



دانشگاه صنعتی شیراز
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بررسی کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی به روش رینگ محدود

بوسیله :

حسین نوروزی

استاد راهنما :

دکتر سید حسن عصایی

اسفند ۱۳۹۰

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

بسمه تعالی

بررسی کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی به روش رینگ محدود

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

توسط

حسین نوروزی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه :

دکتر سید حسن عصایی، استادیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما)

دکتر علیرضا ستوده، دانشیار مهندسی مکانیک (استاد مشاور)

دکتر محمد رحیم همتیان، دانشیار مهندسی مکانیک (استاد داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه : نصرت الله علی قنبری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

**تقدیم بہ همسر م کہ بدون کمکش انجام این مهم میسر
نبود**

سپاسگزاری

وظیفه خود می دانم که از زحمات استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر سید حسن عصایی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. راهنمایی های ارزنده و کمک های ایشان راهگشای من در انجام این پایان نامه بود. موفقیت و شادکامی ایشان را در تمامی مراحل زندگی آرزو دارم.

چکیده

بررسی کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی به روش رینگ محدود

به وسیله ی

حسین نوروزی

در این پایان نامه با استفاده از یک روش نیمه تحلیلی به نام روش حلقه محدود رفتار کمانشی پوسته های استوانه ای ساخته شده از مواد کامپوزیتی لایه ای بررسی شده است. روش حلقه محدود در واقع برگرفته از روش نوار محدود است و برای اولین بار توسط نگارنده پایان نامه به کار گرفته شده است. در این روش به جای المان نوار از المانی به نام حلقه استفاده می شود. با توجه به اینکه موضوع مورد بحث پوسته های استوانه ای است، لذا در ابتدا تئوری های مربوط به تغییر مکان و کرنش پوسته ها ارائه شده اند.

ابتدا یک حلقه محدود معرفی شده است و توابع مناسب برای بیان تغییر مکان نقاط این حلقه هنگام اعمال بار، پیشنهاد شده اند. این توابع به صورت حاصلضرب توابع هارمونیک در محیط حلقه و توابع شکل چند جمله ای در عرض حلقه می باشند. سپس با استفاده از روش انرژی و محاسبه انرژی کرنشی و همچنین انرژی پتانسیل ناشی از بارهای اعمالی، ماتریس های سفتی الاستیک و هندسی برای یک حلقه محاسبه شده اند.

با استفاده از یک کد عددی به زبان برنامه نویسی فرترن ماتریس های مربوط به حلقه ها روی همگذاری شده و ماتریس های سفتی الاستیک و هندسی کل سازه حاصل شده اند. در ادامه با حل معادله به دست آمده که یک معادله مقدار ویژه تعمیم یافته می باشد بار کمانش سازه محاسبه شده است. به منظور بررسی صحت، نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج حاصل از روش المان محدود و نیز نتایج ارائه شده در برخی از مقالات موجود مقایسه شده اند. انطباق بین نتایج مقایسه شده حاکی از مناسب بودن روش حلقه محدود جهت تحلیل پوسته های استوانه ای است.

فصل اول : مقدمه

۲	۱-۱ پیشگفتار
۲	۲-۱ اهمیت کمانش و عوامل ایجاد آن در پوسته‌ها
۴	۳-۱ کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر نیروی محوری
۱۱	۴-۱ کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر فشار خارجی
۱۲	۵-۱ کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر پیچش
۱۳	۶-۱ کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر بارهای ترکیبی
۱۳	۷-۱ روش‌های بررسی مسایل کمانش
۱۴	۸-۱ تحلیل خطی و غیرخطی کمانش
۱۴	۹-۱ روش حلقه محدود
۱۵	۱۰-۱ معرفی مساله مورد بررسی

فصل دوم : مروری بر مطالعات انجام شده

۱۷	۱-۲ مقدمه
۱۷	۲-۲ مطالعات انجام شده بر روی تئوری پوسته‌ها
۲۰	۳-۲ تاریخچه روش نوار محدود

