

سلام الغزالي



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سیدجعفر روزگار رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی رشد ترک دینامیکی در پوسته ها با استفاده از المان محدود توسعه یافته در تاریخ ۱۳۸۹/۶/۱۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مجید میرزائی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامحسین رحیمی شعرباف مقدس	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	
استاد ناظر	دکتر سهیل محمدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر ناصر سلطانی	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مجید محمدی مقدم	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.
اعضای استعد راهنما:

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی

دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه می باشد، باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری سید جعفر روزگار در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر مجید میرزایی از آن دفاع شده است.»

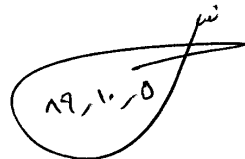
ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

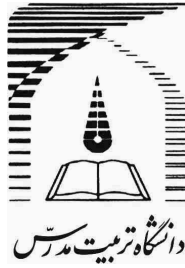
ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سید جعفر روزگار دانشجوی رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سید جعفر روزگار

تاریخ و امضا: 
۸۹، ۱۰، ۵



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی (Ph.D)
رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

شبیه‌سازی رشد ترک دینامیکی در پوسته‌ها با استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته

نگارنده
سید جعفر روزگار

استاد راهنما
دکتر مجید میرزایی

تابستان ۸۹

تقديم:

به خانواده عزيزم

تشکر و قدردانی:

از استاد دانشمند و فرزانه جناب آقای دکتر میرزایی که همواره مرا از رهنمودهای علمی و معنوی‌شان بهره‌مند ساخته‌اند کمال سپاسگزاری را دارم. از خداوند برای ایشان و خانواده محترمشان سلامتی و شادکامی را آرزومندم.

از همسر عزیزم که در روزهای سخت با عشق و مهر مرا همراهی نموده و همیشه باعث دلگرمی من هستند تشکر و قدردانی می‌کنم.

همچنین از دوستان عزیزی که به نحوی مرا در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند تشکر می‌کنم.

چکیده: در این پایان نامه با استفاده از روش اجزاء محدود توسعه یافته به شبیه‌سازی ترک خوردگی و رشد ترک در ورق‌ها و پوسته‌های کیرشلف تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی پرداخته شده است. روش المان محدود توسعه یافته یکی از روش‌های نوین و کارآمد برای مدل‌سازی انواع ناپیوستگی‌ها از جمله ترک در سازه‌ها می‌باشد. در این روش یک سری توابع از جواب‌های تحلیلی مسایل ساده استخراج شده و سپس از این توابع در فضای تقریب مسایل پیچیده‌تر استفاده می‌شود. متناسب با این توابع یک سری درجات آزادی به گره‌های اطراف ناپیوستگی افزوده می‌شود که به این فرایند غنی‌سازی گفته می‌شود.

در این تحقیق با استفاده از فرضیات ساده شونده کیرشلف فرمول‌بندی اجزاء محدود استاندارد ورق و پوسته ارائه گردیده و پس از تدوین کد مربوطه، با حل چند مسئله شناخته شده، از کارایی آن اطمینان حاصل شده است. سپس به منظور تأثیر حضور ترک، از تابع ناپیوسته H و توابع غنی‌ساز نوک ترک استفاده شده است. توابع نوک ترک جدیدی با استفاده از جواب‌های تحلیلی مسئله ورق کیرشلف ترک‌دار تحت بارگذاری‌های صفحه‌ای و خمشی استخراج شده‌اند. ضرایب شدت تنش با استفاده از دو روش انتگرال J و انتگرال برهم‌کنش محاسبه شده‌اند. با حل چند مثال و مقایسه نتایج به دست آمده با جواب‌های عددی و تحلیلی، کارایی کد المان محدود توسعه یافته پوسته در تحلیل ورق‌ها و پوسته‌های ترک‌دار تحت بارگذاری استاتیکی اثبات شده است.

به منظور فرمول‌بندی ساده‌تر و حذف یک سری المان‌های نامناسب، تنها از تابع ناپیوسته H در غنی‌سازی استفاده شده است. چند طرح ساده و جدید برای غنی‌سازی المان مثلثی کرنش ثابت (CST)، المان چهارضلعی چهارگره‌ای (Q4) و المان مستطیلی ورق و پوسته پیشنهاد شده است. با حل چند مسئله شناخته شده، این طرح‌ها مقایسه و مناسب‌ترین طرح معرفی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که حذف توابع نوک ترک، تأثیر چندانی بر ضرایب شدت تنش به دست آمده در مسایل صفحه‌ای ندارد. این در صورتی است که در مسایل خمشی این امر به طور قابل ملاحظه‌ای بر دقت نتایج تأثیر می‌گذارد.

