

مطالعه تجربی اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌های پیوندهای گوی‌سان بر طول کمانش اعضای فشاری سازه‌های شبکه‌ای فضاکار

سیروس غلامپور^۱، شاهرخ مالک^{۲*}

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی قائم شهر

۲- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

maalek@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۱۲

چکیده- تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه مطالعه تجربی اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌های اتصالات پیچی سازه‌های فضاکار بر رفتار اتصالات و پاسخ سازه انجام شده است. در این مطالعه، آثار میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر شرایط سرحدی انتهایی و طول مؤثر کمانش اعضای فشاری به‌طور تجربی مطالعه شده است. بیش از چهل آزمایش بر مدول‌های هرمی شکل متشکل از هشت عضو لوله‌ای با اتصال پیچی از نوع سیستم مرو (MeRo) انجام شده است. این آزمایشها با میزان متفاوت سفت‌شدگی پیچ‌های اتصالات تکرار شده‌اند و حاکی از تأثیر قابل ملاحظه میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر طول مؤثر کمانش و ظرفیت باربری اعضا در نمونه‌های آزمایش بوده‌اند. در این مقاله، ضمن تشریح و تفسیر نتایج آزمایشها، توصیه‌های اجرایی جهت ارتقاء ظرفیت باربری و اعتمادپذیری سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ارائه شده است.

واژگان کلیدی: سازه فضاکار شبکه‌ای، شبکه دولایه، پیونده گوی‌سان، سیستم مرو، میزان سفت‌شدگی پیچ، طول مؤثر کمانش

۱- مقدمه

گنبدهای شبکه‌ای تک لایه با اتصالات نیمه صلب را مورد بررسی قرار داده و یک رابطه ساده جهت پیش بینی بار کمانشی پیشنهاد نمودند.

یامادا^۴ و همکاران [۳] نیز اثر انعطاف پذیری اتصال را به همراه نواقص ساخت و شرایط مختلف بارگذاری بر ظرفیت کمانشی گنبدهای شبکه‌ای تک لایه مورد مطالعه قرار دادند.

تحقیقات کیتی پورنچای^۵ و همکاران [۴] نشان داد که تأثیر لغزش پیچ بر خیز سازه‌های شبکه‌ای نسبتاً زیاد ولی بر

بر اساس مطالعات انجام شده به شرح زیر، ویژگی‌ها و مکانیزم واقعی عملکرد اتصالات سازه‌های فضاکار تأثیر قابل توجهی در پاسخ و رفتار مجموعه سازه خواهند داشت.

نتایج تحقیقات ساکا^۱ و هکی^۲ [۱] نشان داد که بار کمانشی یک سازه فضاکار با اتصالات نیمه صلب بزرگتر از سازه نظیر آن با اتصالات مفصلی است.

کاتو^۳ و همکاران [۲] رفتار کمانشی الاستیک-پلاستیک

4- Yamada
5- Kitipornchai

1- Saka
2- Heki
3- Kato

مقاومت نهایی این سازه‌ها چندان قابل توجه نبوده است. کاتو و همکاران [۵] تأثیرات نیمه‌گیرداری اتصال را بر مقاومت کمانشی گنبدهای شبکه‌ای تک لایه با پلان دایروی و تحت بار قائم مورد مطالعه قرار داده و ضریب لاغری اصلاح شده‌ای پیشنهاد نمودند.

سوادی و ودهیپونگ^۱ و همکاران [۶] با بررسی رفتار یک سیستم اتصالی تحت لنگر خمشی به روش‌های تجربی و تحلیلی نتیجه گرفتند که بارهای کمانشی پیش‌بینی شده اعضا مبتنی بر فرض انتهای مفصلی، معمولاً به‌میزان قابل ملاحظه‌ای محافظه کارانه است.

لوی^۲ و همکاران [۷] از طریق مطالعات آزمایشگاهی نقش پیش‌تندگی اعضا را در شبکه‌های دو لایه مورد بررسی قرار داده و آنرا در افزایش ظرفیت باربری اعضای فشاری مهم ارزیابی نمودند.

چناقلو [۸] با مطالعه تحلیلی اثر انعطاف‌پذیری اتصالات در سازه‌های فضاکار منابع عدم قطعیت‌های مربوط به اتصالات از جمله میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها و تأثیرات آن بر عملکرد سازه را مورد بررسی قرار دادند.

مالک و ابوالحسن فام [۹] به منظور تحلیل غیرخطی سازه‌های فضاکار برنامه‌ای ارائه نمودند که قادر به ملحوظ داشتن آثار انعطاف‌پذیری پیوندها و کمانش اعضا بود.

وائقی و علی بیگی [۱۰] نقش میزان گیرداری اتصالات را در شبکه دو لایه فضاکار مورد بررسی قرار داده و برای در نظر گرفتن آن در مقایسه با اتصالات مفصلی روش‌هایی را جهت تعدیل و اصلاح پیشنهاد نمودند.

فولوپ^۳ و ایوانی^۴ [۱۱] رفتار یک سازه فضاکار را تا مرحله خرابی به روش تجربی مورد مطالعه قرار دادند.

معصومی و مالک [۱۲] مطالعات تحلیلی جدیدی با مدل‌سازی تفصیلی اجزاء محدود و بر مجموعه‌های اعضا و پیوندهای نوع مرو انجام داده و ضریب طول مؤثر اعضا را مورد بررسی قرار دادند.

و بالاخره کاتو و همکاران [۱۳] تحقیقاتی در زمینه تعیین ظرفیت کمانش گنبدهای شبکه‌ای تک لایه ارائه نمودند.

اتصالات درمقایسه با دیگر اجزاء تشکیل دهنده سازه، دارای پیچیدگی‌های هندسی و مکانیکی بیشتری بوده و لذا منابع عدم قطعیت در رفتار اتصالات به مراتب از دیگر اجزاء سازه‌ای قابل ملاحظه‌تر است. دلایل عدم قطعیت در رفتار اتصالات به طور عمده شامل پیچیدگی هندسی، وجود خواص متفاوت برای مصالح مختلف به‌کار رفته در اتصال، وجود سطوح تماس و عدم پیوستگی‌ها، اثرات اندرکنش نیروها، لنگرها، رواداری‌ها در ساخت و نصب و خطاهای انسانی در حین ساخت و برپایی سازه می‌باشند. یکی از مهم‌ترین منابع و دلایل عدم قطعیت در رفتار اتصالات در پیوندهای گوی‌سان سازه‌های فضاکار، میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها می‌باشد. تفاوت در مقادیر نفوذ پیچ‌ها، فقدان فضای مناسب برای آچار جهت سفت کردن کامل بعضی پیچ‌ها، اثرات میزان سفت‌شدگی یک پیچ بر میزان سفت‌شدگی دیگر پیچ‌ها و خطاهای انسانی عواملی هستند که دست به دست هم داده و موجب می‌شوند تا میزان سفت‌شدگی واقعی پیچ‌ها متفاوت باشند. اصولاً در یک سیستم اتصالی مرو به‌علت وجود پیچ‌ها و غلاف‌ها، ناپیوستگی بین اجزای اتصال، قطعی و اجتناب‌ناپذیر بوده و به‌علت وجود شکاف‌ها و پیش‌تندگی‌ها و نیز انتقال فشار به‌وسیله غلاف و انتقال کشش به‌وسیله پیچ، مکانیزم انتقال بار در این نوع اتصال بسیار پیچیده می‌باشد. چون میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر میزان شکاف و مقدار پیش-تندگی اتصال مؤثر است، انتظار می‌رود طبق مطالعات

