

بررسی تأثیر ناکاملی‌های هندسی بر رفتار خرابی نبشی‌های تحت اثر نیروی فشاری در دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو

علی اصغر ذکاوتی^۱، کریم عابدی^{۲*}، محمدرضا چنقلو^۳، محمد چرختاب بسیم^۳

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰)

چکیده

نبشی‌های فولادی، به عنوان یکی از مقاطع پرکاربرد در دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو استفاده می‌شود. بکارگیری این نوع مقاطع و همچنین نحوه اتصالات آن‌ها در دکل‌های مشبک، باعث ایجاد خروج از مرکزیت در انتقال بار بین محل اتصال و محور طولی اصلی عضو می‌گردد که بر نیروهای داخلی تأثیرگذار است. از طرفی وجود لغزش اتصالات و انحنا اولیه در اعضا دکل، منجر به یک رفتار پیچیده، به ویژه برای اعضای تحت نیروی فشاری می‌شود. این نوع ناکاملی‌ها باعث کاهش ظرفیت در مقایسه با یک عضو ایده‌آل ساده تحت بارگذاری مرکزی می‌شود. با توجه به موارد فوق به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی بهتر حالات خرابی دکل، ارائه رویکردی مناسب در مدل‌سازی نبشی‌ها ضروریست. در این مطالعه، با بکارگیری یک روش ساده در مدل‌سازی اعضا نبشی، اثر ناکاملی‌های هندسی (خروج از مرکزیت، لغزش اتصالات و انحنا اولیه) بر روی رفتار خرابی نبشی‌های تحت نیروی فشاری بررسی شده است. برای مطالعه، نبشی‌ها بطور مجزا با اتصالات تک پیچه و دو پیچه و طول‌های متنوع تحت اثر نیروی فشاری محوری مدل‌سازی شده، تحلیل‌های خرابی غیرخطی استاتیکی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده و سپس رفتار خرابی آن‌ها با نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته و ملاحظات مرتبط با آیین‌نامه‌های طراحی در این زمینه مقایسه شده است. نتایج مطالعه، حساسیت رفتار خرابی نبشی‌ها به ناکاملی‌ها را نشان داده و از طرفی روش مدل‌سازی بکارگرفته شده، پیش‌بینی مناسبی از رفتار و ظرفیت باربری این نوع مقاطع را ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نبشی فولادی، دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو، ناکاملی هندسی، خروج از مرکزیت، لغزش اتصالات، انحنا اولیه.

۱- مقدمه

تحقیقات نشان داده است که کمناش این اعضا متأثر از ناکاملی‌های هندسی است (Chan و همکاران، ۱۹۹۵؛ Fu و همکاران، ۲۰۱۶). ناکاملی‌های هندسی^۱ شامل انحراف گره‌ها از محل اصلی خود، لغزش اتصالات، خروج از مرکزیت اعضا، انحرافات ناشی از ساخت و غیره است که در طول فرآیند ساخت، حمل و نقل و مونتاژ دکل‌های انتقال اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین این ناکاملی‌ها و اثرات ثانویه ناشی از آن‌ها ظرفیت نهایی سازه را کاهش می‌دهد (Zhou و همکاران، ۲۰۱۴؛ Pastor و همکاران، ۲۰۱۳). در حال حاضر اکثر مطالعات موجود برای بررسی ناکاملی‌ها با تمرکز بر

دکل‌های انتقال نیرو به عنوان سازه‌های نگهدارنده هادی‌ها در خطوط انتقال برق مورد استفاده قرار می‌گیرند و نقشی حیاتی در شبکه صنعت برق دارند. با توجه به اینکه دکل‌های انتقال در معرض مخاطرات محیطی متعددی قرار دارند، بررسی آسیب‌های وارده بر آن‌ها کانون تحقیقات زیادی بوده است (Asgarian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Deng و Huang، ۲۰۱۸). خرابی دکل‌های خطوط انتقال نیرو بویژه دکل‌های مشبک که ساختاری خرابی دارند، بطور معمول از کمناش یک سری از اعضا آغاز می‌شوند و

^۱ Geometric imperfections (GI)

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۲۹

آدرس ایمیل: a_zekavati99@sut.ac.ir (ع. ذکاوتی)، k_abedi@sut.ac.ir (ک. عابدی)، mrchenaghlu@sut.ac.ir (م. چنقلو)،

basim@sut.ac.ir (م. چرختاب بسیم)

JGJ 7، ۲۰۱۰). Jiang و همکاران (۲۰۱۷) لغزش اتصالات پیچ و مهره و رفتار اتصال نیمه صلب یک دکل مورد آزمایش در مقیاس کامل را با تحلیل مستقیم مرتبه دوم مبتنی بر حالت نقص سازگار مورد مطالعه قرار داد. Fu و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد فروریختن یک دکل مورد آزمایش در مقیاس کامل را بر اساس همین روش بررسی کردند، اما نتایج در پیش‌بینی موقعیت‌های شکست دکل آزمایش موفقیت آمیز نبود. Zhang و همکاران (۲۰۱۹) این رویکرد را برای بررسی حالت‌های خرابی یک دکل انتقال با انتخاب سه حالت کمانش در موقعیت‌های مختلف به کار گرفتند. در روش شبیه‌سازی تصادفی ناکاملی‌ها، برخلاف روش‌های شبیه‌سازی قطعی ناکاملی‌ها، هم توزیع و هم دامنه ناکاملی‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در این روش از تئوری‌های احتمالاتی و قابلیت اطمینان به منظور تحلیل آماری ظرفیت‌های سازه استفاده می‌شود.

در این مقاله، ابتدا انواع ناکاملی‌های هندسی در دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو با جزئیات بیشتری بررسی شده و در بخش بعدی مروری بر مدلسازی و طراحی نبشی‌های دکل‌های خطوط انتقال نیرو در آیین‌نامه‌ها انجام خواهد شد. سپس با ارائه یک روش ساده در مدلسازی اعضا نبشی، اثر این ناکاملی‌های هندسی (خروج از مرکزیت، لغزش اتصالات و انحنا اولیه) بر روی رفتار خرابی نبشی‌های تحت نیروی فشاری بررسی شده است. بدین منظور، نبشی‌ها بطور مجزا با اتصالات تک پیچه و دو پیچه و طول‌های متنوع تحت اثر نیروی فشاری محوری مدل‌سازی شده و در گام بعدی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحلیل‌های خرابی غیرخطی استاتیکی بر روی آن‌ها انجام شده و در نهایت رفتار خرابی آن‌ها با نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته در این زمینه و ملاحظات مرتبط با آیین‌نامه‌های طراحی در این حوزه مقایسه و نتایج ارائه می‌گردد.

۲- ناکاملی‌ها در اعضا و اتصالات دکل‌های مشبک

دکل‌های فولادی مشبک از اعضا و پروفیل‌های مجزا تشکیل شده که در کارخانه، قطعه زنی و سوراخکاری شده، سپس به محل ساخت حمل می‌شوند و با استفاده از پیچ و مهره در محل سایت مونتاژ و برپا می‌شوند. در دکل‌های مشبک عموماً از مقاطع نبشی استفاده شده و اتصالات به نحوی در نظر گرفته می‌شود که بتوان به سادگی با و بدون صفحات اتصال، اعضا را به صورت خرابایی به یکدیگر متصل نمود. به طوری که با توجه به ساختار خرابایی دکل‌های مشبک، اعضا به صورت کشش و فشار عمل می‌کنند و نیروهای موجود توسط اتصالات به صورت مستقیم توسط اعضا و

سازه‌های فضاکار، پوسته‌های مشبک و پوسته‌های استوانه‌ای هستند که کاربرد نتایج آن‌ها را در دکل‌های انتقال محدود می‌کنند. بنابراین، توسعه یک روش شبیه‌سازی ناکاملی مناسب برای ارزیابی دقیق ظرفیت نهایی دکل‌های انتقال ضروری است. ناکاملی‌های هندسی به دلیل اختلافات زیاد بین بارهای کمانش نظری و تجربی سازه‌های پوسته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیر آن‌ها بر رفتار سازه‌ها بویژه پوسته‌های استوانه ای مورد بررسی قرار گرفته است (Karman و همکاران، ۱۹۴۰؛ Koiter، ۱۹۴۵؛ Huseyin و Mandadi، ۱۹۷۷). نتایج نشان داده است که دلایل اصلی این اختلافات غیرخطی بودن سیستم سازه و ناکاملی‌های هندسی است که وجود آن‌ها در سازه اجتناب ناپذیر است. با افزایش پیچیدگی و تنوع سازه‌ها، روش اجزای محدود به طور گسترده‌ای برای حل مسائل مقاومت و کمانش استفاده شده است. نرم‌افزار اجزا محدود توانایی مدل‌سازی ناکاملی‌ها را بر روی یک سازه ایده‌آل و بدست آوردن بارهای بحرانی را فراهم می‌کند. به طور کلی مطالعات و تلاش‌های فعلی برای مدل‌سازی ناکاملی‌ها را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی کرد: ناکاملی‌های اندازه‌گیری شده^۲، روش‌های شبیه‌سازی قطعی ناکاملی‌ها^۳ و روش‌های شبیه‌سازی تصادفی ناکاملی‌ها^۴ با بکارگیری پارامترهای غیر قطعی (Wang و همکاران، ۲۰۲۱).

در ناکاملی‌های اندازه‌گیری شده، به عنوان مثال برای ناکاملی‌های هندسی، شکل، بزرگی و توزیع دقیق عیوب هندسی برآورد می‌شود که این مقادیر می‌توانند با استفاده از فتوگرامتری فاصله نزدیک، دستگاه اندازه‌گیری مختصات سه‌بعدی و تکنیک‌های اندازه‌گیری لیزری برآورد شوند (Selvaraj و Madhavan، ۲۰۱۸؛ Bernard و Coleman، ۱۹۹۹). همکاران (۲۰۱۵) ناکاملی‌ها و عیوب هندسی را برای یک دکل انتقال با استفاده از فناوری اسکن لیزری اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که جابجایی‌های الاستیک و تنش‌ها بین دکل دارای ناکاملی و دکل ایده‌آل به‌طور قابل توجهی متفاوت است که تأثیرات نامطلوب ناکاملی را برای دکل‌های انتقال تأیید می‌کند.

