دانشکده مهندسی مکانیک

# تحلیل تجربی رفتار ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن/لاستیک ضایعاتی/نانو کربنات‌کلسیم

**نگارش**

**مهدی رحمانی**

**استاد راهنما: دکتر فرامرز آشنای قاسمی**

**دکتر غلامحسن پایگانه**

**استاد مشاور: دکتر محمدرضا کلائی**

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی مکانیک**

**(گرایش طراحی کاربردی)**

**خرداد ماه 1391**

بسم الله الرحمن الرحيم

باسمه‌تعالی

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
مدیریت تحصیلات تکمیلی

# تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **مهدی رحمانی** معتهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد.

نام و نام‌خانوادگی دانشجو

امضاء

دانشکده مهندسی مکانیک

# تحلیل تجربی رفتار ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن/لاستیک ضایعاتی/نانو کربنات‌کلسیم

**نگارش**

**مهدی رحمانی**

**استاد راهنما: دکتر فرامرز آشنای قاسمی**

**دکتر غلامحسن پایگانه**

**استاد مشاور: دکتر محمدرضا کلائی**

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی مکانیک**

**(گرایش طراحی کاربردی)**

**خرداد ماه 1391**

شماره :
تاریخ : .....
پیوست : .....

بسمه تعالی

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

# صورتجلسهٔ دفاع پایان‌نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تاییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آقای **مهدی رحمانی** رشتهٔ **مهندسی‌مکانیک–طراحی‌کاربردی** تحت عنوان **تحلیل تجربی رفتار ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن/لاستیک ضایعاتی نانوکربنات‌کلسیم**، که در تاریخ ۹۱/۳/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

☑ قبول (بادرجه ...عالی... امتیاز ...۲۰...) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود.

۱ ـ عالی (۲۰ – ۱۹)

۲ ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ – ۱۸)

۳ ـ خوب (۱۷/۹۹ – ۱۶)

۴ ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ – ۱۴)

۵- غیرقابل قبول (کمتر از ۱۴)

| اعضاء | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر فرامرز آشنای‌قاسمی | استادیار | |
| استاد راهنما | دکتر غلامحسن پایگانه | استادیار | |
| استاد مشاور | دکتر محمدرضا کلایی | استادیار | |
| استاد داور داخلی | دکتر نصراله بنی‌مصطفی‌عرب | استادیار | |
| استاد داور خارجی | دکتر رضا اسلامی | استادیار | |
| نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر عبدالحسین جلالی | استادیار | |

دکتر غلامحسن پایگانه

رئیس دانشکده مهندسی مکانیک

تهران، لویزان، کد پستی: ۱۵۸۱۱–۱۶۷۸۸
صندوق پستی: ۱۶۳–۱۶۷۸۵
تلفن: ۹–۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۳۳
Email: sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

**تقدیم**

**این پایان نامه را در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:**

**- محضر مبارک حضرت صاحب الزمان (عج).**

**- محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند .**

**- محضر استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند .**

**- آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند .**

**- آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.**

**- آنان که آزادی و کرامت انسانی را پاس می‌دارند .**

**- آنان که با یاد خدا و برای کسب رضایت او همراه و همسو با علم و دانش جهت رشد و شکوفایی ایران اسلامی گام برمی‌دارند .**

تقدیر و تشکر

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاری‌شان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم نوعان را مقدم دارد، با او معامله کند و در این خلوص انباز نگیرد و خوش باشدکه پروردگار سمیع و بصیر است.

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم برسم و از هیچ محبتی در حقم دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگیم مرا قوت قلب بود.شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان‌نامه را به پایان برسانم.

درود فراوان به پدر بزرگوارم و سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر دلسوز و مهربانم که سجده‌ی ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و دامان گهربارش لحظه‌های مهربانی را به من آموخت. جای دارد خالصانه از این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر غلامحسن پایگانه، ریاست محترم دانشکده مهندسی مکانیک، که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ و همچنین استاد با کمالات و شایسته، جناب آقای دکتر فرامرز آشنای قاسمی، مدیر گروه محترم ساخت و تولید که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را برعهده گرفتند؛ و همچنین از استادان فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر محمدرضا کلائی و جناب آقای دکتر علیرضا شریف که زحمت مشاوره را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

و سپاس بی‌دریغ خدمت دوستان گران مایه‌ام در کارگروه ترویج ستاد ویژه توسعه فناوری نانو ریاست جمهوری و انجمن نانوفناوری دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند؛ و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند.