1- Swaddi wudhipong

2- Levy

3- Fulop

4- Ivanyi

انتهایی اعضای فشاری، طول مؤثر و ظرفیت باربری آنها، انجام آزمایش بر یک عضو با دو گوی در دوانتها نتایج مطلوبی را به همراه نخواهد داشت زیرا ایجاد شرایط تکیه-گاهی منطبق و یا حتی نزدیک به واقعیت برای سازه‌ای که فقط شامل یک عضو و پیوندهای دو سر آن باشد، در آزمایش قابل حصول نخواهد بود. در نتیجه آزمایشات بر مدول‌های هرمی شکلی انجام شد، که مطابق شکل ۱ از چهار عضو لایه تحتانی و چهار عضو جان، که به وسیله پنج پیونده گوی‌سان از نوع پیونده‌های مرو بهم متصل شده بودند، تشکیل شده بودند. در مدول نمونه فاصله مرکز تا مرکز گوی‌های دو سر کلیه اعضا از یکدیگر ۱۴۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود. مدول‌هایی با اعضای به قطر ۲، ۳ و ۵ تا ۱/۵ اینچ و میزان سفت‌شدگی متفاوت پیچ‌ها به میزان ۴۰Nm، ۱۰۰Nm، ۱۶۰Nm و ۲۰۰Nm و در هر حالت بین ۳ تا ۵ نمونه مورد آزمایش قرار داده شدند. در نتیجه جمعاً بیش از ۴۰ آزمایش تا مرحله بروز کماتش بر مدول‌های مزبور انجام گردید.

۳- شرح انجام آزمایش

با توجه به نیت اصلی از مطالعات، در جهت بررسی تغییرات بار کماتش اعضا در حالات متفاوت پیش‌تیندگی پیچ‌های اتصال، در این آزمایش‌ها، مدول‌ها تحت تأثیر بار قائم متمرکز اعمال شونده بر گوی فوقانی میانی قرار گرفته و توسط تغییر مکان سنج مقدار تغییر مکان گوی فوقانی اندازه‌گیری شد و در نهایت مقدار نیروهای وارده بر مدول و تغییر مکان‌های نظیر آنها بوسیله دستگاه گردآورنده داده‌ها ثبت گردید. ابتدا مدول‌ها از لوله‌هایی به قطر ۳ اینچ مطابق روش معمول کارخانه سازنده ساخته و مورد آزمایش قرار داده شدند. در این آزمایش‌ها قبل از بروز کماتش در اعضای فشاری، جوش بین لوله‌ها و قطعات مخروطی

چنانقلو [۸] میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار اتصال و در نتیجه بر پاسخ و رفتار کلی سازه تأثیرگذار باشد. به‌طور کلی مطالعه اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار سازه‌های فضاکار با سیستم اتصالی مرو می‌تواند با دو رویکرد متفاوت انجام گیرد:

- آثار میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر اتصالات و در نتیجه بر رفتار سازه
 - اثر مستقیم میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار سازه
- در رویکرد اول، خود اتصال تحت مطالعه قرار گرفته و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بر پیونده مجزا رفتار آن با در نظر گرفتن میزان سفت‌شدگی مختلف پیچ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه رفتار سازه با در نظر گرفتن این اثرات تعیین می‌گردد. در رویکرد دوم، که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته، رفتار سازه مستقیماً تحت تأثیر میزان سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌ها مورد مطالعه قرار داده می‌شود.

از آنجا که تعیین اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار یک سازه بسیار پیچیده بوده و با استفاده از یک رویکرد صرفاً تئوریک به هیچ‌وجه قابل انجام نیست و از طرفی مدل‌های با مقیاس‌های کوچک از یک سازه فضاکار نیز نمی‌توانند رفتار چنین سازه‌هایی را در موقعیت واقعی بهره‌برداری به درستی ارائه نمایند، در این تحقیق برای دستیابی به یک درک دقیق از تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر طول کماتش اعضای فشاری سازه‌های فضاکار، یک مجموعه آزمایش بر تعداد زیادی مدول هشت عضوی هرمی شکل مربع‌القاعده با پیونده‌های گوی‌سان مرو و با میزان سفت‌شدگی‌های مختلف پیچ‌ها انجام شد و نتایج تجربی با نتایج محاسباتی مقایسه گردید.

۲- مدول‌های مورد آزمایش

برای برآورد تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر شرایط

و قبل از اعمال بار خارجی، آزمایشاتی نیز بر مدول‌ها انجام گردید که طی آنها با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در یک مدول بدون اعمال بار خارجی، کرنش قابل‌اعتنایی در کرنش سنج‌های الصاق شده بر میانه اعضای مدول مجزا ثبت نگردید. این امر نشان دهنده آن است که:

(الف) اختلاف طول اولیه اعضا و آثار نامیزانی ناشی از رواداری‌های ساخت در تک مدول‌های آزمایش‌ناپذیر بوده است.
(ب) سفت‌شدگی پیچ‌ها به یک میزان برای تمام اتصالات اگرچه باعث ایجاد آثار ناشی از پیش‌تندگی در پیچ‌ها و غلاف‌ها می‌گردد، اما صرفنظر از آثار موضعی، هیچگونه پیش‌تندگی در اعضای مدول مستقل بوجود نمی‌آورد. یادآوری این نکته از این جهت حائز اهمیت می‌باشد که در واقع هرگونه تغییر در ظرفیت باربری کمانش مدول‌ها در نتیجه سفت‌شدگی پیچ‌ها صرفاً ناشی از تغییر طول موثر کمانش است، نه پیش‌تندگی اعضا.



شکل (۱) مدول هرمی هشت‌عضوی مورد آزمایش



شکل (۲) گسیختگی جوش لوله و قطعه مخروطی انتهایی در آزمایش‌های اولیه

انتهایی مطابق شکل ۲ گسیخته شدند. متعاقباً مدول‌هایی با اعضای لوله‌ای با قطرهای ۲ و ۱/۵ اینچ به همراه اجزا و متعلقات متناسب با آن، با اعمال روش‌های کنترل کیفیت جوشکاری، از کارخانه سازنده درخواست و تهیه شد. سپس آزمایش‌ها ابتدا با لوله‌های به قطر ۲ اینچ و با میزان سفت‌شدگی متفاوت پیچ‌ها (۴۰Nm، ۱۰۰Nm، ۱۶۰ Nm و ۲۰۰Nm) و به ازای هر سفت‌شدگی بر حسب مورد بین سه تا پنج بار برای هر حالت تکرار گردید. در این آزمایش‌ها بارگذاری به‌طور تدریجی اعمال شد و تا مرحله بروز کمانش در حداقل یکی از اعضای فشاری ادامه یافت.

شکل ۳ نمونه‌ای از نحوه وقوع کمانش در مدول‌ها و شکل ۴ وضعیت تغییرشکل یافته یکی از غلاف‌ها را تحت اثر این آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در ادامه کلیه مراحل آزمایش فوق‌عیناً برای مدول‌های ساخته شده از لوله‌های ۱/۵ اینچی تکرار و نتایج آن ثبت گردید.

