مدلسازی کامپیوتری و تحلیل غیرخطی اتصالات صلب رایج در ایران

فریبرز ناطقی الهی، استاد پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه
امیرعباس مینایی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه

استاندارد

۱- چکیده

با توجه به محدودیتهای اجرایی یا عدم دسترسی به برخی مصالح مورد نیاز در کشور، مهندسان برای تأمین نیازهای سازه‌ای دست به ابتکارهایی می‌زنند. البته هر ابتکاری چه در مرحله طراحی و چه در مرحله اجرا، اگر بر اساس اصول علمی و عملی پایه گذاری شده باشد، محدودیتها را برطرف و به پیشرفت منجر می‌شود؛ در غیر این صورت، شاید خود عاملی برای ایجاد محدودیت باشد. از جملهٔ این ابتکارات در ایران، طراحی و ساخت ستون با دو نیمرخ *IPE* یا *INP* متشکل از ورق تقویتی سراسری یا تعدادی تسمه با فاصله مشخصی از یکدیگر می‌باشد. اگر برای اتصال تیر به ستون از اتصال صلب استفاده شود، اجزای اتصال به ورق تقویتی ستون متصل می‌شوند و چون این ورق فقط از کناره های خود به ستون جوش می‌شود، در صورت وجود جزئیات اجرایی ناصحیح تحت اثر کشش ناشی از لنگر در صفحه خود خم و باعث کاهش صلبیت اتصال خواهد شد.

در سال ۱۳۷۳ یک بررسی آزمایشگاهی بر روی هفت مدل اتصال صلب در بخش سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن صورت گرفت (مزروعی و همکاران) و نتایج آن در دومین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ارائه گردید [۳]. از آنجا که در انجام آزمایشها، بروز بسیاری از خطاها اجتناب ناپذیر است و همچنین برای جلوگیری از آزمایشهای مشابه و ارائه نتایج به صورت تحلیلی، با مدلسازیهای کامپیوتری و تحلیلهای غیرخطی رفتار مدلهای ساخته شده برای اتصالات توسط نگارندگان مقاله حاضر بررسی گردید.

در این مقاله، خلاصه‌ای از نتایج مدلسازیهای کامپیوتری و تحلیلهای غیرخطی بر روی هفت مدل اتصال صلب ارائه و نتایج حاصل که شامل ظرفیت خمشی، مقدار دوران و اثر اشکالات موجود در جوش اتصال بر روی ظرفیت باربری این اتصالات می باشد، بررسی شده است.

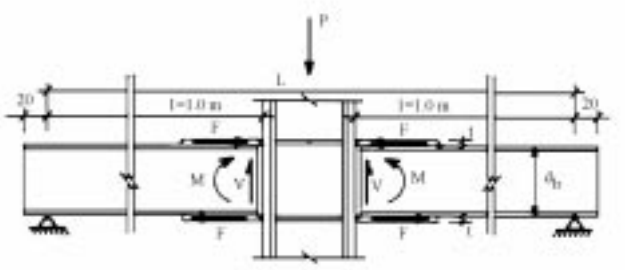
۲- مقدمه

در انجام آزمایشها به علت اینکه شرایط انجام آزمایش کاملاً نمی‌باشند، در نتایج، خطاهای بسیاری تأثیر می گذارند. علاوه بر آن، مدلسازیهای کامپیوتری و کالیبره کردن مدلها برای کاربرد نتایج دقیق تئوریک به جای انجام آزمایشهای گرانقیمت ضروری است تا نتایج حاصل از عملیات آزمایشگاهی، با برنامه های کامپیوتری مورد بررسی و مدلسازی قرار گیرد. در این مقاله، نتایج آزمایشهایی که بر روی نمونه هایی خاص از اتصالات صلب متداول در ایران که در بخش سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام گرفته است، توسط برنامه *NISA (VERSION-94)* بررسی گردیده است.