*شکر خدا را که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم*

مهدی رحمانی

خرداد 1391

## چکیده

تأثیر حضور همزمان پودر تایر فرسوده خودرو (WGRT) و نانوذرات کربنات‌کلسیم ($CaCO_3$) و تغییرات درصد وزنی آنها بر روی خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن (PP) بررسی گردید. به منظور پراکندگی بهتر نانوذرات کربنات‌کلسیم در ماتریس پلی‌پروپیلن، نانوذرات اولیه با یک تک‌لایه از اسید استئاریک روکش شدند؛ همچنین از سازگارکننده "پلی‌پروپیلن گرافت شده با انیدرید مالئیک" (PP-g-MA) به منظور افزایش سازگاری پودر تایر فرسوده خودرو با ماتریس پلی‌پروپیلن استفاده شد. تمامی ترکیب‌ها و حتی حالت‌های خالص مواد در یک اکسترودر دوپیچه همسوگرد مخلوط شدند و سپس به کمک دستگاه قالب‌ریزی تزریقی به صورت نمونه‌های کشش و ضربه استاندارد درآمدند. خواص مکانیکی از قبیل استحکام ضربه آیزود شیاردار، مدول یانگ، ازدیاد طول در شکست، تنش تسلیم و استحکام کششی تمامی حالت‌های خالص مواد و همچنین ترکیب‌های آنها به صورت تجربی بررسی گردیدند. روش طراحی مخلوط و نرم‌افزار Minitab16 به منظور طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری و بهینه‌سازی خواص مکانیکی ترکیب‌ها استفاده شد و ترکیب با هردوی استحکام ضربه و مدول یانگ ماکزیمم با این شیوه تعیین گردید. مدل‌های آماری و معادلات رگرسیون ارائه شده توسط روش طراحی مخلوط انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و به خوبی روند تغییرات خواص مکانیکی ترکیب‌ها را گزارش داده‌اند. ساختارشناسی ترکیب‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) انجام شد. تصاویر FESEM پراکندگی بهتر نانوذرات کربنات‌کلسیم روکش شده با تک‌لایه از اسید استئاریک را تأیید می‌کرد. تمامی ترکیب‌های شامل نانوذرات کربنات‌کلسیم تک‌لایه روکش شده با اسید استئاریک خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با حالت بدون روکش از خود نشان دادند که این بهبود به پراکندگی بهتر نانوذرات کربنات‌کلسیم در ماتریس پلی‌پروپیلن در حالت روکش شده منسوب می‌شود. در ترکیب‌های شامل سازگارکننده PP-g-MA مشاهده شد که میزان 5 درصد وزنی از این ماده منجر به ظهور خواص مکانیکی بهتر ترکیب‌ها می‌شود که به ایجاد پیوندهای مناسب بین پودر تایر فرسوده خودرو و ماتریس در این درصد وزنی سازگارکننده منسوب می‌شود. همچنین سازگارکننده PP-g-MA تأثیر مطلوبی بر پراکندگی بهتر نانوذرات کربنات‌کلسیم در ماتریس پلی‌پروپیلن داشت. آنالیز توزین حرارتی (TGA) به منظور تعیین میزان دقیق روکش اسید استئاریک بر روی نانوذرات کربنات‌کلسیم و همچنین تعیین درصد وزنی ترکیبات موجود در ساختار پودر تایر فرسوده خودرو استفاده شد؛ همچنین آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز گرماکافت (Pyrolysis-FTIR) به منظور تعیین نوع ترکیبات موجود در ساختار پودر تایر فرسوده خودرو استفاده شد که نتایج حاصل از این آنالیز انطباق خوبی با نتایج حاصل از آنالیز TGA مربوط به پودر تایر داشت.



**واژه‌های کلیدی**: خواص مکانیکی- روش طراحی مخلوط- پلی‌پروپیلن- پودر تایر فرسوده خودرو- نانوذرات کربنات‌کلسیم- نانوکامپوزیت‌ها.

## فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

فصل اول: مقدمه
1-1- مقدمه.....2

2-1- تعریف مسئله و بیان فرضیات.....3
3-1- سؤالات و اهداف تحقیق.....5

فصل دوم: مروری بر منابع و تحقیقات پیشین
1-2- مقدمه.....8
2-2- کامپوزیت‌ها.....8
3-2- ماتریس پلیمری.....11
4-2- پلی‌پروپیلن.....12
5-2- کربنات‌کلسیم.....13
6-2- پودر تایر فرسوده خودرو.....16
7-2- مروری بر تحقیقات پیشین.....18
1-7-2- مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن پر شده با ذرات کربنات‌کلسیم.....18
2-7-2- مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن پر شده با الاستومر.....24
3-7-2- مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی طراحی آزمایش و بهینه‌سازی خواص ترکیبات پلی‌پروپیلن/الاستیک ضایعاتی.....27
8-2- خلاصه فصل.....28

فصل سوم: مواد، دستگاه‌ها، روش انجام آزمایش‌ها و تحلیل آماری
1-3- مقدمه.....32
2-3- تعریف مسئله.....32
3-3- مواد اولیه.....33
1-3-3- پلی‌پروپیلن.....33
2-3-3- پلی‌پروپیلن گرافت شده با انیدرید مالئیک (PP-g-MA).....34
3-3-3- پودر تایر فرسوده خودرو.....34
4-3-3- نانوذرات کربنات‌کلسیم.....35

3-3-5- اسید استئاریک.....36
3-4- آماده‌سازی مواد، دستگاه‌های آنالیز مواد.....37
3-4-1- روکش‌دهی نانوذرات کربنات‌کلسیم.....37
3-4-2- آنالیز توزین حرارتی (TGA).....38
3-4-3-آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه تجزیه حرارتی (Pyrolysis-FTIR).....39
3-4-4- میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM).....40
3-5- ساخت نانوکامپوزیت‌ها و دستگاه‌های ساخت نمونه‌ها.....42
3-5-1- ترکیب درصد وزنی نمونه‌ها.....42
3-5-2- دستگاه اکسترودر دوپیچه همسو گرد.....43
3-5-3- دستگاه قالب‌ریزی تزریقی.....45
3-6- خواص مکانیکی و دستگاه‌های اندازه‌گیری.....45
3-6-1-آزمون کشش.....46
3-6-2- آزمون ضربه.....46
3-7- طراحی آزمایش.....47
3-7-1- روش طراحی مخلوط.....49
3-7-2- مراحل طراحی آزمایش به شیوه طراحی مخلوط.....49
3-7-2-1- شناسایی و بیان مسئله.....49
3-7-2-2- طراحی آزمایش‌ها، جمع‌آوری داده‌ها.....50
3-7-2-3- تحلیل داده‌ها.....53

فصل چهارم: نتایج و بحث

4-1- مقدمه.....60
4-2- شناسایی مواد و ساختار شناسی ترکیبات.....60
4-2-1- تعیین میزان روکش اسید استئاریک بر روی نانوذرات کربنات‌کلسیم.....60
4-2-2- تعیین نوع و میزان ترکیبات الاستومر در ساختار پودر تایر فرسوده خودرو.....63
4-2-3- ساختار شناسی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های حاصل.....67
4-3- تحلیل تجربی خواص مکانیکی ترکیب‌ها.....75
4-3-1- تأثیر نانوذرات کربنات‌کلسیم بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....75
4-3-2- تأثیر پودر تایر فرسوده خودرو بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....78
4-3-3- تأثیر PP-g-MA بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....81
4-3-4- تأثیر حضور همزمان نانوذرات کربنات‌کلسیم و PP-g-MA بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن83
4-3-5- تأثیر حضور همزمان پودر تایر فرسوده خودرو و PP-g-MA بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....86

