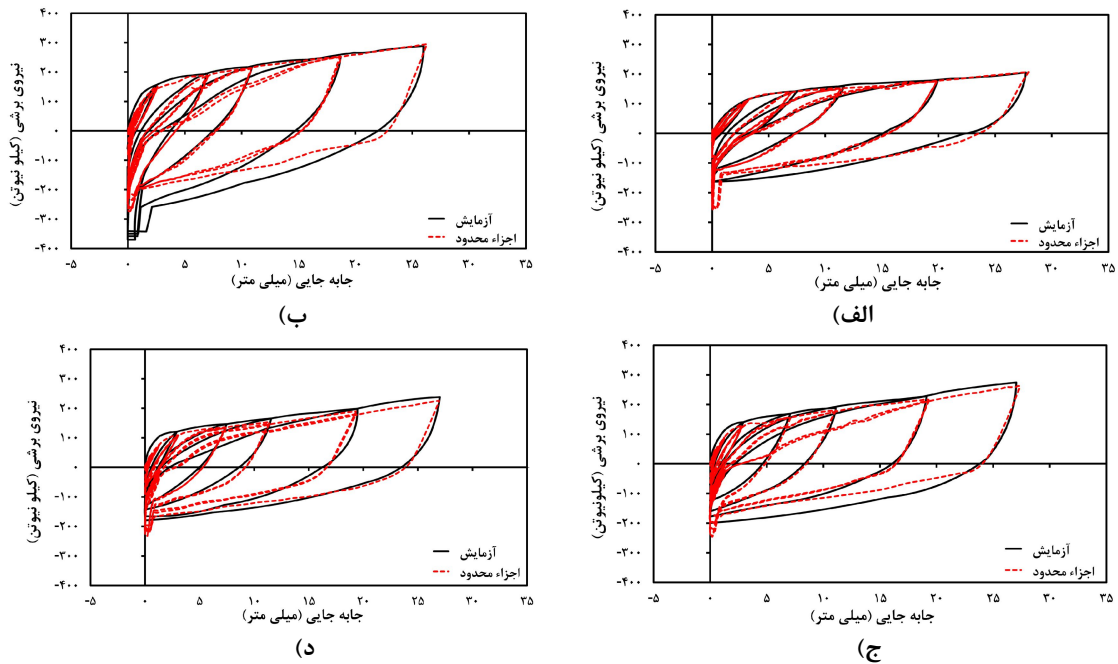
جدول ۲: پروتکل بارگذاری [۱۴]

گام بارگذاری	تعداد چرخه در هر گام بارگذاری	جابه‌جایی (میلی‌متر)	دریافت طبقه متناظر (٪)
۱	۲	۰/۳	۰
۲	۶	۰/۶	<۰/۷۵
۳	۶	۱/۳	۰/۷۵
۴	۴	۳/۲	۱
۵	۲	۱/۳	۰/۷۵
۶	۲	۷	۱/۵
۷	۲	۱/۳	۰/۷۵
۸	۲	۱۱/۴	۲
۹	۲	۱/۳	۰/۷۵
۱۰	۲	۱۸/۴	۳
۱۱	۲	۱/۳	۰/۷۵
۱۲	۱	۲۶	۴

۳- نتایج تحلیل اجزاء محدود

مدل‌های اجزاء محدود چهار نمونه L8-34-4، L8-34-6، L8-58-4 و L8-58-4-NW که توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) مورد آزمایش قرار گرفته بودند، مطابق قسمت قبل ساخته شدند. شکل ۴ نمودار نیروی برشی - جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود را با نمودار متناظر آزمایشگاهی آن مقایسه می‌کند.

