



دانشکده عمران

مطالعه عددی اثر لاغری بال و جان بر روی شکل پذیری ستون های I شکل فولادی

نگارش

کامران نصیری

استاد راهنما: دکتر سید محمد رضا مرتضوی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته عمران_ زلزله

مهر ۱۳۹۲

باسمه تعالی



تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب کامران نصیری متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه/رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی است.

نام و نام خانوادگی دانشجو

کامران نصیری

امضاء

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول

رفتار خمیری (پلاستیک)

۲-۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۲-۱- آزمایشهای پایه.....	۳
۱-۲-۱- آزمایش کشش.....	۴
۲-۲-۱- نمودار تنش حقیقی - کرنش حقیقی.....	۶
۳-۲-۱- آزمایش فشار - اثر بوشینگر - نا ایزوتروپ.....	۱۲
۴-۲-۱- اثرات نرخ کرنش و دما.....	۱۵
۵-۲-۱- اثر فشار هیدرواستاتیک عدم قابلیت تراکم.....	۱۶
۶-۲-۱- فرضی نمودن نمودارهای تنش و کرنش مدل‌های دینامیکی و سینماتیکی.....	۱۷
۷-۲-۱- معادلات فرضی برای منحنی‌های تنش و کرنش.....	۲۲
۳-۱- معیار برای تسلیم.....	۲۳
۱-۳-۱- مقدمه.....	۲۳
۲-۳-۱- مثالهایی از معیارهای تسلیم.....	۲۴
۳-۳-۱- سطح تسلیم - فضای تنش وسترگارد.....	۳۲
۴-۳-۱- پارامتر تنش لود - اثبات عملی معیارهای تسلیم.....	۴۱
۵-۳-۱- سطوح تسلیم ثانوی - بارگذاری و باربرداری.....	۴۵

فصل دوم

عملکرد هیستریزیس ستونهای I شکل

۱-۲- اصول فلسفه طراحی لرزه ای.....	۵۲
۱-۱-۲- مقدمه.....	۵۲
۲-۱-۲- تحقیقات قبلی بر روی تیر ستونهای فولادی.....	۵۳
۳-۱-۲- مشخصه هائی که بر شکل پذیری تیر ستون موثرند.....	۵۵
۲-۲- طراحی ستونهای نمونه.....	۵۷
۱-۲-۲- توصیفات عمومی.....	۵۷
۲-۲-۲- شکل پذیری مورد نیاز در ستونها.....	۵۷

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵۷.....	۳-۲-۲- مقادیر $\frac{P}{P_y}$ که توسط گروه تحقیقاتی NZNSEE پیشنهاد میگردد.....
۵۸.....	۴-۲-۲- محدودیت لاغری بال و جان که بوسیله NZNSEE پیشنهاد میگردد.....
۵۹.....	۵-۲-۲- محدودیت لاغری بال و جان که توسط AISC,LRFD پیشنهاد میگردد.....
۶۰.....	۶-۲-۲- جزئیات مقاطع ستونها.....
۶۵.....	۳-۲- فرآیند آزمایش.....
۶۵.....	۱-۳-۲- نیرو و تغییر مکان.....
۶۵.....	۲-۳-۲- آزمایش ستونها.....
۶۶.....	۴-۲- مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج تجربی.....
۶۶.....	۱-۴-۲- مقدمه.....
۶۶.....	۲-۴-۲- مشاهدات پژوهش.....
۶۷.....	۳-۴-۲- عملکرد ستون نمونه اول.....
۶۹.....	۴-۴-۲- عملکرد ستون دوم.....
۷۲.....	۵-۴-۲- عملکرد ستون شماره سوم.....
۷۴.....	۶-۴-۲- عملکرد ستون شماره چهارم.....
۷۶.....	۷-۴-۲- عملکرد ستون شماره پنجم.....
۷۸.....	۸-۴-۲- عملکرد ستون ششم.....
۸۰.....	۹-۴-۲- عملکرد ستون هفتم.....
۸۲.....	۵-۲- بحث در مورد نتایج آزمایشگاهی.....
۸۲.....	۱-۵-۲- جنبه های مباحثه در مورد نمونه های آزمایشگاهی و نتایج آنها.....

فصل سوم

مدلسازی و تحلیل در نرم افزار ABAQUS

۸۶.....	مقدمه.....
۸۹.....	۱-۳- مروری بر نرم افزار ABAQUS.....