روش‌های شبیه‌سازی قطعی ناکاملی‌ها به عنوان نمونه برای انحنا اولیه ناشی از رواداری‌های ساخت شامل روش حالت نقص سازگار^۵ (Shen و Chen، ۱۹۹۳؛ See و Mcconnel، ۱۹۸۶) و روش اعمال نقص با مودهای ویژه^۶ (Sassone و Bruno، ۲۰۱۶؛ He و همکاران، ۲۰۱۸) هستند، که هر دو یک توزیع فضایی قطعی را برای مقادیر نقص به صورت پیش‌فرض در نظر می‌گیرند و این موضوع با توجه به اجرای ساده و قابلیت اطمینان بالای آنها در چندین استاندارد طراحی مدون شده‌اند (EN 1993-1-6، ۲۰۱۷؛

⁵ Consistent imperfection mode method (CIMM)

⁶ Eigenmode imperfection method (EIM)

² Measured geometric imperfections (MGIs)

³ Deterministic imperfection simulation methods (DISMs)

⁴ Stochastic imperfection simulation methods (SISMs)

- ابعاد مقطع: انحراف از ابعاد دقیق مقطع یک پروفیل فولادی، ناشی از رواداری‌های مرتبط با ساخت است که لحاظ آن در رفتار و ظرفیت اعضا می‌تواند موثر باشد (Fu و Li، ۲۰۱۸)؛
- انحنا اولیه: یکی از متداول‌ترین انواع ناکاملی‌ها در اعضای سازه‌ای است که ناشی از وجود انحنا در راستای اولیه و مرتبط با خطای ساخت است. وجود این نوع ناکاملی تاثیر بسزایی در رفتار اعضای فشاری خواهد داشت (Wang و همکاران، ۲۰۲۱؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۳)؛
- لغزش اتصالات: در ساخت دکل‌های مشبک، به دلیل مسائل اجرایی، یک حداقل فاصله رواداری بین پیچ و سوراخ ایجاد می‌شود. این فاصله و اجرای اتصالات به صورت اتکایی باعث ایجاد یک لقی در اتصال می‌شود (Ungkurapinan و همکاران، ۲۰۰۳؛ Balagopala و همکاران، ۲۰۲۰)؛
- خروج از مرکزیت اعضا: بکارگیری اعضای نبشی و همچنین نحوه اتصالات در دکل‌های مشبک، باعث ایجاد خروج از مرکزیت در انتقال بار بین محل اتصال و محور طولی اصلی عضو می‌گردد که بر نیروهای داخلی تاثیرگذار است (Lee و McClure، ۲۰۰۷؛ Mahmoudi و همکاران، ۲۰۲۲).

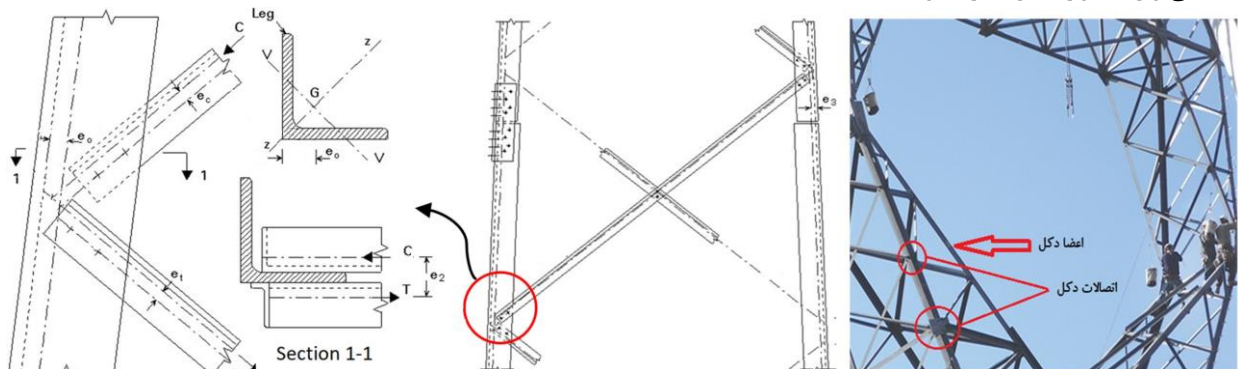
۳- مروری بر مدلسازی و طراحی نبشی‌ها در دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو

مدلسازی دکل‌ها عموماً بصورت یک خرپای سه بعدی ایده‌آل، با رفتار الاستیک در نظر گرفته می‌شوند که از این پس تحت عنوان مدل ساده از آن یاد خواهد شد. در مدل ساده اعضاء بصورت کاملاً مستقیم و بدون جزئیات اتصالات مدل شده که در محل اتصالات همگی اعضا از یک نقطه عبور می‌کنند. این در حالیست که با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبلی عنوان شد، ماهیت نبشی‌ها در دکل‌های انتقال نیرو و نحوه اتصالات (تک پیچه و یا چند پیچه) به نحوی است که منجر به ایجاد خروج از مرکزیت، لغزش اتصالات و مقاومت در برابر چرخش (اتصالات نیمه صلب) خواهد شد.

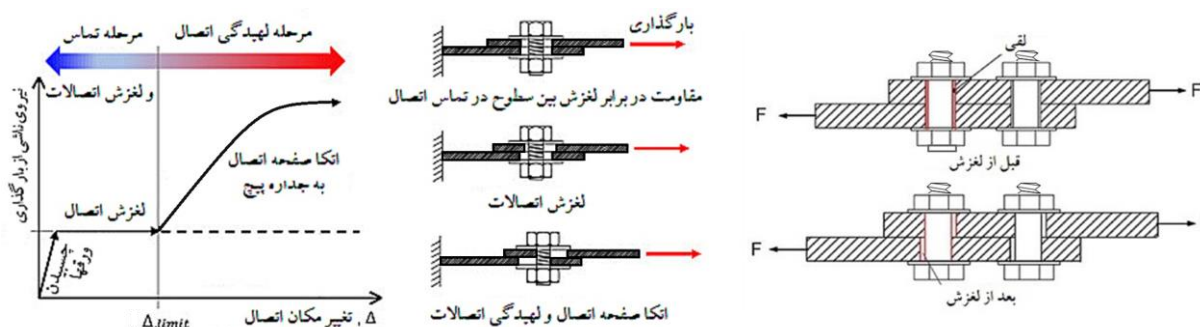
یا بواسطه ورق‌های اتصال به دیگر اعضا منتقل می‌شوند (Kiessling و همکاران، ۲۰۰۳).

دکل‌های مشبک از اعضا، اتصالات و ملحقات (شامل اعضای غیر سازه‌ای مانند پیچ‌های پله و خار ضد صعود) تشکیل می‌گردند. عموماً اعضای دکل‌ها از نبشی‌های گرم نورد شده بال مساوی تشکیل شده و اتصالات در دکل‌های مشبک شامل ورق‌ها، نشیمن اتصالات، پیچ‌ها، مهره‌ها و واشرها می‌باشد. انتقال نیروهای موجود در اعضا به دو صورت اتصال مستقیم نبشی‌ها به یکدیگر و یا از طریق ورق‌های اتصال انجام می‌شوند. اتصالات اعضا به یکدیگر در دکل‌های خطوط انتقال نیرو می‌تواند تک پیچه و یا چند پیچه باشد. اتصالات پیچی در دکل‌های انتقال نیرو معمولاً از نوع اتکایی بوده و مهمترین مسئله، طراحی آرایش اتصال با ایجاد کمترین خروج از مرکزیت است. چراکه بواسطه خاصیت شکل و عدم تقارن نبشی‌ها، بوجود آمدن خروج از مرکزیت اجتناب ناپذیر است. در شکل ۱ وضعیت اتصالات در دکل‌های مشبک نشان داده شده است.

از طرفی در ساخت دکل‌های مشبک، به دلیل مسائل اجرایی، یک حداقل فاصله رواداری بین پیچ و سوراخ ایجاد می‌کنند. این فاصله باعث ایجاد یک لقی در اتصال می‌شود که در هنگام بارگذاری موجب ایجاد لغزش در اتصالات خواهد شد. در شکل ۲ مراحل لغزش اتصالات مشاهده می‌شود. با توجه به مشخصات مصالح و اتصالات دکل‌های خطوط انتقال نیرو، وجود انواع ناکاملی‌ها در این سازه‌ها امری بدیهی و غیر قابل اجتناب است و از طرفی باعث تغییر رفتار سازه در مقایسه با سازه‌ای ایده‌آل خواهد شد. با توجه به ماهیت ناکاملی‌ها، انواع ناکاملی‌های موجود را می‌توان به دو گروه هندسی و مکانیکی تقسیم کرد. این دو نوع ناکاملی دارای ماهیت کاملاً متفاوتی می‌باشند. ناکاملی‌ها هندسی معمولاً تغییرشکل‌های اولیه در سازه را شامل می‌شوند. ناکاملی‌هایی از نوع انحنا اولیه اعضا، انحراف گره‌ها از محل ایده‌آل خود و انحراف در طول اعضا در این گروه قرار می‌گیرند. با توجه به توضیح فوق از مهمترین انواع ناکاملی‌های هندسی در دکل‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:



شکل ۱: اعضا و اتصالات در دکل‌های انتقال و نمایش خروج از مرکزیت‌ها



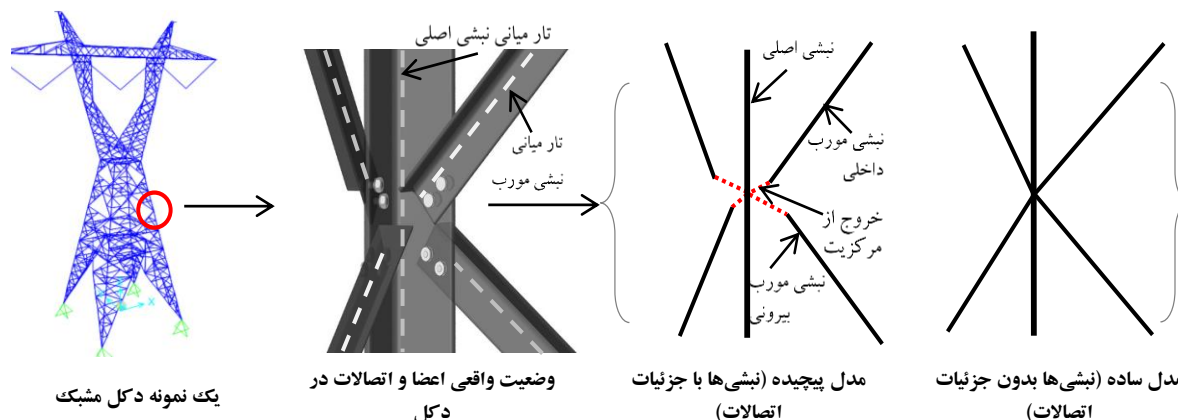
شکل ۲: مراحل شماتیک لغزش در اتصالات

همان‌طور که اشاره شد شرایط مرزی اتصالات در طراحی نبشی‌ها بسیار تاثیر گذار است. استانداردهای طراحی فعلی تا حدودی این اثرات را از طریق نسبت‌های لاغری مؤثر اصلاح‌شده در نظر می‌گیرند. فلذا به منظور طراحی واقع‌بینانه‌تر نبشی‌ها در دکل‌های مشبک، طول مؤثر اعضا با توجه به آرایش اعضا فرعی و همچنین شرایط مرزی اتصالات (اتصال از طریق یک و یا دو بال، تک پیچه و یا چند پیچه بودن) تعیین می‌گردد تا به نحوی پیچیدگی‌های اتصالات در دکل‌های مشبک لحاظ گردد با این وجود، به دلیل مدلسازی ساده و در نتیجه عدم لحاظ پیچیدگی‌های اتصالات، اختلاف نتایج آزمون و مدلسازی وجود دارد و این موضوع اهمیت مدلسازی پیچیده (لحاظ جزئیات اتصالات) را مشخص می‌کند.