به منظور شبیه‌سازی رفتار دینامیکی از روش شبه‌گسسته استفاده شده است. در این روش ابتدا گسسته‌سازی مکانی صورت گرفته و سپس با گسسته‌سازی زمانی دنبال می‌گردد. در این تحقیق برای گسسته‌سازی زمانی، طرح غیرصریح نیومارک مورد استفاده قرار گرفته است. ماتریس‌های جرم، سفتی و نیرو با توجه به درجات آزادی اضافه شده ناشی از غنی‌سازی تشکیل شده‌اند. با حل چند مثال و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج عددی و تحلیلی، عملکرد کد دینامیکی اثبات شده است. همچنین با استفاده از کد، به شبیه‌سازی تیوب‌های نازک دارای ترک تحت بارگذاری انفجاری گازی به عنوان یکی از انواع بارگذاری‌های دینامیکی پرداخته شده است که مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از تطابق خوبی با نتایج تحلیلی، تجربی و عددی برخوردار می‌باشند.

کلمات کلیدی: المان محدود توسعه یافته، غنی‌سازی، شکست، ورق، پوسته، کیرشلف، بارگذاری دینامیکی، بارگذاری انفجاری گازی، روش نیومارک، انتگرال J و انتگرال برهم‌کنش.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

د	فهرست علائم و نشانه‌ها
ز	فهرست جدول‌ها
ح	فهرست نمودارها و عکس‌ها
۱	فصل ۱- مقدمه
۶	فصل ۲- تاریخچه تحقیق
۶	۱-۲ معرفی روش المان محدود توسعه یافته
۱۰	۲-۲ روش المان محدود توسعه یافته در مسایل مکانیک شکست وابسته به زمان و دینامیکی
۱۷	۳-۲ روش المان محدود توسعه یافته در مدل‌سازی ورق‌ها و پوسته‌ها
۱۹	۴-۲ تحقیقات صورت گرفته در زمینه ترک‌خوردگی تیوب‌های تحت بارگذاری انفجاری گازی فشار متوسط
۲۱	فصل ۳- تئوری
۲۱	۱-۳ فرمول‌بندی المان محدود ورق و پوسته
۲۱	۱-۱-۳ فرمول‌بندی ورق‌های نازک (کیرشهف)
۲۲	۲-۱-۳ فرمول‌بندی المان محدود ورق
۲۴	۳-۱-۳ فرمول‌بندی المان محدود پوسته
۲۸	۴-۱-۳ المان مستطیلی پوسته
۲۹	۲-۳ فرمول‌بندی المان محدود مسایل الاستودینامیک
۳۰	۱-۲-۳ روش نیومارک
۳۳	۳-۳ فرمول‌بندی المان محدود توسعه یافته
۳۳	۱-۳-۳ روش المان محدود توسعه یافته برای مسایل صفحه‌ای
۳۷	۲-۳-۳ فرمول‌بندی المان محدود توسعه یافته ورق و پوسته
۴۲	۴-۳ محاسبه ضرایب شدت تنش

