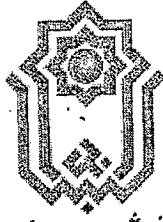


۱۷/۱/۱۰۳۰۱۳
۱۴۱۲۵

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۰۸۶۱۱



دانشگاه بوشهر

دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

تحلیل ارتعاشات و کمانش ورقهای ضخیم مستطیلی، بر روی بستر الاستیک دو پارامتری، تحت بار

صفحه‌ای متغیر و با دو تکیه گاه ساده متقابل

مجلس اطلاعات درک علمی پایه
توسعه و نوآوری

استاد راهنما:

دکتر اکبر علی بیگلر

استاد مشاور:

دکتر محمود شاکری

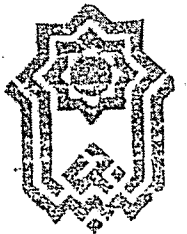
پژوهشگر:

حامد اخوان

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۱۳

زمستان ۱۳۸۶

۱۰۸۶۱۱



دانشگاه بوعلی سینا
دانشکده مهندسی

بیتنامی

تاریخ
شماره
پوست

گواهی تصویب پایان نامه

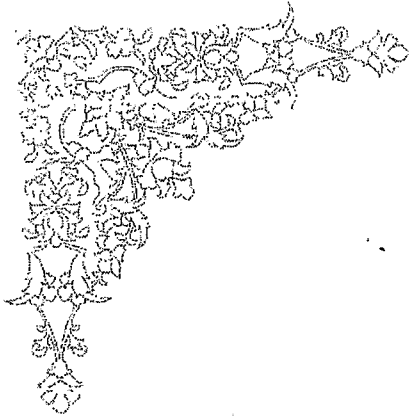
موضوع پایان نامه: *تحلیل اثر تعاملاً با آب و هوا در ...*
صنعتی استغیر نانو تکنیک گاه سازه متقابل

بدینوسیله گواهی می شود جلسه دفاعیه پایان نامه خانم / آقای: *حامد اجروان* ...
رشته: *مهندسی عمران* و رودی: *۸۴۰۰* نيمسال انتخابی:
در روز: *پنجشنبه* مورخ: *۰۸/۰۲/۰۸* ساعت: *۱۱:۰۰* تحت سرپرستی:
۱- استاد راهنما: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر علی بهرامی*
۲- استاد مشاور: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر ...* ...

در محل *دانشگاه بوعلی سینا* برگزار گردید که پس از بررسی از طرف نامبردگان پایان نامه فوق با
نمره *۴۰۰* و درجه *۰۰* در تاریخ *۰۸/۰۲/۰۸* به تصویب رسید.

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد راهنما: *دکتر بهرامی*
نام و نام خانوادگی و امضاء استاد مشاور:
نام و نام خانوادگی و امضاء اساتید مدعو: ۱- *دکتر ...*
۲- *دکتر ...*
۳- *دکتر ...*
نام و نام خانوادگی و امضاء ناظر تحصیلات تکمیلی: *دکتر ...*
نام و نام خانوادگی مدیر گروه یا نماینده و امضاء: *دکتر ...*

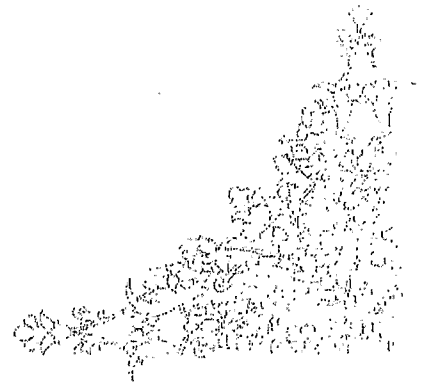
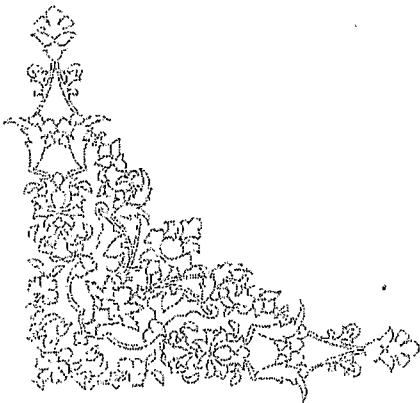
مدیر گروه مهندسی: *دکتر ...*
نام و نام خانوادگی و امضاء: *دکتر ...*



تقدیم به

پدر و مادرم

عزیزانی که در تمامی مراحل زندگی مرا یاری مهربان و تکیه گاهی مطمئن بوده اند



پس از سپاس از خداوند متعال،

از زحمات استادان ارجمند جناب آقای دکتر علی بیگلو، دکتر شاکری، دکتر سیفی، و دکتر

تاجداری که مرا در انجام این پروژه یاری نموده اند، قدردانی می نمایم.