یکی از معتبرترین استانداردهای مرتبط با طراحی دکل‌های مشبک خطوط انتقال نیرو، استاندارد ASCE10-15 (۲۰۱۵) می‌باشد که سال‌هاست مورد استفاده مهندسين قرار گرفته است. طبق این استاندارد، در طراحی دکل‌های مشبک از روش ضرایب بار استفاده می‌شود. در این روش، بارهای وارد بر سازه در ضرایب بار ضرب می‌شوند و تنش‌های نهایی ایجاد شده در اعضا با تنش تسلیم و کمانش آن‌ها مقایسه می‌شود.

در این راستا نتایج تحقیقات نشان می‌دهد (Mahmoudi و همکاران، ۲۰۲۲؛ Prasad Rao و همکاران، ۲۰۱۲)، فرضیات لحاظ شده در مدل ساده موجب می‌شود نتایج آزمون‌های انجام شده با نتایج طراحی بر طبق استانداردها اختلاف داشته باشند. چراکه به علت خروج از مرکزیت اعضا و همچنین عدم عبور محور اصلی اعضا از یک نقطه، لنگرهای متمرکز در گره‌ها ایجاد شده و در نتیجه نیروی اضافی و لنگر متمرکز در اعضا بوجود خواهد آمد و از طرفی لغزش اتصالات و نیمه صلب بودن اتصالات چند پیچه موجب تغییر رفتار دکل خواهد شد. بدین منظور تاکنون مطالعات متنوعی (Balagopala و همکاران، ۲۰۲۰؛ Tian و همکاران، ۲۰۲۰) برای لحاظ جزئیات بیشتر در مدلسازی و در نتیجه پیش بینی پاسخ بهتر انجام شده است. ولی نکته مهم ارائه طرحی است که در عین سادگی بتواند پیچیدگی‌های ناشی از مدلسازی را کاهش دهد.

شکل ۳ پیچیدگی اتصالات دکل را نشان داده و دو نوع مدل پیچیده و ساده را با لحاظ و عدم لحاظ جزئیات اتصالات ارائه نموده است. در بخش‌های بعدی جزئیات لازم به منظور مدلسازی پیچیده که می‌تواند انواع ناکاملی‌ها را در خود لحاظ نماید، ارائه خواهد شد.



شکل ۳: پیچیدگی اتصالات و خروج از مرکزیت اعضا در دکل (چپ) و دو نوع مدل پیچیده و ساده (راست)

$$N_{pl} = A \cdot f_{y,mean} \quad (۴)$$

$$N_{cr} = \pi^2 E_{mean} I_v / L_{sys}^2 \quad (۵)$$

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}} \quad (۶)$$

که در آن:

A: سطح مقطع عضو؛

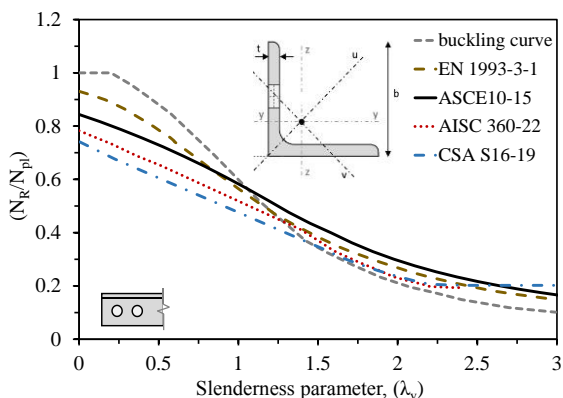
$f_{y,mean}$: تنش تسلیم مجاز میانگین؛

E_{mean} : مدول الاستیسیته میانگین؛

I_v : ممان اینرسی دوم سطح حول محور ضعیف؛

L_{sys} : طول مجموعه تحت آزمون.

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف منحنی‌ها در محدوده لاغری پایین بیشتر از لاغری بالا است. به نظر می‌رسد استاندارد ASCE10-15 در اعضا لاغر در کران بالاتری نسبت به سایر استانداردها قرار دارد در حالی که در اعضا غیر لاغر، استاندارد Eurocode (EN 1993-3-1) نسبت به سایر استانداردها در کران بالاتری قرار دارد. در این خصوص استاندارد CSA S16-19 نیز محافظه‌کارانه‌تر از سایر استانداردها است. لازم به ذکر است یکی از عوامل اختلاف مقادیر پیشنهادی استانداردها، لحاظ ملاحظات طراحی مختلف در روابط طراحی است. به عنوان نمونه در آیین نامه AISC360، اثر نقص اولیه در روابط طراحی به طور ضمنی لحاظ می‌گردد در حالی که در ASCE10-15 این موضوع در نظر گرفته نمی‌شود. از طرفی در برخی استانداردها منحنی ستون بر اساس شرایط مرزی اتصال و حتی نوع مقطع تغییر خواهد کرد. به عنوان نمونه در استاندارد ASCE10-15 و EN 1993-3-1، شرایط مرزی اتصال نبشی با دقت بیشتری لحاظ می‌گردد. خروج از مرکزیت و تعداد پیچ‌های اتصال در این استانداردها منجر به تغییر روابط طراحی و در نتیجه تغییر منحنی ستون خواهد شد.



شکل ۴: مقایسه مقاومت فشاری اسمی نبشی تک برای اتصالات دو پیچه در استانداردهای مختلف

روابط طراحی مقاطع و اتصالات بطور کامل در این استاندارد اشاره شده است. در این بخش به منظور آشنایی با رویه طراحی مقاطع نبشی در دکل‌های انتقال نیرو، بطور خلاصه روابط کلی مربوطه ارائه خواهد شد. تنش فشاری مجاز طراحی F_a در سطح مقطع کل عضو یا در ناحیه کاهش یافته مقطع تحت بار محوری فشاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y ; KL/r \leq C_c \quad (۱)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} ; KL/r > C_c \quad (۲)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (۳)$$

که در آن:

F_y : حداقل تنش تسلیم مجاز؛

E : مدول الاستیسیته؛

L : طول مهار نشده؛

r : شعاع ژیراسیون؛

K : ضریب طول موثر.

در شکل ۴ یک نمای کلی از منحنی مقاومت فشاری نسبی اعضای نبشی تک با اتصالات پیچ و مهره‌ای (با حداقل دو پیچ و اتصال از یک بال) در چندین استاندارد مختلف (استاندارد EN 1993-3-1، ۲۰۰۶؛ استاندارد AISC 360-22، ۲۰۲۲؛ استاندارد CSA S16-19، ۲۰۱۹؛ استاندارد ASCE10-15، ۲۰۱۵) ارائه شده است. در این نمودار λ_v پارامتر لاغری حول محور ضعیف نبشی تک است. N_{pl} برابر مقاومت فشاری محوری پلاستیک و N_{cr} نیروی بحرانی کمناش الاستیک می‌باشد. اصطلاحاً به این نوع نمودارها منحنی ستون^۷ اطلاق می‌شود. در برخی از استانداردها، منحنی ستون به عنوان تابعی از نسبت لاغری L/r بیان می‌شوند. استاندارد ASCE، AISC، در این دسته قرار می‌گیرند. در برخی استانداردهای دیگر، منحنی ستون به عنوان تابعی از پارامتر لاغری λ_v بیان می‌شود. استانداردهایی مانند Eurocode (EN 1993-3-1) در این دسته قرار می‌گیرند. با این حال، از آنجایی که λ_v پارامتری است که به عنوان تابعی از L/r تعریف می‌شود، همیشه می‌توان منحنی ستون‌ها را بر اساس λ_v بیان کرد. در تحقیق حاضر به منظور مقایسه منحنی‌های ستون، تبدیل‌های مورد نیاز انجام شده و تمامی منحنی‌های ستون بر اساس λ_v بیان می‌شوند. مقاومت محوری پلاستیک (N_{pl}) بر اساس معادله ۴ و نیروی بحرانی کمناش الاستیک (N_{cr}) حول محور ضعیف بر اساس معادله ۵ و خواص مقاطع و مصالح محاسبه می‌گردد.

⁷ Column curves

۱۳ مورد با اتصالات یک پیچه) در دانشگاه فناوری گراتس انجام دادند. ۲۴ نمونه با نبشی‌های گرم نورد شده $L80 \times 8$ ($b = 80$ ، $t = 8 \text{ mm}$) ساخته شد. سه نمونه با اتصالات دو پیچه با نبشی‌های گرم نورد شده $L120 \times 12$ ($b = 120$ ، $t = 12 \text{ mm}$) ساخته شد. شکل ۵، شرایط تکیه‌گاهی و نمونه‌های قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد. تصویر سمت راست (پایین) در شکل ۵ نمونه نبشی‌ها را پس از رسیدن به ظرفیت کامل عضو در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. تغییرشکل‌های پلاستیکی باقی‌مانده را می‌توان به وضوح مشاهده کرد. برای مقاطع $L80 \times 8$ از پیچ M20 با گرید ۱۰.۹ استفاده شد، در حالی که برای مقاطع $L120 \times 12$ از پیچ M27 با گرید ۱۰.۹ استفاده شد.

