



۱۲۹۹۰

دانشگاه یزد
دانشکده مهندسی عمران
گروه سازه

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران - سازه

کمانش موضعی ساق فشاری مقاطع T شکل با استفاده از
روش نوارهای محدود

استادان راهنما: دکتر مجتبی ازهری
دکتر نادر عبدلی یزدی

۱ / ۷ / ۱۳۸۸

پژوهش و نگارش: محمد سبحانی

تأیید استاد راهنما
تأیید استاد مشاور

بهمن ماه ۸۷

۱۲۶۹۳۰

تقدیم به
پدر و مادرم

که باد صبح دم نسیم گره گشا آورد

دلا چو غنچه شکایت زکار بسته مکن

سپاس خداوندی را که توفیق بندگی اش را به من ارزانی داشت و در میسر زندگی ام و در پیصودن طریق بندگی اش مرا به واسطه‌ی دعای خیر پدری بزرگوار و محبت بی دریغ مادری مهربان حمایت نمود و گامهای لرزانم را در وادی علم به واسطه‌ی اساتید گرانقدار و صبور محکم نمود.

در ابتدای این پایان نامه از استادان ارجمند جناب آقای دکتر مجتبی ازهری و جناب آقای دکتر نادر عبدلی یزدی که با راهنمایی های ارزنده شان مرا در به اتمام رساندن این پایان نامه یاری نمودند کمال تشکر را دارم و همچنین از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمد مهدی سعادت پور قدردانی ویژه می نمایم که به عنوان استاد ممتحن زحمات زیادی را متحمل گردیدند. در خاتمه از دوستان عزیزم که در تمامی مراحل تحصیل همچون برادرانی دلسوز پشتیبانم بودند، تشکر می نمایم.

محمد سبحانی

زمستان ۸۷

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای محمد سبحانی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه یزد ، در رشته / گرایش : عمران - سازه

تحت عنوان « کمانش موضعی ساق فشاری مقاطع T شکل با استفاده از روش نوارهای محدود »

وتعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۱۹

با حضور اعضای هیات داوران متشکل از :

نام و نام خانوادگی

امضاء

دکتر مجتبی ازهری - دکتر نادر عبدلی یزدی

۱- استاد راهنما

۲- استاد مشاور

دکتر محمد مهدی سعادت پور

۳- داور خارج از گروه

دکتر محمد فروغی

۴- داور داخل گروه

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایانی پایان نامه توسط هیات داوران ، با کمرجه ۲۰۰ و نمره

به عدد ۱۹،۸۵ به حروف توزده و هفتاد و پنج و نیم مورد تصویب قرار گرفت.

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام و نام خانوادگی: دکتر شهرام طالبی

امضاء:

چکیده

تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از پروفیل‌های T شکل (سپری) در اعضای قطری خرپاها به جای مقاطع دویل نبشی موثرتر و بهتر می‌باشد. بنابراین شناخت رفتار آن‌ها، بخصوص رفتار پایداری اجزاء این مقاطع تحت اثر تنش‌های اعمالی دارای اهمیت ویژه‌ای است. با توجه به مشکلات حاکم بر حل دقیق معادلات دیفرانسیل مربوط به تحلیل پایداری ورق‌ها، بار بحرانی کمانش مقاطع از روش عددی نوار محدود بدست می‌آید. در ورق‌ها هنگامی که نسبت عرض به ضخامت از مقدار معینی کمتر باشد رفتار ورق وارد ناحیه پلاستیک (غیرالاستیک) می‌شود و معادلات مربوط به ناحیه‌ی پلاستیک حاکم می‌شود. در حل مسائل پایداری با استفاده از روش ذکر شده که منجر به یک مساله صقادی ویژه می‌شود با حل معادله‌ی مقادیر ویژه، بار بحرانی کمانش مقاطع بدست می‌آید. با استفاده از بار بحرانی، ضرایب کمانش موضعی بال و جان مقطع T شکل بدست می‌آیند که در طراحی این اعضاء بسیار کاربردی هستند. در این پایان نامه هدف بررسی کمانش الاستیک و غیرالاستیک اجزاء مقاطع سپری تحت اثر تنش مختلف با استفاده از روش نوار محدود مختلط می‌باشد. ضرایب کمانش موضعی بدست آمده از روش مزبور انطباق خوبی با آئین‌نامه‌های فولادی و روش‌های عددی دیگر دارد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات و تاریخچه موضوع
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- انواع صفحات
۴	۳-۱- تشریح مسأله کمانشی
۴	۱-۳-۱- مفهوم کماش
۶	۲-۳-۱- انواع کمانشی
۸	۴-۱- تاریخچه
۸	۱-۴-۱- کمانش صفحات
۱۰	۲-۴-۱- روش های عددی حل مسائل صفحات
۱۴	۵-۱- هدف مساله
۱۷	فصل دوم: معادلات حاکم بر کماش صفحات
۱۸	۱-۲- مقدمه
۱۹	۲-۲- فرضیات به کار رفته در تعیین معادلات حاکم بر رفتار ورق
۲۱	۳-۲- تعیین معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار ورق
۲۱	۱-۳-۲- معادلات تعادل
۲۳	۲-۳-۲- روابط لنگر تغییر مکان
۲۹	فصل سوم: روش های حل مسائل کمانش صفحات
۳۰	۱-۳- مقدمه
۳۰	۲-۳- روشهای تحلیلی (دقیق)
۳۰	۱-۲-۳- روش های انرژی
۳۰	۱-۲-۳-۱- اصل بقاء انرژی