۴۴	۳-۴-۱ روش انتگرال J
۴۶	۳-۴-۲ روش انتگرال برهم کنش
۴۸	۳-۵ بررسی حضور توابع غنی ساز
۵۳	۳-۶-۱ رشد ترک
۵۶	فصل ۴- نتایج و بحث
۵۶	۴-۱ تحلیل صفحه‌ای چند مسئله و بررسی حضور توابع غنی‌ساز نوک ترک در نتایج
۵۶	۴-۱-۱ مثال اول: ورق مستطیلی دارای ترک مستقیم با در نظر گرفتن المان CST در شبکه‌بندی
۵۹	۴-۱-۲ مثال دوم: ورق مستطیلی دارای ترک مورب با در نظر گرفتن المان CST در شبکه‌بندی
۶۲	۴-۱-۳ مثال سوم: ورق مستطیلی دارای ترک مستقیم با در نظر گرفتن المان Q4 در شبکه‌بندی
۶۳	۴-۲ تحلیل خمشی ورق و پوسته
۶۴	۴-۲-۱ مثال چهارم: تیوب استوانه‌ای تحت بار نقطه‌ای عمود بر سطح
۶۶	۴-۲-۲ مثال پنجم: ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی تحت بارگذاری خمشی
۶۷	۴-۲-۳ مثال ششم: ورق مستطیلی یک سر گیر دار دارای ترک مرکزی تحت بارگذاری برشی
۶۹	۴-۲-۴ مثال هفتم: پوسته استوانه‌ای دارای ترک مرکزی در راستای محور، تحت فشار داخلی
۷۱	۴-۳ حل چند مسئله تحت بارگذاری دینامیکی
۷۲	۴-۳-۱ مثال هشتم: ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی تحت کشش و خمش خالص
۷۵	۴-۳-۲ مثال نهم: ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی تحت بارگذاری صفحه‌ای و عمود بر صفحه
۷۹	۴-۴ حل مسایل تیوب‌های جدار نازک تحت بارگذاری انفجاری گازی
۸۲	۴-۴-۱ مثال دهم: تیوب آلومینیومی نازک بدون ترک تحت بارگذاری انفجاری گازی
۸۵	۴-۴-۲ مثال یازدهم: تیوب آلومینیومی نازک دارای ترک تحت بارگذاری انفجاری گازی
۹۵	۴-۵ رشد ترک
۹۵	۴-۵-۱ مثال دوازدهم: ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مستقیم تحت کشش تک محوره
۹۷	۴-۵-۲ مثال سیزدهم: ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مورب تحت کشش تک محوره
۹۹	۴-۵-۳ مثال چهاردهم: رشد ترک در نمونه SENB
۱۰۲	فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

فهرست مراجع..... ۱۰۹

پیوست الف: فرمول بندی ورق پ ۱

پیوست ب: فرمول بندی المان محدود ورق پ ۳

پیوست ج: فرمول بندی زیرماتریس B برای گره های مختلف پ ۵

پیوست د: محاسبه ترم های انتگرال برهم کنش خمشی پ ۱۰

پیوست ه- طرح دو گامه (Two-Step) در روش نیومارک پ ۱۵

فهرست علائم و نشانه‌ها

نشانه	توضیح	بعد
a	نصف طول ترک	m
a_n	شتاب در زمان t_n	m/s^2
B	عرض ورق	m
B	ماتریس مشتق‌گیری تغییر مکان به کرنش	l/m
b	چگالی نیروی حجمی	N/m^3
C	ماتریس میرایی	Ns/m
D	ماتریس ماده	N/m^2
E	مدول یانگ	N/m^2
f^e	بردار نیروی گرهی	N
F_x	مولفه بردار نیرو در جهت x	N
F_y	مولفه بردار نیرو در جهت y	N
F_z	مولفه بردار نیرو در جهت z	N
G_m	توابع غنی‌ساز نوک ترک در مسایل خمشی	
H	تابع ناپیوسته هویساید	
h	ضخامت ورق	m
I	انتگرال برهم‌کنش	N/m
J	انتگرال J	N/m
J_k	انتگرال‌های J ناورد	N/m
K	ماتریس سفتی	N/m
K_1	ضریب شدت تنش متقارن (خمشی)	$Pa\sqrt{m}$
K_2	ضریب شدت تنش نامتقارن (پیچشی)	$Pa\sqrt{m}$
K_I	ضریب شدت تنش صفحه‌ای (مود I)	$Pa\sqrt{m}$
K_{II}	ضریب شدت تنش صفحه‌ای (مود II)	$Pa\sqrt{m}$
L	طول لوله	m
M	ماتریس جرم	
$M_{\alpha\beta}$	مولفه‌های منته‌ج گشتاور	Nm/m
N_i	توابع شکل صفحه‌ای	
N_{il}	توابع شکل خمشی	