فصل سوم : تئوری پوسته‌ها

۲۵	۱-۳ مقدمه
۲۵	۲-۳ روابط کرنش-تغییر مکان در پوسته‌ها
۲۹	۳-۳ تئوری‌های تغییر مکان پوسته‌ها
۲۹	۱-۳-۳ تئوری کلاسیک
۳۰	۲-۳-۳ تئوری مرتبه اول برشی
۳۰	۳-۳-۳ تئوری مرتبه سوم ردی
۳۱	۴-۳ تئوری‌های مربوط به کرنش پوسته‌ها
۳۱	۱-۴-۳ تئوری غیر خطی دائل
۳۴	۲-۴-۳ تئوری غیر خطی فلوگه

- ۳۶ ۳-۴-۳ تئوری غیر خطی نووژلیف
- ۳۷ ۳-۴-۴ تئوری غیر خطی ساندرز-کویتز

فصل چهارم : فرمولاسیون روش حلقه محدود

- ۴۱ ۴-۱ مقدمه
- ۴۱ ۴-۲ معرفی مشخصه‌های یک حلقه محدود
- ۴۵ ۴-۳ بسط فرمولاسیون روش حلقه محدود جهت تحلیل کماتش
با استفاده از روش انرژی
- ۴۸ ۴-۴ حل یک معادله‌ی مقدار ویژه‌ی تعمیم یافته با استفاده از روش‌های عددی
- ۵۱ ۴-۴-۱ الگوریتم تجزیه ماتریسی چولسکی
- ۵۲ ۴-۴-۲ معرفی ماتریس هاوس هلدر و تبدیل هاوس هلدر
- ۵۳ ۴-۴-۳ تجزیه ماتریسی QR با استفاده از ماتریس‌های هاوس هلدر
- ۵۵ ۴-۴-۴ محاسبه مقادیر ویژه با استفاده از تجزیه ماتریسی QR
- ۵۶ ۴-۴-۵ محاسبه مقادیر ویژه تعمیم یافته با استفاده از تجزیه ماتریسی چولسکی
و الگوریتم تکرار QR
- ۵۷ ۴-۴-۶ محاسبه بردارهای ویژه از روش تکرار معکوس
- ۵۸ ۴-۵ بررسی کد عددی حلقه محدود

فصل پنجم : مطالعه رفتار کماتشی پوسته‌های استوانه‌ای

- ۶۱ ۵-۱ مقدمه
- ۶۱ ۵-۲ بررسی همگرایی کد عددی حلقه محدود با افزایش تعداد حلقه در طول استوانه
- ۶۴ ۵-۳ بررسی رفتار کماتشی پوسته استوانه‌ای تحت اثر بار محوری
- ۶۴ ۵-۳-۱ بررسی اولیه صحت نتایج کد حلقه محدود جهت استوانه‌های ایزوتروپ
- ۶۵ ۵-۳-۲ استوانه‌های کامپوزیتی تحت بار محوری
- ۷۰ ۵-۳-۳ بررسی اثر طول بر بار کماتش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
- ۸۰ ۵-۳-۴ بررسی اثر شرایط مرزی بر بار کماتش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
- ۸۷ ۵-۳-۵ آرایشهای تاثیر آرایشهای نامتقارن لایه چینی بر بار کماتش
پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی
- ۹۰ ۵-۴ بررسی رفتار کماتشی پوسته استوانه‌ای تحت اثر فشار خارجی
- ۱۰۱ ۵-۵ پوسته استوانه‌ای تحت اثر بار گذاری ترکیبی

۱۰۸	۵-۶ پوسته های استوانه ای ساخته شده از مواد هدفمند
۱۰۸	۵-۶-۱ معرفی مواد دارای خواص تابعی
۱۰۹	۵-۶-۲ خواص موثر مواد با خواص تابعی
۱۱۲	۵-۶-۳ کمانش پوسته های استوانه ای ساخته شده از مواد با خواص تابعی

فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۲۱	۶-۱ نتایج
۱۲۲	۶-۲ پیشنهادات
۱۲۴	منابع