۳۰	۲-۱-۲-۳- قضیه ایستایی انرژی پتانسیل کل
۳۱	۲-۲-۳- روش رایلی - ریتر
۳۳	۳-۲-۳- روش گالرکین
۳۴	۳-۳- روش های عددی
۳۴	۱-۳-۳- روش تفاضل های محدود
۳۵	۲-۳-۳- روش المان محدود
۳۹	فصل چهارم: روش نوارهای محدود
۴۰	۱-۴- مقدمه
۴۲	۲-۴- مراحل تحلیل براساس روش نوارهای محدود
۴۴	۳-۴- توابع درونیاب
۴۶	۴-۴- انواع نوارها و توابع شکل در روش نوار محدود
۴۷	۱-۴-۴- نوار مستطیلی مرتبه پائین (LO_2)
۴۸	۲-۴-۴- نوار مرتبه بالای مستطیلی با خط گره میانی (HO_3)
۴۹	۳-۴-۴- نوار مرتبه بالای مستطیلی با دو خط گره (HO_2)
۵۰	۴-۴-۴- نوار مستطیلی Bubble Strip
۵۱	۵-۴- روش نوار محدود معمولی
۵۱	۱-۵-۴- نوار محدود پیرزیمینسکی
۵۲	۱-۱-۵-۴- تشکیل ماتریس سختی الاستیک
۵۴	۲-۱-۵-۴- تشکیل ماتریس پایداری (هندسی)
۵۶	۲-۵-۴- روش نوار محدود چونگ
۵۶	۱-۲-۵-۴- جدست آوردن توابع شکل طولی نوار
۵۷	۲-۲-۵-۴- صحت ماتریس های سختی و پایداری
۵۹	۶-۴- روش نوار محدود مختلط با نوار با هشت درجه آزادی

۶۳	۱-۶-۴- استخراج ماتریس ها برای درجات آزادی خارج از صفحه
۷۱	۲-۶-۴- استخراج ماتریس ها برای درجات آزادی خارج از صفحه
۷۶	۳-۶-۴- ترکیب ماتریس های سختی و پایداری برای کلیه درجات آزادی
۷۷	۷-۴- روش نوار محدود مختلط با Bubble strip
۸۰	فصل پنجم: بررسی کمانش الاستیک
۸۱	۱-۵- مقدمه
۸۱	۲-۵- کمانش ورق ایزوتروپیک
۸۲	۱-۲-۵- ورق چهارطرف مفصل (SSSS)
۸۸	۲-۲-۵- ورق دو طرف مفصل، دو طرف گیردار (SSCC)
۸۹	۳-۲-۵- ورق سه طرف مفصل، یک طرف گیردار (SSSC)
۸۹	۴-۲-۵- ورق دو طرف مفصل، دو طرف گیردار- آزاد (SSCF)
۹۰	۵-۲-۵- ورق سه طرف مفصل، یک طرف آزاد (SSSF)
۹۲	۳-۵- کمانش مقاطع ایزوتروپیک
۹۴	۱-۳-۵- بررسی کمانش مقطع ایزوتروپیک تحت اثر فشار یکنواخت
۹۵	۱-۳-۵- ۱- مقطع I شکل
۹۸	۱-۳-۵- ۲- مقطع ناودانی
۱۰۲	۱-۳-۵- ۳- مقطع T شکل
۱۰۸	۲-۳-۵- بررسی کمانش مقطع ایزوتروپیک تحت اثر برش خالص
۱۰۹	۱-۲-۳-۵- ۱- مقطع I شکل
۱۱۳	۲-۲-۳-۵- ۲- مقطع ناودانی
۱۱۵	۲-۲-۳-۵- ۳- مقطع T شکل
۱۱۹	۳-۳-۵- بررسی کمانش مقطع ایزوتروپیک تحت اثر خمش خالص
۱۲۰	۱-۲-۳-۵- ۱- مقطع I شکل

