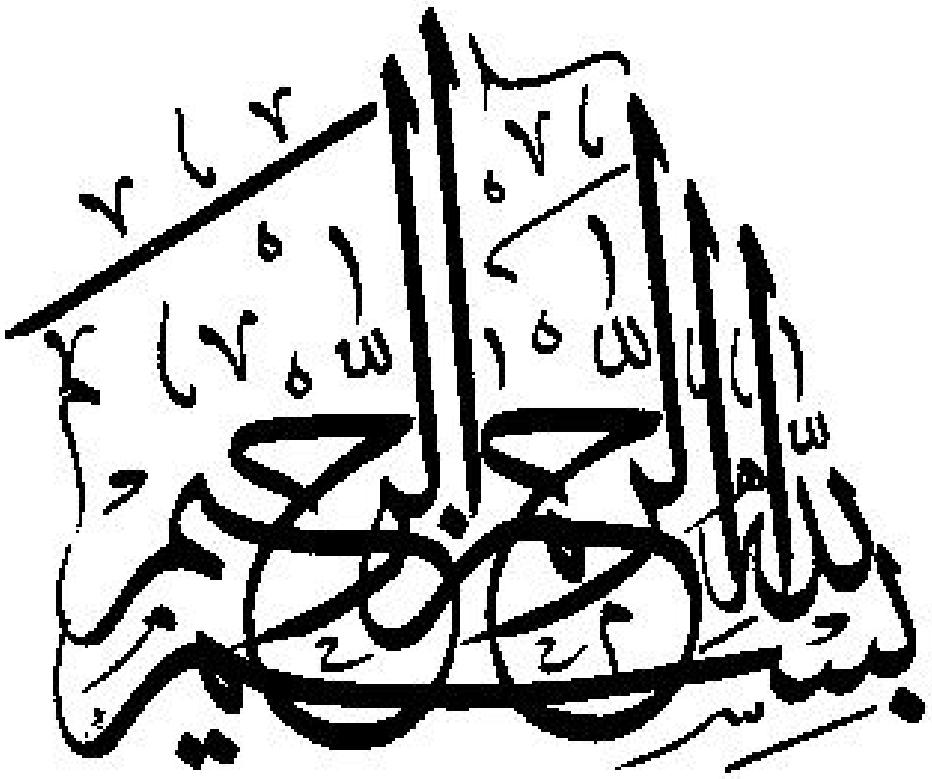
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامه دکتری مهندسی هوافضا

تحلیل رفتار پس ازکمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی با استفاده از روش نوارمحدود نیمه انرژی

نگارش
سیدحسن عصایی

استادراهنما
دکترحمیدرضا اویسی

بهمن۱۳۸۶

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ :

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

۱-مشخصات دانشجو :

نام و نام خانوادگی: **سید حسن عصایی** دانشجوی آزاد ■ بورسیه ☐ معادل ☐

شماره دانشجویی : ۸۰۲۲۹۹۲۵ دانشکده : **مهندسی هوافضا** رشته تحصیلی : **مهندسی هوافضا**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : **دکترحمید رضا اویسی**

عنوان به فارسی : **تحلیل رفتار پس ازکمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی با استفاده از روش نوارمحدود نیمه انرژی**

Title: Post-Local Buckling Analysis of Composite Thin-Walled Sections using Semi-Energy Finite Strip Method

نوع پروژه: کاربردی ☐ بنیادی ☐ توسعه ☐ نظری ■

تاریخ شروع : بهمن ۱۳۸۰ تاریخ خاتمه : اسفند ۱۳۸۶ تعداد واحد : ۴۸

سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه های کلید به فارسی :
روش نوارمحدود نیمه انرژی-تحلیل رفتار پس ازکمانش-مقاطع جدارنازک کامپوزیتی-معادله سازگاری ون کارمن

واژه های کلیدی به انگلیسی :
Semi-Energy Finite Strip Method, Post-Buckling Analysis, Composite Laminated Sections, Von K´arm´an's Compatibility Equation

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت های پژوهشی دانشگاه :
افزایش بودجه تحقیقاتی به منظور ثبت نام و شرکت در کنفرانس ها و سمینارهای علمی

استاد راهنما : **دکترحمید رضا اویسی**

دانشجو : **سید حسن عصایی**

امضـــــاء اســـــتاد راهنمـــــا :

تاریخ :

نسخه ۱ : معاونت پژوهشی
نسخه ۲ : کتابخانه و به انضام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

به نام خدا

شماره ۶۴/۲۰۴/۱

تاریخ: ۸۶/۱۲/۶

برگ ارزیابی دفاع نهایی رساله دکتری

نام و نام خانوادگی: حسن عصاریی — شماره دانشجویی: ۸۰۲۲۹۹۲۵

رشته و گرایش تحصیلی: هوافضا — دانشکده: مهندسی هوافضا

عنوان رساله: تحلیل پس از کمانش موضعی مقاطع کامپوزیتی جدار نازک با استفاده از روش نوار محدود نیمه انرژی

