

الحمد لله  
الكرين



**تحلیل خواص مکانیکی نانو کامپوزیتهای سه تایی پلی  
پروپیلن / پلی اتیلن خطی چگالی پایین / نانو کربنات  
کلسیم به روش آزمایشگاهی**

**نگارش**

**هرمز چراغی**

**استاد راهنما: دکتر فرامرز آشنای قاسمی**

**دکتر غلامحسن پایگانه**

**استاد مشاور: دکتر سعیده مزینانی**

**پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی مکانیک**

**خرداد ۹۱**

دستان پر مهر و کریشان بوسه می زخم و غبار پایشان را تو تیاوار بر چشمانم می  
سایم. غبار حاصل از سیمودن راهی که در آن همه چیز خود را عاشقانه نثار کردند تا  
نهال های زندگیشان قدر افروزند.

تقدیم به

پدرم

و

مادرم

خداوند منان را شاکرم که توفیق به پایان رساندن این مرحله از زندگی را به  
من عطا فرمود.

از پدر و مادر و دیگر اعضای خانواده ام که در تمامی مراحل زندگی مشوق و یاور  
من بوده اند شاکرم می‌کنم.

از اساتید راه‌نما و مشاور بزرگوارم که در تمامی مراحل انجام پایان نامه با صبر و  
حوصله تقایص پایان نامه را رفع کردند شاکرم می‌کنم.

از تمامی دوستان عزیزم که در مراحل انجام آزمایشات پایان نامه مرایاری  
نمودند، بخصوص فرشیدرزلا نسری و بهرام محبوب شاکرم می‌کنم.

## چکیده

خواص مکانیکی و ساختار فیزیکی نانو کامپوزیت سه تایی پلی پروپیلن/پلی اتیلن خطی چگالی پایین/نانوکربنات کلسیم که توسط اکسترودر دو مارپیچه ساخته شده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. سطح نانوذرات توسط اسید استیریک فراوری شد. برای اصلاح برهمکنش بین سطحی پلی پروپیلن/پلی اتیلن خطی چگالی پایین از ترکیب مذاب با پلی اتیلن چگالی بالا استفاده می شود. در این تحقیق تأثیر درصد وزنی پلی اتیلن خطی چگالی پایین و نانوکربنات کلسیم بر خواص کششی، مدول یانگ و انرژی جذبی بر اثر ضربه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تأثیر برهمکنش بین نانوذرات و ماتریس و حجم میکروترک ها روی خواص کششی بررسی شده است. نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزایش درصد وزنی  $\text{NanoCaCO}_3$ ، مدول الاستیسیته ابتدا کاهش سپس افزایش می یابد. استحکام تسلیم و افزایش طول تا شکست و نیز تنش در شکست نانو کامپوزیت با افزایش درصد حجمی  $\text{NanoCaCO}_3$ ، دچار افت اندکی شده است. به دلیل پدیده پیش تسلیم، کاهش سطح زیرمنحنی تنش- کرنش با افزایش کسر وزنی نانو کربنات کلسیم مشاهده می شود. نتایج نشان داد که استحکام ضربه با بالا رفتن درصد وزنی نانوکربنات کلسیم افزایش می یابد، همچنین نتایج آزمایش ها رفتار نامنظم در ترکیبات با درصد وزنی  $\text{LD}=10\%$  را نشان داد، که گمان می رود بخاطر سازگاری بین اجزاء می باشد. تأثیر درصد وزنی  $\text{NanoCaCO}_3$  و  $\text{LD}$  بر میکروترک ها و سطح شکست ضربه توسط میکروسکوب الکترونی روبشی، برای توصیف مکانیزم های بهبود دهنده استحکام شکست مورد بررسی قرار گرفت.

