

تعیین ضریب شدت تنش در شیارها با استفاده از روش تجربی سایه نگاری (کاستیک)

ناصر سلطانی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

وحید متین فر

مدیریت تولید مناطق دریایی شرکت ملی نفت ایران

(تاریخ دریافت ۷۵/۱۱/۲۹، تاریخ تصویب ۷۶/۱۱/۱۸)

چکیده:

روش تجربی سایه نگاری^(۱) برای مطالعه میداین تکین^(۲) تنش در ارتباط با مسایل متعدد مهندسی و بدست آوردن ضرایب شدت تنش در ترک های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. لیکن تاکنون توجهی به مسایل مربوط به میدان تنش در نزدیکی نوک شیارها و گوشه های مقعر نشده است. میدان تنش در نوک تیز شیارها و گوشه های مقعر دارای تکنیکی از رتبه ۱- λ می باشد که وابستگی به زاویه شیار دارد. معادلات لازم برای بررسی ضرایب شدت تنش در شیارها و گوشه های مقعر بدست آمده و قبلاً ارائه گشته است [۱].

در این مقاله ضریب شدت تنش، K_I در صفحات شیاردار با استفاده از معادلات بدست آمده و اعمال روش تجربی سایه نگاری بازتابشی بدست آمد. پنج مدل با شیارهای ۴۵ و ۹۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفت. مدل ها از ورق های نازک و شفاف از جنس پلکسی تهیه شده و شیارها بصورت عمود بر ضخامت صفحه در آنها فرز گردید. مدلها تحت بارگذاری حالت اول قرار گرفته و در هنگام آزمایش تصویر منحنی های کاستیک بوجود آمده توسط یک دوربین ۳۵ میلیمتری در بارگذاری های مختلف ثبت شد. با اندازه گیری از روی تصاویر موجود، ابعاد منحنی های کاستیک در بارهای اعمال شده مختلف بدست آمده و ضریب شدت تنش K_I تعیین شد. نتایج بدست آمده در این پروژه با جوابهای بدست آمده از روشهای تئوری و تجربی دیگر مطابقت دارد و در نتیجه صحت کاربرد روش سایه نگاری بازتابشی^(۳) در تعیین ضریب شدت تنش K_I برای صفحات شیاردار به اثبات می رسد.

کلید واژه ها: شدت تنش، ترک، شیار، سایه نگاری، مکانیک شکست

مقدمه

روش بسیار قوی در تعیین ضرایب شدت تنش در نوک ترک ها برای هر دو حالت استاتیکی و دینامیک شناخته شده است. این روش در حال حاضر به سه گروه تقسیم بندی شده است: (۱) روش سایه نگاری عبوری^(۴)، (۲) روش سایه نگاری بازتابشی از مواد شفاف، (۳) روش سایه نگاری از مواد غیر شفاف.

روش سایه نگاری بازتابشی که برای اولین بار توسط Theocaris ارائه گشت، جهت تعیین ضرایب شدت تنش در حالت اول (K_I) و هم حالت مرکب (K_I, K_{II}) در صفحات شفاف دارای ترک مورد استفاده قرار گرفته است

در تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی مهمترین پارامتری که برای تشخیص ترک ها و حالت آنها بکار می رود، ضریب شدت تنش می باشد. ضریب شدت تنش رابطه مستقیم با بارهای وارده دارد و اثر موقعیت و طول ترک نیز در آن مستتر می باشد.

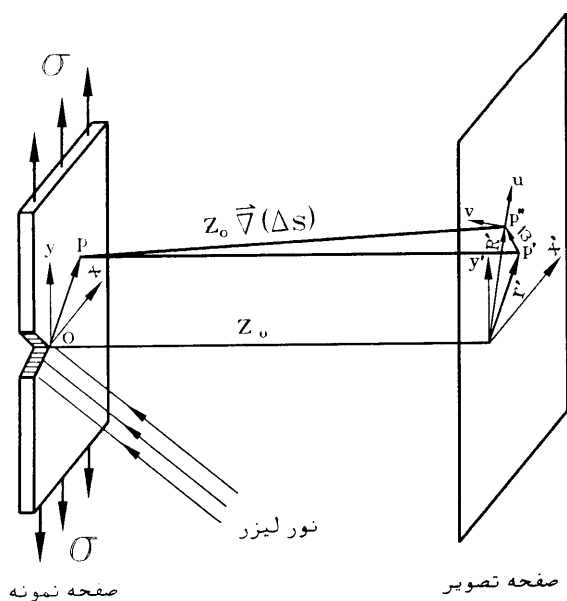
یکی از کارآمدترین و در عین حال ساده ترین روشهای تجربی که برای مطالعه میدان تکین تنش و تعیین ضرایب شدت تنش در صفحات ترک دار تحت تنش بکار می رود، روش تجربی سایه نگاری یا کاستیک می باشد. در پژوهش های مختلف [۷-۲] روش سایه نگاری بعنوان یک

می آید.

هدف از این نوشتار تشریح چگونگی استفاده و کاربرد روش تجربی سایه نگاری بازتابشی از مواد شفاف در صفحه تصویر تشکیل می شوند ضریب شدت تنش K_I در صفحات شیاردار تحت تنش با استفاده از معادلات بدست آمده در [۱] می باشد.

معادلات منحنی های کاستیک در صفحات شیاردار

معادلات منحنی های کاستیک در حالت مرکب جهت بررسی میدان تنش و ضرایب شدت تنش در صفحات شیاردار قبلاً ارائه شده است [۱]. زمانیکه پرتو نور تابیده شده به یک نقطه دلخواه $P(r, \theta)$ در ناحیه تکین حول نوک شیار برخورد می کند منعکس شده و صفحه تصویر را در نقطه P' قطع خواهد کرد (شکل ۲).



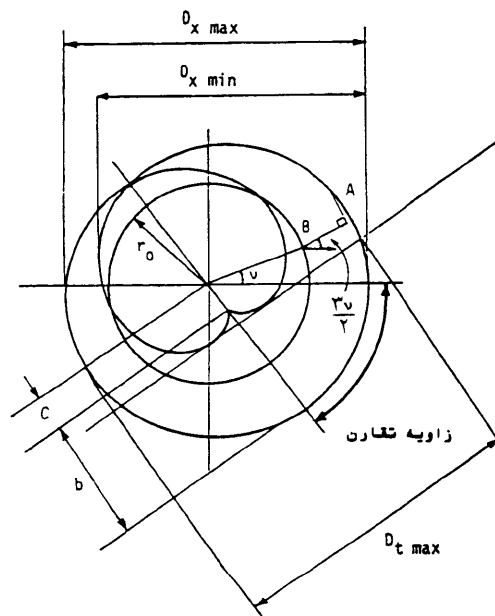
شکل ۲: تغییر مسیر نور در کاستیک بازتابشی.

مؤلفه های بردار \vec{R}' که بیانگر موقعیت تصویر نقطه $P(r, \theta)$ در صفحه تصویر می باشد را می توان بصورت زیر تعریف نمود.

$$x' = \delta_m r \cos \theta + P[\varphi \lambda_1 (\lambda_1 - 1) K_I Q_1 r^{\lambda_1 - 2} \cos(\lambda_1 - 2)\theta - \varphi \lambda_2 (\lambda_2 - 1) K_{II} Q_2 r^{\lambda_2 - 2} \sin(\lambda_2 - 2)\theta] \quad (1)$$

$$y' = \delta_m r \sin \theta - P[\varphi \lambda_1 (\lambda_1 - 1) K_I Q_1 r^{\lambda_1 - 2} \sin(\lambda_1 - 2)\theta + \varphi \lambda_2 (\lambda_2 - 1) K_{II} Q_2 r^{\lambda_2 - 2} \cos(\lambda_2 - 2)\theta]$$

[۲،۳]. منحنی های کاستیک که در روش سایه نگاری بازتابشی از مواد شفاف در صفحه تصویر تشکیل می شوند همگی بصورت منحنی های پاره چرخشی^(۱) می باشند (شکل ۱).



شکل ۱: شکل تئوری منحنی های کاستیک و ابعاد اقطار آن.

منحنی داخلی کاستیک در اثر انعکاس نور از صفحه درونی مدل ایجاد می گردد و بستگی به خواص مکانیکی (E, ν) جنس مدل تحت آزمایش دارد. در حالیکه منحنی خارجی کاستیک در اثر انعکاس نور از سطح درونی مدل ایجاد می گردد و بستگی به خواص مکانیکی و نوری (E, ν, n) مدل تحت آزمایش دارد.

منحنی های کاستیک در واقع اشکال نوری سه بعدی در فضا می باشند که بر اثر انعکاس نور پس از برخورد با صفحه ای صیقلی و براق و یا انکسار نور از میان صفحه شفاف که سطح آنها دارای تغییر شکل موضعی سه بعدی می باشد، تشکیل می شوند. اندازه و شکل این منحنی ها که پس از انعکاس نور بصورت منحنی های پاره چرخشی دوبعدی بر روی صفحه تصویر ظاهر می گردند را می توان جهت بررسی حالت تغییر شکل موضعی که باعث بوجود آمدن این اشکال می شوند، بکار گرفت. یک دسته از این تغییر شکلهای موضعی که در مکانیک شکست بسیار حائز اهمیت می باشند، تغییر شکلهایی هستند که در نوک ترک ها و شیارهایی که تحت تنش می باشند، بوجود

می‌باشند، بصورت زیر درخواست خواهند آمد.

$$x' = \delta_m r_0 \left[\cos\theta - \frac{1}{\lambda_1 - 2} \cos(\lambda_1 - 2)\theta \right] \quad (4)$$

روابط (۴) در واقع معادلات عمومی یک سری منحنی‌های پاره چرخشی برای مقادیر مختلف r می‌باشند. این منحنی‌ها در صورتی بوجود خواهند آمد که از هر نقطه روی محیط (r و θ) از دایره‌ای به شعاع r که مرکز آن در مرکز محور مختصات قرار دارد، یک بردار به اندازه $r/(\lambda_1 - 2)$ که با محور x زاویه $(\lambda_1 - 2)\theta$ می‌سازد، رسم شود. در این صورت تمام نقاط این منحنی در کمترین فاصله خود از نوک شیار خواهند بود. ضریب شدت تنش K_I در این حالت از رابطه (۳) بصورت زیر بدست می‌آید.

$$K_I = \frac{\delta_m}{\sqrt{A_1 P}} r_0^{(\lambda_1 - 2)} \quad (5)$$

روش پردازش داده‌ها

با استفاده از روش کاستیک بازتابشی می‌توان تغییرات ضریب شکست نور ماده در نوک ترک یا شیار را که ناشی از تمرکز تنش در آن ناحیه می‌باشد، اندازه‌گیری نمود. در قسمت قبل رابطه بین تنش و تغییرات ضریب شکست نور برای صفحات شیاردار تحت تنش معلوم گشت. در نتیجه با استفاده از روش سایه‌نگاری بازتابشی و معادلات بدست آمده می‌توان اطلاعات مربوط به میدان تنش را بدست آورد. این اطلاعات براساس تئوری الاستیک - خطی مکانیک شکست با ضرایب شدت تنش مربوط می‌باشند.

