

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان :

تعیین تنش های پسماند بین لایه ای در کامپوزیت های زمینه پلیمری
با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی و مرحله ای

توسط:

محمد اکبرزاده

استاد راهنما:

دکتر احمد قاسمی

شهریورماه ۱۳۹۰

اینجانب محمد اکبرزاده متعهد می شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان تعیین تنش های پسماند بین لایه ای در کامپوزیت های زمینه پلیمری به روش سوراخکاری مرکزی و مرحله ای که به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی به دانشکده مکانیک دانشگاه سمنان ارائه شده، دارای اصالت پژوهشی و حاصل فعالیت های علمی اینجانب می باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان نامه از اینجانب صلب شده و موارد قانونی مترتب به نیز از طرف مراجع زیربط قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی: محمد اکبرزاده

شماره دانشجویی: ۸۸۱۲۱۶۹۰۰۱

امضاء

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین
پشتیبان است
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت
می گراید
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می کنم.

۱.....	مقدمه	۱
۲.....	۱.۱ تنش های پسماند.....	۲
۵.....	۲.۱ روش های ایجاد تنش های پسماند.....	۵
۵.....	۱.۲.۱ روش های مکانیکی.....	۵
۶.....	۲.۲.۱ روش های گرمایی.....	۶
۷.....	۳.۲.۱ روش های پوشش دهی.....	۷
۷.....	۴.۲.۱ روش های ماشین کاری.....	۷
۸.....	۳.۱ دسته بندی تنش های پسماند در کامپوزیت ها.....	۸
۸.....	۱.۳.۱ تنش های میکروسکوپی.....	۸
۸.....	۲.۳.۱ تنش های ماکروسکوپی.....	۸
۹.....	۴.۱ انواع تنش های پسماند در کامپوزیت ها.....	۹
۹.....	۱.۴.۱ تنش های پسماند ناشی از عملیات پخت.....	۹
۱۰.....	۲.۴.۱ تنش های پسماند رطوبتی.....	۱۰
۱۰.....	۵.۱ روش های اندازه گیری تنش های پسماند.....	۱۰
۱۳.....	۱.۵.۱ روش خم کاری.....	۱۳
۱۴.....	۲.۵.۱ روش تفرق اشعه X.....	۱۴
۱۶.....	۳.۵.۱ روش تفرق الکترون.....	۱۶
۱۷.....	۴.۵.۱ روش تفرق نوترون ها.....	۱۷
۱۸.....	۵.۵.۱ روش های الکترو مغناطیسی.....	۱۸
۱۸.....	۶.۵.۱ استفاده از ماورا صوت.....	۱۸
۱۹.....	۷.۵.۱ روش ترموالاستیک.....	۱۹
۱۹.....	۸.۵.۱ روش فوتو الاستیک.....	۱۹
۲۰.....	۶.۱ روش سوراخکاری مرکزی.....	۲۰
۲۱.....	۱.۶.۱ تاریخچه پژوهش های نظری انجام یافته.....	۲۱
۲۷.....	۲.۶.۱ تاریخچه پژوهش های تجربی انجام یافته.....	۲۷
۳۳.....	۲ مبانی روش سوراخ کاری مرکزی.....	۳۳
۳۸.....	۱.۲ روشها و نکات موثر در انجام آزمایش.....	۳۸
۳۹.....	۱.۱.۲ انتخاب و نصب کرنش سنج.....	۳۹
۴۱.....	۲.۱.۲ همراستائی.....	۴۱
۴۳.....	۳.۱.۲ خواص مکانیکی و محدودیت ها در اندازه گیری کرنش.....	۴۳
۴۴.....	۴.۱.۲ روش های سوراخکاری.....	۴۴
۴۸.....	۲.۲ محاسبه تنش پسماند با استفاده از روش سوراخ کاری.....	۴۸
۵۶.....	۳ روش حل دقیق محاسبه ضرایب کالیبراسیون در صفحات ارتو تروپیک.....	۵۶