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۳- نحوه مدل‌سازی اجزاء محدود اعضا.....	۸۷
۳-۳- تایید و اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود اتصالات.....	۸۷
۱-۳-۳- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نمونه‌های آزمایشگاهی.....	۸۹
۴-۳- سخت شدگی Hardening.....	۹۱
۱-۴-۳- رفتار تک محوری مصالح.....	۹۱
۲-۴-۳- رفتار چند محوری مصالح.....	۹۲
۳-۴-۳- قوانین سخت شدگی.....	۹۳
۱-۳-۴-۳- قوانین سخت شدگی ایزوتروپیک.....	۹۳
۲-۳-۴-۳- قوانین سخت شدگی سینماتیک Kinematic.....	۹۴
۵-۳- بارگذاری و تحلیل مدل اجزاء محدود نمونه‌های آزمایشگاهی.....	۹۸
۶-۳- تحلیل.....	۱۰۰
۷-۳- نمودار هیستریزیس.....	۱۱۳
۱-۷-۳- فرمول بندی مدل Bouc-Wen.....	۱۱۴
۲-۷-۳- محاسبه انرژی مستهلک شده در سازه.....	۱۱۴
۳-۷-۳- رسم نمودار هیستریزیس.....	۱۱۵
۴-۷-۳- زوال مقاومت Strength Degradation.....	۱۱۵
۵-۷-۳- زوال سختی Stiffness Degradation.....	۱۱۶
۶-۷-۳- Pinching Effect.....	۱۱۷
۷-۷-۳- اثر نیروی P-Delta (کمانش) در نمودار هیستریزیس.....	۱۱۷
۸-۳- توزیع تنش فن میسر.....	۱۱۹

فصل چهارم

نتیجه گیری

۱- ستون شماره ۱.....	۱۲۴
۲- ستون شماره ۲.....	۱۲۴
۳- ستون شماره ۳.....	۱۲۴
۴- ستون شماره ۴.....	۱۲۵

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۲۵	۴-۵ ستون شماره ۵.....
۱۲۵	۴-۶ ستون شماره ۶.....
۱۲۶	۴-۷ ستون شماره ۷.....
۱۲۶	۴-۸ نتایج.....
۱۲۷	۴-۹ پیشنهادات جهت تحقیقات بعدی.....
۱۲۸	منابع.....

فهرست جداول

صفحه	جدول
۵۸.....	جدول ۱-۲ مقادیر $\frac{P}{P_y}$ ارائه شده توسط گروه تحقیقاتی NZNSEE
۵۹.....	جدول ۲-۲ محدودیت لاغری پیشنهادی توسط گروه تحقیقاتی NZNSEE با $F_y = ۲۵۰$ Mpa
۶۰.....	جدول ۳-۲ محدود نسبت عرض به ضخامت المانهای فشاری پیشنهادی LRFD-AISC
۶۲.....	جدول ۴-۲ مشخصات هندسی و خواص مکانیکی نمونه‌های آزمایش شده
۸۴.....	جدول ۵-۲ مربوط به مقادیر آزمایشگاهی H_{Max} و ضریب افزایش مقاومت
۹۰.....	جدول ۱-۳ نمونه های اتصال آزمایشگاهی
۹۹.....	جدول ۲-۳ تاریخچه بارگذاری
۱۰۱.....	جدول ۳-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۱
۱۰۳.....	جدول ۴-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۲
۱۰۵.....	جدول ۵-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۳
۱۰۷.....	جدول ۶-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۴
۱۰۹.....	جدول ۷-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۵
۱۱۱.....	جدول ۸-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۶
۱۱۳.....	جدول ۹-۳ مساحت نمودار هیستریزیس در شکل پذیری های مختلف در نمونه ۷

فهرست نمودار

نمودار	صفحه
نمودار ۳-۱- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۱	۱۰۰
نمودار ۳-۲- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۲	۱۰۲
نمودار ۳-۳- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۳	۱۰۴
نمودار ۳-۴- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۴	۱۰۶
نمودار ۳-۵- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۵	۱۰۸
نمودار ۳-۶- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۶	۱۱۰
نمودار ۳-۷- نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و مطالعه عددی ستون ۷	۱۱۲