**کلمات کلیدی:** میکروترک، استحکام ضربه، نانو کامپوزیت، کربنات کلسیم

## فهرست

صفحه

عنوان

### فصل اول: طرح مسئله

۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- بیان مسأله تحقیق
۳	۳-۱- ضرورت واهمیت تحقیق
۳	۴-۱- اهداف تحقیق
۳	۵-۱- سوالات یا فرضیه‌های تخصصی
۴	۶-۱- پلیمرها
۴	۱-۶-۱- ساختار شیمیایی پلیمرها
۵	۲-۶-۱- ساختار فیزیکی پلیمرها
۶	۳-۶-۱- پلیمرهای کریستالی
۶	۴-۶-۱- پلیمرهای آمرف
۶	۵-۶-۱- درجه حرارت انتقال شیشه
۷	۶-۶-۱- گروه بندی پلیمرها
۹	۷-۱- پلی پروپیلن
۱۰	۱-۷-۱- انواع پلی پروپیلن
۱۱	۸-۱- پلی اتیلن
۱۲	۱-۸-۱- انواع پلی اتیلن
۱۲	۱-۱-۸-۱- پلی اتیلن با دانسیته بالا
۱۲	۲-۱-۸-۱- پلی اتیلن با دانسیته پایین
۱۲	۳-۱-۸-۱- پلی اتیلن خطی با دانسیته پایین
۱۳	۹-۱- خواص مکانیکی مواد
۱۳	۱-۹-۱- تعریف
۱۳	۲-۹-۱- آزمون کشش پلاستیک ها
۱۶	۳-۹-۱- رفتار مواد در مقابل نیرو های ضربه ای
۱۶	۴-۹-۱- درجه حرارت تبدیل شکست
۱۷	۵-۹-۱- چقرمگی

۱۷	۱-۵-۹-۱- اندازه گیری میزان چقرمگی
۱۸	۱۰-۱- مواد مرکب
۱۸	۱-۱۰-۱- دسته بندی مواد مرکب
۱۸	۲-۱۰-۱- نانو کامپوزیت ها
۱۹	۱-۲-۱۰-۱- مشکلات فرایندی ساخت نانوکامپوزیت ها
۱۹	۲-۲-۱۰-۱- انواع نانوکامپوزیت
۱۹	۳-۲-۱۰-۱- نانو کامپوزیت پلی پروپیلن
۲۰	۳-۱۰-۱- تقویت کننده های ذره ای
۲۰	۱-۳-۱۱-۱- نانو ذرات کربنات کلسیم
۲۱	۴-۱۰-۱- مکانیزم بهبود چقرمگی نانو کامپوزیت ها

## فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۲۳	۱-۲- مقدمه
۲۳	۲-۲- ترکیب پلیمرها
۲۹	۳-۲- نانو کامپوزیت های زمینه پلیمری با محتوای نانو کربنات کلسیم

## فصل سوم: روش تحقیق

۴۱	۱-۳- مقدمه
۴۱	۲-۳- شرح آزمایش
۴۱	۱-۲-۳- مواد اولیه
۴۴	۲-۲-۳- آماده سازی کامپوزیت
۴۴	۱-۲-۲-۳- فراوری سطحی نانو ذرات
۴۶	۳-۲-۳- اکسترودر
۵۰	۱-۳-۲-۳- ترکیب مواد
۵۱	۲-۳-۲-۳- ساخت پلی اتیلن سبک خطی اصلاح شده
۵۲	۴-۲-۳- ساخت کامپوزیت
۵۲	۱-۴-۲-۳- ترکیب اجزا
۵۳	۲-۴-۲-۳- ساخت نمونه های آزمایش
۵۳	۵-۲-۳- قالب گیری تزریقی

۵۳	۳-۲-۵-۱- تعریف
۵۴	۳-۲-۵-۲- واحد تزریق
۵۶	۳-۲-۵-۳- واحد قفل کننده قالب
۵۹	۳-۲-۶- آزمایش کشش
۶۱	۳-۲-۷- آزمایش ضربه
۶۳	۳-۲-۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی

## فصل چهارم: نتایج و بحث

۶۶	۴-۱- مقدمه
۶۶	۴-۲- خواص کشش
۶۶	۴-۲-۱- منحنی تنش کرنش
۶۸	۴-۲-۲- میکرو ترک ها
۷۱	۴-۲-۳- مدول الاستیسیته
۷۴	۴-۲-۴- استحکام تسلیم
۷۷	۴-۲-۵- افزایش طول تا شکست
۷۸	۴-۲-۶- استحکام شکست
۷۹	۴-۳- خواص ضربه
۷۹	۴-۳-۱- تاثیر درصد وزنی نانو کربنات کلسیم بر استحکام ضربه
۸۱	۴-۳-۲- تاثیر درصد وزنی پلی اتیلن چگالی پایین اصلاح شده بر استحکام ضربه
۸۳	۴-۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی
۸۳	۴-۴-۱- پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم
۸۵	۴-۴-۲- تاثیر درصد وزنی پلی اتیلن چگالی پایین اصلاح شده بر پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم
۸۶	۴-۴-۳- سطح شکست ضربه

## فصل پنجم: نتیجه گیری

۹۰	۵-۱- مقدمه
----	------------



## منابع

۹۲

مراجع

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱ واکنش شیمیایی برای تولید پلی اتیلن
۸	شکل ۲-۱ شمای اتصالات عرضی در پلیمرهای مختلف
۸	شکل ۳-۱ شمای یک ناحیه کریستالی در پلیمر
۹	شکل ۴-۱ ساختار اسفرلایت
۹	شکل ۵-۱ ساختار پلی پروپیلن
۱۱	شکل ۶-۱ انواع پلی پروپیلن بر اساس ساختار
۱۱	شکل ۷-۱ ساختار پلی اتیلن
۱۴	شکل ۸-۱ اثر آهنگ کرنش روی مقادیر نیرو-ازدیاد طول برای یک ماده پلاستیکی گرمانرم
۱۵	شکل ۹-۱ منحنی نمونه نیرو ازدیاد طول برای یک پلاستیک گرمانرم کشیده شده سرد.
۱۶	شکل ۱۰-۱ نمودار نیرو-ازدیاد طول یک پلاستیک گرمانرم
۲۴	شکل ۱-۲ منحنی تنش-کرنش برای درصد ترکیبات مختلف در دمای $170^{\circ}\text{C}$
۲۵	شکل ۲-۲ منحنی تنش-کرنش برای درصد ترکیبات مختلف در دمای $200^{\circ}\text{C}$
۲۵	شکل ۳-۲ تغییرات استحکام تسلیم بر حسب محتوای اجزاء
۲۶	شکل ۴-۲ تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب محتوای اجزاء
۲۷	شکل ۵-۲ تغییرات انرژی ضربه کامپوزیت تولیدی به روش ترکیب ۱ مرحله ای بر حسب محتوای LLDPE اصلاح نشده و دما
۲۸	شکل ۶-۲ تغییرات انرژی ضربه کامپوزیت تولیدی به روش ترکیب ۱ مرحله ای بر حسب محتوای LLDPE اصلاح شده و دما
۳۰	شکل ۷-۲ تأثیر درصد حجمی ذرات بر استحکام ضربه شیاردار V
۳۱	شکل ۸-۲ تأثیر درصد وزنی ذرات کربنات کلسیم بر تنش تسلیم در دماهای مختلف
۳۲	شکل ۹-۲ تأثیر دما و درصد وزنی کربنات کلسیم بر انرژی شکست ضربه
۳۳	شکل ۱۰-۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی
۳۴	شکل ۱۱-۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی
۳۵	شکل ۱۲-۲ تأثیر درصد وزنی ذرات کربنات کلسیم بر مدول کششی در $20^{\circ}\text{C}$

