تحليل تنش هاي پسماند غير يكنواخـت در سازه هاي مهندسي

رسول محرمي [1]
دانشجوي دكترا

ايرج ستاري فر [2]
استاديار

به علت اثرات قابل توجه تنش هاي پسماند بر كارايي سازه هاي مهندسي، اين تنش ها در انجام تحليل‌هاي ايمني و تحمل پذيري وجود عيوب بويژه ترك ها در نظر قرار ميگيرند. بدليل مزيت هاي نسبي بسيار زياد تكنيك كرنش سنجي سوراخ پژوهشهاي زيادي در مورد توسعه قابليت اين تكنيك انجام گرفته و يا در حال انجام است. در اين مقاله ابتدا اصول تئوري تكنيك كرنش سنجي سوراخ براي محاسبه تنش هاي پسماند مرور شده و سپس روابط لازم براي محاسبه تنش هاي پسماند غير يكنواخت در ضخامت يک قطعه با رفتار الاستيک خطي به روش انتگرالي استخراج شده است. در ادامه روش محاسبه ضرايب مورد استفاده در محاسبه تنش تشريح ميشود. با استفاده از روش ارائه شده در اين مقاله و به كمک تكنيک كرنش سنجي سوراخ ميتوان تنش هاي پسماند غير يكنواخت ايجاد شده در فرآيند هاي مختلف ساخت را محاسبه كرد.

واژه‌هاي راهنما : محاسبه تنش هاي پسماند، تنش هاي غير يكنواخت، روش انتگرالي، تكنيک كرنش سنجي سوراخ

۱- مقدمه

مطالعات انجام شده در مورد رفتار قطعات و سازه ها نشان ميدهد تاثير تنش هاي پسماند در اين ارتباط قابل توجه ميباشد. نتايج بررسي ها نشان داده است قطعات مشابه كه داراي تنش هاي پسماند مختلف باشـند در شرايط كاري يكسان رفتارهاي مختلفي از نظر استحكام خستگي، مقاومت به شكست ترد، خواص خوردگي و پايداري ابعادي نشان ميدهند.

در دو دهه اخير، تحقيقات زيادي راجع به تنش هاي پسماند و عوامل موثر در ايجاد آن و همچنين اثر اينگونه تنش ها در يكپارچگي سازه هاي تحت بار صورت گرفته است. شكل (۱) برخي از حوزه هاي متاثر از

[1] نويسنده مسئول، دانشجوي دكتري، دانشكده مهندسي مكانيک، دانشگاه صنعتي اميركبير r_moharami@aut.ac.ir
[2] استاديار، دانشكده مهندسي مكانيک، دانشگاه صنعتي اميركبير sattari@aut.ac.ir

تنش هاي پسماند را نشان داده است[۱]. در حالت کلي، به علت تاثير پذيري ايجاد تنشهاي پسماند از پارامترهاي مختلف در طول فرآيند ساخت، بزرگي و توزيع تنش هاي پسماند قبل از ساخت مشخص نبوده و در طراحي در نظر گرفته نمي شود. از طرف ديگر به علت اثرات قابل توجه تنش هاي پسماند بر کارايي سازه، اين تنش ها در انجام تحليل‌هاي ايمني و تحمل پذيري وجود عيوب بويژه ترك ها در سازه‌هاي ساخته شده مدنظر قرار ميگيرد. در صورتي که اطلاعات مناسبي راجع به بزرگي و توزيع تنشهاي پسماند در دسترس نباشد، نتايج حاصل از آناليز ايمني قابل اعتماد نبوده و از ديدگاه ايمني انساني و ديدگاه اقتصادي مشکلات احتمالي زيادي ايجاد ميگردد[۲، ۳].

به دليل اثر پذيري ايجاد تنش هاي پسماند از پارامتر هاي متنوع فرآيند ساخت و محدوديت هاي روش هاي مدلسازي، مدل سازي اغلب فرآيندهاي ساخت بصورت کامل انجام نميشود. به همين دليل نتايج بدست آمده از مدل سازي فرآيندهاي ساخت براي تخمين تنشهاي پسماند ايجاد شده هميشه قابل اعتماد نبوده و نياز به اعتبار سنجي ميباشد. در اين رابطه توسعه توانايي روشهاي اندازه گيري تنش هاي پسماند بر روي قطعات ساخته شده اهميت داشته و مورد توجه ميباشد. تکنيك مرسومي که براي اندازه گيري تنش پسماند استفاده ميشوند، روش کرنش سنجي سوراخ[1] ميباشد. اين تکنيك يك روش استاندارد و نيمه مخرب جهت اندازه گيري تنش پسماند است و براي تعيين تنش پسماند در نزديك سطوح مواد بکار ميرود[۴، ۵]. اساس اين روش ايجاد یک سوراخ کوچک در قطعه کار داراي تنش پسماند و اندازه گيري کرنش‌هاي موضعي آزاد شده از اين سوراخ کاري ميباشد. با استفاده از روابط الاستيسيته بين تنش ها و کرنش ها، تنش هاي موجود در محل سوراخ ايجاد شده قابل تخمين هستند. روش کرنش سنجي سوراخ با داشتن مزاياي زيادي همچون استاندارد بودن، قابل حمل و نقل بودن تجهيزات، سهولت استفاده و قيمت نسبتا مناسب، داراي محدوديت هايي نيز ميباشد. جهت تخمين دقيق تنش هاي پسماند، لازم است که منابع خطا که مقادير بدست آمده تنش پسماند را تحت تاثير قرار ميدهند را شناسايي و کنترل کرد. بر اساس استاندارد، اعتبار اين روش براي تنش هاي پسماند تا حد حداکثر نصف تنش تسليم جسم ميباشد. از محدوديت هاي ديگر اين تکنيک ميتوان به شرط عدم تغيير تنش در جهت ضخامت اشاره نمود. اين دو مورد مهمترين محدوديت اين تکنيک به شمار ميرود. بدليل مزيت هاي نسبي زياد اين تکنيک پژوهشهاي زيادي در مورد توسعه قابليت اين تکنيک و رفع دو نقيصه اشاره شده در حال انجام است.

اولين مقاله تحقيقي در رابطه اندازه گيري تنش پسماند با استفاده از روش ايجاد سوراخ در سال ۱۹۵۶ توسط Kelsey منتشر گرديد. وي با بررسي تغييرات توزيع تنش در ورق، نازك و عريض که به آن يك تنش صفحه اي يکنواخت اعمال شده بود، روشي را جهت تعيين تنشهاي پسماند ارائه کرد [۶]. Rendler و Vigness [۷] در سال ۱۹۶۶ روش کرنش سنجي سوراخ براي اندازه گيري تنش پسماند را توسعه داده و آنرا به يك روش سيستماتيك تبديل کردند. آنها همچنين با تعريف جديدي در روابط بين کرنش‌هاي اندازه گيري شده و تنش هاي بدست آمده براي سوراخ نفوذ کامل[2]، استفاده از حالت سوراخ نفوذ ناقص[3] در اندازه

[1] Hole-Drilling Strain gage method
[2] Through hole
[3] Blind Hole

گيري را توسعه دادند. Procter و Beaney [۸] در سال ۱۹۷۴ و براي ايجاد سوراخ بدون ايجاد تنش اضافي، از ماشين كاري سايشي با هوا استفاده كردند. Schajer [۹] در سال۱۹۸۱ اولين تحليل عمومي المان محدود از روش كرنش سنجي سوراخ را انجام داد و ضرايب مورد استفاده در محاسبه تنش ها در اين روش را بدست آورد. درسال ۱۹۸۲ Flaman [۱۰] يك روش سوراخ كاري عاري از تنش سوراخكاري را كه درآن از يك مته با دور بسيار بالا جهت ايجاد سوراخ استفاده ميشود توسعه داد. درسال ۱۹۸۸ Schajer [۱۱] با انجام تحليل المان محدود علاوه بر معرفي معيار تشخيص يكنواختي تنش اندازه گيري شده در ضخامت قطعه، ضرايب كاليبراسيون جديدي را براي استفاده در اندازه گيري تنشهاي يكنواخت ارائه كرد.

