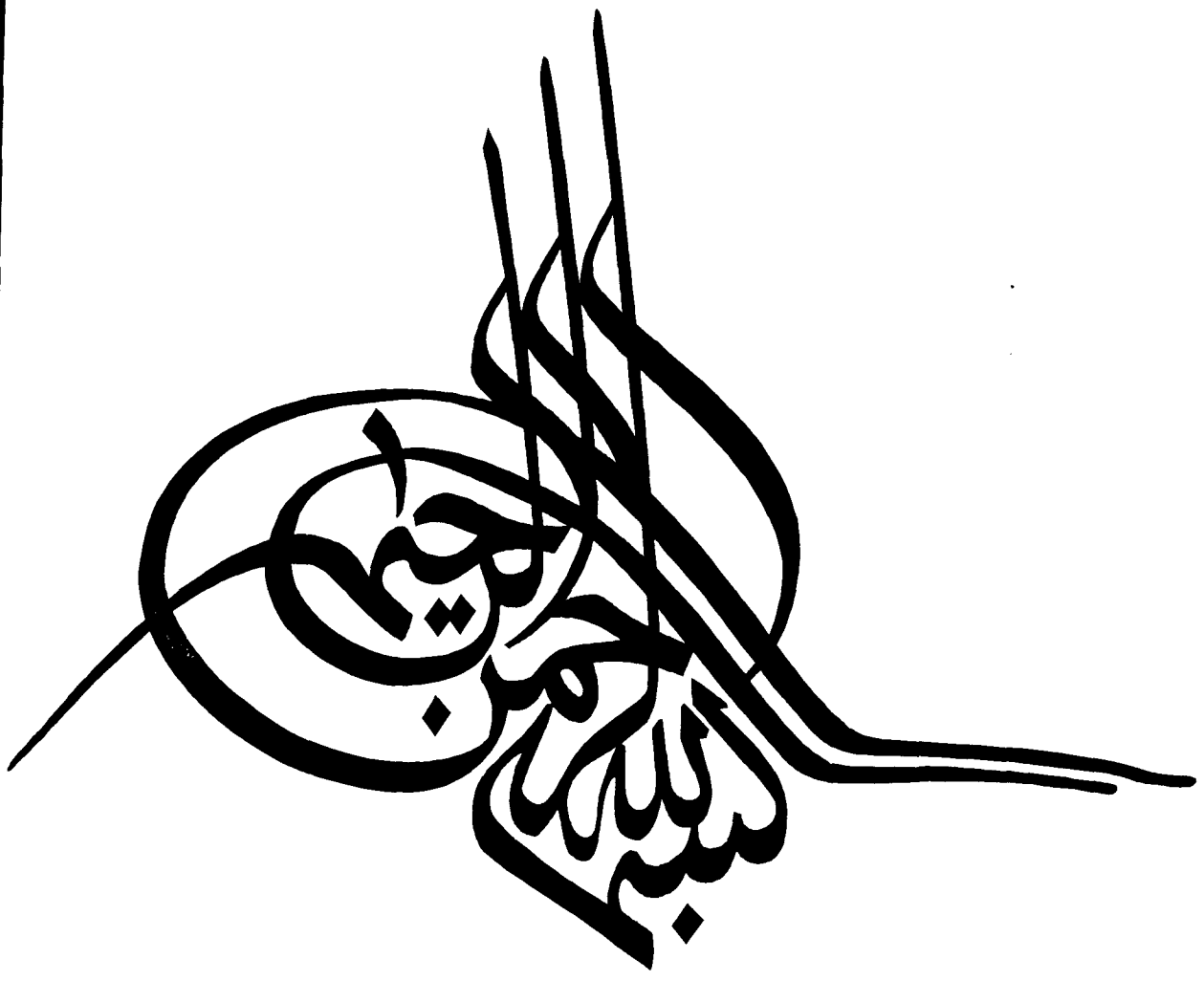


٤٢٥٥٣

۱۳۸۱ /۹/ ۲۴

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی
گروه مهندسی مکانیک

**پایان نامه :**

*برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشتهٔ مکانیک*

***عنوان :***

# تحلیل عددی جدایش لایه ها در یک کامپوزیت تک امتدادی فیبر کربن و رزین اپوکسی در مد اول شکست تحت بارهای استاتیکی

استاد راهنما:
دکتر محمدرضا خوشروان

استاد مشاور:
دکتر مرتضی صادقی

پژوهشگر:
جعفر عزیزی مروت

شهریور ۱۳۸۱

تقدیم به:

همسر صبور و فداکارم

بر خود لازم می دانم مراتب سپاس و قدردانی خود را از استاد راهنمای گرامی و ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد رضا خوشروان که در طول تحصیل و مراحل انجام این پایاننامه از محضر علم و اخلاقشان، کسب فیض نمودم اعلام دارم.

**و با تشکر از:**

- استاد مشاور ارجمند، جناب آقای دکتر مرتضی همایون صادقی که افتخار شاگردی ایشان را داشته و از راهنمائیهای ارزنده ایشان همواره بهرهمند شده ام.
- اساتید گرامی و محترمی که زحمت داوری این پایاننامه را تقبل فرمودهاند.

**نام خانوادگی دانشجو:** عزیزی مروت **نام:** جعفر

**عنوان پایان‌نامه :** تحلیل عددی جدا شدن لایه ها در مد اول شکست در کامپوزیت های تک امتدادی فیبر کربن و رزین اپوکسی تحت بار گذاری استاتیکی.

**استاد راهنما:** جناب آقای دکتر محمد رضا خوشروان

**استاد مشاور:** جناب آقای دکتر مرتضی صادقی

**مقطع تحصیلی:** کارشناسی ارشد **رشته:** مکانیک **گرایش:** طراحی کاربردی **دانشگاه:** تبریز

**دانشکده:** فنی **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** شهریور ۱۳۸۱ **تعداد صفحات:** ۱۲۵

**کلید واژه‌ها:** کامپوزیت- فیبر کربن رزین اپوکسی- مد اول شکست- جدا شدن لایه ها- آهنگ رهایی انرژی کرنشی- نمونه DCB

**چکیده:**

نمونه های کامپوزیتی فیبر کربن-رزین اپوکسی تک امتدادی از نوع DCB (Double Cantilever Beam) تحت بارگذاری استاتیکی در مد I، قرار گرفته و جدا شدن لایه ها (Delamination) با روش آهنگ رهایی انرژی، بررسی و بر آورد می شود. در این رساله، بررسی عددی پدیده جدایش، در مد شکست I، با استفاده از تئوری اروین-کیس (Irwin-Kies) و تئوریهای معمول الاستیسیته انجام می گیرد. بدین ترتیب یک مدل عددی برای تحلیل آزمایشات فوق ارایه می شود. در این تئوری بر اساس بار بحرانی برای شروع ترک و ابعاد هندسی نمونه مورد استفاده و جنس نمونه و بر مبنای تئوری اروین-کیس، مقدار آهنگ رهایی انرژی (GIc) محاسبه می شود. در این بررسی پس از مش بندیهای مناسب در کل نمونه و بویژه بررسی دقیق آن در ته ترک با استفاده از نرم افزار ANSYS، با اعمال بار و انتخاب شرایط مرزی مناسب، آهنگ رهایی انرژی برآورد خواهد شد. سپس نتایج به دست آمده، با نتایج عملی موجود مقایسه شده و از این طریق، مدل عددی طراحی شده تایید می شود.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: معرفی مواد کامپوزیت و معیارهای شکست