حال مدول استقرار یافته به‌صورت ساده بر چهار تکیه‌گاه تحتانی را مطابق شکل ۱ در نظر می‌گیریم. لازم است به این نکته اشاره شود که براساس مفاهیم نظری، مدول مورد بحث قبل از اعمال بار خارجی و پس از اعمال پیش‌تندگی به میزان یکسان در تمامی اتصالات، در حالیکه به جز مؤلفه‌های در امتداد قائم تکیه‌گاه‌های زیر سری چهار-گره تحتانی، و مؤلفه‌های افقی حداقل صرفاً به قصد جلوگیری از جابجایی به‌صورت جسم آزاد فاقد هرگونه قیود تکیه‌گاهی دیگر باشد، سیستمی خود متعادل کننده می‌باشد. به این ترتیب، در صورتیکه از میان اعضا، در حوالی وسط ارتفاع مدول، برشی افقی در نظر گرفته و دیگرام آزاد بخش فوقانی را مورد توجه قرار دهیم، مادامی که نیرویی خارجی بر گره فوقانی اعمال نگردد، در اعضا نیز نیرویی ایجاد نمی‌گردد. به منظور بررسی صحت‌سنجی این امر در نمونه‌های آزمایش پس از پیش‌تندگی اتصالات

طور تصادفی انتخاب شده بودند، کمتر از ظرفیت باربری خود اعضا بوده و رفع این نقیصه در طرح و ساخت قطعات و اجزای اتصال ضروری می‌باشد.

۴-۲- مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ

در ادامه کار نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها با مقادیر متفاوت سفت‌شدگی پیچ‌ها به میزان 40 Nm ، 100 Nm و 160 Nm با موفقیت انجام شد که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ ارائه شده است. با افزایش میزان سفت‌شدگی به 200 Nm و متعاقباً با اعمال بار خارجی، در اثر ترکیب آثار ناشی از بارگذاری خارجی و پیش‌تنیدگی موضعی، غلاف‌ها به حالت خمیری درآمده، جوش‌ها گسیخته شده و لذا اعضای فشاری مدول به مرحله کمانش نرسیدند (شکل ۹). نتایج کلی حاصل از مجموعه آزمایش‌های انجام شده بر مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ جهت مقایسه در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد:

- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از 40 Nm به 100 Nm و از 100 Nm به 160 Nm میانگین شیب نمودارها اندکی افزایش نشان می‌دهد. به عبارت دیگر صلبیت مدول‌ها به میزان نسبتاً اندکی افزایش یافته است.
- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از 40 Nm به 100 Nm و از 100 Nm به 160 Nm ظرفیت باربری مدول‌ها افزایش نشان می‌دهد. به بیان دیگر طول موثر کمانش اعضای فشاری کاهش یافته است.
- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از 160 Nm به 200 Nm مقاومت غلاف‌ها و جوش‌ها به میزانی نبوده است تا نمونه آزمایش ترکیب آثار ناشی از پیش‌تنیدگی موضعی به این میزان را با بارگذاری خارجی تا مرحله کمانش اعضا



شکل (۳) نمونه‌ای از نحوه وقوع کمانش در مدول‌های مورد آزمایش

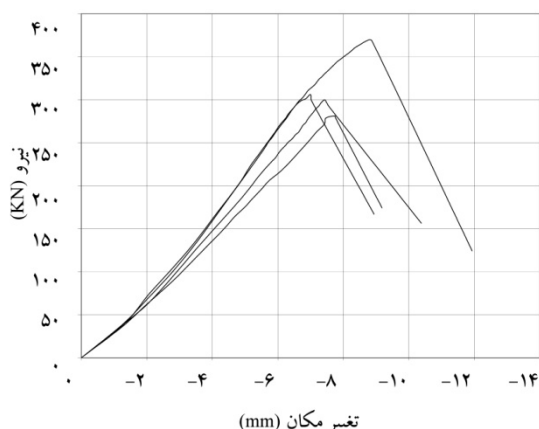


شکل (۴) نمایی از یک غلاف تغییرشکل یافته

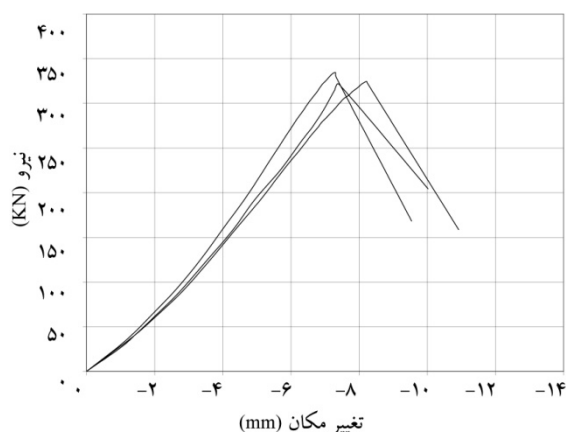
۴- نتایج تجربی آزمایش‌ها

۴-۱- مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۳ اینچ

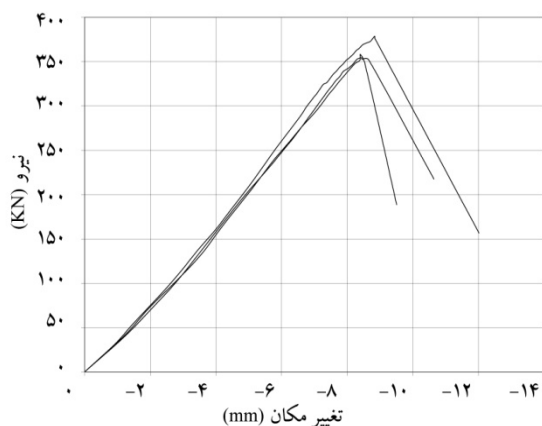
همانطور که در شرح انجام آزمایش‌ها آمده است، در مرحله اول مدول‌هایی با اعضای لوله‌ای به قطر ۳ اینچ مورد آزمایش قرار داده شدند. در تمامی این آزمایشات قبل از آنکه اعضای فشاری دچار کمانش شوند، جوش بین لوله‌ها و قطعات مخروطی انتهایی گسیخته شد. به‌عنوان نمونه نمودارهای نیرو- تغییر مکان مدول‌های حاصل از دو آزمایش از این مجموعه آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه گردیده‌اند. نتیجه‌ای که از این مجموعه آزمایش‌ها حاصل گردید حاکی از آن بود که ظرفیت باربری جوش در اتصالات لوله به مخروطی انتهایی در اعضای که از خط تولید اعضای کارخانه سازنده بدون تمهیدات خاصی و به-



شکل (۶) نمودارهای نیرو-تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با سفت‌شدگی ۴۰ Nm



شکل (۷) نمودارهای نیرو-تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با سفت‌شدگی ۱۰۰ Nm



شکل (۸) نمودارهای نیرو-تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با سفت‌شدگی ۱۶۰ Nm

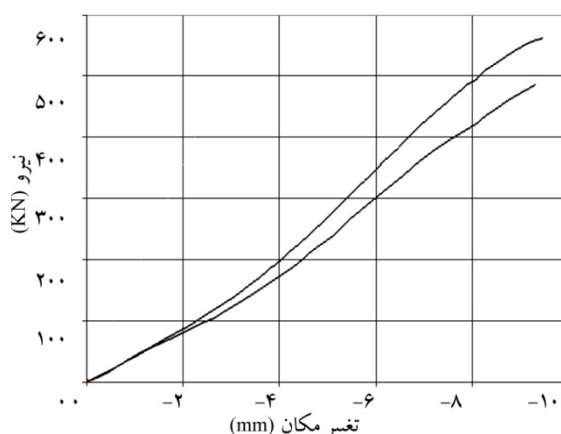
قطری جان بدون تغییر شکل خمیری قابل ملاحظه در غلاف و متعاقباً گسیختگی جوش مدول تحمل نماید.

