



پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران - مهندسی زلزله

موضوع

**بررسی رفتار تیر پیوند متوسط و بلند در
قاب‌های مهار بندی شده و اگر**

دانشجو

اردشیر دانشمند

استاد راهنما

دکتر بهرخ حسینی هاشمی

۱۳۸۹

تقدیم به:
پدر و مادر عزیزم

اعضاء هيئت داوران:

امضاء

استاد راهنما

امضاء

استاد مشاور

امضاء

استاد مدعو (خارجی)

امضاء

استاد مدعو (داخلی)

امضاء

مدیر تحصیلات تکمیلی

چکیده

با توجه به اهمیت عملکرد تیر پیوند در رفتار کلی قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در مورد رفتار تیر پیوند و جزئیات آن انجام شده است. در این میان رفتار تیرهای با طول کوتاه به علت جذب انرژی بالاتر و شکل‌پذیری بهتر بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است و شناخت بیشتری از رفتار این نوع تیرها و پارامترهای لرزه‌ای آن موجود است. بنابراین آیین‌نامه‌های طراحی استفاده از این نوع تیرها را به طراحان پیشنهاد کرده‌اند اما الزامات معماری استفاده از تیرهای با طول متوسط و بلند را ناگزیر می‌سازد. علاوه بر این نتایج گزارش شده از تحقیقات پیشین موید غیر ایمن بودن برخی از نمونه‌ها با طول متوسط و ارضا نشدن ضوابط آیین‌نامه برای آن‌ها می‌باشد که این موضوع بررسی دقیق‌تر روابط موجود آیین‌نامه برای این نوع تیرها و بررسی شکل‌پذیری و پارامترهای موثر بر آن را بیش از پیش ضروری می‌سازد. در این تحقیق مجموعاً ۶۷ نمونه‌ی اصلی با طول متوسط و بلند با استفاده از روش اجزا محدود و در نرم افزار ANSYS مدل سازی شده و ضوابط آیین‌نامه‌ای این نوع تیرها و تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار آن‌ها بررسی گردید. تیرهای پیوند به صورت جدا شده در نظر گرفته شده و شرایط مرزی آن‌ها به نوعی در نظر گرفته شد که تلاش‌های ایجاد شده بتواند نشان‌دهنده‌ی تلاش‌های واقعی تیر پیوند در قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا باشد. همچنین با توجه به استفاده از مشخصات فولادهای با استاندارد آمریکایی در عموم تحقیقات قبلی به منظور مشخص شدن تاثیر خصوصیات فولاد مصرفی بر نوع رفتار از مشخصات فولاد St37 که فولاد رایج ساختمانی در کشورمان می‌باشد استفاده شد. در انتها با توجه به نتایج مشاهده شده توصیه‌هایی برای طراحی تیرهای واقع در این محدوده به منظور حصول اطمینان از رفتار مطمئن تر آن‌ها ارائه گردید. همچنین صحت روابط آیین‌نامه با توجه به نوع فولاد مصرفی برای این نوع تیرها بررسی و نتایج حاصله گزارش شد.

واژه‌های کلیدی

شکل پذیری تیر پیوند، بادبندهای مهاربندی شده‌ی واگرا، اندرکنش برش و خمش، تیرهای پیوند با طول متوسط و بلند، بررسی عددی سازه‌های فولادی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
.....	چکیده..... ث
.....	فصل اول مقدمه و کلیات..... ۱
.....	۱-۱ مقدمه..... ۲
.....	۲-۱ هدف موضوع و اهمیت آن..... ۳
.....	۳-۱ ساختار کلی..... ۳
.....	فصل دوم بازنگری تحقیقات پیشین..... ۴
.....	۱-۲ مقدمه..... ۵
.....	۲-۲ تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته..... ۵
.....	۳-۲ تحقیقات عددی انجام گرفته..... ۱۲
.....	فصل سوم مبانی و تئوری موضوع..... ۲۶
.....	۱-۳ مقدمه..... ۲۷
.....	۲-۳ رفتار مواد در شرایط آرمانی شده..... ۲۷
.....	۳-۳ خصوصیات تک محوری مواد..... ۲۸
.....	۱-۳-۳ منحنی تنش کرنش..... ۲۸
.....	۲-۳-۳ مدول تانژانت (E_T) و مدول پلاستیک (E_p)..... ۲۸
.....	۳-۳-۳ قوانین سخت شوندگی..... ۲۹
.....	۴-۳ مفاهیم اساسی پلاستیسیته..... ۳۱
.....	۱-۴-۳ معیار تسلیم..... ۳۱
.....	۲-۴-۳ سطوح تسلیم..... ۳۴
.....	۳-۴-۳ قوانین سخت شوندگی..... ۳۵
.....	۴-۴-۳ تنش و کرنش معادل..... ۳۶
.....	۵-۴-۳ قانون جریان (شار)..... ۳۷
.....	۵-۳ مروری بر مشخصات کلی سیستم مهاربندی شده ی واگرا..... ۳۸
.....	۶-۳ ضوابط طراحی آیین نامه ی AISC2005 برای قاب های مهاربندی شده ی واگرا..... ۴۱
.....	فصل چهارم مدل اجزا محدودی و روش تحلیل..... ۴۸
.....	۱-۴ مقدمه..... ۴۹
.....	۲-۴ مبانی مدلسازی..... ۵۰
.....	۱-۲-۴ معرفی اجمالی نرم افزار ANSYS..... ۵۰
.....	۲-۲-۴ مروری بر مفهوم آنالیز غیر خطی..... ۵۰
.....	۳-۲-۴ مدل سازی در نرم افزار و بررسی صحت آن..... ۵۱
.....	۳-۴ پارامترهای مدلسازی..... ۵۵