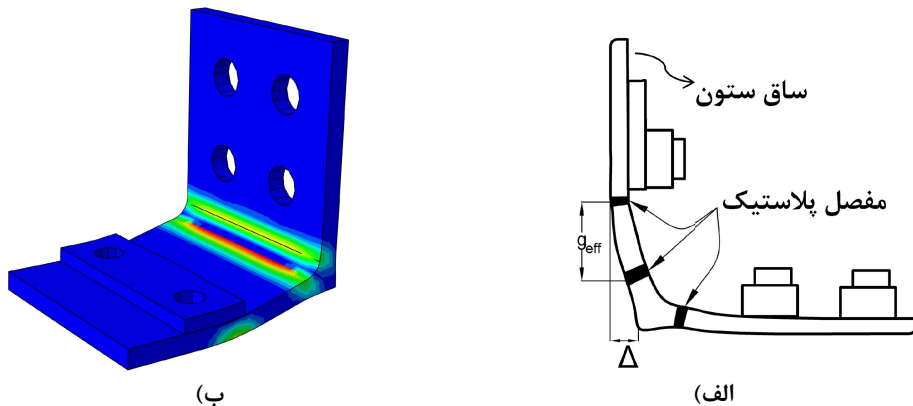
نیروی برشی و جابه‌جایی در محل اعمال بار در بالای بال مدل‌سازی شده تیر اندازه‌گیری شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴: مقایسه نمودار نیروی برشی-جابجایی مدل اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی [۱۷]، (الف) L8-34-6، (ب) L8-34-4، (ج) L8-58-4، (د) L8-58-4-NW

۴- محاسبه ضریب اصلاح نیروی تسلیم در نبشی‌های اتصال

مطابق آنچه در مطالعه گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] ذکر شده است، نیرویی که باعث مکانیزم تسلیم می‌گردد با فرض شکل‌گیری سه مفصل پلاستیک در نبشی تخمین زده می‌شود که در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. شکل ۵ (ب) محل تشکیل مفصل‌های پلاستیک در یکی از مدل‌های اجزاء محدود را نشان می‌دهد که مشابه با شکل ۵ (الف) می‌باشد. دو مفصل در ماهیچه ساق‌های نبشی و به فاصله k (شکل ۲) از گوشه آن تشکیل می‌شوند و مفصل سوم در لبه ورق و اثر یا در زیر خط مرکزی پیچ‌های متصل‌کننده نبشی به ستون تشکیل می‌شوند که این مسئله با ضخامت نبشی مرتبط است.

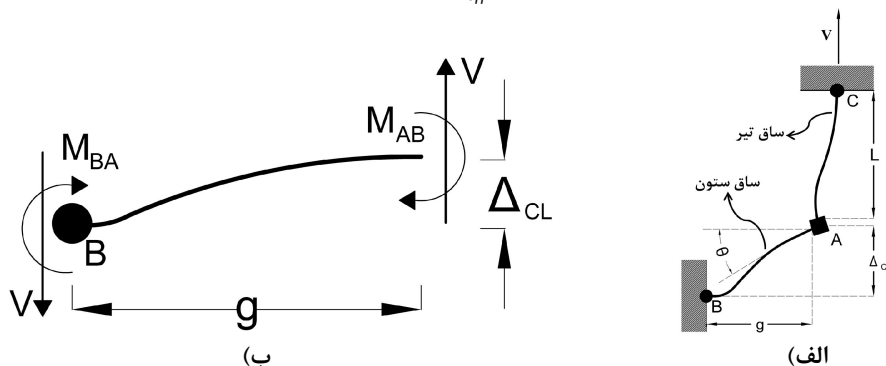


شکل ۵: مکان تشکیل مفصل‌های پلاستیک، (الف) شکل شماتیک [۱۴]، (ب) مدل اجزاء محدود نمونه L8-58-4

نیروی برشی تئوری، V_p که باعث ایجاد مکانیزم تسلیم در نبشی‌ها می‌شود با فرض تغییر شکل و نیروی محوری اندک در ساق ستون نبشی محاسبه می‌گردد. تغییر شکل شماتیک نبشی در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ (ب) با

رسم نمودار جسم آزاد ساق ستون و مساوی قرار دادن لنگرهای M_{AB} و M_{BA} با لنگر خمشی پلاستیک نبشی (M_p) و با فرض صفر بودن Δ_{CL} ، با استفاده از تعادل نیروها رابطه زیر برای نیروی برشی تسلیم تئوری (V_p) به دست می‌آید:

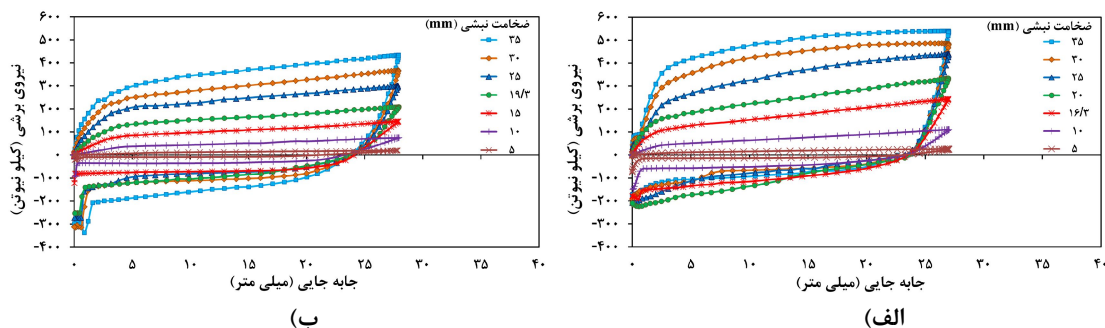
$$V_p(g_{eff}) = \frac{2M_p}{g_{eff}} \quad (3)$$



شکل ۶: الف) هندسه تغییر شکل یافته نشی، ب) نمودار جسم آزاد ساق ستون [۱۴]

گارلوک و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] در مطالعه خود برای محاسبه V_p ، g_{eff} را یک بار برابر با g_2 و یک بار هم برابر با g_2' که به ترتیب برابر فاصله ماهیچه نبشی از لبه ورق و اشرف فاصله ماهیچه نبشی تا مرکز پیچ ستون می باشد، قرار دادند (شکل ۲). نیروی برشی تسلیم به دست آمده از آزمایش $V_{m,exp}$ بر دو مقدار V_p محاسبه شده تقسیم شد و مشخص گردید که مقدار نیروی برشی که از در نظر گرفتن g_{eff} مساوی با g_2 به دست می آید به مقادیر واقعی آن در آزمایش نزدیک تر است. از این رو آن ها پیشنهاد دادند که برای محاسبه نیروی برشی تسلیم تئوری از g_2 استفاده گردد. از آنجا که در نظر گرفتن این مقدار برای g_{eff} باعث می شود تا در بعضی ضخامت ها نیروی برشی به دست آمده از دقت کافی برخوردار نباشد، یک ضریب اصلاح C_V برای نیروی برشی تسلیم تئوری معرفی شد. با رسم نمودار نسبت نیروی برشی تسلیم آزمایش به نیروی برشی تئوری و برازش بین نقاط، ضریب اصلاح نیروی برشی بر حسب ضخامت نبشی به دست می آید.

در مطالعه حاضر دو ضریب اصلاح نیروی برشی برای نبشی‌های دارای ورق وشر و بدون ورق وشر به دست آمده است. برای این منظور دو مدل اجزاء محدود L8-58-4-NW و L8-34-6 انتخاب شده‌اند و بر روی ضخامت آن‌ها یک تحلیل پارامتریک صورت گرفته است. برای هر کدام از مدل‌ها شش ضخامت دیگر علاوه بر ضخامت اصلی نبشی در نظر گرفته شده و مدل‌ها تحت اثر بارگذاری تک آهنگ تحلیل شده‌اند. مقایسه نمودارهای نیروی برشی - جابه‌جایی برای دو نمونه با ضخامت‌های مختلف نبشی در شکل ۷ نشان داده شده است.



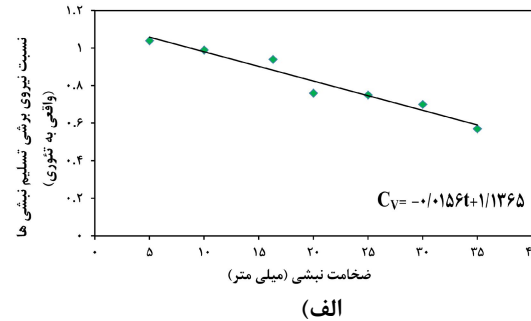
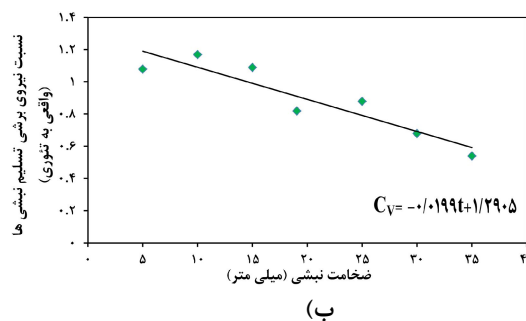
شکل ۷: نمودار نیروی برشی - جابه‌جایی برای ضخامت‌های مختلف نبشی، الف) L8-58-4-NW، ب) L8-34-6

