دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

موضوع پایان نامه:

بررسی ترک به روش بدون مش در مقیاس نانو

استاد راهنما:

دکتر سعید ایرانی

نگارنده:

غلامرضا عربیان نجف‌آبادی

زمستان ۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به :

آنهایی که فروغ هستی‌شان گرمی بخش زندگی‌ام است،

و اتکا به محبت‌ها و الطافشان راه را هموار، و تحمّل مشکلات را آسان می‌نماید،

تقدیم به پدر ، مادر و همسر مهربانم.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	تأییدیه هیئت داوران	شماره: تاریخ:

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

بررسی ترک به روش بدون مش در مقیاس نانو

توسط آقای غلامرضا عربیان، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی در تاریخ مورد تأیید قرار می‌دهند.

استاد راهنمای اول	جناب آقای دکتر سعید ایرانی	امضاء
استاد راهنمای دوم	جناب آقای/ سرکار خانم	امضاء
استاد مشاور	جناب آقای/ سرکار خانم	امضاء
استاد ممتحن اول	جناب آقای دکتر علی مظفری	امضاء
استاد ممتحن دوم	سرکار خانم دکتر مهناز ذاکری	امضاء
نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	.....	امضاء

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	اظهار نامه دانشجو	شماره: تاریخ:

اینجانب **غلامرضا عربیان** دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی دانشکده هوافضا دانشکده صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات انجام شده در پایان نامه با عنوان:

بررسی ترک به روش بدون مش در مقیاس نانو

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر سعید ایرانی توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب(فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	حق طبع و نشر و مالکیت نتایج	شماره: تاریخ:

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخ تکثیر شده وجود داشته باشد.

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

*توجه:

این فرم می‌بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده قرار داده شود.

﴿من لم شکر المخلوق لم شکر الخالق﴾

بر خود واجب می‌دانم تا از زحمات و مساعدت‌های بی‌دریغ

استاد گرامی

دکتر سعید ایرانی

تشکر فراوان نمایم.

همچنین از اساتید گرانقدر دانشکده مهندسی هوافضا که در طول تحصیل مرا از دانش سرشار خود بهره‌مند فرمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم. چرا که به لطف زحمات بی‌دریغ این عزیزان توانستم، دوره‌ی کارشناسی ارشد را با موفقیت به اتمام برسانم.

سلامتی وتوفیق روزافزون این عزیزان را از خداوند مسئلت می‌نمایم.

چکیده

اولین و مهمترین عنصر پایه، نانو ذره است. منظور از نانو ذره، ذراتی با ابعاد نانومتری در هر سه بعد می‌باشد. طی چندین سال اخیر تکنولوژی نانو در عرصه‌های مختلف پیشرفت چشمگیری داشته است.

المان محدود یک روش کاملاً توسعه یافته و قوی می‌باشد و به طور گسترده در زمینه-های مهندسی استفاده می‌شود. زیرا برای هندسه‌های مختلف تطبیق پذیر است و برای انواع بسیاری از مسائل خطی و غیرخطی انعطاف پذیر است. برخی از معایب این روش، از جمله هزینه‌های زیاد محاسبات، محدودیت در تحلیل برخی مسائل مانند ترک و هندسه‌های پیچیده و ... محققان را بر آن داشت تا به نحوی مرحله‌ی ایجاد شبکه‌بندی را در فرآیند محاسبات حذف کنند. این تحقیقات منجر به ابداع روش المان محدود توسعه یافته و مهم‌تر از آن روش قدرتمند ذرات بدون مش گردید.

در پایان نامه حاضر سعی شده تا با استفاده از این روش المان محدود نوپا، مدلی از ترک را در یک صفحه‌ی محدود در ابعاد نانو ارائه نموده و تأثیرات آن را بررسی نماییم. برای این کار طی فرآیند هماهنگ سازی مدل نانو ذره و مدل محیط پیوسته از قاعده‌ی کوشی بورن استفاده گردیده است. جهت بررسی دقت و صحت محاسبات، نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از مکانیک ملکولی مقایسه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: روش‌های ذرات بدون مش، نانو صفحه، میدان تنش لبه ترک، قاعده کوشی بورن، بازه پشتیبان، غنی سازی نود