- شکل ۲-۱۳ استحکام ضربه به صورت تابعی از کربنات کلسیم ۳۵
- شکل ۲-۱۴ استحکام ضربه به صورت تابعی از دما ۳۶
- شکل ۲-۱۵ سطح شکست نمونه شیار V سیستم الف پروپیلن با درصد ترکیب ۰/۵٪ ۳۷
- شکل ۲-۱۶ سطح شکست تحت ضربه شیار V با درصد حجمی ۱/۵٪ ۳۸
- شکل ۲-۱۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی سطح شکست سیستم الف با درصد حجمی ۳٪ ۳۹
- شکل ۲-۱۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی سطح شکست سیستم ب با درصد حجمی ۳٪ ۳۹
- شکل ۳-۱ ذرات نانو کربنات کلسیم ۴۳
- شکل ۳-۲ اسیداستیریک ۴۴
- شکل ۳-۳ ظرف حاوی مخلوط، (a) بعد از افزودن اسید استیریک (b) قبل از افزودن اسید استیریک ۴۵
- شکل ۳-۴ ته نشین شدن نانوکربنات کلسیم ۴۵
- شکل ۳-۵ نانوکربنات کلسیم فراوری شده قبل از خشک شدن ۴۶
- شکل ۳-۶ اکسترودرهای تک مارپیچی ۴۷
- شکل ۳-۷ انواع مارپیجهای اکسترودر ۴۸
- شکل ۳-۸ صفحاتی که اندازه منافذ آنها با هم متفاوت است ۴۹
- شکل ۳-۹ عبوررشته های خروجی از قالب در یک مخزن پراز آب سرد ۴۹
- شکل ۳-۱۰ نمایشگر اکسترودر دو پیچه همسوگر ۵۱
- شکل ۳-۱۱ ترکیب LLDPE و اصلاح کننده HDPE ۵۱
- شکل ۳-۱۲ طرح ساده شده ای از یک واحد تزریق ۵۴
- شکل ۳-۱۳ پیچ های قالب گیری تزریقی ۵۵
- شکل ۳-۱۴ دو مجموعه شیب یک طرفه ۵۵
- شکل ۳-۱۵ ماشین قالب گیری تزریقی و نمایش قسمت های مختلف آن ۵۶
- شکل ۳-۱۶ حالت باز و بسته واحد قفل کننده قالب ۵۷
- شکل ۳-۱۷ طرح گیره اتصال دهنده ۵۸
- شکل ۳-۱۸ طرح محرکه خطی گیره نگهداری قالب ۵۸
- شکل ۳-۱۹ نمونه های تست ضربه و کشش مطابق با استاندارد ASTM ۵۹
- شکل ۳-۲۰ نمایش دستگاه تست کشش و نحوه قرار گیری نمونه در آن ۶۰
- شکل ۳-۲۱ نمودار تنش کرنش یک نمونه (a) یک بار تکرار (b) ۵ بار تکرار ۶۱
- شکل ۳-۲۲ (a) دستگاه آزمایش مقاومت ضربه ای چارپی. (b) نمونه تست ضربه چارپی. (c) نمونه تست ضربه آیزود ۶۲

- شکل ۳-۲۳ روکش سطح شکست نمونه ها با لایه ی نازکی از طلا ۶۴
- شکل ۴-۱ منحنی تنش- کرنش با درصد های وزنی مختلف نانو کربنات کلسیم ۶۷
- شکل ۴-۲ پدیده سفیدشدگی در نمونه ی تحت آزمایش کشش ۶۸
- شکل ۴-۳ میکروترک های اطراف ذرات ۶۹
- شکل ۴-۴ تصاویر SEM سطح شکست نانو کامپوزیت در دمای نیتروژن مایع ۷۰
- شکل ۴-۵ تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب درصد وزنی نانو کربنات کلسیم ۷۲
- شکل ۴-۶ تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب درصد وزنی LD ۷۴
- شکل ۴-۷ تغییرات استحکام تسلیم بر حسب درصد وزنی نانو کربنات کلسیم ۷۵
- شکل ۴-۸ تغییرات استحکام تسلیم نانو کامپوزیت بر اساس محتوای اجزا ۷۶
- شکل ۴-۹ تغییرات افزایش طول تا شکست نانو کامپوزیت بر اساس محتوای اجزا ۷۸
- شکل ۴-۱۰ تغییرات استحکام شکست بر حسب درصد وزنی نانو ذرات ۷۹
- شکل ۴-۱۱ تغییرات استحکام ضربه بر حسب درصد حجمی نانو ذرات ۸۱
- شکل ۴-۱۲ تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب درصد وزنی LD ۸۴
- شکل ۴-۱۳ پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم =۵٪ در ماتریس PP/LD با بزرگنمایی های مختلف ۸۴
- شکل ۴-۱۴ پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم =۱۵٪ در ماتریس PP/LD با بزرگنمایی های مختلف ۸۵
- شکل ۴-۱۵ وابستگی پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم به درصد حجمی LD ۸۶
- شکل ۴-۱۶ تصویر SEM سطح شکست کامپوزیت با درصد ترکیب مختلف ۸۸