۵۵	۳-۴-۱ المان های اجزا محدودی استفاده شده
۵۵	۳-۴-۲ خصوصیات مواد استفاده شده در آنالیز
۵۸	۳-۴-۳ خصوصیات غیر خطی هندسی
۵۸	۳-۴-۴ سایر تنظیمات و ویژگیهای استفاده شده در نرم افزار
۵۹	۴-۴ ساختن نمونه ها، بارگذاری و روش کار
۶۲	۴-۴-۱ رفتار یک نمونه پروفیل جدول اشتال با سخت کننده های دو طرفه
۶۳	۴-۴-۲ تاثیر قرارگیری سخت کننده ها در طرفین جان
۶۳	۴-۴-۳ رفتار یک نمونه تیر پیوند ساخته شده از تیر ورق
۶۴	۴-۴-۴ تاثیر فواصل سخت کننده ها بر روی رفتار تیر پیوند
۶۵	۴-۴-۵ نمونه های اضافی
۶۵	۴-۵ نتایج
۶۷	۴-۵-۱ بررسی رفتار نمونه های ساخته شده از پروفیل IPE270
۷۴	۴-۵-۲ بررسی رفتار نمونه های ساخته شده از تیر ورق
۷۷	۴-۵-۳ بررسی تاثیر فواصل سخت کننده در محدوده ی طولی تیرهای متوسط
۸۰	۴-۵-۴ بررسی رفتار نمونه ی ۳۳
۸۷	۴-۵-۵ بررسی رفتار نمونه های خمشی
۹۱	فصل پنجم نتایج و پیشنهادها
۹۲	۵-۱ نتایج
۹۳	۵-۲ پیشنهادها
۹۵	مراجع
۹۶	۶-۱ مراجع
۹۸	ضمایم

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱-۲: مقایسه منحنی هیسترتیک یک نمونه تیر پیوند برشی بدون سخت کننده و با سخت کننده
۸	شکل ۲-۲: ناپایداری نوع اول مشاهده شده در قطعه تیر خارج تیر پیوند
۸	شکل ۳-۲: ناپایداری نوع دوم مشاهده شده در قطعه تیر مجاور تیر پیوند
۱۰	شکل ۴-۲: شکست جان در محل انتهای جوش سخت کننده به بال (۱۰)
۱۱	شکل ۵-۲: پروتکل بارگذاری اصلاح شده (A) و پروتکل بارگذاری AISC2002 (B)
۱۳	شکل ۶-۲: المان تیر پیوند (A) با زیر مفصلهای غیر پلاستیک (B)
۱۳	شکل ۷-۲: سطح تسلیم زیر مفصل ها به همراه منحنی نیرو، تغییر شکل حاصل از عملکرد توام آنها
۱۴	شکل ۸-۲: مدل CHAO و همکاران (۱۵)

- شکل ۹-۲: منحنی تنش کرنش برای قسمت های مختلف تیر پیوند (A) بال (B) جان و سختکننده (C) ناحیه ی K شکل (D) جوش (۱۵)..... ۱۵
- شکل ۱۰-۲: تغییرات برش طراحی تیر پیوند با افزایش طول تیر پیوند (تیر پیوند برشی) (۱۸) ۱۷
- شکل ۱۱-۲: تغییرات وزن سازه با افزایش طول تیر پیوند (تیر پیوند برشی) (۱۸) ۱۸
- شکل ۱۲-۲: منحنی تغییرات ضریب مقیاس میانگین با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳ و ۹ طبقه (تیر پیوند برشی) (۱۸) ۱۸
- شکل ۱۳-۲: تغییرات شکل پذیری در منحنی پوش اور با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳ و ۹ طبقه (تیر پیوند برشی) (۱۸) ۱۸
- شکل ۱۴-۲: تغییرات وزن سازه با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ طبقه (تیر پیوند خمشی) (۱۸) ۱۹
- شکل ۱۵-۲: تغییرات ضریب مقیاس میانگین با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ طبقه (تیر پیوند خمشی) (۱۸) ۲۰
- شکل ۱۶-۲: تغییرات شکل پذیری در منحنی پوش اور با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳ و ۹ طبقه (تیر پیوند خمشی) (۱۸) ۲۰
- شکل ۱۷-۲: تغییرات وزن سازه با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ طبقه (تیر پیوند برشی خمشی) (۱۸) ۲۱
- شکل ۱۸-۲: تغییرات ضریب مقیاس میانگین با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ طبقه (تیر پیوند برشی خمشی) (۱۸) ۲۲
- شکل ۱۹-۲: تغییرات شکل پذیری در منحنی پوش اور با افزایش طول تیر پیوند برای ساختمان ۳ و ۹ طبقه (تیر پیوند برشی خمشی) (۱۸) ۲۲
- شکل ۲۰-۲: تیپ بادبندهای استفاده شده در تحقیق قلعه نوی و نصرت زهی (۱۹) ۲۳
- شکل ۲۱-۲: نمونه ای از تیر پیوند استفاده شده در تحقیق BREMEN ۲۴
- شکل ۱-۳: منحنی های تنش کرنش آرمانی شده برای رفتار تک محوری مواد: مدل الاستو پلاستیک کامل (A)، مدل الاستیک با سخت شوندگی خطی (B)، مدل الاستیک با سخت شوندگی نمایی (C) و مدل RAMBERG-OSGOOD (D) ۲۸
- شکل ۲-۳: مدول تانژانت و پلاستیک ۲۹
- شکل ۳-۳: اثر بوشینگر ۳۰
- شکل ۴-۳: انواع کرنش سختی: ایزوتروپیک (A)، کینماتیک (B) و مستقل (C) ۳۰
- شکل ۵-۳: سطوح تسلیم فونمیزس و ترسکا در فضای تنشهای اصلی ۳۳
- شکل ۶-۳: سطوح تسلیم فونمیزس و ترسکا در فضای دو بعدی تنشهای انحرافی ۳۳
- شکل ۷-۳: سخت شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک در فضای چند محوری ۳۵
- شکل ۸-۳: انواع مختلف قاب های مهاربندی شده واگرا ۳۸
- شکل ۹-۳: منحنی هیسترتیک قاب خمشی و مهاربندی شده همگرا ۳۹
- شکل ۱۰-۳: منحنی هیسترتیک قاب مهاربندی شده ی واگرا ۳۹