پیچ‌های چهار آزمایش با دست سفت شده‌اند، سایر پیچ‌ها با اعمال فشاری مشخص طبق استاندارد پیش‌تنیده شده‌اند. مشخصات مصالح، ابعاد واقعی (t_{mean} ، b_{mean})، طول عضو (L_{member}) و طول مجموعه مورد آزمون (L_{sys}) برای همه اعضا و سایر جزئیات آزمون در مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) به طور کامل اشاره شده است. شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها در مطالعه فوق عبارتند از:

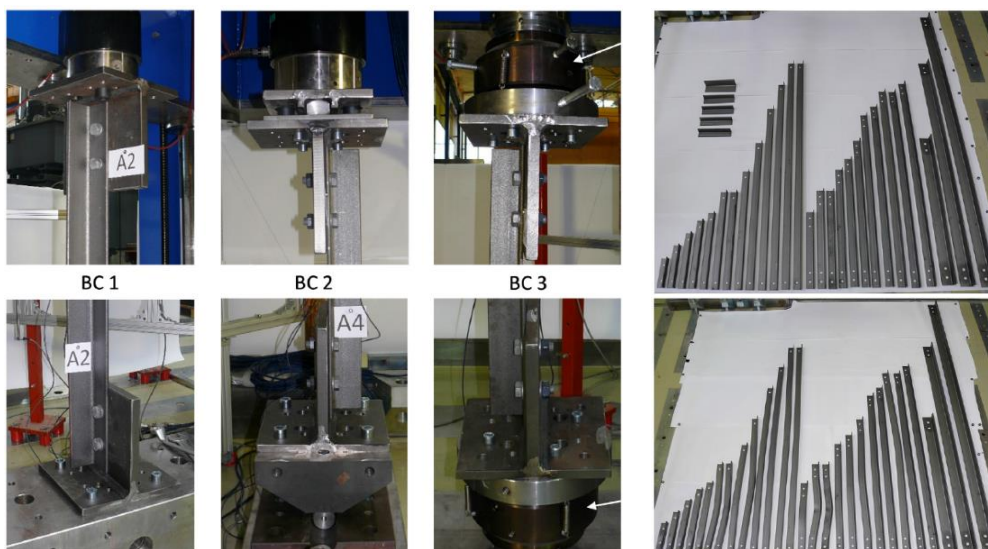
- شرایط مرزی ۱ (BC1): شامل یک تکیه‌گاه کاملاً گیردار در هر دو انتهای عضو با مهار تمام درجات آزادی دورانی است؛
- شرایط مرزی ۲ (BC2): شامل یک تکیه‌گاه لبه چاقویی (مرکز در محور صفحه اصلی) است و تنها مجاز به دوران حول محور موازی با ورق اتصال است؛
- شرایط مرزی ۳ (BC3): شامل یک تکیه‌گاه کاملاً مفصلی (مرکز در مرکز صفحه اصلی) است و دوران آن حول محور طولی عضو محدود شده است.

نکته قابل توجه این است که اثر خروج از مرکزیت بار منجر به کاهش ظرفیت در مقایسه با حالت بدون خروج از مرکزیت (منحنی buckling curve بر مبنای EN 1993-1-1) بویژه در اعضا با لاغری کم می‌شود.

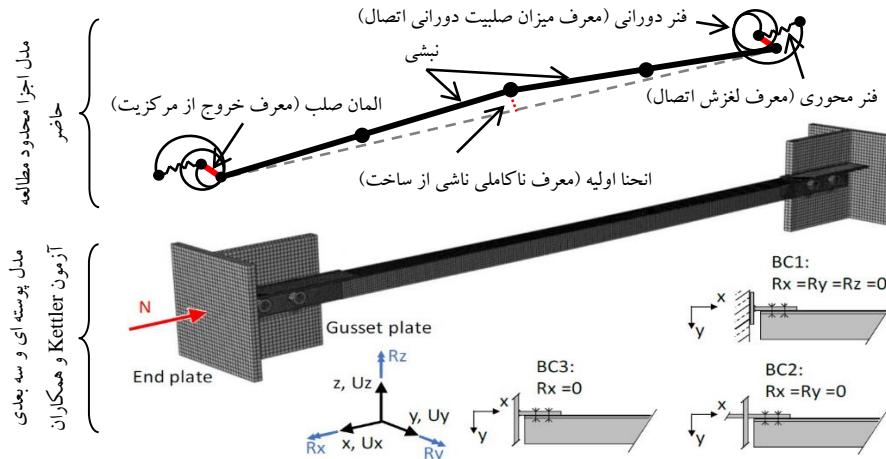
۴- مشخصات آزمون‌های انجام شده توسط Kettler و همکاران (۲۰۱۹)

در این مطالعه، به منظور بررسی اثر ناکاملی‌ها بر ظرفیت فشاری نبشی‌ها، تحلیل مدل عددی اجزا محدود با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط Kettler و همکاران (۲۰۱۹) انجام خواهد شد. در این راستا نبشی‌ها بطور مجزا با اتصالات تک پیچه و دو پیچه و طول‌های متنوع تحت اثر نیروی فشاری محوری مدل-سازی شده، تحلیل‌های خرابی غیرخطی استاتیکی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود انجام شده و سپس رفتار خرابی آن‌ها با نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته مقایسه می‌گردد. در میان مطالعات تحقیقاتی تجربی مختلف انجام شده در گذشته (Bathon و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bhilawe، ۲۰۱۸؛ Tian و همکاران، ۲۰۱۸) بر روی رفتار نبشی‌های تک فولادی، مشاهده گردید که مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) حاوی داده‌های آزمایشی کافی در مورد انواع مختلف نبشی‌های تک با اتصالات پیچ و مهره‌ای است که به بهترین وجه با دامنه و هدف تحقیق حاضر مطابقت دارد. با توجه به محدود بودن دامنه تحقیق حاضر، سایر مطالعات تجربی در نظر گرفته نمی‌شوند. با این حال، نویسندگان معتقدند که میزان داده‌های تجربی موجود در مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) برای نتیجه‌گیری در پایان این مطالعه کافی است.

Kettler و همکاران (۲۰۱۹) در مجموع ۲۷ آزمایش تجربی بر روی نبشی‌های فولادی پیچ‌دار (۱۴ مورد با اتصالات دو پیچه و

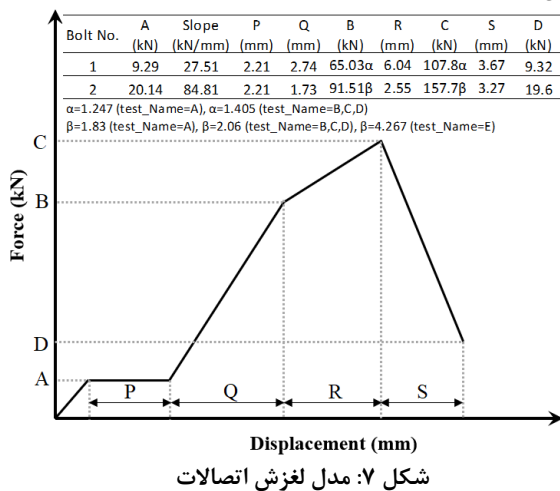


شکل ۵: نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش (راست) و شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها در آزمون فشاری محوری (چپ) (Kettler و همکاران، ۲۰۱۹)



شکل ۶: مدل اجزا محدود تک خطی تحقیق فوق و مدل سه بعدی آزمون Kettler و همکاران (۲۰۱۹) و شرایط مرزی BC1 تا BC3

محور x محلی المان لحاظ گردید که مقدار سختی آن (k_x) وابسته به نوع اتصالات و تعداد پیچ‌ها است و بر اساس مطالعه تجربی Ungkurapinan و همکاران (۲۰۰۳) و مشخصات اتصالات در نظر گرفته شد. در این راستا سختی فنر در راستای x توسط مصالح ElasticMultiLinear لحاظ گردید تا اثرات لغزش اتصالات به طور کامل و واقع بینانه دیده شود. لازم به ذکر است، مدل فوق به نحوی در نظر گرفته شد که قادر است با توجه به کاهش ظرفیت اتصال در برابر حداکثر نیروی وارده، خرابی در اتصالات را لحاظ کند. مدل لغزش اتصالات در شکل ۷ ارائه شده است و در جدول ۱ سختی‌های مختلف در امتداد x, y, z و سختی‌های دورانی نبشی نسبت به تکیه‌گاه در محدوده x, y, z را که در مدل لحاظ گردیده نشان داده شده است.



به منظور لحاظ اثر کمانش، باید نقص اولیه عضو (ناکاملی خطای ساخت) و اثرات تغییر شکل‌های بزرگ ($P-\delta$ و $P-\Delta$) در تحلیل نظر گرفته شوند. نرم‌افزار المان محدود OpenSees قادر به در نظر گرفتن اثر کمانش در یک سیستم می‌باشد. به توجه به توصیه Uriz و همکاران (۲۰۰۸) برای لحاظ اثر کمانش در

۵- مشخصات مدل اجزا محدود و تعریف ناکاملی‌ها

در این مطالعه، تحلیل‌های خرابی غیرخطی استاتیکی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده و همان طور که اشاره شد رفتار خرابی آن‌ها با نتایج مطالعه آزمایشگاهی Kettler و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه می‌گردد. در مدل عددی، هر کدام از نبشی‌ها با توجه به دستگاه مختصات محلی که برای آنها در نظر گرفته شده است، تعریف می‌شوند.

با توجه به اینکه در آزمون فشاری مورد نظر، نبشی‌های تک از طریق یک بال به رابط آزمون متصل می‌گردد، خروج از مرکزیت و سختی دورانی اتصال در هر دو انتهای نبشی توسط المان صلب (معرف خروج از مرکزیت) و شش فنر غیر خطی لحاظ شده است. جزئیات نحوه مدل‌سازی مورد نظر در این تحقیق در شکل ۶ نشان داده شده است. در مدل اجزا محدود فوق، اعضای نبشی توسط المان‌های تیر ستون (Force-Based Beam-Column Element) مدل‌سازی می‌شوند که بر اساس فرمول بندی این المان، مفصل پلاستیک می‌تواند در هر بخش از عضو ایجاد شود. از طرفی برای در نظر گرفتن اثرات غیرخطی، از مقاطع فایبر در سراسر مقطع نبشی استفاده گردید. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در مدل حاضر از المان تیر ستون استفاده می‌شود نمی‌توان انتظار لحاظ نمودن اثرات پیچشی و در نتیجه پیش‌بینی کمانش خمشی-پیچشی را داشت.

خروج از مرکزیت در هر دو انتهای عضو با المان Elastic Beam Column که مدول الاستیسیته آن ۱۰۰ برابر برابر مدول الاستیسیته فولاد مصرفی است ایجاد می‌شود تا بتواند رفتاری صلبی از خود نشان دهد. به منظور شبیه سازی رفتار اتصالات (لغزش و دوران) از المان ZeroLength استفاده گردید به نحوی که شش فنر غیر خطی در گره‌های انتهایی عضو نبشی با سختی‌های انتقالی و دورانی در امتداد محورهای محلی x, y, z بکار گرفته شد. اثر لغزش و لقی اتصالات توسط فنر محوری در جهت

در مدل اجزا محدود از مصالح فولادی دوخطی تک محوری با سخت شدگی سینماتیک برای شبیه سازی نبشی فولادی استفاده می‌شود و مشخصات فولاد مصرفی مطابق نتایج آزمون کشش نبشی‌های مورد آزمون مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) لحاظ گردید.