۳-۴- مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۱/۵ اینچ

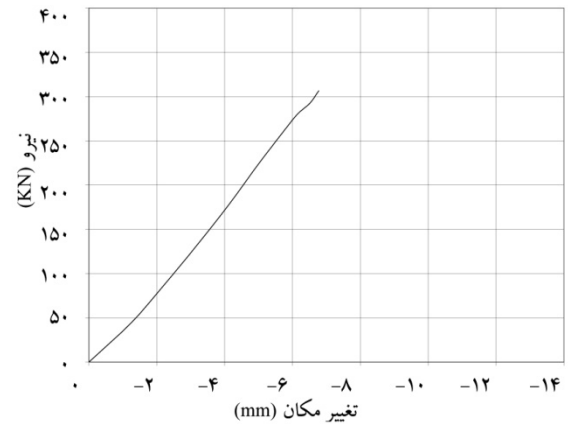
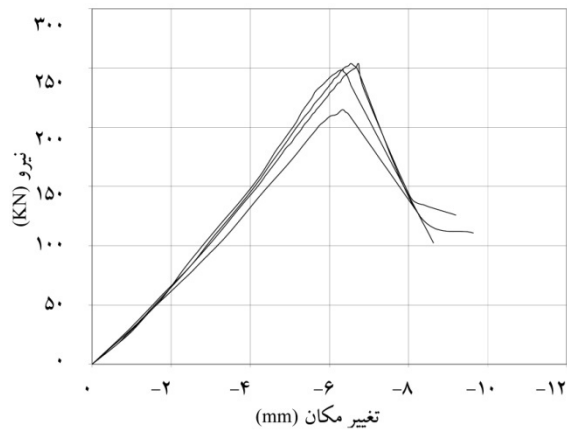
نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد بر مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۱/۵ اینچ به ازای مقادیر متفاوت سفت‌شدگی پیچ‌ها از قرار ۴۰Nm، ۱۰۰Nm، ۱۶۰ Nm و ۲۰۰Nm به ترتیب در شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ و نتایج کلی حاصل از این آزمایش‌ها جهت مقایسه در شکل ۱۵ ارائه گردیده‌اند.

موارد زیر از بررسی نمودارهای اخیرالذکر قابل استنتاج است:

- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۴۰Nm به ۱۰۰Nm و از ۱۰۰Nm به ۱۶۰ Nm میانگین شیب نمودارها اندکی افزایش و به بیان دیگر صلبیت مدول‌ها افزایش یافته است.
- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۴۰Nm به ۱۰۰Nm و از ۱۰۰Nm به ۱۶۰ Nm ظرفیت باربری مدول‌ها افزایش و به عبارت دیگر طول موثر کمانش اعضای فشاری کاهش یافته است.
- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۱۶۰ Nm به ۲۰۰Nm شیب نمودار اندکی کاهش و به بیان دیگر صلبیت مدول‌ها اندکی کاهش نشان می‌دهد.

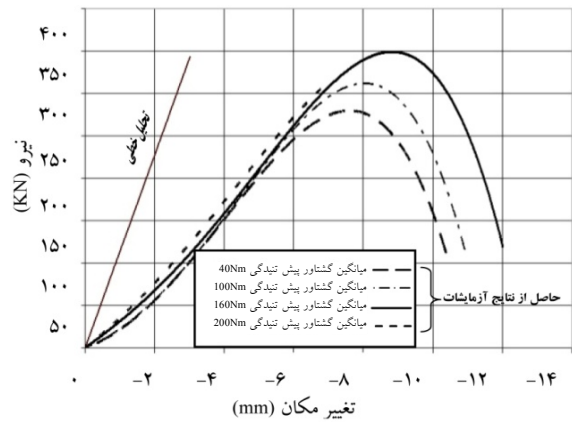
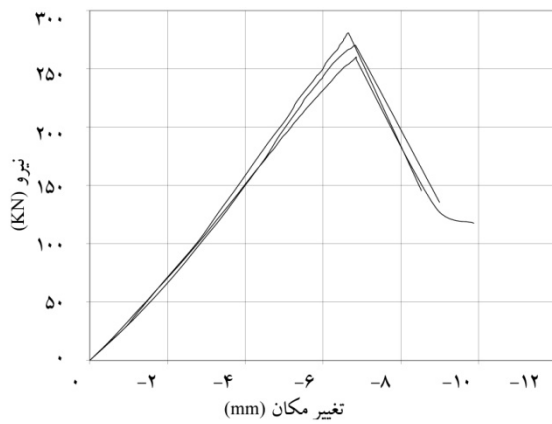


شکل (۵) نمودارهای نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش دو نمونه از مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۳ اینچ



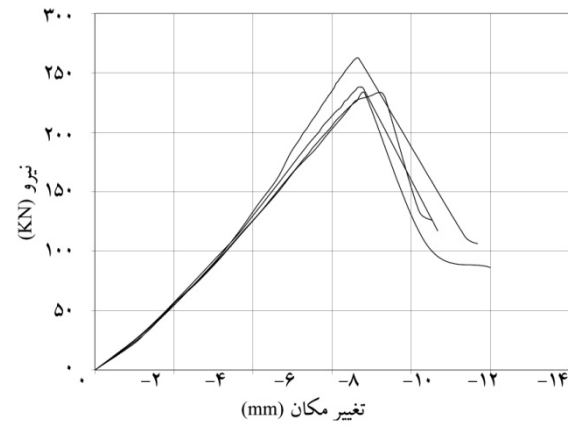
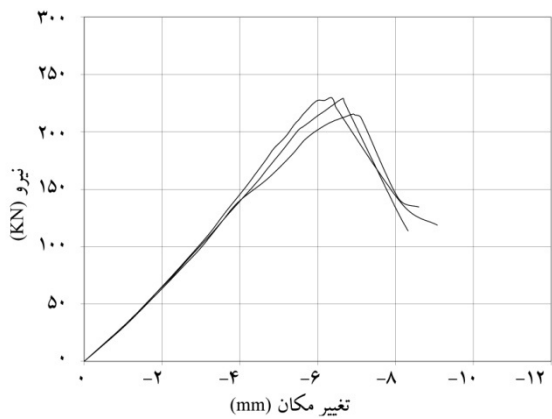
شکل (۹) نمودار نیرو- تغییر مکان مدول با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با سفت‌شدگی ۲۰۰ Nm

شکل (۱۰) نمودارهای نیرو- تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با سفت‌شدگی ۴۰ Nm



شکل (۱۱) نمودار نیرو- تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با میزان سفت‌شدگی ۱۰۰ Nm

شکل (۱۲) نمودارهای نیرو- تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با میزان سفت‌شدگی ۱۶۰ Nm



شکل (۱۳) نمودار نیرو- تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با میزان سفت‌شدگی ۲۰۰ Nm

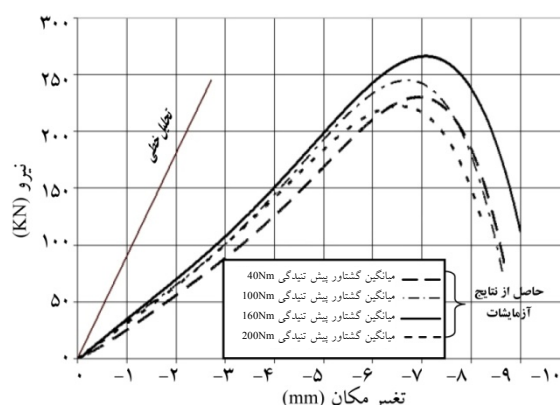
شکل (۱۴) نمودار نیرو- تغییر مکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۲ اینچ و با میزان سفت‌شدگی ۲۰۰ Nm

بارگذاری غیرخطی بوده است و شیب اولیه قدری کوچک-تر از شیب ثانویه در مرحله افزایش بار مشاهده گردیده است. به نظر می‌رسد این پاسخ غیرخطی از رفتار غیرخطی اتصالات و تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های موضعی و ناکاملی‌های اولیه اعضای نمونه‌ها ناشی گردیده باشد.