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه ۱

۱-۱- نانو تکنولوژی ۲

۱-۱-۱- فناوری نانو چیست؟ ۲

۱-۱-۲- تاریخچه فناوری نانو ۳

۱-۲- مقدمهای بر ترک و مکانیک شکست ۳

۱-۳- سیمای کلی و ترتیب فصول ٤

فصل دوم- روشهای بدون مش ٦

۲-۱- چرا روشهای بدون مش؟ ۷

۲-۲- توضیح روشهای بدون مش ۸

۲-۳- رویهی حل مسائل در روشهی بدون مش ۱۱

۲-٤- دسته بندی روشهای بدون مش ۸

۲-٤-۱- دسته بندی بر اساس رویه فورمول بندی ۹

۲-٤-۱-۱- روشهای بی مش بر اساس فرم ضعیف ۱۰

۲-٤-۱-۲- روشهای بی مش بر اساس تکنیکهای ترتیبی ۱۰

۲-٤-۱-۳- روشهای بی مش بر اساس ترکیبی از فرم ضعیف و قوی ۱۰

۲-٤-۲- دسته بندی بر اساس روشهای تقریب تابع ۱۰

۲-٤-۳- دسته بندی بر اساس تعریف بازه ۱۱

۲-٤-۳-۱- روشهای بی مش از نوع بازهای ۱۱

۲-٤-۳-۲- روشهای بدون مش از نوع مرزی ۱۱

۲-۵- ساختار توابع شکل در روشهای بدون مش ۱٤

۲-۵- ۱- نیازهای اولیه ۱٤

۲-۵- ۱- ۱- محدوده پشتیبان ۱٤

۲-۵- ۱- ۲- تعیین فاصله میانگین نودال ۱۵

۲-۵-۲- روشهای درونیابی نقطهای(PIM) ۱٦

۲-۵-۲-۱- توابع شکل PIM چند جملهای ۱۷
۲-۵-۲-۱-۱- توابع شکل PIM چند جملهای عادی ۱۷
۲-۵-۳- توابع شکل درونیابی نقطهای شعاعی(RPIM) ۲۲
۲-٦- روش المان آزاد گالرکین(EFG) ۲۷
فصل سوم- تکنیک همگن سازی وابسته به دما ۳۱
۳-۱- قاعده کوشی بورن ۳۲
۳-۲- قانون کوشی بورن وابسته به دما ۳۳
فصل چهارم- روشهای بدون مش در مقیاس نانو ۳۷
٤-۱- اجرای روش همگن شده ۳۸
٤-۱-۱- اجرای قانون کوشی بورن ۳۸
٤-۱-۲- اجرای روش کوشی بورن وابسته به دما ۳۹
٤-۲- مدل کردن شکست در مقیاس نانو ٤۰
٤-۲-۱- قانون رویت در روشهای ذرات بدون مش ٤۱
٤-۲-۲- مدل منطقهی پیوسته ٤۲
فصل پنجم- مثالهای عددی ٤۵
۵-۱- زنجیره ملکولی یک بعدی ٤۷
۵-۲- نانو تیر دو بعدی ٤۹
۵-۲-۱- خمش نانو تیر ۵۰
۵-۳- ارتعاش نانو تیر ۵۱
۵-٤- مدل بدون مش ارائه شده برای تحلیل ترک در نانو صفحه دو بعدی ۵۲
فصل ششم- نتیجه گیری و تحقیقات آتی ۵۷
۴-۱- خلاصه ۵۸
مراجع ٦۰

فهرست شکل‌ها

شکل(۱-۱): شکست در بدنه هواپیما در اثر رشد ترک ٤

شکل(۲-۱): بازه ایجاد بازه مسئله در روش بی مش و المان محدود معمولی ۱۲

شکل(۲-۲): بازه پشتیبان در روشهای بدون مش- شکل (الف)، بازه پشتیبان دایرهای و شکل (ب) بازه پشتیبان مستطیلی ۱۵

شکل (۲-۳): مثلث خیام- پاسکال ۱۸

شکل(۳-۳): قسمت های مختلف بازه مسئله در روش بدون مش ۲۷

شکل(٤-۱): نمایش تغییر شکل سلول واحد در روش شبه کانتینیوم ۳۹

شکل(٤-۲): قانون رویت در روش ذرات بدون مش ٤۱

شکل(٤-۳):مدل منطقه پیوسته برای رشد ترک ٤۲

شکل(٤-٤):نمای کشش پیوسته ٤۳

شکل(۵-۱):مدل مکانیک محیط پیوسته برای زنجیره ملکولی به روش ذرات بدون مش ٤۷

شکل(۵-۲): انتشار موج در ذنجیره ملکولی ٤۹

شکل (۵-۳): نانو تیر یک سر گیر دار ۵۰

شکل(۵-٤): تغییر شکل و توزیع تنش در نانو تیر یک سر گیردار ۵۱

شکل(۵-۵): نانو صفحه همراه با ترک لبه ای در وسط آن که در روش ذرات بدون مش مدل شده است ۵۳

شکل(۵-٦): نمودار توزیع تنش در نانو صفحه ۵٤

شکل (۵-۷): نمودارتغییرات نیروی کشش در مرز پیشروی ترک ۵۵

شکل(۵-۸): تغییرات تنش در راستای امداد ترک ۵٦

فهرست جداول

جدول (۲-۱): توابع اساسی شعاعی به همراه پارامتر شکل بدون بعد1 ..... ۲۳

جدول (۲): دامنه و فرکانس نوسان نانو تیر2 ..... ۵۲

فهرست علایم و اختصارات

مدول یانگ	E
تابع پله	$H(x)$
مجموعه نودهای اطراف نوک ترک	J
مجموعه نودهای اطراف ترک	K
طول	L
نرخ همگرایی انرژی	R
نیروی جسمی در واحد حجم	b
تانسور هوک	c
شعاع در مختصات محلی	r
جابجایی نودها	u
طول در مختصات محلی	x
عرض در مختصات محلی	y
بازه کامل جسم	Ω
مرز کامل جسم	Γ
مرز ترک	Γ_c
مرز اعمال بار	Γ_t
مرز اعمال قید	Γ_u
بردار نرمال	n
تنش کوشی	σ
زاویه رشد ترک	θ_c
زاویه در مختصات محلی	θ
تنش محوری	$\sigma_{\theta\theta}$
نیروی برشی	τ
تابع شکل	φ_i
کرنش	ε
بخش متقارن گرادیان	∇_s
ضریب پواسون	υ
تابع اصلاح ساز	ψ

فصل اول – مقدمه

۱-۱- نانو تکنولوژی

۱-۱-۱- فن آوری نانو چیست؟

نانو نه یک ماده است نه یک جسم، فقط یک مقیاس است. نانو یک میلیاردم متر است. در مقیاس نانو خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تک تک اتم‌ها و ملکول‌ها با خواص توده ماده متفاوت است. نانو ذرات در چنین مقیاس و مشخصه‌های منحصر به فردی موجب پیدایش دستاوردهای نوینی درعلوم مهندسی؛ پزشکی وسایر علوم می‌شوند.[۱]

به طور کلی این فناوری عبارت است از کاربرد ذرات در ابعاد نانو. از دو مسیر به این ابعاد می توان دسترسی پیدا کرد. یک مسیر دسترسی از بالا به پایین و دیگری طراحی و ساخت از پایین به بالا است. در نوع اول، ساختارهای نانو با کمک ابزار و تجهیزات دقیق از خرد کردن ذرات بزرگ تر حاصل می شوند. در طراحی و ساخت از پایین به بالا که عموما آن را فناوری مولکولی نیز می نامند، ساختارها، اتم به اتم و یا مولکول به مولکول تولید و صورت می گیرند. [۲]

اگر بخواهیم تفاوت این فناوری را با فناوری‌های دیگر به صورت قابل ارزیابی بیان نماییم، می‌توانیم وجود عناصر پایه را به عنوان یک معیار ذکر کنیم. عناصر پایه در حقیقت همان عناصر نانومقیاسی هستند که خواص آنها در حالت نانومقیاس با خواصشان در مقیاس بزرگتر فرق می‌کند. [۳]

اولین و مهمترین عنصر پایه، نانو ذره است. منظور از نانو ذره، همانگونه که از نام آن مشخص است، ذراتی با ابعاد نانومتری در هر سه بعد می‌باشد. نانو ذرات می‌توانند از مواد مختلفی تشکیل شوند، مانند نانوذرات فلزی، سرامیکی و ... . [٤]

دومین عنصر پایه، نانوکپسول است. همان طوری که از اسم آن مشخص است، کپسول‌های هستند که قطر نانومتری دارند و می‌توان مواد مورد نظر را درون آنها قرار داد و کپسوله کرد. سال‌هاست که نانوکپسول‌ها در طبیعت تولید می‌شوند؛ مولکول‌های موسوم به فسفولیپیدها که یک سر آنها آبگریز و سر دیگر آنها آبدوست است، وقتی در محیط آبی قرار می‌گیرند، خود به خود کپسول‌هایی را تشکیل می‌دهند که قسمت‌های آبگریز مولکول در درون آنها واقع می‌شود و از تماس با آب محافظت می‌شود. [٤]

عنصر پایه بعدی نانو لوله کربنی است. این عنصر پایه در سال ۱۹۹۱ در شرکت ان ای سی[۱] کشف شدند و در حقیقت لوله‌هایی از گرافیت می‌باشند. اگر صفحات گرافیت را پیچیده و به شکل لوله در

۱- NEC

بیاوریم، به نانولوله‌های کربنی می‌رسیم. این نانولوله‌ها دارای اشکال و اندازه‌های مختلفی هستند و می‌توانند تک دیواره یا چند دیواره باشند. این لوله‌ها خواص بسیار جالبی دارند که منجر به ایجاد کاربردهای جالب توجهی از آنها می‌شود. [٤]

۱-۱-۲- تاریخچه فناوری نانو

فناوری نانو حدود نیم قرن پیش، همراه با توسعه فناوری‌های نوین تصویربرداری، دستکاری و شبیه سازی ماده در مقیاس اتمی پدید آمده است. نانو در گذشته فیزیک اتمی نامیده می شد. پس از کابردی شدن آن، نام آن نانو شد. به همین دلیل نانو یک علم جدید نیست، اما کاربردی شدن آن زندگی انسان را دگرگون ساخت. ایده نانوتکنولوژی را برای اولین بار درکسلر[۱] به دنیا عرضه نمود، او درآزمایشگاه مشهور ام آی تی[۲] متعلق به انستیتو فورسایت[۳] مطالعات خود را باسیستم‌های بیولوژیکی شروع کرده وسپس متوجه شد که می‌توان دستگاه های ملکولی تولید کرد. بدین ترتیب ایده نانو تکنوژلوی به نام او ثبت شد. اصطلاح (نانو) برگرفته از یونان قدیم است و به معنی(کوتوله) بوده است. [۵]

۱-۲- مقدمه‌ای بر ترک و مکانیک شکست

مکانیک شکست یا مکانیک ترک[٤] شاخه‌ای از مکانیک جامدات می‌باشد که به بررسی، ایجاد و گسترش ترک در جامدات (و سازه‌ها) و نحوه تاثیر آن بر تغییر شکل و احیاناً زوال سازه می‌پردازد. این موضوعات از هر دو منظر مکانیک محیط پیوسته و محیط‌های گسسته مورد مطالعه قرار گرفته و می‌گیرد. نقطه آغازین این دانش آزمایشاتی بود که بوسیله گریفیث[۵] بر روی شیشه انجام گرفت و در سال ۱۹۲۸ میلادی در ژورنال انجمن سلطنتی به چاپ رسید. پیچیدگی‌های منحصر بفرد ترک، این دانش را عرصه‌ی تلاش‌های تئوری و تجربی بسیاری کرده است و هنوز هم بسیاری از مسائل آن لاینحل باقی مانده است. [٦]

کاربرد این علم و نتایج آن در طراحی کشتی، سازه‌ها بویژه سازه‌های بتنی، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی مهندسی، مهندسی پزشکی و غیره می‌باشد. [٦]

۱- Eric Drexler
۲- MIT
۳- Foresight
٤- Fracture Mechanics
۵- Griffith

شکل(۱-۱): شکست در بدنه هواپیما در اثر رشد ترک

۱-۳- سیمای کلی و ترتیب فصول

در فصل بعد به توضیح و بررسی روش‌های بدون مش می‌پردازیم. این روش را تعریف کرده و خواهیم گفت که چرا از این روش‌ها استفاده می‌کنیم. همچنین رویه‌ی حل مسئله با استفاده از این روش‌ها را به تفسیر بیان خواهیم کرد.

در فصل سوم تکنیک همگن‌سازی مکانیک محیط پیوسته با شبکه‌ی اتمی را بیان خواهیم کرد؛ قانون بسیار مهم کوشی- بورن را به طور کامل توضیح خواهیم داد و چگونگی استفاده از پتانسیل بین اتمی لنارد جونز در ترکیب ملکولی را شرح خواهیم داد.

در فصل چهارم چگونگی مدل کردن شکست در مقیاس نانو را بررسی می‌کنیم. در آنجا خواهیم دید که چگونه می‌توان ترک را در مقیاس نانو مدل و تحلیل کرد.

در فصل پنجم مثال‌های عددی را بررسی خواهیم کرد. ابتدا طرز مدل کردن انتشار موج در یک زنجیره اتمی را بررسی می‌کنیم و نتایج حاصل را با نتایج بدست آمده از حل مسئله به روش مکانیک

ملکولی مقایسه می‌کنیم و در ادامه خمش و ارتعاش نانو تیر یک سر گیردار را بررسی خواهیم کرد. در آخر مدل رائه شده از نانو صفحه ترک‌دار را شرح خواهیم داد و کانتور تنش را در آن بدست خواهیم آورد.

در فصل آخر چشم انداز کاربرد روش بدون مش در ترکیب با علم نانو و سایر علوم را نشان خواهیم داد و زمینه‌های ادامه کار و تحقیق در زمینه استفاده از روش تحلیل جدید ارائه شده را بیان خواهیم کرد.

فصل دوم- روش‌های بدون مش

۲-۱- چرا روش‌های بدون مش[۱]؟

یک از مهمترین پیشرفت‌ها در روش‌های عددی، توسعه المان محدود در سال ۱۹۵۰ بود. در المان محدود یک محیط پیوسته با شکل پیچیده، به المان‌ها تقسیم می‌شد و المان‌ها توسط یک نقشه کلی به نام مش، به یکدیگر متصل می‌شدند.[۷]

المان محدود یک روش کاملاً توسعه یافته و قوی می‌باشد و به طور گسترده در زمینه‌های مهندسی استفاده می‌شود. زیرا برای هندسه‌های پیچیده تطبیق پذیر است و برای انواع بسیاری از مسائل خطی و غیرخطی انعطاف پذیر است. اما المان محدود دارای ضعف ذاتی در روش‌های عددی است. زیرا بر مش‌ها یا المان‌هایی که توسط نودها به یکدیگر متصل شده‌اند و از قبل تعریف شده‌اند پایده‌گذاری شده است. المان محدود داری محدودیت‌های زیر است:

۱- هزینه زیاد در ایجاد مش

۲- صحت کم در محاسبه تنش

۳- اشکال در تطبیق پذیری آنالیزها

٤- محدودیت در تحلیل برخی مسائل

۵- تحت تغییر شکل‌های بزرگ، در صحت نتایج المان محدود ضعف قابل توجهی وجود دارد. که ناشی از اعوجاج المان‌هاست.

٦- شبیه سازی رشد ترک با استفاده از مسیر پیچیده و مشکل است. زیرا مسیر با مرز مشترک المان‌ها منطبق نمی‌شود.

۷- شبیه سازی شکست جسم با ماده‌ای پر از تخلخل بسیار مشکل است. المان محدود بر اساس مکانیک محیط‌های پیوسته است که در آن المان‌ها نمی‌توانند شکسته شوند. یک المان می‌تواند یا کاملاً وجود داشته باشد یا کاملاً حذف گردد. که این امر باعث خطا در تعیین مسیر شکست می‌باشد. در ضمن به خاطر غیرخطی بودن مسائل خطای زیادی ایجاد خواهد شد.

ریشه این مشکلات در استفاده از المان یا مش در مرحله فورمول بندی می‌باشد. از این رو نظریه-ی رها شدن از المان و مش در حل عددی ایجاد شد. و نظریه‌ی روش‌های بدون مش یا مش آزاد شروع شد. برای راحتی این روش‌ها را اغلب به نام روش‌های بی مش می‌نامیم.

---

۱. Mesh Free Methods