## فهرست جداول

صفحه	عنوان جدول
۱۴	جدول ۱-۴ استانداردهای تست خواص مکانیکی
۴۲	جدول ۳-۱ خواص مکانیکی پلی پروپیلن
۴۲	جدول ۳-۲ خواص مکانیکی پلی اتیلن با چگالی کم
۴۳	جدول ۳-۳ خواص مکانیکی پلی اتیلن سنگین چگالی بالا
۵۲	جدول ۳-۴ درصد ترکیب پلی اتیلن خطی چگالی پایین اصلاح شده
۵۲	جدول ۳-۵ درصد ترکیب اجزاء نانو کامپوزیت مورد آزمایش
۷۱	جدول ۴-۱ خواص مکانیکی نانو کامپوزیت PP/LD/N

# فصل اول

طرح مسئله

## ۱-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا با بیان مسئله تحقیق، اهمیت و ضرورت انجام آن می توان اهداف تحقیق را شرح داد. سپس با توجه به مواد اولیه و تست های انجام شده توضیحات پیرامون این مفاهیم اولیه بیان شده است که شامل تعریف اولیه پلیمرها ساختار شیمیایی و فیزیکی آنها، دسته بندی پلیمرها و همچنین خواص مکانیکی پلی پروپیلن<sup>۱</sup> و پلی اتیلن<sup>۲</sup> و بررسی ضعف این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه مفاهیم پیرامون خواص مکانیکی مواد و روش های اندازه گیری این خواص بیان شده است و در پایان با تعریف کامپوزیت ها، ساختار و دسته بندی این مواد آشنا خواهیم شد.

## ۱-۲ بیان مسأله تحقیق

پلی پروپیلن یکی از پر مصرف ترین پلاستیک های موجود است. این ترمو پلاست به طور گسترده در صنایع خودرو سازی، بسته بندی، نساجی، لوازم خانگی و... مورد استفاده قرار گرفته است، از مزایای این پلیمر می توان به قابلیت فرایند پذیری خوب، خواص فیزیکی و مکانیکی قابل قبول، قابلیت بازیافت خوب و قیمت پایین آن اشاره نمود. اما ضعف خواص مکانیکی مانند مدول الاستیک، چقرمگی<sup>۳</sup> پایین از چالش های این پلاستیک برای تبدیل شدن به یک پلاستیک صنعتی می باشد [۱].

برای بهبود خواص چقرمگی پلی پروپیلن از مستحکم کننده ها استفاده می شود. یکی از موادی که به عنوان مستحکم کننده کاربرد دارد ترمو پلاستیک پلی اتیلن خطی چگالی پایین<sup>۴</sup> است. با اضافه کردن

---

<sup>۱</sup>- Polypropylene

<sup>۲</sup>- Polyethylene

<sup>۳</sup>-Toughness

<sup>۴</sup>-Linear Low Density Polyethylene

پلی اتیلن خطی چگالی پایین به پلی پروپیلن میتوان به کامپوزیتی با چقرمگی بالاتری دست یافت اما در کنار این افزایش چقرمگی کاهش اندک مدول الاستیک<sup>۵</sup> نیز مشاهده می شود [۲-۳].

سیستم های سه تایی نانو کامپوزیتی دسته جدیدی از مواد هستند که امروزه در دنیای نانو کامپوزیت ها مطرح است. افزودن یک جزء سوم به کامپوزیت باعث می شود که بتوان به خواص جدیدی و یک تعادل بین خواص چقرمگی و استحکام دست یافت. افزودن یک جزء سوم نانو کربنات کلسیم<sup>۶</sup> به کامپوزیت PP/LLDPE باعث افزایش مدول و چقرمگی می شود [۴-۵].  $\text{CaCO}_3$  یکی از رایج ترین مواد معدنی مورد استفاده بعنوان ذرات مستحکم کننده در ماتریس پلی پروپیلن است [۴]. با افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به PP/LLDPE میتوان به کامپوزیتی با خواص جدید و یک تعادل بین خواص چقرمگی و استحکام دست یافت.