در تحلیل اجزاء محدود، نیروی برشی تسلیم واقعی از نمودارهای نیروی برشی-جابجایی به دست می‌آید که معادل نقطه ای از نمودار است که شیب به طور ناگهانی تغییر می‌کند. نیروی برشی تئوری V_p با استفاده از پارامتر g_2 محاسبه شده و نسبت نیروی برشی تسلیم واقعی به تئوری در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نسبت نیروی برشی تسلیم واقعی به تئوری

(L8-34-6) $V_{m,exp}/V_p$ ($g_{eff} = g_2$)	(L8-58-4-NW) $V_{m,exp}/V_p$ ($g_{eff} = g_2$)	ضخامت نبشی (میلی متر)
۰/۸۳	۱/۰۴	۵
۰/۸۸	۰/۹۹	۱۰
۰/۶۸	-	۱۵
-	۰/۹۴	۱۶/۳
۰/۵۴	-	۱۹/۳
-	۰/۷۶	۲۰
۱/۰۸	۰/۷۵	۲۵
۱/۱۷	۰/۷۰	۳۰
۱/۰۹	۰/۵۷	۳۵

برای به دست آوردن ضریب اصلاح نیروی برشی برای هر نمونه، نمودار نسبت نیروهای برشی و ضخامت متناظر با آن‌ها مطابق با شکل ۸ رسم شده است. با برازش خطی بین این نقاط، ضریب اصلاح نیروی برشی تسلیم در نبشی‌ها به صورت تابعی از ضخامت نبشی به دست می‌آید. ضرایب تصحیح به دست آمده از این طریق برای نمونه‌های L8-58-4-NW و L8-34-6 به ترتیب برابر با $C_V = -0.0156t + 1/1365$ و $C_V = -0.0199t + 1/2905$ می‌باشد.



شکل ۸: ضریب اصلاح نیروی برشی تسلیم، الف) L8-58-4-NW، ب) L8-34-6

با ضرب کردن ضریب اصلاح C_V به دست آمده در نیروی برشی تسلیم تئوری V_p ، مقدار نیروی برشی واقعی که باعث تسلیم در نبشی‌ها می‌شود، به دست می‌آید:

$$V_m = C_V \times V_p \quad (4)$$

۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله، ارائه روشی برای شبیه سازی اجزاء محدود اتصالات تیر به ستون دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی تحت اثر بارگذاری چرخه ای می باشد. بعد از زلزله نورث ریج و مشخص شدن عملکرد ضعیف اتصالات جوشی در قاب های خمشی فولادی، محققان به استفاده از اتصالات پیچی روی آوردند و در این زمینه و به طور ویژه در مورد اتصالات دارای نبشی پیچی تحقیقات زیادی در دو دهه اخیر انجام شد. تحقیقات تحلیلی و آزمایشگاهی در زمینه این اتصالات به صورت مستقیم و یا به صورت غیر مستقیم با استفاده از آن ها در اتصالات پیچیده تری مانند اتصالات مرکزگرا همچنان ادامه دارد و به این دلیل ارائه روشی برای مدل سازی این اتصالات تحت اثر بارگذاری چرخه ای که بتواند در تحقیقات تحلیلی آینده مورد استفاده قرار گیرد، حائز اهمیت است. از طرف دیگر تحقیقات عددی گذشته نشان داده اند که پروسه تحلیل اجزاء محدود، روشی کارآمد در بررسی مسائلی است که امکان مطالعه آن ها در آزمایشگاه وجود ندارد و یا سخت و پر هزینه است. در تحقیق حاضر از مدل سازی اجزاء محدود استفاده شده و در این راستا چهار نمونه اتصال تیر به ستون دارای نبشی نشیمن و نبشی بالایی پیچی شبیه سازی شده اند. تفاوت این نمونه ها در اندازه نبشی، خصوصیات مصالح اعضاء و طول مقیاسی پیچ و حضور یا عدم حضور ورق و اشر می باشد. رفتار هیستریزس مدل های اجزاء محدود بر اساس نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است و نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل اجزاء محدود به خوبی قادر بوده است رفتار چرخه ای نمونه ها را پیش بینی کند. سپس یک نمونه دارای ورق و اشر و یک نمونه بدون ورق و اشر انتخاب شده اند و بر روی ضخامت آن ها تحلیل پارامتریک صورت گرفته است. این نمونه ها تحت اثر بارگذاری تک آهنگ قرار گرفته اند و از این نمودارها نیروی برشی تسلیم واقعی به دست آمده است. با رسم نمودار نسبت نیروی برشی تسلیم واقعی به نیروی برشی تئوری بر حسب ضخامت نبشی و برازش فرمول خطی، ضریب اصلاح نیروی برشی تسلیم به صورت تابعی از ضخامت نبشی ارائه شده است. این ضرایب برای نمونه های L8-58-4-NW و L34-4-6 به ترتیب برابر با $C_v = -0.0156t + 1/1365$ و $C_v = -0.0199t + 1/2905$ می باشد.