	بردار یکه عمود بر سطح رو به بیرون	n
$N.m$	گشتاور حول محور x	M_x
$N.m$	گشتاور حول محور y	M_y
$N.m$	گشتاور حول محور z	M_z
N/m^2	نیروی جانبی بر واحد سطح	p
N/m^2	فشار اولیه موج انفجاری	P_1
N/m^2	فشار ماکزیمم موج انفجاری	P_2
N/m^2	فشار پشت جبهه موج	P_3
N/m	مولفه‌های منتجه نیروی برشی	Q_β
	تابع وزن	q
m	مختصات شعاعی در سیستم مختصات نوک ترک	r
N/m^2	مولفه‌های بردار کشش	T_i
s	زمان	t
N/m^2	بردار کشش	t
m	تغییرمکان صفحه‌ای در جهت x	u
N/m^2	چگالی انرژی جنبشی	U
m	فرم گسسته تغییرمکان‌های صفحه‌ای	u^h
m	تغییرمکان صفحه‌ای در جهت y	v
m/s	سرعت در زمان t_n	v_n
m/s	سرعت پیشانی موج (سرعت چاپمن-ژوکت)	V_{cj}
	فضای تقریب المان محدود	v^h
N/m^2	چگالی انرژی کرنشی	W
m	تغییرمکان جانبی در جهت z	w
m	تغییرمکان صفحه میانی در جهت z	w_0
m	فرم گسسته تغییرمکان‌های خمشی	w^h
N/m^2	تنسور تنش کوشی	σ
N/m^2	تنسور تنش	σ_{ij}
	تنسور کرنش	ε_{ij}
	مجموعه توابع پایه	ϕ_i
	توابع غنی‌ساز نوک ترک در مسایل صفحه‌ای	Ψ_i
N/m^2	مدول برشی	μ
	مختصات زاویه‌ای در سیستم مختصات نوک ترک	θ

جهت رشد ترک	θ_c
چرخش حول محور x	θ_x
چرخش حول محور y	θ_y
ضریب پواسون	ν
مختصات نرمال شده	ξ
مختصات نرمال شده	η
ماتریس تبدیل مختصات 6×6	T
ماتریس تبدیل مختصات 3×3	Λ
اولین پارامتر نیومارک	β_1
دومین پارامتر نیومارک	β_2
کل ناحیه مسئله	Ω
ناحیه متشکل از المان‌هایی که هیچ از یک از گره‌ها غنی‌سازی نمی‌شوند	Ω^{std}
ناحیه متشکل از المان‌هایی که همه گره‌هایشان غنی‌سازی می‌شوند	Ω^{enr}
ناحیه متشکل از المان‌هایی که تنها برخی از گره‌ها غنی‌سازی می‌شوند	Ω^{blend}
منحنی در برگیرنده ناحیه مسئله	Γ
بخشی از Γ که شرایط مرزی جابجایی روی آن تعریف می‌شود	Γ_u
بخشی از Γ که شرایط مرزی نیرویی روی آن تعریف می‌شود	Γ_t
بخشی از Γ که شامل سطوح ناپیوستگی مثل ترک می‌باشد	Γ_d

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵۷	جدول ۱-۴ ضریب شدت تنش نرمال شده مود I مثال اول با در نظر گرفتن طرح‌های مختلف غنی‌سازی
۶۰	جدول ۲-۴ ضریب شدت تنش نرمال شده مود I و II مثال دوم با استفاده از روش انتگرال برهم‌کنش
۶۰	جدول ۳-۴ ضریب شدت تنش نرمال شده مود I و II مثال دوم با استفاده از روش انتگرال J
۶۲	جدول ۴-۴ ضریب شدت تنش نرمال شده مود I مثال سوم با توجه به طرح‌های غنی‌سازی پیشنهادی
	جدول ۵-۴ ضریب شدت تنش مود خمشی (K_I) و مقادیر نرمال شده آن برای ورق مستطیلی دارای ترک
۶۶	مستقیم مرکزی تحت بارگذاری خمش خالص مربوط به مثال پنجم
۸۲	جدول ۶-۴ مشخصات هندسی و خواص مواد تیوب مثال دهم و یازدهم
۸۳	جدول ۷-۴ مشخصات موج انفجاری در مثال دهم و یازدهم