فهرست اشکال

شکل	صفحه
شکل ۱-۱ نمونه کشش.....	۴
شکل ۲-۱ نمودار تنش اسمی- کرنش مهندسی.....	۵
شکل ۳-۱ نمودار تنش کرنش حقیقی.....	۹
شکل ۴-۱ نمودار کرنش حقیقی در مقابل کرنش حقیقی برای چند نوع مصالح.....	۱۰
شکل ۵-۱ تنش حقیقی در مقابل کرنش حقیقی روی محورهای لگاریتمی.....	۱۰
شکل ۶-۱ فرضیه‌های اثر بوشینگر.....	۱۴
شکل ۷-۱ اثر نرخ کرنش.....	۱۵
شکل ۸-۱ اثر دما.....	۱۶
شکل ۹-۱ نمودارهای خزش.....	۱۶
شکل ۱۰-۱ مدل دینامیکی فرضی کردن تنش کرنش.....	۱۷
شکل ۱۱-۱ مدل دینامیکی فرضی کردن تنش کرنش.....	۱۸
شکل ۱۲-۱ مدل های سینماتیکی فرضی کردن تنش کرنش.....	۲۰
شکل ۱۳-۱ نمودار تنش کرنش برای مدل مربوط به شکل (۱-۱۲).....	۲۲
شکل ۱۴-۱ تنش های مرکب در استوانه جدار نازک.....	۲۴
شکل ۱۵-۱ نظریه تنش ماکزیمم.....	۲۵
شکل ۱۶-۱ نظریه کرنش ماکزیمم.....	۲۶
شکل ۱۷-۱ نظریه تنش برشی ماکزیمم.....	۲۸
شکل ۱۸-۱ نظریه انرژی پیچشی.....	۲۹
شکل ۱۹-۱ نمودار تسلیم.....	۳۲

- شکل ۱-۲۰ فضای تنش های وسترگارد..... ۳۴
- شکل ۱-۲۱ صفحه π ۳۶
- شکل ۱-۲۲ تصویر P روی صفحه π ۳۷
- شکل ۱-۲۳ تصویر σ_1 روی صفحه π ۳۸
- شکل ۱-۲۴ دایره فن میسز و شش ضلعی ترسکا..... ۳۸
- شکل ۱-۲۵ استوانه های فن میسز و ترسکا..... ۳۹
- شکل ۱-۲۶ حدود منحنی های تسلیم خاص..... ۴۱
- شکل ۱-۲۷ نتایج آزمایش لود..... ۴۳
- شکل ۱-۲۸ نتایج آزمایش لود..... ۴۳
- شکل ۱-۲۹ نتایج حاصله از آزمایش تیلر و کوئینی..... ۴۴
- شکل ۱-۳۰ نتایج آزمایشهای تیلر و کوئینی..... ۴۵
- شکل ۱-۳۱ نتایج آزمایش وایشینگر..... ۴۵
- شکل ۱-۳۲ بردار نمو تنش برای بارگذاری..... ۴۷
- شکل ۱-۳۳ منحنی های تسلیم بعدی..... ۴۸
- شکل ۱-۳۴ منحنی های تسلیم اولیه و بعدی..... ۴۹
- شکل ۱-۳۵ مدل سینماتیکی برای معیار ترسکا..... ۵۰
- شکل ۱-۲ چیدمان نمونه های آزمایش..... ۶۳
- شکل ۲-۲ جزئیات نمونه اول تا هفتم آزمایشگاهی..... ۶۴
- شکل ۲-۳ تاریخچه بارگذاری..... ۶۵
- شکل ۲-۴ نمونه ۱ در انتهای آزمایش..... ۶۸
- شکل ۲-۵ منحنی های هیستریزس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۱..... ۶۹

- شکل ۲-۶ نمونه ۲ در انتهای آزمایش ۷۱
- شکل ۲-۷ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۲ ۷۱
- شکل ۲-۸ نمونه ۳ در انتهای آزمایش ۷۳
- شکل ۲-۹ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۳ ۷۳
- شکل ۲-۱۰ نمونه ۴ در انتهای آزمایش ۷۵
- شکل ۲-۱۱ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۴ ۷۵
- شکل ۲-۱۲ نمونه ۵ در انتهای آزمایش ۷۷
- شکل ۲-۱۳ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۵ ۷۷
- شکل ۲-۱۴ نمونه ۶ در انتهای آزمایش ۷۹
- شکل ۲-۱۵ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۶ ۷۹
- شکل ۲-۱۶ نمونه ۷ در انتهای آزمایش ۸۱
- شکل ۲-۱۷ منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان نمونه ۷ ۸۱
- شکل ۳-۱ مشخصات هندسی اتصالات آزمایشگاهی ۸۹
- شکل ۳-۲ عضو مش‌بندی شده با المان‌های $S\&R$ ۹۱
- شکل ۳-۳ رفتار الاستو - پلاستیک ۹۲
- شکل ۳-۴ سیر تکاملی سطوح جاری شدن در بارگذاری دو محوری ۹۳
- شکل ۳-۵ رفتارهای سخت‌شدگی استاندارد ۹۴
- شکل ۳-۶ نمایی از سخت‌شدگی خطی و غیر خطی ایزوتروپیک ۹۴
- شکل ۳-۷ اثر پوشینگر ۹۵
- شکل ۳-۸ کاهش پلاستیک ۹۵
- شکل ۳-۹ خزش سیکلی ۹۵