از نسیمی دفتر ایام بر هم می خورد

از ورق گردانی لیل و نهار اندیشه کن

نام خانوادگی : اخوان	نام : حامد
عنوان پایان نامه : تحلیل ارتعاشات و کماتش ورقهای ضخیم مستطیلی، بر روی بستر الاستیک دو پارامتری، تحت بار صفحه‌ای متغیر و با دو تکیه گاه ساده متقابل	
استاد راهنما : دکتر اکبر علی بیگلو	استاد مشاور : دکتر محمود شاکری
مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد	رشته : مهندسی مکانیک
گرایش : طراحی کاربردی	گرایش : طراحی کاربردی
دانشگاه : بو علی سینا	دانشکده : مهندسی
تاریخ دفاعیه : ۱۳۸۶/۱۲/۴	تعداد صفحات : ۱۶۱
واژه های کلیدی : ورق، مستطیلی، قطاعی، بستر الاستیک دو پارامتری، بار صفحه ای، فرکانس طبیعی، باکلینگ	
چکیده : <p>صفحات مستطیلی در شاخه های متنوعی از صنایع تکنولوژی مدرن از قبیل صنایع مکانیکی، هوافضا، الکتریکی، دریایی، صنایع اپتیک، صنایع هسته ای و مهندسی سازه کاربرد دارند. بنابراین آگاهی از رفتار ارتعاشی و کماتش آنها در طراحی ها بسیار حائز اهمیت است.</p> <p>راه حل مسائل مقادیر ویژه برای ورقهای ضخیم را با چندین روش تقریبی در خلال سال های گذشته به دست آورده اند. روش های اجزاء محدود، نوار محدود، لایه محدود و روش های برهم نهی برای بررسی مسائل مربوط به مقادیر ویژه این صفحات ضخیم استفاده شدند. تحقیقات جدید در مورد ارتعاشات آزاد ورقهای ضخیم با هر ضخامت با استفاده از آنالیز سه بعدی الاستیسیته و با استفاده از چند جمله ای چیبیشف به عنوان تابع در روش ریلی ریتز صورت گرفته است.</p> <p>ورقهای نسبتاً ضخیم مستطیلی، بطور وسیعی در مهندسی عمران استفاده می شوند. همچنین علاوه بر سازه های عمرانی، در صنعت هوا فضا و به طور مشخص در ساخت بدنه موشک، از ورق های ضخیم استفاده می شود. پی ها سازه هایی هستند که برای انتقال بارهای وارده از سازه رویی به خاک زیرین، طراحی و ساخته می شوند.</p>	

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیلی دقیق میندین معادلات ارتعاشی و کمانش ورق مستطیلی نسبتاً ضخیم بدست آمده اند. این معادلات برای ورق بروی بستر الاستیک دو پارامتری و در معرض بارهای فشاری یکنواخت و غیر یکنواخت خطی هستند. بسترهای الاستیک دو پارامتری مدل هایی از خاک می باشند. باند فرودگاه ها و پیاده رو ها نمونه های کاربردی این تحقیق تئوری می باشند.

پروژه حاضر نتایج فرکانس طبیعی، اساسی، بار کمانش، و بحرانی را برای ۶ حالتی که دارای دو وجه مقابل با تکیه گاه ساده و دو وجه دیگر با تکیه گاه های ساده (S)، گیردار (C)، و آزاد (F) هستند (FCSC ، SCSS ، SSSS ، SCSF ، SFSF ، SSSF) به دست می دهد. این نتایج برای محدوده وسیعی از نسبت طول به عرض، نسبت ضخامت به طول، دو ضریب پایه الاستیک دو پارامتری (پسترناک)، سه نوع بار جانبی خطی در یک سو، بار جانبی یکنواخت از هر دو سو بدست آمده اند.

به علاوه این تحقیق شامل راه حل DQ برای ورق نازک قطاعی دایروی است. این ورق بر روی پایه پسترناک قرار گرفته است؛ در هر سه لبه شعاعی و محیطی بار صفحه ای ای یکنواخت قرار دارد. شش شرط مرزی SCC, SSS, SSC, CSS, CCC, و CSC برای این ورق بررسی شده اند. نتایج فرکانس و بار کمانش برای زوایای متفاوت و ضرایب متفاوت بستر پسترناک ارائه شده اند.

همه امتیاز های این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد و در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب پایان

نامه در مجلات، کنفرانسها و یا سخنرانیها باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با

ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر اینصورت مورد پیگرد قانونی

قرار خواهد گرفت.