فهرست نمودارها و عکس‌ها

صفحه	عنوان
۲۲	شکل ۳-۱ درجات آزادی ورق با توجه به محورهای مختصات
۲۳	شکل ۳-۲ المان مستطیلی ورق
۲۶	شکل ۳-۳ سیستم مختصات محلی و عمومی
۲۹	شکل ۳-۴ آرایش المان‌های مستطیلی پوسته با در نظر گرفتن موازات محورهای x و \bar{x}
۳۴	شکل ۳-۵ جسم با مرزهای داخلی تحت بارگذاری خارجی
۳۶	شکل ۳-۶ توابع غنی‌ساز نوک ترک برای مسایل تحت بارگذاری صفحه‌ای
۴۰	شکل ۳-۷ توابع غنی‌ساز نوک ترک برای مسایل تحت بارگذاری خمشی
۴۱	شکل ۳-۸ نحوه غنی‌سازی گره‌های اطراف ترک
۴۳	شکل ۳-۹ ورق دارای ترک مرکزی در طول ضخامت تحت کشش تک‌محوره
۴۴	شکل ۳-۱۰ ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی تحت خمش
۴۹	شکل ۳-۱۱ نواحی مختلف در یک مسئله غنی‌سازی موضعی
۵۰	شکل ۳-۱۲ نواحی مختلف در مسایل غنی‌سازی با تابع H و توابع نوک ترک
۵۱	شکل ۳-۱۳ نواحی مختلف در مسایل غنی‌سازی با تابع H
۵۲	شکل ۳-۱۴ طرح‌های مختلف غنی‌سازی برای المان‌های مثلثی و چهارضلعی. گره‌هایی که با توابع نوک ترک H و غنی‌سازی می‌شوند به ترتیب با مربع و دایره مشخص شده‌اند. (الف) طرح HT برای المان مثلثی. (ب) طرح H1 برای المان مثلثی. (ج) طرح H2 برای المان مثلثی. (د) طرح HT برای المان چهارضلعی. (ه) طرح H1 برای المان چهارضلعی. (و) طرح H2 برای المان چهارضلعی
۵۷	شکل ۴-۱ ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری محوری یک جهته
۵۸	شکل ۴-۲ تغییرمکان عمودی نقاط واقع بر خط $y=30$ مثال اول با اعمال طرح‌های غنی‌سازی پیشنهادی
۵۹	شکل ۴-۳ ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مورب تحت بارگذاری محوری یک جهته
۶۱	شکل ۴-۴ تغییرمکان عمودی نقاط واقع بر خط $y=26$ مثال دوم با اعمال طرح‌های غنی‌سازی پیشنهادی

- شکل ۴-۵ تغییرمکان عمودی نقاط واقع بر خط $y=30$ مثال سوم با اعمال طرح‌های غنی‌سازی H1 و H2 و ۶۲
- شکل ۴-۶ تغییرمکان عمودی نقاط واقع بر خط $y=30$ مثال سوم با اعمال طرح غنی‌سازی HT و ۶۳
- شکل ۴-۷ تیوب استوانه‌ای تحت بار نقطه‌ای و ۶۴
- شکل ۴-۸ کانتورهای تغییرمکان تیوب استوانه‌ای بدون ترک تحت بار نقطه‌ای عمود بر سطح. سمت چپ: تغییرمکان در جهت محور x . سمت راست: تغییرمکان در جهت محور z . بالا: نتایج کد. پایین: نتایج نرم‌افزار و ۶۵
- شکل ۴-۹ مقادیر شدت تنش خمشی نرمال شده برای ترک با طولهای مختلف مربوط به مثال پنجم و ۶۷
- شکل ۴-۱۰ ورق مستطیلی یک سر گیر دار دارای ترک مرکزی مستقیم تحت بارگذاری جانبی و ۶۸
- شکل ۴-۱۱ تغییرمکان عمود بر صفحه (w) مربوط به نقاط واقع بر خط AB مثال ششم با در نظرگیری طرح‌های غنی‌سازی پیشنهادی و ۶۸
- شکل ۴-۱۲ چرخش حول محور x (θ_x) مربوط به نقاط واقع بر خط AB مثال ششم با در نظرگیری طرح‌های غنی‌سازی پیشنهادی و ۶۹
- شکل ۴-۱۳ پوسته استوانه‌ای دارای ترک محوری تحت فشار داخلی و ۷۰
- شکل ۴-۱۴ تغییرمکان در جهت x مربوط به نقاط واقع بر خط AB و ۷۰
- شکل ۴-۱۵ تغییرمکان در جهت y مربوط به نقاط واقع بر خط AB و ۷۱
- شکل ۴-۱۶ تغییرمکان در جهت z مربوط به نقاط واقع بر خط AB و ۷۱
- شکل ۴-۱۷ ورق مستطیلی حاوی ترک مرکزی تحت بارگذاری کششی و خمشی و ۷۲
- شکل ۴-۱۸ ضریب شدت تنش صفحه‌ای مود I مثال هشتم تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی و ۷۴
- شکل ۴-۱۹ ضریب شدت تنش خمشی مود I مثال هشتم تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی و ۷۴
- شکل ۴-۲۰ ورق مستطیلی حاوی ترک مرکزی تحت بارگذاری کششی و برشی و ۷۵
- شکل ۴-۲۱ تغییرمکان عمودی (v) بر حسب زمان مربوط به نقطه A در مثال هفتم. بالا: نتایج کد XFEM. پایین: نتایج نرم‌افزار ANSYS. سمت راست: ورق بدون ترک. سمت چپ: ورق دارای ترک و ۷۶
- شکل ۴-۲۲ تغییرمکان عمود بر صفحه (w) بر حسب زمان مربوط به نقطه A در مثال هفتم. بالا: نتایج کد XFEM. پایین: نتایج نرم‌افزار ANSYS. سمت راست: ورق بدون ترک. سمت چپ: ورق دارای ترک و ۷۷

