



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی مکانیک

اندازه گیری تنشهای پسماند غیریکنواخت با استفاده از روش

## Ring-Core

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

نگارش:

محسن صدری

استاد راهنما:

دکتر رسول محرمی

مهرماه ۱۳۹۰

به نام نامی  
دوست



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی مکانیک

اندازه گیری تنشهای پسماند غیریکنواخت با استفاده از روش

## Ring-Core

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

نگارش:

محسن صدری

استاد راهنما:

دکتر رسول محرمی

مهرماه ۱۳۹۰

## تقدیم

آنان که خاک را به نظر کیمیا کنند  
آیا بود که گوشه ی چشمی به ما کنند.

این مجموعه تقدیم می شود به پیشگاه پاک امام عصر(عج)، آفتاب مهربان  
عالم امکان.

## سپاسگزاری

از درگاه حضرت دوست به دلیل انجام این مطالعه سپاسگزارم. امید است با تمامی نقصانها رضای آن سرچشمه وجود را فراهم کرده باشد.

از زحمات بی دریغ استاد راهنمای گرامی، آقای دکتر رسول محرمی که راهنمایی‌های ایشان در به ثمر رسیدن این پژوهش نقش ویژه ای داشت قدردانی می نمایم.

از پدر، مادر، برادر و خواهر عزیزم نیز که در همه ی لحظات دشوار زندگی مایه ی دلگرمی و آرامشم بوده اند ممنونم.

در پایان از دکتر اسماعیل پورسعیدی و دکتر مجتبی آیت اللهی که داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.

محسن صدری

مهرماه ۱۳۹۰

## اعلان منحصر به فرد بودن پایان نامه

اینجانب محسن صدری متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه زنجان بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در منابع ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است/

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت/

کلید نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه زنجان می باشد/ هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه زنجان ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

محسن صدری

امضا

## چکیده

به علت اثرات قابل توجه تنش های پسماند بر کارایی و عمر سازه های مهندسی، این تنش ها در بررسی های مربوط به تحمل پذیری وجود عیوب بویژه ترک ها مد نظر قرار میگیرند. در صورتی که اطلاعات مناسبی راجع به بزرگی و توزیع تنشهای پسماند در دسترس نباشد، نتایج حاصل از آنالیزهای مهندسی قابل اعتماد نبوده و از دیدگاه ایمنی انسانی و دیدگاه اقتصادی مشکلات احتمالی زیادی ایجاد میگردد. به دلیل اهمیت این نوع تنشها در ترکیب با بارهای خارجی در طراحی و تخمین عمر سازه های مهندسی، تحلیل و شناخت ماهیت این نوع تنشها در علم مهندسی از جایگاه ویژه ای برخوردار است. همین امر و همچنین عدم وجود اطلاعات و قوانین کلی برای تعیین اندازه و ماهیت دقیق آن بسیاری از پژوهشگران را بر آن داشته است که در این زمینه به مطالعه و پژوهش بپردازند. از جمله زمینه های مورد توجه در این حوزه، اندازه گیری تنشهای پسماند است. برای اندازه گیری تنش های پسماند روش های متنوعی مورد استفاده میباشد که برخی از آنها مبتنی بر آزاد کردن مکانیکی تنش و بررسی تغییرات میدان کرنش میباشد. در این پروژه ابتدا اصول تئوری تکنیک Ring-Core برای محاسبه تنش های پسماند ارائه شده و سپس روابط لازم برای محاسبه تنش های پسماند غیر یکنواخت در ضخامت یک قطعه با رفتار الاستیک خطی به روش انتگرالی استخراج شده است. در ادامه روش محاسبه ضرایب مورد استفاده در محاسبه تنش تشریح می شود.