۱-۱- تعریف..... ۲
۱-۲- اجزاء تشکیل دهنده کامپوزیتها ..... ۲
۱-۳- انواع کامپوزیت... .. ..... ۲
۱-۳-۱- کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف ..... ۲
۱-۳-۲-کامپوزیتهای ذره ای ..... ۲
۱-٤- ویژگیهای اصلی کامپوزیتها ..... ۳
۱-٥- نقش الیاف در ساختار مواد کامپوزیت ..... ۳
۱-٦- انواع الیاف ..... ۳
۱-۷- الیاف کربن وگرافیت ..... ۳
۱-۸- رزین‌ها و نقش آنها در کامپوزیتها ..... ٦
۱-۸-۱- وظایف رزین‌ها در کامپوزیتها ..... ٦
۱-۸-۲- تاثیر بر خواص کامپوزیت ..... ٦
۱-۹- انواع رزین‌های پلیمری ..... ٦
۱-۱۰- رزین‌های اپوکسی ..... ٦
۱-۱۱- نسبت رزین به الیاف در کامپوزیت ..... ٦
۱-۱۲- کامپوزیت و کاربرد آن در صنایع ..... ۷
۱-۱۲-۱- کامپوزیت با کارایی بالا ..... ۷
۱-۱۲-۲- کامپوزیت با کارایی پایین و متوسط ..... ۷
۱-۱۳- کامپوزیت‌ها و کاربرد آن در صنعت حمل و نقل ..... ۷
۱-۱٤- کاربرد کامپوزیت در تراورس‌های راه آهن ..... ۹
۱-۱٥- کاربرد کامپوزیتها در لکوموتیو و راه‌آهن ..... ۱۰
۱-۱٦- معیارهای شکست در مواد کامپوزیت ..... ۱۱
۱-۱٦-۱- تئوری تنش ماکزیمم ..... ۱۱
۱-۱٦-۲- تئوری کرنش ماکزیمم ..... ۱۳

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


۱-۱۶-۳- تئوری " تسای-هیل" ..... ۱٤
۱-۱۶-٤- تئوری "تسای-وو" ..... ۱٤
۱-۱۶-۵- تئوری "پوک" ..... ۱۵
۱-۱۶-٦- تئوری "پاپواونس" ..... ۱۵
۱-۱۷- نتیجه گیری ..... ۱٦


**فصل دوم: کاربرد مکانیک شکست روی مواد کامپوزیت بر مبنای آهنگ رهایی انرژی**


۲-۱- مقدمه ..... ۱۸
۲-۲- روشهای مختلف برای تعیین آهنگ رهایی انرژی کرنشی..... ۱۹
۲-۲-۱- تئوری تیر ساده یا روش جابجایی ..... ۱۹
۲-۲-۲- تئوری تیر اصلاح شده ..... ۲۰
۲-۲-۳- تئوری بری (Berry) ..... ۲۰
۲-۲-٤- تئوری سستی (Compliance)..... ۲۲
۲-۲-۵ تئوری مساحت (Area)..... ۲۲
۲-۲-٦- روش PECM..... ۲۲
۲-۲-۷- روش CBT1..... ۲٤
۲-۲-۸- روش حل پنادو (Penado)..... ۲٤
۲-۲-۹- تصحیح مجدد فرمولهای Berry و CBT ..... ۲۵
۲-۲-۱۰- روش CCM ..... ۲٦
۲-۲-۱۱- روش VCCM ..... ۲۷
۲-۲-۱۲- روش ICCI ..... ۲۸
۲-۲-۱۳- روش VCCT ..... ۲۸
۲-۲-۱٤- روش VCCT بهبود یافته ..... ۲۹
۲-۲-۱۵- روش مساحت میانگین ..... ۳۰