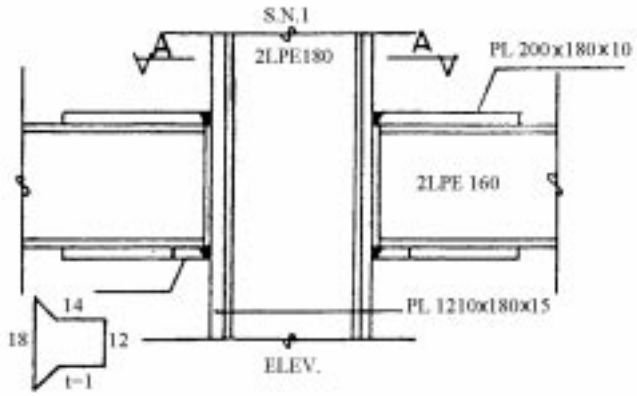
هدف از این بررسی، به دست آوردن ظرفیت خمشی اتصالات صلب رایج در ایران می‌باشد. نتیجه مدلسازی کامپیوتری و انجام عملیات آزمایشگاهی بر روی اتصالات صلب این است که در طراحی سازه هایی که از این نوع اتصالات در آنها استفاده می‌شود، باید حتماً ظرفیت خمشی و رفتار اتصالات در آنها لحاظ شوند [۱ و ۲]. این امر تأثیر بسزایی بر جنبه های اقتصادی و فنی سازه در حال طرح می گذارد.

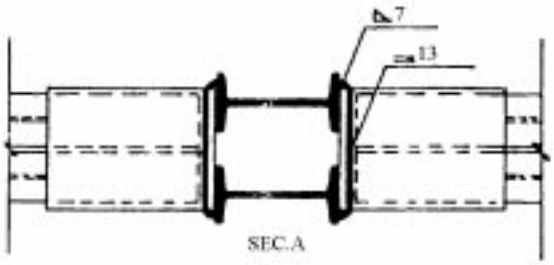
۳- معرفی اتصالات مدل شده در آزمایشگاه

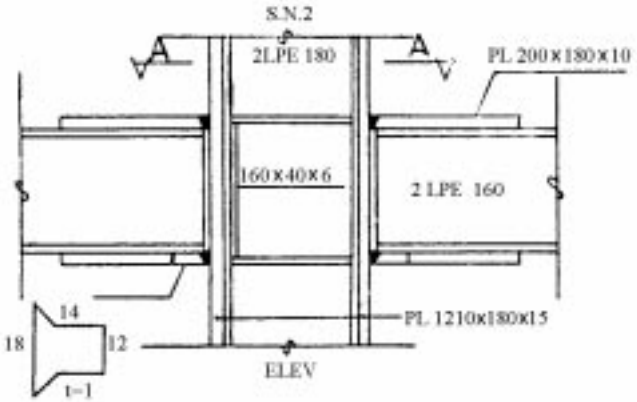
آزمایشهای بارگذاری بر روی هفت نمونه اتصال، به منظور تعیین درصدگیرداری و ظرفیت خمشی اتصالات، انجام شد. هفت نمونه اتصال انتخاب شده، از اتصالات صلب رایج در سازه های فولادی ایران می‌باشند [۱ و ۲]. نحوهٔ آزمایش بارگذاری با شرایط تکیه گاهی مطابق شکل (۱) می باشند که توسط مجریان طرح در آزمایشگاه مرکز

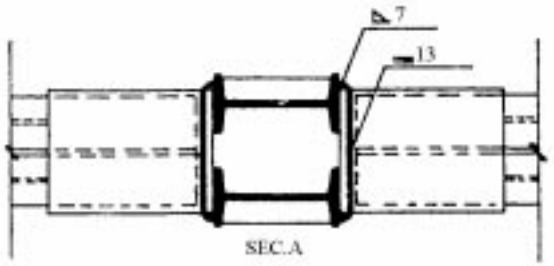


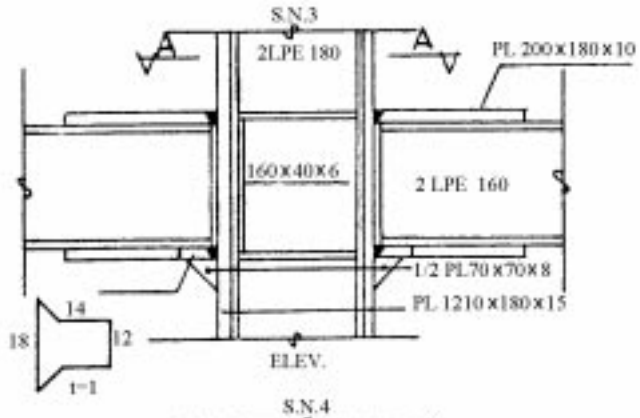
شکل (۱): آرایش مدل آزمایشی [۳]

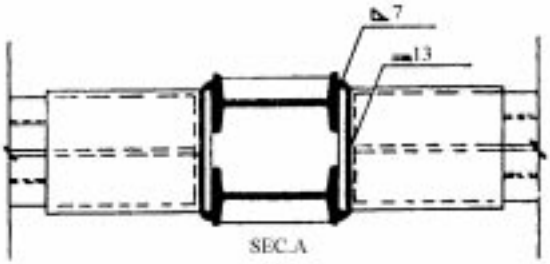

S.N.1
2LPE180
PL 200x180x10
2LPE 160
PL 1210x180x15
14
18
12
t=1
ELEV.