4-3-6- تأثیر حضور همزمان پودر تایر فرسوده خودرو و نانوذرات کربنات‌کلسیم بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....88
4-3-7- تأثیر حضور همزمان پودر تایر فرسوده خودرو، نانوذرات کربنات‌کلسیم و PP-g-MA بر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن.....91
4-4- تحلیل آماری.....94
4-4-1- تحلیل آماری استحکام ضربه آیزود شیاردار کامپوزیت‌ها با استفاده از روش طراحی مخلوط.....94
4-4-2- تحلیل آماری مدول یانگ کامپوزیت‌ها با استفاده از روش طراحی مخلوط.....99
4-4-3- تحلیل آماری ازدیاد طول در شکست کامپوزیت‌ها با استفاده از روش طراحی مخلوط.....103
4-4-4- تحلیل آماری تنش تسلیم کامپوزیت‌ها با استفاده از روش طراحی مخلوط.....106
4-4-5- تحلیل آماری استحکام کششی کامپوزیت‌ها با استفاده از روش طراحی مخلوط.....109
4-4-6- بهینه‌سازی استحکام ضربه و مدول یانگ کامپوزیت‌ها.....112

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
5-1- مقدمه.....117
5-2- نتیجه‌گیری.....118
5-3- پیشنهادات.....123

پیوست
مراحل طراحی و تحلیل آزمایش‌ها و بهینه‌سازی خواص مکانیکی.....125

فهرست مقالات ارائه شده.....134

مراجع.....136

## فهرست جداول

عنوان.....صفحه


جدول(3-1): مشخصات پلی‌پروپیلن HP 550 J گزارش شده توسط کارخانه تولید کننده.....33
جدول(3-2): اطلاعات فنی هموپلیمر پلی‌پروپیلن V 30 S شرکت پتروشیمی مارون.....34
جدول(3-3): اطلاعات فنی نانوذرات کربنات‌کلسیم گزارش شده توسط شرکت تولید کننده.....35
جدول(3-4): مشخصات فنی اسید استئاریک مصرفی.....36
جدول(3-5): علائم اختصاری ترکیب‌ها.....43
جدول(3-6): متغیرهای ورودی و خروجی.....50
جدول(3-7): محدوده مناسب مواد تشکیل دهنده کامپوزیت‌ها.....50
جدول(3-8): آزمایش‌های طراحی شده به روش طراحی مخلوط با استفاده از نرم افزار Minitab16 در یک بار تکرار پذیری.....53
جدول(4-1): آنالیز واریانس مدل Special quartic برای استحکام ضربه آیزود.....96
جدول(4-2): ضرایب پیش‌بینی شده معادله رگرسیون توسط مدل Special quartic برای پیش‌بینی اعداد استحکام ضربه برحسب مقدار مؤلفه‌های ورودی.....97
جدول(4-3): آنالیز واریانس مدل quadratic برای مدول یانگ.....100
جدول(4-4): ضرایب پیش‌بینی شده معادله رگرسیون توسط مدل quadratic برای پیش‌بینی اعداد مدول یانگ برحسب مقدار مؤلفه‌های ورودی.....100
جدول(4-5): آنالیز واریانس مدل quadratic برای ازدیاد طول در شکست.....103
جدول(4-6): ضرایب پیش‌بینی شده معادله رگرسیون توسط مدل quadratic برای پیش‌بینی ازدیاد طول در شکست برحسب مقدار مؤلفه‌های ورودی.....104
جدول(4-7): آنالیز واریانس مدل Special cubic برای تنش تسلیم.....107
جدول(4-8): ضرایب پیش‌بینی شده معادله رگرسیون توسط مدل Special cubic برای پیش‌بینی اعداد تنش تسلیم برحسب مقدار مؤلفه‌های ورودی.....107
جدول(4-9): آنالیز واریانس مدل Special quartic برای استحکام کششی.....110
جدول(4-10): ضرایب پیش‌بینی شده معادله رگرسیون توسط مدل Special quartic برای پیش‌بینی اعداد استحکام کششی برحسب مقدار مؤلفه‌های ورودی.....110