فهرست علائم

فهرست نمادهای انگلیسی:

$E$ : مدول الاستیسیته

$A$  و  $B$ : ضرایب ثابت برای حالت شیار حلقوی سراسری

$\bar{A}$  و  $\bar{B}$ : ضرایب ثابت برای حالت شیار حلقوی ناقص

$H$ : عمق شیار حلقوی در حالت یکنواخت

$D_1$ : قطر داخلی شیار حلقوی

$D_0$ : قطر خارجی شیار حلقوی

$a$ ,  $b$  و  $c$ : راستاهای  $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  درجه قرارگیری کرنش سنجها

$z$ : گام پیشروی در حالت غیریکنواخت

$a_{ni}$ : مولفه های ماتریس ضرایب  $a$  برای حالت غیریکنواخت

$b_{ni}$ : مولفه های ماتریس ضرایب  $b$  برای حالت غیریکنواخت

$P$ : ماتریس تنش هیدرواستاتیک

$Q$ : ماتریس تنش برشی

$p$ : ماتریس کرنش هیدرواستاتیک

$q$ : ماتریس کرنش خالص

$m$ : پارامتر بدون بعد نسبت تنش

فهرست نمادهای یونانی:

$\sigma$ : تنش

$\alpha$ : زاویه بین تنش ماکزیمم و کرنش سنج  $a$

$\tau$ : تنش برشی

$u$ : نسبت پواسون



$\varepsilon$ : کرنش

$\Delta$ : تغییرات یک پارامتر

زیرنویسها:

$\gamma$ : تنش تسلیم

$r$ : راستای شعاعی

$t$ : نشان دهنده حالت کششی

$\theta$ : راستای زاویه ای

$r\theta$ : راستای تنش برشی

*after*: حالت بعد از سوراخکاری

*before*: حالت قبل از سوراخکاری

$i$ : شماره مرحله بارگذاری

$n$ : شماره مرحله براده برداری

$p$ : حالت پلاستیک

$c$ : حالت ماشین کاری

*min*: حالت کمینه

*max*: حالت بیشینه

*app*: اعمال شده

## فهرست مطالب

أ.....	تقديم
ب.....	سپاسگزارى
ج.....	اعلان منحصر به فرد بودن پايان نامه
د.....	چکیده
ه.....	فهرست علائم
ز.....	فهرست مطالب
ط.....	فهرست اشکال
ک.....	فهرست جداول
	فصل اول
۲.....	۱. مقدمه
۲.....	۱-۱ تنشهای پسماند
۳.....	۲-۱ اثرات تنشهای پسماند بر رفتار سازه ها و لزوم اندازه گیری آنها
۶.....	۳-۱ روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند
۷.....	۴-۱ مقایسه روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند و پارامترهای انتخاب روش اندازه گیری
۱۳.....	۵-۱ تکنیک آزادسازی مکانیکی تنش برای اندازه گیری تنشهای پسماند
۱۵.....	۱-۵-۱ مقایسه روشهای <i>HOLE-DRILLING</i> و <i>RING-CORE</i>
	فصل دوم
۱۸.....	۲. مروری بر کارهای انجام شده
۱۸.....	۱-۲ پژوهشهای مربوط به توسعه تکنیک <i>HOLE-DRILLING</i>
۲۲.....	۲-۲ پژوهشهای مربوط به توسعه تکنیک <i>RING-CORE</i>
۲۵.....	۳-۲ تعریف موضوع پژوهش
	فصل سوم
۲۸.....	۳. تئوری مسئله
۲۸.....	۱-۳ تحلیل تنشهای یکنواخت در اطراف یک شیار حلقوی در یک ورق
۳۰.....	۲-۳ تحلیل تنشهای یکنواخت در اطراف یک شیار ناقص حلقوی در یک ورق
۳۱.....	۳-۳ محاسبه تنشها و راستای اصلی
۳۲.....	۱-۳-۳ محاسبه ضرایب <i>A</i> و <i>B</i>
۳۳.....	۲-۳-۳ معیار یکنواختی تنشهای پسماند
۳۴.....	۴-۳ تحلیل تنش های غیریکنواخت در اطراف یک شیار حلقوی
۳۶.....	۵-۳ محاسبه تنشهای پسماند غیریکنواخت در ضخامت با استفاده از تکنیک <i>RING-CORE</i>
۴۰.....	۱-۵-۳ محاسبه ضرایب مورد نیاز $\bar{A}$ و $\bar{B}$