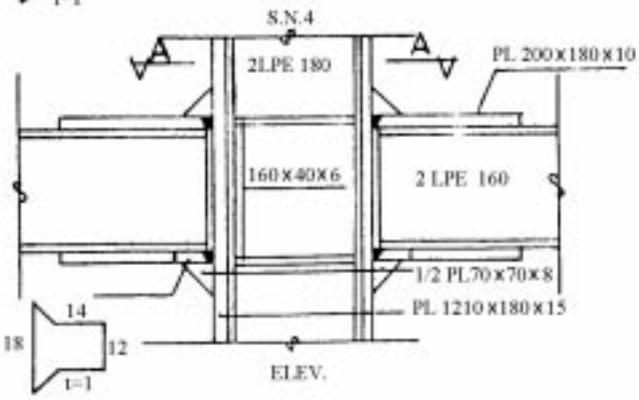

7
13
SEC.A

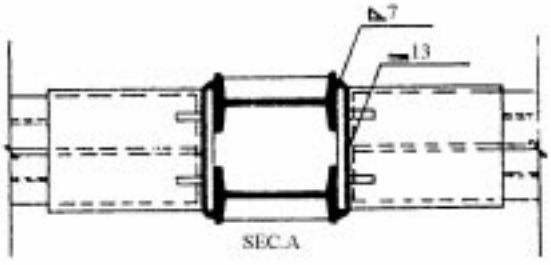

S.N.2
2LPE 180
PL 200x180x10
160x40x6
2 LPE 160
PL 1210x180x15
14
18
12
t=1
ELEV

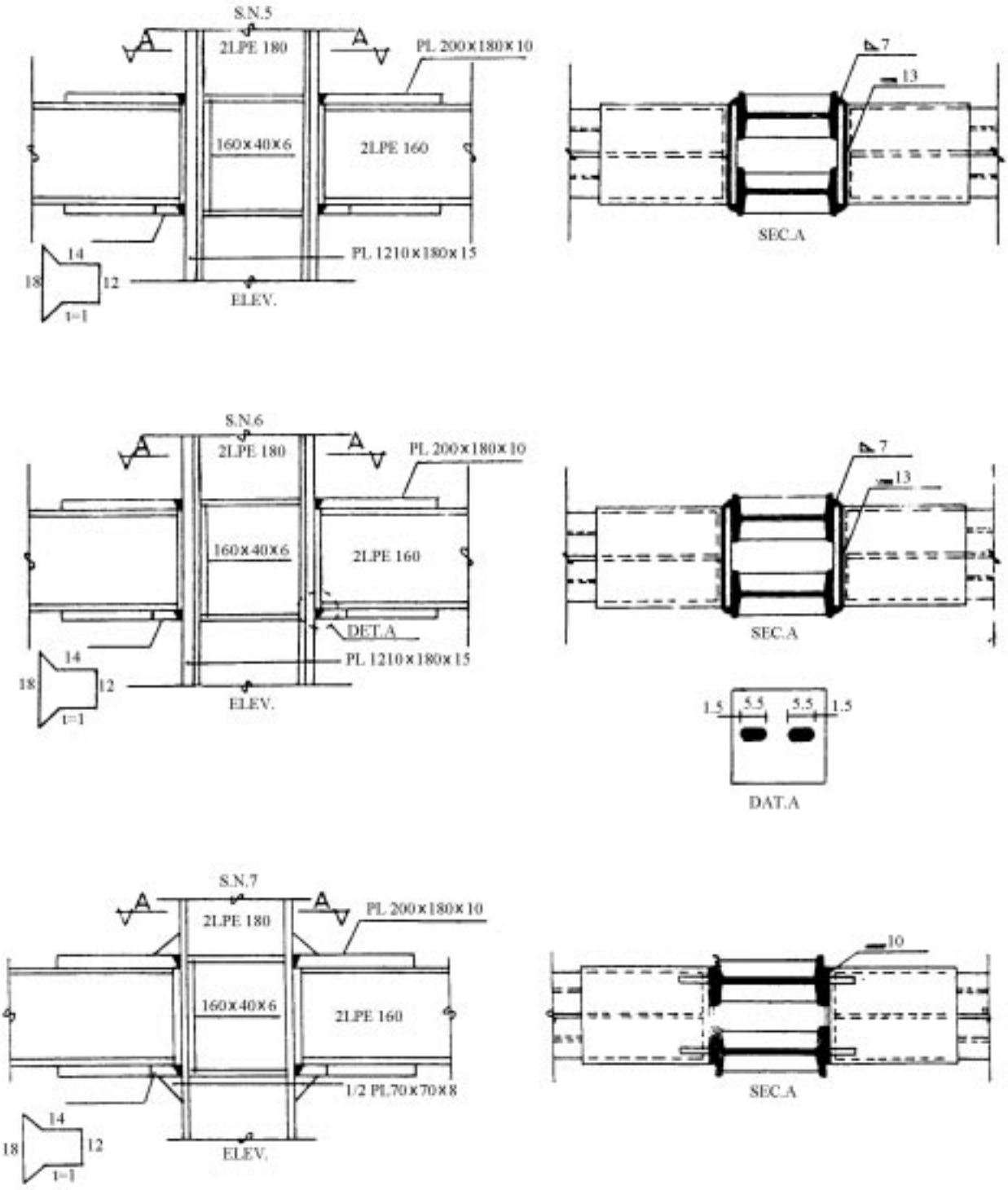

7
13
SEC.A


S.N.3
2LPE 180
PL 200x180x10
160x40x6
2 LPE 160
1/2 PL70x70x8
PL 1210x180x15
14
18
12
t=1
ELEV.


7
13
SEC.A


S.N.4
2LPE 180
PL 200x180x10
160x40x6
2 LPE 160
1/2 PL70x70x8
PL 1210x180x15
14
18
12
t=1
ELEV.


7
13
SEC.A



شکل (۲): جزئیات اجرای نمونه های آزمایشی [۳]

تحقیقات ساختمان و مسکن در سال ۱۳۷۳ مورد بررسی قرار گرفت [۳].