۱۲۳	۵-۳-۲-۲-مقطع ناودانی
۱۲۶	۵-۳-۲-۳-مقطع T شکل
۱۳۴	فصل ششم: بررسی کمانش غیر الاستیک
۱۳۵	۶-۱-مقدمه
۱۳۵	۶-۲-بیان نظریه‌ی کمانش غیرالاستیک
۱۴۵	۶-۳-مدل حساسی منحنی تنش- کرنش
۱۵۱	۶-۴-روش توارمحدود مختلط درکمانش غیرالاستیک
۱۵۴	۶-۵-کمانشی غیرالاستیک ورق
۱۵۴	۶-۵-۱-کمانش غیرالاستیک ورق آلومینیومی
۱۵۴	۶-۵-۱-۱-کمانش ورق چهارطرف مفصلی تحت اثر فشارخالص یکنواخت
۱۵۷	۶-۵-۱-۲-کمانش ورق چهارطرف مفصلی تحت اثر برش خالص یکنواخت
۱۶۰	۶-۵-۳-کمانش غیرالاستیک ورق فولادی
۱۶۱	۶-۵-۲-۱-کمانش غیرالاستیک ورق فولادی تحت اثر فشارخالص یکنواخت
۱۶۱	۶-۵-۲-۱-۱-کمانش ورق چهارطرف مفصلی
۱۶۲	۶-۵-۲-۱-۲-کمانش ورق دوطرف مفصل، دوطرف گیردار
۱۶۴	۶-۵-۲-۱-۳-کمانش ورق دوطرف مفصل، یک طرف گیردار- آزاد
۱۶۵	۶-۵-۲-۱-۴-کمانش ورق سه طرف مفصل، یک طرف آزاد
۱۶۷	۶-۵-۲-۱-۵-مقایسه‌ی کمانش انواع ورق ها
۱۶۸	۶-۵-۲-۲-کمانش غیرالاستیک ورق فولادی تحت اثر برش خالص یکنواخت
۱۶۸	۶-۵-۲-۲-۱-کمانش، ورق چهارطرف مفصلی
۱۷۰	۶-۵-۲-۲-۲-کمانش ورق دوطرف مفصل، دوطرف گیردار
۱۷۱	۶-۵-۲-۲-۳-کمانش ورق دوطرف مفصل، یک طرف گیردار- آزاد
۱۷۲	۶-۵-۲-۲-۴-کمانش ورق سه طرف مفصل، یک طرف آزاد

۱۷۴	۶-۵-۲-۲-۵-۵- مقایسه‌ی کمانش انواع ورق ها
۱۷۵	۶-۶- کمانش غیرالاستیک مقاطع فولادی
۱۷۵	۶-۶-۱- مقطع فولادی I شکل
۱۷۷	۶-۶-۲- مقطع فولادی T شکل
	۶-۷- مقایسه ضوابط آئین نامه ی AISC برای کمانش موضعی ساق مقطع T شکل با نتایج بدست
۱۷۹	آمده از تحلیل با روش نوارهای محدود
۱۸۴	۶-۸- بررسی فشردگی در نیم بال مقطع T شکل
۱۸۵	۶-۸-۱- مقطع غیرفشرده
۱۸۵	۶-۸-۱- مقطع نیمه فشرده
۱۸۷	۶-۸-۱- مقطع فشرده
۱۸۹	فصل هفتم : نتیجه گیری
۱۹۰	۷-۱- مقدمه
۱۹۱	۷-۲- نتیجه گیری
۱۹۴	۷-۳- پیشنهادات
۱۹۵	مراجع