در روش سایه‌نگاری بازتابشی نور تابیده شده به مدل ابتدا با صفحه بیرونی مدل برخورد کرده و قسمتی از آن منعکس شده و در صفحه تصویر منحنی داخلی سایه‌نگاری را تشکیل می‌دهد. پاره دیگر نور از ضخامت صفحه مدل عبور کرده و پس از برخورد با صفحه درونی مدل منعکس شده و در صفحه تصویر منحنی خارجی سایه‌نگاری را تشکیل می‌دهد. این امر سبب می‌شود که در روش سایه‌نگاری بازتابشی از تصویر ثبت شده اطلاعات بیشتری بدست آید.

برای اینکه یک منحنی تکین کاستیک روی صفحه تصویر بوجود آید، باید مقدار مؤلفه i از بردار R یک مقدار حداکثر بوده در حالیکه مقدار مؤلفه z آن ثابت باشد و یابالبعکس. برای تحقق شرایط فوق در مینان جاکوبی آن باید برابر صفر باشد [۳]. یعنی:

$$J = \frac{\delta(x', y')}{\delta(r, \theta)} = \begin{vmatrix} \frac{\delta x'}{\delta r} & \frac{\delta x'}{\delta \theta} \\ \frac{\delta y'}{\delta r} & \frac{\delta y'}{\delta \theta} \end{vmatrix} = 0$$

با جایگذاری مقادیر x' و y' و مشتقات جزئی آنها در رابطه فوق، خواهیم داشت:

$$A_1 K_I^2 r^{2(\lambda_1 - 2)} + A_2 K_{II}^2 r^{2(\lambda_2 - 2)} + A_3 K_I K_{II} r^{(\lambda_1 + \lambda_2 - 6)} \sin(\lambda_1 - \lambda_2)\theta = \left(\frac{\delta_m}{P}\right)^2 \quad (\text{الف} - 2)$$

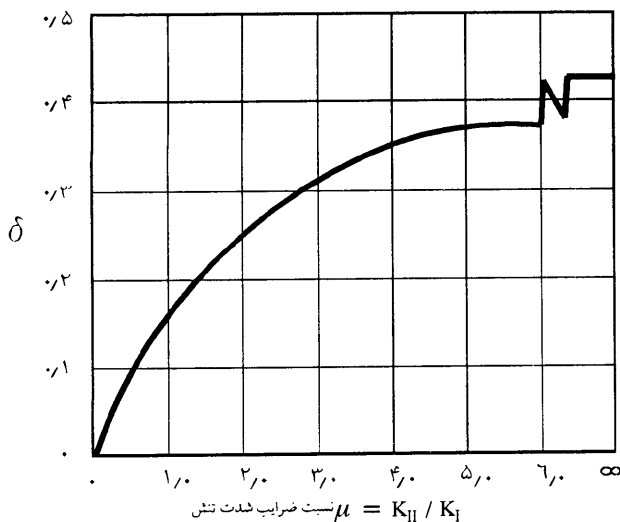
که در رابطه بالا $P = -\text{ch}Z$ می‌باشد. با قرار دادن $\mu = K_{II} / K_I$ خواهیم داشت:

$$A_1 r^{2(\lambda_1 - 2)} + A_2 \mu^2 r^{2(\lambda_2 - 2)} + A_3 \mu r^{(\lambda_1 + \lambda_2 - 6)} \sin(\lambda_1 - \lambda_2)\theta = \left(\frac{\delta_m}{K_I P}\right)^2 \quad (\text{ب} - 2)$$

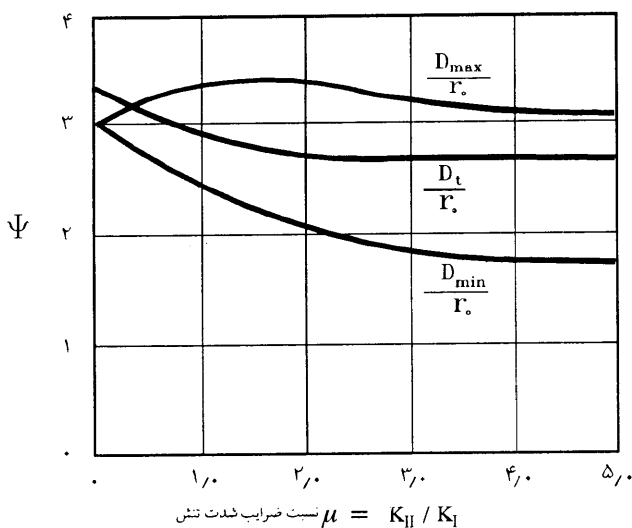
اکنون حالتی را در نظر می‌گیریم که در آن فقط حالت اول (حالت باز شدن) موجود باشد. زمانیکه فقط حالت اول موجود باشد، $K_I = 0$ ($\mu = 0$) خواهد بود و در نتیجه معادله (۲ الف) به صورت زیر در خواهد آمد.

$$r = r_0 = \left(\frac{\delta_m}{\sqrt{A_1 P K_I}}\right)^{1/(\lambda_1 - 2)} \quad (3)$$

همانگونه که در رابطه بالا مشهود است، در این حالت شعاع منحنی اولیه کاستیک تابعی از θ نبوده و ثابت می‌باشد و در نتیجه منحنی اولیه کاستیک یک دایره کامل خواهد بود. در این پروژه جهت انجام آزمایش و کاربرد روش تجربی کاستیک بازتابشی فقط حالت اول در نظر گرفته خواهد شد. با جایگزین کردن r_0 بجای r و به ازای $K_{II} = 0$ در معادلات (۱)، مؤلفه‌های بردار \bar{R} که معرف نقاط منحنی کاستیک در صفحه oxy' برای حالت اول



شکل ۳: تغییرات نسبت $\delta = D_I / \Gamma_0$ بر حسب μ .



شکل ۴: تغییرات نسبت Ψ بر حسب μ .

ترک دار علاوه بر اینکه تابعی از پارامترهای آزمایش و خواص جنس مدل می باشند، تابعی از Γ_0 و نسبت K_{II} به K_I ، μ نیز می باشند [۳]. در نتیجه ابتدا باید مقادیر Γ و μ تعیین گردند.

بدین منظور اندازه های D_{max} و D_{min} از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش استخراج می شوند. با در دست داشتن مقدار μ و با کمک شکل ۳ مقدار δ تعیین گشته و با استفاده از رابطه (۷) مقدار Γ_0 معلوم می گردد. با استفاده از مقادیر بدست آمده μ و Γ_0 می توان K_{II} و K_I را محاسبه نمود.

با اطلاعاتی که از اندازه و شکل منحنی کاستیک بدست می آید، می توان با استفاده از تکنیک های مختلف پردازش داده ها، ضرایب شدت تنش را بدست آورد. بطور کلی تاکنون برای پردازش داده ها در روش کاستیک بازتابشی از سه تکنیک: سه نقطه ای جزمی (معین)، زاویه تقارن و چند نقطه ای فراجزمی استفاده شده است. در قسمت بعدی فقط به تشریح روشی که در این پروژه نیز از آن استفاده خواهد شد، اکتفا می شود.

یکی از روشهایی که بطور گسترده جهت بدست آوردن ضرایب شدت تنش در سایه نگاری بازتابشی مورد استفاده قرار گرفته است، روش سه نقطه ای جزمی است. این روش برای اولین بار توسط Theocaris, Gdoutos [۳] برای بدست آوردن ضرایب شدت تنش (K_{II} و K_I) در صفحه ترک دار تحت تنش مورد استفاده قرار گرفت.

با مشاهده منحنی های مختلف کاستیک بازتابشی در حالات مختلف معلوم می شود که تنها در حالتی که نسبت K_{II} به K_I برابر با صفر است، منحنی کاستیک نسبت به محوری که از نوک شیار می گذرد، متقارن می باشد [۱]. با افزایش این نسبت ($\mu = K_{II} / K_I$) تفاضل D_{min} و D_{max} نیز افزایش می یابد (شکل ۱). در نتیجه با استفاده از هندسه منحنی های بدست آمده از روش کاستیک بازتابشی، ضرایب شدت تنش برای مدل و بارگذاری مورد نظر بدست می آید.

از معادلات مؤلفه های بردار \bar{R}' برای صفحات ترک دار در حالت مرکب می توان منحنی های شکل ۳ و شکل ۴ را رسم نمود. این منحنی ها توسط مرجع [۳] ارائه گشته است. شکل ۴ تغییرات نسبت قطرهای D_{max} و D_{min} را بر حسب μ نشان می دهد. پارامتر Ψ بصورت زیر تعریف می شود.

$$\Psi = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max}} \quad (6)$$

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، زمانیکه مقدار Ψ به $0/42$ می رسد، μ به سمت بینهایت میل می کند و این زمانی است که فقط حالت دو ($K_I = 0$) موجود باشد. در شکل ۳ تغییرات پارامتر δ نسبت به μ نشان داده شده است. پارامتر δ بصورت زیر تعریف می شود:

$$\delta = D / \Gamma_0 \quad (7)$$

ضرایب شدت تنش در حالت مرکب برای صفحات

روش آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها در کاستیک بازتابشی برای تعیین ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

جنس مدل

مواد بسیاری برای کاربرد در روش تجربی کاستیک وجود دارند که از میان آنها می‌توان به Araldite B، CR-39، ورق شیشه، Homalite 100 و PMMA اشاره نمود. در این پروژه از پلی متاکریلات (PMMA) استفاده شده است. این ماده تحت عناوین تجاری شیشه پلکسی در آلمان و آمریکا و پرسپکس در انگلستان شناخته می‌شود و در ایران به آن پلکسی و یا طلق می‌گویند. این ماده به شکل ورق‌های تخت و یا میله‌های مدور با سطوح براق و ضخامتهای متفاوت قابل تهیه می‌باشد. انکسار مضاعف پلکسی بسیار اندک می‌باشد و در نتیجه آن را می‌توان دارای خواص همسان‌نوری فرض نمود. بنابراین منحنی‌هایی که به هنگام آزمایش کاستیک در این ماده تشکیل می‌شوند، منحنی‌های واحدی خواهند بود. این ماده دارای حساسیت بالایی سایه - نوری و اثر اندک منطقه پلاستیک است. این ماده همچنین براحتی ماشین‌کاری شده و نیاز به احتیاط برای جلوگیری از بروز ترک و سبب پدیدگی حین ماشین‌کاری ندارد. این امر پلکسی را در میان مواد مناسب برای کارهای استاتیکی قرار می‌دهد. این ماده اثر ویسکوالاستیک کوتاه مدت از خود بروز می‌دهد و بنابراین در هنگام بارگذاری متغیر با زمان می‌بایست اثر فوق را در نظر گرفت [۸].