۱.۳	معادلات تنش و کرنش در صفحه ارتوتروپیک.....	۵۷
۲.۳	توزیع تنش اطراف سوراخ در یک لایه ارتوتروپیک.....	۶۰
۳.۳	تنش و کرنش در نقاط اندازه گذاری شده در روزت در یک لایه ارتوتروپیک.....	۶۱
۱.۳.۳	بارگذاری در راستای الیاف و محاسبه ستون اول ماتریس ضرایب کالیبراسیون.....	۶۲
۲.۳.۳	بارگذاری در راستای عمود بر الیاف و محاسبه ستون دوم ماتریس ضرایب کالیبراسیون.....	۶۶
۳.۳.۳	برش صفحه ای و محاسبه ستون سوم ماتریس ضرایب کالیبراسیون.....	۶۹
۴.۳	نتایج عددی.....	۷۳
۴	محاسبه تنش های پسماند با تئوری کلاسیک لایه ای.....	۷۵
۱.۴	روابط تنش و کرنش یک تک لایه درون چند لایه.....	۷۵
۲.۴	مراحل تحلیلی محاسبه ی تنش های پسماند.....	۷۸
۳.۴	نتایج عددی.....	۸۱
۵	محاسبه تنش های پسماند با روش المان محدود.....	۸۳
۱.۵	تئوری روش سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک.....	۸۳
۲.۵	تئوری روش سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک.....	۸۵
۱.۲.۵	شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک.....	۸۹
۲.۲.۵	محاسبه ماتریس ضرایب.....	۹۱
۳.۲.۵	نتایج عددی.....	۹۳
۳.۵	تئوری روش سوراخکاری مرکزی در چند لایه های کامپوزیتی.....	۹۴
۱.۳.۵	شبیه سازی روش سوراخکاری مرکزی در چند لایه های کامپوزیتی.....	۹۸
۲.۳.۵	نتایج عددی.....	۹۹
۳.۳.۵	مدلسازی حرارتی و بدست آوردن کرنش های پسماند.....	۱۰۱
۶	جمع بندی و نتیجه گیری.....	۱۰۳
۱.۶	مقایسه نتایج در صفحات ارتوتروپیک.....	۱۰۳
۲.۶	مقایسه نتایج در چند لایه های کامپوزیتی.....	۱۰۵
۱.۲.۶	کامپوزیت شیشه - اپوکسی.....	۱۰۵
۲.۲.۶	کامپوزیت گرافیت - اپوکسی.....	۱۱۲
۳.۶	نتیجه گیری نهایی.....	۱۱۵
۴.۶	پیشنهاداتی برای پروژه های آتی.....	۱۱۵
۱۱۷	منابع و مراجع.....	۱۱۷

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱.۱ گسیخته شدن تیر I شکل در اثر تنش پسماند	۲
شکل ۲.۱ فهرست روش های اندازه گیری تنش های پسماند	۱۲
شکل ۳.۱ روش خم کاری جهت تعیین توزیع تنش پسماند در لایه ها	۱۳
شکل ۱.۲ مته مورد استفاده در روش سوراخکاری	۳۴
شکل ۲.۲ روش سوراخکاری در تعیین تنش پسماند	۳۷
شکل ۳.۲ مراحل مختلف سوراخکاری	۳۸
شکل ۴.۲ راهنمای فرزکاری مدل RS-200	۴۲
شکل ۵.۲ مدل RS-200 با تجهیزات فرزکاری در انتها	۴۵
شکل ۶.۲ مدل RS-200 با تیغه های کاربردی و تجهیزات انتقال به توربین بادی	۴۶
شکل ۷.۲ شکل شماتیک قرار گرفتن کرنش ها	۵۱
شکل ۸.۲ یک نوع منحنی کرنش-عمق در حضور میدان تنش یکنواخت	۵۴
شکل ۱.۳ نقاط کرنش سنجی و جهات اندازه گیری کرنش یک روزت در صفحه ارتوتروپ با سوراخ دایره ای	۵۸
شکل ۲.۳ صفحه نا محدود ارتوتروپ تحت کشش با سوراخ بیضوی	۶۰
شکل ۱.۴ مختصات لایه های یک چند لایه	۷۶
شکل ۲.۴ الگوریتم محاسبه تنش های پسماند با روش تئوری کلاسیک لایه ای	۸۰
شکل ۱.۵ دستگاه سوراخکاری مرکزی	۸۴
شکل ۲.۵ هندسه شماتیک روش سوراخکاری مرکزی	۸۶
شکل ۳.۵ جدول ضرایب کالیبراسیون ارائه شده توسط Schajer&Yang	۸۸
شکل ۴.۵ شبکه بندی سوراخ و کرنش سنج روزت	۸۹
شکل ۵.۵ توزیع تنش در یک ماده ارتوتروپ در اثر سوراخکاری مرکزی با اعمال تنش برشی	۹۱
شکل ۶.۵ مراحل مدلسازی چهار لایه از یک چند لایه کامپوزیتی	۹۶
شکل ۱.۶ مقایسه نتایج بدست آمده ضرایب کالیبراسیون کامپوزیت شیشه/اپوکسی تک جهته	۱۰۵
شکل ۲.۶ مقایسه ضرایب کالیبراسیون مرحله اول با نتایج Shokrieh و Ghasemi	۱۰۷
شکل ۳.۶ مقایسه ضرایب کالیبراسیون مرحله دوم با نتایج Shokrieh و Ghasemi	۱۰۷
شکل ۴.۶ مقایسه ضرایب کالیبراسیون مرحله سوم با نتایج Shokrieh و Ghasemi	۱۰۸
شکل ۵.۶ مقایسه ضرایب کالیبراسیون مرحله چهارم با نتایج Shokrieh و Ghasemi	۱۰۸
شکل ۶.۶ مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تنش پسماند σ_x در هر لایه از $[0/\pm 45/90]_s$	۱۱۰
شکل ۷.۶ مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تنش پسماند σ_y در هر لایه از $[0/\pm 45/90]_s$	۱۱۱
شکل ۸.۶ مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تنش پسماند σ_{xy} در هر لایه از $[0/\pm 45/90]_s$	۱۱۲
شکل ۹.۶ مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تنش پسماند σ_x در هر لایه از $[0_2/90_2]_s$	۱۱۳
شکل ۱۰.۶ مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تنش پسماند σ_y در هر لایه از $[0_2/90_2]_s$	۱۱۴