• ظرفیت باربری جوش در اتصالات اعضای لوله‌ای به قطعات مخروطی انتهایی در برخی موارد از ظرفیت باربری فشاری اعضای مدول‌های مورد بحث کوچک‌تر بوده است که با توجه به آنکه اعضای آزمایش شده از روش‌های متداول ساخت در کارخانه سازنده اختیار گردیده‌اند، رفع این نقیصه در روند طرح و ساخت قطعات و اجزای اتصال این گونه سازه‌ها ضروری می‌باشد.

۵- نتایج مطالعات تحلیلی

همانطوری که قبلاً اشاره شد مدول‌های موردنظر با سفت-شدگی‌های مختلف پیچ‌ها بصورت تجربی تا مرحله کماتش عضو فشاری تحت بارگذاری در گره میانی فوقانی قرار گرفته و پاسخ تغییرمکان گره فوقانی و ظرفیت باربری مدول اندازه‌گیری شده است. در این بخش این مدول‌ها به روش تحلیلی مورد بررسی قرار داده شده و پاسخ‌های تحلیلی تغییرمکان‌ها با دو فرض اتصالات مفصلی و اتصالات صلب با پاسخ‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۱۰ و ۱۵ به ترتیب نمودارهای نیرو- تغییرمکان تجربی و تحلیلی مربوط به مدول‌های با لوله‌های به قطر ۲ اینچ و ۱/۵ اینچ را ارائه می‌نمایند. یکی از نتایجی که از مشاهده نمودارهای فوق حاصل می‌شود این است که شیب نمودارها به روش تحلیلی با دو فرض اتصالات مفصلی و صلب تقریباً یکسان بوده اما از شیب نمودارهای تجربی به ازای کلیه مقادیر سفت‌شدگی پیچ‌ها بیشتر است. به عبارت دیگر صلبیت واقعی بدست آمده



شکل (۱۵) نمودارهای نیرو- تغییرمکان مدول‌های با اعضای لوله‌ای به قطر ۱/۵ اینچ

• با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۱۶۰ Nm به ۲۰۰ Nm ظرفیت باربری مدول‌ها به دلیل تغییرشکل قابل ملاحظه موضعی در اتصالات کاهش یافته است.

۴-۴- نتایج کلی آزمایش‌ها

پس از مطالعه و بررسی کلیه نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر مدول‌های با اعضای به قطرهای ۳، ۲ و ۱/۵ اینچ می‌توان نتیجه گرفت:

- افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب (در حدود ۱۶۰ Nm برای مدول‌های مورد بحث) صلبیت مدول را افزایش داده، اما افزایش سفت‌شدگی بیش از این حد در پیچ‌ها با توجه به خواص رفتاری غلاف‌ها، جوش و ادوات اتصال در مجموعه نمونه‌های آزمایش شده موجب کاهش صلبیت مدول گردیده است.
- افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب (در حدود ۱۶۰ Nm برای مدول‌های مورد بحث) موجب کاهش طول موثر کماتش اعضای فشاری و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری مدول‌ها گردیده، اما سفت‌شدگی بیش از این حد در پیچ‌ها، با توجه به ویژگی‌های رفتاری اتصال، موجب کاهش ظرفیت باربری مدول‌ها شده است.
- منحنی کلیه نمودارهای نیرو- تغییرمکان در مراحل اولیه

- محاسبه ظرفیت باربری اعضای لوله‌ای ۱/۵ اینچی:

$$A = 384 \text{ mm}^2, I = 10/26 \times 10^4, r = 16/3 \text{ mm},$$

$$L = 1410 \text{ mm}, F_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1 \times 1410}{16/3} = 86/5$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 (2/1 \times 10^5)}{(86/5)^2} = 277/0 \text{ MPa}$$

$$\lambda_C = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} = 1/14 < 1/5$$

$$F_{Cr} = (0/658 \lambda_C^2) F_y = (0/658 (1/14)^2) \times 360$$

$$= 208/9 \text{ MPa}$$

$$\phi_C \cdot F_{Cr} = 0/85 \times 208/9 = 177/5 \text{ MPa}$$

$$P_u = \phi_C \cdot P_n = \phi_C \cdot F_{Cr} \cdot A = 177/5 \times 384$$

$$= 68/2 \times 10^3 \text{ N} = 68/2 \text{ kN}$$

مطابق محاسبات انجام شده ظرفیت باربری اعضای ۲

اینچی در حدود ۱۰۳/۸ کیلونیوتن می‌باشد در حالیکه میانگین

ظرفیت باربری تجربی به ازای سفت‌شدگی‌های ۴۰ Nm،

۱۰۰ Nm و ۱۶۰ Nm به ترتیب معادل ۱۰۴ kN، ۱۱۵ kN و

۱۲۷ kN بدست آمده است. همچنین ظرفیت باربری

محاسباتی اعضای ۱/۵ اینچی در حدود ۶۷/۲ کیلونیوتن

می‌باشد در حالیکه میانگین ظرفیت تجربی به ازای سفت-

شدگی‌های ۴۰ Nm، ۱۰۰ Nm، ۱۶۰ Nm و ۲۰۰ Nm به ترتیب

معادل ۸۱ kN، ۸۸ kN، ۹۴ kN و ۷۹ kN بدست آمده است.

برای توجیه اختلاف بین مقادیر ظرفیت‌های باربری

محاسباتی و تجربی، از طرفی با توجه به منابع عدم قطعیت

موجود در ساخت اعضا و اجزای بکار رفته در سازه و نیز

عدم قطعیت‌های ناشی از خطاهای انسانی در اجرا و از

طرفی دیگر فرضیات ساده‌کننده‌ای که در محاسبات در نظر

گرفته می‌شود توضیحات زیر ضروری به نظر می‌رسد:

در محاسبه ظرفیت باربری اعضای فشاری به شرح

فوق، شرایط تکیه‌گاهی این اعضا دو سر مفصل بدون

جابجایی نسبی و طول آنها فاصله مرکز تا مرکز گوی‌ها در

نظر گرفته شده و مشخصات هندسی مقطع لوله (مساحت و

برای مدول‌ها به روش تجربی حتی با مناسب‌ترین میزان

سفت‌شدگی پیچ‌ها از صلیب بدست آمده به روش‌های

تحلیلی کوچک‌تر است. اما همانطور که قبلاً اشاره شد،

هدف اصلی از آزمایش‌های انجام شده بر مدول‌ها تعیین

ظرفیت باربری مدول‌ها و در نتیجه تعیین ظرفیت باربری

یک عضو فشاری مدول به ازای سفت‌شدگی‌های مختلف

پیچ‌ها بوده است تا بتوان ضمن مقایسه آنها با یکدیگر آن را

با ظرفیت باربری محاسباتی نیز مقایسه نمود. لذا میانگین

ظرفیت باربری نهایی حاصل از چند آزمایش برای مدول-

های با میزان سفت‌شدگی مشخص پیچ، به عنوان میانگین

ظرفیت باربری تجربی در نظر گرفته شده است. با توجه به

ویژگی‌های هندسی مدول و نحوه بارگذاری، ظرفیت

باربری هر عضو فشاری تقریباً معادل ۳۵٪ ظرفیت باربری

مدول محاسبه می‌گردد.