## فهرست نمودارها

عنوان.....صفحه

شکل(2-7): منحنی‌های DTG نانوذرات کربنات‌کلسیم روکش شده با مقادیر مختلف اسید استئاریک.....22
شکل(3-19): نمودار هیستوگرام باقیمانده‌ها.....55
شکل(3-20): نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها.....55
شکل(3-21): نمودار کاهش مقادیر و تغییرات در پاسخ با گذشت زمان.....56
شکل(3-22): نمودار افزایش باقیمانده‌ها با افزایش مقادیر.....56
شکل(3-23): نمودار استقلال باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر.....56
شکل(3-24): نمودار تغییرات مقادیر باقیمانده‌ها نسبت به سطوح فاکتور.....57
شکل(4-1): منحنی‌های DTG و TGA نانوذرات اولیه خریداری شده از کارخانه.....62
شکل(4-2): منحنی‌های DTG و TGA نانوذرات پس از افزایش روکش اسید استئاریک.....63
شکل(4-3): طیف‌های FTIR پودر تایر فرسوده خودرو.....65
شکل(4-4): منحنی‌های TGA-DTG پودر تایر فرسوده خودرو.....67
شکل(4-11): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و نانوذرات کربنات‌کلسیم در درصدهای وزنی مختلف کربنات‌کلسیم.....75
شکل(4-12): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و نانوذرات کربنات‌کلسیم در درصدهای وزنی مختلف کربنات‌کلسیم.....77
شکل(4-13): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و پودر تایر فرسوده خودرو در درصدهای وزنی مختلف پودر تایر فرسوده.....79
شکل(4-14): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و پودر تایر فرسوده خودرو در درصدهای وزنی مختلف پودر تایر فرسوده.....80
شکل(4-15): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی حالت‌های خالص و ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA.....81
شکل(4-16): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست حالت‌های خالص و ترکیب‌های دوتایی پلی‌پروپیلن و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA.....82
شکل(4-17): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی حالت‌های خالص و ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، کربنات‌کلسیم و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA وکربنات‌کلسیم.....83

شکل(4-18): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست حالت‌های خالص و ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، کربنات‌کلسیم و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA و کربنات‌کلسیم...85
شکل(4-19): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی حالت‌های خالص و ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA و پودر تایر.....86
شکل(4-20): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست حالت‌های خالص و ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف PP-g-MA و پودر تایر.....87
شکل(4-21): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده خودرو و کربنات‌کلسیم در درصدهای وزنی مختلف کربنات‌کلسیم و پودر تایر فرسوده خودرو.....89
شکل(4-22): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست ترکیب‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده خودرو و کربنات‌کلسیم در درصدهای وزنی مختلف کربنات‌کلسیم و پودر تایر فرسوده خودرو.....90
شکل(4-23): استحکام ضربه آیزود شیاردار، تنش تسلیم و استحکام کششی ترکیب‌های چهارتایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده خودرو، نانو کربنات‌کلسیم و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف92
شکل(4-24): مدول یانگ و ازدیاد طول در شکست ترکیب‌های چهارتایی پلی‌پروپیلن، پودر تایر فرسوده خودرو، نانو کربنات‌کلسیم و PP-g-MA در درصدهای وزنی مختلف.....92
شکل(4-25): نمودارهای باقیمانده‌ها برای استحکام ضربه آیزود در تحلیل‌آماری با استفاده از مدل Special quartic.....95
شکل(4-26): نمودارهای ترکیبی تغییرات استحکام ضربه آیزود بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد پایین مؤلفه غایب در هر نمودار.....98
شکل(4-27): نمودارهای ترکیبی تغییرات استحکام ضربه آیزود بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد وسط مؤلفه غایب در هر نمودار.....99
شکل(4-28): ماکزیمم استحکام ضربه آیزود پیش بینی شده توسط مدل Special quartic و درصدهای وزنی مؤلفه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت با استحکام ضربه ماکزیمم.....99
شکل(4-29): نمودارهای باقیمانده‌ها برای مدول یانگ در تحلیل‌آماری با استفاده از مدل quadratic.....100
شکل(4-30): نمودارهای ترکیبی تغییرات مدول یانگ بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد پایین مؤلفه غایب در هر نمودار.....101
شکل(4-31): نمودارهای ترکیبی تغییرات مدول یانگ بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد وسط مؤلفه غایب در هر نمودار.....102
شکل(4-32): ماکزیمم مدول یانگ پیش‌بینی شده توسط مدل quadratic و درصدهای وزنی مؤلفه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت با استحکام ضربه ماکزیمم.....102
شکل(4-33): نمودارهای باقیمانده‌ها برای ازدیاد طول در شکست در تحلیل‌آماری با استفاده از مدل