۶- تحلیل رفتار خرابی نبشی‌ها

۶-۱- تحلیل رفتار خرابی نبشی‌ها و مقایسه با نتایج

مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته

در این بخش، عملکرد مدل عددی در پیش‌بینی ظرفیت فشاری محوری نبشی فولادی با توجه به نتایج آزمون Kettler و همکاران مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای هر نبشی تک و یا دوپیچه و شرایط مختلف مرزی تکیه‌گاه‌ها، نسبت مقدار محاسبه شده از نتایج تحلیلی بر مقاومت فشاری محوری پلاستیک در منحنی‌های ستون نشان داده شده و با مقادیر تجربی مقایسه می‌شود. در جدول ۲ علاوه بر مشخصات نمونه‌های مورد آزمون، مقایسه‌ای بین بارهای نهایی آزمایش‌های تجربی Kettler (N_R) و بارهای نهایی محاسبه شده توسط مدل نرم‌افزار اجزا محدود ($N_{R,4FEM}$) مورد نظر در این تحقیق، نشان داده شده است.

OpenSees، هر عنصر باید به حداقل دو المان beam-column غیر الاستیک با حداقل سه نقطه انتگرال گیری تقسیم شود. در این تحقیق برای بررسی ناکاملی خطای ساخت در اعضا و لحاظ اثر کمانش، برای به دست آوردن دقت قابل قبول تری از رفتار کمانشی مقطع نبشی و با توجه به پیشنهاد Darestani و همکاران (۲۰۱۹)، تعداد المان‌های تقسیم شده به دو برابر افزایش یافت. علاوه بر این، به منظور محاسبه آثار غیرخطی‌های هندسی، تغییر شکل‌های بزرگ با استفاده از تبدیل هندسی "Co-rotational" در OpenSees در نظر گرفته شد.

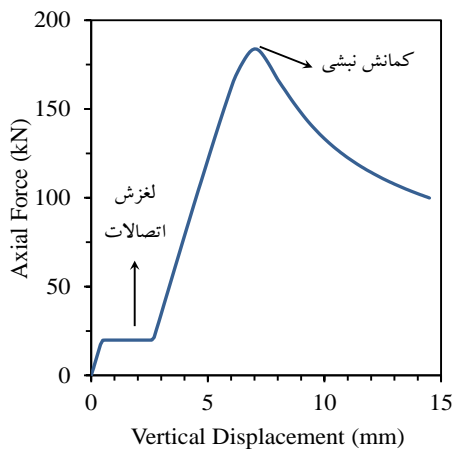
جدول ۱ - مشخصات سختی اتصالات

سختی	نوع اتصال	
	تک پیچه	دو پیچه
K_x	بر اساس مدل Ungkurapinan و همکاران (۲۰۰۳) و مشخصات اتصالات	
K_y	صلب	صلب
K_z	صلب	صلب
$K_{rot,x}$	صلب	صلب
$K_{rot,y}$	مفصلی	صلب
$K_{rot,z}$	صلب	صلب

جدول ۲ - مشخصات نمونه‌های مورد آزمون و مقایسه بارهای نهایی تحلیلی عددی نسبت به بارهای نهایی آزمایشگاهی

نمونه آزمون	مقطع نبشی	تعداد پیچ	شرایط تکیه‌گاهی	L_{member} mm	ϵ_{imp} mm	N_R kN	$N_{R,FEM}$ kN	$\frac{N_{R,FEM} - N_R}{N_R}$	N_{pl} kN	$\frac{N_R}{N_{pl}}$	$\frac{N_{R,FEM}}{N_{pl}}$	حالت خرابی
								%		-	-	
A1	80 X 8	2	BC1	1140	0.4	261.1	286.8	9.9	365.9	0.71	0.78	B _{in}
A2	80 X 8	2	BC1	1820	1.45	238.8	245.8	2.9	362.9	0.66	0.68	B _{in}
A3	80 X 8	2	BC1	2630	1.6	215.4	183.8	-14.7	368	0.59	0.50	B _{out}
A4	80 X 8	2	BC2	870	0.25	156.8	159.9	2.0	364.3	0.43	0.44	B _{out}
A5	80 X 8	2	BC2	1550	1.15	117.8	124.3	5.5	363.1	0.32	0.34	B _{out}
A6	80 X 8	2	BC2	2360	1.45	71.8	78.4	9.2	366	0.20	0.21	B _{out}
B1	80 X 8	2	BC3	1410	0.65	148.0	121.5	-17.9	397.2	0.37	0.31	B _{out}
B2	80 X 8	2	BC3	2220	1.35	86.4	77.5	-10.3	397.5	0.22	0.20	B _{in&out}
B3	80 X 8	2	BC3	2770	2.1	61.0	58.4	-4.3	399.7	0.15	0.15	B _{in&out}
B4	80 X 8	1	BC1	1140	0.35	162.9	163.5	0.3	398	0.41	0.41	B _{in}
B5	80 X 8	1	BC1	1820	1.15	132.1	111.4	-15.6	399	0.33	0.28	B _{in}
C1	80 X 8	1	BC1	3170	1.1	98.4	98.2	-0.2	390	0.25	0.25	B _{in}
C2	80 X 8	1	BC2	870	0.25	120.9	133.8	10.7	389.3	0.31	0.34	LP
C3	80 X 8	1	BC2	2360	1.05	66.0	69.3	5.1	390.3	0.17	0.18	B _{out}
C4	80 X 8	1	BC3	1410	0.45	131.0	125.7	-4.0	390.1	0.34	0.32	B _{out}
C5	80 X 8	1	BC3	2770	0.8	62.6	61.0	-2.6	392.4	0.16	0.16	B _{in&out}
D1	80 X 8	2	BC1	1140	0.6	260.2	316.2	21.5	383.9	0.68	0.82	B _{in}
D2	80 X 8	2	BC1	2630	1.55	177.5	177.0	-0.3	385.7	0.46	0.46	B _{in}
D3	80 X 8	1	BC1	1140	0.45	154.8	145.1	-6.2	384.8	0.40	0.38	B _{in}
D4	80 X 8	1	BC1	3170	2.55	73.1	61.8	-15.5	386.2	0.19	0.16	B _{in}
D5	80 X 8	1	BC3	320	0.05	145.5	151.2	3.9	381.2	0.38	0.40	LP
D6	80 X 8	1	BC3	470	0.1	151.0	151.0	0.0	385.1	0.39	0.39	LP
D7	80 X 8	1	BC3	620	0.15	148.8	151.3	1.6	382.1	0.39	0.40	LP
D8	80 X 8	1	BC3	770	0.25	145.0	151.3	4.4	383.8	0.38	0.39	LP
E1	120 X 12	2	BC1	1850	1.1	488.4	535.0	9.5	827.9	0.59	0.65	B _{out}
E2	120 X 12	2	BC1	3170	2.85	357.2	345.3	-3.3	826.5	0.43	0.42	B _{out}
E3	120 X 12	2	BC1	4200	2.65	267.1	240.1	-10.1	826.3	0.32	0.29	B _{out}

شکل ۹، منحنی نیرو-تغییر مکان تحلیل عددی، مرحله لغزش اتصالات و کمانش نبشی برای نبشی A3 را نشان می‌دهد.



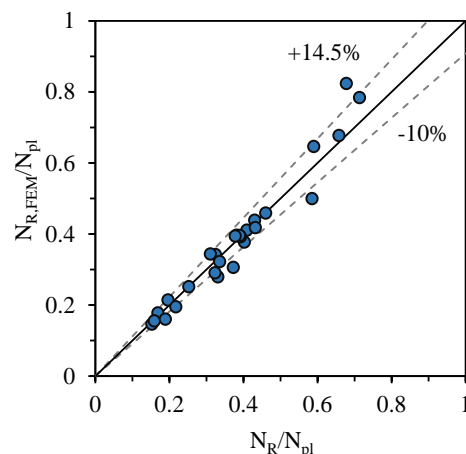
شکل ۹: منحنی نیرو-تغییر مکان تحلیل عددی برای نبشی A3

شکل ۱۰ مقایسه‌ای از منحنی‌های نیرو-تغییر مکان مدل عددی و تجربی را برای شرایط مرزی BC1 (تکیه‌گاه گیردار) برای نمونه A2 با اتصالات دو پیچه ارائه می‌دهد. رخداد کمانش حول محور موازی با ورق تکیه‌گاه برای مدل عددی و آزمون تجربی در شکل مشاهده می‌شود.

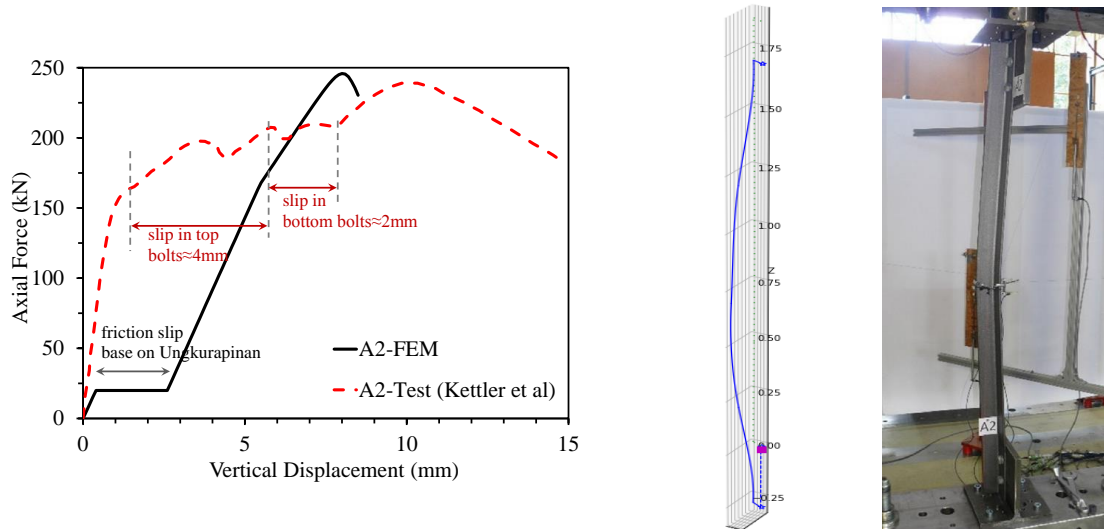
همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین بار نهایی مدل اجزا محدود و مدل تجربی وجود دارد اما تفاوت قابل توجهی در ثبت رخداد های لغزش اتصالات بین مدل عددی و آزمایشگاهی است. در مدل آزمایشگاهی در محدوده بارگذاری بین ۱۵۰ کیلو نیوتن تا ۲۰۰ کیلو نیوتن، دو پیچ در اتصال بالا لغزشی حدود ۴ میلی متر را نشان می‌دهند. هنگام رسیدن به بارگذاری ۲۰۰ کیلو نیوتن، دو پیچ اتصال پایین نیز تقریباً ۲ میلی متر لیز می‌خورند که منجر به افزایش ناگهانی تغییر شکل عمودی در سطح مقطع میانی و در بالای نمونه می‌شود و پس از لغزش، بارگذاری مجدداً افزایش یافته تا به بار نهایی NR می‌رسد. در حالی در مدل عددی رخداد لغزش در محدوده ۲۰ کیلو نیوتن اتفاق می‌افتد. دلیل این موضوع تفاوت نحوه اجرای اتصالات پیچی است. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد اتصالات مدل تجربی از نوع پیش‌تنیده و اتصالات مدل عددی از نوع اتکایی (اتصالات مرسوم دکل‌های مشبک) بر مبنای مدل Ungkurapinan و همکاران (۲۰۰۳) است. فلذا لحظه رخداد لغزش اتصالات در مدل عددی و تجربی متفاوت می‌باشد. البته با توجه به میزان مرسوم رواداری‌های ساخت و وجود سخت‌شوندگی در مرحله اول لغزش نمودار در مدل آزمایشگاهی، به نظر می‌آید که ثبت لغزش اتصالات در گزارش Kettler و همکاران، مرحله توام لغزیدن و اتکا اتصالات به یکدیگر می‌باشد.