فهرست جدول ها

عنوان و شماره

صفحه

- ۳۹ جدول ۱-۳: کرنش های خطی سطح میانی برای تئوری های مختلف
- ۳۹ جدول ۲-۳: کرنش های غیر خطی سطح میانی برای تئوری های مختلف
- ۳۹ جدول ۳-۳: انحنا و چرخش برای تئوری های مختلف
- ۶۵ جدول ۱-۵: مقایسه تنش کمانشی بر حسب گیگا پاسکال برای نسبت های مختلف $\frac{R}{t}$
- ۶۶ جدول ۲-۵: ضریب کمانش تئوری های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 1$, $[(0)_{2k}]_s$
- ۶۸ جدول ۳-۵: ضریب کمانش تئوری های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 1$, $[(0/90)_k]_s$
- ۶۸ جدول ۴-۵: ضریب کمانش تئوری های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 1$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۷۱ جدول ۵-۵: ضریب کمانش تئوری های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(0)_{2k}]_s$
- ۷۲ جدول ۶-۵: ضریب کمانش تئوری های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 4$, $[(0)_{2k}]_s$
- ۷۴ جدول ۷-۵: تعداد موج های محیطی و نیم موج های طولی استوانه کمانش یافته
با آرایش $[(0)_{2k}]_s$, $\frac{L}{R} = 2$
- ۷۵ جدول ۸-۵: تعداد موج های محیطی و نیم موج های طولی استوانه کمانش یافته
با آرایش $[(0)_{2k}]_s$, $\frac{L}{R} = 4$
- ۷۶ جدول ۹-۵: تعداد موج های محیطی و نیم موج های طولی استوانه کمانش یافته
با آرایش $[(0/90)_k]_s$, $\frac{L}{R} = 2$
- ۷۷ جدول ۱۰-۵: تعداد موج های محیطی و نیم موج های طولی استوانه کمانش یافته
با آرایش $[(0/90)_k]_s$, $\frac{L}{R} = 4$

- جدول ۵-۱۱: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
 با آرایش $[(\pm 45)_k]_s, \frac{L}{R} = 2$
- جدول ۵-۱۲: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
 با آرایش $[(\pm 45)_k]_s, \frac{L}{R} = 4$
- جدول ۵-۱۳: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 1$ و شرایط مرزی SS_C
- جدول ۵-۱۴: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 2$ و شرایط مرزی SS_C
- جدول ۵-۱۵: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 4$ و شرایط مرزی SS_C
- جدول ۵-۱۶: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 1$ و شرایط مرزی C_C
- جدول ۵-۱۷: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 2$ و شرایط مرزی C_C
- جدول ۵-۱۸: ضریب کمانش برای $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 4$ و شرایط مرزی C_C
- جدول ۵-۱۹: مقایسه ضریب کمانش استوانه $(\frac{NL^2}{10h^3 E_2})$ با شرایط مرزی SS_SS
- جدول ۵-۲۰: ضریب کمانش استوانه با آرایش غیر متقارن با شرایط مرزی SS_SS
- جدول ۵-۲۱: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی برای آرایش نامتقارن $(\pm 45)_k$
- جدول ۵-۲۲: ضریب کمانش در حالت بارگذاری فشار خارجی برای آرایش $[(0)_{2k}]_s$
- جدول ۵-۲۳: ضریب کمانش در حالت بارگذاری فشار خارجی برای آرایش $[(0/90)_k]_s$
- جدول ۵-۲۴: ضریب کمانش در حالت بارگذاری فشار خارجی برای آرایش $[(\pm 45)_k]_s$
- جدول ۵-۲۵: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
 با شرایط مرزی SS_SS و $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 2$
- جدول ۵-۲۶: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
 با شرایط مرزی SS_SS و $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 4$
- جدول ۵-۲۷: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
 با شرایط مرزی SS_SS و $[(0/90)_k]_s, \frac{L}{R} = 2$
- جدول ۵-۲۸: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته

- با شرایط مرزی SS_SS و $\frac{L}{R} = 4$, $[(0/90)_k]_s$
- ۹۷ جدول ۵-۲۹: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
- با شرایط مرزی SS_SS , $\frac{L}{R} = 2$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۹۷ جدول ۵-۳۰: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه کمانش یافته
- با شرایط مرزی SS_SS , $\frac{L}{R} = 4$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۱۰۲ جدول ۵-۳۱: تنش محوری و فشار خارجی بحرانی بی بعد شده برای آرایش $[(0)_8]_s$
- ۱۰۴ جدول ۵-۳۲: تنش محوری و فشار خارجی بحرانی بی بعد شده برای آرایش $[(0)_{32}]_s$
- ۱۰۵ جدول ۵-۳۳: تنش محوری و فشار خارجی بحرانی بی بعد شده برای آرایش $[(0/90)_4]_s$
- ۱۰۶ جدول ۵-۳۴: تنش محوری و فشار خارجی بحرانی بی بعد شده برای آرایش $[(0/90)_{16}]_s$
- ۱۱۶ جدول ۵-۳۵: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه
با شرایط مرزی SS_SS , $N = 0.5$ و بارگذاری محوری
- ۱۱۶ جدول ۵-۳۶: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه
با شرایط مرزی SS_SS , $N = 2$ و بارگذاری محوری
- ۱۱۹ جدول ۵-۳۷: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه
با شرایط مرزی SS_SS , $N = 0.5$ و بارگذاری فشار خارجی
- ۱۱۹ جدول ۵-۳۸: تعداد موج‌های محیطی و نیم موج‌های طولی استوانه
با شرایط مرزی SS_SS , $N = 2$ و بارگذاری فشار خارجی

فهرست نمودارها

عنوان و شماره

صفحه

- ۶۲ نمودار ۵-۱: ضریب کمانش حاصل از تئوری‌های مختلف کرنش - تغییر مکان
بر حسب تعداد حلقه‌ها برای بار محوری
- ۶۲ نمودار ۵-۲: ضریب کمانش حاصل از تئوری مرتبه اول برشی کرنش - تغییر مکان
بر حسب تعداد حلقه‌ها برای بار محوری
- ۶۳ نمودار ۵-۳: ضریب کمانش حاصل از تئوری‌های مختلف کرنش - تغییر مکان
بر حسب تعداد حلقه‌ها برای فشار خارجی
- ۶۳ نمودار ۵-۴: ضریب کمانش حاصل از تئوری مرتبه اول برشی کرنش - تغییر مکان
بر حسب تعداد حلقه‌ها برای فشار خارجی
- ۶۷ نمودار ۵-۵: ضریب کمانش تئوری‌های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی SS_SS و نسبت‌های مختلف $\frac{t}{R}$
- ۶۹ نمودار ۵-۶: ضریب کمانش تئوری‌های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی SS_SS و نسبت‌های مختلف $\frac{t}{R}$
- ۶۹ نمودار ۵-۷: ضریب کمانش تئوری‌های مختلف کرنش - تغییر مکان
برای شرایط مرزی SS_SS و نسبت‌های مختلف $\frac{t}{R}$
- ۷۲ نمودار ۵-۸: اثر نسبت $\frac{L}{R}$ بر ضریب کمانش استوانه
با شرایط مرزی $BC: SS_SS$ ، $[(0)_{2k}]_s$
- ۷۳ نمودار ۵-۹: اثر نسبت $\frac{L}{R}$ بر ضریب کمانش استوانه
با شرایط مرزی $BC: SS_SS$ ، $[(0/90)_k]_s$
- ۷۳ نمودار ۵-۱۰: اثر نسبت $\frac{L}{R}$ بر ضریب کمانش استوانه
با شرایط مرزی $BC: SS_SS$ ، $[(\pm 45)_k]_s$
- ۸۵ نمودار ۵-۱۱: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش استوانه با $\frac{L}{R} = 2$ ، $[(0)_{2k}]_s$
- ۸۶ نمودار ۵-۱۲: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش استوانه با $\frac{L}{R} = 2$ ، $[(0/90)_k]_s$