۴۲.....	۶-۳ اندازه گیری تنشهای پسماند بزرگ با استفاده از روش <i>RING-CORE</i> .....
	فصل چهارم
۴۵.....	۴. آنالیز المان محدود.....
۴۶.....	۱-۴ مدلسازی مسئله.....
۵۸.....	۲-۴ بررسی اثرات پلاستیسیته ناشی از ایجاد شیار حلقوی با استفاده از تکنیک المان محدود.....
	فصل پنجم
۶۰.....	۵. نتایج و خطاها.....
۶۰.....	۱-۵ نتایج محاسبه تنشهای پسماند یکنواخت.....
۶۳.....	۲-۵ نتایج محاسبه تنشهای پسماند غیریکنواخت.....
۶۷.....	۱-۲-۵ مقایسه نمونه ای از نتایج با پژوهشهای قبلی.....
۶۸.....	۳-۵ بررسی اثرات پلاستیسیته.....
۶۸.....	۱-۳-۵ اثرات پلاستیسیته در بارگذاری تک محوره.....
۷۲.....	۲-۳-۵ اثرات پلاستیسیته در بارگذاری دو محوره.....
۷۵.....	۳-۳-۵ بررسی خطای پلاستیک و تصحیح نتایج تنشهای محاسبه شده.....
۷۹.....	۴-۳-۵ مثالی از نحوه تصحیح نتایج با استفاده از روش ارائه شده.....
	فصل ششم
۸۲.....	۶. جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۸۲.....	۱-۶ نتیجه گیری.....
۸۳.....	۲-۶ پیشنهادات برای کارهای آتی.....
۸۴.....	فهرست منابع.....
۸۷.....	پیوست.....