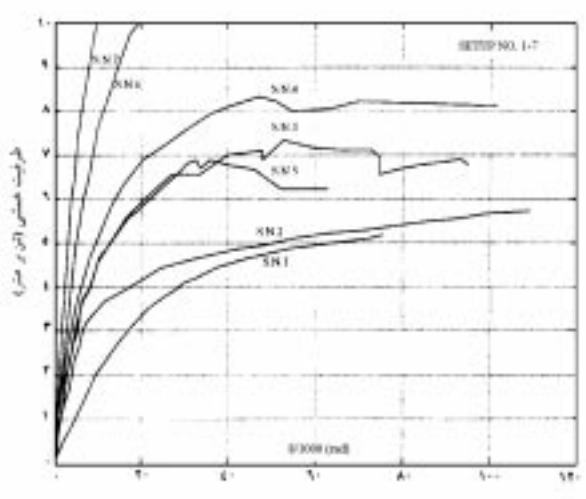
در ساخت نمونه‌ها از دو نیمرخ *IPE-180* با فاصلهٔ ۱۲/۵ سانتیمتر از یکدیگر و ورق تقویتی *PL15* با طول ۱۲۰ سانتیمتر به عنوان ستون، دو نیمرخ *IPE-160* با طول ۱۲۰ سانتیمتر به عنوان تیر استفاده شده‌بود. جزئیات نمونه های آزمایشی در شکل (۲) ارائه گردیده است [۳].

در ساخت هفت مدل آزمایشی، سعی گردید که کلیه مراحل از نظر شرایط، نحوه و حتی کیفیت جوشکاری، مشابه وضعیت اجرایی باشد. روند اعمال بار در تمام آزمایشها در سه دوره بارگذاری انجام شد.

در مرحله اول نیروی قائم جک به اندازه ۰-۱-۰ تن، در مرحله دوم ۰-۲-۰ تن و در مرحله سوم از صفر تا بار نهایی اعمال شد.