- شکل ۴-۲۳ چرخش حول محور x بر حسب زمان مربوط به نقطه A در مثال هفتم. بالا: نتایج کد XFEM.
- ۷۸ پایین: نتایج نرم افزار ANSYS. سمت راست: ورق بدون ترک. سمت چپ: ورق دارای ترک
- ۸۰ شکل ۴-۲۴ پروفیل واقعی موج انفجاری (اندازه گیری شده در آزمایشگاه) و معادل ایده آل آن
- ۸۱ شکل ۴-۲۵ پروفیل فشار در یک لحظه از زمان در طول لوله
- ۸۲ شکل ۴-۲۶ مشخصات هندسی تیوب بدون ترک
- شکل ۴-۲۷ تنش محیطی بر حسب زمان در نقطه $0/3038$ متر از ابتدای تیوب مثال نهم الف) با استفاده از حل تحلیلی گذرا [۴۶] ب) با استفاده از نرم افزار ANSYS-LS DYNA ج) با استفاده از کد دینامیکی پوسته
- ۸۴ المان محدود توسعه یافته
- ۸۵ شکل ۴-۲۸ مشخصات هندسی تیوب با ترک ضخامتی در راستای محور
- شکل ۴-۲۹ تنش محیطی بر حسب زمان. الف و ب) در نقطه $0/3038$ متر از ابتدای تیوب. ج و د) در نقطه $0/4864$ متر از ابتدای تیوب. ه و و) در نقطه $1/0032$ متر از ابتدای تیوب. ز و ح) در نقطه $1/2008$ متر از ابتدای تیوب. سمت راست: نتایج کد المان محدود توسعه یافته پوسته دینامیکی. سمت چپ: نتایج نرم افزار
- ۸۷ ANSYS-LS DYNA.
- شکل ۴-۳۰ کانتورهای تنش غشایی محوری به دست آمده از کد در زمان های مختلف. در شکل های الف تا و موقعیت جبهه موج از ابتدای تیوب بین ۱۳۲ تا ۱۳۲۰ میلی متر تغییر می کند.
- ۸۹ شکل ۴-۳۱ کانتورهای تنش محوری به دست آمده از ANSYS-LS DYNA در زمان های مختلف. در شکل های الف تا و موقعیت جبهه موج از ابتدای تیوب بین ۱۳۲ تا ۱۳۲۰ میلی متر تغییر می کند.
- ۹۰ شکل ۴-۳۲ کانتورهای تنش غشایی محیطی به دست آمده از کد در زمان های مختلف. در شکل های الف تا و موقعیت جبهه موج از ابتدای تیوب بین ۱۳۲ تا ۱۳۲۰ میلی متر تغییر می کند.
- ۹۱ شکل ۴-۳۳ کانتورهای تنش اصلی اول به دست آمده از ANSYS-LS DYNA در زمان های مختلف. در شکل های الف تا و موقعیت جبهه موج از ابتدای تیوب بین ۱۳۲ تا ۱۳۲۰ میلی متر تغییر می کند.
- ۹۲ شکل ۴-۳۴ کانتورهای تغییر مکان در جهت Z بر روی تیوب تغییر شکل یافته. شکل های الف و ب با بزرگنمایی ۲۰۰۰ و شکل های ج و د با بزرگنمایی ۳۰۰ ترسیم شده اند.
- ۹۳ شکل ۴-۳۵ شکل تغییر یافته تیوب با بزرگنمایی ۲۰ در زمان $0/45$ میلی ثانیه الف) با استفاده از کد. ب) با استفاده از ANSYS-LS DYNA
- ۹۴