فهرست جداول

شماره جدول	صفحه
جدول ۴-۱: مقایسه دو روش اجزاء محدود و نوار محدود	۴۱
جدول ۵-۱: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSSS تحت اثر فشار خالص یکنواخت	۸۵
جدول ۵-۲: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSSS تحت اثر برش خالص یکنواخت	۸۶
جدول ۵-۳: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSSS تحت اثر خمش خالص	۸۷
جدول ۵-۴: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSCC	۸۸
جدول ۵-۵: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSSC	۸۹
جدول ۵-۶: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSCF	۹۰
جدول ۵-۷: ضریب کمانش موضعی ورق طویل SSSF	۹۱
جدول ۵-۸: مقایسه بین ضرایب کمانش موضعی	۹۳
جدول ۶-۱: کمانش موضعی غیرالاستیک ورق طویل SSSS تحت اثر فشار خالص یکنواخت و دارای	
عرض ورق برابر ۳۰ اینچ (b=20 in)	۱۵۵
جدول ۶-۲: کمانش موضعی غیرالاستیک ورق طویل SSSS تحت اثر برش خالص یکنواخت و دارای	
عرض ورق برابر ۱۰۰ اینچ (b=100 in)	۱۵۸
جدول ۶-۳: مقایسه بین نتایج بدست آمده در کمانش مقطع T شکل با استفاده از روش نوار محدود و	
آئین نامه‌ی AISC	۱۸۴

فهرست نمودارها

شماره نمودار	صفحه
نمودار ۱-۵:	منحنی تغییرات K بر حسب a/b $r =$
۸۴	
نمودار ۲-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع I شکل تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۹۶	
نمودار ۳-۵:	منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۹۷	
نمودار ۴-۵:	منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۹۷	
نمودار ۵-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع ناودانی تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۹۹	
نمودار ۶-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع ناودانی با زائده ی لبه‌ای تحت اثر فشار
۱۰۰	
نمودار ۷-۵:	منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۱۰۱	
نمودار ۸-۵:	منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی تحت اثر فشار خالص یکنواخت
۱۰۹	
نمودار ۹-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت فشار خالص یکنواخت
۱۰۳	
نمودار ۱۰-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت فشار خالص یکنواخت
۱۰۴	
نمودار ۱۱-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت فشار خالص یکنواخت
۱۰۵	
نمودار ۱۲-۵:	منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت فشار خالص یکنواخت
۱۰۷	
نمودار ۱۳-۵:	منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت فشار خالص یکنواخت
۱۰۷	
نمودار ۱۴-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع I شکل تحت برش خالص
۱۱۰	
نمودار ۱۵-۵:	منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل برش خالص
۱۱۲	
نمودار ۱۶-۵:	منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل برش خالص
۱۱۲	
نمودار ۱۷-۵:	منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی تحت اثر برش خالص
۱۱۴	
نمودار ۱۸-۵:	منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی تحت اثر برش خالص
۱۱۴	
نمودار ۱۹-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر برش خالص
۱۱۶	
نمودار ۲۰-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر برش خالص
۱۱۷	
نمودار ۲۱-۵:	منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر برش خالص
۱۱۷	