- شکل ۳-۱۰ خستگی نرمی ۹۶
- شکل ۳-۱۱ نحوه نصب و برپایی نمونه‌ها در آزمایشگاه ۹۷
- شکل ۳-۱۲ شرایط مرزی در نشر گرفته شده در مدل عددی ABAQUS ۹۷
- شکل ۳-۱۳ تاریخچه بارگذاری ۹۸
- شکل ۳-۱۴ الف) نمودار بار - زمان ب) نمودار تغییر شکل - زمان ج) نمودار هیستریزیس ۱۱۵
- شکل ۳-۱۵ زوال مقاومت ۱۱۵
- شکل ۳-۱۶ زوال مقاومت منحنی پوش آور در ساختمان ارتفاع متوسط ۱۱۶
- شکل ۳-۱۷ الف) زوال مقاومت سیکلی ب) زوال مقاومت درون - سیکلی ۱۱۶
- شکل ۳-۱۸ زوال سختی ۱۱۷
- شکل ۳-۱۹ Pinching Effect ۱۱۷
- شکل ۳-۲۰ نمودار مهاربند CBF تحت بارگذاری متناوب ۱۱۸
- شکل ۳-۲۱ نمودار مهاربند همراه با مراحل کمانش عضو ۱۱۸
- شکل ۳-۲۲ توزیع تنش فون میز برای هفت نمونه در انتهای بارگذاری ۱۲۲

فصل اول

عملکرد پلاستیک (غیره خطی)

۱-۱- مقدمه

علم مربوط به مطالعه و بحث و تحقیق درباره خاصیت خمیری اجسام (پلاستیسیته) را می‌توان بدو قسمت متمایز از یکدیگر بترتیب زیر تقسیم کرد:

- ۱- حالتی که کرنشهای خمیری در حدود یا نزدیک کرنشهای ارتجاعی میباشد و بهمین علت میگویند که جسم در حالت ارتجاعی خمیری یا الاستوپلاستیک قرار دارد.
- ۲- حالتی کرنشهای خمیری با مقایسه کرنشهای ارتجاعی خیلی بزرگ بوده و در نتیجه میتوان از کرنشهای ارتجاعی در مقابل کرنشهای خمیری صرفنظر کرد.

حالت اول بیشتر برای مهندسیین محاسب و طراح در انجام محاسبات ساختمانهای فلزی و سازه‌ها، بکار میرود و بحث و تجزیه و تحلیل مسائل مربوط بحالت ارتجاعی خمیری بدون استفاده از کامپیوتر امکان‌پذیر نیست و از سالهای ۱۹۶۰ به بعد شروع به حل این مسائل با استفاده از کامپیوتر گردید. حالت دوم بطور کلی برای مهندسیین تولید جهت طرح ماشینها و دستگاههای نورد، کشیدن سیمها و حدیده‌کاری، چکش‌کاری، تزریق فلزات، فرم دادن قطعات و ایجاد تغییر شکل دائمی در آنها قابل استفاده است.

تاریخ علم حالت خمیری از سال ۱۸۶۴ که ترسکا (TRESKA) نتایج کارهای خودش را درباره سنبه زنی و حدیده‌کاری و تزریق منتشر کرد شروع می‌شود. او در این موقع با آزمایشهایی که انجام داد مبنای تسلیم را بوسیله فرمول نشان داد. چند سال بعد با استفاده از نتایج ترسکا، سنت و نانت (SAINT-VENANT) ولوی (LEVY) پایه‌های تئوری جدید حالت خمیری را بیان کردند. برای ۷۵ سال بعدی پیشرفت خیلی کند و ناهموار بود، گر چه کمک مهمی توسط فن میسز و هنکی (HENCKY)، پراند تل (PRANDTL) و سایرین شد، تقریباً فقط از سال ۱۹۴۵ بود که نظریه به شکلی پدیدار گشت که از آن موقع کوششهای متمرکزی بوسیله بسیاری از پژوهندگان انجام گرفت که با سرعت زیادی به پیش میرود. خلاصه تاریخچه پژوهشگران بوسیله هیل (HILL) و وسترگارد (WESTERGAARD) به نحو شایسته‌ای بیان شده است.