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


۲-۲-۱۶- روش راجو (Raju) ..... ۳۱

۲-۲-۱۷- روش MVCCI ..... ۳۲

۲-۲-۱۸- توزیع آهنگ رهایی انرژی کرنشی ($G_I$) ..... ۳۳

۲-۲-۱۹- محاسبه شدت تمرکز تنش $K_I$ با داشتن $G_I$ درکامپوزیتهای متعامد ..... ۳٤

۲-۳- نکات تکمیلی در رابطه با تعیین آهنگ رهایی انرژی کرنش ..... ۳۵

**فصل سوم: آنالیز عددی آهنگ رهایی انرژی کرنشی بحرانی توسط نرم افزار ANSYS**

۳-۱- مقدمه ..... ٤۰

۳-۲- المانهای استفاده شده در ANSYS ..... ٤۱

۳-۳- مشخصات عمومی نمونه DCB مورد مطالعه ..... ٤٤

۳-۳-۱- ابعاد نمونه ..... ٤٤

۳-۳-۲- جنس نمونه ..... ٤٤

۳-۳-۳- روش بارگذاری ..... ٤٤

۳-٤- معیارهای انتخابی برای تشخیص شروع رشد ترک ..... ٤۵

۳-۵- انواع مش‌بندیهای مختلف و تعیین $G_{IC}$ در هر مورد ..... ٤٦

۳-۵-۱- مش‌بندی‌های دوبعدی ..... ٤٦

۳-۵-۲- مش‌بندی‌های سه بعدی ..... ۵۱

**فصل چهارم: بررسی تاثیر ترک در رفتار ارتعاشی مواد کامپوزیت**

٤-۱- مقدمه ..... ٦۰

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


٤-٢- تیر کامپوزیتی ترکدار یک امتدادی ..... ٦٠

٤-٣- ارتعاشات طبیعی تیر کامپوزیتی یکسرگیردار با یک ترک واقع در روی آن ..... ٦٣

٤-٤- تیر کامپوزیتی لایه لایه شده (Delaminated) ..... ٦٦

٤-٥- ارتعاشات طبیعی یک تیر کامپوزیتی با انتشار ترک ..... ٦٩

٤-٦- صفحه کامپوزیتی لایه لایه شده ..... ٧٣

٤-٧- ارتعاشات طبیعی کامپوزیت یکسر گیردار با یک ترک ..... ٧٥

**فصل پنجم: آنالیز مودال توسط نرم افزار ANSYS**

٥-١- مقدمه ..... ٨٠

٥-٢- مراحل انجام آنالیز مودال ( تنش آزاد ) ..... ٨٠

٥-٢-١- مدل سازی ..... ٨٠

٥-٢-٢- خواص مکانیکی نمونه ..... ٨٣

٥-٢-٣- مدل هندسی و مش بندی نمونه ..... ٨٥

٥-٢-٤- اعمال شرایط مرزی ..... ٨٧

٥-٣- مدل سازی نمونه ها توسط ANSYS و بدست آوردن فرکانسهای طبیعی ..... ٨٨

٥-٣-١- مدل سازی نمونه کامپوزیتی بدون ترک ..... ٨٨

٥-٣-٢- بررسی تاثیر طول و موقعیت ترک در رفتار ارتعاشی صفحات کامپوزیتی

به کمک نرم افزار ANSYS ..... ٩١

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


۵-۳-۳- تاثیر تغییر پارامترها، روی رفتار ارتعاشی صفحه کامپوزیتی مدل I .....۹۳

۵-۳-٤- تاثیرتغییر پارامترها بر روی هندسه مدل II و مشاهده نتایج حاصل

از نرم افزار ANSYS .....۱۰۰

۵-۳-۵- نمونه و شکل مدهای ارتعاشی صفحه کامپوزیتی برای مدل II ترک .....۱۰۷


**فصل ششم: نتایج**


٦-۱- نتایج مربوط به آهنگ رهایی انرژی کرنشی .....۱۱۱

٦-۱-۱- نمودار توزیع GIC .....۱۱۱

٦-۱-۲- مقایسه نتایج، برای ترک مدلسازی شده با زاویه حاده(غیر تکین)

در مدل دو بعدی .....۱۱۲

٦-۱-۳- مقایسه نتایج بدست آمده برای ترک مدلسازی شده با زاویه حاده( تکین) ..۱۱۳

٦-۱-٤- مقایسه نتایج برای مدل نوک ترک، مدلسازی شده با یک ربع دایره

با شعاع متغیر(تکین).....۱۱٤

٦-۱-۵- مقایسه نتایج برای ترک مدلسازی شده با یک خط راست ( نوک

ترک غیر تکین) .....۱۱۵

٦-۱-٦- مقایسه نتایج برای ترک مدلسازی شده با یک خط راست ( نوک

ترک تکین) .....۱۱۵

٦-۱-۷- مقایسه نتایج برای ترک مدلسازی شده با یک خط راست در مدل

سه بعدی (نوک ترک آجری) .....۱۱٦

٦-۱-۸- مقایسه نتایج برای ترک مدلسازی شده با یک خط راست در مدل

سه بعدی(نوک ترک تکین) .....۱۱٦

٦-۲- نتایج تاثیر پارامترهای وابسته به ترک در رفتار ارتعاشی کامپوزیتهای لایه ای ۱۱۷