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ - حوزه های تاثیرات تنشهای پسماند بر رفتار سازه ها..... ۴
- شکل ۲-۱ - نحوه بررسی تاثیرات تنشهای پسماند در مهندسی مکانیک ..... ۵
- شکل ۳-۱ روش لایه برداری با ست آپ انعطاف و سنسور جابجایی (سمت چپ)-با استفاده از کرنش سنج (راست) ..... ۱۴
- شکل ۴-۱- مشخصات هندسی و محل قرار گرفتن کرنش سنجهای Ring-Core و Hole-Drilling ..... ۱۶
- شکل ۱-۲- مقایسه نتایج تنشهای محاسبه شده به وسیله کرنش سنجی سوراخ با استفاده از ۴ تکنیک مختلف توسط Schajar ..... ۱۹
- شکل ۲-۲- نتایج محاسبه تنشهای پسماند خطی با استفاده از روش انتگرالی توسط Schajar ..... ۲۰
- شکل ۳-۲- مرزهایی که تنشهای محاسبه شده با احتمال ۹۰٪ نسبت به تنش واقعی قرار دارند(روش انتگرالی (a) و سری توانی (b)) با انحراف استاندارد ۳ میکرون ..... ۲۱
- شکل ۴-۲- ثابت سازی مرکزی ساپورت ایجاد شیار حلقوی و نصب کرنش سنج گلبرگی در نقطه مورد نظر ..... ۲۳
- شکل ۵-۲- نصب کرنش سنج گلبرگی در نقطه مورد نظر ..... ۲۳
- شکل ۶-۲- ایجاد شیار حلقوی به صورت مرحله به مرحله ..... ۲۳
- شکل ۷-۲- نتایج تنشهای پسماند محاسبه شده موجود در سازه تست شده ..... ۲۴
- شکل ۸-۲- مقایسه نتایج روش گام به گام با تنش واقعی ..... ۲۴
- شکل ۹-۲- نتایج محاسبه تنشهای پسماند یکنواخت و غیریکنواختبا استفاده از روش گام به گام ..... ۲۵
- شکل ۱-۳- حالت تنش در یک صفحه بدون شیار حلقوی در نقطه  $P(r,\theta)$  ..... ۲۸
- شکل ۲-۳- حالت تنش در یک صفحه با شیار حلقوی کامل در نقطه  $P(r,\theta)$  ..... ۲۹
- شکل ۳-۳- حالت تنش دومحوره در یک صفحه با شیار کامل در نقطه  $P(r,\theta)$  ..... ۳۰
- شکل ۴-۳- ابعاد شیار و کرنش سنج قابل استفاده ..... ۳۱
- شکل ۵-۳- درصد کرنش در برابر عمق نرمال شده شیار برای تنش یکنواخت ..... ۳۳
- شکل ۶-۳- استفاده از اصل جمع آثار برای اعمال بارگذاری در تعیین ضرایب ..... ۳۴
- شکل ۷-۳- استفاده از اصل جمع آثار برای محاسبه ضرایب حالت بارگذاری غیر یکنواخت ..... ۳۵
- شکل ۸-۳- حالت تنش دومحوره متغیر در ضخامت و فرض مورد استفاده برای تبدیل رابطه انتگرالی به حاصل جمع ..... ۳۶
- شکل ۹-۳- نمونه ای از کرنش سنجهای قابل استفاده در روش Ring-Core ..... ۳۷
- شکل ۱۰-۳- راستای تنشهای اصلی و کرنشهای اندازه گیری شده ..... ۳۸
- شکل ۱۱-۳- نحوه بارگذاری برای محاسبه ضریب  $\bar{A}$  ..... ۴۱
- شکل ۱۲-۳- نحوه بارگذاری برای محاسبه ضریب  $\bar{B}$  ..... ۴۲
- شکل ۱-۴- مدل مش بندی شده برای شبیه سازی و محاسبه ماتریسهای ضرایب ..... ۴۸
- شکل ۲-۴- حالتیهای بارگذاری برای محاسبه مولفه های ماتریسهای ضرایب ..... ۵۰
- شکل ۱-۵- هندسه شیار حلقوی و موقعیت کرنش سنجهای و تنشهای ماکزیمم و مینیمم ..... ۶۰
- شکل ۲-۵- ضرایب  $\bar{A}$  و  $\bar{B}$  برای محاسبه تنشهای پسماند یکنواخت در ضخامت ..... ۶۱
- شکل ۳-۵- درصد خطا برای تنشهای پسماند تک محوره با بارگذاری ۵۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال ..... ۶۲
- شکل ۴-۵- خطای محاسبه تنشهای پسماند برای بارگذاری دومحوره ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال ..... ۶۳
- شکل ۵-۵- حالت بارگذاری دومحوره متغیر در ضخامت به صورت خطی ..... ۶۴
- شکل ۶-۵- تغییرات کرنش در سه راستای  $b, a$  و  $c$  با تغییر اندازه گام برای بارگذاری غیریکنواخت تک محوره ..... ۶۵
- شکل ۷-۵- تغییرات کرنش در سه راستای  $a, b$  و  $c$  با تغییر اندازه گام برای بارگذاری غیریکنواخت دومحوره ..... ۶۵
- شکل ۸-۵- نتایج تنشهای پسماند غیریکنواخت در ضخامت برای شعاع شیار حلقوی ۴ میلیمتر ..... ۶۶
- شکل ۹-۵- نتایج تنشهای پسماند غیریکنواخت دومحوره در ضخامت برای شعاع شیار حلقوی ۸ میلیمتر ..... ۶۷
- شکل ۱۰-۵- مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج مرجع [۲۳] ..... ۶۸
- شکل ۱۱-۵- تشابه منحنی تنش-کرنش واقعی فولاد زنگ نزن به منحنی تنش-کرنش دوخطی ..... ۶۹

- شکل ۱۲-۵- تاثیرات پلاستیسیته روی محاسبه تنشهای پسماند ..... ۷۰
- شکل ۱۳-۵- درصد خطاهای پلاستیک محاسبه شده برای عمقهای مختلف شیار حلقوی ..... ۷۰
- شکل ۱۴-۵- بازه بهینه محاسبه تنشهای پسماند تک محوره ..... ۷۱
- شکل ۱۵-۵- روند تغییرات خطا با تغییر مدول پلاستیک ..... ۷۱
- شکل ۱۶-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.125$  ..... ۷۲
- شکل ۱۷-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.25$  ..... ۷۳
- شکل ۱۸-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.375$  ..... ۷۳
- شکل ۱۹-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.5$  ..... ۷۳
- شکل ۲۰-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.625$  ..... ۷۴
- شکل ۲۱-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.75$  ..... ۷۴
- شکل ۲۲-۵- تغییرات خطای پلاستیک برای حالت دومحوره با تغییرات  $Z/D$  و نسبت  $\sigma_{app}/\sigma_y$  برای  $p1=0.875$  ..... ۷۴
- شکل ۲۳-۵- نمونه ای از معادلات برازش شده از توابع خطا برای حالت  $p1=0.5$  ..... ۷۶