محاسبات مدل‌سازی در این بخش بر اساس ناکاملی هندسی ناشی از ساخت روی نبشی تقسیم شده به ۴ المان با ایجاد انحنای اولیه معادل $e_{imp_FEM} = L/300$ مطابق پیشنهاد Kettler و همکاران (۲۰۱۹) انجام شده است. همان‌طور که در ابتدای بخش ۵ توضیح داده شد، ورودی‌ها و محاسبات نرم‌افزاری اجزای محدود با داده‌های هندسی و مشخصات اندازه‌گیری شده مصالح که در بخش ۴ و مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) اشاره گردید انجام شده است. لازم به ذکر است فقط ناکاملی‌های هندسی در نظر گرفته شده است و ناکاملی‌هایی مانند تنش‌های پسماند لحاظ نشده است. در جدول ۲ علاوه بر این مقادیر، به مقاومت محوری پلاستیک N_{pi} نیز اشاره شده است. دو ستون آخر این جدول نیز اطلاعات بیشتری در مورد حالت خرابی آزمون انجام شده توسط Kettler ارائه می‌دهد. حالت‌های خرابی با پارامترهای زیر طبقه بندی می‌شوند:

- "B" نشان‌دهنده کمانش حول محور مشخص شده ("داخل" یا "خارج" از صفحه)؛
 - "LP" نشان‌دهنده مکانیزم لهیدگی و خرابی محلی پلاستیک.
- شکل ۸، یک مقایسه ظاهری بین محاسبات عددی و آزمایش‌ها، بر اساس پارامترهای بی‌بعد $N_{R,FEM}/N_{pi}$ و N_R/N_{pi} ارائه می‌کند. می‌توان ملاحظه نمود که محاسبات اجزای محدود بر اساس روش ارائه شده، بارهای نهایی آزمایش‌ها را به خوبی پیش‌بینی می‌کند به طوری که در ۷۸ درصد نمونه‌ها اختلاف زیر ۵ درصد است. از طرفی همان‌طور که انتظار می‌رود اثرات تنش‌های پسماند بویژه در محدوده پارامتر لاغری پایین، موثرتر بوده به طوری که اختلاف نتایج آزمون و تحلیل عددی در این محدوده بیشتر شده و بین ۱۰- درصد الی ۱۴٫۵+ درصد قرار می‌گیرد.

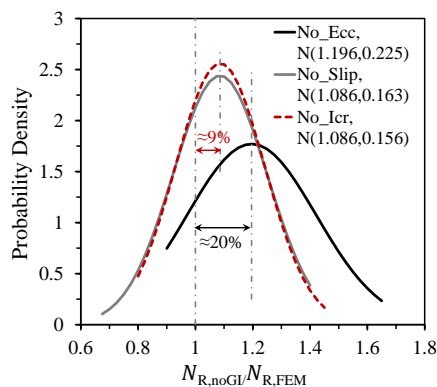


شکل ۸: مقایسه نیروهای محوری نهایی نتایج عددی تحقیق فوق ($N_{R,FEM}$) با نتایج تجربی Kettler و همکاران (N_R)



شکل ۱۰: مقایسه نیروی محوری و تغییر شکل‌ها بین تحلیل عددی و آزمون تجربی Kettler و همکاران: نمونه A2 (راست: نبشی تحت آزمون فشاری، وسط: کمانش نبشی در مدل عددی، چپ: منحنی نیرو-تغییر مکان تحلیل عددی و آزمون تجربی)

مقاومت تحلیل حالت بدون انحنا و نتایج نمونه‌های آزمایشی ناچیز است به علت ناکاملی هندسی بسیار کوچک در انحنا اولیه نمونه آزمایش شده (e_{imp}) است که در مطالعه Kettler و همکاران (۲۰۱۹) صراحتاً به آن اشاره شده است. میانگین مقادیر نسبت نیروهای مدل بدون لحاظ خروج از مرکزیت و نیروهای مدل جامع، ۱٫۲ است که نشان از تأثیر مهم خروج از مرکزیت در پیش‌بینی صحیح نیروهای نهایی است و عدم لحاظ آن منجر به پیش‌بینی مقادیر بالاتری از نیروهای خرابی واقعی می‌شود که قابل انتظار است. مقایسه بین نسبت $N_{R,FEM}$ و $N_{R,noslip}$ نشان می‌دهد، میانگین مقادیر نسبت نیروهای مدل بدون لحاظ لغزش اتصالات و نیروهای مدل جامع، ۱٫۰۹ است، که حاکی از تأثیر به مراتب کمتر این نوع ناکاملی نسبت به ناکاملی‌های خروج از مرکزیت و انحنا اولیه در پیش‌بینی نیروی نهایی است. البته بدیهی است که لحاظ لغزش اتصالات تأثیر بسزایی در پیش‌بینی صحیح تغییر مکان عضو خواهد داشت. جمع‌بندی نتایج فوق در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه توزیع‌های نرمال برازش شده بر اساس مطالعه پارامتریک حساسیت به ناکاملی‌های هندسی

۶-۲- بررسی پارامتریک حساسیت به ناکاملی هندسی

بر اساس مدل اجزای محدود با در نظر گرفتن داده‌های هندسی و مشخصات مصالح، یک مطالعه پارامتریک عددی به منظور بررسی تأثیر عیوب هندسی ناشی از انحنا اولیه، خروج از مرکزیت و لغزش اتصالات بر بارهای نهایی انجام شده است. در این بررسی، ابعاد مقطع و پارامترهای مصالح بدون تغییر باقی مانده‌اند، در حالیکه مدل‌های اجزا محدود دیگری توسعه یافت که سه حالت زیر را پوشش می‌دهند:

- (۱) محاسبات عددی بدون هیچ گونه نقص و انحنا اولیه انجام شد که منجر به بارهای نهایی $N_{R,noicr}$ شد؛
- (۲) محاسبات عددی بدون لحاظ خروج از مرکزیت انجام شد که منجر به بارهای نهایی $N_{R,noecc}$ شد؛
- (۳) محاسبات عددی بدون لحاظ لغزش اتصالات انجام شد که منجر به بارهای نهایی $N_{R,noslip}$ شد.

در بخش قبل نشان داده شد که محاسبات مدل‌سازی بر اساس ناکاملی هندسی ناشی از انحنا اولیه، خروج از مرکزیت و لغزش اتصالات، نتایج مناسبی را ارائه نمود، بنابراین این مدل به عنوان یک مدل و معیار جامع که تمامی ناکاملی‌های هندسی در آن لحاظ شده جهت مقایسه با سایر مدل‌ها استفاده خواهد شد. در این راستا در این بخش، مدل‌سازی اجزا محدود بر اساس سه حالت ذکر شده ($N_{R,noicr}$ و $N_{R,noslip}$ ، $N_{R,noecc}$) انجام شد و با محاسبات مدل جامع ($N_{R,FEM}$) مقایسه گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. نتایج محاسبات و مقایسه بین حالت بدون انحنا اولیه و نیروهای اصلی نهایی نشان می‌دهد که در برخی موارد (مانند A3 و E2) لحاظ این ناکاملی تأثیر بسزایی در پیش‌بینی رفتار خرابی دارد. از طرفی در سایر مواردی که اختلاف بین

جدول ۳ - نتایج مطالعه پارامتریک حساسیت به ناکاملی انحنا اولیه، خروج از مرکزیت و لغزش اتصالات

نمونه آزمون	N_R	$N_{R,FEM}$	$N_{R,noicr}$	$N_{R,noecc}$	$N_{R,noslip}$	$\frac{N_{R,noicr}}{N_{R,FEM}}$	$\frac{N_{R,noecc}}{N_{R,FEM}}$	$\frac{N_{R,noslip}}{N_{R,FEM}}$
	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-
A1	261.1	286.8	287.4	286.9	292.2	1.00	1.00	1.02
A2	238.8	245.8	288.0	257.2	226.1	1.17	1.05	0.92
A3	215.4	183.8	265.8	200.7	166.0	1.45	1.09	0.90
A4	156.8	159.9	156.9	260.5	172.2	0.98	1.63	1.08
A5	117.8	124.3	121.7	191.9	145.4	0.98	1.54	1.17
A6	71.8	78.4	87.9	126.8	108.3	1.12	1.62	1.38
B1	148.0	121.5	117.0	166.2	142.9	0.96	1.37	1.18
B2	86.4	77.5	76.0	90.0	95.8	0.98	1.16	1.23
B3	61.0	58.4	58.2	63.9	72.9	1.00	1.09	1.25
B4	162.9	163.5	151.2	151.2	148.3	0.93	0.93	0.91
B5	132.1	111.4	142.1	150.9	112.7	1.28	1.35	1.01
C1	98.4	98.2	82.6	92.1	66.3	0.84	0.94	0.68
C2	120.9	133.8	147.0	150.8	170.7	1.10	1.13	1.28
C3	66.0	69.3	68.4	77.8	86.4	0.99	1.12	1.25
C4	131.0	125.7	120.9	150.7	147.7	0.96	1.20	1.17
C5	62.6	61.0	60.6	66.6	76.4	0.99	1.09	1.25
D1	260.2	316.2	323.4	319.3	299.2	1.02	1.01	0.95
D2	177.5	177.0	245.2	194.0	160.2	1.39	1.10	0.90
D3	154.8	145.1	151.0	151.1	146.3	1.04	1.04	1.01
D4	73.1	61.8	78.9	87.9	63.6	1.28	1.42	1.03
D5	145.5	151.2	151.1	151.3	194.0	1.00	1.00	1.28
D6	151.0	151.0	150.9	151.2	189.8	1.00	1.00	1.26
D7	148.8	151.3	151.1	151.3	181.4	1.00	1.00	1.20
D8	145.0	151.3	150.8	151.2	175.3	1.00	1.00	1.16
E1	488.4	535.0	656.5	667.8	510.2	1.23	1.25	0.95
E2	357.2	345.3	461.6	519.0	325.6	1.34	1.50	0.94
E3	267.1	240.1	316.0	398.6	230.6	1.32	1.66	0.96

می‌دهد. آزمون‌های تجربی Kettler و همکاران (۲۰۱۹) نیز در شکل جهت مقایسه آورده شده است. شکل فوق هر سه شرایط مرزی BC1 (تکیه‌گاه گیردار) و BC2 (تکیه‌گاه لبه چاقو) و BC3 (تکیه‌گاه مفصلی) را شامل می‌شوند. تحلیل‌های عددی اجزا محدود مطابقت خوبی با آزمایش‌ها نشان می‌دهند. نتایج عددی نشان داده شده در شکل ۸ برای BC3 تطابق با رفتار نظری را برای مقاطع نبشی با تکیه‌گاه کاملاً مفصلی را به خوبی نشان می‌دهد. بدیهی است که تفاوت مقاومت بین BC1 و BC2 نسبت به BC2 و BC3 بیشتر است. به طور کلی در این شکل تأثیر بالای شرایط مرزی مختلف کاملاً مشهود است.