در سال ۱۹۸۶ روش كرنش سنجي سوراخ به صورت استاندارد ASTM E837 [۱۲] تدوين شد و براي معتبر بودن نتايج محدوديت و شروطي تعيين گرديد. لازم به اشاره ميباشد كه در حالت كلي نميتوان تنش هاي پسماند را با همان دقتي كه تنش ناشي از بارهاي خارجي اندازه گيري ميشود، بدست آورد. جهت تخمين دقيق تنش هاي پسماند، لازم است كه منابع خطا كه مقادير بدست آمده تنش پسماند را تحت تاثير قرار ميدهند را شناسايي و كنترل كرد.

در اين مقاله ابتدا با تحليل تنش هاي يكنواخت در حوزه یک سوراخ كامل بر روي یک ورق نامحدود روابط مربوط به تغييرات كرنش ناشي از ايجاد سوراخ بدست آمده و سپس روابط مشابه در مورد حوزه یک سوراخ ناقص نيز مورد بررسي قرار گرفته است. در ادامه تحليل تنش هاي غير يكنواخت در اطراف یک سوراخ ناقص مورد توجه قرار گرفته و در انتها روابط و تكنيک محاسبه تنش هاي پسماند غير يكنواخت در یک سازه مهندسي ارائه شده است.

۲- تحليل تنش هاي يكنواخت در حوزه یک سوراخ

۱-۲- تحليل تنش هاي يكنواخت در حوزه یک سوراخ كامل

شكل (۲) ناحيه اي از یک صفحه نازک كه تحت تنش يكنواخت تک محوره σ_X ميباشد را نشان مي-دهد. حالت تنش اوليه در هر نقطه مفروض دلخواه $P(R,\alpha)$ از اين صفحه در مختصات قطبي مطابق روابط زير ميباشد.

$$\sigma'_R = \frac{\sigma_X}{2}(1+\cos 2\alpha) \tag{۱}$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_X}{2}(1-\cos 2\alpha) \tag{۲}$$

$$\tau'_{R\theta} = -\frac{\sigma_X}{2}(Sin2\alpha) \tag{۳}$$

اگر در ورق تحت بارگذاري سوراخ كوچكي ايجاد گردد توزيع تنش جديدي بوجود مي آيد. شكل (۳) حالت تنش در نقطه $P(R,\alpha)$ را بعد از ايجاد سوراخ در ورق تحت تنش يكنواخت تک محوره σ_X نشان ميدهد. با در نظر گرفتن یک تابع تنش به فرم رابطه (۴) و در نظر گرفتن روابط تنش قبل از ايجاد سوراخ، رابطه (۵) براي تابع تنش در اين حالت در نظر گرفته ميشود.

$$\varphi = \varphi(R,\theta) \tag{۴}$$

$$\varphi = f_0(R) + f_2(R)\cos 2\theta \tag{۵}$$

$$\nabla^4\varphi = 0 \tag{۶}$$

با جاگذاري رابطه (۵) در رابطه (۶) توابع f_0 و f_2 بصورت روابط زير بدست مي آيد که در اين روابط C_1 تا C_8 ضرایب ثابت میباشند.

$$f_0(R) = C_1R^2\ln r + C_2R^2 + C_3\ln R + C_4 \tag{۷}$$

$$f_2(R) = C_5R^2 + C_6R^4 + \frac{C_7}{R^2} + C_8 \tag{۸}$$

با جاگذاري روابط فوق در رابطه (۵) تابع تنش بصورت رابطه (۹) بازنويسي ميشود.

$$\varphi = C_1R^2\ln R + C_2R^2 + C_3\ln R + C_4 + (C_5R^2 + C_6R^4 + \frac{C_7}{R^2} + C_8)\cos 2\theta \tag{۹}$$

با جاگذاري رابطه تابع تنش (۹) در رابطه تنش شعاعي و تنش محيطي، مولفه تنش شعاعي و تنش محيطي در هر نقطه از ورق تحت تنش محوري يكنواخت در حوزه یک سوراخ کامل بصورت بدست مي آيد.

$$\sigma_R = \frac{1}{R}\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{R^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2} \tag{۱۰}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2\varphi}{\partial R^2} \tag{۱۱}$$

پس از جاگذاري براي تابع تنش فوق، تنش شعاعي و محيطي برابر ميشود با:

$$\sigma_R = C_1(1+2\ln R) + 2C_2 + \frac{C_3}{R^2} - \left(2C_5 + \frac{6C_7}{R^4} + \frac{4C_8}{R^2}\right)\cos 2\alpha \tag{۱۲}$$

$$\sigma_\theta = C_1(3+2\ln R) + 2C_2 + \frac{C_3}{R^2} - \left(2C_5 + 12C_6R^2 + \frac{6C_7}{R^2}\right)\cos 2\alpha \tag{۱۳}$$

بعد از ايجاد سوراخ، مؤلفه تنش شعاعي در هر نقطه از سطح سوراخ که سطح آزاد جديد است صفر مي باشد. همچنين در فاصله دور از لبه سوراخ، بدليل تضعيف اثر سوراخ، مقدار تنش ها با مقادير بدست آمده براي ورق بدون سوراخ برابر خواهد بود. با اعمال شرط مرزي فوق، ضرايب ثابت تعيين شده و مولفه تنش شعاعي و محيطي در نقطه $P(R,\alpha)$ بعد از ايجاد سوراخ در ورق تحت تنش يكنواخت تک محوره σ_X بصورت روابط زير بدست مي آيد. در اين روابط R_0 شعاع سوراخ ايجاد شده و R شعاع نقطه دلخواه از مرکز سوراخ است.

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_X}{2}(1-\frac{1}{r^2}) + \frac{\sigma_X}{2}(1+\frac{3}{r^4}-\frac{4}{r^2})\cos 2\alpha \tag{۱۴}$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_X}{2}(1+\frac{1}{r^2}) - \frac{\sigma_X}{2}(1+\frac{3}{r^4})\cos 2\alpha \tag{۱۵}$$

$$r = \frac{R}{R_0 = a} \qquad (\mathrm{R} \geq \mathrm{R_0})$$

با فرض رفتار الاستيک، تفاضل بين تنش هاي قبل و بعد از سوراخکاري تنش هاي آزاد شده ناشي از سوراخکاري را نشان ميدهد. تغييرات تنش ناشي از ايجاد سوراخ در ورق تحت تنش يکنواخت تک محوره σ_X براي يک نقطه با فاصله مشخص از مرکز سوراخ بصورت روابط زير بدست مي آيد.

$$\Delta\sigma_r = \frac{\sigma_X}{2}[-\frac{1}{r^2} + (\frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2})\cos 2\alpha] \tag{۱۶}$$

$$\Delta\sigma_\theta = \frac{\sigma_X}{2}[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\cos 2\alpha] \tag{۱۷}$$

اگر رفتار مواد همگن و الاستيک خطي در نظر گرفته شود و از لحاظ خواص مکانيکي نيز ايزوتروپ فرض گردد، با استفاده از قانون هوک مي توان تغييرات کرنش شعاعي ناشي از ايجاد سوراخ در يک نقطه از ورق تحت تنش يکنواخت تک محوره را در هر نقطه $P(R,\alpha)$ بدست آورد. با قرار دادن روابط (۱۶) و (۱۷) در رابطه هوک، تغييرات کرنش شعاعي و تغييرات کرنش محيطي مطابق رابطه (۱۸) و (۱۹) بدست مي آيد.