ماده ی مورد آزمایش در این تحقیق نانو کامپوزیت  $\text{PP/LLDPE/NanoCaCO}_3$  است که از ترکیب پلی پروپیلن، نانو کربنات کلسیم روکش شده با اسید استیریک با درصد وزنی ۰٪ تا ۱۵٪ و LLDPE با درصد وزنی مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ساخته شد. هدف از این پروژه بررسی تأثیر درصد ترکیب نانو ذرات  $\text{CaCO}_3$  و نیز LLDPE بر خواص نهایی نانو کامپوزیت بوده است.

### ۳-۱ ضرورت و اهمیت تحقیق

برای بهبود خواص مکانیکی مخصوصاً چقرمگی پلی پروپیلن که مانع تبدیل شدن این پلیمر به یک پلاستیک صنعتی شده است نیاز به ساخت یک کامپوزیت با خواص پلیمر همچون وزن پایین، تولید ساده و ... به اضافه خواص جدیدی مانند چقرمگی و مدول بالاتر هست که بتواند این خلأ را در صنعت پر کند.

### ۴-۱ اهداف تحقیق

بهبود رفتار چقرمگی پلی پروپیلن از طریق ترکیب پلی اتیلن خطی چگالی پایین و افزودن ذرات نانو کربنات کلسیم جهت دستیابی به کامپوزیتی با خواص مکانیکی بالا با هزینه تولید پایین برای پاسخ به نیاز صنعت و بررسی اثر درصد نانو ذرات بر چقرمگی و رفتار ضربه ای نانو کامپوزیت های حاصل می باشد.

<sup>5</sup> - elastic modulus

<sup>6</sup> -  $\text{NanoCaCO}_3$



## ۵-۱ سوالات یا فرضیه‌های تخصصی

- ۱- اضافه کردن پلی اتیلن خطی چگالی پایین به پلی پروپیلن میتواند در بهبود رفتار چقرمگی پلی پروپیلن مؤثر باشد.
- ۲- اضافه کردن نانو ذرات نانو کربنات کلسیم به پلی پروپیلن میتواند چقرمگی و استحکام به ضربه پلی پروپیلن را بهبود ببخشد.
- ۳- افزودن جداگانه نانو ذرات کربنات کلسیم و پلی اتیلن خطی چگالی پایین باعث چقرمه شدن پلی پروپیلن میشود پس افزودن همزمان نانو کربنات کلسیم و پلی اتیلن خطی چگالی پایین نیز باعث چقرمه تر شدن کامپوزیت نسبت به هر یک از حالات قبل می شود.
- ۴- اثر درصد ترکیب نانو کربنات کلسیم بر رفتار ضربه ای نانوکامپوزیتهای سه تایی PP/LLDPE/NanoCaCO<sub>3</sub> چیست.

## ۱-۶ پلیمرها

بشر با تلاش برای دستیابی به مواد جدید، با استفاده از مواد عالی (عمدتاً هیدرو کربنها) موجود در طبیعت به تولید مواد مصنوعی نایل شد. این مواد عمدتاً شامل عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد بوده و به مواد پلیمری معروف است. پلیمرها (پلاستیک‌ها) شامل ماکرو مولکول‌ها، بیشتر اوقات در شکل زنجیره‌های مولکولی بزرگ که در آن اتم‌ها توسط پیوندهای کووالانسی<sup>۷</sup> در کنار هم نگه داشته می شوند، در حالی که پیوندهای بین زنجیره‌های متمایز خیلی ضعیف تر هستند. به این دلیل مولکولهای زنجیری می توانند به عنوان واحدهای ساختمانی اصلی یک پلیمر در نظر گرفته شوند. بر خلاف فلزات و سرامیک‌ها، پلیمرها از ذرات نقطه مانند (اتم‌ها) تشکیل نمی شوند، ولی از اجزا خطی (زنجیره‌ها) تشکیل می شوند. بنابراین ساختار آنها خیلی پیچیده تر از گروه‌های دیگر مواد است [۶].