فهرست جداول

صفحه

جدول ۱.۳ ثابت های الاستیکی کامپوزیت شیشه - اپوکسی.....	۷۳
جدول ۲.۳ ابعاد کرنش سنج روزت.....	۷۳
جدول ۳.۳ ضرایب کالیبراسیون بدست آمده از حل دقیق.....	۷۴
جدول ۱.۴ تنش های پسماند بدست آمده از تئوری کلاسیک برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی با چیدمان $[0/\pm 45/90]_s$	۸۱
جدول ۲.۴ خواص کامپوزیت گرافیت/اپوکسی.....	۸۱
جدول ۳.۴ تنش های پسماند بدست آمده از تئوری کلاسیک برای کامپوزیت گرافیت/اپوکسی و چیدمان $[0_2/90_2]_s$	۸۲
جدول ۱.۵ ضرایب کالیبراسیون بدست آمده از شبیه سازی با روش المان محدود.....	۹۴
جدول ۲.۵ ضرایب کالیبراسیون مرحله ای چند لایه شیشه/اپوکسی $[0/\pm 45/90]_s$	۱۰۰
جدول ۳.۵ ضرایب کالیبراسیون مرحله ای چند لایه گرافیت/اپوکسی $[0_2/90_2]_s$	۱۰۰
جدول ۴.۵ کرنش های پسماند ثبت شده در اثر بارگذاری حرارتی.....	۱۰۲
جدول ۱.۶ ضرایب کالیبراسیون کامپوزیت شیشه/اپوکسی بدست آمده توسط Schajer.....	۱۰۴
جدول ۲.۶ ضرایب کالیبراسیون مرحله ای چند لایه شیشه/اپوکسی $[0/\pm 45/90]_s$ ، بدست آمده توسط Ghasemi.....	۱۰۶
جدول ۳.۶ نتایج عددی کرنش های رها شده از سوراخکاری چند لایه شیشه/اپوکسی $[0/\pm 45/90]_s$	۱۰۹
جدول ۴.۶ تنش های پسماند بدست آمده از حل عددی برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی با چیدمان $[0/\pm 45/90]_s$	۱۱۰
جدول ۵.۶ تنش های پسماند بدست آمده از حل عددی برای کامپوزیت گرافیت/اپوکسی با چیدمان $[0_2/90_2]_s$	۱۱۳

چکیده

تنشهای پسماند تنشهایی هستند که مستقل از بارهای خارجی بوده و در حالتی که هیچ تنش کاری یا بار خارجی دیگری به قطعه اعمال نمی شود، بخشی از مقاومت آن صرف غلبه بر این تنش ها می شود. روش سوراخ کاری، یک روش معمول و متداول در اندازه گیری تنش های پسماند محسوب می شود. تنش های پسماند از ارتباط میان کرنش های اندازه گیری شده و ضرایب کالیبراسیون محاسبه می شوند. روش سوراخکاری مرحله ای، برای تعیین توزیع غیر یکنواخت تنش در عمق قطعه، استفاده می شود. پس از انجام اولین مرحله از سوراخکاری، کرنش های رها شده در مراحل بعد تحت تأثیر دو عامل تنش های موجود در آن عمق و تغییر هندسه ی سوراخ هستند.