## فهرست جداول

جدول ۱a-۱- مقایسه روشهای مختلف از نظر عملی و کاربردی	۸
جدول ۱b-۱- مقایسه روشهای مختلف از نظر مواد و شرایط قابل استفاده	۹
جدول ۱c-۱- مقایسه روشهای مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی	۱۰
جدول ۱-۲- مقایسه روشهای مختلف از نظر عمق اندازه گیری تنش، عوامل تولید و تاثیر این تنش ها در صنعت	۱۲
جدول ۴-۱- ضرایب $\bar{A}$ برای گام پیشروی ۱ میلیمتر	۵۰
جدول ۴-۲- ضرایب $\bar{B}$ برای گام پیشروی ۱ میلیمتر	۵۱
جدول ۴-۳- ضرایب $\bar{A}$ برای گام پیشروی ۰/۵ میلیمتر	۵۲
جدول ۴-۴- ضرایب $\bar{B}$ برای گام پیشروی ۰/۵ میلیمتر	۵۳
جدول ۴-۵- ضرایب $\bar{A}$ (ستون ۱ تا ۱۲) برای گام پیشروی ۰/۲۵ میلیمتر	۵۴
جدول ۴-۶- ضرایب $\bar{A}$ (ستون ۱۲ تا ۲۴) برای گام پیشروی ۰/۲۵ میلیمتر	۵۵
جدول ۴-۷- ضرایب $\bar{B}$ (ستون ۱ تا ۱۲) برای گام پیشروی ۰/۲۵ میلیمتر	۵۶
جدول ۴-۸- ضرایب $\bar{B}$ (ستون ۹ تا ۱۶) برای گام پیشروی ۰/۲۵ میلیمتر	۵۷
جدول ۵-۱- نمونه ای از نتایج بدست آمده برای تنشهای پسماند یکنواخت محاسبه شده با تکنیک Ring-Core	۶۲
جدول ۵-۲- نتایج تنشها برای بارگذاری دو محوره	۶۳
جدول ۵-۳- معادلات درجه دوم برازش شده از تغییرات خطا	۷۶
جدول ۵-۴- نمودار ضرایب معادله درجه ۲ برازش شده از توابع خطا - قسمت اول	۷۷
جدول ۵-۵- نمودار ضرایب معادله درجه ۲ برازش شده از توابع خطا - قسمت دوم	۷۷
جدول ۵-۶- توابع برازش شده برای ضرایب $c_1$ ، $c_2$ و $c_3$	۷۷
جدول ۵-۷- مقادیر $k_{ij}$ به ازای تغییرات $p_2$	۷۸
جدول ۵-۸- مقادیر تنش محاسبه شده با فرض الاستیک	۷۹
جدول ۵-۹- نتایج تنش تصحیح شده با استفاده از روش پیشنهادی	۷۹