quadratic.....103
شکل(4-34): نمودارهای ترکیبی تغییرات ازدیاد طول در شکست بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد پایین مؤلفه غایب در هر نمودار.....105
شکل(4-35): نمودارهای ترکیبی تغییرات ازدیاد طول در شکست بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد وسط مؤلفه غایب در هر نمودار.....105
شکل(4-36): ماکزیمم ازدیاد طول در شکست پیش‌بینی شده توسط مدلquadratic و درصدهای وزنی مؤلفه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت با استحکام ضربه ماکزیمم.....106
شکل(4-37): نمودارهای باقیمانده‌ها برای تنش تسلیم کامپوزیت‌ها در تحلیل‌آماری با استفاده از مدل Special cubic .....106
شکل(4-38): نمودارهای ترکیبی تغییرات تنش تسلیم بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد پایین مؤلفه غایب در هر نمودار.....108
شکل(4-39): نمودارهای ترکیبی تغییرات تنش تسلیم بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد وسط مؤلفه غایب در هر نمودار.....108
شکل(4-40): ماکزیمم تنش تسلیم پیش‌بینی شده توسط مدل Special cubic و درصدهای وزنی مؤلفه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت با استحکام ضربه ماکزیمم.....109
شکل(4-41): نمودارهای باقیمانده‌ها برای استحکام کششی کامپوزیت‌ها در تحلیل‌آماری با استفاده از مدل Special quartic.....110
شکل(4-42): نمودارهای ترکیبی تغییرات استحکام کششی بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد پایین مؤلفه غایب در هر نمودار.....111
شکل(4-43): نمودارهای ترکیبی تغییرات استحکام کششی بر حسب تغییرات مقادیر مؤلفه‌ها در حد وسط مؤلفه غایب در هر نمودار.....112
شکل(4-44): ماکزیمم استحکام کششی پیش‌بینی شده توسط مدل Special quartic و درصدهای وزنی مؤلفه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت با استحکام ضربه ماکزیمم.....112
شکل(4-45): استحکام ضربه و مدول یانگ ماکزیمم کامپوزیت بهینه.....113
شکل(4-46): استحکام ضربه و مدول یانگ ماکزیمم پیش‌بینی شده توسط روش طراحی مخلوط برای ترکیب‌های فاقد PP-g-MA.....114
شکل(4-47): استحکام ضربه و مدول یانگ ماکزیمم پیش‌بینی شده توسط روش طراحی مخلوط برای ترکیب‌های با 5 درصد وزنی PP-g-MA.....114
شکل(4-48): استحکام ضربه و مدول یانگ ماکزیمم پیش‌بینی شده توسط روش طراحی مخلوط برای ترکیب‌های با 5 درصد وزنی PP-g-MA.....115