٦-۳- نتایج کلی .....۱۲۰

## فهرست مطالب

عنوان صفحه

٦-٤- پیشنهادات ..... ١٢٢
مراجع ..... ١٢٤
Abstract ..... ١٢٦

## مقدمه

کامپوزیت به موادی گفته می شود که در ساختمان آن دو جزء فیبر و ماتریس بکار رفته است که در این ترکیب، مواد اصلی، خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و در آخر ماده ای حاصل می شود که دارای خواص بهینه ای می باشد که در هر کدام از مواد مشارکت کننده، بصورت جداگانه و در تمام حالتها یافت نمی شود .

این مواد بنا به دلائل بسیاری اعم از نسبت وزن به حجم پائین، توانائی بالا در جذب انرژی ها، مقاومت خستگی زیاد و پایداری حرارتی خوب، در چند دهه اخیر، کاربرد گسترده ای در صنایع نظامی،خودرو سازی، صنایع هوایی، دریایی و راه آهن پیدا کرده است.

از جمله عیوب مهم و مخرب در مواد کامپوزیت، پدیده ای موسوم به جدایش یا لایه لایه شدن می باشد که عامل اساسی از کار افتادگی و تخریب مواد کامپوزیتی، همین پدیده می باشد که مشابه ایجاد و رشد ترک در مواد ایزوتروپیک می باشد. معیارهایی که برای بررسی این پدیده بکار می روند غالباً معیارهایی آزمایشگاهی هستند که به ساختن نمونه های مشابه مختلف، که تنها در طول ترک اولیه با هم تفاوت دارند، نیاز می باشد. که مسائلی از قبیل دقت بسیار بالا در ساخت این نمونه ها، دقت زیاد در انجام تمامی مراحل آزمایش و همچنین صرف هزینه های بسیار سنگین، محققین را به مدل کردن این نمونه ها، توسط نرم افزارهای مختلف المان محدود ترغیب می کند.

ما نیز در این راستا، در پایان نامهٔ حاضر، با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS به مدل کردن ترک در مواد کامپوزیتی پرداخته ایم.این مدلسازی در دو حالت تعیین آهنگ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در مد اول شکست و همچنین تاثیر پارامترهای وابسته به ترک اعم از طول و موقعیت ترک در نمونه کامپوزیتی، در فرکانسهای طبیعی این مواد، انجام شده است. در حالت اول، ترک اولیه را با روشهای بسیار متنوع، مش بندی نموده و آهنگ رهایی انرژی کرنشی بحرانی، تحت مد اول بارگذاری و شکست، با استفاده از معیارهای تسای-هیل و تنش ماگزیمم محاسبه می کنیم و در این راستا به نتایج جالبی که با داده های تجربی، سازگاری قابل قبولی را نشان می دهند، خواهیم رسید.

در حالت دوم، ترک را در حالت کلی مورد بررسی قرار مـی دهیـم و تـاثیر طـول و موقعیـت آنـرا روی رفتـار ارتعاشی کامپوزیتها، تحلیل می کنیم.

در ابتدا فرکانسهای طبیعی نمونه بدون ترک را محاسبه کرده ایم سپس فرکانسهای طبیعی نمونه ترکدار را با مدلسازی ترک با چهار مدل مختلف، بدست آورده ایم که در این قسمت نیز نتایج قابل توجـهی از تحلیلـهای انجام شده گرفته شده است.