ما در این پایان نامه با استفاده از روش عددی المان محدود ضرایب کالیبراسیون مرحله ای را برای ماده ای مشخص بدست آورده ایم و با استفاده از کرنش هایی که قبلاً از آزمایش روی همین ماده بدست آمده بود، تنش های پسماند را محاسبه کردیم و با تنش های بدست آمده از تئوری کلاسیک مقایسه نمودیم که بر درستی کار انجام شده صحت گذاشت. همچنین، با مدلسازی حرارتی، کرنش های پسماند ناشی از بارهای گرمایی را در نمونه ای دیگر بدست آوردیم. از ارتباط میان این کرنش ها و ضرایب کالیبراسیونی که برای هر مرحله سوراخکاری از روش المان محدود برای این ماده بدست آوردیم تنش های پسماند محاسبه گردید. نتایج حاصل با تنش های پسماند پیش بینی شده از نظریه کلاسیک مقایسه شد که خطای کمتر از ۱.۹۵٪ نشانگر صحت کار انجام شده را داشت.

کلمات کلیدی: تنش های پسماند، ضرایب کالیبراسیون، روش المان محدود، روش سوراخکاری مرحله ای.

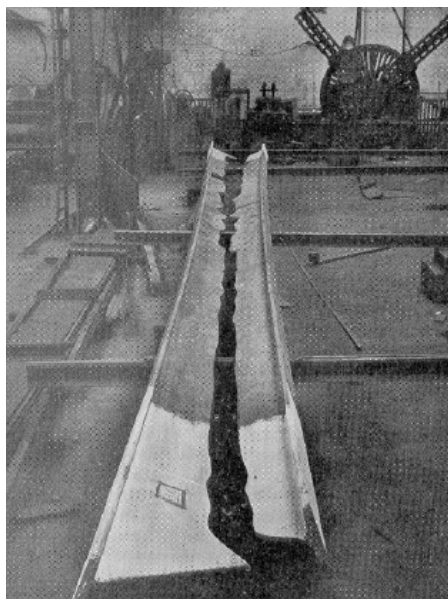
۱ مقدمه

تنشها به دو دسته تنشهای باری و تنشهای پسماند^۱ تقسیم می شوند. تنشهای باری، عبارتند از تنش هایی که در حد الاستیک به وسیله بارهای خارجی مانند: کشش، فشار، خمش و پیچش به وجود می آیند. این تنشها پس از برداشته شدن بارهای خارجی دوباره به صفر برگشته و مقدار آن ها را می توان از معادلات مقاومت مصالح والاستیسیته محاسبه نمود. تنشهای پسماند را به طور ساده می توان تنشهایی دانست که مستقل از بارهای خارجی بوده و به طور قابل توجهی استحکام خستگی اجزاء ماشین را تحت تأثیر قرار می دهند. بنابراین، این تنشها در حالتی که هیچ تنش کاری یا بار خارجی دیگری به قطعه اعمال نمی شود، در یک عضو ساده یا قطعه ماشین، وجود دارند و بخشی از مقاومت آن صرف غلبه بر این تنش ها می شود.

^۱ Residual stress

۱.۱ تنش های پسماند

تنش های پسماند ممکن است در اثر فرایند ساخت و یا در طول دوره کاری در قطعه پدید آیند. تاثیر تنش های پسماند با توجه به مقدار، علامت و توزیع تنش در مقایسه با تنش های ناشی از بار خارجی می تواند مفید یا مضر باشد. در بسیاری از موارد، تنش های پسماند نقش عمده ای را در شکست سازه ایفا می کنند، به ویژه زمانی که قطعه تحت بار متناوب یا محیط خورنده قرار گیرد؛ ولی همیشه نقش مخرب ندارند. همچنین در برخی موارد ممکن است تنش پسماند در طول عمر سازه، توسط فرایند نصب یا مونتاژ غلط، توسط اضافه بار های اتفاقی، اثرات موقعیت استقرار بر روی سازه های زیرزمینی و یا توسط بار های مرده (وزن سازه)، که الزاماً یک قسمت از بار های ناخواسته موجود در سازه هستند، به وجود آید. حالت کلی دیگری که موجب ایجاد تنش پسماند می شود، اصلاح یا ایجاد تغییر در سیستم در حال کار می باشد [۲-۱].