تاریخ تصویب پیشنهاد رساله: ۸۱/۰/۳

تاریخ دفاع: ۱۲/۱۳

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	کد انفورماتیک	رتبه علمی	امتیاز (از ۱۰۰)	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر حمید رضا اویسی	۱۰۲۰۳	دانشیار	۱۰۰	
استاد راهنمای دوم					
استاد مشاور اول					
استاد مشاور دوم					
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد زمان کبیر	۱۰۲۷۶	دانشیار	[redacted]	
داور داخلی اول	دکتر علی صالح زاده نوبری	۱۰۲۶۹	دانشیار	۹۷	
داور داخلی دوم	دکتر محمد همایون صدرلاهیجانی	۱۰۰۷۴	استادیار	۹۷/۵	
داور خارجی اول	دکتر محمد زمان کبیر	۱۰۲۷۶	دانشیار	۹۷/۵	
داور خارجی دوم	دکتر محمد حسین ابوترابی نوین		استاد	۹۵	
داور پنجم					
	میانگین نمرات هیئت داوران			۹۸	

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده:

امضاء و تاریخ:

این قسمت توسط تحصیلات تکمیلی دانشگاه تنظیم خواهد شد.	شرح	نمره به عدد	نمره به حروف
A	میانگین نمرات هیئت داوران (بر مبنای ۲۰)		
B	منهای نمره دیرکرد		
C	مابقی بابت ارائه مقالات اضافی		
D	نمره نهایی ($D=A-B+C$)		

تقدیم به یاد خواهر محبوبم

طاهره

سپاسگزاری

« مَنْ عَلِمْنی حَرفاً فَقَدْ صَیَرنی عَبْداً »

صمیمانه ترین سپاسها را به استاد گرانقدر و فرزانه‌ام جناب آقای دکترحمیدرضااویسی تقدیم میکنم و بدینوسیله از زحمات بی‌شائبه ایشان، که با راهنماییهای ارزنده و گرانبهای خود اینجانب را هدایت و یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. بی‌شک بدون پیگیری و دلسوزی های مستمر ایشان نگارنده در انجام این تحقیق عاجز می‌ماند.

سیدحسن عصایی

چکیده:

در رساله دکتری حاضر روشی نیمه تحلیلی به نام روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی جهت تحلیل رفتار پس ازکمانش سازه های جدارنازک کامپوزیتی ارائه شده است. در روش پیشنهادی یک تابع شکلی شامل یک سری درجات آزادی به عنوان تابع تغییر مکان خارج صفحه تعریف میگردد. در این تابع، تغییرات تغییرمکان خارج صفحه در امتداد طولی به صورت توابع هارمونیک و تغییرات عرضی این تابع تغییر مکان به صورت توابع چندجمله ای فرض میشوند. با جایگذاری تابع تغییرمکان خارج صفحه در معادله سازگاری ون کارمن و حل تحلیلی بر روی یک نوارمحدود، تنش های داخل صفحه محاسبه میگردند. سپس با انتگرال گیری از تنش های محاسبه شده و اعمال قضیه هوک برای مواد مرکب لایه ای، توابع تغییرمکان داخل صفحه تعیین میگردند. درادامه با تعریف درجات آزادی برتوابع تغییرمکان داخل صفحه محاسبه شده، ثابت های انتگرال گیری حل تحلیلی محاسبه میشوند. در نهایت با استخراج رابطه انرژی پتانسیل نوار محدود بر حسب درجات آزادی و اعمال اصل مینیمم انرژی پتانسیل شکل معادلات تعادل غیرخطی استخراج میگردند که با روی هم گذاری این معادلات برای یک صفحه یا سازه صفحه ای متشکل از مواد مرکب لایه ای که به نوارهای محدود تقسیم شده اند، معادله غیرخطی تعادل کل سازه برحسب درجات آزادی نوارهای محدود به دست می آید، که با اعمال شرایط مرزی مناسب، معادلات استخراج شده با به کارگیری روش تکرار نیوتن-رافسون قابل حل میباشند. روش ارائه شده توسط نرم افزار MATLAB به یک کدکامپیوتری تبدیل شده و صحت وحساسیت آن با استفاده از روش اجزاءمحدود (نرم افزار ANSYS) و روش نوارمحدود تمام انرژی مورد ارزیابی قرارگرفته است. لازم به ذکر است که روش نوارمحدود تمام انرژی در چند دهه اخیر توسط محققان مختلف جهت بررسی رفتار پس ازکمانش سازه های کامپوزیتی مورد استفاده قرارگرفته است. در این راستا به منظور استخراج نتایج روش نوارمحدود تمام انرژی یک کدکامپیوتری به زبان برنامه نویسی FORTRAN توسط نگارنده تهیه شده است. لازم به ذکر است که مطالعات پارامتری مختلفی بر روی رفتار پس از کمانش صفحات و مقاطع کامپوزیتی جدارنازک صورت گرفته است که کلیه نتایج بیانگر دقت روش نوارمحدود نیمه انرژی ارائه شده در این پایان نامه میباشند. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده میتوان نتیجه گرفت که از نظر دقت و اقتصاد محاسباتی روش نوارمحدود نیمه انرژی برتری کاملی نسبت به روش نوارمحدود تمام انرژی دارد و دلیل این امر استفاده از حل تحلیلی در فرمولاسیون روش نوارمحدود است. شایان ذکر است که مشارکت علمی پایان نامه حاضر عبارت است از حل تحلیلی معادله سازگاری ون کارمن برروی یک نوارمحدود متشکل از مواد مرکب لایه ای و ارائه روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی برمبنای آن و انجام یک سری مطالعات بر روی رفتار پس از کمانش صفحات و مقاطع کامپوزیتی جدارنازک به کمک این روش، که برای اولین بار توسط نگارنده در مراجع معتبرعلمی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: روش نوارمحدود نیمه انرژی-تحلیل رفتار پس ازکمانش-مقاطع جدارنازک کامپوزیتی-معادله سازگاری ون کارمن