# فصل اول

مقدمه

## ۱. مقدمه

## ۱-۱- تنشهای پسماند

تنشهای پسماند به آن دسته از تنشها اطلاق می شود که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی مانده و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. این تنشها در حالت خودتعادلی بوده و مجموع نیروها و کویلهای حاصله در کل سازه صفر می باشد. بررسیها روی سازه های مهندسی نشان می دهند که تنشهای پسماند در ترکیب با بارهای وارده خارجی می توانند سبب کارافتادگی سازه در بارهایی به مراتب کمتر از بارهای منطقه ایمن طراحی گردند [۱]. اما توزیع تنشهای پسماند در مواد مختلف لزوماً مضر نیست. مثلاً از دیدگاه مکانیک شکست تنها تنشهای کششی سبب رشد ترک می شوند و تنشهای فشاری نه تنها مضر نیستند بلکه سبب جلوگیری از رشد ترک می گردند. به طور کلی اغلب فرآیندهای ساخت و تولید در قطعه سبب تولید تنشهای پسماند می شوند. از مهمترین منابع تولید تنشهای پسماند می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ایجاد تنشهای پسماند در فرآیندهای مونتاژ نظیر جوشکاری و اتصالات مکانیکی
- ایجاد تنشهای پسماند در فرآیندهای شکل دهی نظیر فورجینگ و نوردکاری
- ایجاد تنشهای پسماند در فرآیندهای ماشینکاری نظیر سنگزنی و فرزکاری
- ایجاد تنشهای پسماند در فرآیندهای تولید نظیر ریخته گری
- ایجاد تنشهای پسماند در فرآیندهای پوشش دهی نظیر اسپری مذاب
- ایجاد تنشهای پسماند در عملیات حرارتی نظیر مارتزیتی کردن فولاد، سخت کردن عمیق و سطحی و ...

در این فرآیندها بدلیل ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک غیریکنواخت تنشهای پسماند ایجاد می شوند. از دیدگاهی دیگر عوامل ایجاد تنشهای پسماند به سه دسته زیر تقسیم می شود:

- تاثیرات دمایی مثل جوشکاری و یا عملیات حرارتی؛
- تاثیرات مکانیکی؛ نظیر فرم دادن سرد
- تاثیرات فیزیکی/شیمیایی؛ مثل تغییر دانه ها در طول فرآیند سرد کردن



تنشهای ایجاد شده ناشی از این عوامل می توانند به صورت محلی<sup>۱</sup> و یا سراسری<sup>۲</sup> در قطعه وجود داشته باشند. تنشهای پسماند محلی در کنترل کیفیت و نگهداری اهمیت بیشتری دارد. چون عامل وجود ناهمگونی در سازه شده و تاثیرات منفی بیشتری بر عمر و پایداری آن می گذارد.

تحلیل این نوع تنشها در علم مهندسی مکانیک از جایگاه ویژه ای برخوردار بوده و اندازه گیری، تخمین و تعیین اندازه و جهت آن موضوع پژوهش بسیاری از محققان رشته مکانیک می باشد.

## ۱-۲- اثرات تنشهای پسماند بر رفتار سازه ها و لزوم اندازه گیری آنها

مطالعات انجام شده روی سازه های مهندسی نشان می دهد که تنشهای پسماند در کارافتادگی سازه ها و قطعات مهندسی تاثیر قابل توجهی دارند. مطالعات انجام شده در مورد رفتار قطعات و سازه ها نشان می دهد تاثیر تنش های پسماند در این ارتباط قابل ملاحظه می باشد. نتایج بررسی ها نشان داده است قطعات مشابه که دارای تنش های پسماند مختلف باشند در شرایط کاری یکسان رفتارهای مختلفی از نظر استحکام خستگی، مقاومت به شکست ترد، خواص خوردگی و پایداری ابعادی نشان می دهند [۲].

در سالهای اخیر، تحقیقات زیادی راجع به تنش های پسماند و عوامل موثر در ایجاد آن و همچنین اثر اینگونه تنش ها در یکپارچگی سازه های تحت بار صورت گرفته است. شکل ۱-۱ برخی از حوزه های متاثر از تنشهای پسماند را نشان داده است [۳].