## فهرست شکل‌ها

عنوان.....صفحه


شکل(2-1): چینش متفاوت تقویت کننده‌ها در کامپوزیت‌ها.....9
شکل(2-2): شکل شماتیک از پیوندهای جانبی در پلیمرهای مختلف.....12
شکل(2-3): خم شدن ترک با اضافه کردن ذرات.....14
شکل(2-4): مکانیزم‌های افزایش انرژی ضربه به وسیله ترک‌ها.....15
شکل(2-5): حالت‌های مختلف توزیع و پراکندگی نانوذرات در ماتریس‌های پلیمری.....16
شکل(2-6): مکانیزم چقرمه شدن با ذرات صلب.....20
شکل(3-1): گرانول پلی‌پروپیلن HP 550 J.....33
شکل(3-2): گرانول PP-g-MA مصرفی.....34
شکل(3-3): پودر تایر فرسوده خودرو.....35
شکل(3-4): پودر نانوذرات کربنات‌کلسیم.....36
شکل(3-5): ذرات اسید استئاریک مصرفی.....36
شکل(3-6): مراحل مختلف روکش دهی نانوذرات کربنات‌کلسیم.....38
شکل(3-7): دستگاه TGA مدلPL-1500 .....39
شکل(3-8): دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه.....40
شکل(3-9): میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی.....41
شکل(3-10): نمونه‌های کامپوزیتی با سطح روکش داده شده توسط طلا برای بررسی ریز ساختار...41
شکل(3-11): دستگاه مورد استفاده جهت روکش‌دهی سطحی نمونه ها با طلا.....42
شکل(3-12): مراحل ساخت نانوکامپوزیت‌ها توسط دستگاه اکسترودر.....44
شکل(3-13): طرح شماتیک دستگاه اکسترودر دوپیچه همسوگرد.....44
شکل(3-14): دستگاه تزریق مورد استفاده برای تهیه‌ی نمونه‌های آزمایش.....45
شکل(3-15): دستگاه کشش Zwick/Roell مدل Z100 .....46
شکل(3-16): دستگاه ضربه RESIL IMPACTOR.....47
شکل(3-17): تصویر L-simplex.....51
شکل(3-18): نمونه‌ای از طراحی مخلوط به روش Extreme vertices .....52
شکل(4-5): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع حالت‌های بدون پرکننده.....68
شکل(4-6): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع نانوکامپوزیت‌های پر شده با نانوذرات کربنات‌کلسیم.....69

شکل(4-7): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع نانوکامپوزیت‌های شامل نانوذرات کربنات‌کلسیم و PP-g-MA.....70
شکل(4-8): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع کامپوزیت‌های پر شده با پودر تایر فرسوده خودرو و PP-g-MA.....72
شکل(4-9): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع کامپوزیت‌های پر شده با پودر تایر فرسوده خودرو و نانوذرات کربنات‌کلسیم روکش شده با تک لایه اسید استئاریک...73
شکل(4-10): تصاویر FESEM گرفته شده از سطوح شکسته شده با نیتروژن مایع کامپوزیت‌های پر شده با پودر تایر فرسوده خودرو، نانوذرات کربنات‌کلسیم و PP-g-MA.....74

# فصل اول

## مقدمه

## 1-1- مقدمه

کامپوزیت‌ها[1] یا مواد مرکب از جمله مواد مهندسی جدیدی هستند که استفاده از آنها ایده جدیدی نیست و بشر از دیرباز به اهمیت ترکیب فیزیکی موادی که در دسترس وی بوده‌اند، پی برده است.

برای کامپوزیت تعریف‌های مختلفی داده شده است. مواد کامپوزیت آمیخته‌ای از دو یا چند فاز یا جزء مجزا هستند که توسط یک فصل مشترک مشخص از هم تفکیک شده‌اند که خواص آن از تک‌تک مواد تشکیل دهنده آن تأثیر می‌پذیرد و به منظور بهبود یک یا چند خاصیت زمینه اصلی تولید می‌شود. طراحان و مهندسان کارایی مواد کامپوزیتی جهت تولید محصولاتی با کیفیت بالا، با دوام و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه را اثبات شده می‌دانند. مواد کامپوزیتی در محصولات زیادی در زندگی روزمره ما یافت می‌شوند، از جمله اتومبیل‌ها، قایق‌ها، چوب‌های اسکی، گلف و غیره. علاوه بر آن در بسیاری از صنایع از قبیل صنایع ساختمانی، الکتریکی، هوافضا، نظامی، اتومبیل‌سازی از مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود.

استفاده از کامپوزیت‌های مدرن در حقیقت از اوایل سال 1940 میلادی شروع شد. در این سال برای اولین بار الیاف شیشه جهت تقویت پلاستیک‌های مصرفی در ساخت پوشش پلاستیکی آنتن رادار هواپیما استفاده شد[1].

از جمله کامپوزیت‌های پرکاربرد، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌باشند که در صنایع کاربرد فراوانی دارند. از مزایای استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌توان به استحکام بالا، سبکی، مقاومت در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری طراحی، دوام زیاد و ارزانی آنها اشاره کرد.