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- فرضیات و محدودیت های روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی در ارزیابی رفتارپس ازکمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی ۴

فصل دوم: مرروری برمطالعات انجام شده بر رفتار پس از کمانش سازه های صفحه ای جدار نازک و طرح موضوع تحقیق

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- مروری بر فعالیت های تحقیقاتی گذشته ۸

۲-۳- جایگاه خالی تحقیقات در مطالعات انجام شده و طرح موضوع پژوهش ۳۰

فصل سوم:ارائه فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی جهت تحلیل رفتار پس ازکمانش موضعی سازه های جدارنازک کامپوزیتی

۳-۱- مقدمه ۳۴

۳-۲- معرفی مشخصه های یک نوار محدود ۳۴

۳-۳- استخراج معادلات سازگاری و تعادل ون کارمن برای یک المان صفحه کامپوزیتی ۳۷

۳-۴- انتخاب تابع تغییرمکان خارج صفحه برای نوار محدود ۴۱

۳-۵- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با آرایش لایه چینی متقارن- متوازن و شرایط مرزی تکیه گاه ساده در دوسر نوار ۴۳

۳-۶- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با آرایش لایه چینی متقارن- متوازن و شرایط مرزی تکیه گاه گیردار در دوسر نوار ۵۵

۳-۷- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با شرایط مرزی دو سر نوارتکیه گاه ساده با آرایش لایه چینی غیر متقارن و با فرض $(A_{13}^{*} = A_{23}^{*} = B_{11}^{*} = B_{22}^{*} = B_{12}^{*} = B_{21}^{*} = B_{33}^{*} = 0)$ ۵۹

۳-۸- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با شرایط مرزی دو سر

نوارتکیه گاه ساده با آرایش لایه چینی غیر متقارن و با فرض $(A_{13}^{*} = A_{23}^{*} = B_{13}^{*} = B_{23}^{*} = B_{31}^{*} = B_{32}^{*} = 0)$ ۶۲
۳-۹- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با شرایط مرزی دو سر نوارتکیه گاه گیردار با آرایش لایه چینی غیر متقارن و با فرض $(A_{13}^{*} = A_{23}^{*} = B_{13}^{*} = B_{23}^{*} = B_{31}^{*} = B_{32}^{*} = 0)$ ۶۴
۳-۱۰- بسط فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت یک نوار محدود با شرایط مرزی دو سر نوارتکیه گاه ساده با فرض وجود تغییرشکل اولیه کوچک ۶۷
۳-۱۱- ارائه رابطه انرژی پتانسیل و معادلات تعادل برای یک نوار محدود کامپوزیتی ۷۱
۳-۱۲- روش تکرار نیوتن-رافسون درحل معادلات غیرخطی تعادل ۷۴
۳-۱۳- محاسبه تنشهای داخل صفحه و نیروی طولی اعمالی به یک نوارمحدود ۷۵
۳-۱۴- الگوریتم تحلیل رفتار پس از کمانش سازه های جدارنازک کامپوزیتی با روش نوارمحدود نیمه انرژی ۷۶

فصل چهارم: بررسی رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی با استفاده از روش نوار محدود نیمه انرژی و سایر روشهای عددی

۴-۱- مقدمه ۸۰
۴-۲- بررسی رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی با آرایش لایه چینی متقارن ۸۱
۴-۳- بررسی رفتار پس از کمانش صفحهٔ کامپوزیتی با آرایش لایه چینی پاد متقارن زاویه چین ۹۶
۴-۴- بررسی رفتار پس از کمانش صفحهٔ کامپوزیتی با آرایش لایه چینی پاد متقارن عمود چین ۱۰۰
۴-۵- بررسی رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی بافرض وجود ناخالصی اولیه ۱۰۳
۴-۶- بررسی اثر شرایط مرزی بر رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی ۱۰۹
۴-۷- بررسی تأثیر زاویه چیدمان الیاف بر رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی ۱۱۸
۴-۸- بررسی تأثیر ترم های کوپلینگ خمش و پیچش بر رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی جدار نازک ۱۲۶
۴-۹- بررسی تأثیرنسبت منظری بر رفتار پس از کمانش صفحات کامپوزیتی جدار نازک ۱۳۹

فصل پنجم:بررسی رفتار پس از کمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی

۵-۱- مقدمه ۱۴۳
۵-۲- بیان فرضیات کلاسیک جهت تحلیل رفتار پس از کمانش مقاطع جدار نازک کامپوزیتی ۱۴۴
۵-۳- بررسی رفتار پس از کمانش مقطع C شکل ایزوتروپ ۱۴۹
۵-۴- بررسی رفتار پس از کمانش مقطع C شکل کامپوزیتی ۱۵۴

۵-۵- بررسی رفتار پس از کمانش مقطع I شکل کامپوزیتی ۱۵۸
۵-۶- بررسی رفتار پس از کمانش مقطع جدار بستهٔ مربع شکل کامپوزیتی ۱۶۴

فصل ششم:نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری از تحقیق انجام شده ۱۷۰
۶-۲- پیشنهادات جهت فعالیت های تحقیقاتی آتی ۱۷۲

مراجع ۱۷۴

پیوست (الف):ارائه فرمولاسیون روش نوارمحدودتمام انرژی در بررسی رفتار پس از کمانش صفحات جدار نازک کامپوزیتی

الف-۱- مقدمه ۱۸۴
الف-۲- تشریح فرمولاسیون درحالت دوسرنوارشرایط مرزی تکیه گاه ساده ۱۸۴
الف-۳- تشریح فرمولاسیون درحالت دوسرنوارشرایط مرزی تکیه گاه گیردار ۱۸۷
الف-۴- تشریح فرمولاسیون درحالت وجود ناخالصی های اولیه خارج صفحه ۱۸۸

پیوست (ب):بررسی رفتار پس از کمانش سازه های جدار نازک کامپوزیتی با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم افزار ANSYS 5.4

ب-۱- تشریح روش تحلیل اجزاءمحدود توسط نرم افزار ANSYS 5.4 ۱۹۲
ب-۲- مطالعه همگرایی جهت یافتن تعداد المانهای مورد نیاز در تحلیل غیرخطی ۱۹۶
ب-۳- بررسی اثر ناخالصی بسیارکوچک اولیه بر پاسخ رفتار پس ازکمانش صفحات کامپوزیتی ۱۹۸

پیوست (ج):لم تخمین انرژی پتانسیل

ج-۱- مقدمه ۲۰۱
ج-۲- تشریح لم ۲۰۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

کاهش وزن در سازه‌های هوایی همواره یکی از چالشهای عظیمی بوده که متخصصان صنایع هوافضا با آن درگیر بوده‌اند. از این رو همواره طراحان علاقه داشته‌اند تا با به کارگیری روشهای بهینه طراحی و استفاده از مواد دارای خواص مکانیکی بالا و وزن کم به این نیاز پاسخ مناسبی ارائه کنند. یکی از عمده‌ترین روشها در کاهش وزن در سازه‌های هوایی استفاده از سازه‌های جدار نازک می‌باشد که در حقیقت این نوع سازه‌ها دارای ضخامت بسیار کمی نسبت به سایر ابعاد سازه دارا می‌باشند. از معیارهای اصلی طراحی سازه‌های جدارنازک معیار کمانش می‌باشد. کمانش پدیده‌ای است که گاهاً می‌تواند موجب ناپایداری سازه و شکست آن گردد اما در حالات خاص همچون کمانش موضعی مقاطع جدارنازک، رفتار پس از کمانش سازه پایدار می‌باشد. از این رو طراحان سازه‌های هوافضا علاقه‌مند می‌باشند که به منظور کاهش وزن این نوع سازه‌ها به آنها اجازه کمانش موضعی دهند تا سازه بتواند تا محدوده مجاز نیز وارد ناحیه پس از کمانش گردد. البته این امر نیازمند محاسبات بسیار دقیق و پیچیده به منظور شناسایی رفتار سازه در ناحیه پس از کمانش است. لازم به ذکر است که سازه های جدارنازک درناحیه پس از کمانش دچارپدیده کاهش سختی میگرندو در نتیجه ظرفیت باربری آنها کاهش می یابد که درنتیجه محاسبه سختی سازه جدارنازک درناحیه پس ازکمانش و به طبع آن محاسبه ظرفیت باربری سازه امری بسیار مهم درطراحی سازه های جدارنازک درناحیه پس ازکمانش میباشد. از آنجا که رفتار پس از کمانش سازه‌های جدارنازک یک رفتار غیرخطی هندسی است آنالیز انجام شده بسیار پیچیده می‌باشد. معادلات متشکله مربوط به سازگاری و تعادل رفتار غیرخطی هندسی بافرض تغییرشکل های بزرگ سازه‌های جدارنازک برای اولین بار توسط آقای ون‌کارمن (Von Karman)در سال ۱۹۱۰ مطرح شد که با حل این معادلات برای شرایط مرزی خاص

مساله رفتار پس از کمانش سازه مشخص می‌گردد. متاسفانه این معادلات غیرخطی از مرتبه چهار می‌باشند و تاکنون جواب کلی این معادلات یافت نشده است و در تحقیقات انجام شده فقط برای حالت‌های خاص و شرایط مرزی ساده جواب این معادلات مشخص است. درنتیجه ارائه پاسخ بادقت بالا از حل معادلات سازگاری و تعادل ون کارمن برای سازه های جدارنازک با شرایط مرزی نسبتاً پیچیده تر امری بسیار مهم در طراحی سازه‌های جدارنازک می‌باشد.

از روشهای دیگری که محققان و طراحان صنایع هوافضا برای کاهش وزن سازه‌های جدارنازک به کار گرفته‌اند استفاده از مواد کامپوزیتی در ساختار این نوع سازه‌ها می‌باشد. این نوع مواد عموماً دارای وزنی بسیار سبکتر از مواد فلزی می‌باشند و قابلیت بالای آنها همچون مقاومت در برابر خوردگی و محیط های شیمیایی، خواص انیزوتروپی ... باعث شده که طراحان صنایع هوافضا علاقه خاصی به این نوع مواد نشان دهند. پارامترهای بسیار مختلفی بر رفتار مواد کامپوزیت تاثیرگذارند که به عنوان نمونه می‌توان به نسبت انیزوتروپی، وضعیت آرایش لایه‌ها و مدول‌های اصلی و فرعی ... اشاره کرد. در نتیجه اگر هدف استفاده از مواد کامپوزیتی در ساختار سازه های هوایی جدارنازک جهت رفتار در ناحیه پس ازکمانش باشد عملاً نیاز به تحلیل های بسیار پیچیده تری از رفتار پس ازکمانش سازه، نسبت به حالتی که ازمواد ایزوتروپ در ساختار این نوع سازه ها استفاده شده است میباشد.

با توجه به مباحث مطرح شده فوق میتوان نتیجه گرفت که ارائه یک روش جدید و با دقت بالا جهت تحلیل رفتار پس ازکمانش سازه های جدارنازک ساخته شده ازمواد کامپوزیتی موضوع جالبی جهت پایان نامه دکتری رشته مهندسی هوافضا میباشد.

درفصل دوم ابتدا مروری بر تاریخچه فعالیت‌های انجام شده در تحلیل رفتار پس از کمانش سازه‌های جدارنازک انجام شده و با بررسی و نتیجه‌گیری از مطالعات انجام شده جایگاه خالی تحقیقات در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است که نهایتاً طرح موضوع تحقیق در این پایان نامه که ارائه روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی جهت مطالعه رفتارپس از کمانش صفحات و مقاطع جدارنازک کامپوزیتی میباشد، بیان شده است. در فصل سوم پایان نامه حاضر فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی در حالت های لایه چینی مختلف مواد کامپوزیت لایه ای جدارنازک و همچنین فرض وجود تغییرشکل اولیه ارائه شده است. درفصل چهارم فرمولاسیون های ارائه شده درفصل سوم جهت تحلیل رفتار پس ازکمانش صفحات کامپوزیتی بسط داده شده اند و حساسیت و دقت روش ارائه شده توسط پاسخهای حاصل از روش اجزاءمحدود و روش نوارمحدود تمام انرژی سنجیده شده است. درفصل پنجم با ارائه یک سری فرضیات فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی جهت

تحلیل رفتار پس ازکمانش مقاطع کامپوزیتی بسط داده شده است و صحت این فرضیات با روش اجزاءمحدود مورد ارزیابی قرارگرفته است. نهایتاً درفصل ششم نتیجه گیری ازمطالعات انجام شده ارائه گشته و توصیه هایی جهت انجام تحقیقات بعدی ارائه شده است.

در ادامه فرضیاتی که دراین پایان نامه مورد استفاده قرارگرفته است بیان میگردد.

۱-۲- فرضیات و محدودیت های روش نوارمحدود نیمه انرژی چندترمی در ارزیابی رفتارپس ازکمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی

فرضیات و محدودیت های روش ارائه شده درپایان نامه حاضرعبارتند از:

۱- فرض بر این است که صفحات کامپوزیتی مورد نظر جدارنازک بوده و از تئوری کلاسیک خمش صفحات (CLPT[1]) در بیان معادلات متشکله و فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی استفاده شده است.

۲- درفرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی، در بیان روابط کرنش از فرضیات ون کارمن استفاده شده و لذا ازترم های غیرخطی مربوط به مشتقات توابع تغییر مکان داخل صفحه صرف نظر شده است.

۳- فرض بر این است که مقاطع و صفحات مورد تحلیل تنها در امتداد محور طولی بارگذاری میشوند. به عبارت دیگر یک سر مقطع در امتداد طول ثابت است و در سر دیگر آن یک کوتاه شدگی یکنواخت اعمال میگردد. در نتیجه در فرمولاسیون روش نوار محدود نیز یک سر نوار در امتداد طول ثابت شده و در سر دیگر آن یک کوتاه شدگی انتهایی یکنواخت اعمال میگردد.

۴- شرایط مرزی تکیه گاهی خارج صفحه در دو سر مقاطع، صفحات و همچنین نوار محدود به صورت هر دو سر تکیه گاه ساده یا هردوسر تکیه گاه گیردار میباشد. شرط مرزی تکیه گاهی خارج صفحه برروی لبه های غیربارگذاری شونده میتواند به صورت شرایط مرزی آزاد، تکیه گاهی ساده و تکیه گاهی گیردار مدلسازی گردد.

۵- نیروی برشی بر روی دو سربارگذاری شونده مقاطع، صفحات و همچنین نوار محدود صفر فرض میگردد.

[1] Classical Laminated Plate Theory

۶- فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی ارائه شده در این پایان نامه با فرض تعداد دلخواه ترم های تابع تغییرمکان خارج صفحه قابل بسط میباشد. اما به دو دلیل تنها سه هارمونیک اول از سری تابع تغییرمکان خارج صفحه در بیان فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی مورد استفاده قرارگرفته است:

الف) با توجه به اینکه هدف در این پایان نامه بررسی رفتار پس ازکمانش در بارهای بالاتر ازبار کمانش و حداکثر تا ده برابر بارکمانش میباشد، بیان سه هارمونیک اول تابع تغییرمکان خارج صفحه در این محدوده با توجه به فرمولاسیون های ارائه شده جهت روش نوارمحدود تمام انرژی مناسب میباشد[۵۵ الی۶۶]. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج ارائه شده در این پایان نامه و مقایسه این نتایج با نتایج روش اجزاء محدود نشانگر صحت فرض سه هارمونیک تابع تغییرمکان خارج صفحه در محدوده بارگذاری اشاره شده است.

ب) با توجه به اینکه فرمولاسیون روش نوارمحدود نامه انرژی بر اساس حل تحلیلی و محاسبات بسیار پیچیده ریاضی استوار است، انجام عملیات ریاضی مورد نظر توسط دستگاه های رایانه موجود بسیار زمان بر میباشد و در بعضی حالات خاص لایه چینی مواد کامپوزیت احتیاج به حافظه بسیار بالایی جهت پردازش میباشد که با فرض تعداد بیشتر از سه ترم تابع تغییرمکان خارج صفحه عملاً انجام محاسبات ریاضی موردنظر توسط کامپیوتر های موجود امکان پذیر نمیباشد.

۷- توابع تغییر مکان خارج صفحه فرض شده در این پایان نامه به صورت توابع هارمونیک میباشند که شرایط مرزی هندسی و شرایط مرزی نیرویی را تواماً در لبه های بارگذاری شونده ارضاء نمایند. لازم به ذکر است که در فرمولاسیون ارائه شده چون متد حل بر مبنای مینیمم سازی انرژی پتانسیل استوار است، میتوان از توابع تغییر مکان خارج صفحه که تنها شرایط مرزی هندسی را ارضاء مینمایند نیز استفاده کرد اما با توجه به اینکه هدف ارائه یک فرمولاسیون منطبق بر حل تحلیلی معادله سازگاری ون کارمن میباشد از توابع هارمونیک که نتایج دقیق تری از رفتار پس از کمانش سازه های صفحه ای جدارنازک ارائه میکنند استفاده شده است.

۸- فرمولاسیون روش نوار محدود نیمه انرژی ارائه شده جهت مقاطع جدار نازک کامپوزیتی ساخته شده از مواد مرکب لایه ای قابل کاربرد است که آرایش لایه چینی آنها به صورتی است که ترم های مزدوج داخل صفحه (A_{16},A_{26}) در ماتریس سختی نیروها-کرنشهای داخل صفحه آنها برابر صفر باشد. دلیل این فرض این است که در فرمولاسیون ارائه شده فرض بر این است که تنها یک نیروی محوری که باعث ایجاد یک کوتاه شدگی انتهایی یکنواخت در یک سر نوار

محدود است بر نوارمحدود عمل میکند. اما با فرض وجود ترم های مزدوج داخل صفحه در ناحیه قبل از کمانش در اثر اعمال نیروی محوری یک کرنش برشی نیز بر نوارمحدود عمل میکند و عملاً کوتاه شدگی انتهایی یکنواخت ایجاد نمیشود همچنین از دیدگاه ریاضی با توجه به این که حل ارائه شده از تکنیک جداسازی متغیرها استفاده میکند در صورت وجود ترم های مزدوج داخل صفحه روش جداسازی متغیرها قابل اجرا نمیباشد چون دستگاه معادلات دیفرانسیل با استفاده از این تکنیک از حالت کوپله خارج نمیشود و جهت حل آن به صورت حل تحلیلی احتیاج به شرایط مرزی زیادتری است که جهت تحلیل رفتار پس ازکمانش موضعی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی عملی نمیباشد.

۹- روش نوار محدود نیمه انرژی تنها جهت تحلیل رفتار پس از کمانش موضعی مقاطع جدار نازک منشوری شکل که دارای مقطع ثابت در امتداد یک محور طولی میباشند کاربرد دارد.

۱۰- مقاطع مورد بررسی باید جزء یکی از سه گروه زیر باشند:
الف) مقاطعی که در هر محل تقاطع آن دو جزء صفحه با هم تلاقی دارند (مانند مقطع C شکل)
ب) مقاطعی که در هر محل تقاطع آن سه جزء صفحه که با هم زاویهٔ ۱۲۰ درجه تشکیل دهند با هم تلاقی داشته باشند.
ج) مقاطعی که در هر محل تقاطع آن سه جزء صفحه با هم تلاقی داشته باشند که در آن هر صفحه بر صفحهٔ دیگر عمود یا در راستای آن باشد (مانند تیر I شکل).

۱۱- با توجه به اینکه در فرمولاسیون روش نوارمحدود نیمه انرژی توابع تغییر مکان در محل تقاطع صفحات تشکیل دهنده مقطع بر هم منطبق نمیباشند و عملاً یک عدم سازگاری به وجود می آید، نمی توان با استفاده از فرمولاسیون ارائه شده در این پایان نامه رفتار پس از کمانش کلی مقاطع جدارنازک کامپوزیتی را بررسی کرد، اما با استفاده از فرضیات کلاسیک که توضیحات آن درفصل پنجم ارائه شده است میتوان رفتارپس از کمانش کلی یک سری مقاطع خاص رابررسی نمود.

۱۲- صحت فرضیات انحام شده در این پایان نامه در ارتباط با رفتار پس از کمانش موضعی مقاطع جدار نازک فلزی توسط روشهای نوارمحدود تمام انرژی و روش نوارمحدود نیمه انرژی در بسیاری از مقالات قبلی و مطالعات گذشته ارائه شده است[۸۸،۹۰،۹۱،۹۳،۹۶] و در یکی از اهداف این پایان نامه ارزیابی صحت فرضیات فوق جهت تحلیل رفتار پس از کمانش موضعی صفحات و مقاطع کامپوزیتی جدارنازک میباشد.

فصل دوم

مرروری برمطالعات انجام شده بر رفتار پس از کمانش سازه های صفحه ای جدار نازک و طرح موضوع تحقیق

۲-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا مروری بر تاریخچه فعالیت‌های انجام شده در تحلیل رفتار پس از کمانش سازه‌های جدارنازک انجام شده و با بررسی و نتیجه‌گیری از مطالعات انجام شده جایگاه خالی تحقیقات در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است که نهایتاً هدف انجام تحقیق در این رساله بیان شده است

۲-۲- مروری بر فعالیت های تحقیقاتی گذشته

Brayan در سال ۱۸۹۱ اولین مقالهٔ کلیدی در زمینهٔ رفتار کمانش صفحات ایزوتروپ را به ثبت رسانید [۱]. در این مقالهٔ اولین حل مربوط به کمانش صفحات با مرزهای تکیه‌گاهی ساده تحت اثر نیروی فشاری داخل صفحه ارائه شده است همچنین Brayan برای اولین بار رفتار کمانشی صفحات با توجه به تغییرات نسبت منظری صفحه را مورد مطالعه قرار داد و منحنی‌های Garland (دندان اره‌ای) را معرفی کرد.

Von Karman در سال ۱۹۱۰ برای اولین بار معادلات تعادل و سازگاری مربوط به یک المان از صفحه ایزوتروپ را که تحت اثر تغییر شکلهای بزرگ قرار گرفته است ارائه کرد [۲]. لازم به ذکر است که معادلات ارائه شده توسط ون کارمن به عنوان معادلات متشکله تغییر شکل های غیرخطی بزرگ صفحات که مبین رفتار پس از کمانش یک سازه میباشد توسط محققان دیگر مورد استفاده قرار گرفته است.

Cox در سال ۱۹۳۴ و Marguerre در سال ۱۹۳۷ سعی به حل معادلات Von Karman در حالت‌های خاص نمودند[۳،۴]. لازم به ذکر است که فعالیتهای Cox کمک بسیار ارزنده‌ای به محققان به منظور درک بهتر از مقاومت پس از کمانش یک صفحه ارائه کرد اما به علت بعضی از فرضیات ساده‌کنندهٔ نادرست که در روش تحلیل خود به کار برده بود پاسخ صحیحی به دست نیاورد. Maraguerre فرضیات غلط Cox را تصحیح نمود و با فرض یک سری مثلثاتی به منظور معرفی رفتار جابجایی خارج صفحه یک ورق ایزوتروپ با تکیه‌گاههای ساده معادلهٔسازگاری Von Karman را به صورت تحلیلی حل کرد و سپس با به کارگیری روش مینیمم سازی انرژی پتانسیل پارامترهای مجهول مربوط به سری مثلثاتی جابجایی خارج صفحه را محاسبه کرد. روش حل Maraguerre که بعد ها توسط آقایان [۴۱] Rhodes و Harvey به نام روش نیمه انرژی (Semi Energy Method) معرفی شد توسط بسیاری از محققان جهت بررسی رفتار پس از کمانش سازه‌های جدار نازک به کار گرفته شد و در ادامه این گزارش به معرفی دقیق این روش خواهیم پرداخت.

پس از Maraguerre افراد مختلفی همچون [۵] Levy، [۶] Hoff, Koiter و همکاران[۷]، [۸]Coan و [۱۰،۹] Yamaki روش ارائه شده توسط Maraguerre را جهت مطالعه رفتار پس از کمانش صفحات گسترش دادند. به عنوان مثال Yamaki با ارائه یک روش مبتنی بر فرض تغییر شکل خارج صفحه به صورت یک سری مثلثاتی فوریه و فرض یک سری تغییر شکلهای اولیه هماهنگ با تغییر شکل خارج از صفحهٔ فرض شده رفتار پس از کمانش صفحات ایروتروپ با شرایط مرزی مختلف و همچنین فرض ناخالصی اولیه را بررسی کرد. نتایج آنالیزهای Yamaki سالها به عنوان یک همسنج (Benchmark) جهت تحلیل و آنالیز صحت و دقت روشهای دیگر مورد استفاده محققان قرار گرفته است.