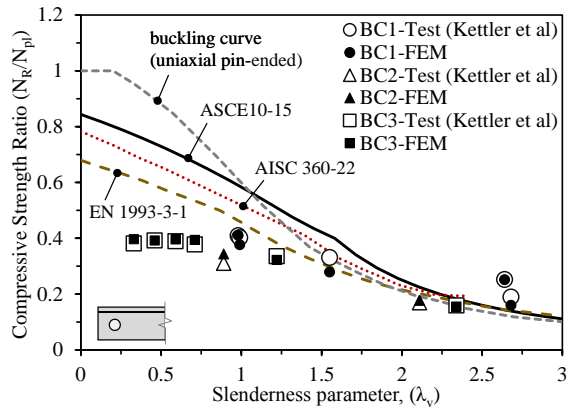
با بررسی نتایج و نمودارهای آیین‌نامه‌های مختلف مشخص می‌شود که ضوابط آیین‌نامه‌ها برای شرایط کاملاً گیردار (BC1)، محافظه کارانه است از طرفی با توجه به اینکه شرایط مرزی تیکه گاهی در اعضا دکل‌های خطوط انتقال نیرو، نه کاملاً گیردار و نه کاملاً مفصلی است، به نظر می‌آید ضوابط آیین‌نامه ASCE10-15 که شرایط میانه‌ای را اتخاذ نموده مناسب‌تر از سایر آیین‌نامه‌ها است. از طرفی باید اشاره نمود که آیین‌نامه ASCE10-15 نسبت به سایر آیین‌نامه‌ها جزئیات بیشتری از شرایط اتصال را (خروج از

در این شکل بر روی هیستوگرام داده‌های هر یک از سه ستون آخر جدول ۳، یک منحنی نرمال برازش شده است. به منظور نمایش و مقایسه هرچه بهتر منحنی‌ها، هیستوگرام داده‌ها حذف شده است. در این شکل، اختلاف میانه و همچنین پراکندگی داده‌های مرتبط با مدل بدون لحاظ خروج از مرکزیت و نیروهای مدل جامع نسبت به ناکاملی‌های دیگر کاملاً مشهود است.

۳-۶- تحلیل رفتار خرابی نبشی‌ها و مقایسه با استانداردهای طراحی

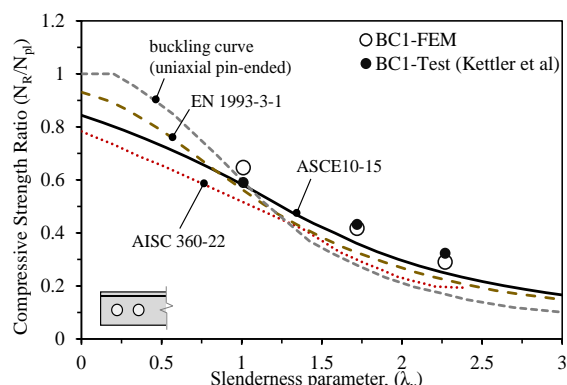
در این بخش نتایج تحلیل عددی تحقیق فوق بر اساس مدل عددی و نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط Kettler (N_R) به همراه منحنی‌های استانداردهای طراحی ارائه خواهد شد. در شکل ۱۲ الی ۱۴ نتایج آزمون و تحلیل عددی با استانداردهای طراحی مربوطه با استفاده از نمودارهای N_R/N_{pi} بر اساس λ_v مقایسه شده است. با توجه به تأثیر شرایط گیرداری اتصالات بر روی ضوابط طراحی و نتایج تجربی و عددی، شکل‌های فوق بر اساس تک پیچه و دو پیچه بودن اتصالات ارائه شده است. شکل ۱۲ نتایج ۱۱ تحلیل عددی را بر روی مقاطع L80x8 با اتصالات دو پیچه نشان

ضروری است که در طراحی اعضا با لاغری کم بویژه در دکل‌های خطوط انتقال نیرو از اتصالات تک پیچه استفاده نمی‌شود. در این خصوص باید توجه داشت عموماً در طراحی دکل‌های انتقال نیرو، اتصالات به گونه‌ای طراحی می‌شوند که ظرفیت آنها از ظرفیت اعضا متصل بیشتر باشد.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج تحلیل عددی L80x8 برای اتصالات تک پیچه با استانداردهای طراحی و آزمون Kettler و همکاران

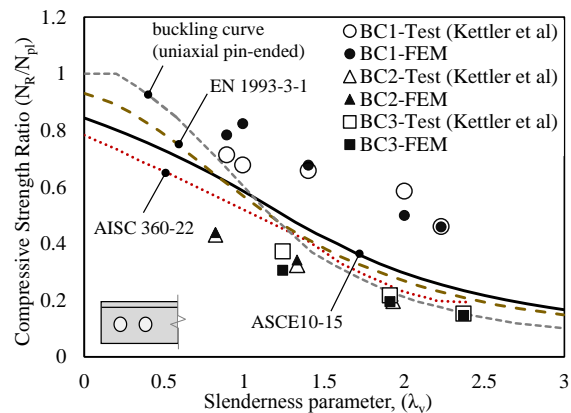
شکل ۱۴ نتایج تحلیل عددی و آزمایش تجربی را بر روی سه مقطع L120x12 با اتصالات دو پیچه را نشان می‌دهد (E1، E2، E3). شرایط مرزی تکیه‌گاهی در این حالت از نوع BC1 (کاملاً گیردار) است. تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمون و محاسبات عددی مشهود است. همچنین می‌توان تأیید کرد که آیین‌نامه‌های طراحی اروپایی (EN 1993-3-1) و همچنین آیین‌نامه‌های طراحی آمریکایی (AISC 360-22 و ASCE10-15) پیش‌بینی‌های محافظه‌کارانه‌تری برای مقاومت کمانش اعضا برای پارامترهای لاغری بالا ارائه می‌دهد.



شکل ۱۴: مقایسه نتایج تحلیل عددی L120x12 برای اتصالات دو پیچه با استانداردهای طراحی و آزمون Kettler و همکاران

لازم به توضیح است با مقایسه نتایج BC1 (تکیه‌گاه گیردار) در شکل ۱۲ و شکل ۱۴ با یکدیگر، مشخص می‌شود که مقاومت

مرکزیت و صلبیت اتصال) به عنوان ورودی جهت طراحی اخذ می‌نماید.



شکل ۱۲: مقایسه نتایج تحلیل عددی L80x8 برای اتصالات دو پیچه با استانداردهای طراحی و آزمون Kettler و همکاران

شکل ۱۳ نتایج ۱۳ آزمایش بر روی مقاطع L80x8 با اتصالات تک پیچه را نشان می‌دهد. مجدداً نتایج آزمایش‌های Kettler و همکاران نیز ارائه شده است. باید توجه داشت که در مطالعه تجربی آقای Kettler و همکاران (۲۰۱۹)، اتصالات پیچ و مهره‌ای آزمونه‌ها به صورت اتصالات پیش‌تنیده اجرا شده است و تنها اتصالات آزمونه D4 با دست محکم شده است. از طرفی رفتار اتصالات پیاده شده در مدل عددی تحقیق فوق، بر مبنای اتصالات اتکایی در دکل‌های خطوط انتقال نیرو بر اساس مطالعات Ungkurapinan و همکاران (۲۰۰۳) می‌باشد. در این خصوص در شکل ۱۰ اثر اتصال پیش‌تنیده پیچه‌ها برای نسبت لاغری بالا تا حدودی قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که اتصالات پیش‌تنیده می‌تواند مقاومت کمانش قطعه را تا حدودی افزایش دهد، اما تأثیر شرایط مرزی مختلف تکیه‌گاهی مهمتر از موضوع پیش‌تنیدگی اتصالات است. با مقایسه نتایج BC2 (تکیه‌گاه لبه چاقو) و BC3 (تکیه‌گاه مفصلی) در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ با یکدیگر، می‌توان تأیید کرد که مقاومت کمانش برای اتصالات تک پیچه و دو پیچه تا حدودی یکسان است اما در اتصالات دو پیچه در شرایط تکیه‌گاهی BC1 (انتهای گیردار) ظرفیت بارگذاری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از طرفی با بررسی نتایج و نمودارهای آیین‌نامه‌های مختلف مشخص می‌شود که برای اعضا با لاغری کم بویژه برای شرایط BC2 (تکیه‌گاه لبه چاقو) و BC3 (تکیه‌گاه مفصلی) در اغلب آیین‌نامه‌ها اختلافات قابل توجهی دیده می‌شود. این موضوع همان طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد ناشی از وقوع حالت خرابی محلی پلاستیک در اتصالات در نمونه‌های تک پیچه با لاغری کم است که موجب شده با وجود بالا بودن ظرفیت عضو نبشی، ظرفیت مجموعه کاهش یابد. البته ذکر این نکته مهم

• بررسی پارامتریک حساسیت به ناکاملی لغزش اتصالات حاکی از تاثیر به مراتب کمتر این نوع ناکاملی نسبت به ناکاملی‌های خروج از مرکزیت در پیش‌بینی نیروی نهایی است. به طوری که نتایج در مطالعه حاضر نشان داد، میانگین نیروهای نهایی نمونه‌های مدل عددی با لحاظ لغزش اتصالات نسبت به نیروهای مدل عددی بدون لحاظ لغزش اتصالات، ۹٪ اختلاف دارد در حالیکه این موضوع در خصوص ناکاملی خروج از مرکزیت حاکی از ۲۰٪ اختلاف است. البته بدیهی است که لحاظ لغزش اتصالات تاثیر بسزایی در پیش‌بینی صحیح تغییر مکان عضو خواهد داشت.

• با بررسی نتایج و نمودارهای آیین‌نامه‌های مختلف مشخص می‌شود که ضوابط آیین‌نامه‌ها برای شرایط کاملا گیردار (BC1)، محافظه کارانه است و مقاومت فشاری نهایی آنها نیز به طور قابل توجهی بالاتر از ضوابط آیین‌نامه‌های فعلی است.