- شکل ۳-۱۱: تعیین مقاومت تیر برشی بر مبنای هندسه ی قاب ۴۳
- شکل ۳-۱۲: روش طراحی پلاستیک ارائه شده توسط KASAI و POPOV ۴۴
- شکل ۳-۱۳: نیروهای ایجاد شده در مهاربند، تیر پیوند و قطعه تیر مجاور تیر پیوند در یک نمونه قاب مهاربندی شده
واگرا ۴۴
- شکل ۳-۱۴: تغییر نیروی محوری با تغییر زاویه ی بین تیر پیوند و مهاربند ۴۵
- شکل ۳-۱۵: تیر پیوند ونحوه ی قرارگیری تقویت ها ۴۶
- شکل ۴-۱: مفهوم گام و زیر گام در آنالیز غیر خطی (۲۸) ۵۱
- شکل ۴-۲: مدل و شرایط مرزی به همراه نمودار برش و لنگر خمشی آن (A) و توزیع نیروهای معمول در یک قاب
EBF (B) ۵۲
- شکل ۴-۳: دستگاه آزمایش استفاده شده توسط آرکه ۵۳
- شکل ۴-۴: نمونه ساخته شده برای صحت سنجی ۵۴
- الف: منحنی هیستریزیس نمونه UTA2 در کار تحلیلی ریچاردز و یوانگ و کار آزمایشگاهی آرکه ۵۴
- ب) منحنی هیستریزیس استخراج شده از مدل ۵۴
- شکل ۴-۵: صحت سنجی نتایج ۵۴
- شکل ۴-۶: مشخصات ظاهری المان SOLID45 ۵۵
- شکل ۴-۷: رفتار در نظر گرفته شده برای مدل ۵۶
- شکل ۴-۸: منحنی تنش کرنش تک محوره فولاد A992 ۵۷
- شکل ۴-۹: منحنی تنش کرنش تک محوره فولاد ST37 ۵۸
- شکل ۴-۱۰: ایجاد شبکه بندی با ابعاد متفاوت بر روی یک نمونه برای استخراج حالت بهینه ۵۸
- شکل ۴-۱۱: مقایسه پروتکل بارگذاری پیشنهادی آیین نامه ی AISC2002 و AISC2005 ۶۲
- شکل ۴-۱۲: مقطع تیر ورق استفاده شده ۶۴
- شکل ۴-۱۳: مدل شماره ۲۴ و مدل متناظر آن با یک سخت کننده ی کمتر (مدل شماره ۴۴) ۶۵
- شکل ۴-۱۴: منحنی هیستریزیس و تغییر شکل گام آخر دو نمونه ۶۷
- شکل ۴-۱۵: تفاوت رفتار پانل های میانی و کناری در نمونه ی شماره ۱۱ ۶۸
- شکل ۴-۱۶: دوران پلاستیک مدل های ساخته شده از نیمرخ IPE270 و مقایسه با ظرفیت مجاز ۶۹
- شکل ۴-۱۷: مراحل شکست تیر پیوند ساخته شده از نیمرخ IPE270 در محدودهی رفتاری بحث برانگیز .. ۷۰
- شکل ۴-۱۸: محل وقوع بیشینه ی کرنشهای پلاستیک در یک نمونه تیر با نسبت طولی $2/6 < P < 2/2$ در انتهای
بارگذاری به همراه منحنی هیستریزیس نمونه ۷۱
- شکل ۴-۱۹: منحنی هیستریزیس نمونه ۲۲ و نمونه متناظر آن با سخت کننده ی یک طرفه (نمونه ۳۲) ۷۲
- شکل ۴-۲۰: رفتار دو نمونه ی متناظر با سختکننده ی یک طرفه (نمونه ۱۶) و دو طرفه (نمونه ۶) ۷۳
- شکل ۴-۲۱: ضریب اضافه مقاومت مدل های ساخته شده از نیمرخ IPE270 ۷۴
- شکل ۴-۲۲: دوران پلاستیک مدل های ساخته شده از تیورق و مقایسه با ظرفیت مجاز ۷۵
- شکل ۴-۲۳: مقایسه ی کرنش پلاستیک در دو گروه نمونه ۷۶
- شکل ۴-۲۴: ضریب اضافه مقاومت مدل های ساخته شده از تیر ورق ۷۷