فهرست مطالب

۱. مقدمه، مرور منابع و کاربرد های ورق ضخیم در صنعت..... ۱
۲. تئوری میندلین و معادلات حاکم بر رفتار ورق مستطیلی..... ۷
۳. بدست آوردن معادلات حاکم بر ارتعاشات ورق مستطیلی و تعیین فرکانسهای طبیعی و بار های باکلینگ ورق..... ۱۵
۴. اعمال شرایط مرزی به ورق مستطیلی..... ۳۶
۵. مقایسه نتایج برای ورق مستطیلی..... ۵۶
۶. بار های بحرانی و فرکانس های اساسی ورق مستطیلی..... ۵۹
۷. بحث و نتیجه گیری بار کماتش ورق مستطیلی..... ۶۶
۸. بحث و نتیجه گیری فرکانس طبیعی ورق مستطیلی..... ۷۳
۹. ورق قطاعی بر روی پایه الاستیک دو پارامتری و در معرض بار های صفحه ای یکنواخت..... ۷۷
۱۰. فرکانس های طبیعی ورق نازک قطاعی، و نتیجه گیری..... ۸۳
۱۱. عناوین تحقیقات پیشنهادی..... ۹۳
۱۲. بیوست A. حل شرط های مرزی دارای لبه آزاد در ورق مستطیلی..... ۱۴۶
۱۳. بیوست B. بار های کماتش ورق مستطیلی..... ۱۵۶
۱۴. بیوست C. فرکانس های طبیعی ورق مستطیلی..... ۱۵۹
۱۵. مراجع..... ۱۶۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): مختصات هندسی ورق..... ۷
- شکل (۱-۳): ورق با بارهای جانبی از هر دو سو..... ۱۶
- شکل (۲-۳): انواع بارهای جانبی اعمال شده به ورق..... ۱۶
- شکل (۱-۴): انواع شرایط مرزی برای ورق با دو لبه متقابل موازی..... ۳۶
- شکل (۱-۷): کاهش بار بحرانی با افزایش نسبت ضخامت به طول در ورق با بار یکنواخت در یک سو در ورق SSSS..... ۶۶
- شکل (۲-۷): کاهش بار بحرانی با افزایش نسبت ضخامت به طول در ورق با بار یکنواخت در یک سو در ورق SCSS..... ۶۶
- شکل (۳-۷): کاهش بار بحرانی با افزایش نسبت ضخامت به طول در ورق با بار یکنواخت در یک سو در ورق SCSC..... ۶۷
- شکل (۴-۷): افزایش بار بحرانی با افزایش K_2 در ورق با بار یکنواخت در یک سو برای ورق مربعی با نسبت ضخامت به طول ۰٫۲، و بدون پایه وینکلر در ضرایب پایه $100-0$ ۶۷
- شکل (۵-۷): افزایش بار بحرانی با افزایش K_2 در ورق با بار یکنواخت در یک سو برای ورق مربعی با نسبت ضخامت به طول ۰٫۲، و بدون پایه وینکلر در ضرایب پایه $100-0$ ۶۸
- شکل (۶-۷): افزایش بار بحرانی با افزایش نسبت طول به عرض در ورق با بار یکنواخت در یک سو برای ورق SSSS..... ۶۹
- شکل (۷-۷): افزایش بار بحرانی با افزایش نسبت طول به عرض در ورق با بار یکنواخت در یک سو..... ۶۹
- شکل (۸-۷): تغییرات بار بحرانی با افزایش η در ورق SCSC با بار یکنواخت در یک سو..... ۷۰
- شکل (۹-۷): تغییرات بار بحرانی با افزایش η در ورق SCSC با بار یکنواخت در یک سو $\delta = 0.2, \bar{K}_S = 0, m = 1, M = 0$ ۷۰
- شکل (۱۰-۷): تغییرات بار بحرانی با افزایش η در ورق SCSC با بار متغییر در یک سو $\delta = 0.2, \bar{K}_S = 0, \bar{K}_H = 0$ ۷۱
- شکل (۱۱-۷): تغییرات بار بحرانی با افزایش η در ورق SCSC با ضخامت‌های متفاوت با بار یکنواخت در یک سو $\bar{K}_S = 0, \bar{K}_H = 0$ ۷۲
- شکل (۱-۸): کاهش فرکانس اساسی با افزایش نسبت ضخامت به طول در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو در ورق SSSS با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۳
- شکل (۲-۸): کاهش فرکانس اساسی با افزایش نسبت ضخامت به طول در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو در ورق SCSC با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۳
- شکل (۳-۸): افزایش فرکانس اساسی با افزایش K_2 در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو برای ورق مربعی با نسبت ضخامت به طول ۰٫۲، و بدون پایه وینکلر با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۴
- شکل (۴-۸): افزایش فرکانس اساسی با افزایش K_1 در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو برای ورق مربعی با نسبت ضخامت به طول ۰٫۲، و بدون پایه برشی با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۴
- شکل (۵-۸): افزایش فرکانس اساسی با افزایش نسبت طول به عرض در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو برای ورق SSSS با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۵
- شکل (۶-۸): افزایش فرکانس اساسی با افزایش نسبت طول به عرض در ورق با بار صفحه‌ای در یک سو با شرایط مرزی SSSS و SCSC با نسبت $(N/Ncr=0, 5)$ ۷۵
- شکل (۱-۹): ورق قطاعی در معرض بارهای شعاعی و محیطی یکنواخت در مختصات قطبی..... ۷۷
- شکل (۲-۹): ورق قطاعی نازک بر روی بستر الاستیک دو پارامتری در مختصات قطبی..... ۷۸
- شکل (۳-۹): طرح نقطه بندی ورق قطاعی..... ۷۹
- شکل (۱-۱۰): مطالعه همگرایی برای ورق قطاعی با شرایط مرزی متفاوت..... ۸۳
- شکل (۲-۱۰): فرکانس‌های طبیعی ورق قطاعی در برابر زوایای ورق برای شرایط مرزی متفاوت..... ۸۷
- شکل (۳-۱۰): فرکانس‌های طبیعی ورق قطاعی CCC به صورت $1/4$ دایره در برابر ضرایب $100-0$ بستر وینکلر و لایه برشی..... ۸۷