فناوری نانو[2] و نانو مواد[3] از علوم جدید می‌باشند که به دلیل خواص شگفت‌آوری که مواد در ابعاد نانو از خود نشان می‌دهند، بسیار مورد توجه محققان قرارگرفته است. فناوری نانو واژه‌ای کلی است که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. به طور کلی منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود یک تا 100 نانومتر می‌باشد (یک نانومتر یک میلیاردم متر یا $10^{-9}$ متر است). اولین جرقه فناوری نانو در سال 1959 زده شد. در این سال ریچاد فاینمن[4] طی یک سخنرانی با عنوان "فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد" ایده فناوری نانو را مطرح ساخت. در این نظریه وی

[1]-Composites
[2] -Nanotechnology
[3] -Nano materials
[4] -Richard Feynman

اعلام کرد در آینده نزدیک مولکول‌ها و اتم‌ها را به طور مستقیم می‌توان دستکاری کرد.

در اواخر قرن بیستم زمینه جدیدی تحت عنوان " نانوکامپوزیت‌ها "[1] وارد عرصه علم و فناوری کامپوزیت‌ها شد. نانوکامپوزیت، به کامپوزیت‌هایی که حداقل یکی از ابعاد فاز پراکنده در آن در مقیاس نانو باشد، اطلاق می‌گردد. به دلیل تغییر در ترکیب شیمیایی و ساختار مواد در مقیاس نانومتری و ارائه خواص ویژه و بی‌نظیر این ترکیبات نسبت به مواد کامپوزیتی در مقیاس‌های متداول، در ده سال اخیر پیشرفت قابل توجهی در این زمینه صورت گرفته است[2].

در چند دهه اخیر نانوکامپوزیت‌های آلی- معدنی در عرصه علم و صنعت توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. افزودن مقادیر بسیار کم افزودنی‌ها و پرکننده‌های نانومتری به این کامپوزیت‌ها بهبود قابل توجه خواص حرارتی، مکانیکی، کاهش وزن و مقاومت در برابر سایش و تنش‌های کششی آن‌ها را به همراه داشته است.

## 2-1-تعریف مسئله و بیان فرضیات

پلی‌اولفین‌ها[2] یک طبقه از ترموپلاستیک‌ها[3] هستند که به واسطه تعادل خوب میان خواص فیزیکی و شیمیایی، قیمت پایین، وزن کم، فرآیندپذیری و خصوصیات بازیافتی خوب در سال‌های اخیر رشد سریعی داشته‌اند. پلی‌پروپیلن یکی از پرکاربردترین اولفینی‌هاست؛ نانوکامپوزیت‌های آن از اولین نانوکامپوزیت‌هایی است که تجاری شده است و صنعت خودرو نقش مهمی در این فرآیند تجاری شدن داشته‌است. برای بهبود ویژگی‌های پلی‌پروپیلن[4] کارهای زیادی انجام شده‌است. با کنترل وزن مولکولی، استفاده از مواد افزودنی و مخلوط‌کردن، امکان تشدید و بهبود بسیاری از ویژگی‌های پلی‌پروپیلن وجود دارد.

بهبود استحکام ضربه و سفتی[5] PP مفهوم عملی مهمی برای گسترش محدوده کاربردهای آن دارد[3]. مقاومت ضربه‌ای کم بویژه در دماهای پائین از جمله ضعف‌های پلی‌پروپیلن است که به محدودیت استفاده از آن در بسیاری کاربردها انجامیده است[3-5]. استفاده از مواد با استحکام ضربه بالا در ترکیبات بر پایه پلی‌پروپیلن از جمله راهکارهای مقابله با این ضعف به شمار می‌رود. در این میان، بهره‌برداری از لاستیک‌ها و از آن جمله ضایعات تایر خودروها، به دلایل ارزانی و مسائل زیست محیطی، در محصولات با بستر PP بسیار حائز اهمیت و جذاب است[6]. تایر ضایعاتی خودرو[6] ماده‌ای ترموست[7] می‌باشد که شامل زنجیرهای پلیمری با پیوندهای عرضی[8] غیر قابل برگشت بوده و مانند ترموپلاستیک‌ها قابلیت شکل‌گیری دوباره و استفاده مجدد را دارا نمی‌باشند. افزودن لاستیک ضایعاتی

[1]-Nanocomposites
[2] -Polyolefins
[3] -Thermoplastics
[4] -Polypropylene
[5] -Stiffness
[6] -Waste ground rubber tire
[7] -Thermoset
[8] -Cross-link