• برای اعضا با لاغری کم بویژه برای شرایط BC2 (تکیه‌گاه لبه چاقو) و BC3 (تکیه‌گاه مفصلی) در اغلب آیین‌نامه‌ها اختلاف قابل توجهی دیده می‌شود. این موضوع ناشی از وقوع حالت خرابی اتصالات در نمونه‌های تک پیچه با لاغری کم است که موجب شده با وجود بالا بودن ظرفیت عضو نبشی، ظرفیت مجموعه کاهش یابد.

۷- مراجع

- AISC 360-22, "Specification for Structural Steel Buildings", ANSI, Chicago, 2022.
- ASCE 10-15, "Design of latticed steel transmission structures, ASCE/SEI 10-15", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2015.
- Asgarian B, Dadras Eslamlou S, E. Zaghi A, Mehr M, "Progressive collapse analysis of power transmission towers", J Constr Steel Res, 2016, 123:31-40.
- Balagopal R, Ramaswamy A, Palani GS, Prasad Rao N, "Simplified bolted connection model for analysis of transmission line towers", 2020, Structures. 27:2114-2125.
- Bathon L, Mueller WH III, Kempner L Jr, "Ultimate load capacity of single steel angles", J Struct Eng (N Y), 1993, 119(1):279-300.
- Bernard ES, Coleman R, Bridge RQ, "Measurement and assessment of geometric imperfections in thin-walled panels" Thin-Walled Struct, 1999, 33(2):103-126.
- Bhilawe JV, "Study of equal angle subjected to compression for bolted end connection", J Inst Eng (India) Ser A, 2018, 99(1):123-132.
- Bruno L, Sassone M, Venuti F, "Effects of the Equivalent Geometric Nodal Imperfections on the stability of single layer grid shells", Eng Struct, 2016, 112:184-199.
- Chan SL, Zhou ZH, Chen WF, Peng JL, Pan AD, "Stability analysis of semirigid steel scaffolding", Eng Struct, 1995, 17(8):568-574.

نهایی برای این نوع شرایط مرزی تکیه‌گاهی متاثر از نوع مقطع است. به طوری که برای نبشی با مقطع $L80 \times 8$ بارهای نهایی بیشتری نسبت به مقطع $L120 \times 12$ با توجه به منحنی‌های آئین نامه‌ای حاصل می‌شود. دلیل این امر استفاده از ضخامت صفحه اتصال یکسان با مقدار $t=25\text{mm}$ برای هر دو نوع مقطع است. بنابراین سختی دورانی حول محور z (سختی خمشی صفحه اتصال) برای هر دو نوع مقطع یکسان بوده و در نتیجه سختی مجموع ناحیه اتصال (صفحه و نبشی) برای نبشی با مقطع $L80 \times 8$ نسبت به مقطع $L120 \times 12$ مطلوب‌تر و شرایط بهتری خواهد داشت.

۷- نتیجه گیری

مدل‌سازی ناکاملی‌های هندسی در این تحقیق و تحلیل‌های عددی انجام شده بر روی نبشی‌های تک فولادی با اتصالات تک پیچه و دو پیچه و مقایسه آن با مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته و ضوابط آیین‌نامه‌ها، نتایج زیر را ارائه می‌کند:

- نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با توجه به لحاظ اثر ناکاملی‌های هندسی (خروج از مرکزیت، لغزش اتصالات و انحنای اولیه)، تطابق خوبی را با نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته در این زمینه نشان داد. به طوری که حداکثر اختلاف بین محاسبات عددی و آزمایش‌ها، بر اساس پارامترهای بی‌بعد N_R/N_{pi} و $N_{R,FEM}/N_{pi}$ ، ۱۴٫۵٪ و در ۷۸ درصد نمونه‌ها اختلاف زیر ۵ درصد ثبت گردید. از طرفی رویکرد فوق بر خلاف پیچیدگی مدل‌سازی‌های پوسته‌ای و سه‌بعدی، ساده بوده و سرعت مدل‌سازی و تحلیل را بهبود می‌بخشد.
- نتایج محاسبات و مقایسه بین حالت بدون انحنا اولیه و نیروهای اصلی نهایی نشان می‌دهد که در برخی موارد لحاظ این ناکاملی تاثیر بسزایی در پیش‌بینی رفتار خرابی دارد. از طرفی در سایر مواردی که اختلاف بین مقاومت تحلیل حالت بدون انحنا و نتایج نمونه‌های آزمایشی ناچیز است به علت ناکاملی هندسی بسیار کوچک در انحنا اولیه نمونه آزمایش شده است.
- لحاظ ناکاملی ناشی از خروج از مرکزیت در نبشی‌های فولادی به علت اتصال از طریق یک بال، تاثیر بسزایی در پیش‌بینی صحیح نیروهای نهایی دارد که ناشی از ایجاد لنگرهای متمرکز و در نتیجه تغییر نیروهای داخلی عضو است. به طوری که نتایج در مطالعه حاضر نشان داد، میانگین نیروهای نهایی نمونه‌های مدل عددی با لحاظ خروج از مرکزیت نسبت به نیروهای مدل عددی بدون لحاظ خروج از مرکزیت، ۲۰٪ اختلاف دارد.

- Transmission Tower in the Type Test", *Scientia Iranica*, 2022; 29(3): 1125-1141.
- Mohammadi Darestani Y, Shafieezadeh A, Cha K, "Effect of modelling complexities on extreme wind hazard performance of steel lattice transmission towers", *Struct Infrastruct Eng: Maint Manage Life-Cycle Des Perform*, 2020, 16(6):898-915.
- Pastor MM, Bonada J, Roure F, Casafont M, "Residual stresses and initial imperfections in non-linear analysis", *Eng Struct*, 2013, 46:493-507.
- Prasad Rao N, Samuel Knight GM, Mohan SJ, Lakshmanan N, "Studies on failure of transmission line towers in testing", *Eng Struct*, 2012, 35:55-70.
- See T, McConnel RE, "Large displacement elastic buckling of space structures", *J Struct Eng (N Y)*, 1986, 112(5):1052-1069.
- Selvaraj S, Madhavan M, "Geometric imperfection measurements and validations on cold-formed steel channels using 3D noncontact laser scanner", *J Struct Eng (N Y)*, 2018, 144(3):04018010.
- Tian L, Guo L, Qu B, "Single-angle compression members with both legs bolted at the ends: Design implications from an experimental study", *J Struct Eng (N Y)*, 2018, 144(9):06018004.
- Tian L, Pan H, Ma R, Zhang L, Liu Z, "Full-scale test and numerical failure analysis of a latticed steel tubular transmission tower", *Eng Struct*, 2020, 208(109919):109919.
- Ungkurapinan N, Chandrakeerthy SRDS, Rajapakse RKN, Yue SB, "Joint slip in steel electric transmission towers", *Eng Struct*, 2003, 25(6):779-788.
- Uriz P, Filippou FC, Mahin SA, "Model for cyclic inelastic buckling of steel braces", *J Struct Eng (N Y)*, 2008, 134(4):619-628.
- Von Karman TH, Dunn LG, Tsien H-S, "The influence of curvature on the buckling characteristics of structures", *J Aeronaut Sci (Inst Aeronaut Sci)*, 1940, 7(7):276-289.
- Wang J, Li H-N, Fu X, Dong Z-Q, Sun Z-G, "Wind fragility assessment and sensitivity analysis for a transmission tower-line system", *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2022, 231(105233):105233.
- Wang J, Li H-N, Fu X, Li Q, "Geometric imperfections and ultimate capacity analysis of a steel lattice transmission tower", *J Constr Steel Res*, 2021, 183(106734):106734.
- Zhang J, Xie Q, "Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load", *J Constr Steel Res*, 2019, 160:271-279.
- Zhou Z, Wu J, Meng S, "Influence of member geometric imperfection on geometrically nonlinear buckling and seismic performance of suspen-dome structures", *Int J Struct Stab Dyn*, 2014, 14(03):1350070.
- Chen X, Shen S-Z, "Complete load-deflection response and initial imperfection analysis of single-layer lattice dome", *Int J Space Struct*, 1993, 8(4):271-278.
- Conde B, Villarino A, Cabaleiro M, Gonzalez-Aguilera D, "Geometrical issues on the structural analysis of transmission electricity towers thanks to laser scanning technology and finite element method", *Remote Sens (Basel)*, 2015, 7(9):11551-11569.
- CSA S16-19, "Design of steel structures" CSA Group, Toronto, 2019.
- Deng HZ, Huang B, "Study on ultimate bearing capacity of main member in transmission tubular tower leg", *Thin-Walled Struct*, 2018, 127:51-61.
- EN 1993-1-6, "Eurocode 3: Design of Steel Structures- Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures", European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
- EN 1993-3-1, "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts", CEN, Brussels, 2006.
- Fu X, Li H-N, "Uncertainty analysis of the strength capacity and failure path for a transmission tower under a wind load", *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2018, 173:147-155.
- Fu X, Li H-N, Li G, "Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads", *Struct Saf*, 2016, 58:1-10.
- Fu X, Wang J, Li H-N, Li J-X, Yang L-D, "Full-scale test and its numerical simulation of a transmission tower under extreme wind loads", *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2019, 190:119-133.
- He S, Jiang Z, Cai J, "Investigation on simulation methods of initial geometric imperfection distribution in elasto-plastic stability analysis of single-layer reticulated shells", *KSCE J Civ Eng*, 2018, 22(4):1193-1202.
- Huseyin K, Mandadi V, "On the imperfection sensitivity of compound branching", *Ing arch*, 1977, 46(4):213-222.
- Jiang W-Q, Liu Y-P, Chan S-L, Wang Z-Q, "Direct analysis of an ultrahigh-voltage lattice transmission tower considering joint effects", *J Struct Eng (N Y)*, 2017, 143(5):04017009.
- JGJ 7, "Technical Specification for Space Frame Structures", China Architecture Industry Press, Beijing, 2010.
- Kettler M, Lichtl G, Unterweger H, "Experimental tests on bolted steel angles in compression with varying end supports", *J Constr Steel Res*, 2019, 155:301-315.
- Kiessling F, Nefzger P, Nolasco JF, Kaintzyk U, "Overhead power lines: Planning, design, construction", 2003rd ed. Berlin, Germany: Springer, 2014.
- Koiter, W.T, "On the stability of elastic equilibrium", National Aeronautics and Space Administration, 1967.
- Lee P-S, McClure G, "Elastoplastic large deformation analysis of a lattice steel tower structure and comparison with full-scale tests", *J Constr Steel Res*, 2007, 63(5):709-717.
- Mahmoudi A, Jafari M. A, Nasrollahzadeh K, "Reliability-Based Approach for Fragility Analysis of Lattice