- شکل (۱۰-۴): فرکانس های طبیعی ورق قطاعی CCC به صورت $1/4$ دایره در برابر ضرایب $1000-1000$ وینکلر
و لایه برشی.....
۸۸.....
- شکل (۱۰-۵): فرکانس های طبیعی ورق قطاعی CCC در برابر زوایای α متفاوت برای ضرایب $1000-1000$ وینکلر.....
۸۹.....
- شکل (۱۰-۶): تغییرات فرکانس اول ورق قطاعی SSS در برابر بارگذاری کامل شعاعی و محیطی با زوایای ورق متفاوت.....
۹۱.....
- شکل (۱۰-۷): تغییرات فرکانس اول ورق قطاعی SSS در برابر بارگذاری کامل شعاعی و محیطی
با ضرایب متفاوت بستر الاستیک.....
۹۲.....

فهرست جداول

- جدول (۱-۵): مقایسه بارهای بحرانی بی بعد $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ از روش سری های توانی و روش تیموشنکو با تئوری میندلین برای ورق نازک تحت بار یکنواخت و بدون پایه الاستیک دو بعدی (شرط مرزی SCSC)..... ۵۶
- جدول (۲-۵): مقایسه بارهای بحرانی بی بعد $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ از روش سری های توانی و روش انرژی با تئوری میندلین برای ورق نازک تحت بار یکنواخت و بدون پایه الاستیک دو بعدی (شرط مرزی SCSC)..... ۵۷
- جدول (۳-۵): مقایسه بارهای کماتش مود اول $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ از روش تابع گرین با تئوری میندلین برای ورق نازک مربعی بر روی پایه الاستیک دو بعدی و تحت بار صفحه ای یکنواخت (شرط مرزی SCSC)..... ۵۷
- جدول (۴-۵): مقایسه فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ از روش تابع گرین با تئوری میندلین برای ورق نازک مربعی بر روی پایه الاستیک دو بعدی و تحت بار صفحه ای یکنواخت (شرط مرزی SCSC)..... ۵۷
- جدول (۵-۵): مقایسه فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ از روش سری های توانی با تئوری میندلین برای ورق نازک مربعی بدون پایه الاستیک دو بعدی و تحت بار صفحه ای یکنواخت و متغیر (شرط مرزی SCSC)..... ۵۸
- جدول (۶-۵): مقایسه فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ از روش تابع گرین با تئوری میندلین برای ورق نازک مربعی با پایه الاستیک دو بعدی (همه شش شرط مرزی مختلف)..... ۵۸
- جدول (۱-۶): بارهای بحرانی بی بعد $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ برای ورق های مستطیلی SCSC با بار یکنواخت در یک سو $M = 0$ ۶۰
- جدول (۲-۶): بارهای بحرانی بی بعد $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ برای ورق های مستطیلی SCSC با بار متغیر در یک سو $M = 0.5$ ۶۱
- جدول (۳-۶): بارهای بحرانی بی بعد $\bar{N}_{cr} = N_{cr} b^2/D$ برای ورق های مستطیلی SCSC با بار متغیر در یک سو $M = 1$ ۶۲
- جدول (۴-۶): فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ برای ورق های مستطیلی SCSC تحت بار صفحه ای با $N_0/\bar{N}_{cr} = 0.25$ ۶۳
- جدول (۵-۶): فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ برای ورق های مستطیلی SCSC تحت بار صفحه ای با $N_0/\bar{N}_{cr} = 0.5$ ۶۴
- جدول (۶-۶): فرکانس های اساسی بی بعد $\beta = \omega \alpha^2 \sqrt{\rho h/D}$ برای ورق های مستطیلی SCSC تحت بار صفحه ای با $N_0/\bar{N}_{cr} = 0.75$ ۶۵
- جدول (۱-۱۰): مقایسه فرکانس های طبیعی اول ورق قطاعی CSS..... ۸۴
- جدول (۲-۱۰): مقایسه فرکانس های طبیعی اول ورق قطاعی CCC..... ۸۴
- جدول (۳-۱۰): مقایسه فرکانس های طبیعی اول ورق قطاعی SCC..... ۸۵
- جدول (۴-۱۰): مقایسه فرکانس های طبیعی اول ورق قطاعی SCS..... ۸۵
- جدول (۵-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی CSS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۸۵
- جدول (۶-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی CCC بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۸۶
- جدول (۷-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی SCC بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۸۶
- جدول (۸-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی SCS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۸۶
- جدول (۹-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی CCC بر روی بستر الاستیک وینکلر..... ۸۶
- جدول (۱۰-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی CCC بر روی بستر الاستیک وینکلر..... ۸۷
- جدول (۱۱-۱۰): فرکانس های طبیعی اول برای ورق قطاعی CCC بر روی بستر الاستیک وینکلر با زوایای α متفاوت..... ۸۷
- جدول (۱۲-۱۰): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی CSS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۰
- جدول (۱۳-۱۰): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی CCC بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۰