مراجع

- [1] Christopoulos C, Filiatrault A, Uang C-M, Folz B. Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames. *Journal of Structural Engineering*, 128: 1111-20, 2002.
- [2] Herning G, Garlock MM, Ricles J, Sause R, Li J. An overview of self-centering steel moment frames. *Structures Congress-Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*, Austin, TX, 1412-20, 2009.
- [3] Shen J, Astaneh-Asl A. Hysteretic behavior of bolted-angle connections. *Journal of constructional steel research*, 51: 201-18, 1999.
- [4] Kishi N, Chen W-F. Moment-rotation relations of semirigid connections with angles. *Journal of Structural Engineering*, 116: 1813-34, 1990.
- [5] Bernuzzi C. Prediction of the behaviour of top-and-seat cleated steel beam-to-column connections under cyclic reversal loading. *Journal of earthquake engineering*, 2: 25-58, 1998.
- [6] Bernuzzi C, Calado L, Castiglioni CA. Ductility and load carrying capacity prediction of steel beam-to-column connections under cyclic reversal loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 1: 401-32, 1997.
- [7] Leon R, Shin K. Seismic performance of semi-rigid composite frames. *Proc 5th US Nat Conf on Earthquake Eng*, 243-52, 1994.
- [8] Shen J, Astaneh-Asl A. Hysteresis model of bolted-angle connections. *Journal of constructional steel research*, 54: 317-43, 2000.
- [9] Ricles JM, Sause R, Garlock MM, Zhao C. Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames. *Journal of Structural Engineering*, 127: 113-21, 2001.
- [10] Kurama Y, Pessiki S, Sause R, Lu L-W. Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *PCI journal*, 44: 72-89, 1999.
- [11] Kurama Y, Sause R, Pessiki S, Lu L-W. Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *Structural Journal*, 96: 622-32, 1999.
- [12] Garlock MM, Ricles JM, Sause R. Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections. *Journal of Structural Engineering*, 131: 438-48, 2005.



**4th. International Congress on Civil Engineering , Architecture
and Urban Development
27-29 December 2016, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran**

- [13] Garlock MM, Ricles JM, Sause R. Influence of design parameters on seismic response of post-tensioned steel MRF systems. *Engineering Structures*, 30: 1037-47, 2008.
- [14] Garlock MM, Ricles JM, Sause R. Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections. *Journal of structural Engineering*, 129: 1615-25, 2003.
- [15] Hibbit H, Karlsson B, Sorensen E. ABAQUS User Manual, Version 6.12 ed.), Simulia,, Providence, RI, 2012.
- [16] AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Inc: Chicago, IL. ANSI/AISC; 2010.
- [17] Garlock MEM. Design, analysis, and experimental behavior of seismic resistant post-tensioned steel moment resisting frames Lehigh University; 2002.