- نمودار ۵-۲۲: منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت اثر برش خالص ۱۱۸
- نمودار ۵-۲۳: منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت اثر برش خالص ۱۱۹
- نمودار ۵-۲۴: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع I شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۱
- نمودار ۵-۲۵: منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۲
- نمودار ۵-۲۶: منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع I شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۲
- نمودار ۵-۲۷: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع ناودانی شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۴
- نمودار ۵-۲۸: منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۵
- نمودار ۵-۲۹: منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع ناودانی شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۵
- نمودار ۵-۳۰: بررسی اثر توزیع تنش بر روی ضریب کمانش موضعی ۱۲۸
- نمودار ۵-۳۱: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۹
- نمودار ۵-۳۲: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۲۹
- نمودار ۵-۳۳: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۳۰
- نمودار ۵-۳۴: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۳۰
- نمودار ۵-۳۵: منحنی تغییرات σ/E بر حسب λ/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۳۱
- نمودار ۵-۳۶: منحنی تغییرات K_w بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۳۲
- نمودار ۵-۳۷: منحنی تغییرات K_f بر حسب b_f/b_w در مقطع T شکل تحت اثر خمش یکنواخت ۱۳۲
- نمودار ۶-۱: منحنی تنش- کرنش برای ستون تحت فشار ۱۳۷
- نمودار ۶-۲: یک نوع منحنی تنش- کرنش موثر ۱۴۱
- نمودار ۶-۳: منحنی تنش- کرنش فولاد نرمه معمولی A36 بر حسب درصد ۱۴۷
- نمودار ۶-۴: منحنی تنش- کرنش فولاد نرمه معمولی در مقیاس کوچکتر بر حسب درصد ۱۴۸
- نمودار ۶-۵: مدل تنش- کرنش فولاد نرمه معمولی در حالت الاستو- پلاستیک کامل همراه کار سختی ۱۵۰
- نمودار ۶-۶: مقایسه‌ی بین کمانش موضعی الاستیک و غیرالاستیک ۱۵۶
- نمودار ۶-۷: مقدار ضریب اصلاح کمانش غیرالاستیک براساس تنش فشاری ۱۵۷

- نمودار ۶-۸: مقایسه‌ی بین کمانش موضعی لایستیک و غیرالاستیک ۱۵۹
- نمودار ۶-۹: مقدار ضریب اصلاح کمانش غیر لایستیک براساس تنش برشی ۱۶۰
- نمودار ۶-۱۰: کمانش غیرالاستیک ورق SSSS تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۶۱
- نمودار ۶-۱۱: کمانش غیرالاستیک ورق SSCC تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۶۳
- نمودار ۶-۱۲: کمانش غیرالاستیک ورق SSCF تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۶۵
- نمودار ۶-۱۳: کمانش غیرالاستیک ورق SSSF تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۶۶
- نمودار ۶-۱۴: مقایسه‌ی کمانش غیرالاستیک ورق‌های متفاوت تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۶۷
- نمودار ۶-۱۵: کمانش غیرالاستیک ورق SSSS تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۶۹
- نمودار ۶-۱۶: کمانش غیرالاستیک ورق SSCC تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۰
- نمودار ۶-۱۷: کمانش غیرالاستیک ورق SSCF تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۲
- نمودار ۶-۱۸: کمانش غیرالاستیک ورق SSSF تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۳
- نمودار ۶-۱۹: مقایسه‌ی کمانش غیرالاستیک ورق‌های متفاوت تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۴
- نمودار ۶-۲۰: کمانش غیرالاستیک مقطع I تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۷۵
- نمودار ۶-۲۱: کمانش غیرالاستیک مقطع I تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۶
- نمودار ۶-۲۲: کمانش غیرالاستیک مقطع T تحت اثر فشار خالص یکنواخت ۱۷۸
- نمودار ۶-۲۳: کمانش غیرالاستیک مقطع T تحت اثر برش خالص یکنواخت ۱۷۸
- نمودار ۶-۲۴: منحنی بدون بعد کمانش ورق ۱۸۱
- نمودار ۶-۲۵: منحنی تغییرات کرنش بحرانی برحسب نسبت عرض به ضخامت در ورق تقویت نشده ۱۸۶