---

<sup>۱</sup> Local  
<sup>۲</sup> Global



شکل ۱-۱ - حوزه های تاثیرات تنشهای پسماند بر رفتار سازه ها

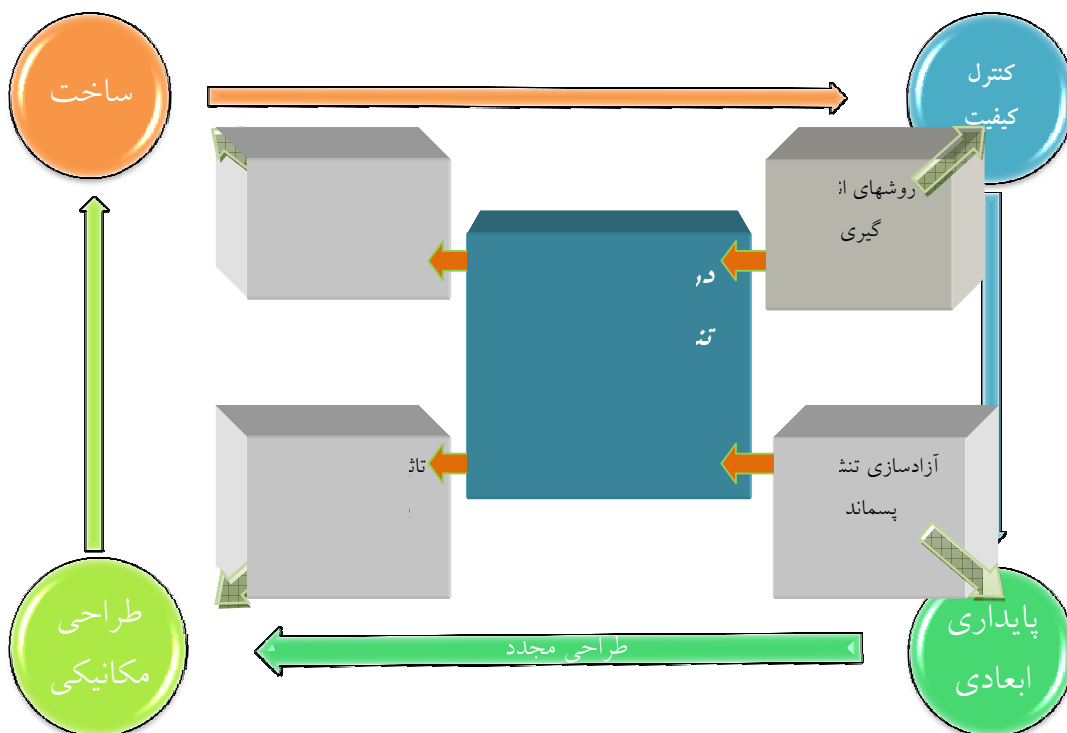
پس قطعاتی که دارای تنشهای پسماند می باشند، در شرایط کاری و بارگذاری مکانیکی یکسان با قطعاتی مشابه که فقط تحت بارگذاری مکانیکی قرار دارند، از نظر خواص مکانیکی نظیر استحکام خستگی و... رفتار متفاوتی از خود نشان می دهند. اگر تاثیرات تنشهای پسماند در قطعه را نتوان با یک روش دقیق تفسیر کرد، برای جلوگیری از کارافتادگی باید از ضرایب اطمینان محافظه کارانه استفاده نمود. که این مسئله خود سبب پیامدهایی نظیر افزایش وزن و حجم سازه، هزینه و ... می-گردد.

تنشهای پسماند به شکلهای مختلفی بر رفتار سازه ها تاثیر می گذارند. این تاثیر می تواند بسته به اندازه و توزیع تنش سبب افت و یا بهبود برخی خواص مکانیکی سازه گردد. چگونگی تاثیر تنشهای پسماند بر برخی خواص مکانیکی مهم در زیر اشاره شده است:

- **خواص خستگی و شکست ترد؛** این خواص با وجود تنشهای پسماند کششی افت می کند ولی وجود تنشهای پسماند فشاری در یک قطعه موجب بهبود این خواص می گردند.
- **خوردگی؛** وجود تنشهای پسماند اعم از کششی و فشاری در سازه ها سبب افت این خاصیت در آنها می شود.

- **استحکام کمانش؛** وجود تنشهای پسماند محلی، ناهمگونی خواص و توزیع غیرهمگن تنشهای پسماند در سازه ها سبب کاهش استحکام کمانش آنها می شود.
- **رفتار مواد؛** وجود تنشهای پسماند می تواند حالت بارگذاری ماده را تغییر دهد. با تبدیل حالت تنش ماده از دوبعدی به سه بعدی، رفتار نرم به ترد تبدیل می شود.
- **پایداری ابعادی؛** تغییر شکلهای ناشی از تنشهای پسماند، می تواند بر تلورانسها، پایداری ابعادی و... تاثیر گذارد.