نظریه‌های خمیری به دو دسته تقسیم میشوند: نظریه‌های فیزیکی و نظریه‌های ریاضی. نظریه‌های فیزیکی در پی آنست که علت جاری شدن خمیری فلزات را در یابد. وقتیکه مصالح از نقطه نظر میکروسکوپی دیده شود، کوشش این است که معلوم گردد برساتمها- کریستالها و دانه‌های مصالحی که در حالت جریان خمیری می‌باشد چه می‌آید. نظریه‌های ریاضی از طرف دیگر در طبیعت بصورت

حادثه منطقی به موضوع توجه کرده سعی میکند که آنرا فرمول بندی نموده و در حالت بزرگ و مرئی بشکل قابل استفاده در آورد بدون اینکه بطور عمیق به مباحث فیزیکی توجه داشته باشد. امید احتمالی البته این است که بالاخره ایندو نظریه یکی شده و حالت و وضع مصالح را در حالت خمیری تعیین نموده و مبنائی برای استفاده هر عملی به مهندسين بدهد. در این بخش بیشتر روی فرضیه‌های ریاضی اقدام شده است طوری که این فرضیه‌ها از نوع فیزیکی کاملاً متمایز است. فرضیه‌های فیزیکی توسط فیزیکدانها مخصوص فیزیکدانهای حالت جامد مورد بحث و مطالعه واقع می‌شود.

بحث دربارهٔ حالت جریان خمیری در فلزات بصورت زیر از طریق درک مستقیم انجام می‌شود: هرگاه نواری از فولاد در نظر گرفته شود که یک طرف آن درگیره‌ای ثابت شده و بطرف دیگرش نیروی خمشی وارد آید، طرف آزاد خم می‌گردد. اگر مقدار نیروی وارده زیاد نباشد وقتی نیرو برداشته شود انتهای آزاد نوار بحالت اولیه برگشت خواهد یافت طوری که هیچگونه تغییر شکل محسوس در نوار باقی نمی‌ماند. هرگاه نیروی وارد به انتهای آزاد بزرگ باشد پس از برداشت نیرو دیگر جسم بحالت اول بر نمی‌گردد و مقداری از تغییر شکل در آن بطور دائم خواهد ماند و گفته می‌شود که تغییر شکل خمیری در جسم ایجاد گردیده است. منظور ما این نیست که معلوم کنیم چرا تغییر شکل خمیری در جسم تولید شده است بلکه می‌خواهیم تعیین کنیم که از نظر عوامل وارد بجسم مانند تنشها- کرنشها- و بارها چه پدیده‌هایی در جسم بوجود آمده است.

بطور خلاصه، حالت خمیری عبارتست از خاصیت اجسام سخت وقتی که تحت اثر بارهای خارجی تغییر شکل دائمی در آنها ایجاد شود، حالت ارتجاعی یا الاستیسیته عبارتست از خاصیت جسم سخت که تغییر شکل حاصله در آنها با برداشتن بار از بین رفته و بشکل اول برگشت پیدا کند.

نظریهٔ حالت خمیری اجسام را میتوان به دو قسمت تقسیم کرد. در یک قسمت عملیات تغییر فرم دادن فلزات مانند چکش کاری- حدیده کاری- تزریق- نوردکاری و غیره بررسی می‌شود که در آنها تغییر شکلهای خمیری (پلاستیکی) به مقدار زیاد مشاهده می‌شود. برای این نوع مسائل می‌توان از کرنشهای ارتجاعی صرف نظر کرد و فلز را می‌توان خمیری کامل فرض نمود. در قسمت دیگر دسته‌ای از مسائل قرار می‌گیرد که مقدار کرنشهای خمیری در مقابل کرنشهای ارتجاعی کوچک است این قسمت یا نوع دوم از کرنشها برای طراحان ماشینها و محاسبان سازه‌ها در درجه اول اهمیت است. با توجه فراوانی که اخیراً روی تقلیل وزن هواپیما- موشکها- کشتی‌های فضائی و نظایر آنها بکار میرود دیگر طراحان این دستگاهها نمی‌توانند ضرائب اطمینان را در سطح بالا در نظر بگیرند و میباید که حداکثر نسبت بار به وزن را در محاسبات بدست آورند. این نوع محاسبه مطمئناً در ناحیهٔ پلاستیک انجام خواهد شد. حتی در موارد استعمال سادهٔ صنعتی رقابت شدیدی روی کاربرد مصالح و بازده بالاتر وجود دارد.

۱-۲- آزمایشهای پایه

در این بخش نتایج بعضی آزمایشهای مبنا روی فلزات نشان داده شده است منحنی تنش- کرنش در

مورد کشش که اساس تئوری پلاستیسیته می‌باشد بطور تفصیل آمده است. اثر بارگذاری معکوس - کرنش، دما و فشار هیدرواستاتیک بطور خلاصه بحث شده است. منحنی‌های تصویری تنش - کرنش و نمونه‌های متعددی از مصالح و عمل آنها در آزمایشها شرح داده شده است.