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_X(1+\nu)}{2E}[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)})\cos 2\alpha] \tag{۱۸}$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_X(1+\nu)}{2E}[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}\cos 2\alpha - \frac{4}{r^2(1+\nu)})\cos 2\alpha] \tag{۱۹}$$

روابط بدست آمده را ميتوان بصورت زير نوشت:

$$\varepsilon_r = \sigma_X(A + B\cos 2\alpha) \tag{۲۰}$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_X(-A + C\cos 2\alpha) \tag{۲۱}$$

که در آن ضرايب بصورت زير تعريف ميشود:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E}(\frac{1}{r^2}) \tag{۲۲}$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E}[(\frac{4}{1+\nu})\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}] \tag{۲۳}$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E}[-(\frac{4}{1+\nu})\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}] \tag{۲۴}$$

هنگامي که ورق در دو جهت عمود بر هم تحت تنش هاي σ_x و σ_y قرار گيرد، با فرض رفتار الاستيک خطي، با استفاده از اصل جمع آثار، تغييرات کرنش شعاعي به صورت رابطه (۲۵) خواهد بود.

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \tag{۲۵}$$

معادله فوق رابطه اساسي در اندازه گيري تنش هاي پسماند به روش کرنش سنجي سوراخ در حالتي که سوراخ کامل ايجاد شده باشد را ارائه مي‌کند. اگر در رابطه فوق ε_r معلوم فرض شود، براي حل کامل اين معادله و تعيين سه مجهول باقيمانده سه اندازه‌گيري مستقل کرنش شعاعي لازم است. معمول‌ترين فرآيند براي بدست آوردن کرنش هاي آزاد شده، نصب گيج هاي مقاومتي در قالب يک رست در اطراف محل اندازه-گيري قبل از سوراخکاري و ثبت تغييرات کرنش حين ايجاد سوراخ است. اگر چه قرار دادن کرنش‌سنج‌ها در زواياي مختلف دلخواه است اما در آرايش مطابق شکل (۴) روابط تحليلي در ساده‌ترين حالت خواهد بود.

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (۲۶)$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)Sin2\alpha \quad (۲۷)$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) - B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (۲۸)$$

با فرض معلوم بودن مقادير كرنش ها از طريق اندازه‌گيري مي توان مقدار و جهت تنش هاي اصلي را بدست آورد. با استفاده از سه اندازه‌گيري انجام شده و حل سه معادله فوق، مقدار و جهت تنش هاي اصلي از رابطه (۲۹) و (۳۰) بدست مي‌آيد.

$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B} \quad (۲۹)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (۳۰)$$

۲-۲- تحليل تنش هاي يكنواخت در حوزه یک سوراخ نفوذ ناقص

در مورد اغلب قطعات صنعتي ايجاد سوراخ نفوذ كامل ممكن نبوده و ايجاد سوراخ مطابق شكل (۵) مورد توجه ميباشد. ايجاد يك سوراخ ناقص در يك صفحه اي، توزيع تنش بسيار پيچيده‌اي اطراف سوراخ ايجاد ميكند كه هنوز یک راه حل تئوري و كامل براي محاسبه آن ارائه نشده است. روابط بدست آمده در قسمت قبلي براي حالت سوراخ كامل ميباشد ولي نشان داده شده است كه با تعريف ضرايب ثابت جديدي معادلات بدست آمده براي حالت سوراخ ناقص نيز معتبر است[۷].

با فرض رفتار الاستيک خطي، تغييرات كرنش شعاعي ناشي از ايجاد یک سوراخ ناقص در یک ورق تخت و ضخيم هنگامي كه تنش هاي σ_x و σ_y اعمال شده است مشابه رابطه (۲۵) ولي با ضرايب جديد مطابق رابطه (۳۱) خواهد بود. مقادير اين ضرايب به رفتار مواد و هندسه سوراخ و موقعيت نقطه مورد بررسي بستگي دارد.

$$\varepsilon_r = \overline{A}(\sigma_x + \sigma_y) + \overline{B}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (۳۱)$$

$$\overline{A} = f_A(E, \nu, D_o, Z/D) \quad (۳۲)$$

$$\overline{B} = f_B(E, \nu, D_o, Z/D) \quad (۳۳)$$

در روابط فوق E مدول الاستيسيته و ν ضريب پواسون جسم مورد بررسي بوده و D_o، D و Z مشخصات هندسي سوراخ مطابق شكل (۵) ميباشد. ضرايب ثابت جديد به صورت مستقيم از روش هاي تئوري قابل محاسبه نيستند و بايد آنها را به وسيله تست هاي تجربي و يا بوسيله روش هاي عددي نظير روش آناليز المان محدود به دست آورد. با داشتن ضرايب ثابت و با استفاده از رابطه (۳۱) تغييرات كرنش ناشي از ايجاد سوراخ براي هر نقطه دلخواه بدست مي‌آيد. مشابه حالت بررسي شده قبل، در مورد یک كرنش سنج رستي با

آرايش ارائه شده در شكل (۴)، از روابط مربوط به تغييرات كرنش شعاعي استفاده شده و روابط زير براي محاسبه مقدار و جهت تنش هاي اصلي بدست مي‌آيد.

$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4\overline{A}} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4\overline{B}} \quad (۳۴)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (۳۵)$$

همانطور كه ملاحظه ميشود، روابط مربوط به سوراخ كامل و ناقص تنها از نظر ضرايب ثابت با هم متفاوت ميباشند. جهت تعيين مقادير ضرايب ثابت مورد استفاده در رابطه (۳۴) از تست تجربي استفاده ميشود. در اين تست با اعمال تنش محوري σ_c در نمونه اي كه كرنش سنج رستي بر روي آن نصب شده و ايجاد سوراخ با ابعاد و هندسه مورد نظر، ميتوان تغييرات كرنش ناشي از ايجاد سوراخ را بدست آورد. در مورد يک كرنش سنج رستي ارائه شده در شكل (۴)، اگر اعمال بار در راستاي المان شماره ۱ باشد، رابطه (۳۱) را ميتوان بصورت زير براي المان ۱ و ۳ نوشت.

$$\varepsilon_r^x(1) = \sigma_x(\overline{A} + \overline{B}\cos 2\alpha_{\alpha=0}) = \sigma_c(\overline{A} + \overline{B}) \quad (۳۶)$$

$$\varepsilon_r^x(3) = \sigma_x(\overline{A} + \overline{B}\cos 2\alpha_{\alpha=90}) = \sigma_c(\overline{A} - \overline{B}) \quad (۳۷)$$

با داشتن مقادير تنش اعمال شده و نيز ثبت تغييرات كرنش ناشي از ايجاد سوراخ، براي ماده مورد بررسي با هندسه معين سوراخ ايجاد شده و شكل مشخص كرنش سنج رستي مي توان ضرايب ثابت را از رابطه (۳۸) و (۳۹) بدست آورد.

$$\overline{A} = \frac{\varepsilon_r^x(1) + \varepsilon_r^x(3)}{2\sigma_c} \quad (۳۸)$$

$$\overline{B} = \frac{\varepsilon_r^x(1) - \varepsilon_r^x(3)}{2\sigma_c} \quad (۳۹)$$