- شکل ۴-۲۵: مقایسه ی ظرفیت دورانی نمونه ها با نمونه های متناظر با یک سخت کننده ی کمتر ۷۸
- شکل ۴-۲۶: مقایسه ی ظرفیت دورانی نمونه ها با ظرفیت مجاز آنها در نمونه های با تعداد سخت کننده ی اولیه و سخت کننده ی کمتر ۷۸
- شکل ۴-۲۷: مقایسه ی تنشهای پلاستیک معادل در سه تیر پیوند با طول متوسط ۸۰
- شکل ۴-۲۸: منحنی هیستریزیس نمونه ۳۳ و نمونه متناظر آن با سخت کننده ی دو طرفه (نمونه ۲۳) ۸۱
- شکل ۴-۲۹: مقایسه ی تغییر ظرفیت چرخشی و نیروی نهایی نمونه ها با یک طرفه شدن سخت کننده ها در تیرهای پیوند با طول های مختلف ۸۲
- شکل ۴-۳۰: تغییر شکل نمونه شماره ۳۳ در گام های بارگذاری مختلف ۸۲
- شکل ۴-۳۱: تغییر ظرفیت چرخشی و نیرویی نمونه شماره ۳۳ بر اساس تغییر فاصله سخت کننده ها ۸۴
- شکل ۴-۳۲: تغییر ماکزیمم کرنشهای پلاستیک نمونه شماره ۳۳ بر اساس تغییر فاصله سخت کننده ها .. ۸۴
- شکل ۴-۳۳: توزیع تنش پلاستیک معادل در نمونه ها شماره ۵۵ تا ۵۷ در گام آخر بارگذاری ۸۵
- شکل ۴-۳۴: تغییر رفتار تیر پیوند با تغییر ضخامت سخت کننده ها ۸۶
- شکل ۴-۳۵: تغییر شکل و کرنش پلاستیک در نمونه های شماره ۴۹ و ۵۴ در گام آخر بارگذاری ۸۶
- شکل ۴-۳۶: ظرفیت چرخشی حاصل شده برای نمونه های خمشی در مقابل ظرفیت مجاز آیین نامه ۸۷
- شکل ۴-۳۷: تغییر شکل و کرنشهای پلاستیک (راست به چپ) برای نمونه ۳۷ ۸۹
- شکل ۴-۳۸: مقایسه ی شدت تنش ها در نمونه های ۳۰ و ۴۰ (راست به چپ) ۹۰
- شکل ۴-۳۸: ضریب اضافه مقاومت تیرهای بلند ۹۰
- شکل پ-۱: توابع شکل المان SHELL 181 ۹۹

فصل اول

۱-۱ مقدمه

زلزله با وارد نمودن آسیب‌های شدید به سازه‌ها، پل‌ها، شریان‌های حیاتی و سایر بناهای پایه‌ای که بر مبنای اصول صحیح لرزه‌ای طراحی و اجرا نشده‌اند می‌تواند باعث وقوع اختلالات وسیعی در جریان زندگی انسان‌ها و سایر موجودات گردد. طراحی لرزه‌ای سازه‌ها باید به گونه‌ای انجام شود که دو معیار اساسی ارضا شود. معیار اول این است که سازه باید سختی و مقاومت کافی داشته باشد تا تغییر مکان‌های اعضای غیر سازه‌ای آن تحت اثر زلزله‌های خفیف از مقدار مجاز تجاوز نکند. برای ارضای معیار دوم سازه باید دارای شکل پذیری کافی باشد تا تحت اضافه بار ناشی از زلزله‌های شدید فرو نریزد (۱).

در سیستم مهاربندی شده‌ی واگرا نیروهای محوری ایجاد شده در مهاربندها توسط برش و خمش در قسمتی از تیر که تیر پیوند نامیده می‌شود به ستون یا مهاربند مجاور منتقل می‌شود. جاری شدن فولاد در تیر پیوند رخ می‌دهد و بدین وسیله قسمت اعظم انرژی زلزله تلف خواهد شد که میزان آن بستگی به مشخصات و جزئیات این تیر دارد. برای کاربردهای لرزه‌ای، مهاربندها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در شرایط بارگذاری نهایی دچار کماتش نشوند. برای اطمینان از این امر ظرفیت نهایی تیر پیوند به دقت در نظر گرفته می‌شود و قاب مهاربندی شده‌ی واگرا بگونه‌ای طراحی می‌شود تا تحت بارگذاری شدید اغلب عملکرد غیرارتجاعی در تیر پیوند رخ دهد. بدین صورت تیرهای پیوند به صورت فیوزی عمل می‌کنند که مانع از کماتش مهاربندها می‌شوند. با توجه به عملکرد فیوز مانند تیر پیوند در طراحی قاب‌های واگرا ابتدا تیر پیوند و جزئیات آن محاسبه شده و پس از آن بقیه‌ی اجزای قاب طراحی می‌گردند که نشان‌دهنده‌ی اهمیت بالای طراحی صحیح این عضو دارد (۲).

فاکتور کلیدی که رفتار تیر پیوند را کنترل می‌کند طول آن است. تیرهای پیوند کوتاه در برش جاری شده در حالی که تیرهای پیوند بلند در اثر خمش جاری می‌شوند. تیرهای پیوند متوسط در اثر ترکیب برش و خمش جاری خواهند شد. مشاهده شده که عملکرد و جذب انرژی تیرهای پیوند کوتاه که در برش جاری می‌شود مناسب‌تر از عملکرد و جذب انرژی تیرهای پیوند متوسط و بلند می‌باشد. تحقیقات بسیار زیادی در گذشته بر روی رفتار تیر پیوند به ویژه تیرهای با طول کوتاه انجام گرفته و ضوابط آیین‌نامه نیز عمدتاً بر اساس تحقیقات صورت گرفته بر روی این نوع تیرها حاصل گردیده است. با توجه به تحقیقات محدودتری که در گذشته بر روی تیرهای متوسط و بلند صورت گرفته و همچنین ابهاماتی که در عملکرد این تیرها مشاهده شده در پژوهش حاضر تلاش شده است که رفتار این نوع تیرها مخصوصاً تیرهای متوسط با دقت بیشتری مورد بررسی قرار بگیرد (۳).



۱-۲ هدف موضوع و اهمیت آن

همانگونه که در مقدمه نیز ذکر گردید هدف اصلی این تحقیق ارزیابی رفتار تیرهای پیوند برشی به صورت مفصل و بررسی اجمالی برخی از ویژگی‌های رفتاری تیر پیوند بلند می‌باشد. در این راستا با بررسی رفتارهای غیر ایمن مشاهده شده در برخی از نمونه‌های تحقیقات پیشین (۴) (۵) سعی در شناسایی تاثیر پارامترهای مختلف بر این رفتارها و معرفی راه‌حلی برای آنها شده است. علاوه بر این سایر خصوصیات موثر در شکل‌پذیری تیرهای پیوند با طول متوسط و بلند نیز مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از مشخصات فولاد St37 که فولاد رایج مورد استفاده در صنعت ساختمان کشورمان می‌باشد (۶) ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. شایان ذکر است که ضوابط جاری مبحث دهم بر گرفته از استانداردهای آمریکایی می‌باشد در حالی که استانداردهای فولادهای مورد استفاده بر اساس استاندارد اروپایی و مخصوصاً استاندارد DIN آلمان می‌باشد (۶). بنابراین با توجه به تفاوت مشخصات فولادها ضروری است که بنا به مورد بر اساس شکل‌پذیری، سختی و مقاومت فولادها ضوابط بررسی گردد.

۱-۳ ساختار کلی

مروری بر مطالعات تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است در فصل دوم این پژوهش ارائه شده است. فصل سوم به بررسی روابط مربوط به تئوری پلاستیسیته، سطوح تسلیم، معیارهای سخت شوندگی و سایر مباحث تئوری مرتبط با موضوع می‌پردازد. در انتهای این فصل ضوابط جاری آیین‌نامه‌ها در زمینه‌ی قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا به اختصار بیان شده است. فصل چهارم به معرفی نرم افزار، المان‌های استفاده شده، جزئیات مدل‌سازی و روش تحلیل نتایج می‌پردازد. در فصل پنجم خلاصه‌ی مطالب، نتیجه‌ی پژوهش و پیشنهادات برای کارهای آتی مطرح شده است. در انتهای تحقیق نیز به ترتیب مراجع مورد استفاده در این پژوهش و ضمایم ارائه شده است.



فصل دوم

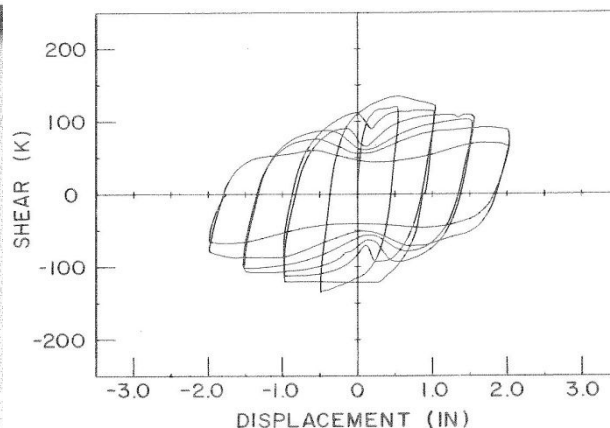
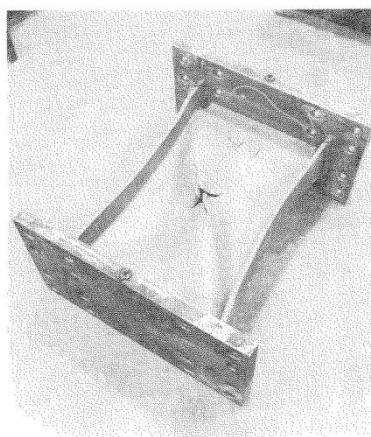
۱-۲ مقدمه

در اواسط دهه‌ی ۷۰ پوپوف و همکارانش سیستم مهاربندی واگرا را در دانشگاه کالیفرنیا ابداع کردند (۷) و اولین بار در کالیفرنیا به عنوان سیستم باربر جانبی مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های مطلوب این سیستم نظیر دارا بودن همزمان سختی و شکل‌پذیری مناسب، امکان ایجاد بازشوهای بزرگ در آن و اقتصادی بودن آن سبب گردید استفاده از آن در عرصه‌ی ساخت و ساز روز به روز وسیع‌تر گردد. علاوه بر این امروزه استفاده از این سیستم به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب بهسازی ساختمان‌ها و پل‌ها مد نظر می‌باشد.

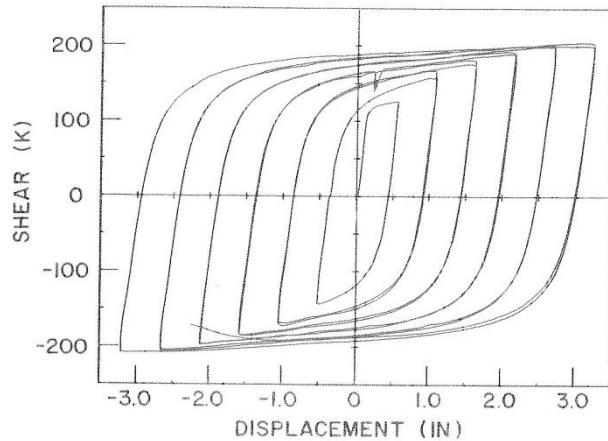
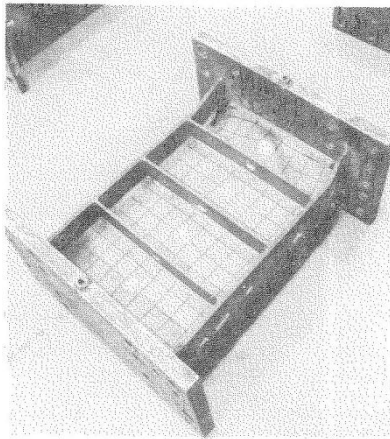
در این فصل از این تحقیق سعی شده است مروری مختصر بر تحقیقات انجام گرفته بر روی تیرهای پیوند در دو قسمت تحقیقات عددی و آزمایشگاهی ارائه گردد.

۲-۲ تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته

اولین مطالعه‌ی آزمایشگاهی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد آزمایش Popov و Hjelmstad در سال ۱۹۸۳ می‌باشد. در این آزمایش ۱۵ نمونه تیر پیوند با مقیاس کامل مورد آزمایش قرار گرفت تا خصوصیات کلی تیر و به طور ویژه رفتار کمانشی و بعد از کمانش آنها مشخص شود (۲). یکی از نتایجی که در این آزمایش مشاهده شد تاثیر سخت کننده‌ها در مقاومت و شکل‌پذیری و به طور کلی رفتار تیر پیوند می‌باشد که به عنوان نمونه منحنی هیسترتیک یکی از نمونه‌ها با سخت کننده و بدون آن در شکل ۱-۲ مشاهده می‌گردد (۲).



الف: تیر پیوند برشی بدون سخت کننده (۲)



ب: تیر پیوند برشی با سخت کننده (۲)

شکل ۲-۱: مقایسه منحنی هیسترتیک یک نمونه تیر پیوند برشی بدون سخت کننده و با سخت کننده

نتایج دیگری که در این آزمایش حاصل شد عبارتند از:

- تیر پیوند با رفتار برشی نسبت به تیر با رفتار خمشی قابلیت جذب انرژی بالاتری دارد و از بین مودهای شکست تیر برشی، تسلیم برشی جان بهتر از کمانش برشی جان است و سخت کننده های جان با به تاخیر انداختن کمانش جان تاثیر مطلوبی بر میزان اتلاف انرژی تیر پیوند دارند.
 - کمانش جان در مقایسه با کمانش بال تاثیر مخرب تری دارد و اندرکنش آنها از اثر هرکدام به تنهایی بیشتر است.
 - تیرهای پیوند خمشی امکان کمتری برای استفاده از سخت شوندگی کرنشی دارند (۲).
- Malley و Popov در سال ۱۹۸۳ مطالعه تجربی دیگری بر روی ۱۲ نمونه تیر پیوند با مقیاس کامل انجام دادند تا تاثیر سه عامل حساسیت رفتار تیر پیوند به نوع بارگذاری، جزئیات اتصال تیر پیوند به ستون و طراحی سخت کننده های جان و جزئیات آن را مورد بررسی قرار دهند. برای بررسی هر کدام از این سه عامل، ۴ نمونه با مشخصات متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. پارامتر اصلی در این مطالعه جذب انرژی تیر پیوند بوده است (۱).
- نتایج حاصله درباره تاثیر نوع بارگذاری نشان داد که تیرهای پیوندی که به درستی طراحی شده باشند بدون توجه به تاریخچه بارگذاری می توانند مقدار قابل توجهی انرژی را تلف نمایند. تغییر مکان های اولیه-ی بزرگ که باعث کمانش جان می شود ظرفیت اتلاف انرژی را نسبت به حالتی که تغییر مکان ها بطور تدریجی اضافه شده اند بیشتر کاهش می دهند ولی شکل پذیری در این دو حالت تفاوت چندانی ندارد. تیرهای پیوند برشی می توانند تغییر مکان مونوتونیک تا حدود ۲۰ درصد طول خود را بدون کاهش قابل ملاحظه ظرفیت تحمل نمایند (۱).



نتایج آزمایش همچنین نشان داد که در صورت طراحی مناسب، قرار دادن سخت کننده‌ها در دو طرف تیر یا در یک طرف تیر تاثیر یکسانی دارد. در صورتی که سخت کننده‌ها به هر دو بال جوش داده نشوند کاهش ظرفیت اتلاف انرژی در تیر پیوند بوجود خواهد آمد. این مسئله بخصوص در حالت بعد از کمانش جان صادق است. با این وجود می توان سخت کننده‌ها را به بال بالایی جوش نداد که دلیل آن اثر کمکی دال سقف می باشد (۱).

ملاحظه شد که نزدیک کردن بیش از اندازه‌ی سخت کننده‌ها به یکدیگر باعث می شود تا گسیختگی ناگهانی قبل از وقوع کمانش در جان اتفاق بیفتد و بنابراین توصیه شد که فاصله‌ی سخت کننده‌ها حداقل ۲۰ برابر ضخامت جان تیر پیوند باشد (۱).

مقایسه نمودارهای کرنش سخت کننده‌ها نشان داد که قبل از جاری شدن برشی تنشی در سخت کننده‌ها بوجود نمی‌آید و وقتی کمانش رخ می دهد سخت کننده‌ها در اثر ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی جاری می‌شوند و سخت کننده‌هایی که در مجاورت پانل کمانش کرده قرار دارند بیشترین میزان تنش را تحمل می کنند (۱).

Foutch در سال ۱۹۸۹ آزمایشی را بر روی یک سازه‌ی شش طبقه با مقیاس کامل که سیستم مقاوم جانبی آن ترکیبی از نوع قاب مهارشده‌ی واگرا و قاب خمشی بود انجام داد تا عملکرد سازه واقعی را بررسی کند (۸).

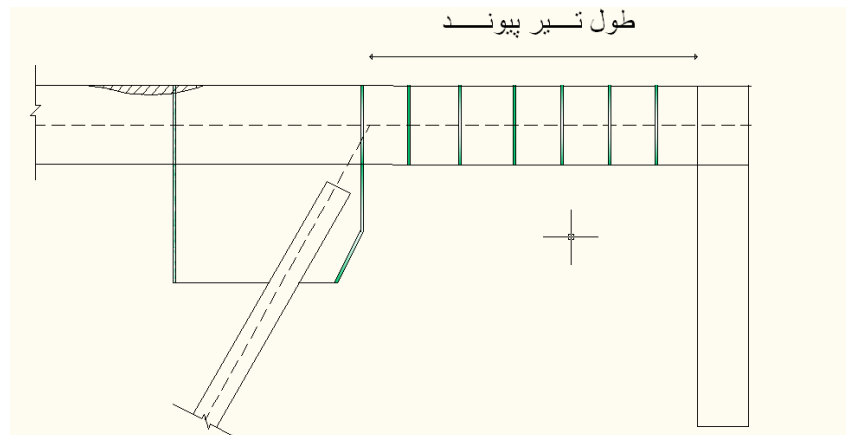
مشاهده شد که مقاومت سازه تقریباً سه برابر بیشتر از ظرفیت طراحی است و حدوداً پنج برابر بیشتر از برش پایه طراحی است که در آیین‌نامه مشخص شده است. این امر ناشی از اضافه مقاومت مصالح، مقاومت طراحی اضافی در قاب‌های خمشی، سخت شوندگی کرنشی، عمل ترکیبی ناشی از وجود دال سقف و توزیع بار غیراربعجانبی بوده است. اکثر این اضافه مقاومت ناشی از تیر پیوند و چشمه‌ی اتصال ستون بوده است که در برش جاری شده اند (۸).

عملکرد مناسب تیر پیوند در این آزمایش باعث شد که ضریب اضافه مقاومتی بین ۱/۸ تا ۲ برای طراحی در این تیرهای توصیه شود (۸).

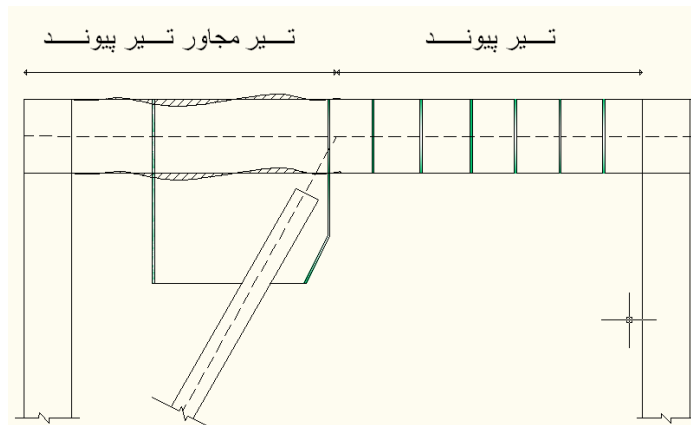
Popov و Engelhardt در سال ۱۹۹۲ آزمایش‌هایی را بر روی چند نمونه تیر پیوند بلند متصل به ستون با هدف تحقیق درباره‌ی ناپایداری های محتمل قطعه تیر خارج از تیر پیوند، درک مکانیزم‌های جاری شدن و مودهای گسیختگی غالب در تیرهای پیوند بلند، اثرات استفاده از سخت کننده‌ها در به تاخیر انداختن کمانش موضعی در تیرهای پیوند بلند انجام دادند (۹).



در این آزمایش‌ها دو نوع ناپایداری در قطعه تیر خارج تیر پیوند مشاهده شد. اولین ناپایداری توسعه‌ی کمانش در بال بالایی قطعه تیر مجاور تیر پیوند در محل اتصال صفحه اتصال مهاربند در مجاورت تیر پیوند می‌باشد (شکل ۲-۲). این ناپایداری منجر به گسیختگی نمی‌شود ولی تاثیر مخرب قابل توجهی در پاسخ هیسترتیک و شکل‌پذیری قاب‌های مهار بندی شده واگرا دارد. ناپایداری بعدی در قطعه تیر خارج تیر پیوند کمانش پیچشی جانبی کلی تیر مجاور تیر پیوند است که باعث کاهش چشم‌گیر مقاومت و شکل‌پذیری قاب می‌شود (شکل ۲-۳) (۹).



شکل ۲-۲: ناپایداری نوع اول مشاهده شده در قطعه تیر خارج تیر پیوند



شکل ۲-۳: ناپایداری نوع دوم مشاهده شده در قطعه تیر مجاور تیر پیوند

این مطالعه احتمال ایجاد ناپایداری در تیر مجاور تیر پیوند را آشکار نمود که مخصوصاً در مورد ناپایداری نوع دوم باعث کاهش مقاومت و شکل‌پذیری قابهای EBF می‌شود. در حالی که تسلیم در تیر مجاور تیر پیوند تاثیر زیادی در کاهش مقاومت و شکل‌پذیری قابهای EBF ندارد (۹).

اولین ناپایداری در تیر پیوند در بال بالایی تیر پیوند در محل اتصال با ستون مشاهده شد. با ادامه‌ی بارگذاری ناپایداری بعدی در بال بالایی تیر پیوند در محل صفحه اتصال با مهاربند اتفاق افتاد و در نهایت ناپایداری در محل جان تیر پیوند به وقوع پیوست (۹).

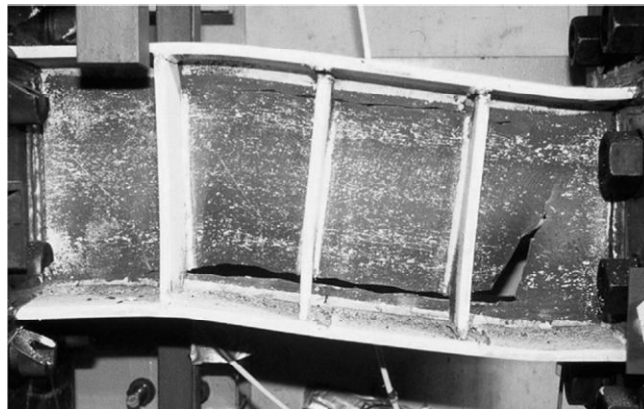
مد گسیختگی غالب، شکست بال تیر پیوند در محل اتصال با ستون می باشد. این نوع گسیختگی در دوران غیر ارتجاعی بسیار کمتر از حد ذکر شده در آیین نامه‌ها اتفاق می افتد و بسیار مخرب می باشد. با توجه به نتایج این تحقیق پیشنهاد شد که تیرهای پیوند بلند نباید به صورت متصل به ستون به کار برده شود (۹). نتایج دیگری که در این آزمایش حاصل شد عبارتند از:

- برای نمونه‌ها با بال ضخیم کمانش ضعیف در محل اتصال تیر پیوند با ستون مشاهده شد و هیچگونه کمانشی در بال بالایی تیر در محل چشمه اتصال با ستون مشاهده نشد و در نتیجه برای مقاطع با بال ضخیم استفاده از تیر پیوند طولانی متصل به ستون نیازمند تحقیقات بعدی می باشد.
- فقط برای تیرهای بسیار طولانی تسلیم در انتهای تیر پیوند و ناپایداری‌ها از نوع خمشی (کمانش بال، کمانش پیچشی جانبی) می باشد و برای نمونه‌های با طول کوتاه‌تر تسلیم‌ها و ناپایداری‌ها ناشی از ترکیب رفتار برشی و خمشی می باشد. بنابراین توصیه شد به جای $1/6 \text{ Mp/Vp}$ تا $2/6 \text{ Mp/Vp}$ ، محدوده‌ی $1/6 \text{ Mp/Vp}$ تا 3 Mp/Vp برای رفتار اندرکنشی در نظر گرفته شود.
- در تیرهای برشی مد غالب گسیختگی، کمانش جان می باشد که با تقویت‌هایی به فواصل مساوی می توان این مد را به تاخیر انداخت. در تیرهای بلند، کمانش بال با استفاده از تقویت‌های انتهایی به خوبی کمانش جان به تاخیر نمی افتد ولی در عوض شروع کمانش بال در یک تیر پیوند بلند پدیده‌ی آنچنان خطرناکی نیست. به طوری که برخی از نمونه‌ها با وجود کمانش بسیار شدید بال، کاهش مقاومت ناچیزی نشان دادند (۹).

در سال ۲۰۰۴ Engelhardt و همکاران آزمایش‌هایی را بر روی مقاطع بال پهن با طول‌های مختلف که جنس همگی آنها از فولاد ASTM A992 بود انجام دادند. فولاد ASTM A992 فولادی جدید در استاندارد آمریکایی می باشد که جایگزین فولادهای قدیمی تر مثل ASTM A36 در صنعت ساختمان شده است. حد جاری شدن این نوع فولاد $F_y=345 \text{ MPa}$ می باشد که نسبت به فولاد ASTM A36 که دارای حد جاری شدن $F_y=250 \text{ MPa}$ می باشد از مقاومت جاری شدن بالاتری برخوردار است ولی شکل پذیری کمتری نسبت به آن دارد. در این مجموعه آزمایش‌ها فاکتور اضافه مقاومت تیر پیوند، محدودیت‌های لاغری بال و تاثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار تیر پیوند مورد بررسی قرار گرفت (۱۰).



پدیده‌ی قابل ملاحظه‌ای که در این آزمایش‌ها مشاهده شد و در آزمایش‌های قبلی به وضوح اشاره نشده بود شکست جان است که از جوش سخت‌کننده‌ها آغاز می‌شود. تمامی نمونه‌های تیر پیوند با طول کمتر از حد برشی در اثر شکست جان تیر پیوند گسیخته شدند (شکل ۲-۴). شکست جان تیر پیوند در گزارش‌های قبلی بیان شده بود، ولی این شکست‌ها عموماً بعد از گسترش شدید کمانش موضعی جان اتفاق افتاده بود. شکست‌های گزارش شده در آزمایش‌های قبلی در پانل‌های جان تیر پیوند در محل تغییرشکل‌های موضعی بزرگ ناشی از کمانش بال یا جان، بعد از این رخ می‌داد که ناپایداری غیر ارتجاعی باعث کاهش قابل ملاحظه در نیروهای تیر پیوند می‌شد. چنین شکست‌هایی در این برنامه آزمایشی نیز ملاحظه شد (۱۰). برخلاف شکست‌هایی که در آزمایش‌های قبلی گزارش شده بود، تعدادی از نمونه‌ها در این برنامه‌ی آزمایش قبل از اینکه کمانش جان رخ دهد، و یا تنها بعد از کمانش بسیار ملایم آن، دچار شکست در جان در محل انتهای جوش سخت‌کننده‌ها شدند. تحلیل گسیختگی نشان می‌دهد که دلیل این امر تمرکز تنش در انتهای جوش سخت‌کننده بوده، زیرا سخت‌کننده بیش از اندازه نزدیک به جوش شیاری بال به جان مقطع ساخته شده قطع شده بود (۱۰).



شکل ۲-۴: شکست جان در محل انتهای جوش سخت‌کننده به بال (۱۰)

در سال ۲۰۰۵ Okazaki و همکاران مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای بررسی بیشتر فاکتور اضافه مقاومت، محدودیت لاغری بال و تاثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار تیر پیوند انجام دادند (۱۱). نتایج این آزمایش نشان داد که محدودیت‌های لاغری بال برای تیرهای پیوند برشی همانگونه که در مطالعات قبلی نیز تایید شده بود می‌تواند از مقدار کنونی آیین نامه‌ها یعنی $0/3 (E/F_y)^{1/5}$ به مقدار $0/38 (E/F_y)^{1/5}$ افزایش پیدا کند ولی برای تیرهای با طول بیشتر نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد (۱۱). نتیجه‌ی دیگری که از این آزمایش حاصل شد بررسی ضریب اضافه مقاومت تیر پیوند بود. مشاهده شد ضرایب اضافه مقاومت همگی تیرها از $1/11$ تا $1/47$ متغیر است که مقدار میانگین آن $1/35$ بوده است. اگر