از اولین کسانی که تحقیقاتی در زمینه رفتار پس از کمانش سازه‌های کامپوزیتی ارائه کرد می‌توان به کار انجام شده توسط Yussuf در سال ۱۹۵۲ اشاره کرد[۱۱]. Yussuf روش ارائه شده توسط[۸] Coan جهت تحلیل پس از کمانش صفحات ایزوتروپ را به صفحات ارتوتروپ گسترش داد. همچنین در مقالهٔ ارائه شده Yussuf با فرض یک سری مثلثاتی برای رفتار خارج از صفحه ورق اورتوتروپ و حل معادلهٔ تعمیم داده شدهٔ Von Karman جهت تغییر شکلهای بزرگ صفحه و فرض ناخالصی‌های اولیه روش خود را ارائه کرد. ایشان برای بررسی صحت روش محاسباتی خود نتایج به دست آمده از روش خود برای صفحات ایزوتروپ را با نتایج تست‌های انجام گرفته توسط Hoff و همکاران [۷] مقایسه کرد.

Soper در سال ۱۹۵۸ رفتار تغییر شکل بزرگ صفحات ارتوتروپیک که توسط یک سری تقویت‌کننده‌های طولی تقویت شده‌اند را بررسی کرد[۱۲]. بارگذاری بر روی این صفحات فشار جانبی می‌باشد. همچنین در تحلیل انجام گرفته شرایط مرزی با فرض تکیه‌گاه‌هایی فنری پیچشی (Rotational Constraint) روی مرزهای صفحه انجام شد. نقطهٔ شروع تحلیل توسط معادلات تعمیم‌یافته Von Karman می‌باشد. Soper توزیع نیروهای جانبی و تغییر شکلها را به صورت توابع مثلثاتی در نظر گرفت. نتایج به دست آمده از این تحلیل با نتایج تست مقایسه شد و چنین نتیجه گرفته شد که در فشارهای پایین نتایج تحلیل و تست هماهنگی مناسبی دارند اما با افزایش فشار در نتایج به دست آمده از تحلیل و تست تفاوت بسیاری مشاهده می‌گردد. Soper در تحلیل خود نتوانست فرضیات مناسبی جهت تحلیل تنش در صفحات تقویت‌شده ارائه کند که این امر بعدها توسط Benthem در سال ۱۹۵۹ ارائه شد[۱۳]. لازم به ذکر است که تحلیل انجام شده توسط Benthem برای سازه های جدارنازک ایزوتروپ میباشد.

Benthem در سال ۱۹۵۹ تحقیقات بسیار جالبی در مورد رفتار پس از کمانش سازه‌های جدار نازک صفحه‌ای که از یک سری جزء صفحات ایزوتروپ تشکیل می‌شوند انجام داد [۱۳]. او با حل معادلات سازگاری و تعادل ون‌کارمن در ناحیهٔ پس از کمانش میزان کاهش سختی را در این سازه‌ها محاسبه کرد وبا محاسبات بسیار پیچیدهٔ ریاضی توانست شرایط مرزی غشایی که در محل اتصال صفحات وجود دارد را در ناحیه پس از کمانش استخراج کند. فرضیات او که به نام فرضیات کلاسیک مشهور می‌باشند مبین این حقیقت هستند که می‌توان در تحلیل رفتار پس ازکمانش سازه‌های صفحه‌ای جدارنازک هر یک از جزء صفحات را در مختصات موضعی خود صفحه مورد بررسی قرار داد و شرایط مرزی کلاسیک را به مرزها اعمال نمود. البته لازم به ذکر است که فرضیات ارائه شده تنها برای لبه‌هایی که تنها دو جزء صفحه در این مرز با هم تلاقی داشته باشند کاربرد دارند و برای سه جزء صفحه تلاقی کننده در یک لبه تنها درحالاتی که دو صفحه بر صفحه سوم عمود باشند یا اینکه سه صفحه با یکدیگر زاویه ۱۲۰ درجه ایجادکنند کاربرد دارد. این فرضیات توسط بسیاری از محققان به کار گرفته شده است و دقت مناسب پاسخ‌های ارائه شده کاملاً مشهود است.

Basu و Chapman در سال ۱۹۶۶ مقاله ای در زمینهٔ تغییر شکلهای بزرگ صفحات اورتوتروپ ارائه کردند که این صفحات تحت تأثیر بارهای فشاری جانبی متقارن نسبت به خطوط میانی صفحه می‌باشند[۱۴]. شرایط مرزی صفحات از انواع فنری پیچشی، فنری غشایی و فنری برشی فرض شدند. در حقیقت این تحقیق توسعهٔ کار قبلی انجام شده توسط Soper می‌باشد. لازم به ذکر است که متد حل در این تحقیق حل معادلات ون‌کارمن با استفاده از روش تفاضلات محدود می‌باشد.