در اين رابطه $\varepsilon_r^x(1)$ و $\varepsilon_r^x(3)$ تغييرات كرنش بدليل ايجاد سوراخ ميباشد. چون اعمال تنش ثابت بر روي نمونه و سوراخكاري و ثبت تغييرات كرنش از نظر اجرايي مشكل است، براي سهولت در تعيين مقادير ضرايب ثابت مورد استفاده در حالت سوراخ ناقص، نمونه در دو مرحله بارگذاري ميگردد. ابتدا نمونه كششي كه كرنش سنج رستي بر روي آن نصب شده در حالت بدون سوراخ و بعد در حالت سوراخ شده تحت تنش برابر و يكنواخت، كه كمتر از يک سوم تنش تسليم است، قرار مي گيرد و در هر مرحله كرنش ها ثبت ميشود. با فرض رفتار الاستيک براي مواد، اختلاف كرنش ها در دو حالت در صورتي كه تنش اعمال شده در آنها يكسان باشد تغييرات كرنش بدليل ايجاد سوراخ را نشان ميدهد. روابط (۳۸) و (۳۹) به روابط زير تبديل ميشود.

$$\overline{A} = \frac{(\varepsilon_r^x(1)_{after} - \varepsilon_r^x(1)_{before}) + (\varepsilon_r^x(3)_{after} - \varepsilon_r^x(3)_{before})}{2\sigma_c} \quad (۴۰)$$

$$\overline{B} = \frac{(\varepsilon_r^x(1)_{after} - \varepsilon_r^x(1)_{before}) - (\varepsilon_r^x(3)_{after} - \varepsilon_r^x(3)_{before})}{2\sigma_c} \quad (۴۱)$$

در مواردي كه امكان انجام تست تجربي نباشد ميتوان از مدل سازي المان محـدود بـراي تعيـين ضـرايب ثابت استفاده نمود.

۳-تحليل تنش هاي غير يكنواخت در حوزه يک سوراخ

طبق استاندارد ASTM E837 روش كرنش سنجي سوراخ جهت اندازه گيري تنشهاي پسماند سطحي و يكنواخت در ضخامت مواد با رفتار الاستيک خطي مورد استفاده ميباشد. بدليل اينكه در بسياري ازحالتها تنش هاي پسماند ناشي از روشهاي توليد در عمق تغيير ميكنند، استفاده از روش استاندارد در اينگونه موارد معتبر نمي باشد. در فرآيند هايي مثل عمليات حرارتي و مكانيكي روي سطح، نورد و غلتک كاري، پوشش دهي و جوشكاري، تنش هاي پسماند در راستاي عمق متغير بوده و تغييرات تنش در نزديک سطح ميتواند خيلي شديد باشد. در برخي از اين فرآيند ها پروفيل تنش در راستاي ضخامت بر كاركرد قطعه تاثير گذار بوده و به عنوان معيار كنترل پروسه و كنترل كيفيت استفاده ميشود. تحقيقات زيادي در جهت توسعه روشي مناسب براي اندازه گيري اين گونه تنش هاي پسماند كه در راستاي ضخامت متغيير هستند، انجام ميگردد. در نتيجه پژوهش هاي انجام شده راه حل هاي مختلفي براي اندازه گيري تنش هاي پسماند در راستاي ضخامت قطعات ارائه شده است كه ميتوان به روش كرنش مرحله اي[1]، روش تنش متوسط[2]، روش سري هاي تواني[3] اشاره نمود[۱۳].

جديد ترين تكنيک در اندازه گيري تنشهاي پسماند غير يكنواخت با تكنيک كرنش سنجي سوراخ به نام روش انتگرالي[4] شناخته ميشود. ايده اين روش در سال ۱۹۸۵ توسط Flaman و Manning ارائه شد[۱۴]. در اين روش فرض شده است كه كرنش هاي اندازه گيري شده در حين سوراخ كاري در هر مرحله نتيجه انتگرال آزاد شدن تنش ها در همه مراحل قبلي ايجاد سوراخ ميباشد. در سال ۱۹۸۸، Schajer با استفاده از آناليز المان محدود روش اندازه گيري تنشهاي پسماند غير يكنواخت روش انتگرالي را تكميل تر كرد. وي با استفاده از يک مدل دو بعدي المان محدود ضرايبي را براي استفاده ارائه نمود [۱۵، ۱۶ و ۱۷]. با توجه به گستردگي پارامتر هاي موثر، هنوز هيچ تكنيک اندازه گيري تنش هاي پسماند غير يكنواخت در ضخامت تكميل نشده و تحقيقات زيادي در مورد تعيين ضرايب محاسبه تنشهاي پسماند در هر مورد اندازه گيري و تعيين خطاها و بهينه كردن اندازه گيري تنشهاي پسماند غير يكنواخت انجام مي شود. در ادامه روابط مورد استفاده در روش انتگرالي بررسي شده و روابط مورد نياز براي تعيين ضرايب مورد نياز استخراج ميگردد.

۳-۱- روابط مورد استفاده در محاسبه تنش هاي پسماند غير يكنواخت در ضخامت

در صورتي كه تنش ها در راستاي ضخامت متغيير باشد، روشهاي بدست آمده قبلي براي محاسبه تنش هـاي پسماند قابل استفاده نيست. در روش هاي قبلي فرض يكنواختي تنش در راستاي ضخامت در بدسـت آوردن

1 Incremental Starin Method
2 Average Stress Method
3 Power Series Method
4 Integral Method

روابط و ضرايب مورد استفاده قرار گرفت. براي محاسبه تنش هاي پسماند متغيير در ضخامت ايجـاد سـوراخ ميبايد بصورت مرحله اي و طي چندين گام باشد. تنش هاي پسماند متغيير در ضخامت با فـرض يكنـواختي در هر گام سوراخكاري قابل محاسبه مي باشد.

فرض اساسي ديگر مورد استفاده در اين محاسبه در شكل (٦) نشان داده شده است. براي مـواد بـا رفتـار الاستيک خطي تغييرات كرنش اندازه گيري شده در هر گام از ايجاد سوراخي به عمق مشخص z نتيجـه اثـر همه آزاد شدن تنش ها در مراحل قبلي ايجاد سوراخ ميباشد. بنابر اين تغييرات كرنش اندازه گيري شـده در هر گام از ايجاد سوراخ علاوه بر تنش هاي موجود در همان گام به تنش هاي موجود در قسـمت هـاي قبلـي نيز متاثر ميگردد. بزرگي و جهت تنش هاي اصلي در گام اول تـنش بـا فـرض يكنـواختي تـنش در آن گـام مطابق روش ارائه شده در قسمت ۳-۲ محاسبه شده و با استفاده از تنش محاسبه شده، تنش در گام دوم نيز محاسبه ميگردد و به همين ترتيب مقدار تنش براي گام هاي بعدي نيز محاسبه ميگردد.