- جدول (۱۰-۱۴): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی SSS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۰
- جدول (۱۰-۱۵): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی SCC بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۰
- جدول (۱۰-۱۶): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی SCS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۱
- جدول (۱۰-۱۷): شش فرکانس طبیعی اول برای ورق قطاعی CCS بر روی بستر الاستیک دو پارامتری..... ۹۱
- جدول (B-۱): بار کماتش ورق SSSS با $N_x=N_y=N_{cr}$ ۹۶
- جدول (B-۲): بار کماتش ورق SCSS با $N_x=N_y=N_{cr}$ ۱۰۰
- جدول (B-۳): بار کماتش ورق SCSC با $N_x=N_y=N_{cr}$ ۱۰۴
- جدول (B-۴): بار کماتش ورق SSSS با N_x و $M=0$ ۱۰۸
- جدول (B-۵): بار کماتش ورق SCSS با N_x و $M=0$ ۱۱۰
- جدول (B-۶): بار کماتش ورق SCSC با N_x و $M=0$ ۱۱۲
- جدول (B-۷): بار کماتش ورق SSSS با N_x و $M=0, 5$ ۱۱۴
- جدول (B-۸): بار کماتش ورق SCSS با N_x و $M=0, 5$ ۱۱۶
- جدول (B-۹): بار کماتش ورق SCSC با N_x و $M=0, 5$ ۱۱۸
- جدول (B-۱۰): بار کماتش ورق SSSS با N_x و $M=1$ ۱۲۰
- جدول (B-۱۱): بار کماتش ورق SCSS با N_x و $M=1$ ۱۲۲
- جدول (B-۱۲): بار کماتش ورق SCSC با N_x و $M=1$ ۱۲۴
- جدول (C-۱): شش فرکانس های طبیعی اول ورق SSSS با $N_x=N_y=+$ ۱۲۶
- جدول (C-۲): شش فرکانس های طبیعی اول ورق SCSS با $N_x=N_y=+$ ۱۳۴
- جدول (C-۳): شش فرکانس های طبیعی اول ورق SCSC با $N_x=N_y=+$ ۱۴۲
- جدول (C-۴): فرکانس های طبیعی اول ورق SSSS با $N_x/N_{cr}=0, 25$ ۱۵۰
- جدول (C-۵): فرکانس های طبیعی اول ورق SSSS با $N_x/N_{cr}=0, 5$ ۱۵۱
- جدول (C-۶): فرکانس های طبیعی اول ورق SSSS با $N_x/N_{cr}=0, 75$ ۱۵۳
- جدول (C-۷): فرکانس های طبیعی اول ورق SCSC با $N_x/N_{cr}=0, 25$ ۱۵۴
- جدول (C-۸): فرکانس های طبیعی اول ورق SCSC با $N_x/N_{cr}=0, 5$ ۱۵۶
- جدول (C-۹): فرکانس های طبیعی اول ورق SCSC با $N_x/N_{cr}=0, 75$ ۱۵۷

فهرست علائم

a, b
 E
 D
 G
 h
 K^2
 K_s
 K_w
 \bar{K}_S, \bar{K}_W
 M_{11}, M_{22}, M_{12}
 $\bar{M}_{11}, \bar{M}_{22}, \bar{M}_{12}$
 N_{cr}
 N_0
 P
 \bar{P}
 Q_1, Q_2
 \bar{Q}_1, \bar{Q}_2
 t
 x_1, x_2, x_3
 X_1, X_2
 $U_i \ (i=1,2,3)$