از آنجاییکه تغییرات ضخامت صفحه مدل از عوامل اصلی تشکیل منحنی کاستیک می‌باشد، لذا ورق انتخابی می‌بایست خالی از هرگونه تغییرات موضعی در چگالی و ضخامت باشد. در صورتیکه این شرایط ارضا نگردند، نتایج غیر قابل اعتماد خواهند بود. خواص مکانیکی و نوری پلکسی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

هندسه مدل

مدلهای در نظر گرفته شده برای آزمایش از ورق شفاف

از آنجاییکه در این پروژه جهت انجام آزمایش فقط حالت اول شکست ($K_{II} = 0$) در نظر گرفته شده است، در نتیجه مقدار μ از قبل معلوم می‌باشد و نیازی به رسم منحنی شکل ۴ برای صفحات شیاردار وجود ندارد. همچنین به جای رسم منحنی شکل ۳ برای صفحات شیاردار فقط نیاز به تعیین مقدار δ به ازای $\mu = 0$ می‌باشد.

برای تعیین مقدار δ در $\mu = 0$ و با در نظر داشتن اینکه در این حالت تقارن منحنی نسبت به محور x ها وجود دارد، باید محل برخورد منحنی کاستیک با محور y' در دو حالت $\theta = \frac{\pi}{2}$ و $\theta = \frac{-\pi}{2}$ را بدست آورده و اندازه D_I/r_0 را معلوم نمود.

معادله دوم از روابط (۴) را در نظر می‌گیریم. به ازاء $\theta = \frac{\pi}{2}$ محل برخورد منحنی با محور y مثبت و به ازاء $\theta = \frac{-\pi}{2}$ محل برخورد با محور y منفی بدست می‌آید. این دو حالت توسط روابط زیر بیان می‌شود.

$$y^+/r_0 = \sin(\pi/2) + \frac{1}{\lambda_1 - 2} \sin[(\lambda_1 - 2)(\pi/2)] \quad (8)$$

$$y^-/r_0 = -\sin(\pi/2) - \frac{1}{\lambda_1 - 2} \sin[(\lambda_1 - 2)(\pi/2)]$$

سپس مقدار δ از مجموع قدر مطلق دو مقدار فوق برای زاویه شیار مورد نظر بدست می‌آید.

$$\delta = D_I/r_0 = |y^+/r_0| + |y^-/r_0| \quad (9)$$

جهت تعیین مقدار K_I از رابطه (۵) مقدار r_0 مورد نیاز می‌باشد. از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش می‌توان مقدار D_I را اندازه‌گیری نمود. سپس با در دست داشتن مقدار δ و D_I اندازه r_0 از رابطه (۷) تعیین می‌گردد. با قرار دادن مقدار r_0 ، پارامترهای آزمایش و خواص جنس مدل مقدار K_I تعیین می‌گردد.

روش انجام آزمایشات

مبانی تئوری و ریاضی روش کاستیک بازتابشی و روش پردازش داده‌ها مورد بحث قرار گرفتند. در این قسمت جزئیاتی همانند جنس مدل مورد آزمایش، هندسه مدل،

جدول ۱: خواص پلکسی در درجه حرارت ۲۵C

مقدار	علامت اختصاری	
۰/۳۳	γ	ضریب پواسون
۳/۳۴ GN/m ^۲	E	مدول الاستیسیته
۱/۱۱×۱۰ m ^۲ /N	C _i	ضریب نوری - تنش (عبوری)
۰/۹۸۸×۱۰ m ^۲ /N	C _δ	ضریب نوری - تنش از سطح بیرونی
۳/۲۲×۱۰ m ^۲ /N	C _r	ضریب نوری - تنش از سطح درونی
۱/۴۹	n	ضریب شکست نور

از ۲ یک میدان تنش کششی یکنواخت عمود بر پهنای ورق، w، ایجاد گردید. با مواظبت‌های خاص پس از ماشینکاری می توان از نبود تنشهای پس ماند اطمینان حاصل نمود. پارامترهای هندسی مدلها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی مدل ها

شماره مدل	طول (l) mm	عرض (w) mm	ضخامت (h) mm	طول شیار (A) mm
V _۱ -۹۰	۲۹۰	۶۳/۵	۳	۲۵/۴
V _۲ -۹۰	۲۴۰	۵۵	۳	۱۱
V _۳ -۹۰	۲۴۰	۵۵	۴	۱۱
V _۱ -۴۵	۲۴۰	۵۵	۳	۱۱
V _۲ -۴۵	۲۴۰	۵۵	۲	۱۱

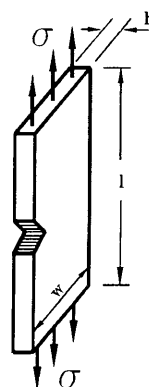
روش انجام آزمایش

آماده سازی وسایل آزمایشگاهی برای تحلیل مسائل استاتیک به کمک روش سایه‌نگاری، بسیار ساده بوده و نیاز به امکانات پیچیده برای بدست آوردن منحنی کاستیک و همچنین ثبت مسیرها ندارد. وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز در روش سایه‌نگاری بازتابشی برای بررسی مسائل استاتیکی عبارتند از:

- منبع نوری مناسب

- مدل شفاف

پلکسی به ضخامت‌های ۲ و ۳ و ۴ میلی متر می باشند. هندسه این مدل ها در شکل ۵ نشان داده شده است. جهت ساخت مدلها، ورقهای پلکسی ابتدا به اندازه‌های موردنظر توسط اهره برقی بریده شدند، سپس با استفاده از ماشین فرز افقی و ابزار فرز انگشتی (برای شیار ۹۰ درجه) و فرز خورشیدی (برای شیار ۴۵ درجه) شیارها در مدل ایجاد شدند.



شکل ۵: هندسه مدل های آزمایش.

برای ایجاد شیار ۹۰ درجه قسمت سرفرز با زاویه ۴۵ درجه نسبت به مدل قرار داده شد و با استفاده از فرز انگشتی شیار مزبور در مدل ایجاد گردید. برای ایجاد شیار ۴۵ درجه فرز خورشیدی با همان زاویه تهیه گردیده و بصورت عمود بر ضخامت مدل روی فرز بسته شده و سپس شیار در مدل فرز گردید. با نسبت پهنا / طول بزرگتر

سیستم بارگذاری و دستگاه اندازه گیری بار - ابزار ثبت تصویر

در این پروژه از پرتو نور حاصل از یک لیزر هلیوم - نئون گازی تک رنگ با طول موج 6328 \AA استفاده شده است. این چنین پرتو نوری شدت بیشتری نسبت به پرتو معمولی دارد و می تواند در نزدیکی نوک شیار مدل متمرکز شده و منحنی کاستیک واضح و روشنی ایجاد نماید. مدل ها با فاصله ای از نقطه کانونی عدسی قرار می گیرند. بخشی از نور تابیده شده به مدل از میان آن عبور کرده و پاره دیگر پس از برخورد با مدل منعکس شده و بر روی پرده ای که در جلو مدل قرار دارد ایجاد تصویر می نماید. مدل ها به کمک سیستم بارگذاری تحت کشش تک محوره قرار می گیرند. سیستم بارگذاری بر روی یک ریل متحرک در صفحه x,y مستقر می گردد تا بتوان تصویر منحنی های کاستیک بر روی صفحه تصویر را تنظیم نمود.

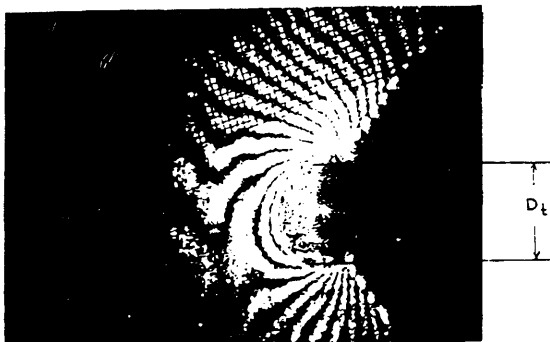
Shimizu و دیگران [۹] بصورت تجربی ثابت کرده اند که اندازه شعاع منحنی اولیه کاستیک t ، اثر قابل ملاحظه ای در مقدار K_t دارد. در نتیجه t باید بزرگتر از نصف ضخامت مدل تحت آزمایش باشد ($t / t > 0.5$) تا اینکه حالت تنش مسطح برقرار گردد [۱۰].

میزان بار وارده از روی یک اندازه گیر با که قبلاً کالیبره شده است قابل اندازه گیری می باشد. سیستم بارگذاری و دستگاه اندازه گیر بار که در این پروژه استفاده شده است، متعلق به دستگاه فتوالاستیسیته واقع در آزمایشگاه فتوالاستیسیته گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی می باشد. منحنی های کاستیک تشکیل شده بر روی پرده تصویر با یک دوربین ۳۵ میلی متری کانون Canon AE-1 Program و با فیلم سیاه و سفید (Speed ASA 400) عکسبرداری شده است. همچنین از یک ورق شفاف میلی متری در محل پرده تصویر به منظور کالیبره کردن استفاده شده است. برای هر آزمایش فاصله بین لیزر و مدل و بین مدل و پرده تصویر نیز قرائت و ثبت می گردد.

روش جمع آوری داده ها

در این قسمت به تشریح چگونگی جمع آوری داده ها در این پروژه پرداخته می شود. روشی که در این پروژه از آن استفاده شده است را شاید بتوان روش زاویه تقارن، هنگامیکه زاویه تقارن برابر صفر باشد، نیز نامید. یعنی زمانیکه مقدار μ معلوم و برابر با صفر می باشد. هنگام انجام آزمایش در این پروژه، یک ورق شفاف میلی متری بر روی پرده تصویر قرار داده می شود. این عمل به منظور یافتن یک معیار یا ضریب اندازه گیری انجام می شود. از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش فاصله بین دو خط ورق میلی متری اندازه گیری می شود. سپس اندازه واقعی بین دوخط بر این مقدار اندازه گیری شده تقسیم شده و ضریب اندازه گیری معلوم می گردد. در نتیجه هر اندازه ای که از روی منحنی های کاستیک در تصاویر بدست می آید در این ضریب اندازه گیری ضرب شده تا اندازه حقیقی فاصله بدست آید.