فهرست شکل ها

شماره شکل	صفحه
شکل ۱-۱: (الف) شکل یک غشاء (ب) شکل یک ورق ضخیم غیرایزوتروپیک که از روی هم قرار دادن صفحات نازک و مواد چسبنده تشکیل شده است، (ج) نیروهای داخلی وارد بر المان پوسته و (د) نیروهای داخلی وارد بر المان ورق	۳
شکل ۱-۲: (الف) کمناش ستون و (ب) کمناش ورق تحت اثر بار محوری	۵
شکل ۱-۳: انواع کمناش موضعی، پیچشی، تغییر شکلی، جانبی	۷
شکل ۱-۲: پایداری تعادل	۱۸
شکل ۲-۲: نمایش ورق در صفحه مختصات فرضی، راستای X عرض ورق و راستای Y طول ورق	۲۰
شکل ۲-۳: برش ها و لنگرهای احمالی بر چهار طرف المان مستطیل شکل ورق	۲۲
شکل ۲-۴: المان ورق تحت تاثیر تغییر شکل های کوچک خمشی	۲۲
شکل ۲-۵: تبدیل تنش نرمال داخل صفحه به ممان M_x	۲۴
شکل ۲-۶: تبدیل تنش برشی داخل صفحه به ممان M_{xy}	۲۴
شکل ۲-۷: المان ورق تحت تغییر شکل های داخل صفحه	۲۶
شکل ۲-۸: نمایش تغییر شکل های خارج از صفحه المان ورق در صفحه XZ (مقطع عرضی)	۲۷
شکل ۴-۱: سازه های تقسیم بندی شده، (الف) تیر تقسیم بندی شده به نوارهای محدود، (ب) ورق چند لایه تقسیم بندی شده به روش لایه محدود، (ج) ورق تقسیم بندی شده به روش نوار محدود	۴۲
شکل ۴-۲: نوار محدود مرتبه پائین	۴۷
شکل ۴-۳: نوار مرتبه بالای مستطیلی با خط گره میانی (H_{03})	۴۸
شکل ۴-۴: نوار مرتبه بالای مستطیلی با دو خط گره (H_{02})	۴۹
شکل ۴-۵: مقایسه تحوی المان بندی در روش المان محدود و نوار محدود	۵۱
شکل ۴-۶: کمناش موضعی در یک نوار محدود در اثر تنش های دو طرفه	۵۲
شکل ۴-۷: حالت پایه تنش در روش نوار محدود مختلط نیمه تحلیلی	۶۱

- شکل ۴-۸: درجات آزادی برای یک نوار محدود در روش نوار محدود مختلط نیمه تحلیلی ۶۲
- شکل ۵-۱: حالت پایه ی تنش در نوار و انواع شرایط مرزی ۸۲
- شکل ۵-۲: نمایش مقطع I شکل ۹۳
- شکل ۵-۳: نمایش مقطع I شکل تحت اثر تنش فشاری خالص یکنواخت ۹۵
- شکل ۵-۴: نمایش مقطع ناودانی شکل تحت اثر تنش خالص یکنواخت ۹۹
- شکل ۵-۵: نمایش مقطع T شکل تحت اثر فشاری خالص یکنواخت ۱۰۳
- شکل ۵-۶: مقطع I تحت اثر برش ۱۰۹
- شکل ۵-۷: مقطع ناودانی تحت اثر برش ۱۱۳
- شکل ۵-۸: مقطع T تحت اثر برش ۱۱۵
- شکل ۵-۹: تبدیل تنش سهموی به دوزتقه ۱۱۵
- شکل ۵-۱۰: توزیع تنش خمشی روی مقطع I شکل ۱۲۰
- شکل ۵-۱۱: توزیع تنش خمشی روی مقطع T شکل ۱۲۶

فصل اول

کلیات و تاریخچه موضوع

استفاده از فولاد از دیرباز، به عنوان ماده‌ای که از تنش تسلیم نسبتاً بالایی برخوردار است و در برابر بارهای وارد شده، متحمل تغییر شکل های کوچکی می گردد، مورد توجه صنعت گران و محققین قرار گرفته است.

شاید اولین سازه اساسی که اعضای آن از فولاد ساخته شد یک قوس فولادی با دهانه‌ی ۳۰ متر باشد که در سال های ۱۷۷۷ تا ۱۷۷۹ میلادی در کشور انگلستان ساخته شد و از آن پس تعداد بی شماری سازه با مصالح فولادی تا اواسط قرن ۱۹ میلادی در اروپا بنا نهاده شد. امروزه استفاده از فولاد با مقاومت بسیار بالا امکان ساخت سازه‌های فولادی خاص و بسیار سبک را میسر کرده است.

از خواص فولاد می توان مقاومت بالا، یکنواختی و دوام را بیان نمود. این خصوصیات باعث می شود رفتار سازه در مقابل زلزله مناسب باشد. همچنین می توان به خواصی همچون قابلیت الاستیک و چکش خواری اشاره نمود. از سوی دیگر مقاومت زیاد فولاد و همچنین هزینه تمام شده‌ی نسبتاً بالای آن باعث گردیده که معمولاً مقاطع فولادی متشکل از یک سری صفحات نازک و لاغر باشد.

این امر موجب می گردد که این مقاطع هنگامی که تحت تنش های فشاری قرار می گیرند، بعضاً در حالتی دچار گسیختگی شوند که تنش ها از مرز تنش تسلیم فراتر نرود سازه تحت بارهای وارده، دچار تغییر شکل های بزرگی شده که نهایتاً منجر به انهدام سازه و ناپایداری در کل سیستم سازه‌ای می گردد.

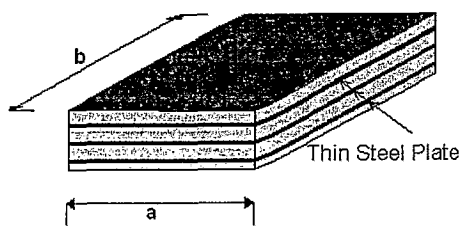
این مسأله که به پدیده کمانش معروف است، همزمان با استفاده از فولاد به عنوان مصالح باربر، مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین همواره در طراحی اعضای سازه ای سعی می شود که این اعضاء طوری کنار هم قرار داده شوند که بتوانند بیشترین بار اعمالی را تحمل کنند، بدون اینکه سیستم دچار ناپایداری احتمالی گردد [۱].

۱-۲- انواع صفحات

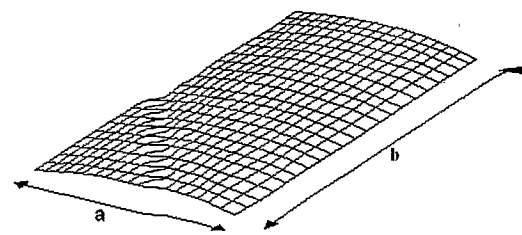
صفحات، سازه‌هایی هستند که شکل اولیه آن‌ها تخت می‌باشد و ضخامت آن‌ها بسیار کوچکتر از دو بعد دیگر است. به عنوان مثال می‌توان به پانل‌های جانبی و سقف ساختمان‌ها و دیسک‌های توربین، دیواره‌ها و کف مخازن اشاره نمود. از لحاظ ابعاد به طور کلی صفحات را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- صفحات ضخیم ، ۲- صفحات نازک ، ۳- غشاءها

نازک بودن صفحات یک امر نسبی است، به طور کلی نمی‌توان معیار دقیقی برای نسبت ابعاد صفحه تعیین کرد. معمولاً اگر نسبت بعد کوچکتر صفحات (طول یا عرض) به ضخامت آن‌ها بزرگتر از ۱۰ باشد می‌توان آن‌ها را نازک فرض نمود شکل‌های زیر انواع صفحات و نیروهای داخلی را نشان می‌دهند [۲].



(ب)



(الف)

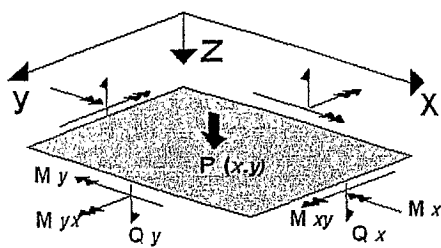
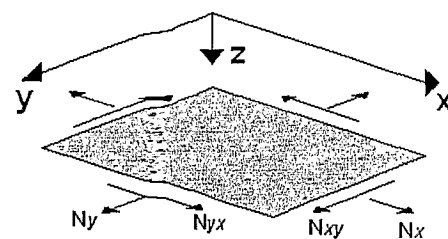


Plate Forces

(د)



Shell Forces

(ج)

شکل ۱-۱: (الف) شکل یک غشاء، (ب) شکل یک ورق ضخیم غیر ایزوتروپیک که از روی هم قرار دادن صفحات نازک ایجاد شده، (ج) نیروهای داخلی وارد برالمان پوسته و (د) نیروهای داخلی وارد برالمان ورق