٤- نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده

دوران قسمت مرکزی اتصال با دستگاههای مربوطه اندازه گیری و در هر مرحله، متوسط مقادیر حاصل به عنوان چرخش اتصال منظور گردید. با توجه به مقدار بار انتهایی ستون و بازوی لنگر، مقدار لنگر وارد بر اتصال محاسبه و منحنی $(M-\theta)$ برای هر نمونه اتصال مطابق شکل (۳) ترسیم شد [۳]. درصد گیرداری (برای دهانه متعارف ٤/٥ متر) و ظرفیت خمشی هر اتصال نتایج آزمایشگاهی در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۳): منحنی لنگر- دوران نمونه های آزمایشی [۳]

٥- مدلسازی کامپیوتری

برای مدلسازی کامپیوتری از برنامه *NISA (VERSION-94)*، استفاده گردید. تحلیل انجام شده استاتیکی غیرخطی می‌باشد. یکی از مزایای برنامه *NISA* این است که خصوصیات غیرخطی مصالح را در تحلیلها لحاظ می کند. از محدودیتهای این برنامه، عدم تعریف فنر خمشی در محل تیر به ستون در تحلیلهای استاتیکی غیرخطی می‌باشد. برای مدل کردن تیر و ستون، به روش اجزای محدود از دو مقطع معادل قوطی شکل استفاده شد. از آنجا که در مدل کردن تیر در برنامه *NISA* در وضعیت المان تیر *(BEAM ELEMENT)*، اگر حالت غیرخطی مصالح هم مدّنظر باشد فقط از تعدادی مقاطع خاص می توان استفاده نمود، دو نیمرخ I به هم چسبیده یا با فاصله‌جزء این مقاطع نمی‌باشد، باید مقطع معادلی تعریف نمود، از این خصوصیت، برای سهولت

جدول (۱): درصد گیرداری (برای اندازه دهانه متعارف ٤/٥ متر) و ظرفیت خمشی اتصالات [۳]

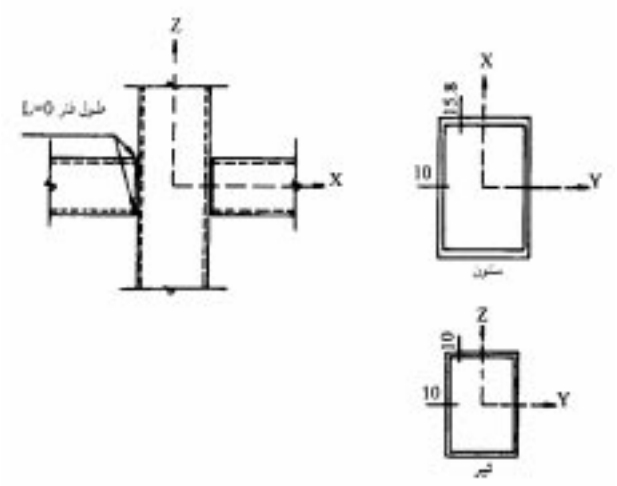
شماره نمونه	گیرداری	ظرفیت خمشی (تن بر متر)	جزئیات نمونه آزمایشی
S.N.1	٪٤٠	٥/١٩	ورق زیر سری و ورق روی سری
S.N.2	٪٦٠	٥/٧٢	ورق زیر سری، ورق روی سری و ورق تقویت ستون در قسمت خارجی
S.N.3	٪٦٧	٧/٣٣	ورق زیر سری، ورق روی سری، ورق تقویت ستون در قسمت خارجی و لچکی در پایین
S.N.4	٪٧١	٨/٣٣	ورق زیر سری، ورق روی سری، ورق تقویت ستون در قسمت خارجی و لچکی در پایین و بالا
S.N.5	٪٦٥	٦/٨٩	ورق زیر سری، ورق روی سری، ورق تقویت ستون در قسمت خارجی و داخلی
S.N.6	٪٨٤	١٠	ورق زیر سری، ورق روی سری، ورق تقویتی در قسمت خارجی و داخلی و جوش کام
S.N.7	٪٩٠	١٠	ورق زیر سری، ورق روی سری، ورق تقویتی ستون در قسمت خارجی و خارجی لچکی در پایین و بالا

در مدلسازی کامپیوتری و از دو مقطع معادل قوطی شکل برای تیر و ستون استفاده گردید. ابعاد مقطع مورد استفاده به جای تیر ۱۵/۷۷x۱۱/۷ سانتیمتر و ابعاد مقطع مورد استفاده به جای ستون ۲۲x۲۰/۲ سانتیمتر انتخاب گردید.