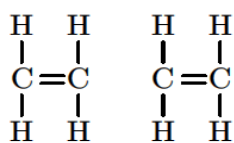
### ۱-۶-۱- ساختار شیمیایی پلیمرها

مولکولهای زنجیری منفرد در داخل یک پلیمر معمولاً اجزاء آلی هستند. این مولکولهای زنجیری واحدهای یکسان زیادی هستند که مونومر<sup>۸</sup> نامیده می شوند. نوعاً، تعداد مونومرها در یک زنجیره مولکولی

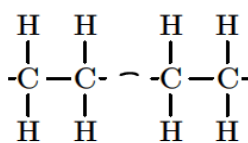
<sup>۷</sup>-Covalent bond

<sup>۸</sup>-Monomer

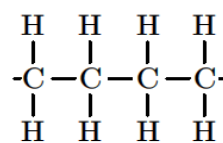
از مرتبه  $10^3$  تا  $10^5$  است، که منجر به یک طول مولکولی کلی بالاتر از چند میکرو متر می شود. تعداد میانگین مونومرها در مولکولهای زنجیری یک پلیمر درجه پلیمریزاسیون<sup>9</sup> نامیده می شود. یک مثال برای این چنین واکنشی تشکیل پلی اتیلن از اتیلن است. بطوریکه در شکل ۱-۱ مشاهده می شود، اتیلن شامل دو اتم کربن متصل شده توسط یک پیوند دوگانه است، با ظرفیت آزاد اتم کربن پر شده با هیدروژن، دو مولکول اتیلن می توانند توسط استفاده از الکترون های پیوند دوگانه واکنش دهند تا یک اتصال بین مولکول ها ایجاد کنند [۷].



(a) Monomers



(b) Double bond broken. Radicals



(c) Linking of two radicals

شکل ۱-۱ واکنش شیمیایی برای تولید پلی اتیلن [۷]

در بین زنجیرهای مولکولی پیوندهای شیمیایی قوی وجود ندارد. وابسته به ساختار مولکولی، دوقطبی<sup>۱۰</sup> به شدت وابسته به دما، هیدروژنی، یا پیوندهای واندروالس<sup>۱۱</sup> یافت می شوند. خواص مکانیکی پلیمرها اساساً توسط تحرک مولکولهای زنجیری تعیین می شود. تحرک وابسته به ساختار شیمیایی پلیمر است [۷].

### ۱-۶-۲- ساختار فیزیکی پلیمرها

در حالی که فلزات و سرامیک ها می توانند به طور کامل کریستالی باشند، این کلاً برای پلیمرها امکان پذیر نیست. در اصل زنجیرهای مولکولی می توانند به طور موازی منظم شوند و بنابراین یک ساختار منظم ایجاد کنند، اما به دلیل طول آنها، خیلی غیر محتمل است که هنگامی که از یک حالت مایع سرد می شوند مولکولها خطی یا به طور منظم پیچیده شوند. از روی آمار بیشتر این احتمال وجود

<sup>9</sup>-Degree of polymerisation

<sup>10</sup>-Dipole

<sup>11</sup>-Van der Waals bonds

دارد که یک مولکول زنجیری خیلی پیچیده شود و با مولکولهای دیگر درگیر شود. بنابراین پلیمرها همیشه یک ساختار اندکی آمرف<sup>۱۲</sup> دارا می شوند [۷].

### ۱-۶-۳- پلیمرهای کریستالی<sup>۱۳</sup>

هنگامی که یک ماده پلیمری از حالت مذاب (محلول) به جامد تبدیل می شود تجمع مولکولی جهت حصول پایدارترین حالت ممکن انجام می گیرد. صورت بندی های مولکول ها در صورت تبلور با پایدار ترین فرم ممکن حداکثر تجمع مولکولی را موجب می شوند. چون تشکیل بلور ها منتهی به آزاد شدن انرژی می گردد و سطح انرژی پایین می آید بنابراین در صورتی که ماده پلیمری پتانسیل ذاتی برای تبلور داشته باشد به احتمال خیلی زیاد متبلور خواهد شد [۸].

### ۱-۶-۴- پلیمرهای آمرف

ساختمان پلیمرهای آمرف به مقدار کم شناخته شده است زیرا ساختمان مولکولی منظمی نداشته و آنها را نمی توان با استفاده از روش های استاندارد پراش یک اشعه به خوبی بررسی نمود. این دشواری را می توان به حساب طول زنجیر مولکول ها گذاشت. با وجود این در سال های اخیر شواهد حاصل از پراش اشعه X<sup>۱۴</sup> و میکروسکوپ الکترونی نمونه هائی از پلیمر های شیشه ای، نظم تجمع مولکولی را در آنها تایید می کند.

در پلیمر های آمرف شیشه ای مانند پلی استایرین و پلی متیل متاکریلات قرارگیری مولکول ها در کنار هم اتفاقی بوده و هنگامی که در اثر انرژی گرمایی تحرک مولکول ها افزایش می یابد، پلیمر به ترتیب از حالت شیشه و رابری<sup>۱۵</sup> گذشته و بالاخره به حالت خمیری (مذاب) درمی آید، چنین انتقالاتی منجر به تغییراتی در خواص فیزیکی پلیمر می گردد. در درجه حرارت بالا (بیشتر از نقطه ذوب) و یا به حالت

<sup>12</sup>-Amorphous

<sup>13</sup>-Crystal

<sup>14</sup>-X-Ray Diffraction

<sup>15</sup>-Rubbery

محول تمام پلیمر ها آمرف هستند و پیوند های شیمیایی مولکول های آنها عمدتاً از طریق چرخش پیوندی تحرک قابل ملاحظه ای را دارند.

مقدار تحرک ملکول ها و امکان تغییر صورت بندی آنها در درجه حرارت اتاق تعیین کننده حالت آمرف شیشه ای یا رابری ماده پلیمری است [۸].

### ۱-۶-۵- درجه حرارت انتقال شیشه

چون خواص مکانیکی پلیمرها به شدت تحت تأثیر تغییر حالت یا انتقال در آنهاست لذا شناخت درجه حرارت هایی که این انتقال را موجب می شوند از اهمیت زیادی برخوردار است چنین درجه حرارت هایی پارامتر های مهمی هستند که به درجه حرارت های انتقال موسومند. درجه حرارت انتقال شیشه<sup>۱۶</sup>  $T_g$  یکی از این درجه حرارت هاست که از مشخصه های مهم در پلیمر های آمرف (شیشه ای یا رابری) محسوب می شود. اگر مذاب یک نمونه گرما نرم<sup>۱۷</sup> غیرقابل تبلور به تدریج سردشود و گرانیروی آن با گذشت زمان زیادتر می شود. اگر درجه حرارت به اندازه کافی کاهش یابد به حالت رابری رسیده و سپس با کاهش بیشتر درجه حرارت به جسم شیشه ای و سخت تبدیل می گردد. درجه حرارتی که نمونه پلیمری از حالت رابری به شیشه ای انتقال می یابد را درجه حرارت انتقال شیشه گویند.

خواص یک ماده پلیمری به مقدار زیاد در  $T_g$  تغییر می یابد برای مثال هنگامی که درجه حرارت یک پلیمر آمرف به زیر  $T_g$  برسد سفتی<sup>۱۸</sup> آن افزایش می یابد. خواصی نظیر ظرفیت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی هم تغییر می یابند [۸].

### ۱-۶-۶- گروه بندی پلیمرها

(۱) پلاستیک های گرمانرم، (۲) پلاستیک های گرما سخت<sup>۱۹</sup> یا ترموست ها، و (۳) الاستومرها<sup>۲۰</sup>. ترموپلاستیک ها با افزایش دما نرم شده و با خنک شدن به سختی اولیه اشان برمی گردند و بیشتر قابل ذوب هستند، به عنوان مثال، نایلون، پلاستیک های گرما سخت (ترموست ها) وقتی گرم می شوند، سخت شده و هنگام سرد شدن به سختی اولیه برمی گردند. این مواد توسط کاتالیزورها یا گرم شدن تحت فشار به یک شکل دائمی تبدیل می شوند. الاستومرها نظیر رابرها می توانند بدون پاره شدن و گسستن در برابر

<sup>16</sup>-Glass transition temperature

<sup>17</sup>-Thermoplastic

<sup>18</sup>-Stiffness

<sup>19</sup>-Thermosetting polymers

<sup>20</sup>-Elastomers