 β
 δ
 $\varepsilon_{i,j} \ (i, j=1,2,3)$
 ν
 ρ
 $\sigma_{i,l} \ (i, j=1,2,3)$
 ω
 ψ_1, ψ_2
 $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$
 ψ_3
 $\bar{\psi}_3$

طول و عرض صفحه میانی ورق به ترتیب، m
 مدول یانگ، N/m^2
 سختی خمشی ورق، Nm
 مدول برشی، N/m^2
 ضخامت ورق، m
 ضریب تصحیح برشی،
 ضریب الاستیک لایه برشی بستر، N/m^2
 ضریب الاستیک وینکلر بستر، N/m
 ضرایب بی بعد لایه برشی و وینکلر بستر به ترتیب،
 گشتاور خمشی بر واحد طول در صفحه x_1 و x_2 به ترتیب، و گشتاور پیچشی بر واحد طول، N
 گشتاور خمشی بر واحد طول (بی بعد) در صفحه x_1 و x_2 به ترتیب، و گشتاور پیچشی بر واحد طول (بی بعد)،
 نیروی بحرانی
 بیشترین نیروی صفحه ای
 نیروی عمود بر صفحه میانی، N/m^2
 نیروی بی بعد عمود بر صفحه میانی،
 نیروهای برشی در صفحه x_1 و x_2 به ترتیب، N/m
 نیروهای برشی بی بعد در صفحه x_1 و x_2 به ترتیب،
 زمان، s
 متغیرهای محور مختصات،
 متغیرهای بی بعد محور مختصات در صفحه،
 جابجایی ورق در جهت محورهای مختصات، m

فهرست علائم یونانی

فرکانس طبیعی بی بعد،
 نسبت ضخامت به طول ورق،
 مؤلفه های کرنش،
 ضریب پواسن،
 چگالی حجمی، Kg/m^3
 مؤلفه های تنش، N/m^2
 فرکانس طبیعی زاویه ای، $1/s$
 چرخش خمشی حول محور x_2 و x_1 به ترتیب،
 چرخش خمشی بی بعد حول محور x_2 و x_1 به ترتیب،
 جابجایی عمودی در جهت x_3 ، m
 جابجایی عمودی بی بعد در جهت x_3 ، $-$

۱. مقدمه، مرور منابع و کاربرد های ورق ضخیم در صنعت

کارهای منتشر شده در این باب، در حد کفایت است. اکثریت آنها بر اساس تئوری ورق های نازک می باشد. یک منبع عالی در این زمینه، کار Liessa در سال ۱۹۶۹ [۱] و مقالات وی می باشد. کار قابل ملاحظه او بر روی صفحات مستطیلی، شامل فهم دقیق و نتایج آنالیزی برای ۲۱ حالت مختلف شرایط مرزی کلاسیک می باشد. تئوری ورق نازک از اثرات تغییر شکل های برشی و اینرسی چرخشی صرف نظر می کند که در تعیین فرکانس های ارتعاشی بسیار مهم می باشند. این خطا با افزایش ضخامت ورق افزایش می یابد. فعالیت های میندین و همکارانش در خلال سال های ۱۹۵۱ [۲] تا ۱۹۵۶ [۳] منجر به تدوین تئوری میندین شد که به صورت تئوری تغییر شکل برشی مرتبه ۱ برای ورقهای نسبتاً ضخیم با در نظر گرفتن اثرات اینرسی چرخشی و تنش برشی در راستای ضخامت ورق می باشد. تئوری تغییر شکل برشی درجه ۱ میندین یک ضریب تصحیح برشی برای پوشش دادن خطای ناشی از تقریب کرنش برشی به صورت یکنواخت در امتداد ضخامت که ایجاد تنش برشی ناخواسته در سطوح آزاد $Z = \pm \frac{h}{2}$ می کند را در نظر می گیرد.

راه حل مسائل مقادیر ویژه برای ورقهای ضخیم را با چندین روش تقریبی در خلال سال های گذشته به دست آورده اند.