- ۸۶ نمودار ۵-۱۳: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش استوانه با $\frac{L}{R} = 2$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۸۹ نمودار ۵-۱۴: ضریب کمانش استوانه با آرایش نامتقارن $(\pm 45)_k$ بر اساس تئوری‌های مختلف
- ۹۱ نمودار ۵-۱۵: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 2$ و $\frac{t}{R}$, $[(0)_{2k}]_s$
- ۹۲ نمودار ۵-۱۶: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 4$ و $\frac{t}{R}$, $[(0)_{2k}]_s$
- ۹۳ نمودار ۵-۱۷: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 2$ و $\frac{t}{R}$, $[(0/90)_k]_s$
- ۹۳ نمودار ۵-۱۸: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 4$ و $\frac{t}{R}$, $[(0/90)_k]_s$
- ۹۴ نمودار ۵-۱۹: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 2$ برای آرایش $[(\pm 45)_k]_s$
- ۹۵ نمودار ۵-۲۰: ضریب کمانش برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{R} = 4$ برای آرایش $[(\pm 45)_k]_s$
- ۹۹ نمودار ۵-۲۱: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش آرایش $[(0)_{2k}]_s$, $\frac{L}{R} = 2$
- ۹۹ نمودار ۵-۲۲: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش آرایش $[(0/90)_k]_s$, $\frac{L}{R} = 2$
- ۱۰۰ نمودار ۵-۲۳: اثر شرایط مرزی بر ضریب کمانش آرایش $[(\pm 45)_k]_s$, $\frac{L}{R} = 2$
- ۱۰۳ نمودار ۵-۲۴: ترکیب بارگذاری محوری و فشاری برای $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(0)_8]_s$
- ۱۰۵ نمودار ۵-۲۵: ترکیب بارگذاری محوری و فشاری برای $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(0)_{32}]_s$
- ۱۰۷ نمودار ۵-۲۶: ترکیب بارگذاری محوری و فشاری برای $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(0/90)_4]_s$
- ۱۰۷ نمودار ۵-۲۷: ترکیب بارگذاری محوری و فشاری برای $BC: SS - SS$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(0/90)_{16}]_s$
- ۱۱۳ نمودار ۵-۲۸: ضریب کمانش بار محوری ضخامت‌های مختلف برای $N = 0$
- ۱۱۴ نمودار ۵-۲۹: ضریب کمانش بار محوری ضخامت‌های مختلف برای $N = 0.5$
- ۱۱۴ نمودار ۵-۳۰: ضریب کمانش بار محوری برای ضخامت‌های مختلف و $N = 2$
- ۱۱۵ نمودار ۵-۳۱: ضریب کمانش بار محوری برای ضخامت‌های مختلف و N بینهایت
- ۱۱۷ نمودار ۵-۳۲: ضریب کمانش فشار خارجی برای ضخامت‌های مختلف و $N = 0$
- ۱۱۷ نمودار ۵-۳۳: ضریب کمانش فشار خارجی برای ضخامت‌های مختلف و $N = 0.5$
- ۱۱۸ نمودار ۵-۳۴: ضریب کمانش فشار خارجی برای ضخامت‌های مختلف و $N = 2$
- ۱۱۸ نمودار ۵-۳۵: ضریب کمانش فشار خارجی برای ضخامت‌های مختلف و N بینهایت