شکل ۱.۱ گسیخته شدن تیر I شکل در اثر تنش پسماند [۳]

تنش های پسماند در فلزات در اثر مواردی نظیر تسلیم قطعه، جوشکاری، ریخته گری و نورد ایجاد می شوند. البته تنش های پسماند همیشه مضر نمی باشند و در مواردی نظیر عملیات پرتاب ساچمه با طراحی مناسب می توان از آنها استفاده نمود. به طور معمول، تنش های پسماند کششی مضر هستند و موارد اثبات شده متعدد وجود دارد که این تنش ها عامل مهم شکست های سازه ای در اثر خستگی و موارد دیگر می باشند که در آن ها تنش های کاری با تنش های پسماندی که از قبل در قطعه وجود داشته است، جمع می شوند و باعث ایجاد اضافه بار و عامل اصلی شکست قطعه می گردند (شکل ۱.۱).

در کامپوزیتها عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس، انقباض و انبساط متفاوت لایه های متوالی به دلیل اختلاف جهات اصلی آنها و انجماد غیر یکنواخت قطعه به علت گرادیانهای شدید دما در حین ساخت سبب ایجاد تنش های پسماند می شود. اندازه این تنش ها به ساختار چند لایه، خواص مواد لایه ها و پروسه ساخت بستگی دارد. تنش های پسماند در مواد مرکب بازده و کارایی سازه را کاهش داده و باعث ترک برداشتن ماتریس، لایه لایه شدن سازه، پاره شدن الیاف و تاب برداشتن در چند لایه های نامتقارن می شوند و تاثیر قابل توجهی در کاهش استحکام حدی و نهایی سازه دارند [۴].

مقدار نسبت تنش پسماند در راستای عمود بر الیاف به مقاومت ماده ارتوتروپیک در راستای عمود بر الیاف کامپوزیت بسیار بیشتر از مقدار این نسبت در جهت طولی است و در بعضی از موارد به قدری شدید است که باعث ایجاد ترک های عرضی در ماتریس شده و قطعه سریعتر از آنچه که پیش بینی شده تخریب می گردد [۵-۶]. همچنین این تنش ها در مجاورت سطوح مشترک لایه ها و مرزهای هندسی نظیر لبه های آزاد لایه ها از تمرکز بالایی برخوردارند. در نقاط لبه ای، تنش های پسماند درون لایه ای باعث بوجود آمدن تنش های برشی و عمودی

بین لایه ای و تقویت اثر مرزی شده و در موارد شدید موجب ترک خوردگی ماتریس و یا آغاز تورق لایه ها^۱ می شوند [۷-۸].

تاثیر تنش های پسماند در شکل ظاهری قطعات کامپوزیتی با لایه چینی نامتقارن، تابیدگی یا کمانش قطعه است. تئوری کلاسیک، شکل پخت شده ی چند لایه های نامتقارن [۰/۹۰] را به صورت زینی شکل پیش بینی می کند، اما با استفاده از معادلات انرژی نشان داده شده است که حالت زینی شکل با توجه به ضخامت چند لایه و طول آن در برخی از موارد، ترکیبی ناپایدار است و شکل برخی از چند لایه های نامتقارن نازک بسیار نزدیک به استوانه های مستدیر بیان شده است. به علاوه، بعضی از آنها دو حالت استوانه ای شکل پایدار دارند. در این گونه موارد، شکل استوانه ای قطعه می تواند طی عملی که به آن میان پرش گفته می شود، به حالت استوانه ای دیگر در جهت عمود بر استوانه اولی پرش نماید. به علاوه چند لایه هایی که ممکن است در دمای محیط استوانه ای شکل باشند در دماهای نزدیک به دمای پخت تغییر شکل داده و حالت زینی شکل به خود می گیرند [۹-۱۱].

اگر تنش های پسماند به هنگام طراحی قطعات کامپوزیتی در نظر گرفته نشده و یا به درستی محاسبه نگردند، ضریب اطمینان بیشتری در طراحی لازم خواهد بود. این امر منجر به تولید قطعات غیر بهینه گردیده و استحکام و وزن سازه را افزایش می دهد [۱۲].

امروزه در برخی موارد و با وجود بسیاری از محدودیت ها، امکان اندازه گیری تنش های پسماند، با روش های مختلف مسیر گردیده است و هنوز برای دستیابی به یک روش عمومیت یافته و قابل استفاده در تمام موارد، تلاش می شود.

^۱ Delamination

پس همان طور که گفته شد تنش های پسماند، تنش هایی هستند که وجود آن ها جهت ایجاد تعادل نیرویی بین قطعه و محیط الزامی نیست. این تنش ها را می توان از جنبه های مختلفی از قبیل روش های ایجاد و علل پیدایش آن ها و نیز تأثیرشان بر عمر قطعات مورد بررسی قرار داد.