- شکل ۴-۳۶ مسیر رشد ترک استاتیکی در یک ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مستقیم تحت کشش تک‌محوره. الف) ۵ مرحله رشد ۲ میلیمتری. ب) ۱۰ مرحله رشد ۱ میلیمتری. ۹۵
- شکل ۴-۳۷ مسیر رشد ترک دینامیکی در یک ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مستقیم تحت کشش تک‌محوره. الف) ۸ مرحله رشد ۱ میلیمتری. ب) ۱۶ مرحله رشد ۰/۵ میلیمتری. ج) ۴۰ مرحله رشد ۰/۲ میلیمتری. د) ۱۶۰ مرحله رشد ۰/۰۵ میلیمتری. ۹۶
- شکل ۴-۳۸ مسیر رشد ترک دینامیکی در ورق مستطیلی تحت کشش با در نظر گرفتن طول گام زمانی ۱ و ۰/۰۵ ثانیه‌ای. ۹۷
- شکل ۴-۳۹ ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مورب تحت کشش تک‌محوره. ۹۸
- شکل ۴-۴۰ مسیر رشد ترک در یک ورق مستطیلی دارای ترک مرکزی مورب تحت کشش تک‌محوره. الف) ۵ مرحله رشد ۲ میلیمتری. ب) ۱۰ مرحله رشد ۱ میلیمتری. ۹۸
- شکل ۴-۴۱ ابعاد و بارگذاری و شرایط مرزی نمونه SENB. ۹۹
- شکل ۴-۴۲ مسیر رشد ترک در نمونه SENB. الف) ۵ مرحله رشد ۰/۶ میلیمتری. ب) ۸ مرحله رشد ۰/۳۷۵ میلیمتری. ج) ۱۰ مرحله رشد ۰/۳ میلیمتری. ۱۰۰
- شکل ۵-۱ المان نوک ترک و دستگاه مختصات محلی ۱۰۵

فصل ۱

مقدمه

مطالعات تجربی نشان داده است هیچ سازه‌ای بدون نقص نبوده و دارای ترک‌های هر چند کوچک می‌باشد و از طرف دیگر اعمال بار به صورت کاملاً استاتیکی امکان‌پذیر نمی‌باشد. هرچند در بسیاری از کاربردهای مهندسی می‌توان با در نظر گرفتن یک سری حدود و فرضیات، مسایل را در حیطه مسایل سازه‌های کامل و یا تحت بار استاتیکی محسوب نمود؛ در بسیاری موارد تحلیل سازه‌های ترکدار تحت بار دینامیکی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مواردی که اهمیت بالایی در کاربردهای مهندسی و صنعتی دارد ورق‌ها و پوسته‌های دارای ترک تحت بارگذاری دینامیکی می‌باشد که در این تحقیق به شبیه‌سازی این سازه‌ها با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته پرداخته می‌شود.

روش‌های مبتنی بر المان محدود که به بررسی رشد ترک در سازه‌ها می‌پردازند به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند. در گروه اول که گروه نمایش هندسی^۱ نامیده می‌شود ترک به صورت مستقیم در هندسه در نظر گرفته می‌شود که در اینصورت لازم می‌باشد در حین رشد ترک نحوه گسسته‌سازی (شبکه‌بندی^۲) مدل تغییر کند. در گروه دوم که گروه نمایش غیرهندسی نامیده می‌شوند، در حین تحلیل هندسه ترک به صورت مستقیم وارد نمی‌شود؛ بلکه حضور ترک بر روابط حاکم تأثیر می‌گذارد. این تأثیر می‌تواند در روابط بنیادین تنش- کرنش و یا در روابط سینماتیک کرنش- تغییرمکان اعمال شود. روش المان محدود توسعه یافته یکی از روش‌های متعلق به گروه دوم است که به تازگی شکل گرفته و در حال پیشرفت سریعی می‌باشد. در این روش توابع خاصی از حل‌های تحلیلی ترک در مسایل ساده شناخته شده استخراج شده و از ضرب این توابع در توابع شکل گره‌های اطراف ترک

¹ Geometrical Presentation

² Mesh generation