اندازه قطر D_t از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش بدست می آید. یکی از این تصاویر در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس اندازه بدست آمده در ضریب اندازه گیری ضرب شده تا اندازه واقعی D_t بدست آید. نهایتاً با در دست داشتن ضریب برای شیار مورد نظر (معادلات ۸ و ۹) مقدار t تعیین می گردد. سپس با جایگذاری خواص جنس مدل و مقدار t در رابطه (۴) ضریب شدت تنش K_t برای حالت اول شکست و زاویه شیار مورد نظر، بدست می آید.



شکل ۶: طریق اندازه گیری قطر D_t .

ارائه نتایج آزمایش

برابر با ۲ و فاصله مدل تا پرده تصویر برابر با ۲/۷ متر بوده است. ضریب δ از روابط ۷ و ۸ برای شیار ۹۰ درجه برابر با ۳/۰۳ و برای شیار ۴۵ درجه برابر با ۲/۹۴ تعیین گشت. نتایج بدست آمده برای تنش های مختلف در جداول ۳ تا ۸ برای هر مدل بطور جداگانه ارائه شده است.

همانطور که در جدول نتایج مشاهده می شود هر قدر مقدار تنش افزوده می شود، مقدار ضریب شدت تنش K_I نیز افزایش می یابد. مقادیر بدون بعد تنش $(K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1})$ که در ستون آخر جدول نتایج ارائه شده، با نتایج بدست آمده توسط پژوهشگران دیگر مقایسه شده است (جدول ۸). همانگونه که مشاهده می شود مقدار اختلاف با نتایج تئوری و تجربی بین ۱ تا ۵ درصد می باشد.

از آنجاییکه مدل های انتخابی در این پروژه توسط پژوهشگران دیگر [۱۱، ۱۲، ۱۳] در روشهای تئوری، عددی و تجربی برای بدست آوردن ضریب شدت تنش مورد استفاده قرار گرفته و جوابهای موجود در دسترس می باشد، لذا جهت سنجش نتایج این آزمایش و مقایسه جوابهای بدست آمده با دیگران این مدل ها انتخاب شدند.

مدل ها تحت بارگذاری حالت اول قرار گرفتند و پس از ثبت تصاویر بدست آمده، مقادیر D_I برای هر بارگذاری تعیین گردیده و بطوریکه در فصل قبل تشریح شد مقدار K بدست آمد. در کلیه آزمایشها مقدار ضریب بزرگنمایی δ_m

جدول ۳: نتایج آزمایش برای مدل ۹۰ - V_1

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_I mm	K_I $N/m^{(\lambda_1+1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1-1}$
۱	۱۵۶۲۵۰۰	۹/۷	۱۲۸۹۰۶۲	۴/۴۰
۲	۲۸۶۴۵۸۳	۱۲/۴	۲۴۰۰۵۲۱	۴/۴۷
۳	۴۰۶۲۵۰۰	۱۴/۴	۳۴۴۵۰۰۰	۴/۵۲
۴	۵۲۰۸۳۳۳	۱۶/۰	۴۴۵۳۱۲۴	۴/۵۶
۵	۶۲۵۰۰۰۰	۱۷/۱	۵۲۶۶۱۲۵	۴/۴۹
۶	۷۱۳۵۴۱۷	۱۸/۰	۵۹۱۵۲۶۰	۴/۴۲

جدول ۴: نتایج آزمایش برای مدل ۹۰ - V_2

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_I mm	K_I $N/m^{(\lambda_1+1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1-1}$
۱	۴۸۴۸۴۸۵	۱۱/۱	۱۷۸۹۰۹۱	۲/۸۸
۲	۵۴۵۴۵۴۵	۱۱/۵	۱۹۷۴۵۴۵	۲/۸۳
۳	۶۰۶۰۶۰۶	۱۲/۱	۲۲۱۲۱۲۱	۲/۸۵
۴	۶۶۶۶۶۶۷	۱۲/۶	۲۴۷۸۰۰۰	۲/۹۰
۵	۷۲۷۲۷۲۷	۱۳/۱	۲۷۲۷۲۷۳	۲/۹۳
۶	۷۸۷۸۷۸۸	۱۳/۳	۲۸۶۰۶۰۶	۲/۸۰
۷	۸۴۸۴۸۴۸	۱۴/۰	۳۲۰۸۳۴۷	۲/۹۵

جدول ۵: نتایج آزمایش برای مدل $V_3 - 90$

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۳۲۴۰۷۴۱	۱۰/۵	۱۱۸۶۱۶۱	۲/۸۶
۲	۳۷۰۳۷۰۳	۱۱/۲	۱۳۸۸۸۸۸	۲/۹۳
۳	۴۱۶۶۶۶۷	۱۱/۶	۱۴۹۱۶۶۷	۲/۸۰
۴	۴۶۲۹۶۳۰	۱۲/۱	۱۶۸۹۸۱۵	۲/۸۵
۵	۵۵۵۵۵۵۶	۱۳/۲	۲۰۶۴۹۹۹	۲/۹۰
۶	۶۴۸۱۴۸۱	۱۴/۲	۲۴۵۰۰۰۰	۲/۹۵

جدول ۶: نتایج آزمایش برای مدل $V_1 - 45$

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۳۳۳۳۳۳۳	۹/۸	۸۸۹۹۹۹۹	۲/۴۹
۲	۳۹۳۹۳۹۴	۱۰/۵	۱۰۷۱۵۱۵	۲/۵۴
۳	۴۵۴۵۴۵۵	۱۱/۱	۱۲۲۴۰۹۱	۲/۵۱
۴	۵۱۵۱۵۱۵	۱۱/۶	۱۳۷۰۳۰۳	۲/۴۸
۵	۶۶۶۶۶۶۷	۱۲/۴	۱۶۳۴۲۲۲	۲/۵۰
۶	۷۲۷۲۷۲۳	۱۲/۹	۱۷۶۶۶۶۷	۲/۴۷
۷	۷۸۷۸۷۸۸	۱۳/۴	۱۹۶۳۳۳۶	۲/۵۲

جدول ۷: نتایج آزمایش برای مدل $V_2 - 45$

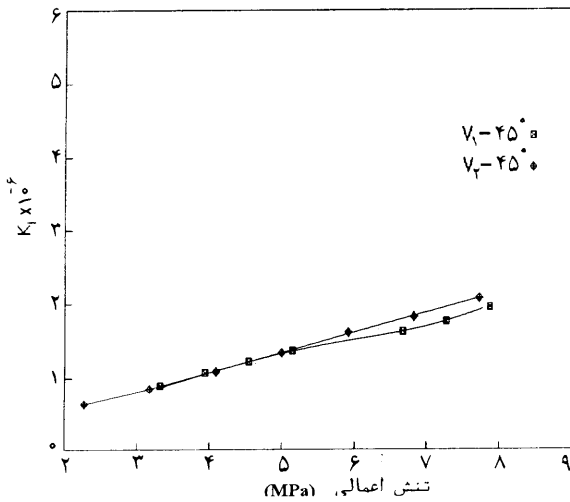
شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۲۲۷۲۷۲۷	۷/۲۰	۶۱۵۹۰۹	۲/۵۳
۲	۳۱۸۱۸۱۸	۸/۲۰	۸۴۶۳۶۴	۲/۴۸
۳	۴۰۹۰۹۰۹	۹/۰	۱۰۸۴۰۹۱	۲/۴۷
۴	۵۰۰۰۰۰۰	۹/۸	۱۳۴۰۰۰۰	۲/۵۰
۵	۵۹۰۹۰۹۱	۱۰/۵	۱۶۰۷۲۷۳	۲/۵۴
۶	۶۸۱۸۱۸۲	۱۱/۱	۱۸۲۰۴۵۵	۲/۴۹
۷	۷۲۷۲۷۲۳	۱۱/۷	۲۰۸۰۹۵۵	۲/۵۱

جدول ۸: مقایسه مقادیر بدون بعد تنش $K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$

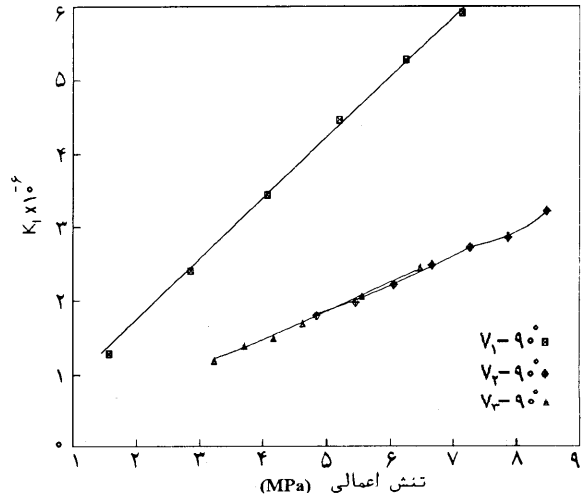
مدل	a/w	h mm	عددی [۱۱]	تجربی [۱۳]	تئوری [۱۲]	کاستیک بازتابشی
$V_1 - 90$	۰/۴	۳	۴/۳۷۶	۴/۶۶	۴/۹۸۴	۴/۴۷۶
$V_2 - 90$	۰/۲	۳	۲/۸۲	-	۲/۸۴۳	۲/۸۷۶
$V_3 - 90$	۰/۲	۴	۲/۸۲	-	۲/۸۴۳	۲/۹
$V_1 - 45$	۰/۲	۳	-	-	۲/۴۸۶	۲/۴۹
$V_2 - 45$	۰/۲	۲	-	-	۲/۴۸۶	۲/۵۰

شکل‌های ۷ و ۸ نمایانگر تغییرات ضریب شدت تنش و قطر D_t نسبت به تنش اعمال شده می باشد. در شکل ۷ (الف) تغییرات ضریب شدت تنش برای سه مدل با شیار ۹۰ درجه نشان داده شده است. در مدل اول نسبت عمق شیار به پهنای صفحه (a/w) برابر با ۰/۴ و در دو مدل دیگر این نسبت برابر با ۰/۲ می باشد.