Roufeil و Dawe در سال ۱۹۸۰ [۴] رفتار ورقهای ضخیم میندین را بر اساس روش ریلی ریتز پیدا کردند. آنها از توابع تیر تیموشنکوی اصلاح شده برای پیش بینی رفتار این صفحات استفاده کردند. Liew و همکاران او از سالهای ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۵ [۵-۱۰] ارتعاشات آزاد ورق های مستطیلی میندین را با استفاده از روش ریلی ریتز بررسی کردند. آنها از توابع چند جمله ای دو بعدی و یک بعدی گرام اسمیت به عنوان توابع مجاز صفحه در روش ریلی ریتز بهره بردند. Cheung و

Zhou در سال ۲۰۰۰ [۱۱] از توابع تیر تیموشنکوی استاتیکی به عنوان توابع مجاز در روش ریلی ریتز برای مطالعات این صفحات استفاده کردند. روش های اجزاء محدود، نوار محدود، لایه محدود و روش های برهم نهی به ترتیب بوسیله Aljanabi ۱۹۸۹ [۱۲]، Dawe ۱۹۸۷ [۱۳]، Cheung و Chakrabarti ۱۹۷۲ [۱۴]، Mikami، Yushimura ۱۹۸۴ [۱۵] و Gorman ۱۹۹۶ [۱۶] برای بررسی مسایل مربوط به مقادیر ویژه این صفحات ضخیم استفاده شدند. بعلاوه بررسی های بیشتر بر روی ارتعاشات سه بعدی ورق های مستطیلی بوسیله Sirnvas ۱۹۷۰ [۱۷]، Wittrick ۱۹۸۷ [۱۸]، Liew و Teo ۱۹۹۹ [۱۹] انجام گرفت.

تحقیقات جدیدی توسط Zhou در سال ۲۰۰۲ [۲۰] در مورد ارتعاشات آزاد ورقهای ضخیم با هر ضخامت با استفاده از آنالیز سه بعدی الاستیسیته و با استفاده از چند جمله ای چبیشف به عنوان تابع در روش ریلی ریتز صورت گرفته است. معادلات مشخصه دقیق صفحات مستطیلی نازک با دو وجه مخالف هم که دارای تکیه گاه ساده می باشند را می توان در کار Leissa در سال ۱۹۷۳ [۲۱] یافت. پژوهش های تکمیلی در این زمینه توسط H.Hashemi و همکارانش صورت گرفت [۲۲]. پروژه حاضر معادلات مشخصه را به صورت دقیق برای ۶ حالتی که دارای دو وجه مقابل با تکیه گاه ساده و دو وجه دیگر با تکیه گاه های ساده (S)، گیردار (C)، و آزاد (F) هستند (SSSS، SCSS، FCSC، SSSF، SCSF) به دست می دهد. انتگرال گیری از معادلات حرکت با ترمهای تنش معادل که بر اساس تئوری ورق ضخیم به دست می آید، می تواند گستره وسیعی از نسبت ابعادی ورق (η) و ضریب نسبت ضخامت (δ) را پوشش دهد و نتایج آن معیار سنجش مناسبی برای اعتبار تئوری های دو بعدی تقریبی و تکنیک های محاسباتی جدید در آینده باشد.

در سال ۱۹۳۶ و ۱۹۳۷، Nölke [۲۳-۲۴] با استفاده از روش انرژی اولین نتایج را برای کمانش ورق ها ارائه کرد. Timoshenko [۲۵] نیز در سال ۱۹۷۳ نتایج قابل قبولی را برای حالات ساده بار کمانش ورق بدست آورد. Lam [۲۶] در سال ۲۰۰۰ با کمک تابع گرین نتایج مناسبی برای کمانش ورق دارای بار یکنواخت بدست آورد. Leissa و Kang [۲۷-۲۸] نیز در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ با استفاده از روش سری های توانی نتایج دقیقی را برای بار کمانش ورق بدون بستر و بار جانبی بدست آوردند.

از آنجا که پل های منحنی شکل و برخی سطوح در سازه های فضائی به شکل ورق های قطاعی هستند، در این تحقیق به بررسی آنها نیز پرداخته شده است. Leissa [۲۹] یک حل دقیق برای ورق های نازک قطاعی با لبه های شعاعی ساده و لبه محیطی با شرط مرزی دلخواه بدست آورد؛ سپس Rubin [۳۰] این روش را به کمک سری Frobenius توسعه داد. پس از آن Westmann [۳۱] یک حل دقیق را برای ورق های قطاعی با لبه محیطی آزاد یافت. برای برخی موارد از ورق های قطاعی برخی محققان از روش های ریلی-ریتز برای بدست آوردن فرکانس های طبیعی تقریبی استفاده کرده اند [۳۲]. اخیراً با استفاده از روش (DQ) Differential Quadrature فرکانس های طبیعی برای این نوع ورق ها بدست آمده است. تا کنون نتایج فرکانس برای ورق های قطاعی بر روی بستر الاستیک دو پارامتری بدست نیامده است.

