



دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

دانشکده جنگلداری و فن آوری چوب

پایان نامه: بررسی تولید پانل ساندویچی با استفاده از چوب پالونیا و رویه فایبرگلاس

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد (M.Sc) در مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ

توسط:

مریم سبجانی

استاد راهنما:

دکتر ابوالقاسم خزاعیان

اساتید مشاور:

دکتر علیرضا شاکری

دکتر تقی طبرسا

تقدیم بہ:

روح بلند پدر ہمیشہ یارِ کرم  
غزل ناب ہستی ام  
استوارترین کویہ تاریخ زندگی ام

و تقدیم بہ:

مادم، گرانہاترین کویہ زندگی ام  
زیباترین حکایت ہستی ام  
بہ شوق بودن آن صبور بی ادعا از خداوند سپاس گذاری می کنم  
و بہ رسم، بردستان پر عطفوت مادرم بوسہ می زنم

## پاسگذاری:

اینک که پایان نامه اینجانب به مراحل نهایی خود رسیده با سپاس بیکران از خداوند یکتا، وظیفه خود می دانم در این بخش از: استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر خزاعیان به دلیل نکته سنجی در انتخاب موضوع و نگاه ویژه بر مسائل روز صنعت و کمک های علمی و معنوی ایشان در مراحل مختلف پایان نامه تشکر و قدردانی کنم.

از استادی مشاور محترم، جناب آقای دکتر شاکری و جناب آقای دکتر طبرسا به دلیل مشاورت و مساعدت های بزرگوارانه ایشان در مراحل مختلف پایان نامه تشکر و پاسگذاری نمایم.

از داوران محترم پایان نامه جناب آقای دکتر علی قاسمیان و جناب آقای دکتر محمد رضا ماستری فرغانی که زحمت داوری پایان نامه را پذیرفتند، بسیار تشکر و پاسگذاری نمایم.

از نایب محترم تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر آزادفر به دلیل همکاری های فراوان ایشان، بسیار سپاسگذارم. از جناب آقای شماری و ملائی، متخصص در امر کامپوزیت به دلیل کمک های مفید و بی ثباته شان نهایت قدردانی را دارم. از دوستان گرامی، خانم سگالو، آقای رباین و آقای پیرایش که در طی دوران تحصیل مشوق و همراهم بودند کمال تشکر را دارم. از کمک های بی دریغ جناب آقای ملک و جناب آقای مقدس زاده و جناب آقای رضایی نژاد و تمام عزیزانی که در انجام این تحقیق به نحوی مرایاری دادند بسیار سپاس گذاری می کنم.

و در نهایت بر خود واجب می دانم از خانواده عزیزم که از پیچ کوششی برای پیشبرد کارم دریغ نوزیند و در تمام مدت تحصیل خالصانه یار و پشتیبانم بودند صمیمانه قدردانی و تشکر خود را ابراز کنم. بی شک بدون یاری آنها انجام این مهم میسر نبود.

## چکیده

هدف این تحقیق، بررسی کردن تولید پانل ساندویچی با استفاده از چوب پالونیا و رویه فایبرگلاس (الیاف شیشه) و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی این نوع پانل ساندویچی بود.

جهت ساخت این پانل ساندویچی سه نوع فاکتور نوع فایبرگلاس (سوزنی و تلفیق سوزنی/حصیری)، نوع رزین (اپوکسی و پلی استر) و ضخامت لایه مغزی چوب پالونیا (در دو سطح ۹ و ۱۹ میلی متر) به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند که به صورت آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد.

از مجموع شرایط ساخت، جمعا ۸ تیمار و از هر تیمار ۵ تکرار ساخته شد. خواص فیزیکی و مکانیکی پانل ها شامل مقاومت به دانسیته، جذب آب، مقاومت خمشی شامل مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته، تنش برشی مرکز و تنش خمشی رویه، فشار سطحی، فشار لبه ای و مقاومت کشش عمود بر سطح بر اساس استاندارد ASTM مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایشات توسط نرم افزار آماری Minitab آنالیز گردید و اثر عوامل متغیر روی خواص فیزیکی و مکانیکی پانل ها با استفاده از روش آنالیز واریانس انجام گرفت.

با بررسی نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی مشاهده گردید که کاهش ضخامت لایه مغزی اثر مثبتی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی پانل از قبیل مقاومت خمشی، فشار لبه ای و مقاومت به جذب آب نشان داد، اما در مواردی که مقاومت به فشار سطحی پارامتر مهمی باشد، پانل های با ضخامت لایه مغزی ۱۹ میلی متر خواص مطلوب تری را نشان می دهند.

استفاده از رزین اپوکسی در ساخت پانل، در آزمایشات فشار لبه ای و کشش عمود بر سطح پانل ساندویچی مقاومت های بیشتری نسبت به رزین پلی استر نشان داد.

نوع فایبرگلاس تاثیر مستقل و متقابل معنی داری بر روی هیچ یک از آزمایشات مکانیکی و فیزیکی نداشت. نتایج دانسیته نیز نشان داد پانل های ساخته شده با ضخامت های لایه مغزی ۱۹ میلی متر ( $0.05 \text{ gr/cm}^3$ )، به دلیل حجم بیشتر چوب در مرکز پانل، دانسیته کمتری نسبت به پانل های با ضخامت لایه مغزی ۹ میلی متر ( $0.07 \text{ gr/cm}^3$ ) داشتند.

کلمات کلیدی: چندسازه، پانل ساندویچی، فایبرگلاس، لایه مغزی، اپوکسی، پلی استر، سوزنی، حصیری

## فهرست مطالب

### مقدمه و کلیات

۱	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ مسئله تحقیق
۵	۳-۱ اهداف تحقیق
۶	۴-۱ تاریخچه پیدایش پانل ساندویچی
۷	۵ کلیات و مفاهیم اولیه
۸	۲-۵-۱ انواع چندسازه
۸	۳-۵-۱ مهمترین موارد استفاده از چندسازه های زمینه پلیمری
۹	۴-۵-۱ چند سازه های زمینه پلیمری تقویت شده
۱۰	۶-۱ ماده زمینه های پلیمری
۱۲	۱-۶-۱ پلاستیکهای گرما نرم
۱۲	۲-۶-۱ پلاستیکهای گرما سخت
۱۲	۱-۲-۶-۱ رزین های پلی استر
۱۲	۱-۱-۲-۶-۱ پلی استرهای گرما سخت (غیر اشباع)
۱۴	۲-۱-۲-۶-۱ عوامل پخت رزین پلی استر غیراشباع
۱۵	۲-۲-۶-۱ رزین های اپوکسی
۱۶	۱-۲-۶-۱ عوامل پخت رزین های اپوکسی
۱۷	۲-۲-۶-۱ رقیق کننده های رزین اپوکسی
۱۸	۳-۲-۶-۱ خواص رزین اپوکسی
۱۸	۷-۱ تقویت کننده ها
۲۰	۱-۷-۱ الیاف شیشه
۲۱	۲-۷-۱ انواع مختلف الیاف شیشه
۲۱	۳-۷-۱ ترکیب مواد لازم برای تهیه الیاف شیشه
۲۲	۴-۷-۱ فرآیند ساخت الیاف شیشه
۲۴	۵-۷-۱ پارچه های ساخته شده از الیاف شیشه
۲۴	۶-۷-۱ مزایای چندسازه های بسپاری تقویت شده با الیاف شیشه
۲۵	۷-۷-۱ معضلات چند سازه های الیاف شیشه
۲۵	۸-۷-۱ روش های مختلف شکل دهی چندسازه ها
۲۷	۸-۱ پالونیا

۲۷	۱-۸-۱ چوب پالونیا
۳۰	سابق تحقیق
	مواد و روش ها
۴۰	۱-۳ عوامل مورد بررسی
۴۱	۲-۳ طرح آماری
۴۱	۱-۳ تهیه مواد اولیه
۴۲	۱-۱-۳ پالونیا
۴۲	۲-۱-۳ الیاف شیشه
۴۳	۳-۱-۳ نوع و مقدار مصرف رزین
۴۳	۱-۳-۱-۳ رزین اپوکسی
۴۴	۲-۳-۱-۳ سخت کننده جهت پلیمریزاسیون رزین اپوکسی
۴۴	۳-۳-۱-۳ رزین پلی استر
۴۴	۴-۳-۱-۳ کاتالیزور جهت سرعت واکنش رزین پلی استر
۴۵	۵-۳-۱-۳ شتاب دهنده جهت پلیمریزاسیون رزین پلی استر
۴۵	۲-۳ ساخت فرآورده مرکب
۴۷	۲-۳ بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی پانل ها
۴۸	۱-۲-۳ آزمون تعیین مقاومت به خمش
۵۰	۲-۲-۳ آزمون مقاومت به فشار لبه ای
۵۰	۳-۲-۳ آزمون مقاومت به فشار سطحی
۵۱	۴-۲-۳ آزمون تعیین مقاومت به کشش عمود بر سطح
۵۲	۵-۲-۳ آزمون تعیین وزن مخصوص فرآورده های مواد مرکب
۵۲	۶-۲-۳ میزان جذب آب بعد از ۲ و ۲۴ ساعت
	تجزیه و تحلیل آماری
۵۶	۱-۴ مقاومت خمشی
۵۷	۱-۱-۴ تاثیر مستقل ضخامت مرکز بر مقاومت خمشی (MOR)
۵۸	۲-۱-۴ مقایسه مقاومت خمشی نمونه های شاهد و پانل
۵۸	۲-۴ مدول الاستیسیته
۵۹	۱-۲-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر مدول الاستیسیته (MOE)
۶۰	۲-۲-۴ تاثیر متقابل اثر نوع رزین و ضخامت بر مدول الاستیسیته (MOE)
۶۰	۳-۲-۴ مقایسه مدول الاستیسیته نمونه های شاهد و پانل

۶۱	-----	۳-۴ تنش برشی لایه مغزی
۶۲	-----	۱-۳-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر تنش برشی مرکز
۶۲	-----	۴-۴ تنش خمشی رویه
۶۴	-----	۵-۴ مقاومت فشاری لبه ای پانل
۶۵	-----	۱-۵-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر مقاومت فشاری لبه ای پانل
۶۵	-----	۲-۵-۴ تاثیر مستقل نوع رزین بر فشار لبه ای پانل
۶۶	-----	۳-۵-۴ مقاومت به فشار نمونه های شاهد و پانل (در جهت عمود برالیاف)
۶۷	-----	۶-۴ مقاومت فشاری سطحی پانل
۶۸	-----	۱-۶-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر فشار سطحی پانل
۶۸	-----	۲-۶-۴ مقاومت به فشار موازی الیاف نمونه های پانل و شاهد
۶۸	-----	۷-۴ آزمایش کشش عمود بر سطح
۶۹	-----	۱-۷-۴ تاثیر مستقل نوع رزین بر کشش عمود بر سطح پانل
۷۱	-----	۸-۴ آزمون دانسیته
۷۲	-----	۱-۸-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر دانسیته پانل
۷۳	-----	۲-۸-۴ مقایسه دانسیته نمونه های پانل و شاهد
۷۳	-----	۹-۴ آزمون جذب آب بعد از ۲ ساعت
۷۴	-----	۱-۹-۴ تاثیر مستقل نوع ضخامت بر جذب آب بعد از ۲ ساعت پانل
۷۵	-----	۲-۹-۴ مقایسه جذب آب بعد از ۲ ساعت نمونه های پانل و شاهد
۷۶	-----	۱۰-۴ آزمون جذب آب بعد از ۲۴ ساعت
۷۷	-----	۱-۱۰-۴ تاثیر مستقل ضخامت بر جذب آب پانل بعد از ۲۴ ساعت
۷۷	-----	۲-۱۰-۴ مقایسه جذب آب بعد از ۲۴ ساعت نمونه های پانل و شاهد
۷۸	-----	استنتاج
۷۹	-----	پیشنهادات
۹۰	-----	منابع

## فصل اول

### مقدمه و کلیات

#### ۱-۱ مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد. بسیاری از نیازهای صنعتی صنایعی مانند صنایع فضایی، دریایی، راکتورسازی، الکترونیکی و غیره نمی‌تواند با استفاده از مواد معمولی شناخته شده برآورد شود. به عنوان مثال در صنایع هوافضا به محصولاتی نیاز است که ضمن داشتن استحکام زیاد سبک باشند، مقاومت به سایش و مقاومت در برابر نور ماوراء بنفش خوبی داشته باشند و در دماهای بالا استحکام خود را از دست ندهند و یا در صنایع دریایی، معمولاً ترکیبی از خواص فیزیکی دانسیته کم و مقاومت به رطوبت بالا مورد نیاز است. بنابراین از آنجا که نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه خواص فوق‌را دارا باشد، باید به دنبال روشی برای ترکیب خواص مواد بود، این راه حل همان مواد چندسازه<sup>۱</sup> است. قسمت بیشتری از نیاز، با استفاده از چندسازه‌ها می‌تواند برآورده شود. چندسازه ماده‌ای چند جزئی است که خواص آن در مجموع از هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده خود بیشتر است. اجزاء تشکیل دهنده ویژگی‌های خود را حفظ کرده، در یکدیگر حل نشده و با هم ترکیب نمی‌شوند. این مواد در مقیاس میکروسکوپی معمولاً به صورت یک مخلوط فیزیکی متشکل از دو یا چند ماده مختلف تعریف می‌شوند که خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با هم تشکیل می‌دهند [۴].

در چندسازه‌ها عموماً ۳ ناحیه متمایز وجود دارد:

۱- فاز پیوسته (ماده زمینه)

۲- فاز نا پیوسته (تقویت کننده) که غالباً به سه دسته کلی ذرات پودری<sup>۲</sup>، ذرات صفحه‌ای<sup>۳</sup> و الیاف<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود و هر دسته خصوصیات ویژه‌ای را در چندسازه ایجاد می‌کند.

۳- فصل مشترک<sup>۵</sup> بین این دو فاز که تعیین کننده خواص و مشخصه‌های ماده مرکب خواهد بود [۴].

فاز غیر پیوسته معمولاً سخت تر و قوی تر از فاز پیوسته است، لذا به آن فاز تقویت کننده می‌گویند که به صورت یک یا چند فاز غیر پیوسته در یک فاز پیوسته (ماده زمینه) است [۶]. از پرمصرف ترین انواع ماده زمینه در این فرآورده‌ها پلاستیک‌های گرماسخت هستند. افزایش خواص مکانیکی این مواد، همواره از اهداف تحقیقاتی گروه‌های مختلفی در جهان بوده است. میزان بهبود و تقویت خواص آنها، به خواص فاز تقویت کننده نیز بستگی دارد. از مهمترین راه‌های بهبود خواص آنها، تقویت این

<sup>۱</sup> composite

<sup>۲</sup> Particles

<sup>۳</sup> Platelets

<sup>۴</sup> Fiber

<sup>۵</sup> interface



مواد با الیاف می‌باشد. استفاده از این مواد در پلاستیک های گرماسخت باعث می‌شود که محصول نهایی به یکی از فرآورده های تقویت شده مهندسی تبدیل شود. الیاف در چندسازه ها عضو بارپذیر اصلی سازه ها هستند. ساخت چندسازه های مستحکم و قوی جهت اهداف مهندسی، اغلب با کاربرد الیاف با مقاومت بالا (مخصوصاً مقاومت به شکست) نظیر الیاف شیشه<sup>۱</sup>، گرافیت، بور، سیلیکات خالص صورت می‌گیرد. به منظور استفاده از این الیاف، ماده زمینه یا ماتریس<sup>۲</sup> جهت قرار گرفتن الیاف در آن لازم می‌باشد، به این جهت که ماده زمینه آنها را در محل و آرایش مطلوب نگه می‌دارد. ماده زمینه صرفنظر از این که توسط الیاف تقویت می‌شوند، خود نقش چسباندن الیاف به یکدیگر، انتقال تنش های وارده به الیاف، محافظت الیاف در برابر عوامل مکانیکی، محافظت از شرایط جوی و همچنین رطوبت را بر عهده دارند [۴].

چندسازه های حاوی الیاف شیشه امروزه بسیار مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار دارند و به دلیل مزیت های فراوانشان استفاده از آنها در حال رشد و گسترش است. از این ترکیبات به طور عمده در ساخت پانل های ساندویچی استفاده می‌شود. چند سازه های پانل ساندویچی<sup>۳</sup> رده ای از محصولات پیشرفته هستند که در آنها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد محصولاتی جدید با خواص فیزیکی و مکانیکی برتر استفاده شده است.

این چندسازه، طبقه خاصی از مصالح کامپوزیتی است که شامل یک ساختار سبک و مرکب است که از دو طرف به دولایه محدود شده و در وسط آن، یک هسته مرکزی قرار دارد. اصطلاحاً در مجموع، این ساختار به آن دسته از ساختارهای لایه ای اطلاق می‌شود که از یک هسته مرکزی ضخیم و سبک و لایه های خارجی نازک و مقاوم تشکیل شده است. یک ساختار ساندویچی، مقاومت بسیار بالاتری نسبت به تک تک اجزای خود دارد و از سبکی فوق العاده ای نیز برخوردار است. همچنین هزینه نسبتاً پایینی داشته و به سرعت و سهولت می‌تواند در ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرد. از جمله دلایل رشد و پیشرفت این چند سازه ها تولید محصولاتی است که در برابر رطوبت، پوسیدگی و خوردگی مقاوم بوده و از پایداری ابعادی برخوردارند. از مزیت های مهم دیگر بکارگیری آنها، سهولت شکل دهی با انواع قالب ها و تبدیل ارزان آنهاست.

در این ساختارها عموماً از فوم، شانه عسلی ها و چوب بالزا به عنوان مصالح مرکزی و از لایه های تقویت شده الیاف کربن و عمدتاً الیاف شیشه به عنوان مصالح رویه ای استفاده می‌شود.

این ساختار به ظاهر ساده که به علت شباهت ظاهریش با ساندویچ به همین نام خوانده می‌شود، مزیت‌ها و قابلیت های فوق العاده ای از خود نشان می‌دهد. خلاصه ای از آنچه امروزه پانل های ساندویچی را به عنوان گزینه ای مناسب در جهان مطرح ساخته است به شرح زیر می‌باشد:

الف) دانسیته مناسب آنها که به علت استفاده از مواد کم دانسیته در هسته این پانل ها ایجاد می‌شود. بنا به این ویژگی، این پانل ها جهت استفاده در صنایع هوافضا بسیار مقبولند. این خاصیت به ویژه در سبک سازی بناها در مقابله با زلزله بسیار مهم است. یک دیواره ساندویچی در مقایسه با نمونه مشابه سیمانی یا آجری، گاه تا ۵۰ برابر سبک تر است.

ب) استحکام بالای این پانل ها نسبت به دانسیته آن ها، به طوری که پانل نیروهای وارده را به خوبی جذب می‌کند و آن را از مقاومت بالایی در برابر بارهای فشاری و ضربه ای برخوردار می‌کند که این مسئله در ساخت پل ها، ساخت دیواره ها و سقف های کاذب از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

---

<sup>۱</sup> Fiberglass

<sup>۲</sup> Matrix

<sup>۳</sup> Sandwich panel

ج) مقاومت در برابر خوردگی ، بطوریکه در شرایط خوردنده محیطی دچار آسیب های ناشی از خوردگی نمی شود، بنابراین در ساخت پارکت های در تماس با مواد شیمیایی بسیار مطلوب اند. این ویژگی باعث حداقل شدن هزینه تعمیر و نگهداری نیز می گردد.

د) این پانل ها مقاوم در برابر رطوبت هستند، لذا در شرایط محیطی مرطوب دچار آسیب نمی شوند. این پانل ها به علت خاصیت ضد آبشان در بدنه کشتی ها مورد استفاده قرار می گیرند.

با توجه به اینکه در هر نوع کاربرد خواص استحکامی پانل مورد نیاز است، پانل های ساندویچی به دلیل امتیاز نسبت بالای مقاومت مکانیکی به وزن آنها کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون دارند، از کشتی تا ساختار هواپیمایی، از دیواره های واگن تا پانل های ساختمانی، در سازه های پل و مهندسی.

این محصول نسبتا جدید از جمله فرآورده های مرکب مهندسی شده چوبی است که به عنوان ماده ساختمانی و صنعتی تولید و مصرف آن در سطح جهان رو به افزایش است و در سال های اخیر به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. این محصول تا کنون تقریبا در ایران ناشناخته باقی مانده است.

## ۱-۲ مسئله تحقیق

در سال های اخیر کمبود مواد اولیه چوبی، صنعت چوب را با چالش های مهمی رو به رو کرده است. با اعمال سیاست های جدید سازمان حفاظت و محیط زیست جنگل ها و مراتع، در سال های آتی بهره برداری از جنگل ها کاهش چشمگیرتری خواهد یافت. به طور کل کشور ایران از لحاظ پوشش جنگلی کشوری فقیر به شمار می آید، چرا که مساحت جنگل های موجود آن نسبت به مساحت کل کشور بسیار ناچیز است (۰.۷٪) و سطح قابل بهره برداری جنگل های صنعتی کشور نسبت به سطح کل جنگل های کشور ۱/۲ میلیون هکتار نسبت به ۱۲ میلیون هکتار بر آورد شده است که این مقدار چوب تولید شده از منابع جنگلی داخلی جوابگوی نیاز صنایع چوب کشور ما نیست [۱۵].

محدودیت این منابع جنگلی، حفظ محیط زیست و نیاز روز افزون به منابع چوبی تجدید شونده، بخش های صنعتی را بر آن داشته است تا در حوزه های جنگلکاری، کشت و توسعه گونه های سریع الرشد را مد نظر قرار دهند. به عبارتی دیگر، زراعت درختان سریع الرشد یکی از راه های مقابله با این چالش ها است. این گونه ها می توانند به عنوان منبعی جایگزین در جهت رفع کمبود منابع تجدید شونده و مورد نیاز صنایع چوب استفاده گردند. بنابراین ، کار حاضر به سمت تحقیقات بیشتر بر روی گونه سریع الرشد پالونیا سوق داده شد.

همچنین با توجه به کاهش روزافزون ذکر شده در سطح جنگل های جهان به خصوص در کشورهای توسعه نیافته، تامین مواد اولیه صنایع مختلف سلولزی از منابع بازیافتی، چه در مرحله بهره برداری و چه در مرحله تولید فرآورده ها در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در کشور ما با توجه به فرسودگی ماشین آلات و به روز نشدن تکنولوژی تولید، میزان ضایعات بسیار بالاست. عدم توجه به ضایعات حاصله در صنایع چوب کشور نه تنها مشکلات زیست محیطی و آلوده شدن محیط صنایع را فراهم آورده است، بلکه مقادیر زیادی منابع سلولزی از دسترس خارج می گردد. درصد ضایعات بهره برداری در جنگل و تولید محصولات در صنایع ایران بر اساس آمار سازمان برنامه و بودجه ۱۳۷۸ در جدول ۱-۱ آمده است [۲۲].

جدول ۱-۱ درصد ضایعات بهره برداری جنگل و تولید مصنوعات در صنایع

ضایعات	قطع و استحصال	تبدیل در جنگل	نگهداری در انبار یا جنگل	تبدیل در صنعت	روکش و تخته لایه	جمع کل
درصد نسبت به مصرف	۸/۰۸	۵۱/۲۱	۶/۶	۴۰	۶۰/۲۵	۲۶/۱۹
درصد نسبت به کل ضایعات	۱۸/۶۳	۵۵/۴۶	۱/۵۵	۳/۵	۳/۵	۱۰۰

سیاست گذاری ها در زمینه استفاده از ضایعات چوب پالونیا برای تولید بلوک های مرکزی پانل ساندویچی به دلیل ابعاد کوچک آنها، با توجه به درصد بالای ضایعات قطعات چوب (ارائه شده در جدول ۱-۱) بستر سازی مناسبی برای این صنعت بویژه از جنبه اقتصادی به نظر می آید.

از دلایل اصلی انتخاب این چوب برای استفاده در ساخت پانل ساندویچی، امتیاز دانسیته پایین و استحکام در واحد وزن بالای آن بود که به عنوان مبنایی برای ساخت پانل ساندویچی در این پایان نامه مورد نظر قرار گرفت. همچنین خاصیت عایق حرارتی و رطوبتی این چوب امتیاز بالایی در استفاده آن به عنوان مرکز پانل ساندویچی است [۳۰]. این چوب علاوه بر دارا بودن این خواص مطلوب، از مزایای هزینه پایین سرمایه گذاری، حجم رویش بالا و قیمت پایین نیز برخوردار است.

### ۱-۳ اهداف

در این تحقیق دو هدف اساسی مد نظر قرار گرفت که به شرح زیر می باشد:

- ۱- یافتن شرایط مناسب تولید پانل ساندویچی با مرکزیت چوب و رویه الیاف شیشه
- ۲- معرفی چوب پالونیا به عنوان یک ماده مناسب در لایه مغزی پانل های ساندویچی با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب

## ۱-۴ تاریخچه پیدایش پانل ساندویچی

تاریخ پیدایش ساختارهای ساندویچی در سال ۱۸۲۰ توسط شخصی به نام دلو<sup>۱</sup> آغاز شد که استفاده از ساختارهایی با دو رویه و با فاصله ای بین آنها توسط او مرسوم شد. اولین استفاده گسترده از پانل های ساندویچی در زمان جنگ جهانی دوم بود که به دلیل کمبود مصالح در انگلستان در طی جنگ، برای ساخت هواپیما از لایه های نازک چوب به عنوان رویه و از چوب بالزا به عنوان مرکز استفاده شد که تولیدش موفقیت آمیز بود و به اسم **Wooden wonder** شناخته شد و از آن در نیروی هوایی رویال<sup>۲</sup> (RAF) و تعدادی از نیروهای هواپیمایی اروپایی مورد استفاده قرار گرفت. بعدها وقتی این هواپیما وارد تولید در سال ۱۹۴۱ شد، به اسم مسکوئیتو<sup>۳</sup> و به عنوان یکی از سریعترین هواپیماهای موجود در جهان شناخته شد. در طی جنگ جهانی دوم، اولین تئوری های پانل ساندویچی نوشته شد. به این مضمون که دو رویه پانل ساندویچی برای ایجاد سکون در فاصله ای از هم قرار می گیرند. این رویه ها برای ایجاد مقاومت به یکدیگر وابسته اند و مرکز مورد استفاده نیز باید سفت باشد و موجب نگاه داشتن مسافت بین رویه ها شود و از لغزش رویه ها، کنار هم نیز جلوگیری کند.

در دهه ۵۰ استفاده از شانه عسلی ها به عنوان مصالح مرکزی پانل های ساندویچی، در صنعت هواپیما معمول شد که محدودیت هایی برای استفاده از آنها وجود داشت، به عنوان مثال بزرگترین مشکل آنها خوردگی شان در طول مدت استفاده بود.

در دهه ۶۰ نیز فوم های مختلفی مانند پلی اورتان و پلی استیرن تولید شدند که به دلیل خاصیت عایقی شان، به عنوان مصالح مرکزی در این پانل ها مورد استفاده قرار گرفتند.

در این پانل ها، اغلب برای رویه از مصالح سنتی ای مانند فولاد و آلومینیوم استفاده می شد. اما امروزه استفاده از پلاستیک های تقویت شده الیاف شیشه به دلایل امتیازات فراوانی مانند خواص مکانیکی بالا، سطوح پرداخت عالی، مقاومت به خوردگی، سهولت کاربرد و هزینه پایین ساخت، به طور وسیع به عنوان رویه این پانل ها مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین، این پانل ها به علت خاصیت ضد آب رویه ها و سبکی شان، به طور عمده در بدنه کشتی ها مورد استفاده قرار می گیرند...

و امروزه پانل های ساندویچی برای کاربرد های مختلف بسیار مطلوب، انعطاف پذیر و مورد استفاده اند.

---

<sup>۱</sup> Delau

<sup>۲</sup> Royal

<sup>۳</sup> Mosquito

## ۱-۵ کلیات

### ۱-۵-۱ مفاهیم اولیه

واژه چندسازه Composite از کلمه انگلیسی «to compose» به معانی توأم کردن، ساختن و مخلوط کردن مشتق شده است. چندسازه ها از ترکیب و اختلاط چند ماده حاصل می شوند. در اینجا منظور ترکیب و اختلاط فیزیکی است نه شیمیایی، بطوریکه اجزاء تشکیل دهنده ماهیت شیمیایی و طبیعی خود را به طور کامل حفظ می کنند. گرچه در برخی از چندسازه های پیشرفته برای بهبود خواص، انجام اصلاحات شیمیایی جزئی سطحی در مورد مواد تشکیل دهنده الزامی است. با این تعریف چون تقریباً اکثر مواد طبیعی و مصنوعی را می توان چندسازه به حساب آورد، برای محدود کردن موضوع تعریفی عملی تر و اختصاصی تر از چندسازه ها ارائه می شود [۴].

چندسازه ها موادی هستند:

- (۱) جامد (ترکیبات مایع از نظر خواص مکانیکی فاقد ارزش اند).
- (۲) مصنوعی (مواد طبیعی مانند چوب و استخوان حذف می شوند).
- (۳) متشکل از دو یا چند جزء (یا فاز) که از نظر شیمیایی یا فیزیکی کاملاً متفاوتند و بصورت منظم یا پراکنده کنار هم قرار گرفته اند و لایه مشترک یا حد واسطی بین آنها وجود دارد و خواص مکانیکی یکی از فازها نسبت به فاز یا فازهای دیگر خیلی بهتر است.
- (۴) دارای خواص و ویژگی هایی هستند که هیچ یک از فازهای تشکیل دهنده به تنهایی نمی توانند آنها را داشته باشند.

### ۱-۵-۲ انواع چندسازه

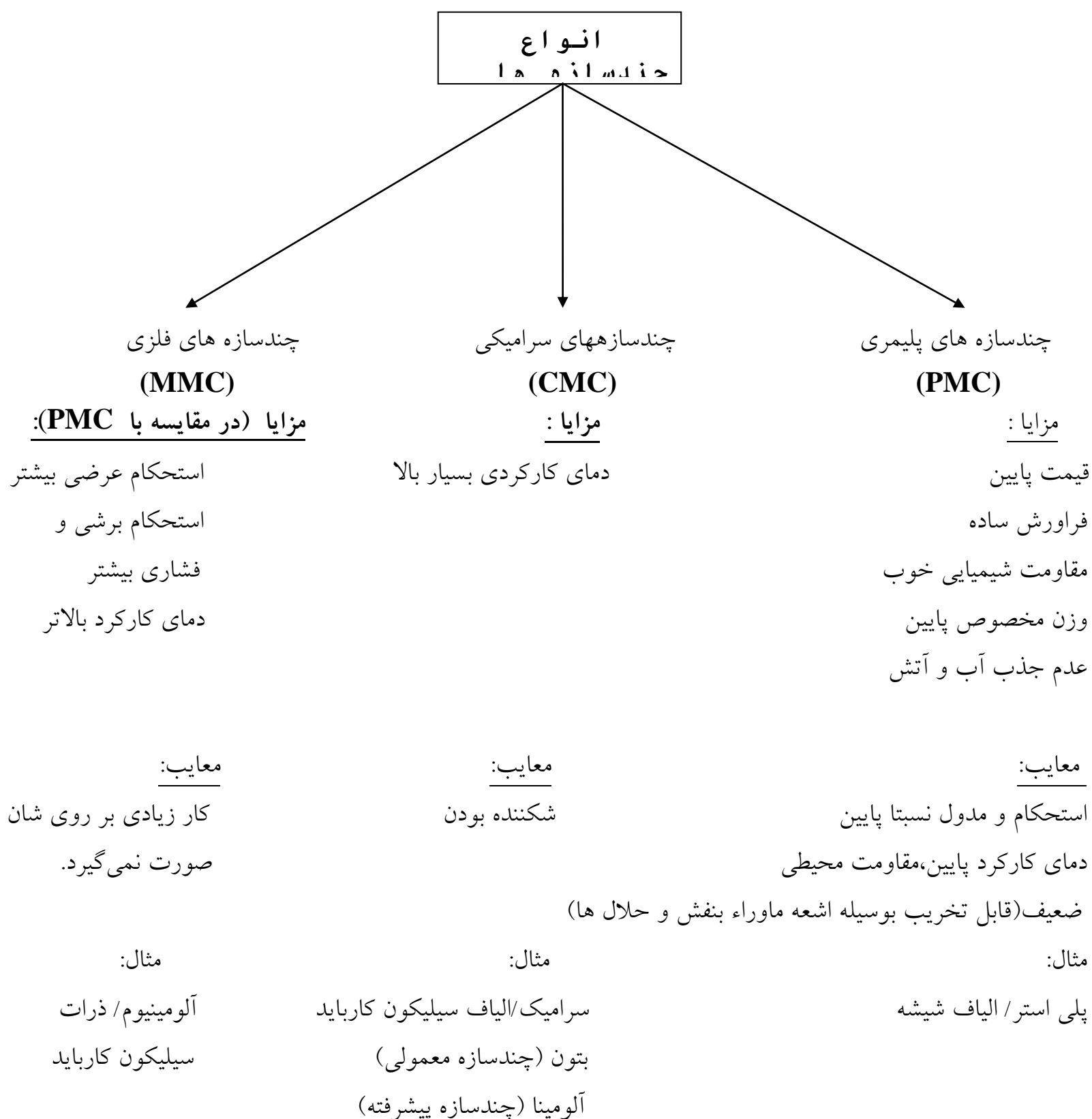
به طور کلی مواد چندسازه‌ای به سه دسته تقسیم می شوند که شامل موارد زیر باشد:

- ۱- چند سازه سرامیکی (CMC)<sup>۱</sup>
- ۲- چندسازه زمینه فلزی (MMC)<sup>۲</sup>
- ۳- چند سازه زمینه پلیمری (PMC)<sup>۳</sup> که رایج ترین دسته چند سازه ها هستند و بیش از ۹۰ درصد مصرف جهانی چندسازه را به خود اختصاص می دهند [۴].

<sup>۱</sup> Ceramic Matrix Composite

<sup>۲</sup> Metal Matrix Composite

<sup>۳</sup> Polymer Matrix Composite



شکل ۱-۱ طبقه بندی چندسازه ها از نقطه نظر نوع ماده زمینه [۶]

### ۱-۵-۳ مهمترین موارد استفاده از چندسازه های زمینه پلیمری

استفاده از چندسازه های پلیمری در صنعت، حدود ۶۰ درصد صرفه اقتصادی داشته است. با توجه به پایداری بسیار زیاد این چندسازه های پلیمری و مقاومت بسیار خوب آنها در محیط های خورنده، این مواد کاربردهای وسیعی در صنایع دریایی پیدا کرده اند که از جمله مهمترین آنها می توان به ساخت بدنه قایق ها، کشتی ها و تاسیسات فراساحلی اشاره داشت. مواد چندسازه زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف، به علت پایین بودن نسبت وزن مخصوص به مقاومت، ترکیبی از مقاومت و مدول بهتر و در

نتیجه کاربردی بهتر نسبت به مواد فلزی دارند، این مواد در بسیاری از کاربردهایی که کاهش وزن سازه از اهمیت برخوردار است می‌توانند جایگزین فلزات شوند [۱۲].

بنابراین ساخت بدنه هواپیما، ساخت پره های توربین بادی و پره های هلی کوپتر و پوشش رادار هواپیما از کاربردهای چندسازه در صنعت هوافضا است. صنعت ساختمان و صنایع مرتبط با آن پرمصرف ترین صنعت برای این مواد چندسازه‌ای است. این مواد به منظور ترمیم و تقویت سازه های فرسوده و ترمیم لوله های فرسوده نفت و گاز و عایق توربین‌ها به کار می‌روند [۲۵].

#### ۱-۵-۴ چند سازه های زمینه پلیمری تقویت شده

کارایی چندسازه های پلیمری مهندسی توسط خواص اجزاء آنها تعیین می‌شود. خواص هر یک از اجزاء یعنی ماده زمینه و تقویت کننده، ابعاد ماده تقویت کننده (شکل، اندازه و توزیع اندازه ذرات)، نسبت اجزاء متشکله، سطح مشترک بین ماده زمینه و تقویت کننده و اثر متقابل بین آنها بشدت خواص ماده مرکب حاصل را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۸].

علاوه بر فاز پیوسته که ماده زمینه یا ماتریس نامیده می‌شود، دیگر اجزاء، تقویت کننده و یا پر کننده<sup>۱</sup> نام دارند. از واژه تقویت کننده زمانی استفاده می‌شود که خواص مکانیکی ماده مرکب حاصل نسبت به ماده زمینه خالص بهتر شده باشد و پرکننده زمانی گفته می‌شود که استفاده از آن سبب کاهش هزینه تولید شود. بهای پرکننده ها به نسبت پلیمر کمتر است. در شرایط مطلوب جزئی که به پلیمر اضافه می‌شود، هم به عنوان تقویت کننده و هم به عنوان پرکننده عمل می‌کند و علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، کاهش هزینه تمام شده را نیز سبب می‌شود. معمولاً تقویت کننده ها سخت تر، محکم تر و سفت تر از ماده زمینه هستند.

الیاف حجم قابل توجهی از یک چندسازه را تشکیل می‌دهند. الیافی که عمدتاً در صنعت این چندسازه ها استفاده می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف) مصنوعی ب) طبیعی

اغلب این چندسازه ها دارای الیاف با مدول بالا هستند که در پلیمر های پلیمری قرار داده شده اند و فصل مشترک خوبی نیز بین این دو جزء وجود دارد. وظیفه اصلی آنها تحمل بار اعمال شده به چند سازه می‌باشد. نوع لیف، مقدار آنها و آرایش یافتگی آنها بسیار حائز اهمیت اند و بر خواص زیرتاثیر می‌گذارند [۶]:

۱- استحکام و مدول کششی، فشاری و خمشی

۲- استحکام خستگی<sup>۲</sup>

۳- ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته

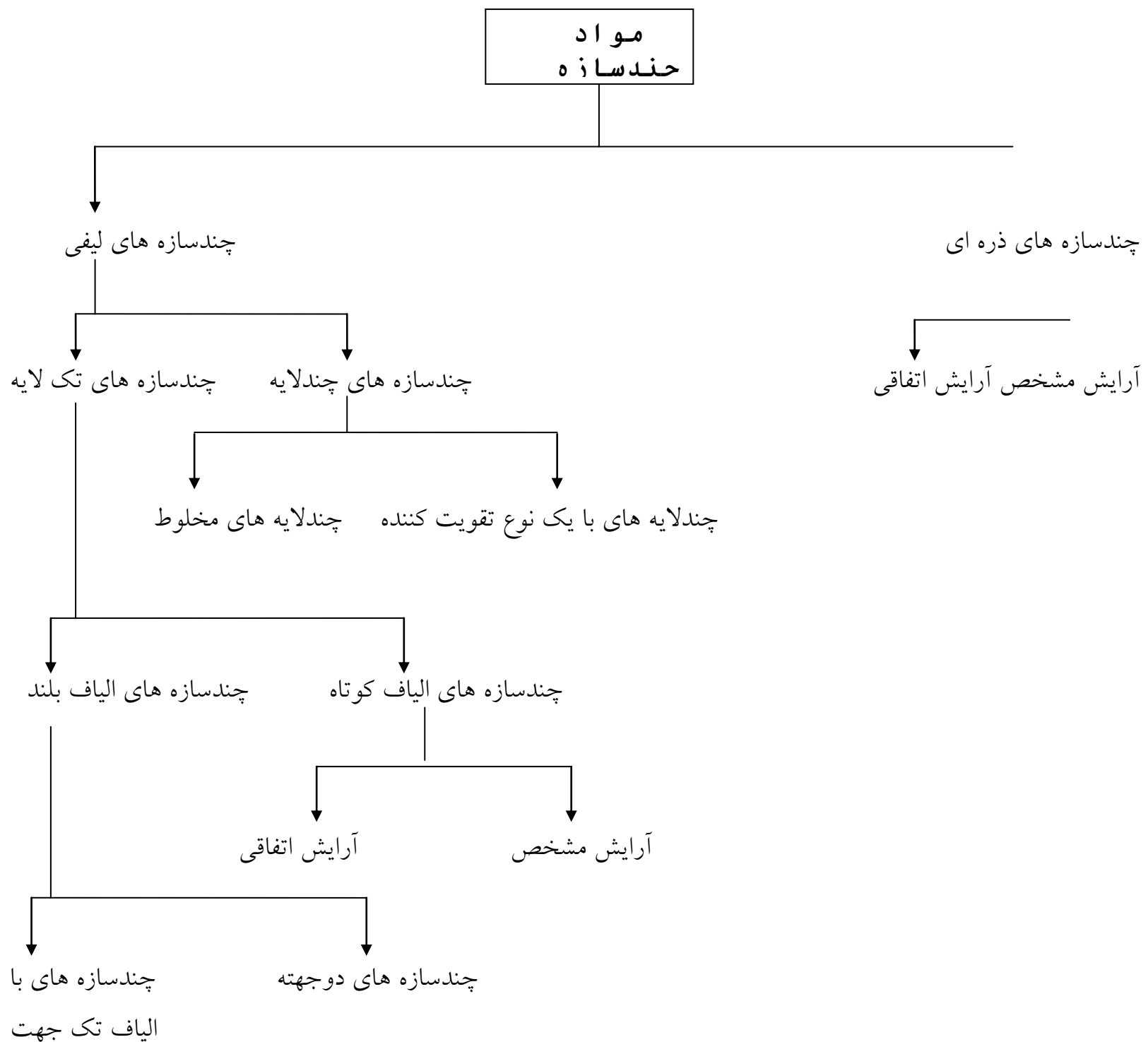
۴- وزن مخصوص چند سازه

۵- قیمت

---

<sup>۱</sup> Filler

<sup>۲</sup> Fatigue



شکل ۱-۲ طبقه بندی انواع مختلف چندسازه ها [۶]

### ۶-۱ ماده زمینه های پلیمری

ماده زمینه های پلیمری جزء عمده چندسازه های پلیمری هستند، این بخش عملکردهای بسیار مهمی در چند سازه دارد. اول این که به عنوان یک اتصال دهنده<sup>۱</sup> یا چسب الیاف تقویت کننده را نگه می دارد. دوم، پلیمر تحت بار اعمالی تغییر شکل می دهد و تنش را به الیاف محکم و سفت منتقل می کند. سوم، رفتار پلاستیک ماده زمینه پلیمری انرژی را جذب کرده، موجب کاهش تمرکز تنش می شود و در نتیجه، رفتار چقرمگی در شکست را بهبود می بخشد. همچنین از سایش سطح الیاف جلوگیری به عمل می آورد و از الیاف در مقابل عوامل محیطی نظیر رطوبت محافظت می کند. ماده زمینه نقش اساسی در بعضی خواص چندسازه نظیر استحکام و مدول عرضی<sup>۲</sup>، خواص برشی و خواص در حالت فشاری دارد [۶].

<sup>۱</sup> Binder

<sup>۲</sup> Transverse



به طور کل پلیمرها از نظر ساختاری مولکول های زنجیری بزرگی هستند (از این رو به آنها ماکرومولکول نیز اطلاق می شود) که پیوند های کووالانسی اتم های کربن استخوان بندی اصلی آنها را تشکیل می دهند. فرآیند تشکیل مولکول های بزرگ از مولکول های کوچک (مونومر) را پلیمر شدن می نامند. بدین معنی که پلیمر شدن، فرآیند اتصال تعدادی مونومر به یکدیگر و تشکیل پلیمر است.

پلیمرها از نظر ساختاری بسیار پیچیده تر از فلزات و سرامیک ها هستند، ولی با هزینه کم تر و به سهولت بیشتری فرآیند می شوند. معمولاً پلیمرها در مقایسه با فلزات در مقابل مواد شیمیایی مقاوم ترند. از طرف دیگر، این مواد استحکام و مدول کشسانی کمتر و گستره دمای کاربردی پایین تری دارند.

چون در پلیمرها پیوندهای کووالانسی غالب اند، معمولاً این مواد رسانایی گرمایی، هدایت حرارتی و الکتریکی ضعیفی از خود نشان می دهند. قرار گرفتن دراز مدت پلیمرها در معرض نور ماوراء بنفش یا بعضی از حلال ها، تضعیف خواص آنها را به دنبال دارد [۱۴].

بحث در مورد مصادیق ماده زمینه های پلیمری مورد استفاده در چند سازه ها به معنای بحث در مورد تمام پلاستیک های تجاری موجود می باشد. در تئوری، تمام گرما سخت ها و گرما نرم ها می توانند به عنوان ماده زمینه پلیمری استفاده شوند، اما در عمل گروه های مشخصی از پلیمرها به لحاظ فنی و اقتصادی دارای اهمیت هستند. در میان گرما نرم ها، اگرچه گرمانرم های متعددی استفاده می شوند، پلی پروپیلن و نایلون بیشترین اهمیت را دارا هستند و در میان پلیمرهای گرماسخت پلی استر، فنل فرمالدهید، اپوکسی و رزین های پلی ایمید بیشترین کاربرد را دارند [۶].

برای تهیه پلاستیک ها به طور کلی به مونومرها نیاز می باشد. تنوع و تعدد پلاستیک ها ایجاب می کند که مونومر های متعددی نیز به این منظور ساخته شوند، اما به طور کلی فرآیند پلیمر شدن به دو گروه مهم طبقه بندی می شود:

#### ۱) پلیمر شدن تراکمی

در این فرایند واکنش مولکولها به صورت مرحله ای روی می دهد و در هر مرحله یک مولکول ساده که معمولاً آب است، به عنوان محصول جانبی تشکیل می شود.

#### ۲) پلیمر شدن افزایشی

در این فرآیند مونومرها، بدون تولید محصول جانبی به یکدیگر متصل می شوند. پلیمر شدن افزایشی معمولاً در حضور کاتالیزور انجام می شود.

پلاستیک های گرما سخت و گرما نرم که بوسیله هر دو روش پلیمر شدن تراکمی و افزایشی تولید می شوند و از نظر رفتار از یکدیگر متمایزاند، پلیمرهای گرما سخت و گرمانرم نامیده می شوند. تفاوت رفتاری آنها، مبتنی بر ساختار و شکل مولکولی، اندازه وزن مولکولی و یا مقدار و نوع پیوند ها (کووالانسی یا نیروی واندروالس) است [۱].

در حال حاضر پلاستیک های مختلفی با خواص کاملاً مختلف توسط سازندگان گوناگون در دنیا ساخته و به بازار عرضه می شود. پلاستیک ها به علت خواص مختلفی که دارند اغلب جایگزین مواد طبیعی شده و بدین ترتیب در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله این خواص می توان به موارد اشاره کرد:

سبک بودن، عایق حرارت بودن، عایق الکتریسیته بودن، شفاف بودن، رنگ پذیر بودن، مقاومت در برابر شرایط جوی، مقاومت در برابر حلال ها و مواد شیمیایی، بهداشتی بودن و سهولت ساخت. به طور کل پلاستیک ها به دو گروه عمده گرما سخت و

گرما نرم تقسیم می‌شوند. امروزه به منظور تقویت کردن پلاستیک‌ها از مواد مختلفی استفاده می‌گردد. این مواد به اشکال مختلف مانند الیاف پیوسته، آرد الیاف (الیاف خرد شده) و یا بافته شده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. اغلب برای تقویت سازه‌ها از الیاف شیشه یا الیاف کربن استفاده می‌شود که مشخصات چندسازه بسته به نوع کاربرد و اهداف مورد انتظار قابل تعیین است [۲۸].

#### ۱-۶-۱ پلاستیکهای گرما نرم

گرما نرم‌ها به آن دسته از پلاستیک‌ها هستند که در اثر گرما، نرم و پس از سرد شدن مجدداً جامد می‌شوند. این عمل را می‌توان به دفعات بدون اینکه در جنسیت پلاستیک‌ها تغییری ایجاد شود انجام داد. این پلیمرهای خطی که گرما نرم نام دارند برای شکل‌گیری به صورت سیال مناسب‌اند. از جمله پلیمرهای گرمانرم می‌توان پلی‌اتیلن با دانسیته کم یا زیاد، پلی‌استایرن، پلی‌متیل متا اکریلات و پلی‌پروپیلن را نام برد. [۱۴].

#### ۱-۶-۲ پلاستیکهای گرما سخت

هنگامی که ساختار پلیمر بی‌شکل است، نظم مشخص بین مولکولها وجود ندارد و زنجیرها به طور اتفاقی کنار هم قرار می‌گیرند. پس از این که مولکولهای پلیمر به علت ایجاد پیوندهای عرضی به شکل یک شبکه سه بعدی در آمد، در اثر گرما نرم نخواهند شد. این پلیمرهای پیوند عرضی شده، پلیمرهای گرما سخت نامیده می‌شوند. پیوندهای عرضی، لغزش مولکولها را روی یکدیگر مشکل می‌سازد، بنابراین پلیمر محکم و سخت می‌شود. به عنوان مثال لاستیک پیوند عرضی شده با گوگرد که ولکانیزه پیوند عرضی شده نامیده می‌شود، استحکام آن دهها برابر لاستیک طبیعی است. نمونه‌های دیگر پلیمرهای گرماسخت عبارتند از: پلی‌استر، اپوکسی، پلی‌یورتان، سیلیکون، فنولیک‌ها [۱۴].

#### ۱-۲-۶-۱ رزین‌های پلی‌استر

رزین‌های پلی‌استر به دو گروه اصلی گرمانرم و گرما سخت تقسیم می‌گردند. رزین‌های پلی‌استر گرماسخت بدلیل دارا بودن دی‌اسیدهای حاوی پیوندهای دوگانه، قابلیت ایجاد پیوندهای عرضی<sup>۱</sup> بین زنجیرهای پلی‌استر را دارند، در حالیکه دی‌اسیدهای موجود در پلی‌استرهای گرما نرم فاقد این گونه پیوند های دوگانه بوده و در نتیجه قابلیت ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیرها را ندارند. به همین دلیل معمولاً پلی‌استرهای گرما نرم را پلی‌استرهای اشباع شده و پلی‌استرهای گرماسخت را پلی‌استرهای اشباع نشده می‌نامند [۴].

#### ۱-۱-۲-۶-۱ پلی‌استرهای گرما سخت (غیر اشباع)

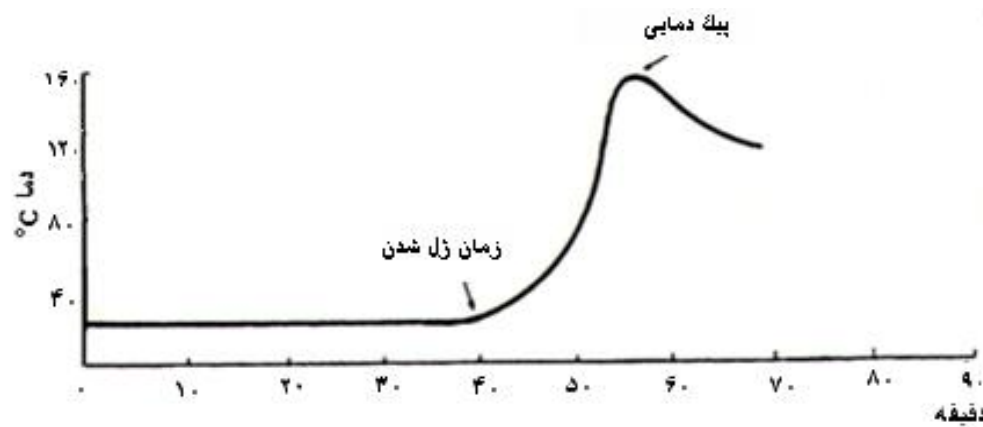
رزین پلی‌استر غیراشباع پرمصرف‌ترین رزین در صنعت کامپوزیت می‌باشد. الیس<sup>۲</sup> (۱۹۳۷) اثر مونومر غیر اشباع را بر سرعت پخت پلی‌استرها مورد بررسی قرار داد که بعنوان پدر پلی‌استر غیر اشباع شناخته شد. پلی‌استرهای غیر اشباع از واکنش یک یا چند الکل دو یا چند هیدروکسیله با یک یا چند اسید دو یا چندعامله بدست می‌آیند و حاوی تعدادی پیوند  $C = C$  می‌باشند. در واقع هر مولکول اسید دو عاملی از دو طرف با دو مولکول الکل، اتصال استری برقرار می‌کند و سپس پلیمر حاصل در یک حلال فعال مانند استایرن حل می‌گردد که ضمن کاهش ویسکوزیته کار با رزین را ساده تر می‌نماید. حلال مذکور نیز دارای

<sup>۱</sup> Cross linked

<sup>۲</sup> Elis

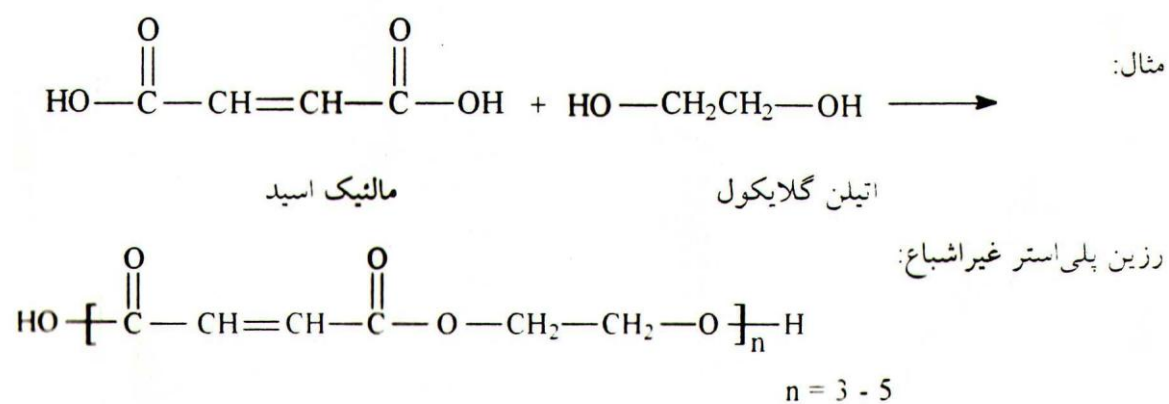
پیوند  $C=C$  می‌باشد و بعنوان عامل پیوند عرضی در سیستم عمل می‌کند و با اتصال به مولکولهای پلی استر از محل نقاط غیراشباع آنها ساختاری سه بعدی را بوجود می‌آورد [۱۴].

واکنش شبکه‌ای شدن پلی استر با افزودن مقدار کمی کاتالیزور مانند پراکسیدهای آلی یا ترکیبات آزوآلیفاتیک ( $-N=N-$ ) شروع می‌گردد. این مواد در معرض حرارت و یا یک ماده شتاب دهنده به رادیکال آزاد تجزیه شده و عموماً با واکنش با مولکول های استایرن و شکستن باند دوگانه آنها باعث تبدیل مونومرهای استایرن و زنجیرهای پلی استری به رادیکال های آزاد می‌گردند. در این مرحله دمای سیستم رزین تغییری نمی‌کند. هنگامی که رادیکال های آزاد موجود در سیستم به حد معینی رسیدند به تدریج در سیستم پیوندهای عرضی تشکیل می‌شوند، این فرآیند همراه با آزاد شدن انرژی می‌باشد و باعث بالا رفتن درجه حرارت سیستم تا حدود  $150^{\circ}C$  می‌گردد. پس از این مرحله و با کاهش تدریجی تعداد پیوندهای عرضی که در واحد زمان تشکیل می‌شوند دمای سیستم کاهش پیدا می‌کند و در نهایت پلی استر جامد تشکیل می‌شود [۳].



شکل ۱-۳ افزایش دما یا گرمایی یک رزین پلی استر

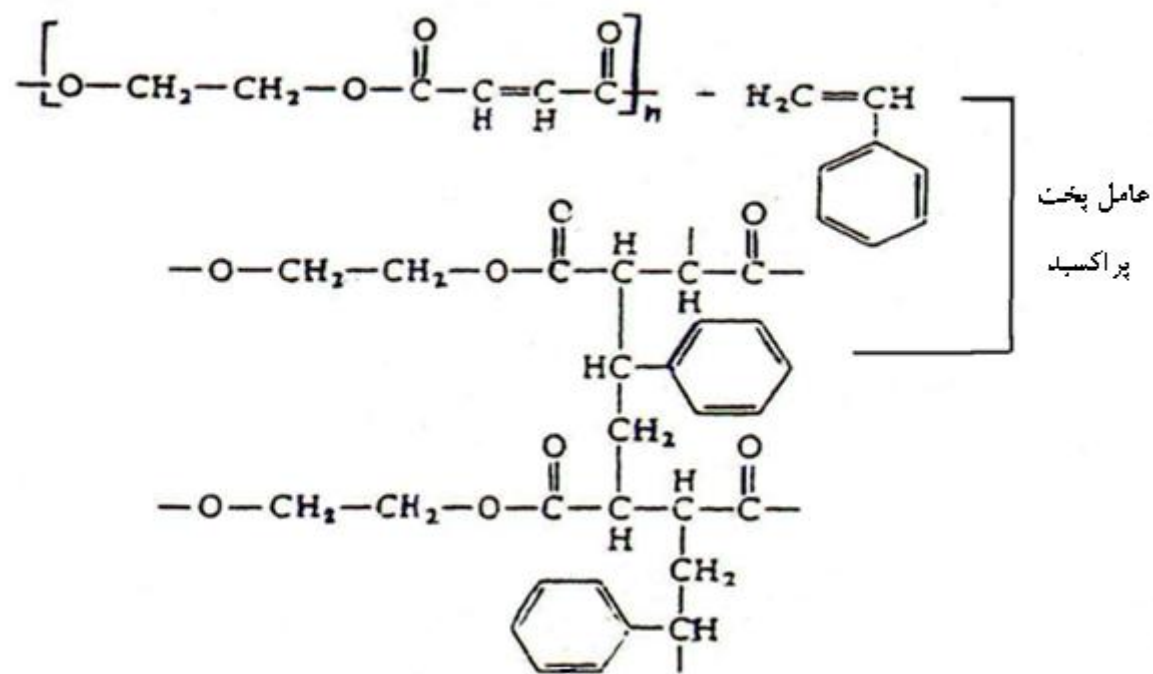
سه مرحله کاملاً مشخص زمان پل شدن، زمان سخت شدن<sup>۱</sup> و زمان نهایی<sup>۲</sup> در پخت یک سیستم رزین وجود دارد. زمان ژل شدن از زمان مخلوط کردن کاتالیزور و شتاب دهنده تا زمانی که رزین بصورت یک ژل نرم در می‌آید را گویند. پس از این زمان است که دمای رزین به سرعت افزایش می‌یابد. زمان سخت شدن از زمان ژل شدن تا زمانی که رزین به قدر کافی سخت شده است که می‌توان قطعه را از قالب بیرون آورد گفته می‌شود و به زمان بعد از قالبگیری تا رسیدن به سختی کامل و مقاومت شیمیایی نهایی و پایداری، زمان نهایی می‌گویند [۳]. واکنش پلیمریزاسیون رزین پلی استر در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ واکنش تولید رزین پلی استر غیر اشباع

<sup>۱</sup> hardening time  
<sup>۲</sup> maturing time

باید توجه داشت که رزین های پلی استر مایعاتی غیر پایدارند. حتی در دمای محیط پس از نگهداری آنها به مدت چندین ماه سخت شده و به صورت یک ژل لاستیکی تبدیل می شوند. با افزایش دما و در صورت نگهداری رزین در ظروف شیشه ای و یا در معرض نور قرار گرفتن، عمر نگهداری رزین کاهش می یابد. اغلب رزین های پلی استر را در محیط تاریک و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد می توان به مدت حداقل ۶ ماه و در بعضی مواقع بیش از یکسال نگهداری کرد. رزین های رنگی (رزین های حاوی رنگدانه) معمولاً عمر نگهداری حدود ۳ ماه دارند [۶]. همچنین باید توجه داشت به جهت نشر مونومر استایرن در محیط و دیگر بخارات شیمیایی، تخلیه خوب هوای کارگاه ضروری است.



شکل ۱-۵ رزین پلی استر با اتصال های عرضی

#### ۱-۲-۶-۱ عوامل پخت رزین پلی استر غیراشباع

همانگونه که بیان شد رزین پلی استر غیراشباع در ابتدا به صورت مایع می باشد که پس از افزودن مواد سخت کننده و در اثر ایجاد پیوندهای هیدروژنی به صورت جامد و سخت در می آید. مواد سخت کننده رزین پلی استر شامل دو بخش اصلی می باشند:

بخش اول شامل موادی است که نقش آغازگر واکنش پلیمریزاسیون را بر عهده دارد. جهت شروع پخت نیاز به یک مرکز فعال است تا پلیمریزاسیون را آغاز کند. این نقش را کاتالیزورها ایفا می کنند. آنها مولد رادیکال های آزاد می باشند و مهمترین عوامل پخت می باشند. این مواد شامل پراکسیدهای آلی هستند. طریقه واکنش به صورتی است که پراکسیدهای آلی با گرفتن انرژی تجزیه شده و به صورت رادیکال آزاد در می آیند. رادیکال های آزاد با هیدروژن های فعال واکنش داده و رادیکالهای پلیمری را تشکیل می دهند که می توانند پیوندهای عرضی ایجاد کنند. پخت رزین بلافاصله پس از اضافه کردن کاتالیزور شروع می شود. برای پخت پلی استرهای غیر اشباع از پراکسیدهای آلی مختلفی می توان استفاده کرد. برخی از آنها مانند متیل اتیل کتون پراکسید، دی سیکلوهگزان پراکسید برای گیرایی رزین در دمای اتاق به کار می روند، در حالیکه پراکسیدهایی مانند بنزوئیل پراکسید برای پخت رزین در دمای بالا مورد استفاده قرار می گیرند.

کاتالیزورهای مصرفی بایستی قبل از استفاده به رزین اضافه شوند. اگر پراکسیدهای آلی در هنگام کار به درستی مورد استفاده قرار نگیرند می توانند بسیار خطرناک باشند. بعضی از آنها به اصطکاک، گرما، تکان خوردن حساس هستند و می توانند در اثر این