اختلاف اندک نتایج بدست آمده در مقایسه با جوابهای تئوری [۱۲] و تجربی [۱۳] و عددی [۱۱] گویای دقت خوب جوابهای بدست آمده و صحت روش آزمایشی بکار رفته در این پروژه و در نتیجه مناسب بودن روش سایه‌نگاری بازتابشی جهت تعیین ضریب شدت تنش K_I در صفحات شیاردار می باشد.



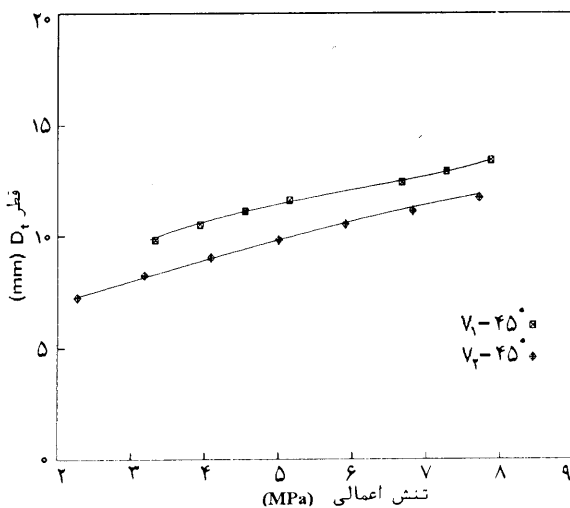
(ب)



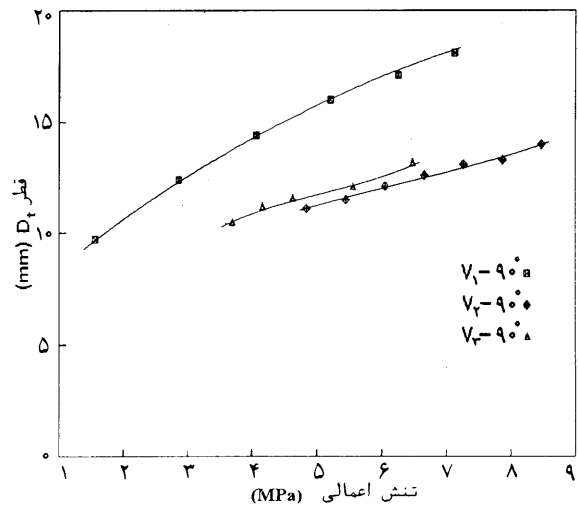
(الف)

شکل ۷: ضریب شدت تنش برحسب تنش اعمال شده.

(الف: شیار ۹۰ درجه) - (ب: شیار ۴۵ درجه)



(ب)



(الف)

شکل ۸: قطر D_t برحسب تنش اعمال شده.

(الف: شیار ۹۰ درجه) - (ب: شیار ۴۵ درجه)

سه تکنیک برای جمع آوری داده‌ها در کاستیک بازتابشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها تلفیقی از تکنیک سه نقطه‌ای جزمی و زاویه تقارن برای جمع آوری داده‌ها استفاده شد و اندازه قطر D_1 در تنشهای مختلف بدست آمد و سپس ضرایب شدت تنش از روی روابط بدست آمده برای شیارها تعیین گشت. نتایج بدست آمده در جداول ۳ تا ۷ ارائه شده است.

مقادیر بدون بعد ضریب شدت تنش با جوابهای بدست آمده از روشهای دیگر مقایسه شد. اختلاف نتایج بدست آمده در مقایسه با روشهای دیگر حداکثر تا ۵ درصد می‌باشد و این بیانگر دقت نسبتاً خوب روش استفاده شده در آزمایش و نهایتاً مناسب بودن روش سایه‌نگاری بازتابشی در تعیین ضریب شدت تنش K_1 برای صفحات شیاردار می‌باشد.

تغییرات ضریب شدت تنش و قطر D_1 برحسب تنش اعمال شده در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتیجه‌ای که می‌توان در ارتباط با تغییرات ضریب شدت تنش در مدل‌ها بیان نمود این است که هر مقدار نسبت a/w بیشتر گردد ضریب شدت تنش نیز بیشتر می‌گردد. همچنین تغییر ضخامت مدل برای یک نسبت a/w مشخص تغییر قابل ملاحظه‌ای در ازدیاد ضریب شدت تنش را موجب نمی‌گردد. برای مثال در شکل ۷ (الف) افزایش نسبت a/w از ۰/۲ به ۰/۴ در یک تنش مشخص باعث دوبرابر شدن ضریب شدت تنش می‌شود در حالیکه در همان شکل افزایش ضخامت مدل برای $a/w = 0.2$ افزایش قابل ملاحظه‌ای را در ضریب شدت تنش نشان نمی‌دهد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که جهت کاربرد صفحات دارای شیار، پس از انتخاب نسبت a/w مناسب می‌توان از ضخامت کمتر استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به خاطر پشتیبانی‌های لازم از این پروژه قدردانی می‌گردد.

بطوریکه مشاهده می‌شود، در یک تنش اعمال شده مشخص، افزایش نسبت (a/w) از ۰/۲ به ۰/۴ تقریباً افزایشی معادل با ۲ برابر را در مقدار K_1 نشان می‌دهد. در حالیکه افزایش ضخامت از ۳ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر برای نسبت $a/w = 0.2$ باعث افزایش محسوسی در مقدار K_1 نمی‌گردد. همچنین در شکل ۷ (ب) برای شیار ۴۵ درجه افزایش ضخامت مدل از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر برای نسبت $a/w = 0.2$ افزایشی را در مقدار K_1 در بر ندارد. تغییرات قطر D_1 برای سه مدل با شیار ۹۰ درجه در شکل ۸ (الف) و برای دو مدل با شیار ۴۵ درجه در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است.

برای یک تنش اعمال شده مشخص، با افزایش نسبت a/w از ۰/۲ (مدل $V_7 - 90$) به ۰/۴ (مدل $V_1 - 90$)، اندازه قطر D_1 تا ۱/۵ برابر افزایش پیدا می‌کند. لیکن با افزایش ضخامت برای نسبت $a/w = 0.2$ مقدار D_1 تنها ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

بحث و نتیجه‌گیری

جهت انجام آزمایش و اعمال روش کاستیک بازتابشی برای تعیین ضریب شدت تنش فقط حالت اول (حالت باز شدن) در نظر گرفته شد و روابط لازم جهت تعیین ضریب شدت تنش بدست آمد. ۵ مدل که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت از صفحه نازک و شفاف از جنس پلکسی ساخته شد. دو مدل با شیار ۹۰ درجه به ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر و دو مدل دیگر با شیار ۴۵ درجه و ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین جهت مقایسه نتایج این روش با نتایج بدست آمده از روش فتوالاستیسیته، یک مدل نیز با شیار ۹۰ درجه و نسبت a/w برابر با ۰/۴ انتخاب گردید.

مدل‌ها تحت بارگذاری حالت اول قرار گرفته و تنش کششی یکنواخت در عرض صفحه با در نظر گرفتن نسبت ارتفاع به پهنا بزرگتر از ۲ ایجاد گردید. در تنش‌های مختلف تصاویر کاستیک بوجود آمده ثبت گردید. تاکنون

مراجع

- ۱ - سلطانی، ن. متین فر، و. "گسترش مبانی ریاضی روش تجربی کاستیک (سایه نگاری) در گوشه‌های مقعر" مجله دانشکده فنی، شماره ۵۷، خرداد، (۱۳۷۵).
- 2 - P. S. Theocaris. (1970). "Local yielding around a crack tip in plexiglass." *Journal of Applied Mechanics*, 37, 409-414.
- 3 - P. S. Theocaris, and E. Gdoutos. (1972). "An optical method for determining opening and sliding mode stress intensity factors." *Journal of Applied Mechanics*, 7, 91-97.
- 4 - P. S. Theocaris.(1981). "Elastic stress intensity factors evaluated by caustics." *In Mechanics of Fracture (Edited by G. C. Sih)*, Maritinus Nijhoff, The Netherlands, 189-252.
- 5 - J. Beinert, and J. F. Kalthoff. (1981). "Experimental determination of dynamic stress intensity factors by shadow patterns." *In Mechanics of Fracture (Edited by G. C. Sih)*, Maritinus Nijhoff, The Netherlands. 281-330.
- 6 - J. Rosakis, and A. T. Zehnder. (1985). "On the method of caustics: an exact analysis based on geometrical optics", *Journal of Elasticity*, 15, 345-367.
- 7 - R. Hermann, and N. J. Holroyd. (1986). "Environment sensitive fracture of AA7475 using shadow optical method of caustics." *Mater. Sci. Technol.*, 2, 1238-1244.
- 8 - N. Soltani, and L. W. Zachary. (1989). "Study of mixed mode stress intensity factors using the experimental method of caustics." *SEM Conference on Experimental Mechanics*.
- 9 - K. Shimizu, S. Takahashi, and H. Shimada. (1985). "Some proposition on caustics and an application to biaxia fracture problem." *Experimental Mechanics*, 25.
- 10 - A. J. Rosakis, and K. Ravi-Chander. (1984). "On crack tip stress state: An experimental evaluation of three dimensional effects." *California Institute of Technology Report*, SM84-2.
- 11 - J. N. Bora. (1988). "Analysis of re-entrant boundaries in problems of plane elasticity by an improved boundary element method." *M.S. Thesis, Iowa State University Ames, Iowa*.
- 12 - B. Gross, and A. Mendelson. (1972). "Plane elastostatic analysis of V-notched plates." *International Journal of Fracture Mechanics*, 8(3), 267-276.
- 13 - M. Mahinfalah. (1988). "Photoelastic determination of stress intensity factors for sharp re-entrant corners in plates under extension." *Ph.D. Thesis, Iowa State University Ames, Iowa*.