شکل زیر جایگاه و نحوه تاثیر تنشهای پسماند در مهندسی و طراحی را نشان می دهد:



شکل ۱-۲- نحوه بررسی تاثیرات تنشهای پسماند در مهندسی مکانیک

به دلیل اهمیت کارآیی سازه ها، تنشها در طراحی اولیه و نیز انجام تحلیلهای ایمنی و نیز تحمل پذیری وجود عیوب(به ویژه ترکها) مد نظر قرار می گیرند. چنانچه در انجام تحلیلهای ایمنی اطلاعات مناسبی راجع به بزرگی و توزیع تنشها در اتصالات مورد نظر نباشد بعضا از تخمینهای محافظه کارانه می شود که ممکن است در نهایت منجر به زیر سوال رفتن کاربرد سازه مورد نظر شود. بنابراین وجود اطلاعات کافی از بزرگی و توزیع تنشها در آنالیز ایمنی برای تصمیم گیری درباره ادامه کار، تعمیر و یا توقف سازه مورد نظر ضروری می باشد. و در غیر این صورت نتایج حاصل از

آنالیز ایمنی قابل قبول نخواهد بود. به طور کلی تنش در طراحی سازه ها از دو جنبه تحمل پذیری و حداقل تغییر شکل مورد توجه قرار می گیرد. به دلیل اینکه عوامل مختلفی در به وجود آمدن تنشهای پسماند تاثیرگذارند، در نظر گرفتن مستقیم آنها در طراحی اولیه مشکل می باشد. اما در نظر گرفتن آنها برای تخمین عمر و شرایط کارکرد سازه در بررسی های بعد از ساخت (کنترل کیفیت و تعمیر و نگهداری) کاملاً ضروری می باشد.

روشهای تحلیل تئوری تنش با وجود مزایای قابل توجه مثل ارائه توزیع میدانی تنش و دقت نتایج برای هندسه و شرایط مرزی معین، برای تعیین تنش در هندسه های پیچیده، رفتار مواد متغیر و ... با محدودیتهایی مواجه هستند. به دلیل پیچیدگی مسئله تنشهای پسماند از نظر تحلیلی و وجود پارامترهای مختلف در ایجاد آنها در حال حاضر امکان تحلیل کامل آنها به صورت تئوری وجود ندارد. لذا لزوم اندازه گیری تنشهای پسماند به کمک روشهای تجربی و عددی مشخص می شود. به همین دلیل انواع روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند روز به روز در حال بررسی، پیشرفت و گسترش بیشتر است. در قسمت بعد به مختصری از انواع روشهای موجود اشاره خواهد گردید.

### ۱-۳- روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند

تکنیکهای متعددی برای اندازه گیری تنشهای پسماند وجود دارند. چون تنش به طور مستقیم قابل اندازه گیری نیست، در این تکنیکها از اندازه گیری تغییرات دیگر خاصیتها و رفتار ماده در برابر اعمال تنش برای محاسبه و اندازه گیری تنشهای پسماند استفاده می شود. از جمله کمیتهای قابل اندازه گیری که برای این منظور مورد استفاده قرار می گیرد، کرنش و جابجایی می باشد.

روشهای مختلف بسته به قابلیت ها و مورد کاربرد آنها دارای توانایی ها، مزایا و معایبی می باشند. به عنوان مثال برخی از روشها تنها توصیفی کیفی از توزیع تنش به دست می دهند مانند روش فتوالاستیسیته (البته این روش نیز با ملاحظات قابلیت توصیف کمی از وضعیت تنش نیز به ما خواهند داد)؛ و برخی دیگر روشهای کمی بوده و اطلاعات عددی از اندازه و جهت تنشها به دست می دهند. انواع روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند از نظر میزان تخریب به سه گروه زیر تقسیم می شوند:

➤ **روشهای غیرمخرب؛** روشهای غیرمخرب تاثیر در کارایی قطعه نداشته و پس از انجام تست سازه کارایی خود را از دست نمی دهد. این روشها بر اساس تغییر ساختار ماده در اثر وجود