با در نظر گرفتن شكل (۶) و فرض هاي مربوط به آن و نيز رابطـه هـاي (۲۲)، (۲۳)، (۲۵) و (۳۱) بـراي حالت سوراخ كامل و سوراخ ناقص، تغييرات كرنش شعاعي ناشي از آزاد شدن تنش در گام سوراخ كـاري بـه عمق z در سوراخي كه به عمق نهايي h بصورت گام به گام ايجاد شده است بصورت رابطه (۴۲) خواهد بود.

$$\varepsilon_r(z) = A(\sigma_x(z)+\sigma_y(z)) + B(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))\cos 2\alpha(z) \tag{۴۲}$$

$$A = -\frac{1+\nu}{2E}\times a \qquad a = a(z,h) \tag{۴۳}$$

$$B = -\frac{1}{2E}\times b \qquad b = b(z,h) \tag{۴۴}$$

با جاگذاري روابط (۴۳) و (۴۴) در رابطه (۴۲)، كرنش آزاد شده بصورت زير خواهد بود.

$$\varepsilon_r(z) = \frac{1+\nu}{2E}\times a(z,h)\times(\sigma_x(z)+\sigma_y(z)) + \frac{1}{2E}\times b(z,h)\times(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))\cos 2\alpha(z) \tag{۴۵}$$

طبق اصل جمع آثار ميتوان فرض كرد كه كرنش اندازه گيري شـده در حـين ايجـاد سـوراخي بـه عمـق مشخص z نتيجه انتگرال كرنش ناشي از آزاد شدن تنش ها در همه مراحل قبلي ايجـاد سـوراخ ميباشـد. در مورد سوراخ ايجاد شده به عمق نهايي h ميتوان روابط كرنش را به صورت زير نوشت:

$$\varepsilon_r(h) = \int_o^h \varepsilon_r(z)dz \tag{۴۶}$$

$$\varepsilon_r(h) = \frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz + \frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))\cos 2\alpha(z)dz \tag{۴۷}$$

در رابطه فوق تنش هاي اصلي $\sigma_x(z)$ و $\sigma_y(z)$ و زاويه α مجهول بوده و با داشتن ضرايب ثابـت و انـدازه گيري كرنش در هر مرحله قابل محاسبه ميباشد. با بازنويسي رابطه (۴۷) براي هر سه المان كرنش رستي بـه فرم شكل (۴)، خواهيم داشت:

$$\varepsilon_1(h) = \frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz + \frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))\cos 2\alpha(z)dz \tag{۴۸}$$

$$\varepsilon_2(h) = \frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz + \frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))Sin2(\alpha)(z)dz \tag{۴۹}$$

$$\varepsilon_3(h)=\frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz-\frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))Cos2(\alpha)(z)dz \qquad (۵۰)$$

در روابط بالا σ_x و σ_y تنش هاي اصلي بوده و لزوما در راستاي ۱ و ۳ شکل (۴) نیستند. اگر σ_1، σ_2 و τ_{13} مولفه تنش در جهت ۱ و ۳ باشند، از روابط دایره مور خواهیم داشت:

$$\sigma_x(z)+\sigma_y(z)=\sigma_1(z)+\sigma_3(z) \qquad (۵۱)$$

$$(\sigma_x(z)-\sigma_y(z))Cos\,2\alpha=\sigma_1(z)-\sigma_3(z) \qquad (۵۲)$$

با استفاده از روابط فوق خواهیم داشت:

$$\varepsilon_1(h)=\frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_1(z)+\sigma_3(z))dz+\frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_1(z)-\sigma_3(z))dz \qquad (۵۳)$$

$$\varepsilon_2(h)=\frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz-\frac{1}{E}\int_0^h b_h(z)\tau_{13}\,dz \qquad (۵۴)$$

$$\varepsilon_3(h)=\frac{1+\nu}{2E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_x(z)+\sigma_y(z))dz-\frac{1}{2E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_1(z)-\sigma_3(z))dz \qquad (۵۵)$$

با جمع و تفریق دو عبارت کرنش مربوط به المان ۱ و ۳ کرنش سنج رستي با شکل (۴) خواهیم داشت:

$$\varepsilon_3(h)+\varepsilon_1(h)=\frac{1+\nu}{E}\int_0^h a_h(z)(\sigma_3(z)+\sigma_1(z))dz \qquad (۵۶)$$

$$\varepsilon_3(h)-\varepsilon_1(h)=\frac{1}{E}\int_0^h b_h(z)(\sigma_3(z)-\sigma_1(z))dz \qquad (۵۷)$$

$$\varepsilon_3(h)+\varepsilon_1(h)-2\varepsilon_2(h)=\frac{2}{E}\int_0^h b_h(z)\tau_{13}\,dz \qquad (۵۸)$$

با فرض ثابت بودن تنش در هر گام از سوراخ کاري و تبدیل انتگرال به جمع عددي (با فرض تعداد مراحل ایجاد سوراخ به عمق h برابر مقدار معین n) :

$$\varepsilon_1(h)+\varepsilon_3(h)=\frac{1+\nu}{E}\sum_0^n a_h(j)(\sigma_x(j)+\sigma_y(j)) \qquad (۵۹)$$

$$\varepsilon_1(h)-\varepsilon_3(h)=\frac{1}{E}\sum_0^n b_h(j)(\sigma_x(j)-\sigma_y(j)) \qquad (۶۰)$$

$$\varepsilon_3(h)+\varepsilon_1(h)-2\varepsilon_2(h)=\frac{2}{E}\sum_0^n b_h(j)\tau_{13}(j) \qquad (۶۱)$$

اگرفرض شود :

$$p=\frac{\varepsilon_3+\varepsilon_1}{2},\ q=\frac{\varepsilon_3-\varepsilon_1}{2},\ t=\frac{\varepsilon_3+\varepsilon_1-2\varepsilon_2}{2} \qquad (۶۲)$$

$$P=\frac{\sigma_3+\sigma_1}{2},\ Q=\frac{\sigma_3-\sigma_1}{2},\ T=\tau_{13} \qquad (۶۳)$$

که در آن p و P بترتیب تعریف کرنش و تنش هیدرواستاتیک و q و Q بترتیب تعریف کرنش و تنش برشي میباشد. اگر در ایجاد سوراخ به عمق z تعداد مراحل برابر i باشد، با باز نویسي روابط (۵۹)، (۶۰) و (۶۱) خواهیم داشت:

$$p_i = \frac{1+\nu}{E}\sum_{0}^{n} a_{ij}P_j = \frac{1+\nu}{E}(a_{i1}P_1 + a_{i2}P_2 + a_{i3}P_3 + a_{i4}P_4 + a_{i5}P_5 + ...) \qquad 1 \le j \le i \le n \qquad (۶۴)$$

$$q_i = \frac{1}{E}\sum_{0}^{n} b_{ij}Q_j = \frac{1}{E}(b_{i1}Q_1 + b_{i2}Q_2 + b_{i3}Q_3 + b_{i4}Q_4 + b_{i5}Q_5 + ...) \qquad 1 \le j \le i \le n \qquad (۶۵)$$

$$t_i = \frac{1}{E}\sum_{0}^{n} b_{ij}T_j = \frac{1}{E}(b_{i1}T_1 + b_{i2}T_2 + b_{i3}T_3 + b_{i4}T_4 + b_{i5}T_5 + ...) \qquad 1 \le j \le i \le n \qquad (۶۶)$$

که در آن n تعداد مراحل ايجاد سوراخ به عمق h ميباشد. در ايجاد سوراخ به عمق h، اگر هدف پيدا كردن اندازه تنش ها در هر مرحله از سوراخ كاري باشد، بايستي روابط فوق را براي هر مرحله نوشت و در هرمرحله P_i و Q_i را بدست آورد. اگر $n = 4$ باشد:

$$p_i = \frac{1+\nu}{E}\sum_{0}^{n} a_{ij}P_j \qquad 1 \le j \le i \le 4 \qquad (۶۷)$$

$$q_i = \frac{1}{E}\sum_{0}^{n} b_{ij}Q_j \qquad 1 \le j \le i \le 4 \qquad (۶۸)$$

$$t_i = \frac{1}{E}\sum_{0}^{n} b_{ij}T_j \qquad 1 \le j \le i \le 4 \qquad (۶۹)$$

روابط فوق را مي توان بصورت ماتريسي نيز به شكل زير نوشت :

$$[\bar{a}][P] = \frac{E}{1+\nu}[p] \qquad (۷۰)$$

$$[\bar{b}][Q] = E\,[q] \qquad (۷۱)$$

$$[\bar{b}][T] = E\,[t] \qquad (۷۲)$$

براي محاسبه تنش هاي اصلي در هر عمق از مقادير محاسبه شده σ_1، σ_2 و τ_{13} استفاده ميشود.

$$\sigma_{j_{\max}}, \sigma_{j_{\min}} = P_j \pm \sqrt{Q_j^{\,2} + T_j^{\,2}} = E\left[\frac{p_i}{\bar{a}_{i,j}(1+\nu)} + \frac{\sqrt{q_i^2 + +t_i^2}}{\bar{b}_{i,j}}\right] \qquad (۷۳)$$

$$\beta_j = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{T_j}{Q_j}\right) = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{t_j}{q_j}\right) \qquad (۷۴)$$

با داشتن ضرايب ثابت مورد استفاده تنش هاي اصلي و جهت آن قابل محاسبه ميباشد.

۲-۳- محاسبه ضرايب مورد استفاده در محاسبه تنش هاي پسماند غير يكنواخت

در قسمت قبل براي كرنش شعاعي ناشي از ايجاد سوراخ در يک قطعه كه داراي تنش پسماند متغير در ضخامت ميباشد رابطه (۶۴)، (۶۵) و (۶۶) بدست آمد. در اين رابطه h عمق سوراخ، z فاصله از سطح قطعه، a_{ij} و b_{ij} ضرايب ثابت مربوط به هندسه سوراخ، هندسه رست و جنس مواد ميباشد. اگر در اين رابطه مقادير و راستاي تنشهاي اصلي مجهول در نظر گرفته شود، براي محاسبه آنها مي بايد مقادير كرنش و ضرايب مربوطه معلوم باشد.

۱-۲-۳- محاسبه ضرایب ثابت a_{ij}

اگر در رابطه (۴۷) فرض وجود تنش هیدرو استاتیک در هر عمق دلخواه مورد توجه قرار گیرد، براي سوراخي به عمق h خواهیم داشت:

$$\sigma_x(z) = \sigma_y(z) = \sigma(z) \quad (۷۵)$$

$$\sigma_x(z) - \sigma_y(z) = 0 \quad (۷۶)$$

$$\varepsilon_r(h) = \frac{1+\nu}{E}\int_0^h a_h(z)\sigma(z)dz \quad (۷۷)$$

با فرض ثابت بودن تنش در هر گام ایجاد سوراخ و تبدیل انتگرال به جمع عددي (با فرض تعداد مراحل ایجاد سوراخ به عمق h برابر n) رابطه فوق به رابطه زیر تبدیل میگردد. در این رابطه $\varepsilon_{ir}(h)$ کرنش شعاعي ایجاد شده ناشي از ایجاد سوراخ در مرحله i ام بوده و ضرایب a_{ij} نیز ضرایب ثابت تاثیر تنش در هر گام سوراخ کاري میباشد.

$$\varepsilon_{ir}(h) = \frac{1+\nu}{E}\sum_o^n a_{ij}\sigma_j = \frac{1+\nu}{E}(a_{i1}\sigma_1 + a_{i2}\sigma_2 + a_{i3}\sigma_3 + ...) \quad (۷۸)$$

با استفاده از قانون جمع آثار در رفتار الاستیک مواد، براي پیدا کردن هر یک از ضرایب a_{ij} مورد نیاز میتوان فرض کرد:

$$\sigma_{j\neq m} = 0 \quad (۷۹)$$

در عبارت بالا σ_j تنش موجود در هر گام از عمق سوراخ میباشد. با استفاده از رابطه (۷۹)، رابطه (۷۸) بصورت زیر تبدیل میگردد.

$$a_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\frac{\varepsilon_{ir}}{\sigma_{ij}} \qquad 1 \le j \le i \quad (۸۰)$$

با استفاده از رابطه (۸۰) ضرایب ثابت مربوط به هر عمق سوراخ محاسبه میگردد.

۲-۲-۳- محاسبه ضرایب ثابت b_{ij}

در این قسمت فرض مي شود تنش پسماند موجود در هر عمق از نوع برشي میباشد. در این صورت براي سوراخي به عمق h خواهیم داشت:

$$\sigma_x(z) = -\sigma_y(z) = \sigma(z) \quad (۸۱)$$

$$\sigma_x(z) + \sigma_y(z) = 0 \quad (۸۲)$$

$$\varepsilon_r(h) = \frac{1}{E}\int_0^h b_h(z)\sigma(z)\cos 2\alpha(z)dz \quad (۸۳)$$

در رابطه (۸۳) براي پيدا کردن ضرايب b_{ij} فرض ميشود $\alpha = 0$ که در اين صورت با فرض ثابت بودن تنش در هر گام ايجاد سوراخ و تبديل انتگرال به جمع عددي (با فرض تعـداد مراحـل ايجـاد سـوراخ بـه عمـق h برابر n) رابطه فوق به رابطه زير تبديل ميگردد.

$$\varepsilon_{ir}(h) = \frac{1}{E}\sum_{o}^{n} b_{ij}\sigma_j = \frac{1}{E}(b_{i1}\sigma_1 + b_{i2}\sigma_2 + b_{i3}\sigma_3 + ...) \qquad (۸۴)$$

در اين رابطه $\varepsilon_{ir}(h)$ شعاعي ناشي ار اين نوع بار گذاري در راستاي $\alpha = 0$ ميباشد. در اين قسمت نيز بـا استفاده از قانون جمع آثار، از فرض ارائه شده در رابطه (۷۹) استفاده ميشود. بنابر اين خواهيم داشت:

$$b_{ij} = E\frac{\varepsilon_{ir}}{\sigma_{ij}} \qquad 1 \le j \le i \qquad (۸۵)$$

در عبارت بالا نيز σ_{ij} تنش موجود در هر گام از عمق سوراخ ميباشد.

۳-۲-۳- تکنيک تعيين مقادير ضرايب ثابت a_{ij} و b_{ij}

براي محاسبه مقادير ضرايب ثابت راه حل تحليلي وجود ندارد بنابر اين براي تعيين اين ضرايب و اسـتفاده از آن در محاسبه تنش هاي پسماند متغير در ضخامت بايستي از تکنيک عـددي اسـتفاده نمـود. بـراي تعيـين ضرايب a_{ij} و b_{ij} بايستي در عمق ايجاد شده در گام j ام سوراخکاري سوراخ ايجاد شده در i مرحلـه تـنش پسماند با توزيع فرض شده در مرحله i و ii ايجاد شده و تغييرات کرنش ناشي از ايجاد سوراخ بدست آيد و از روابط بدست آمده ضرايب ثابت تعيين گردد.

با توجه به فرض رفتار الاستيک خطي براي مواد مورد بررسي، ميتوان به جاي ايجاد تنش و سوراخ کاري، از بار گذاري بر روي ورق سوراخ شده استفاده نمـود. سـاخت مـدل المـان محـدود کـه در آن، تنهـا در يـک ضخامت مشخص تنش پسماند موجود باشد امکان پـذير نبـوده و بـه جـاي آن بـراي بدسـت آوردن ضـرايب ميتوان از اعمال تنش بر سطح استفاده کرد. اساس اين روش مبتني بر قانون جمع آثار در مورد مواد با رفتـار الاستيک خطي ميباشد. مطابق شکل (۷) تغييرات کرنش بدست آمده توسط کرنش سنج نشان داده شده در مدل A با مجموع تغييرات کرنش بدست آمده توسط کرنش سنج در موقعيت يکسـان در مـدل B و C برابـر ميباشد. در مدل B بدليل تعادل در تنش ها، کرنش سنج هيچ تغييري حس نکرده و بنابر ايـن تغييـرات آن صفر ميباشد. در نتيجه مقدار تغييرات کرنش ايجاد شده در مدل C با مدل C برابر خواهد بود. بنـابر ايـن در مدل سازي المان محدود به جاي ايجاد تنش پسماند از اعمال تنش بر سطح مورد نظر اسـتفاده ميگـردد. در اين حالت براي تعيين نوع و ميزان تنش اعمالي بر سطح ديوار سوراخ از روابط مـور اسـتفاده ميگـردد. بـراي محاسبه a_{ij}، اگر $\sigma_x(z) = \sigma_y(z) = P$ باشد تنش شعاعي موجود در هر نقطه بصورت رابطه (۸۶) خواهد بود.

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}Cos\,2\theta = P \qquad (۸۶)$$

يعني براي محاسبه a_{ij} بر روي سطح ايجاد شده از گام j ام در سوراخكاري i مرحله اي، ميبايد تنش يكنواخت P اعمال شده و تغييرات كرنش بدست آيد. همچنين براي محاسبه ضرايب b_{ij}، اگر $\sigma_x(z) = -\sigma_y(z) = P$ باشد، تنش شعاعي موجود در هر نقطه بصورت رابطه (۸۷) خواهد بود.

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} Cos\ 2\theta = PCos\ 2\theta \qquad (۸۷)$$

براي محاسبه b_{ij} بر روي سطح ايجاد شده از گام j ام در سوراخكاري i مرحله اي، ميبايد تنش با توزيع $PCos\ 2\theta$ اعمال شده و تغييرات كرنش در راستاي $\theta = 0$ بدست آيد. شكل (۸) نوع بار گذاري بر سطح سوراخ براي محاسبه ضرايب ثابت در هر عمق را نشان ميدهد.

براي محاسبه تنش هاي پسماند متغير در ضخامت ميبايستي ضرايب ثابت در هر مرحله از سوراخ كاري و براي هر گام از سوراخ كاري كه در آن مقادير كرنش هاي شعاعي ثبت مرگردد محاسبه گردد. به عنوان مثال اگر ايجاد سوراخ در چهار مرحله انجام شده باشد ضرايب a_{ij} و b_{ij} كه در آن $i = 4$ و $1 \le j \le 4$ ميباشد محاسبه شده و تنش ها در ۴ گام از ضخامت محاسبه ميگردد. شكل (۹) بار گذاري مورد استفاده در محاسبه ضرايب a_{ij} را نشان ميدهد. بدست آوردن ضرايب ثابت a_{ij} و b_{ij} مورد استفاده در محاسبه تنش هاي پسماند متغير در ضخامت بصورت تحليلي امكان پذير نبوده و بايستي از تكنيک المان محدود براي تعيين مقادير ضرايب استفاده نمود.

٤- نتيجه گيري

اندازه گيري تنش هاي پسماند غير يكنواخت از موضوعات مطرح در رابطه با آناليز ايمني و بررسي يكپارچگي سازه هاي تحت بار ميباشد. با استفاده از روش ارائه شده در اين مقاله ميتوان تنش هاي پسماند را در مورد قطعات داراي تنش هاي غير يكنواخت و نيز در مورد قطعاتي كه خواص مواد در راستاي ضخامت متغير ميباشد محاسبه نمود. براي هر حالت مورد بررسي، ابتدا به كمک تكنيک كرنش سنجي سوراخ، تغييرات كرنش ناشي از ايجاد سوراخ در چند گام از ضخامت بدست ميآيد. سپس ضرايب ثابت مربوطه طبق روش ارائه شده با استفاده از آناليز المان محدود تعيين شده و تنش هاي پسماند با استفاده از روابط استخراج شده محاسبه ميگردد. تكنيک ارائه شده در اين مقاله در آناليز ايمنی، كنترل كيفيت ساخت و بررسي يكپارچگي سازه های مهندسی قابل استفاده ميباشد.

مراجع

[1] *Hand book of Residual Stresses and Distortion*, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2002).

[2] Masubuchi, K., *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, New York, USA, (1980).

[3] *Welding Handbook: Welding Technology*, Vol. 1, American Welding Society, Ohio, USA, (2002).

[4] Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T., and Grant, P.V., "Measurement of Residual Stress in Components, A Review of Residual Stress Measurement Methods," NPL Report, UK, (2001).

[5] Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, Technical Note, TN-503, Vishay Measurements Group, Carolina, USA, (1993).

[6] Kelsey, R. A., "Measurement of Residual Stresses by Hole-Drilling Method," Proc., SESA XIV, 1, pp. 181-194, (1956).

[7] Rendler, N.J., and Vigness, I., "Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses," Experimental Mechanics, Vol. 6, pp. 577–586, (1966).

[8] Beaney, E.M., and Procter, E., "A Critical Evaluation of the Center Hole Drilling Technique for Measurement of Residual Stresses," Strain, Vol. 10, pp. 7-14, (1974).

[9] Schajer, G.S., "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements," Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 103, pp. 157–163, (1981).

[10] Flaman, M.T., "Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Centre-Hole Method of Residual Stress Measurement," Experimental Mechanics, Vol. 22, pp. 26–30, (1982).

[11] Schajer, G.S., "Judgment of Residual Stress Field Uniformity when using the Hole-Drilling Strain Gage Method," Proceeding of ICRS II, France, pp. 71-77, (1988).

[12] ASTM E 837 "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," ASTM Standards, Section 3, Vol. 03.01, Ohio, USA, (1986).

[13] *Handbook of Measurement of Residual Stress*, Society for Experimental Mechanics, 1th Edition, pp. 2-7, SEM Press, Ohio, USA, (1996).

[14] Flaman, M.T., and Manning, B.H., " Determination of Residual Stress Variation with Depth by Hole Drilling Method," Experimental Mechanic, Vol. 25, pp. 205-207, (1985).

[15] Schajer, G.S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses using the Hole Drilling Method," Journal of Strain Analysis, Vol. 28, pp. 19–22, (1988).

[16] Schajer, G.S., "Non-Uniform Residual Stresses Measurement by the Hole Drilling Method: Part I - Stress Calculation Procedures," Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 338–343, (1988).

[17] Schajer, G.S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses using the Hole Drilling Method: Part II - Practical Application of the Integral Method," Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 344–349, (1992).

فهرست علائم انگليسي

A، B، C: ضرايب ثابت مورد استفاده در حالت سوراخ سراسري

$\bar{A}$، $\bar{B}$: ضرايب ثابت مورد استفاده در حالت سوراخ نفوذ ناقص

a، b: ضرايب ثابت بي بعد مورد استفاده در محاسبه تنش پسماند

a_{ij}، b_{ij} : ضرايب ثابت بي بعد مورد استفاده در محاسبه تنش پسماند غير يكنواخت

C_{1-9}: ضرايب ثابت مورد استفاده در تعريف تابع تنش

D: قطر متوسط كرنش سنج رستي

D_o، R_0: قطر و شعاع سوراخ ايجاد شده

E: مدول الاستيسيته

h: ارتفاع مورد بررسي از عمق سوراخ

p ، P: بترتيب كرنش و تنش هيدرواستاتيک

q، Q: بترتيب تعريف كرنش و تنش برشي

R: شعاع نقطه مورد بررسي

r : شعاع بي بعد (نرمال شده با شعاع سوراخ)

Z: عمق سوراخ ايجاد شده

فهرست علائم يوناني

α : موقعيت زاويه اي نقطه مورد بررسي در سيستم قطبي

σ_X ،σ_Y: تنش هاي اصلي اعمال شده بر ورق

σ'_r ،σ'_θ: تنش شعاعي و مماسي قبل از ايجاد سوراخ

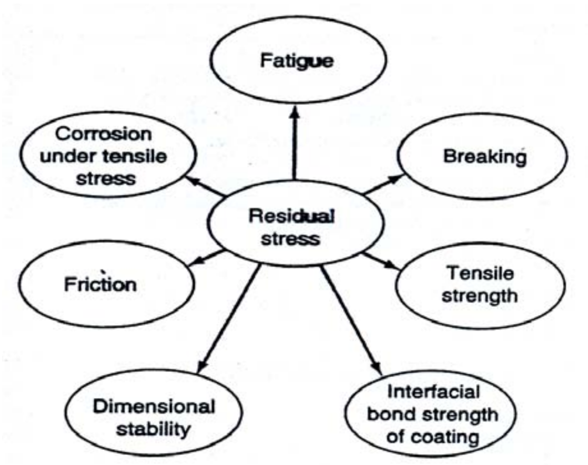
σ''_r ،σ''_θ : تنش شعاعي و مماسي بعد از ايجاد سوراخ

ε_r : كرنش شعاعي

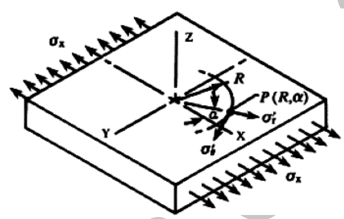
φ : تابع تنش در اطراف سوراخ

ν: ضريب پواسن

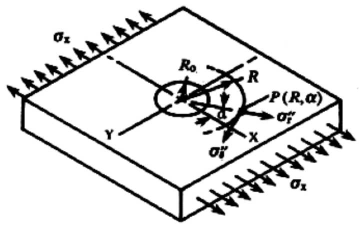
شكلها



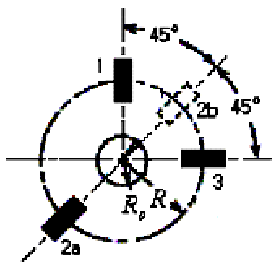
شكل ۱- برخي از حوزه هاي متاثر از تنشهاي پسماند



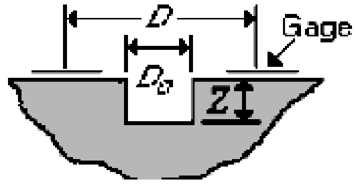
شكل ۲- حالت تنش در نقطه $P(R,\alpha)$ قبل از ايجاد سوراخ



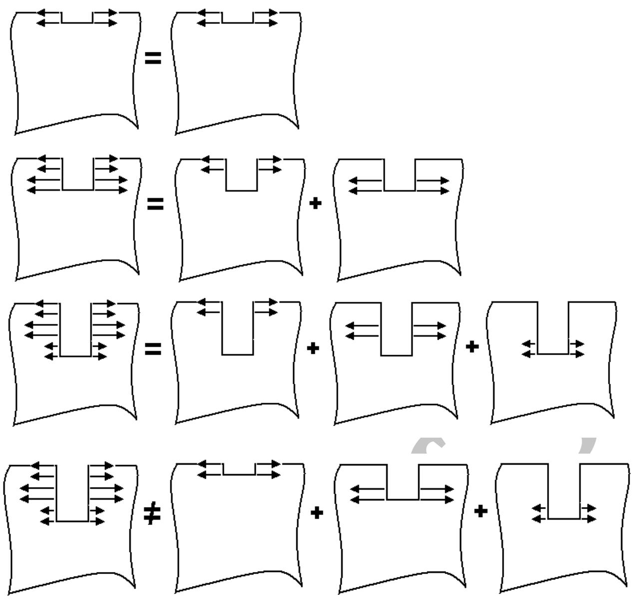
شكل ۳- حالت تنش در نقطه $P(R,\alpha)$ بعد از ايجاد سوراخ



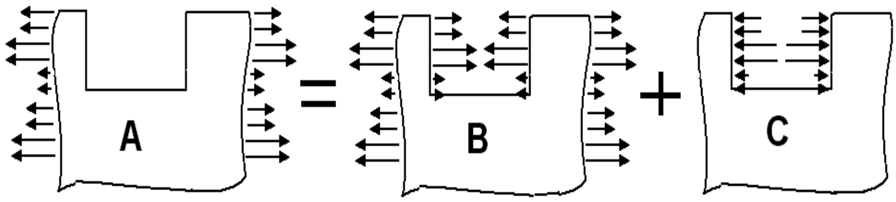
شكل ۴- آرايش مناسب براي موقعيت المان هاي كرنش سنج جهت ساده شدن روابط



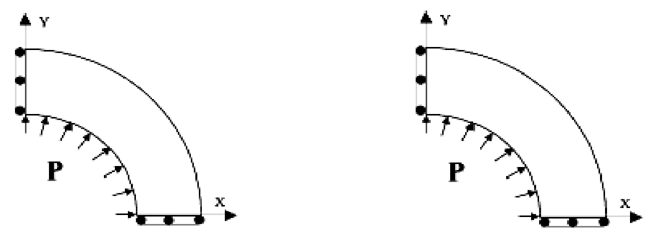
شکل ۵- ایجاد سوراخ ناقص براي اندازه گیري تنش هاي پسماند



شکل۶- فرض مورد استفاده در محاسبه تنش هاي پسماند متغییر در ضخامت

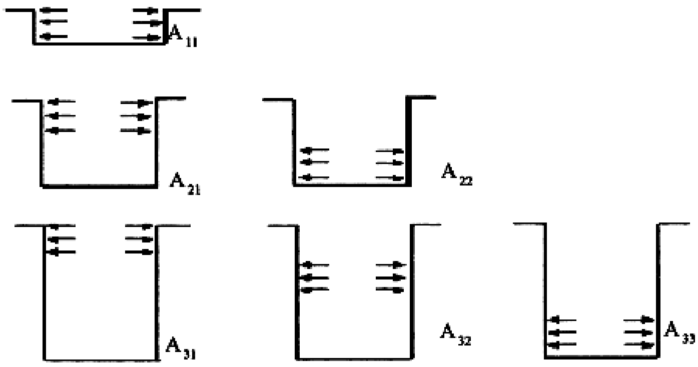


شکل ۷- استفاده از قانون جمع آثار در تعیین مقادیر ضرایب ثابت



$$a_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\frac{\varepsilon i_r}{P_{ij}} \qquad 1 \le j \le i \qquad\qquad b_{ij} = E\,\frac{\varepsilon_{ir}}{P_{ij}} \qquad 1 \le j \le i$$

شکل۸- نوع بار گذاري بر سطح سوراخ براي محاسبه ضرایب ثابت a_{ij} و b_{ij} در هر عمق



شكل۹- بار گذاري مورد استفاده در محاسبه ضرايب a_{ij}

Abstract

Non-uniform residual stresses arise from most mechanical or thermal operations, performed in processing engineering materials, like welding and machining. They may enhance occurrence of brittle fracture, fatigue, structural buckling and stress-cracking-corrosion. Therefore, estimation of their magnitude and distribution are of great importance in integrity assessments of load bearing structures. The hole-drilling strain gauge method (HDSG), described in ASTM E837, is the common method used in evaluation of through thickness uniform residual stresses. However, according to this standard, the use of this method is limited for uniform stress distribution through the thickness of the body. In this paper, the capability of the HDSG method in evaluation of non-uniform stresses is studied by using the integral technique. Hear, assuming linear elastic materials, the basic relations of the method are derived. Also, a procedure for determination of the required coefficients is proposed, using by the integral method, were presented.