در انتخاب مقطع معادل سعی شد تا اساس مقطع مدل کامپیوتری با اساس مقطع تیر آزمایشگاهی و سطح مقطع، ممان اینرسی و شعاع ژیراسیون مدل کامپیوتری با سطح مقطع، ممان اینرسی و شعاع ژیراسیون ستون آزمایشگاهی یکسان باشند تا تنشهای خمشی و فشاری در هر دو مدل از شرایط یکسانی برخوردار باشند.

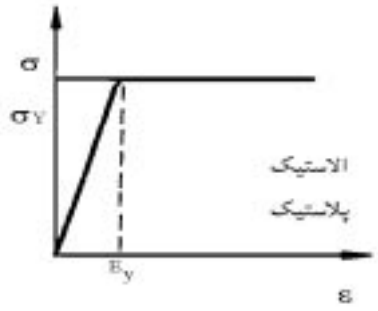
در محل اتصال تیر به ستون دو فنر انتقالی *(TRANSLATIONAL SPRING ELEMENT)* با طول صفر در پایین و بالای تیر (در محل آکس قائم تیر) قرار داده شد. برای تعیین دوران اتصال در مدلهای آزمایشگاهی فرض شده‌بود که محل دوران در وسط تیر است، بنابراین در مدل کامپیوتری در وسط تیر مفصل تعبیه گردید. لازم به ذکر است که کوپل نیروی ایجاد شده در دو فنر انتقالی، به

ایجاد لنگر در محل اتصال منجر می شوند. جزئیات مدل کامپیوتری در شکل (٤) آورده شده است.

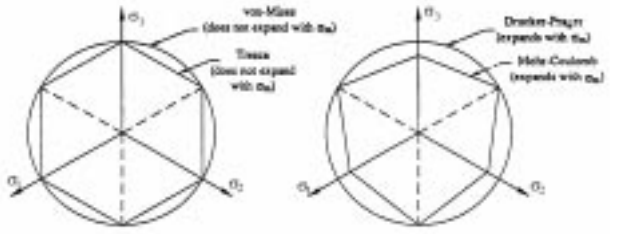


شکل (٤): جزئیات مدل کامپیوتری

منحنی تنش- کرنش فولاد به صورت دو خطی در نظر گرفته شد. سطح جاری شدن مصالح فون- می سز و رفتار مصالح ایزوتروپیک بود. منحنی تنش- کرنش و سطح جاری شدن مصالح در شکلهای (٥ و ٦) آورده شده است. پنجاه گام بارگذاری و در هر گام حداکثر ٣٠ مرحله درون یابی در نظر گرفته شد. تلورانس تغییرمکان، نیرو و انرژی بحرانی ٠/٠١ می‌باشند.



شکل (٥): منحنی تنش و کرنش مصالح فولادی



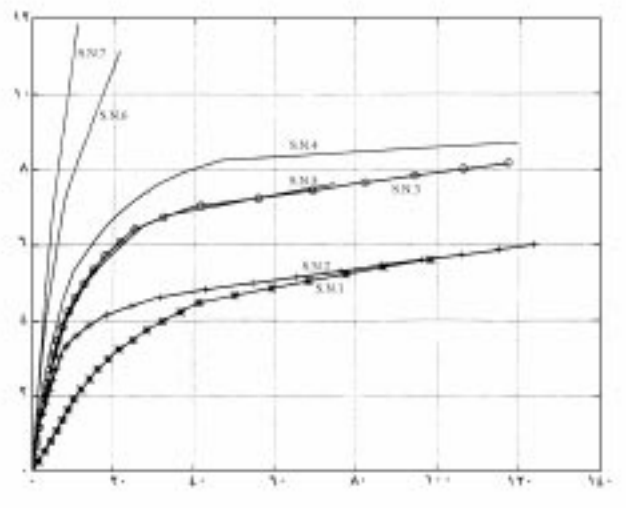
شکل (٦): سطح جاری شدن مصالح

با توجه به اینکه شکل ظاهری مقاطع انتخابی در رفتار غیرخطی شبیه‌سازی شده تأثیر بسزایی دارد، مقاطع بسیاری برای معادل کردن مقاطع مدل کامپیوتری با مقاطع مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت مقطعی انتخاب شد که رفتار غیرخطی مناسبی داشته باشد.