برای تعیین ظرفیت باربری محاسباتی اعضای فشاری از

روش ضرایب بار و مقاومت [۱۴] با فرض ضریب طول

مؤثر، K، برابر با واحد (فرض متداول در دفاتر محاسبات

فنی سازه‌های فضاکار) به شرح زیر استفاده شده است:

- محاسبه ظرفیت باربری اعضای لوله‌ای ۲ اینچی:

$$A = 480 \text{ mm}^2, I = 19/98 \times 10^4 \text{ mm}^4, r = 20/4 \text{ mm},$$

$$L = 1410 \text{ mm}, F_y = 360 \text{ MPa}$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1 \times 1410}{20/4} = 69$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 (2/1 \times 10^5)}{(69)^2} = 435/3 \text{ MPa}$$

$$\lambda_C = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} = 0/91 < 1/5$$

$$F_{Cr} = (0/658 \lambda_C^2) F_y = (0/658 (0/91)^2) \times 360$$

$$= 25/45 \text{ MPa}$$

$$\phi_C \cdot F_{Cr} = 0/85 \times 254/5 = 216/3 \text{ MPa}$$

$$P_u = \phi_C \cdot P_n = \phi_C \cdot F_{Cr} \cdot A = 216/3 \times 480$$

$$= 103/8 \times 10^3 \text{ N} = 103/8 \text{ kN}$$

شعاع ژیراسیون) بعنوان مشخصات هندسی مقطع عضو منظور می‌گردد. ضمناً نیروی فشاری وارد بر اعضا کاملاً مرکزی و اعضا کاملاً مستقیم و بدون انحنا و نابجایی اولیه فرض شده‌اند. دو فرض از مفروضات فوق به شرح زیر در جهت تخمین محافظه‌کارانه ظرفیت عضو و به معنی تخمین ظرفیتی کوچک‌تر از ظرفیت واقعی آن خواهند بود:

- اتصالات کاملاً مفصلی و در نتیجه ضریب طول کمانش برابر با یک فرض شده که با توجه به اینکه اتصال مفصلی ایده‌آل وجود ندارد، ضریب طول کمانش عضو بدون تغییر مکان نسبی جانبی دو انتهای آن در واقع کوچک‌تر از یک می‌باشد.

- طول عضو برابر فاصله مرکز تا مرکز گوی‌ها یعنی ۱۴۱cm فرض شده که این فرض نیز با توجه به ابعاد واقعی و صلب بودن گوی‌ها منتج به تخمین کمتر از واقعیت ظرفیت می‌گردد.

اما دیگر فرضیات به شرح زیر موجب تخمین ظرفیت محاسباتی به میزانی افزون بر ظرفیت واقعی اعضای فشاری گردیده‌اند:

- جابجایی نسبی جانبی دو سر عضو اگرچه در مورد مدول مورد بحث عملاً ناچیز است، اما می‌تواند موجب افزایش ضریب طول موثر کمانش و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری عضو فشاری گردد. لذا صرف نظر کردن از آن در جهت تخمین ظرفیت افزون بر ظرفیت واقعی خواهد بود.

- میزان انحنای اولیه اعضا (نابجایی‌های یا ناکاملی‌های اولیه)، خروج از مرکزیت‌های بار و تنش‌های پس ماند نیز می‌توانند در تخمین ظرفیت باربری عضو تأثیرگذار باشند. لازم به یادآوری است که اندازه‌گیری میزان ناکاملی یا نابجایی اعضا قبل از آزمایش و برداشت‌های کرنش سنج‌ها پس از سفت کردن پیچ‌ها و قبل از اعمال بار خارجی نشان دهنده ارضاء میزان رواداری مجاز در طول و انحنای اعضا در مدول‌های آزمایش شده بوده‌اند.

از سوی دیگر، اختلاف بین ظرفیت‌های محاسباتی و تجربی در مدول‌هایی که با اعضای ۲ اینچی ساخته شده‌اند در مقایسه با مدول‌های با اعضای ۱/۵ اینچی بیشتر بوده است که دلیل آن نامتناسب بودن مشخصات گوی‌ها، پیچ‌ها و غلاف‌ها در مقایسه با مشخصات لوله‌های تشکیل دهنده مدول‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر چون گوی‌ها، پیچ‌ها و غلاف‌های بکار رفته برای اعضای ۲ اینچی و ۱/۵ اینچی یکسان بوده‌اند، لذا اعضای با لوله‌های ۲ اینچی نسبت به اعضای ۱/۵ اینچی دارای شرایط تکیه‌گاهی متفاوت و میزان پاره‌گیرداری نسبی ضعیف‌تری بوده‌اند و این امر بر طول کمانش و در نتیجه ظرفیت باربری اعضا تأثیر گذار بوده است.

با صرف نظر کردن از موارد فوق، تفاوت بین ظرفیت‌های باربری محاسباتی و تجربی بر حسب ضریب طول موثر کمانش (K) به شرح زیر بیان می‌گردد.

با محاسباتی نظیر آنچه که به ازای ضریب طول موثر برابر با واحد (K=۱) انجام شد، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- محاسبه ظرفیت باربری اعضای لوله‌ای ۲ اینچی:

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی ۴۰Nm:

$$K = 1 \Rightarrow P_u = 103/8 \text{ KN}$$

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی ۱۰۰ Nm:

$$K = 0/84 \Rightarrow P_u = 115 \text{ KN}$$

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی ۱۶۰ Nm:

$$K = 0/65 \Rightarrow P_u = 127 \text{ ton}$$

بنابراین ضریب طول موثر کمانش معادل (K_e)، که به ازای آن با روش محاسباتی همان ظرفیت باربری تجربی عضو در حالت سفت‌شدگی پیچ‌ها به میزان ۴۰Nm (یعنی ۱۰۴ کیلونیوتن) حاصل می‌شود، عبارتست از: K_e = ۱.

و به همین ترتیب ضریب طول کمانش معادل برای میزان سفت‌شدگی‌های ۱۰۰Nm و ۱۶۰Nm به ترتیب K_e = ۰/۸۴ و K_e = ۰/۶۵ بدست می‌آید. این نتایج جهت

مقایسه در شکل (۱۶- الف) آمده است.

• محاسبه ظرفیت باربری اعضای لوله‌ای ۱/۵ اینچی:

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی 40 Nm :

$$K = 0/83 \Rightarrow P_u = 81 \text{ KN}$$

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی 100 Nm :

$$K = 0/73 \Rightarrow P_u = 88 \text{ KN}$$

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی 160 Nm :

$$K = 0/65 \Rightarrow P_u = 94 \text{ KN}$$

معادل ظرفیت تجربی با سفت‌شدگی 200 Nm :

$$K = 0/85 \Rightarrow P_u = 79/3 \text{ ton}$$

بنابراین ضریب طول مؤثر کماتش معادل (K_e)، که به ازای آن با روش محاسباتی همان ظرفیت باربری تجربی در حالت سفت‌شدگی 40 Nm (یعنی 81 کیلونیوتن) حاصل می‌گردد، عبارت است از: $K_e = 0/83$.

و به همین ترتیب ضریب طول کماتش معادل برای سفت‌شدگی‌های 100 Nm ، 160 Nm و 200 Nm به ترتیب $K_e = 0/73$ ، $K_e = 0/65$ و $K_e = 0/85$ بدست می‌آید. این نتایج جهت مقایسه در شکل (۱۶- ب) آمده است.