واژه نامه

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1 - Shadow spot method | سایه نگاری |
| 2 - Singular | میادین تکین |
| 3 - Reflected | بازتابشی |
| 4 - Transmitted Caustics | سایه نگاری عبوری |
| 5 - Epicycloids | منحنی‌های پاره چرخشی |

روش آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها در کاستیک بازتابشی برای تعیین ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

جنس مدل

مواد بسیاری برای کاربرد در روش تجربی کاستیک وجود دارند که از میان آنها می‌توان به Araldite B، CR-39، ورق شیشه، Homalite 100 و PMMA اشاره نمود. در این پروژه از پلی متاکریلات (PMMA) استفاده شده است. این ماده تحت عناوین تجاری شیشه پلکسی در آلمان و آمریکا و پرسپکس در انگلستان شناخته می‌شود و در ایران به آن پلکسی و یا طلق می‌گویند. این ماده به شکل ورق‌های تخت و یا میله‌های مدور با سطوح براق و ضخامتهای متفاوت قابل تهیه می‌باشد. انکسار مضاعف پلکسی بسیار اندک می‌باشد و در نتیجه آن را می‌توان دارای خواص همسان‌نوری فرض نمود. بنابراین منحنی‌هایی که به هنگام آزمایش کاستیک در این ماده تشکیل می‌شوند، منحنی‌های واحدی خواهند بود. این ماده دارای حساسیت بالای سایه - نوری و اثر اندک منطقه پلاستیک است. این ماده همچنین براحتی ماشین کاری شده و نیاز به احتیاط برای جلوگیری از بروز ترک و سبب پریدگی حین ماشین‌کاری ندارد. این امر پلکسی را در میان مواد مناسب برای کارهای استاتیکی قرار می‌دهد. این ماده اثر ویسکوالاستیک کوتاه مدت از خود بروز می‌دهد و بنابراین در هنگام بارگذاری متغیر با زمان می‌بایست اثر فوق را در نظر گرفت [۸].

از آنجاییکه تغییرات ضخامت صفحه مدل از عوامل اصلی تشکیل منحنی کاستیک می‌باشد، لذا ورق انتخابی می‌بایست خالی از هرگونه تغییرات موضعی در چگالی و ضخامت باشد. در صورتیکه این شرایط ارضا نگردند، نتایج غیر قابل اعتماد خواهند بود. خواص مکانیکی و نوری پلکسی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

هندسه مدل

مدلهای در نظر گرفته شده برای آزمایش از ورق شفاف

از آنجاییکه در این پروژه جهت انجام آزمایش فقط حالت اول شکست ($K_{II} = 0$) در نظر گرفته شده است، در نتیجه مقدار μ از قبل معلوم می‌باشد و نیازی به رسم منحنی شکل ۴ برای صفحات شیاردار وجود ندارد. همچنین به جای رسم منحنی شکل ۳ برای صفحات شیاردار فقط نیاز به تعیین مقدار δ به ازای $\mu = 0$ می‌باشد.

برای تعیین مقدار δ در $\mu = 0$ و با در نظر داشتن اینکه در این حالت تقارن منحنی نسبت به محور x ها وجود دارد، باید محل برخورد منحنی کاستیک با محور y' در دو حالت $\theta = \frac{\pi}{2}$ و $\theta = -\frac{\pi}{2}$ را بدست آورده و اندازه D_I/r_0 را معلوم نمود.

معادله دوم از روابط (۴) را در نظر می‌گیریم. به ازاء $\theta = \frac{\pi}{2}$ محل برخورد منحنی با محور y مثبت و به ازاء $\theta = -\frac{\pi}{2}$ محل برخورد با محور y منفی بدست می‌آید. این دو حالت توسط روابط زیر بیان می‌شود.

$$y^+/r_0 = \sin(\pi/2) + \frac{1}{\lambda_1 - 2} \sin[(\lambda_1 - 2)(\pi/2)] \quad (8)$$

$$y^-/r_0 = -\sin(\pi/2) - \frac{1}{\lambda_1 - 2} \sin[(\lambda_1 - 2)(\pi/2)]$$

سپس مقدار δ از مجموع قدرمطلق دو مقدار فوق برای زاویه شیار مورد نظر بدست می‌آید.

$$\delta = D_I/r_0 = |y^+/r_0| + |y^-/r_0| \quad (9)$$

جهت تعیین مقدار K_I از رابطه (۵) مقدار r_0 مورد نیاز می‌باشد. از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش می‌توان مقدار D_I را اندازه‌گیری نمود. سپس با در دست داشتن مقدار δ و D_I اندازه r_0 از رابطه (۷) تعیین می‌گردد. با قرار دادن مقدار r_0 پارامترهای آزمایش و خواص جنس مدل مقدار K_I تعیین می‌گردد.

روش انجام آزمایشات

مبانی تئوری و ریاضی روش کاستیک بازتابشی و روش پردازش داده‌ها مورد بحث قرار گرفتند. در این قسمت جزئیاتی همانند جنس مدل مورد آزمایش، هندسه مدل،

جدول ۱: خواص پلکسی در درجه حرارت ۲۵C

مقدار	علامت اختصاری	
۰/۳۳	γ	ضریب پواسون
۳/۳۴ GN/m ^۲	E	مدول الاستیسیته
۱/۱۱×۱۰ m ^۲ /N	C _t	ضریب نوری - تنش (عبوری)
۰/۹۸۸×۱۰ m ^۲ /N	C _s	ضریب نوری - تنش از سطح بیرونی
۳/۲۲×۱۰ m ^۲ /N	C _r	ضریب نوری - تنش از سطح درونی
۱/۴۹	n	ضریب شکست نور

از ۲ یک میدان تنش کششی یکنواخت عمود بر پهنای ورق، w، ایجاد گردید. با مواظبت‌های خاص پس از ماشینکاری می توان از نبود تنش‌های پس ماند اطمینان حاصل نمود. پارامترهای هندسی مدلها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی مدل‌ها

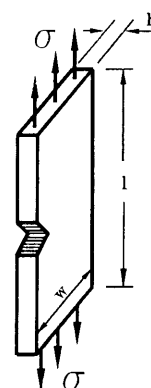
شماره مدل	طول (l) mm	عرض (w) mm	ضخامت (h) mm	طول شیار (A) mm
V _۱ - ۹۰	۲۹۰	۶۳/۵	۳	۲۵/۴
V _۲ - ۹۰	۲۴۰	۵۵	۳	۱۱
V _۳ - ۹۰	۲۴۰	۵۵	۴	۱۱
V _۱ - ۴۵	۲۴۰	۵۵	۳	۱۱
V _۲ - ۴۵	۲۴۰	۵۵	۲	۱۱

روش انجام آزمایش

آماده سازی وسایل آزمایشگاهی برای تحلیل مسائل استاتیک به کمک روش سایه‌نگاری، بسیار ساده بوده و نیاز به امکانات پیچیده برای بدست آوردن منحنی کاستیک و همچنین ثبت مسیرها ندارد. وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز در روش سایه‌نگاری بازتابشی برای بررسی مسائل استاتیکی عبارتند از:

- منبع نوری مناسب
- مدل شفاف

پلکسی به ضخامت‌های ۲ و ۳ و ۴ میلی متر می باشند. هندسه این مدل‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. جهت ساخت مدلها، ورقهای پلکسی ابتدا به اندازه‌های موردنظر توسط اهر برقی بریده شدند، سپس با استفاده از ماشین فرز افقی و ابزار فرز انگشتی (برای شیار ۹۰ درجه) و فرز خورشیدی (برای شیار ۴۵ درجه) شیارها در مدل ایجاد شدند.



شکل ۵: هندسه مدل‌های آزمایش.

برای ایجاد شیار ۹۰ درجه قسمت سرفرز با زاویه ۴۵ درجه نسبت به مدل قرار داده شد و با استفاده از فرز انگشتی شیار مزبور در مدل ایجاد گردید. برای ایجاد شیار ۴۵ درجه فرز خورشیدی با همان زاویه تهیه گردیده و بصورت عمود بر ضخامت مدل روی فرز بسته شده و سپس شیار در مدل فرز گردید. با نسبت پهنای طول بزرگتر

– سیستم بارگذاری و دستگاه اندازه گیری بار
– ابزار ثبت تصویر

در این پروژه از پرتو نور حاصل از یک لیزر هلیوم – نئون گازی تک رنگ با طول موج 6328 \AA استفاده شده است. این چنین پرتو نوری شدت بیشتری نسبت به پرتو معمولی دارد و می تواند در نزدیکی نوک شیار مدل متمرکز شده و منحنی کاستیک واضح و روشنی ایجاد نماید. مدل ها با فاصله ای از نقطه کانونی عدسی قرار می گیرند. بخشی از نور تابیده شده به مدل از میان آن عبور کرده و پاره دیگر پس از برخورد با مدل منعکس شده و بر روی پرده ای که در جلو مدل قرار دارد ایجاد تصویر می نماید. مدل ها به کمک سیستم بارگذاری تحت کشش تک محوره قرار می گیرند. سیستم بارگذاری بر روی یک ریل متحرک در صفحه x, y مستقر می گردد تا بتوان تصویر منحنی های کاستیک بر روی صفحه تصویر را تنظیم نمود.

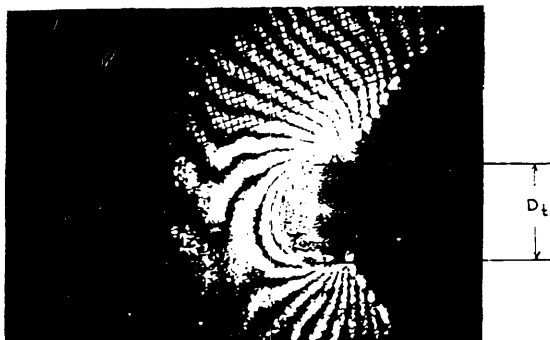
Shimizu و دیگران [۹] بصورت تجربی ثابت کرده اند که اندازه شعاع منحنی اولیه کاستیک I_0 ، اثر قابل ملاحظه ای در مقدار K_I دارد. در نتیجه I باید بزرگتر از نصف ضخامت مدل تحت آزمایش باشد ($I_0 / t > 0.5$) تا اینکه حالت تنش مسطح برقرار گردد [۱۰].

میزان بار وارده از روی یک اندازه گیر با که قبلاً کالیبره شده است قابل اندازه گیری می باشد. سیستم بارگذاری و دستگاه اندازه گیر بار که در این پروژه استفاده شده است، متعلق به دستگاه فتوالاستیسیته واقع در آزمایشگاه فتوالاستیسیته گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی می باشد. منحنی های کاستیک تشکیل شده بر روی پرده تصویر با یک دوربین ۳۵ میلی متری کانون Canon AE-1 Program و با فیلم سیاه و سفید (Speed ASA 400) عکسبرداری شده است. همچنین از یک ورق شفاف میلی متری در محل پرده تصویر به منظور کالیبره کردن استفاده شده است. برای هر آزمایش فاصله بین لیزر و مدل و بین مدل و پرده تصویر نیز قرائت و ثبت می گردد.