ورقهای نسبتاً ضخیم مستطیلی، بطور وسیعی در مهندسی عمران استفاده می شوند. یک نوع سازه که در آن از این نوع ورقها استفاده می شود، روسازی بتنی فرودگاه است که در این حالت ورقها در طی عمر کاریشان تحت فشار خارجی مخصوصاً بارهای ضربه ای مانند فرود آمدن هواپیما و بارهای درون صفحه ای در اثر اتصال با بلوکهای مجاور می باشند. مسأله معمولاً ساده شده و بصورت یک ورق ضخیم مستطیلی قرار گرفته روی فونداسیون الاستیک تحت بارهای ضربه ای

بررسی می شود. بهمین دلیل مطالعه رفتار دینامیکی ورقهای نسبتاً ضخیم تحت شرایط بارگذاری ترکیبی و مستقر روی فونداسیون الاستیک یک موضوع قابل توجه در طراحی روسازی بتنی فرودگاه می باشد. همچنین علاوه بر سازه های عمرانی، در صنعت هوا فضا و به طور مشخص در ساخت بدنه موشک، از ورق های ضخیم استفاده می شود. بکارگیری این ورق ها در بدنه موشک مستلزم در نظر گرفتن این نکته است که نباید فرکانس های طبیعی ارتعاشات بدنه موشک با فرکانس های کاری سیستم های دوار داخلی موشک همسان باشد. در غیر این صورت بروز پدیده تشدید باعث آسیب دیدگی موشک و اختلال در عملکرد آن می گردد.

پی ها سازه هایی هستند که برای انتقال بارهای وارده از سازه رویی به خاک زیرین، طراحی و ساخته می شوند. خاصیت الاستیک خاک با یک فنر معادل می گردد. پایه پسترناک مدل ساده ای برای بستر زیرین ورق که از جنس خاک است، می باشد. تفاوت پی ماشین آلات با انواع دیگر پی ها، تفاوت در نوع بارگذاری و محدودیت شدید تغییر مکانهای مجاز می باشد. برآورد فرکانس های طبیعی سیستم شالوده و در نظر گرفتن حاشیه اطمینان بین فرکانس کاری و فرکانس طبیعی سیستم از مراحل مهم طراحی بشمار می رود. در اغلب پی ها محدودیت های خاصی برای تغییر مکانهای مجاز وجود دارد. تغییر مکانهای پی در صورتی که از مقدار معینی تجاوز کنند، می توانند موجب اختلال شوند. این اختلالات به معنی بروز اشکال در فرود هواپیما بوده و کوچکترین اشتباه در طراحی زیر ساخت های فرودگاه می تواند منجر به عواقب جانی و مالی قابل توجهی گردد. شش حالت مرزی در نظر گرفته شده در گزارش این پروژه، بیانگر وضعیت جاسازی ورق روی پی و همچنین اتصالات کناره های ورقهای مجاور می باشد. بسته به موقعیت ورق می توان رفتار آن را با یکی از شرایط مرزی مورد توجه این گزارش مطابقت داد.

شرح مطالب فصلها در پروژه حاضر بدین صورت می باشد:

در فصل ۱ اول ابتدا به مرور منابع پرداخته شده است و سپس کاربرد هایی از ورق های ضخیم در صنعت یادآوری می شود.

در فصل ۲ دوم معادلات حاکم بر رفتار ورق، مطابق تئوری میندلین استخراج می شود. اگر چه معادلات حاکم بر ارتعاش ورق، معادلات ناویر استوکس می باشد و استخراج این معادلات در منابع مختلف به کرات آورده شده است، اما جهت حفظ انسجام مطالب، این معادلات با نحوه استخراج آنها بطور کامل ذکر می شوند. در این فصل معادلات کلی حاکم بر ارتعاشات ورق استخراج می شوند. این معادلات عبارتند از سه معادله دیفرانسیل مرتبه دوم مربوط به درجات آزادی حرکت ورق مطابق تئوری میندلین که در فرم کلی می باشند.

در فصل ۳، این معادلات ابتدا در غیاب تمامی ترمهای تنش صفحه ای متغییر خطی و پایه پسترناک و بارگذاری خارجی مورد استفاده قرار می گیرند تا فرکانس های طبیعی ارتعاشات ورق استخراج شوند. سپس در غیاب پایه پسترناک و تنش صفحه ای و بارگذاری ضربه ای از این معادلات جهت استخراج ارتعاشات آزاد و شکل مودها استفاده می شود. روند حل اینگونه خواهد بود که ثوابتی در معادلات دیفرانسیل وارد می شود. جهت حل و بدست آوردن این ثوابت از شرایط مرزی استفاده می گردد و برای حل هر کدام از شرایط مرزی، شش معادله و شش مجهول بدست می آید که به فرم ماتریسی مرتب می شوند و متناظر هر دستگاه معادلات، معادله مشخصه ای وجود دارد که بیانگر شکل مود حاکم بر رفتار ورق در شرایط مرزی مذکور است. سه معادله دیفرانسیل مرتبه دوم حاکم بر ارتعاشات ورق با هم ترکیب می شوند که یک معادله