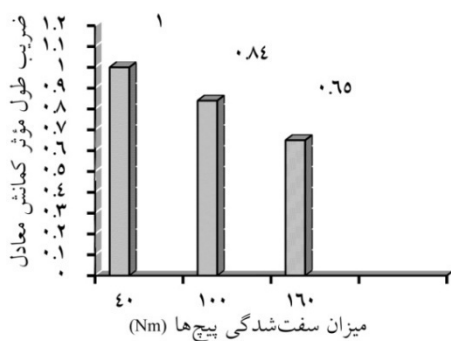
همانطوری که در شکل ۱۶- ب مشاهده می‌گردد، در مورد مدول‌های با اعضای به قطر ۱/۵ اینچ، با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب 160 Nm ، ضریب طول مؤثر کماتش کاهش و در نتیجه ظرفیت باربری عضو افزایش یافته اما با سفت‌شدگی بیش از حد در اثر تغییر شکل خمیری غلاف و کاهش میزان پاره‌گیرداری اتصال ضریب طول مؤثر معادل افزایش یافته است.

۶- نتیجه گیری

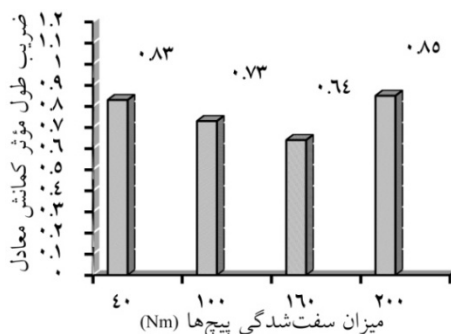
نتایج حاصل از مطالعات تجربی و تحلیلی انجام شده در مورد مدول‌های منتخب از شبکه‌های فضاکار دو لایه را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد. لازم است این نکته مورد

تأکید قرار داده شود که با توجه به تعداد آزمایش‌های انجام شده و همچنین ویژگی‌های شبکه‌های مورد مطالعه، که حیطه محدودی از ابعاد هندسی و مشخصات مقاطع اعضا و پیوندها را در سیستم مورد مطالعه در بر گرفته است، نتایج زیر نیز صرفاً در همین چارچوب قابل ارائه بوده و در تعمیم آن به سایر شبکه‌های فضاکار با ویژگی‌های متفاوت باید جانب احتیاط را رعایت نمود.

• افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب، متناسب با مشخصه‌های اتصال، صلبیت مدول را اندکی افزایش داده اما ادامه افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حدی که منجر به بروز تغییر شکل‌های خمیری ادوات اتصال، خرابی‌های موضعی و یا شکست جوش گردد، موجب کاهش صلبیت مدول خواهد شد.



الف) اعضای فشاری ساخته شده از لوله‌های ۱/۵ اینچی



ب) اعضای فشاری ساخته شده از لوله‌های ۱/۵ اینچی

شکل (۱۶) ضریب طول مؤثر کماتش معادل اعضای فشاری برحسب

میزان متفاوت گشتاور اعمال شده برای سفت‌شدگی پیچ‌ها

تر بوده است که با توجه به آنکه نمونه‌ها از اعضای ساخته شده در خط تولید متداول و به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند، رفع این نقیصه در طرح و ساخت قطعات و اجزاء اتصال در تولید انبوه ضروری خواهد بود.

• استفاده از گوی‌ها، پیچ‌ها و غلاف‌های مقاوم‌تر شرایط تکیه‌گاهی را بهبود بخشیده و با کاهش یافتن طول مؤثر کمانش، ظرفیت باربری عضو را افزایش می‌دهد. لذا لازم است ابعاد گوی‌ها، پیچ‌ها و غلاف‌ها متناسب با ابعاد لوله‌ها و میزان پیش‌تندگی اتصال طراحی به‌نحوی اختیار گردد تا عملکرد موردنظر از مجموعه حاصل گردد.

در اعمال پیش‌تندگی پیچ‌ها باید توجه داشت که میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها به میزانی محدود گردد که منجر به شکست زودرس پیچ تحت تأثیر حالات بارگذاری متفاوت محتمل نگردد. به عبارت دیگر انتخاب میزان پیش‌تندگی پیچ‌ها متناسب با مقاومت و میزان تغییرشکل پیچ‌ها و ادوات اتصال و متقابلاً انتخاب پیچ‌ها و طراحی ادوات اتصال باید بر اساس میزان گشتاور پیش‌تندگی به منظور نیل به عملکرد موردنظر صورت گیرد.

در اینجا یادآوری این نکته نیز ضروری به‌نظر می‌رسد که اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در صلبیت مجموعه سازه فضاکار شبکه‌ای دو لایه طی آزمایش‌های گزارش شده در مرجع [۱۵] نشان داده شده است.

همچنین اثر انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندها در رفتار کلی و موضعی سازه‌های فضاکار و طول مؤثر اعضا در آیین‌نامه سازه‌های فضاکار [۱۶] مورد بحث قرار داده شده و شیوه منظور داشتن این آثار در تحلیل و طراحی تشریح گردیده است. در این رابطه اثر میزان سفتی پیچ‌ها نیز در آیین‌نامه مورد اشاره قرار داده شده است. امید است مطالعه حاضر با ارائه کمی نتایج آزمایش‌های انجام شده به شرح فوق در تدقیق معیارها و ضوابط ذیربط مفید واقع گردد.

• صلبیت واقعی به دست آمده برای مدول‌های مورد بحث به‌روش تجربی، حتی با مناسب‌ترین میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها، از صلبیت به‌دست آمده به‌روش‌های تحلیلی بر اساس فرض اتصالات مفصلی ایده‌آل به میزان قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر بوده است.

• افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب (به شرح مذکور در بخش ۴) موجب کاهش طول مؤثر کمانش اعضای فشاری و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری مدول‌ها گردیده است؛ اما سفت‌شدگی بیش از حد پیچ‌ها به دلیل بروز نارسائی‌های موضعی و تغییرشکل‌های خمیری در غلاف و اجزا و ادوات اتصال بسته به مشخصه‌های اتصال، موجب افزایش طول مؤثر معادل کمانش اعضای فشاری و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری مدول‌ها می‌گردد.

در صورتی که آثار ترکیبی اعمال گشتاور پیش‌تندگی پیچ‌ها و بارگذاری خارجی منجر به تغییر شکل خمیری قابل ملاحظه ادوات اتصال و یا شکست جوش گردد، طبعاً ظرفیت باربری مدول محدود خواهد گردید. بنابراین تعیین میزان گشتاور مناسب برای سفت‌شدگی پیچ‌ها با توجه به ویژگی‌های اتصال بر اساس توصیه‌های فصل هفتم آیین‌نامه سازه‌های فضاکار [مرجع] (طراحی به کمک آزمایش) ضروری خواهد بود.

• شیب کلیه نمودارهای نیرو- تغییرمکان به روش تجربی در مراحل اولیه بارگذاری دارای شیب اولیه‌ای کوچک‌تر از شیب ثانویه بوده و با افزایش بارگذاری حالت سخت‌شدگی در نمونه‌های آزمایش مشاهده شده است. به‌نظر می‌رسد این پاسخ غیر خطی ناشی از رفتار غیرخطی و تغییرشکل‌های نمونه‌های آزمایش و جابجایی‌های موضعی اتصالات و ناکاملی اعضا باشد.