۱-۲-۱- آزمایش کشش

ساده ترین و عمومی ترین آزمایشها که مهمترین آنها نیز می‌باشد، آزمایش کشش ساده است. یک نمونه استوانه‌ای شکل که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است در داخل ماشین قرار داده می‌شود، بار بتدریج اضافه می‌شود، تغییرات میزان بار وارده در مقابل تغییر طول علامت گزارش شده روی نمونه و کم شدن قطر آن یادداشت می‌شود. نوع عمومی نمودار تنش در مقابل کرنش در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. [۷]

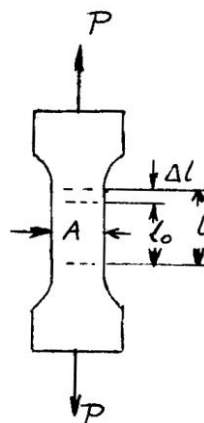
تنش اسمی که عبارت از بار وارده بر سطح مقطع اولیه نمونه است در مقابل کرنش قراردادی که همان کرنش مهندسی نامیده می‌شود رسم شده است. کرنش مهندسی (قراردادی) عبارتست از مقدار اضافه طول تقسیم بر طول اولیه علامت گذاری شده در روی نمونه، تنش اسمی را میتوان بوسیله رابطه زیر نشان داد.

$$\sigma_N = \frac{P}{A_0} \quad (1-1)$$

و کرنش مهندسی (قراردادی) توسط رابطه زیر نشان داده می‌شود:

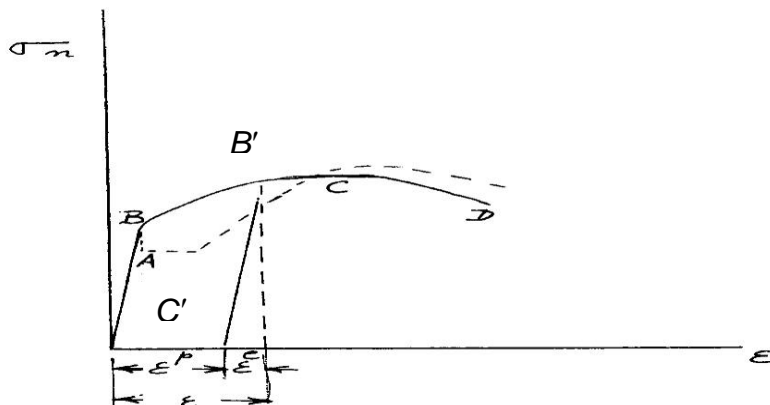
$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (1-2)$$

مطابق شکل ۱-۲ ملاحظه می‌شود که رابطه بین تنش و کرنش خطی است. این قسمت خطی تا نقطه A ادامه می‌یابد که به حد تناسب معروف است. در این ناحیه است که تئوری خطی ارتجاعی با استفاده قانون هوک معتبر است.



شکل ۱-۱- نمونه کششی

با زیاد کردن تنش مقدار کرنش نیز اضافه می‌شود ولی این اضافه کرنش دیگر تابع خطی تنش نیست ولی هنوز جسم دارای خاصیت ارتجاعی می‌باشد یعنی بازای برداشتن بار نمونه بوضع اولیه‌اش برگشت پیدا می‌کند.



شکل ۱-۲- نمودار تنش اسمی - کرنش مهندسی

این حالت تا نقطه B ادامه دارد که به حد ارتجاعی معروف است و گفته می‌شود که نقطه تسلیم رسیده است. در خیلی از مصالح فاصله بین نقاط A و B کم است. برای منظورهای ما این دو نقطه یکی فرض می‌شوند. ضمناً تعیین محل نقطه‌های A و B تا میزان زیادی بستگی به دقت و حساسیت دستگاه‌های اندازه‌گیری دارند. در مورد بعضی از مصالح صنعتی برای تعیین نقطه تسلیم با آن چنان اشکالی برخورد می‌شود که اجباراً نقطه‌ای را با میزان کرنش معلوم برای تسلیم انتخاب می‌کنند، بعنوان مثال نقطه‌ای را که دارای 0.2% درصد کرنش است می‌توان انتخاب نمود، تنش چنین نقطه‌ای را تنش تسلیم فرعی و یا تنش تسلیم کرنشی می‌نامند. پس از نقطه حد ارتجاعی در جسم تغییر شکل دائمی بوجود می‌آید که به تغییر شکلهای خمیری معروف هستند. کرنشهای حاصله در اجسام در حد ارتجاعی بین $(0.01\%$ تا 0.1%) در صد می‌باشند. وقتی که بار از حد ارتجاعی بگذرد کرنشها با نرخ زیادتری اضافه می‌شوند. البته تا موقعیکه بار اضافه نشود کرنش اضافه نخواهد شد. این حالت را در جسم کار سختی یا کرنش سختی می‌نامند.