لازم به ذکر است که در مدل کامپیوتری به جای آنکه تکیه گاههای تیر ثابت و بار جک به انتهای ستون وارد شود، جهت سهولت در مدلسازی فرض شد که ابتدا و انتهای ستون ثابت و بار در دو انتهای دو تیر (محل تکیه گاهها) وارد شود.

٦- نتایج حاصل از مدلسازی کامپیوتری

با توجه به نتایج به دست آمده، در مدلهای اول، دوم، ششم و هفتم، منحنی لنگر- دوران انطباق نسبتاً خوبی با منحنی لنگر- دوران حاصل از مدلسازیهای آزمایشگاهی داشت؛ ولی در مدلهای سوم، چهارم و پنجم منحنی لنگر- دوران فقط در مرحله خطی دارای انطباق با منحنی لنگر- دوران حاصل از مدلسازیهای آزمایشگاهی می‌باشد، زیرا در منحنی لنگر- دوران مدلسازی آزمایشگاهی نامنظمی‌هایی در مرحله غیرخطی به چشم می خورد که می‌تواند ناشی از اشکالات جوش یا مصالح استفاده شده در اتصالات باشند (زیرا شرایط ساخت مدلسازی آزمایشگاهی منطبق با شرایط عملی بوده است).



شکل (٧): منحنی لنگر- دوران مدلهای اتصالات حاصل از تحلیل کامپیوتری [٥]

جدول (٢): مقایسه ظرفیت خمشی و درصد گیرداری مدلهای کامپیوتری و آزمایشگاهی [٥]

شماره نمونه	گیرداری کامپیوتری	گیرداری آزمایشگاهی	ظرفیت خمشی کامپیوتری	ظرفیت خمش آزمایشگاهی (تن بر متر)
S.N.1	٪٣٤	٪٤٠	٥/٥٩٤	٥/١٩
S.N.2	٪٦٠	٪٦٠	٦/٠٠	٥/٧٢

S.N.3	٪٦٧	٪٦٧	٨/١٨	٧/٣٣
S.N.4	٪٧١	٪٧١	٨/٧٢	٨/٣٣
S.N.5	٪٦٥	٪٦٥	٧/٦٣	٦/٨٩

منحنی لنگر- دوران هفت مدل بررسی شده توسط برنامه *NISA* [٤] در شکل (٧) آورده شده است. ظرفیت خمشی و درصد گیرداری حاصل از مدلسازی آزمایشگاهی و کامپیوتری در جدول (٢) با هم مقایسه شده اند.

٧- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدلسازیهای کامپیوتری، نتایج حاصل از مدلسازیهای آزمایشگاهی را تأیید می نماید [٣]. ذکر این نکته نیز ضروری است که انجام آزمایشهای غیرمخرب جوش (مخصوصاً در اتصالات صلب) و بررسی آزمایش مصالح باید حتماً در اجرای سازه های فولادی پیش بینی شود تا دیدگاههای طراحان پروژه تأمین گردد؛ زیرا، در صورت وجود اشکال در جوش اتصالات صلب، رفتار اتصال تغییر خواهد کرد.

٨- سپاسگزاری

از مسؤولین محترم مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به خاطر فراهم نمودن امکان استفاده از نتایج آزمایشگاهی و انجام تحلیلهای کامپیوتری در بخش کامپیوتر آن مرکز صمیمانه تشکر و قدردانی می گردد.

S.N.6	٪٨٢	٪٨٤	١١/١٣	١٠
S.N.7	٪٩٠	٪٩٠	١١/٨٦	١٠

٩- مراجع

١- طاحونی؛ شاپور. "سازه های فولادی با اتصالات جوشی"، تهران: انتشارات دهخدا، ١٣٧٥.

٢- دفتر نظامات مهندسی. "مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمانهای فولادی"، شرکت چاپ خواجه، ١٣٧٤.

٣- مزروعی، علی؛ سیمونیان، واهاک؛ نیکخواه عشقی، مجید. بررسی تجربی درصد گیرداری اتصالات صلب جوشی متداول در قابهای خمشی برای مناطق زلزله خیز، دومین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ١٣٧٤.

4-NISA Users Manual. (1994), University of Michigan, Engineering Mechanics Research Coporation, 1994.

٥- مینایی، امیرعباس؛ ناطقی الهی، فریبرز. "مدلسازی کامپیوتری اتصالات صلب"، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، تهران: دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب، ١٣٧٨.