# فصل اول

## معرفی مواد کامپوزیت و معیارهای شکست

## ۱-۱- تعریف[۱]

مواد کامپوزیت[1] به موادی اطلاق می‌شود که در ساختار آن بیش از یک جزء وجودداشته باشد، که در این مواد اجزاء مختلف خواص فیزیکی و شیمیائی خود را در ترکیب حفظ کرده و در نهایت ماده‌ای حاصل می‌شود که دارای خواص بهینه‌ای نسبت به هر کدام از اجزاء، می‌باشد.

## ۱-۲- اجزاء تشکیل دهنده کامپوزیتها

یک کامپوزیت از دو فاز عمده تشکیل شده است.

۱-فاز پیوسته یا ماتریس[2]

۲- فاز ناپیوسته یا استحکام دهنده[3]

در کامپوزیتهای پلیمری، فاز پیوسته یا زمینه اصلی، از جنس پلیمر می‌باشد که اتصال دو فاز به یکدیگر از طریق سطح مشترک[4] صورت می‌پذیرد.

## ۱-۳- انواع کامپوزیت

کامپوزیتهای پلیمری به دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شود:

### ۱-۳-۱- کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف (Fiber Reinforced Composites) [۱]

این کامپوزیتها به کامپوزیتها فیبری(Fibrous composites) نیز مشهور هستند در این نوع کامپوزیت، الیاف، فاز تقویت کننده می‌باشند.

این دسته از کامپوزیتها در کاربردهای سازه‌ای، استفاده فراوانی دارند.

### ۱-۳-۲-کامپوزیتهای ذره ای (Particulate Composites)[۱]

در این نوع کامپوزیتها فاز تقویت کننده از ذرات تشکیل شده است. این دسته از کامپوزیتها در قطعات با اصطکاک زیاد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مجموع باید اشاره کرد که کامپوزیتهای فیبری ذره‌ای، بطور گسترده در صنایع نظامی، خودروسازی، صنایع هوایی، دریایی و راه‌آهن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

---

[1] Composite Materials

[2] Matrix

[3] Reinforcer

[4] Interface

## ۱-٤- ویژگیهای اصلی کامپوزیتها[۱]

وزن مخصوص کم، پایداری حرارتی خوب، توانایی بالا در جذب انرژی، سهولت در تولید و مقامت خستگی خوب، از ویژگیهای اصلی کامپوزیتها محسوب می شوند.

با توجه به مجموعهٔ شرایط مذکور، کامیوزیتهای پلیمری، رفته رفته، نقش گسترده‌ای را در صنایع مختلف بعنوان جایگزین فلزات، پیدا کرده‌اند.

## ۱-٥- نقش الیاف در ساختار مواد کامپوزیتی (مواد مرکب فیبری)

الیاف، اصلی‌ترین المان در مواد مرکب فیبری هستند که بالاترین کسر حجمی را در ساختار کامپوزیتها دارا می باشند. انتخاب صحیح نوع، مقدار و جهت، بسیار مهم بوده و تاثیر زیادی روی ویژگیهائی از قبیل جرم مخصوص، استحکام کششی، مدول کششی، استحکام فشار، استحکام خستگی، قیمت و خواص حرارتی و الکتریکی خواهند گذاشت.

## ۱-٦- انواع الیاف [۱]

اصلی‌ترین الیاف در کامپوزیتها، عبارتند از:

۱-الیاف فلزی: شیشه، آزبست

۲-الیاف معدنی: کربن، گرافیت، آرمید

۳-الیاف عالی: Br، Sic

٤-الیاف طبیعی

از بین الیاف مذکور، الیاف کربن و الیاف شیشه، کاربرد فراوان دارند.

## ۱-۷- الیاف کربن وگرافیت

استحکام کشش بالا، مدول کششی بالا، وزن مخصوص پایین، ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام خستگی بالا، از مزایای این الیاف به حساب می آیند.

از محدودیتهای این الیاف می توان به مقاومت به ضربه پایین (شکنندگی)، مقاومت الکتریکی بالا، کرنش در شکست پایین و قیمت بالا اشاره کرد.