• ظرفیت باربری جوش در اتصالات در بعضی موارد از ظرفیت باربری اعضای فشاری مدول‌های موردنظر کوچک-

۷- سپاسگزاری

آزمایش‌های گزارش شده در این مقاله در آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی بابل به انجام رسیده است. در اینجا لازم است از پشتیبانی‌های به عمل آمده از طرف جناب آقای دکتر جواد واثقی امیری با در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و همکاری‌های جناب آقای دکتر محمدرضا داودی و جناب آقای مهندس امین مصطفویان در این زمینه سپاسگزاری به عمل آید. جناب آقای دکتر محسن غفوری آشتیانی مشوق نگارندگان در انجام این مطالعه بوده‌اند، پشتیبانی‌های ایشان موجب امتنان ویژه نگارندگان است.

نمونه‌های آزمایش توسط مجتمع سازه‌های فضایی صنایع خودکفایی سپاه در اختیار قرار داده شده است. نگارندگان وظیفه خود می‌دانند از همکاری ایشان تقدیر نمایند.

در خاتمه از سرکار خانم مهندس شرمین امین نژاد به خاطر تنظیم آرایه مقاله و آقای مهندس امیدپورهادی به خاطر تنظیم شکل‌ها سپاسگزاری به عمل می‌آید.

۷- منابع

- [4] Kitipornchai. S, Al-Bermani. F. G. A and Peyrot. A. H, "Effect of Bolt Slippage on Ultimate Behaviour of Lattice Structures", Journal of Structural Engineering 120 (8), (1994), 2281-2287.
- [5] Kato. S, Mutoh. I and Shomura. M, "Effect of Joint Rigidity on Buckling Strength of Single Layer Lattice Domes", Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS, 35(115),(1994), 101-109.
- [6] Swaddiwudhipong. S, Koh. C. G and Lee. S. L, "Development and Experimental Investigation of a Space Frame Connector", International Journal of Space Structures, 9(2), (1994), 99-106.
- [7] Levy. R, Hanaor. A and Rizzuto. N, "Experimental Investigation of Prestressing in Double- Layer Grids", International Journal of Space Structures, (1994), 21-26.
- [8] Chenaghloou. M.R, "Semi- Rigidity of Connections in Space Structures", Ph.D. Thesis, University of Surrey, October (1997).
- [۹] مالک، ش. و ابوالحسن فام، م.، «تحلیل حدی شبکه‌های فضاکار با پیوندهای نیامی»، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکار، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
- [10] Vaseghi. J and Alibeygi. M.H, "Parametric evaluation to induce a modified design in double layer grid space frames", Proceedings of the Fifth International Conference on Space Structures, University of Surrey, UK, (2002), 721-728.
- [11] Fulop. A and Ivanyi. M, "Experimentally Analyzed Stability and Ductility Behaviour of a Space- Truss Roof System", Journal of Thin Walled Structures, 42(2004), 309-320.
- [۱۲] معصومی، م.، «مطالعه‌ای در زمینه طول مؤثر و ضریب لاغری اعضا در سازه‌های مشبک فضاکار»، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی شاهرخ مالک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۸۳.
- [1] Saka. T and Heki. K, "The Effect of Joints on the Strength of Space Trusses", Proceedings of the Third International Conference on Space Structures, University of Surrey, UK, (1984), 417- 422
- [2] Kato. S, Ueki. T and Takashima. H, "Study on the Buckling Behaviour of Semi- Rigidly Jointed Latticed Dome of Single Layer", Proceedings of the International Conference on 10 Years of Progress in Shell and Spatial Structures, Vol. 5, Madrid, (1989).
- [3] Yamada. M, Yamamoto H, Wang. Li and Jung Hwan. M, "On the Effect of Joint Flexibility and Loading Conditions on the Buckling Characteristics of Single- Layer Latticed Domes", Proceedings of the International Conference on 10 Years of Progress in Shell and Spatial Structures, Vol. 4, Madrid, (1989).

[۱۶] آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، نشریه شماره ۴۰۰ دفتر نظام فنی اجرائی معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری، مجری مسئول: شاهرخ مالک، تدوین شده در دانشکده فنی دانشگاه تهران با همکاری کمیته تدوین، ۱۳۸۸.

[13] Kato. S, Fujimoto. M and Ogawa. T, "Buckling Load of Steel Single Layer Reticulated Domes" Journal of The International Association for Shell and Spatial Structures, IASS, (2005).

[۱۴] مقررات ملی ساختمان ایران مبحث دهم: طرح و اجرای سازه‌های فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۷.

[۱۵] غلامپور، س.، مالک، ش.، غفوری آشتیانی، م. و واثقی امیری، ج.، «بررسی تجربی اثرات میزان سفت‌شدگی پیچ‌های پیوندهای گوی‌سان بر صلبیت شبکه‌های دو لایه فضاکار»، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۴، شماره ۳، مهرماه ۱۳۸۹، صفحه ۴۳۷ تا ۴۴۵.

An Experimental Study of the Influence of the Degree of Bolt Tightness on the Effective Length of Compression Members of Double Layer Space Structures Composed of Ball Joints

S. Gholampour¹, S. Maalek^{2*}

1- Lecturer, Islamic Azad University, Ghaem-shahr Campus

2- Lecturer, Department of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

maalek@ut.ac.ir

Abstract:

A search of the published literature reveals that studies related to the effects of the degree of bolt tightness on the behavior of space structural joints and consequently on the member behavior and the overall response of space structures are rather limited. An experimental investigation of the effects of bolt tightness on the rigidity of double layer grids, carried out previously by the authors, had revealed the significance of the degree of bolt tightness on the overall rigidity of the tested structures.

The present research is concerned with an investigation of the effects of the degree of bolt tightness on the end conditions and consequently on the effective lengths and the slenderness ratios of compression members of double layer space structures. An experimental program of work was conducted on more than 40 test specimens consisting of typical pyramidal modules of representative double layer grids to observe the influence of the degree of bolt tightness on the effective length and load carrying capacity of diagonal compression web members of such modules. Each module was fabricated by practically identical tubular members and the matching MERO type ball joints. However, different modular specimens were constructed using tubular members with different diameters and cross sectional properties. In each individual test specimen, it was attempted that the bolts connecting the members to the ball joints be tightened by the same applied torque to achieve an identical degree of tightness in all its joints. However, different values of applied torques were used to tighten different test specimens. Following the preparation of the test specimens tightened with different applied torques, a monotonically increasing concentrated load was applied at the upper node of each specimen. The tests were continued up to failure and in each test the displacement of the central top node just underneath the applied load was measured as the main component of the response of the test module. The observations indicate that the degree of bolt tightness has a significant influence on the effective lengths and consequently the load carrying capacity of compression members of such modules. However, over-tightening may cause failure of connection sleeves. Also, bolt pre-stressing shall not be made to a degree that causes brittle fracture of pre-stressed bolts or premature tearing of member to end cone welded connections under additional applied tension.

On the basis of the observed behavior and supporting theoretical studies, the effects of the bolt tightness on the behavior of double layer space structures have been discussed in the context of design assisted by testing emphasized in Chapter 7 of the Iranian Code of Practice for Space Structures. With due consideration of different aspects of the influence of the degree of bolt tightness on the behavior of joints, members and modules, as well as the overall structural behavior, some practical recommendations have been presented to improve the reliability of structural performance through increasing rigidity and load carrying capacity of such double layer space grid structures, that can be achieved as a result of a proper choice of the bolt tightening procedure.

Keywords: Skeletal Space Structure, Double Layer Grid, MERO Type Jointing System, Degree of Bolt Tightness, Effective Length