روش جمع آوری داده ها

در این قسمت به تشریح چگونگی جمع آوری داده ها در این پروژه پرداخته می شود. روشی که در این پروژه از آن استفاده شده است را شاید بتوان روش زاویه تقارن، هنگامیکه زاویه تقارن برابر صفر باشد، نیز نامید. یعنی زمانیکه مقدار μ معلوم و برابر با صفر می باشد. هنگام انجام آزمایش در این پروژه، یک ورق شفاف میلی متری بر روی پرده تصویر قرار داده می شود. این عمل به منظور یافتن یک معیار یا ضریب اندازه گیری انجام می شود. از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش فاصله بین دو خط ورق میلی متری اندازه گیری می شود. سپس اندازه واقعی بین دو خط بر این مقدار اندازه گیری شده تقسیم شده و ضریب اندازه گیری معلوم می گردد. در نتیجه هر اندازه ای که از روی منحنی های کاستیک در تصاویر بدست می آید در این ضریب اندازه گیری ضرب شده تا اندازه حقیقی فاصله بدست آید.

اندازه قطر D_t از روی تصاویر ثبت شده در آزمایش بدست می آید. یکی از این تصاویر در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس اندازه بدست آمده در ضریب اندازه گیری ضرب شده تا اندازه واقعی D_t بدست آید. نهایتاً با در دست داشتن ضریب برای شیار مورد نظر (معادلات ۸ و ۹) مقدار τ تعیین می گردد. سپس با جایگذاری خواص جنس مدل و مقدار I در رابطه (۴) ضریب شدت تنش K_I برای حالت اول شکست و زاویه شیار مورد نظر، بدست می آید.



شکل ۶: طریق اندازه گیری قطر D_t .

ارائه نتایج آزمایش

برابر با ۲ و فاصله مدل تا پرده تصویر برابر با ۲/۷ متر بوده است. ضریب δ از روابط ۷ و ۸ برای شیار ۹۰ درجه برابر با ۳/۰۳ و برای شیار ۴۵ درجه برابر با ۲/۹۴ تعیین گشت. نتایج بدست آمده برای تنش های مختلف در جداول ۳ تا ۸ برای هر مدل بطور جداگانه ارائه شده است.

همانطور که در جدول نتایج مشاهده می شود هر قدر مقدار تنش افزوده می شود، مقدار ضریب شدت تنش K_I نیز افزایش می یابد. مقادیر بدون بعد تنش $(\lambda_1^{-1}) K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1-1}$ که در ستون آخر جدول نتایج ارائه شده، با نتایج بدست آمده توسط پژوهشگران دیگر مقایسه شده است (جدول ۸). همانگونه که مشاهده می شود مقدار اختلاف با نتایج تئوری و تجربی بین ۱ تا ۵ درصد می باشد.

از آنجاییکه مدل های انتخابی در این پروژه توسط پژوهشگران دیگر [۱۱، ۱۲، ۱۳] در روشهای تئوری، عددی و تجربی برای بدست آوردن ضریب شدت تنش مورد استفاده قرار گرفته و جوابهای موجود در دسترس می باشد، لذا جهت سنجش نتایج این آزمایش و مقایسه جوابهای بدست آمده با دیگران این مدل ها انتخاب شدند.

مدل ها تحت بارگذاری حالت اول قرار گرفتند و پس از ثبت تصاویر بدست آمده، مقادیر D_i برای هر بارگذاری تعیین گردیده و بطوریکه در فصل قبل تشریح شد مقدار K بدست آمد. در کلیه آزمایشها مقدار ضریب بزرگنمایی δ_m ،

جدول ۳: نتایج آزمایش برای مدل ۹۰ - V_1

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_i mm	K_I $N/m^{(\lambda_1+1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1-1}$
۱	۱۵۶۲۵۰۰	۹/۷	۱۲۸۹۰۶۲	۴/۴۰
۲	۲۸۶۴۵۸۳	۱۲/۴	۲۴۰۰۵۲۱	۴/۴۷
۳	۴۰۶۲۵۰۰	۱۴/۴	۳۴۴۵۰۰۰	۴/۵۲
۴	۵۲۰۸۳۳۳	۱۶/۰	۴۴۵۳۱۲۴	۴/۵۶
۵	۶۲۵۰۰۰۰	۱۷/۱	۵۲۶۶۱۲۵	۴/۴۹
۶	۷۱۳۵۴۱۷	۱۸/۰	۵۹۱۵۲۶۰	۴/۴۲

جدول ۴: نتایج آزمایش برای مدل ۹۰ - V_2

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_i mm	K_I $N/m^{(\lambda_1+1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1-1}$
۱	۴۸۴۸۴۸۵	۱۱/۱	۱۷۸۹۰۹۱	۲/۸۸
۲	۵۴۵۴۵۴۵	۱۱/۵	۱۹۷۴۵۴۵	۲/۸۳
۳	۶۰۶۰۶۰۶	۱۲/۱	۲۲۱۲۱۲۱	۲/۸۵
۴	۶۶۶۶۶۶۷	۱۲/۶	۲۴۷۸۰۰۰	۲/۹۰
۵	۷۲۷۲۷۲۷	۱۳/۱	۲۷۲۷۲۷۳	۲/۹۳
۶	۷۸۷۸۷۸۸	۱۳/۳	۲۸۶۰۶۰۶	۲/۸۰
۷	۸۴۸۴۸۴۸	۱۴/۰	۳۲۰۸۳۴۷	۲/۹۵

جدول ۵: نتایج آزمایش برای مدل $V_3 - 90$

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۳۲۴۰۷۴۱	۱۰/۵	۱۱۸۶۱۶۱	۲/۸۶
۲	۳۷۰۳۷۰۳	۱۱/۲	۱۳۸۸۸۸۸	۲/۹۳
۳	۴۱۶۶۶۶۷	۱۱/۶	۱۴۹۱۶۶۷	۲/۸۰
۴	۴۶۲۹۹۳۰	۱۲/۱	۱۶۸۹۸۱۵	۲/۸۵
۵	۵۵۵۵۵۵۶	۱۳/۲	۲۰۶۴۹۹۹	۲/۹۰
۶	۶۴۸۱۴۸۱	۱۴/۲	۲۴۵۰۰۰۰	۲/۹۵

جدول ۶: نتایج آزمایش برای مدل $V_1 - 45$

شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۳۳۳۳۳۳۳	۹/۸	۸۸۹۹۹۹۹	۲/۴۹
۲	۳۹۳۹۳۹۴	۱۰/۵	۱۰۷۱۵۱۵	۲/۵۴
۳	۴۵۴۵۴۵۵	۱۱/۱	۱۲۲۴۰۹۱	۲/۵۱
۴	۵۱۵۱۵۱۵	۱۱/۶	۱۳۷۰۳۰۳	۲/۴۸
۵	۶۶۶۶۶۶۷	۱۲/۴	۱۶۳۴۲۴۲	۲/۵۰
۶	۷۲۷۲۷۲۳	۱۲/۹	۱۷۶۶۶۶۷	۲/۴۷
۷	۷۸۷۸۷۸۸	۱۳/۴	۱۹۶۳۳۳۶	۲/۵۲

جدول ۷: نتایج آزمایش برای مدل $V_2 - 45$

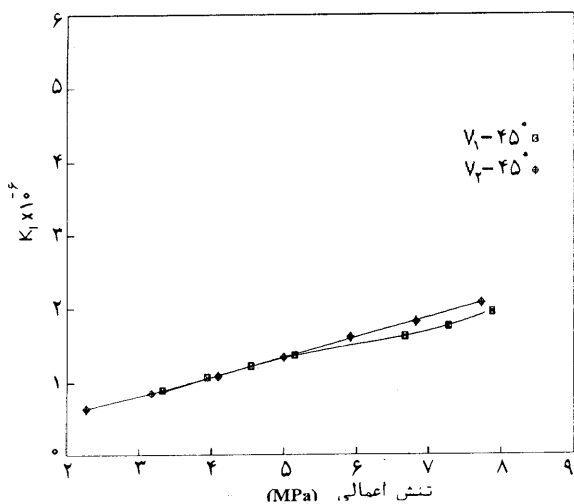
شماره آزمایش	تنش N/m^2	D_t mm	K_I $N/m^{(1+\lambda_1)}$	$K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$
۱	۲۲۷۲۷۲۷	۷/۲۰	۶۱۵۹۰۹	۲/۵۳
۲	۳۱۸۱۸۱۸	۸/۲۰	۸۴۶۳۶۴	۲/۴۸
۳	۴۰۹۰۹۰۹	۹/۰	۱۰۸۴۰۹۱	۲/۴۷
۴	۵۰۰۰۰۰۰	۹/۸	۱۳۴۰۰۰۰	۲/۵۰
۵	۵۹۰۹۰۹۱	۱۰/۵	۱۶۰۷۲۷۳	۲/۵۴
۶	۶۸۱۸۱۸۲	۱۱/۱	۱۸۲۰۴۵۵	۲/۴۹
۷	۷۲۷۲۷۲۳	۱۱/۷	۲۰۸۰۹۵۵	۲/۵۱

جدول ۸: مقایسه مقادیر بدون بعد تنش $K_I \sigma^{-1} a^{\lambda_1 - 1}$

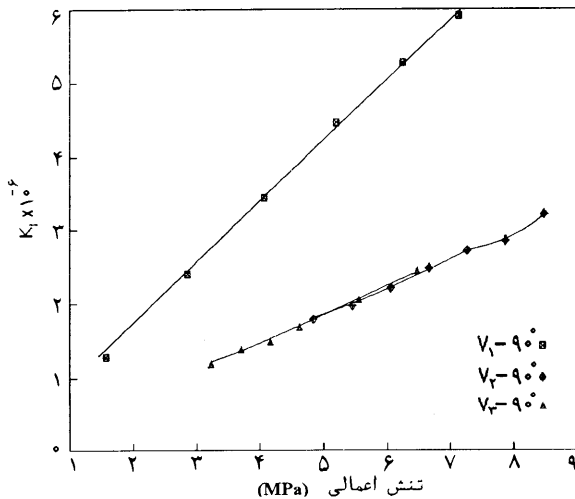
مدل	a/w	h mm	عددی [۱۱]	تجربی [۱۳]	تئوری [۱۲]	کاستیک بازتابشی
$V_1 - 90$	۰/۴	۳	۴/۳۷۶	۴/۶۶	۴/۹۸۴	۴/۴۷۶
$V_2 - 90$	۰/۲	۳	۲/۸۲	-	۲/۸۴۳	۲/۸۷۶
$V_3 - 90$	۰/۲	۴	۲/۸۲	-	۲/۸۴۳	۲/۹
$V_1 - 45$	۰/۲	۳	-	-	۲/۴۸۶	۲/۴۹
$V_2 - 45$	۰/۲	۲	-	-	۲/۴۸۶	۲/۵۰

شکل‌های ۷ و ۸ نمایانگر تغییرات ضریب شدت تنش و قطر D_t نسبت به تنش اعمال شده می باشد. در شکل ۷ (الف) تغییرات ضریب شدت تنش برای سه مدل با شیار ۹۰ درجه نشان داده شده است. در مدل اول نسبت عمق شیار به پهنای صفحه (a/w) برابر با ۰/۴ و در دو مدل دیگر این نسبت برابر با ۰/۲ می باشد.