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان و شماره

۴	شکل ۱-۱: کمانش یک مخزن
۶	شکل ۲-۱: نمودار بار - کوتاه شدگی برای پوسته استوانه‌ای ایده‌آل
۷	شکل ۳-۱: مود کمانش رینگی (متقارن) استوانه
۷	شکل ۴-۱: نحوه تغییر شکل استوانه در مد کمانش رینگی
۸	شکل ۵-۱: مود کمانش شطرنجی (نامتقارن) استوانه
۸	شکل ۶-۱: نحوه تغییر شکل استوانه در مود کمانش شطرنجی
۹	شکل ۷-۱: پدیده فروریزش
۱۱	شکل ۸-۱: رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر فشار خارجی
۱۲	شکل ۹-۱: حالت تنش منجر به کمانش در استوانه تحت پیچش
۲۶	شکل ۱-۳: یک پوسته و سطح میانی آن
۲۹	شکل ۲-۳: یک پوسته با دو انحنا
۳۲	شکل ۳-۳: پوسته استوانه‌ای و تغییر شکل‌های مربوط به آن
۳۳	شکل ۴-۳: مفهوم هندسی تغییر شکل طولی
۳۳	شکل ۵-۳: مفهوم هندسی تغییر شکل محیطی
۴۱	شکل ۱-۴: نمونه‌ای از یک حلقه محدود، دستگاه مختصات و درجات آزادی آن
۴۲	شکل ۲-۴: استوانه تقسیم شده با استفاده از حلقه‌های محدود
۵۲	شکل ۳-۴: انعکاس یک بردار در فضا نسبت به یک صفحه
۵۹	شکل ۴-۴: فلوچارت کد عددی حلقه محدود
۶۵	شکل ۱-۵: مود کمانش رینگی استوانه با سه نیم موج در جهت طولی
۷۵	شکل ۲-۵: مود کمانش شطرنجی با یک نیم موج طولی و ۴ موج محیطی برای استوانه با آرایش $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 2, k = 8$
۷۶	شکل ۳-۵: مود کمانش شطرنجی با ۳ نیم موج طولی و ۴ موج محیطی برای استوانه با آرایش $[(0)_{2k}]_s, \frac{L}{R} = 4, k = 8$
۷۷	شکل ۴-۵: مود کمانش شطرنجی با ۳ نیم موج طولی و ۴ موج محیطی برای استوانه با آرایش $[(0/90)_k]_s, \frac{L}{R} = 2, k = 8$

- ۷۸ شکل ۵-۵: مود کمانش شطرنجی با ۵ نیم موج طولی و ۴ موج محیطی
 برای استوانه با آرایش $k=8$, $\frac{L}{R} = 4$, $[(0/90)_k]_s$
- ۷۹ شکل ۶-۵: مود کمانش رینگی با ۵ نیم موج طولی برای استوانه
 با آرایش $k=8$, $\frac{L}{R} = 2$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۸۰ شکل ۷-۵: مود کمانش رینگی با ۹ نیم موج طولی برای استوانه
 با آرایش $k=8$, $\frac{L}{R} = 4$, $[(\pm 45)_k]_s$
- ۹۸ شکل ۸-۵: شکل مود کمانش برای حالت بارگذاری فشاری با ۵ موج محیطی
- ۱۰۹ شکل ۹-۵: مدل سازی ماده با خواص تابعی الف) لایه ای ب) پیوسته
- ۱۱۰ شکل ۱۰-۵: نسبت حجمی فلز در جهت ضخامت برای مقادیر مختلف N

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

هنگامی که سفتی یک سازه تحت تاثیر بارکاهش می یابد و سازه متحمل جابجایی های عرضی بزرگ و قابل مشاهده می شود، از عبارت کمانش استفاده می شود. برای بارهای کوچک فرآیند کمانش الاستیک خواهد بود، چون پس از برداشتن بار جابجایی ها ناپدید می شوند. اگر جابجایی ناشی از کمانش بیش از حد بزرگ شود سازه گسیخته خواهد شد. در طراحی سازه ها اگر یک عضو یا بخشی از آن تحت کمانش قرار گیرد، در تحلیل آن می بایست هر دو مبحث ایمنی مقاومتی و ایمنی کمانشی بررسی شود که دلیل لزوم مطالعه مبحث کمانش نیز همین امر است.

در سال های اخیر و با پیشرفتهای به دست آمده در زمینه تولید مواد با مقاومت زیاد، سازه ها احتیاج به میزان ماده کمتری برای تحمل بار دارند. بدین مفهوم که با داشتن مواد دارای مقاومت مکانیکی بالا عموماً ضخامت و سطح مقطع مورد نیاز سازه ها جهت تحمل بارهای وارده کم شده و در نتیجه سازه ها لاغرتر و طبعاً کمانش پذیرتر شده اند. تعداد زیادی از نمونه های تاریخی موجود است که شکست سازه ای را به کمانش نسبت می دهند، مانند فروپاشی سیلوها، پل های در حال ساخت، سکوهای نفتی و شکست سازه های هواپیما پیش از رسیدن به بار نهایی طراحی.

از حدود دویست سال گذشته تاکنون تمام تلاش مهندسان و طراحان بر این بوده که تا حد امکان به جای استفاده از سازه های توپر، سنگین و جدار ضخیم^۱ از سازه های سبک و جدار نازک^۲ استفاده کنند. سازه های جدار نازک سازه هایی هستند که دارای ضخامت بسیار کم نسبت به سایر ابعاد سازه می باشند. این تعریف شامل گروه بزرگی از سازه ها می باشد که کاربرد فراوانی در صنایع مختلف اعم از صنایع هوا فضا، خودروسازی، سازه های عمرانی، سازه های دریایی و مخازن دارند. از سازه های جدار نازک می توان به سازه های صفحه ای، تیرها با مقاطع مختلف و پانلهای به کار رفته در پلها یا بدنه و بال هواپیما اشاره کرد. نکته حائز اهمیت در طراحی این نوع سازه ها معیار طراحی است که باید بر اساس معیار کمانش صورت گیرد زیرا سازه های جدار نازک به علت کم بودن ضخامتشان شدیداً نسبت به پدیده کمانش حساس هستند و ممکن است در اثر بارگذاری هایی با شدت بسیار کم دچار کمانش شوند. از آنجا که پدیده کمانش در بعضی از موارد یک پدیده ناپایدارکننده در سازه می باشد و ممکن است به شکست سازه بیانجامد شناخت این پدیده جهت طراحی سازه امری ضروری محسوب می شود. در طراحی سازه های هوایی با توجه به محدودیت وزنی این امر بسیار حساس تر می باشد. زیرا اگر طراح ضخامت صفحات و پوسته ها و سایر اجزای سازه را بیشتر از حد نیاز در نظر گیرد با توجه به افزایش وزن سازه، طرح بهینه نمی

^۱ Heavy and Thick Structures

^۲ Light and Thin Structures

باشد و خطا در طراحی محسوب می‌شود. از طرفی با کاهش ضخامت صفحات و پوسته‌ها با محدودیت کمانش روبه‌رو می‌شویم و در نتیجه طراحی این نوع سازه‌ها ملزم به یک روند تکرار و سعی و خطا می‌باشد تا نقطه بهینه طراحی مشخص شود.

۱-۲ اهمیت کمانش و عوامل ایجاد آن در پوسته‌ها

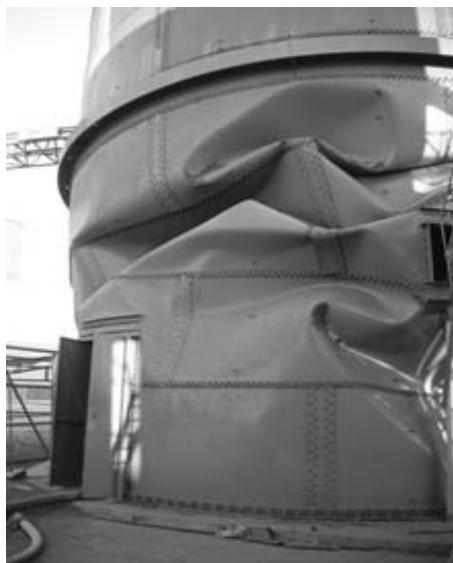
پوسته‌ها اجسامی سه بعدی هستند که توسط دو سطح منحنی محدود شده‌اند و فاصله بین این دو سطح در مقایسه با سایر ابعاد جسم کوچک است. کاربرد این اجسام در زمینه‌های مختلف زیاد است از دلایل این امر می‌توان به نسبت مقاومت به وزن زیاد و نیز سفتی زیاد پوسته‌ها اشاره کرد. از میان پوسته‌ها با اشکال هندسی مختلف پوسته‌های استوانه‌ای کاربرد وسیع‌تری دارند که به دلیل سهولت ساخت شکل استوانه در صنعت و نیز مناسب بودن این شکل هندسی برای برخی کاربردهای صنعتی می‌باشد. استفاده فراوان از پوسته‌های استوانه‌ای به خصوص در صنایع حساس از جمله در ذخیره مایعات که گاه می‌توانند مشتعل شوند و یا سمی باشند و استفاده از این نوع پوسته‌ها در وسایلی مانند هواپیماها و زیر دریایی‌ها اهمیت بررسی پدیده‌های مکانیکی مربوط به آنها و از جمله کمانش را چند برابر کرده است [۱]. در نظر بگیرید که بدنه یک هواپیما در هنگام پرواز و یا نشست در اثر نیروهای وارد شده بر آن دچار کمانش شود و یا یک زیردریایی هنگامی که در اعماق آب است در اثر فشار هیدروستاتیک آب دچار کمانش شود، فکر کردن به عواقب این دست مسائل به خوبی اهمیت بررسی کمانش را پدیدار می‌سازد. با نگاهی به شکل (۱-۱) که کمانش یک مخزن را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که وقوع این پدیده چه هزینه‌هایی اعم از جانی و مالی را می‌تواند بر بهره بردار تحمیل کند، لذا لازم است در هنگام طراحی به این مساله توجه کافی شود و این امر فقط از طریق شناخت مکانیزم کمانش و بررسی در این زمینه قابل دستیابی است. ذکر این نکته در اینجا لازم است که عموماً کمانش به صورت ناگهانی رخ می‌دهد و همین امر اهمیت بررسی آن را بیشتر می‌کند. کمانش پوسته‌های استوانه‌ای ممکن است تحت اثر موارد زیر رخ دهد:

۱- نیروی محوری

۲- فشار خارجی

۳- پیچش

۴- ترکیب موارد فوق



شکل ۱-۱: کمانش یک مخزن [۱]

۱-۳ کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر نیروی محوری

اعضای سازه‌ای که در معرض نیروی فشاری قرار دارند مستعد کمانش اویلری هستند و تنش بحرانی که منجر به کمانش اویلری می‌شود برای یک ماده وقتی بیشترین مقدار خود را دارد که قسمت اعظم ماده در فاصله‌ای دور از محور خنثی قرار گیرد، این مساله استوانه‌ها را به اعضایی موثر در پیشگیری از کمانش اویلری تبدیل می‌کند، اما هر چقدر که ضخامت استوانه کمتر شود شکل دیگری از کمانش به نام کمانش موضعی^۳ احتمال وقوع بیشتری دارد. در کمانش موضعی پوسته‌های استوانه‌ای بر خلاف کمانش اویلری که پوسته در راستای طولی دچار خمش می‌شود و شکل سطح مقطع ثابت است، در این حالت تغییر شکل در مقاطع مختلف پوسته رخ می‌دهد و محور طولی پوسته استوانه‌ای ثابت باقی می‌ماند. از اعضای سازه‌ای تحت اثر نیروی محوری که در معرض کمانش هستند می‌توان به هواپیماها، شاتل‌ها، مخازن و لوله‌های کار شده در زیر دریا و یا متعلقات پلها اشاره کرد. در بسیاری از موارد به دلیل نازک بودن پوسته، معیار کمانش به عنوان عامل موثر در طراحی است. به عبارت دیگر کمانش پوسته در بارهایی به مراتب کمتر از بار مقاومتی ماده رخ می‌دهد و می‌تواند موجب تخریب آن گردد.

نیروی محوری در یک پوسته استوانه‌ای می‌تواند به دلایل مختلف در این نوع سازه‌ها ایجاد شود، به عنوان مثال در یک برج تقطیر وزن سازه یک نیروی محوری تقریباً یکنواخت ایجاد می‌کند، اما در همین برج نیروی عرضی ناشی از باد یا زلزله با ایجاد یک ممان می‌تواند به پیدایش فشار

^۳ Local Buckling