مقدار تنش لازم برای اینکه کرنش خمیری بیشتری در جسم ایجاد شود تنش جریان می‌نامند. وقتی آزمایش ادامه پیدا کند منحنی بنقطه C که در آن بارماکزیم مقدار خود را دارد می‌رسد، این نقطه که به نقطه حداکثر بار یا نقطه عدم تعادل معروف است نمونه به حالت میان باریک در می‌آید و سپس در نقطه D میشکند. پس از نقطه C یک حالت تنش سه محوری وجود دارد. نقطه C نشان دهنده حد قسمتی از محنی است که قابل استفاده از نظر تئوری - پلاستیسیته در آزمایش کشش است. مقدار تنش در نقطه C به مقاومت کششی و یا حد تنش معروف است. هرگاه در هر نقطه‌ای بین حد ارتجاعی B و بارماکزیم C بار وارده برداشته شود منحنی باربرداری موازی با خط نشان دهنده حالت ارتجاعی مانند B'C' بدست می‌آید، بنابراین مقداری از کرنش در جسم مانده و مقداری برگشت داده می‌شود که این مقدار اخیر کرنش ارتجاعی در تغییر شکل کلی نامیده می‌گردد. ملاحظه می‌شود که

کرنش کلی جسم را می‌توان مجموعه دو قسمت ε^e کرنش ارتجاعی و ε^p کرنش خمیری (پلاستیکی) در نظر گرفت، یعنی:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (1-3)$$

اگر مجدداً بار روی جسم گذارده شود منحنی $B'C'$ با تغییر کوچکی مجدداً ترسیم می‌شود. در واقع حلقه کوچک پس ماند کرنشی تشکیل می‌شود که قابل اغماض است. جریان خمیری تقریباً تا نقطه B' شروع نمی‌شود. اگر بارگذاری ادامه یابد منحنی $B'C$ ادامه پیدا می‌کند و چنان ادامه خواهد داشت که اصلاً برداشتن بار اتفاق نیفتاده است. در اینصورت نقطه B' عبارت خواهد بود از نقطه تسلیم جدید برای جسمی که در آن سختی کرنشی بوجود آمده است.

بعضی از مصالح مانند فولاد نرمی که آب گرفته شده است درموقع آزمایش کشش ساده پس از رسیدن به نقطه تسلیم بالائی B یک دفعه به نقطه پائین تری نزول پیدا میکنند و این حالت توسط نقطه چین روی شکل ۱-۲ نشان داده شده است. نمونه در این موقع با باری تقریباً ثابت اضافه طول پیدا می‌کند طوری که این کرنش تقریباً ده برابر کرنش نقطه B است و سپس کار سختی شروع می‌شود. میزان تنش در قسمت پائین که خط مستقیم تسلیم را نشان می‌دهد به تنش تسلیم پائینی معروف است و حالتی از جسم را نشان می‌دهد که بعلت اوضاع غیر متعادل جهشی بین تسلیم بالائی B و تنش پائینی حاصله در نمونه بوجود آمده است. نقطه تسلیم بالائی در مقابل تنشهای خمشی یا ناهمگن بودن جسم و یا نرخ بارگذاری روی جسم خیلی حساس است. جریان خمیری در نقطه تسلیم به مقدار خیلی کمی تولید می‌شود و به همین جهت است که در محاسبات طراحی ماشینها باید نقطه تسلیم پائینی را از نظر جریان خمیری مورد توجه قرار داد.

۱-۲-۲- نمودار تنش حقیقی - کرنش حقیقی

ترسیم منحنی تنش اسمی در مقابل کرنش قراردادی در بالا ذکر شد. کاملاً واضح است که تنش اسمی همان تنش واقعی وارد به نمونه نیست زیرا سطح مقطع نمونه مرتباً در موقع آزمایش کششی کاهش می‌یابد. برای تنشهایی که تا نقطه تسلیم و نزدیک آن باشد این تمایز خیلی مشخص نیست. در تنشهای بالاتر این تمایز نسبتاً مهم می‌شود. تنش حقیقی را می‌توان بترتیب زیر از تنش اسمی متمایز ساخت طوری که اگر از تغییرات کوچک حجمی صرف نظر شود و جسم مورد آزمایش غیر قابل تراکم فرض شود میتوان نوشت که: [۴]

$$AL = A_0L_0$$

که در آن L_0A_0 بترتیب سطح مقطع و طول اولیه مورد آزمایش از نمونه و L و A مقادیر جاری آنها در طول آزمایش است. اگر P بار وارده باشد در اینصورت تنش واقعی σ عبارتست از:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{PL}{A_0 L_0}$$