۲.۱ روش های ایجاد تنش های پسماند

کلیه روش های ایجاد تنش های پسماند را می توان به چهار گروه اصلی طبقه بندی کرد: روش های مکانیکی، گرمایی، پوشش دهی و ماشین کاری. این روش ها عموماً برای همه فلزات قابل استفاده اند، اما کاربرد برخی از آن ها محدود به خانواده خاصی از فلزات است.

۱.۲.۱ روش های مکانیکی

روش های مکانیکی ایجاد تنش های پسماند همگی شامل اعمال بار خارجی تا رسیدن به تغییر شکل پلاستیک موضعی می باشند. پس از برداشتن بار خارجی، در اثر پدیده بازگشت فنری، تنش های پسماند کششی و فشاری در قطعه ایجاد خواهد شد. بارگذاری تا پلاستیک شدن سطح ادامه پیدا می کند پس از برداشته شدن بار در سطح، تنش پسماند به وجود خواهد آمد که در جهت مخالف تنش اولیه است. پس از حذف بار هر دو نوع تنش پسماند کششی و فشاری جهت ارضای معادلات تعادل ($\sum M = 0, \sum F = 0$) به وجود خواهد آمد. یک روش متداول ایجاد تنش پسماند، اعمال بار کششی بیش از حد در محلی است که در معرض بار کششی قرار دارد. در نتیجه این کار، در نزدیکی ترک ها به دلیل تمرکز تنش، تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد و در نتیجه پس از برداشتن بار، در نزدیکی ترک ها تنش پسماند فشاری

به وجود می آید که این تنش پسماند در بارگذاری های کشش سه بعدی، باعث افزایش ضریب اطمینان می شود [۱-۲].

متداول ترین روش های مکانیکی ایجاد تنش پسماند فشاری، نورد موضعی^۱ و ساچمه زنی^۲ می باشند. هر دو فرایند با ایجاد تغییر شکل پلاستیک موضعی همراه اند. در نورد موضعی این کار با غلتک های باریک و در ساچمه زنی با ساچمه های کوچک انجام می شود. از نورد سطحی اغلب برای افزایش عمر خستگی پیچ ها و مهره های ساخته شده از فولاد های مقاوم استفاده می شود [۱۳-۱۴].

۲.۲.۱ روش های گرمایی

در اغلب فرایندهای شکل دهی که با تغییرات دمایی همراهند، تنش های پسماند ایجاد می شوند که ممکن است برای عمر قطعه مضر یا مفید باشند. به طور مثال سخت کاری سطحی یکی از قدیمی ترین روش های افزایش استحکام قطعات می باشد. در نتیجه این فرایند، قطعاتی با پوسته سخت ایجاد می شود که دارای تنش پسماند فشاری اند. سخت کاری سطحی را می توان به روش های مختلفی مانند سخت کاری القائی، کربوریزه کردن، نیتریده کردن و آبدهی انجام داد. البته عمق تنش پسماند ناشی از سخت کاری القائی بیش تر از روش های کربوریزه کردن و نیتریده کردن می باشد و از این رو نسبت به آن ها مزیت دارد. همچنین حرارت ناشی از فرایند جوشکاری نیز باعث ایجاد تنش کششی در سطح قطعه و در نتیجه کاهش عمر خستگی می شود [۱-۲].

¹ Localized Rolling

² Shot Peening

۳.۲.۱ روش های پوشش دهی

پوشش دهی اغلب به منظور افزایش مقاومت خوردگی و زیباسازی قطعات انجام می شود. پوشش دهی در اکثر موارد به دلیل ایجاد تنش پسماند کششی، باعث کاهش چشم گیر عمر می شود که این عمر بستگی به عمق پوشش دهی و مواد به کار رفته دارد [۱-۲]. به طور مثال، پوشش دهی با فلزات نیکل و کروم باعث کاهش چشم گیر در عمر قطعه می شود، در حالی که پوشش دهی با فلزات دیگر اثر کم تری بر عمر خستگی دارد. همچنین می توان با انجام فرایندهایی مانند ساچمه زنی یا سخت کاری سطحی، استحکام خستگی قطعه را با ایجاد تنش پسماند فشاری به حالت اولیه بازگرداند.

۴.۲.۱ روش های ماشین کاری

مشخص شده است که ماشین کاری باعث تغییر عمر خستگی قطعات می گردد. ماشین کاری از چهار جهت سبب این تغییر عمر می شود: انجام کار سرد، ایجاد تغییر در زبری سطح، ایجاد تغییر فاز در ماده و ایجاد تنش پسماند [۱۵]. در این بین تنش پسماند اغلب دارای نقش اساسی در تغییر عمر خستگی است. در حین ماشین کاری سه منطقه به ترتیب از سطح به طرف داخل ماده تشکیل می شود: ۱- قسمت تغییر شکل پلاستیک یافته، ۲- قسمت تغییر شکل الاستیک یافته و ۳- قسمت تغییر شکل نیافته. در نتیجه پس از اتمام ماشینکاری، تنش پسماند بوجود می آید. اندازه و علامت تنش پسماند حاصل به سرعت نسبی ابزار و ماده، فشار و هندسه ابزار، نرخ براده برداری و روش خنک کاری بستگی دارد. بسیاری از فرایندهای ماشینکاری باعث ایجاد تنش پسماند کششی در سطح و تنش پسماند فشاری در قسمت های زیری سطح می شود. به دلیل کم بودن عمق تنش پسماند، غالباً پولیش کردن باعث از بین رفتن بخش عمده ای از تنش پسماند بوجود آمده می شود. سنگ زدن نیز باعث ایجاد تنش

پسماند در قطعه می شود. سنگ زدن معمولی با سرعت بالا و خنک سازی با آب یا هوا باعث ایجاد تنش پسماند کششی در سطح شده، عمر خستگی قطعه را کاهش می دهد. این در حالی است که سنگ زدن ملایم با سرعت کم و استفاده از روغن به عنوان خنک کن، با ایجاد تنش پسماند فشاری نقش مؤثری در افزایش عمر خستگی دارد [۱-۲].

۳.۱ دسته بندی تنش های پسماند در کامپوزیت ها

تنش های پسماند در کامپوزیت ها به دو دسته کلی تنش های میکروسکوپی و تنش های ماکروسکوپی تقسیم بندی می شوند.

۱.۳.۱ تنش های میکروسکوپی

این تنش ها در ریز ساختار کامپوزیت و به علت انقباض و انبساط متفاوت الیاف و ماتریس در اثر عواملی نظیر خشک شدن از دمای پخت تا دمای عادی و یا جذب رطوبت و به دلیل تفاوت ضرایب انبساط حرارتی آنها بوجود می آیند. تنش های پسماند در رزین به صورت کششی و در الیاف به صورت فشاری هستند. تنش های میکروسکوپی تابعی از درصد حجمی الیاف، ضخامت فاز مشترک الیاف و رزین و غیر یکنواخت بودن فاز مشترک هستند [۱۶].

۲.۳.۱ تنش های ماکروسکوپی

این تنش ها در ابعادی که نسبت به ریز ساختار قطعه بزرگ است، عمل نموده و تقریباً مقادیر ثابتی دارند و در کل قطعه متعادلند و به دو دلیل زیر در کامپوزیت ها بوجود می آیند [۳]:

الف) انقباض و انبساط متفاوت لایه های متوالی به دلیل اختلاف جهات اصلی لایه ها

ب) انجماد غیر یکنواخت قطعه به علت تغییرات شدید دما در حین ساخت.

۴.۱ انواع تنش های پسماند در کامپوزیت ها

تنش های پسماند در کامپوزیت ها در اثر عملیات حرارتی پخت و جذب رطوبت توسط کامپوزیت ها می باشد که در زیر توضیح مختصری در مورد آن ها داده شده است.

۱.۴.۱ تنش های پسماند ناشی از عملیات پخت

در کامپوزیت های پلیمری، تنش های پسماند ناشی از عملیات پخت به دو علت شیمیایی و حرارتی بوجود می آیند. هنگامی که پیوند های سراسری شروع می شود، انقباض شیمیایی باعث انقباض رزین می گردد. اغلب پیوند های سراسری در بالاترین دما که دمای پخت نامیده می شود، رخ می دهد. لذا رزین می تواند به حد کافی ویسکوز باقی مانده تا تنش های پسماند به صورت کامل آزاد گردند. از آنجا که انقباض شیمیایی ماتریس پلیمری تقریباً ۰.۶٪ و نقش کرنش های شیمیایی برای یک سیکل پخت نوعی کمتر از ۰.۴٪ می باشد، نقش آنها در تنش های پسماند ناچیز است. از طرف دیگر تغییر شکل کامپوزیت در جهت عمود بر الیاف بسیار بزرگتر از جهت طولی می باشد. همچنین الیاف تقویت کننده، تغییر شکل شیمیایی و حرارتی بسیار کمی از خود نشان می دهند، اما ماتریس پلیمری ضریب انبساط حرارتی بالایی داشته و تغییر شکل زیادی را متحمل می شود [۱۷].

هنگامی که تغییر شکل ها یکدیگر را متعادل می کنند و سازه شکل می گیرد، این تفاوت ها باعث پدید آمدن تنش های پسماند می شوند. از آنجا که نقش کرنش های شیمیایی در تنش های پسماند ناشی از عملیات پخت کم است، این نوع تنش ها را عموماً تنش های پسماند حرارتی می نامند [۱۷].

۲.۴.۱ تنش های پسماند رطوبتی

تنش های پسماند رطوبتی در کامپوزیت های با ماتریس آلی و به دلیل اختلاف در تورم در اثر رطوبت جذب شده بوجود می آیند. اگرچه توزیع دما معمولاً یکنواخت است، توزیع رطوبت غالباً غیر یکنواخت می باشد. انتشار بسیار آهسته رطوبت یکی از دلایل این ناهمگونی است. این نوع تنش ها به علی استفاده از کامپوزیت ها در محیط مرطوب بوجود می آیند و می توانند اثر تنش های پسماند حرارتی را کاهش داده و یا از بین ببرند [۲۰-۱۸].

۵.۱ روش های اندازه گیری تنش های پسماند

اندازه گیری تنش های پسماند عموماً بر پایه روش های غیر مستقیم متکی است. در شکل ۲.۱ روش های مختلف اندازه گیری تنش های پسماند نشان داده شده است. Withers & Bhadeshia در تحقیقات مروری خود روش های اندازه گیری تنش های پسماند و منشأ و طبیعت این تنش ها را مورد مطالعه قرار داده اند [۲-۱]. جزئیات روش های مختلف و مقایسه میان آن ها در منابع مختلف قابل دسترسی است [۲۲-۲۱]. در حالت کلی روشهای اندازه گیری تنش های پسماند به سه دسته عمده تقسیم می شوند.

دسته اول روش های مکانیکی مخرب^۱ و نیمه مخرب^۲ هستند، که نیاز به مقطع زدن در قطعه و یا برداشتن مقداری از ماده آن را دارند. در روش های مکانیکی که از کرنش سنج^۳ برای اندازه گیری کرنش های پسماند استفاده می شود، باید به طریقی تنش های محبوس در حضور کرنش سنج آزاد شوند تا کرنش سنج بتواند تغییر در کرنش را به سبب رها شدن تنش ثبت

^۱ Destructive

^۲ Semi-Destructive

^۳ Strain Gage

کند. کرنش سنج کاملاً نسبت به گذشته قطعه بی تفاوت بوده و تنها تغییرات کرنش را پس از نصب اندازه گیری می کند. بنابراین روش های مکانیکی روش هایی مخرب یا نیمه مخرب هستند. تنش های پسماندی که در قطعه وجود دارد، از اندازه گیری کرنش رها شده بدست می آید. از این دسته، روشی که بیشترین کاربرد را دارد روش سوراخکاری مرکزی^۱ می باشد [۲۳-۲۱].

دسته دوم شامل روش های نوری می گردد که روش های غیر مخرب یا نیمه مخرب هستند. روش های نوری برای اندازه گیری تنش های پسماند از فن آوری پیچیده تری استفاده نموده و از دقت مناسبی برخوردارند. با استفاده از اشعه X می توان به صورت غیر مخرب تنش پسماند را در لایه سطحی قطعه اندازه گیری کرد، ولی استفاده از آن برای لایه های میانی به برداشتن متوالی لایه های فوقانی آن لایه نیازمند است، که باعث تخریبی شدن این روش می گردد [۲-۲۷ و ۲۵-۲۶].

دسته سوم شامل روش های غیر مخرب می گردد که خواصی از مواد را که در حالت تنش دار و عاری از تنش مقادیر متفاوتی را اخذ می نمایند، اندازه گیری می کنند. این روش ها خود به روش های فراصوتی و مغناطیسی تقسیم می شوند و انتخاب روش بستگی به اطلاعات مورد نیاز برای تحقیق و یا کنترل کیفیت و یا آنکه این روش ها فقط در لایه سطحی و یا ناحیه زیر سطحی بررسی شوند، دارد. مهمترین نقیصه بسیاری از روش های غیر مخرب آن است که مقدار پارامتر فیزیکی مورد اندازه گیری تنها تابعی از تنش پسماند نیست. این مقدار غالباً با عواملی چون تغییرات در ترکیب فلز، فاز های فلزی موجود در ماده و اندازه ماده تحت تأثیر

^۱ Hole Drilling method