اختلاف اندک نتایج بدست آمده در مقایسه با جوابهای تئوری [۱۲] و تجربی [۱۳] و عددی [۱۱] گویای دقت خوب جوابهای بدست آمده و صحت روش آزمایشی بکار رفته در این پروژه و در نتیجه مناسب بودن روش سایه‌نگاری بازتابشی جهت تعیین ضریب شدت تنش K_t در صفحات شیاردار می باشد.

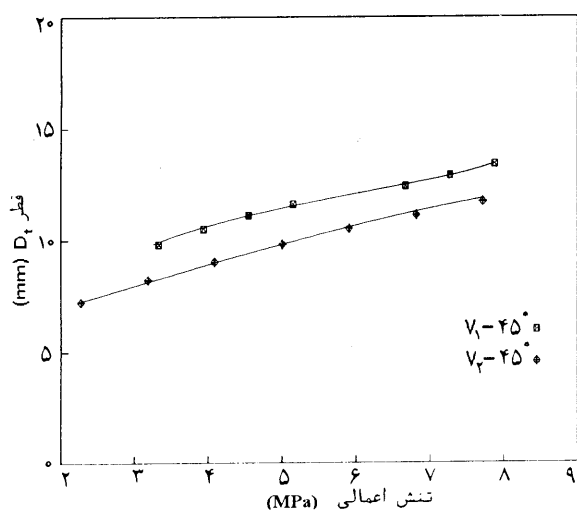


(ب)

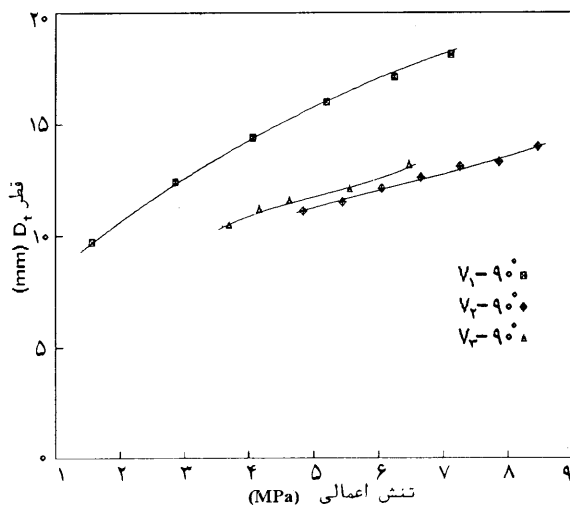


(الف)

شکل ۷: ضریب شدت تنش برحسب تنش اعمال شده.
(الف: شیار ۹۰ درجه) - (ب: شیار ۴۵ درجه)



(ب)



(الف)

شکل ۸: قطر D_t برحسب تنش اعمال شده.
(الف: شیار ۹۰ درجه) - (ب: شیار ۴۵ درجه)

سه تکنیک برای جمع آوری داده‌ها در کاستیک بازتابشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها تلفیقی از تکنیک سه نقطه‌ای جزمی و زاویه تقارن برای جمع آوری داده‌ها استفاده شد و اندازه قطر D_1 در تنشهای مختلف بدست آمد و سپس ضریب شدت تنش از روی روابط بدست آمده برای شیارها تعیین گشت. نتایج بدست آمده در جداول ۳ تا ۷ ارائه شده است.

مقادیر بدون بعد ضریب شدت تنش با جوابهای بدست آمده از روشهای دیگر مقایسه شد. اختلاف نتایج بدست آمده در مقایسه با روشهای دیگر حداکثر تا ۵ درصد می‌باشد و این بیانگر دقت نسبتاً خوب روش استفاده شده در آزمایش و نهایتاً مناسب بودن روش سایه‌نگاری بازتابشی در تعیین ضریب شدت تنش K_1 برای صفحات شیاردار می‌باشد.

تغییرات ضریب شدت تنش و قطر D_1 برحسب تنش اعمال شده در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتیجه‌ای که می‌توان در ارتباط با تغییرات ضریب شدت تنش در مدل‌ها بیان نمود این است که هر مقدار نسبت a/w بیشتر گردد ضریب شدت تنش نیز بیشتر می‌گردد. همچنین تغییر ضخامت مدل برای یک نسبت a/w مشخص تغییر قابل ملاحظه‌ای در ازدیاد ضریب شدت تنش را موجب نمی‌گردد. برای مثال در شکل ۷ (الف) افزایش نسبت a/w از ۰/۲ به ۰/۴ در یک تنش مشخص باعث دوبرابر شدن ضریب شدت تنش می‌شود در حالیکه در همان شکل افزایش ضخامت مدل برای $a/w = 0.2$ افزایش قابل ملاحظه‌ای را در ضریب شدت تنش نشان نمی‌دهد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که جهت کاربرد صفحات دارای شیار، پس از انتخاب نسبت a/w مناسب می‌توان از ضخامت کمتر استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به خاطر پشتیبانی‌های لازم از این پروژه قدردانی می‌گردد.

بطوریکه مشاهده می‌شود، در یک تنش اعمال شده مشخص، افزایش نسبت (a/w) از ۰/۲ به ۰/۴ تقریباً افزایشی معادل با ۲ برابر را در مقدار K_1 نشان می‌دهد. در حالیکه افزایش ضخامت از ۳ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر برای نسبت $a/w = 0.2$ باعث افزایش محسوسی در مقدار K_1 نمی‌گردد. همچنین در شکل ۷ (ب) برای شیار ۴۵ درجه افزایش ضخامت مدل از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر برای نسبت $a/w = 0.2$ افزایشی را در مقدار K_1 در بر ندارد. تغییرات قطر D_1 برای سه مدل با شیار ۹۰ درجه در شکل ۸ (الف) و برای دو مدل با شیار ۴۵ درجه در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است.

برای یک تنش اعمال شده مشخص، با افزایش نسبت a/w از ۰/۲ (مدل ۹۰ - V_2) به ۰/۴ (مدل ۹۰ - V_1)، اندازه قطر D_1 تا ۱/۵ برابر افزایش پیدا می‌کند. لیکن با افزایش ضخامت برای نسبت $a/w = 0.2$ مقدار D_1 تنها ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

بحث و نتیجه‌گیری

جهت انجام آزمایش و اعمال روش کاستیک بازتابشی برای تعیین ضریب شدت تنش فقط حالت اول (حالت باز شدن) در نظر گرفته شد و روابط لازم جهت تعیین ضریب شدت تنش بدست آمد. ۵ مدل که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت از صفحه نازک و شفاف از جنس پلکسی ساخته شد. دو مدل با شیار ۹۰ درجه به ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر و دو مدل دیگر با شیار ۴۵ درجه و ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین جهت مقایسه نتایج این روش با نتایج بدست آمده از روش فتوالاستیسیته، یک مدل نیز با شیار ۹۰ درجه و نسبت a/w برابر با ۰/۴ انتخاب گردید.

مدل‌ها تحت بارگذاری حالت اول قرار گرفته و تنش کششی یکنواخت در عرض صفحه با در نظر گرفتن نسبت ارتفاع به پهنا بزرگتر از ۲ ایجاد گردید. در تنش‌های مختلف تصاویر کاستیک بوجود آمده ثبت گردید. تاکنون

مراجع

- ۱ - سلطانی، ن. متین فر، و. "گسترش مبانی ریاضی روش تجربی کاستیک (سایه نگاری) در گوشه‌های مقعر" مجله دانشکده فنی، شماره ۵۷، خرداد، (۱۳۷۵).
- 2 - P. S. Theocaris. (1970). "Local yielding around a crack tip in plexiglass." *Journal of Applied Mechanics*, 37, 409-414.
- 3 - P. S. Theocaris, and E. Gdoutos. (1972). "An optical method for determining opening and sliding mode stress intensity factors." *Journal of Applied Mechanics*, 7, 91-97.
- 4 - P. S. Theocaris.(1981). "Elastic stress intensity factors evaluated by caustics." *In Mechanics of Fracture (Edited by G. C. Sih)*, Martinus Nijhoff, The Netherlands, 189-252.
- 5 - J. Beinert, and J. F. Kalthoff. (1981). "Experimental determination of dynamic stress intensity factors by shadow patterns." *In Mechanics of Fracture (Edited by G. C. Sih)*, Martinus Nijhoff, The Netherlands. 281-330.
- 6 - J. Rosakis, and A. T. Zehnder. (1985). "On the method of caustics: an exact analysis based on geometrical optics", *Journal of Elasticity*, 15, 345-367.
- 7 - R. Hermann, and N. J. Holroyd. (1986). "Environment sensitive fracture of AA7475 using shadow optical method of caustics." *Mater. Sci. Technol.*, 2, 1238-1244.
- 8 - N. Soltani, and L. W. Zachary. (1989). "Study of mixed mode stress intensity factors using the experimental method of caustics." *SEM Conference on Experimental Mechanics*.
- 9 - K. Shimizu, S. Takahashi, and H. Shimada. (1985). "Some proposition on caustics and an application to biaxia fracture problem." *Experimental Mechanics*, 25.
- 10 - A. J. Rosakis, and K. Ravi-Chander. (1984). "On crack tip stress state: An experimental evaluation of three dimensional effects." *California Institute of Technology Report*, SM84-2.
- 11 - J. N. Bora. (1988). "Analysis of re-entrant boundaries in problems of plane elasticity by an improved boundary element method." *M.S. Thesis, Iowa State University Ames, Iowa*.
- 12 - B. Gross, and A. Mendelson. (1972). "Plane elastostatic analysis of V-notched plates." *International Journal of Fracture Mechanics*, 8(3), 267-276.
- 13 - M. Mahinfalah. (1988). "Photoelastic determination of stress intensity factors for sharp re-entrant corners in plates under extension." *Ph.D. Thesis, Iowa State University Ames, Iowa*.

واژه نامه

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1 - Shadow spot method | سایه نگاری |
| 2 - Singular | میادین تکین |
| 3 - Reflected | بازتابی |
| 4 - Transmitted Caustics | سایه نگاری عبوری |
| 5 - Epicycloids | منحنی‌های پاره چرخشی |