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0}$$

ولی تنش اسمی σ_n مساویست با:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} - 1$$

کرنش قراردادی نیز مساویست با:

در اینصورت می توان نوشت که:

$$\sigma = \sigma_n(1 + \varepsilon) \quad (1-4)$$

با یک توضیح مشابه می توان نشان داد که کرنش قراردادی یا کرنش مهندسی کاملاً کرنش واقعی جسم را نشان نمی دهد زیرا مبنای اندازه گیری آن طول اولیه جسم (یا قسمت مورد آزمایش نمونه) می باشد در حالیکه طول جسم مرتباً در حال تغییر است. تعریف دیگری بوسیله لودویک (LODWIK) روی طول متغیر جسم بیان گردید. بنابراین تغییر کرنش جسم بوسیله رابطه زیر:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{dl}{l} \quad (1-5)$$

بیان گردید که کرنش کلی جسم در تمام طول آزمایش برابر خواهد بود با:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1-6)$$

$\bar{\varepsilon}$ به کرنش طبیعی معروف بوده و کرنش لگاریتمی یا کرنش واقعی است و تقریباً می توان گفت که مقدار متوسط کرنش بین فاصله l_0 تا l است. رابطه آن با کرنش مهندسی با استفاده از $\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon$ بصورت زیر در می آید:

$$\bar{\varepsilon} = \ln(\varepsilon + 1) \quad (1-7)$$

برای کرنشهای کوچک هر دو تقریباً شبیه یکدیگر می باشند و به همین علت در کرنشهای کم عموماً از کرنش مهندسی استفاده می شود. کرنش طبیعی نیز مزایای زیادی دارد مثلاً کرنشهای طبیعی را میتوان با هم جمع کرد در حالیکه کرنشهای مهندسی را نمی توان با هم جمع نمود. ثانیاً اگر یک جسم نرم مورد آزمایش فشار و کشش واقع شود منحنی های تنش حقیقی در مقابل کرنش طبیعی برای هر دو تقریباً شبیه یکدیگر خواهد بود در حالیکه اگر نمودارهای تنش مهندسی در مقابل کرنش مهندسی یکی برای کشش و دیگری برای آزمایش فشار رسم شود این دو شبیه یکدیگر نخواهند بود. از طرف دیگر شرط تراکم ناپذیری با استفاده از کرنش طبیعی به صورت ساده تری بیان می شود:

$$\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 + \bar{\varepsilon}_3 = 0 \quad (1-8)$$

در حالیکه همین شرط با استفاده از کرنش مهندسی به شکل زیر در خواهد آمد:

$$(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) - 1 = 0 \quad (1-9)$$

که فقط در موقعیکه کرنشها خیلی کوچگ هستند بصورت زیر در می آید:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

اگر نمودار تنش حقیقی درمقابل کرنش حقیقی برای آزمایش کشش ساده که قبلاً شرح داده شده است رسم گردد منحنی عیناً شبیه نمودار قبلی نقطه تسلیم و خیلی کم بالاتر از آن بدست می آید. پس از این نقطه و نمودار از هم جدا می شوند طوریکه منحنی تنش حقیقی همیشه بالاتر از منحنی تنش اسمی است و دارای نقطه ماکزیمی نخواهد بود. میزان تنش حقیقی در نقطه تنش حد را به طریق زیر می توان بدست آورد:

چون همیشه رابطه $P = \sigma A$ برقرار است، که در آن P نیروی وارده σ تنش و A سطح مقطع نمونه است بنابراین در نقطه ماکزیم تنش چنین بدست می آید.

$$dP = \sigma dA + Ad\sigma = 0$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dA}{A}$$

$$A_0 l_0 = Al$$

$$Adl + ldA = 0$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dl}{l}$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} = \frac{dl}{l} = d\bar{\varepsilon}$$

$$\frac{d\sigma}{d\bar{\varepsilon}} = \sigma$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{1 + \varepsilon} \quad (1-10)$$

در روی منحنی σ در مقابل $\bar{\varepsilon}$ مقدار σ در نقطه حد تنش روی نمودار - تنش و کرنش مهندسی وقتی اتفاق می افتد که شیب منحنی $\frac{d\sigma}{d\bar{\varepsilon}}$ برابر تنش در آن نقطه باشد. چنین نقطه ای در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

از طرف دیگر برای رسم نمودار تنش حقیقی در مقابل کرنش طبیعی می توان از کرنش قطری بجای کرنش طولی استفاده کرد بشرط آنکه شکل مقطع نمونه گرد باشد. در اینصورت هر گاه ε_D کرنش قطری نمونه باشد، می توان نوشت که: