

آزمایشگاه مقاومت مصالح

گزارش آزمایش شماره ۶

فتوالاستیسیته

۹۴/۸/۲۰

G2 گروه

اعضای گروه:

۱- علی آماده

۲- حسین باشی

۳- سروش حبیبی

۴- یاسین ساقیان

نیمسال اول ۹۵-۹۴

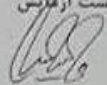
دانشکده مهندسی مکانیک

پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

برگه آزمایش

شماره آزمایش	6	نام آزمایش	فوتوالاستیسیتی
تاریخ انجام آزمایش	۹۸/۸/۲۰	تعداد حاضرین	۳
نام و نام خانوادگی	میزان ناخبر (دقیقه)	نام و نام خانوادگی	میزان ناخبر (دقیقه)
علی دود	—	سید مرتضی	—
حسین ناصر	—	پارسا دشتیان	—

امضا سرپرست آزمایش



موارد مورد نیاز جهت اندازه گیری	n	رنگ هاله	F(N)	$\delta(0.01mm)$
ابعاد سطح مقطع قطعه تحت کشش $w = 30.1 \pm 0.5mm$ $t = 9.83 \pm 0.05mm$	۰.۹	قرمز	۱۸۶	۳۱
	۱	اقرنی	۲۱۶	۳۶
قطر سوراخ بزرگ: $d_1 = 12.82 \pm 0.05mm$	۱.۰۸	کرم	۲۵۲	۴۲
قطر سوراخ وسط: $d_2 = 9.02 \pm 0.05mm$	۱.۲۲	کرم - سبز	۳۱۲	۵۲
قطر سوراخ کوچک: $d_3 =$	۱.۳۹	سبز - زرد	۳۸۴	۶۴
دقت کولیس: $\pm 0.2mm$	۱.۶۳	زرد	۴۳۲	۷۲

رنگ سوراخ کوچک	رنگ سوراخ بزرگ	F(N)
۱.۳۹ - کرم - زرد	۲.۵ - سبز - زرد	۱۸۰
۲.۵ - سبز	۲.۵ - سبز - زرد	۳۵۰

گزارش مختصر

دانشکده مهندسی مکانیک

آزمایشگاه مقاومت مصالح

شماره گروه:

تاریخ: ۹۴، ۸، ۲۰

نام آزمایش: فوتو الاستیسیته

۱. شرح دستاوردهای مهم آزمایش

این آزمایش در زمینه تغییر شکل و تنش در یک ماده الاستیک تحت بارهای مختلف انجام شد. با استفاده از تکنیک فوتو الاستیسیته، توزیع تنش در یک قطعه تحت بار مشخص بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش در نقاط خاص (مثلاً گوشه‌ها و سوراخ‌ها) متمرکز می‌شود. همچنین، با تغییر بار، تغییرات در الگوی تنش مشاهده شد. این آزمایش به درک بهتر رفتار مواد تحت تنش کمک می‌کند.

۲. منابع احتمالی خطا

در این آزمایش، خطاهای احتمالی شامل موارد زیر می‌باشد: ۱. خطای در اندازه‌گیری بار و تغییرات در بار. ۲. خطای در اندازه‌گیری تغییرات در الگوی تنش. ۳. خطای در تفسیر نتایج و مقایسه با تئوری. ۴. خطای در انتخاب ماده آزمایش. ۵. خطای در تنظیم دستگاه. این خطاها می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر داشته باشد.

۳. ضرایب تمرکز تنش در مقادیر بالاتر نیروی F وارده دقیقتر تعیین می شوند یا در مقادیر پایین تر؟ چرا؟

بله، ضرایب تمرکز تنش در مقادیر بالاتر نیروی F وارده دقیقتر تعیین می شوند. زیرا در مقادیر بالاتر، تغییرات در الگوی تنش بیشتر و واضح تر می‌باشد. در مقادیر پایین تر، تغییرات در الگوی تنش کمتر و کمتر قابل تشخیص است. بنابراین، برای تعیین دقیق تر ضرایب تمرکز تنش، نیاز به بارهای بالاتر داریم.

۴. تاکنون تغییر بهیچای قطعه بر نتایج آزمایش چیست؟

تاکنون تغییر بهیچای قطعه بر نتایج آزمایش نیست. زیرا تغییرات در الگوی تنش و ضرایب تمرکز تنش، تنها به بار وارده و خواص ماده بستگی دارد. تغییرات در خواص ماده یا تغییرات در بار، می‌تواند بر نتایج تأثیر داشته باشد. اما تغییرات در خواص ماده یا تغییرات در بار، در این آزمایش اعمال نشده است.



برگه نمره

آزمایش شماره ۶

فتوالاستیسیته

سرپرست آزمایش:

ریز نمرات

شرح موضوع	نمره خام	حداکثر نمره
مقدمه		۳
تئوری		۲
شرح آزمایش		۱۰
نتایج آزمایش		۲۰
بحث و بررسی نتایج آزمایش		۲۵
جمع بندی و نتیجه گیری		۵
مراجع و ضمائم		۱۰
گزارش مختصر		۲۵
جمع کل		۱۰۰

نمره گزارش

نمره خام	ضریب تصحیح	نمره

نمره افراد

نام	تاخیر	نمره نهایی
۱ علی آماده	-	
۲ حسین باشی	-	
۳ سروش حبیبی	-	
۴ یاسین ساقیان	-	

امضا سرپرست آزمایش

فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۵
۲- تئوری.....	۸
۱-۲- پلاریزه شدن نور.....	۸
۲-۲- پلاریسکوپ.....	۹
۱-۲-۲- پلاریسکوپ صفحه‌ای.....	۱۰
۲-۲-۲- پلاریسکوپ دایره‌ای.....	۱۰
۳-۲-۲- صفحه‌ی ربع موج.....	۱۲
۳-۲- مواد bi-refringement.....	۱۲
۴-۲- ضریب تمرکز تنش.....	۱۳
۳- شرح آزمایش.....	۱۵
۱-۳- وسایل مورد استفاده در آزمایش.....	۱۵
۲-۳- نحوه‌ی انجام آزمایش.....	۱۶
۳-۳- عوامل خطا.....	۱۹
۴- نتایج آزمایش.....	۲۰
۱-۴- به دست آوردن ضریب حساسیت ماده (f).....	۲۰
۲-۴- محاسبه‌ی میزان خطای ضریب حساسیت ماده (f).....	۲۱
۳-۴- به دست آوردن حساسیت ماده (f) و خطای آن با استفاده از روابط رگرسیون.....	۲۲
۴-۴- محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش (K_t).....	۲۶
۱-۴-۴- محاسبات مربوط به تعیین ضرایب تمرکز تنش.....	۲۶
۲-۴-۴- محاسبه‌ی خطای ضرایب تمرکز تنش.....	۲۷
۳-۴-۴- محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش تئوری.....	۲۹
۵- بحث و بررسی نتایج آزمایش.....	۳۰
۶- جمع بندی و نتیجه‌گیری.....	۳۲
۷- مراجع.....	۳۴
۸- ضمائم.....	۳۴

فهرست اشکال

- شکل ۱: حرکت نور در طول صفحات مشخص شده و پلاریزه شدن آن..... ۸
- شکل ۲: اساس کار یک صفحه‌ی پلاریزه کننده‌ی تخت عمودی..... ۹
- شکل ۳: شماتیک یک پلاریسکوپ صفحه‌ای..... ۱۰
- شکل ۴: شمایی از یک پلاریسکوپ دایروی..... ۱۱
- شکل ۵: پلاریسکوپ دایره‌ای..... ۱۱
- شکل ۶: نمودار مورد استفاده برای تعیین ضریب تمرکز تنش مربوط به یک ورق نازک تحت کشش ساده..... ۱۴
- شکل ۷: پلاریسکوپ دایره‌ای مورد استفاده در آزمایش..... ۱۵
- شکل ۸: ساعت اندازه‌گیری میزان جابجایی حلقه‌ی اعمال کننده‌ی بار..... ۱۶
- شکل ۹: منحنی تغییرات بارکششی اعمال شده به قطعه برحسب میزان جابجایی حلقه‌ی اعمال کننده‌ی بار..... ۱۶
- شکل ۱۰: هاله‌ی ایجاد شده در قطعه پیش از شروع بارگذاری..... ۱۷
- شکل ۱۱: هاله‌ی ایجاد شده در قطعه پس از اعمال بارگذاری در یکی از حالات آزمایش..... ۱۷
- شکل ۱۲: طیف رنگی ایجاد شده در نزدیکی سوراخ بزرگ در اثر تمرکز تنش..... ۱۸
- شکل ۱۳: طیف رنگی ایجاد شده در نزدیکی سوراخ کوچک در اثر تمرکز تنش..... ۱۸
- شکل ۱۴: منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله..... ۲۴
- شکل ۱۵: منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله به همراه خطوط اعتماد..... ۲۵

فهرست جداول

جدول ۱: مرتبه‌ی هاله برای رنگ‌های مختلف.....	۱۳
جدول ۲: داده‌های حاصل از آزمایش.....	۲۰
جدول ۳: داده‌های حاصل از آزمایش به همراه نیروی اعمالی به قطعه‌ی مورد آزمایش.....	۲۰
جدول ۴: نتایج محاسبات انجام شده.....	۲۱
جدول ۵: نتایج حاصل از محاسبات خطا.....	۲۲
جدول ۶: اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات رگرسیون.....	۲۳
جدول ۷: داده‌های حاصل از آزمایش برای محاسبه‌ی ضرایب تمرکز تنش.....	۲۶
جدول ۸: نتایج حاصل از محاسبات مربوط به تعیین ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ بزرگ.....	۲۶
جدول ۹: نتایج حاصل از محاسبات مربوط به تعیین ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ کوچک.....	۲۷
جدول ۱۰: نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز میانگین سوراخ‌های بزرگ و کوچک.....	۲۹
جدول ۱۱: نتایج به دست آمده برای ضرایب حساسیت ماده (f).....	۳۰
جدول ۱۲: نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز تنش سوراخ بزرگ.....	۳۰
جدول ۱۳: نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز تنش سوراخ کوچک.....	۳۱

۱- مقدمه

بررسی تنش ایجاد شده در قطعات مختلف موجود در صنعت بر اثر بارهای وارده به آن‌ها یکی از مهم‌ترین مسایل در علم مقاومت مصالح و طراحی این قطعات می‌باشد. برای تحلیل تنش در یک قطعه می‌توان از روش‌های نظری مانند مقاومت مصالح یا تئوری الاستیسیته، روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود یا روش تفاضل محدود و روش‌های تجربی مثل کرنش‌سنج مقاومت الکتریکی یا روش فتوالاستیسیته استفاده کرد؛ در این آزمایش به تحلیل تجربی تنش با استفاده از روش فتوالاستیسیته پرداخته می‌شود. در واقع هدف از انجام این آزمایش تعیین تجربی تنش با استفاده از روش فتوالاستیسیته و به وسیله‌ی دستگاه پلاریسکوپ در یک مدل از جنس اپوکسی و تحت بارگذاری خارجی است. از آنجا که در این روش نقاطی که تنش‌های متفاوتی دارند، با طیف‌های رنگی مختلفی نمایان می‌شوند، از این‌رو می‌توان هر رنگ را مقیاسی برای اندازه‌گیری تنش‌ها در نظر گرفت. هدف دیگر این آزمایش استفاده از دستگاه پلاریسکوپ برای تعیین ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ‌های موجود روی قطعه و مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از آزمایش با نتایج تئوری است. مراجع اصلی مورد استفاده در این آزمایش ابتدا دستور کار آزمایشگاه مقاومت مصالح و سپس کتاب طراحی اجزاء ماشین نوشته‌ی جوزف شیگلی می‌باشند.

در ادامه‌ی این گزارش و در بخش دوم ابتدا توضیحاتی در مورد مفاهیم و ابزارهای مورد استفاده در آزمایش فتوالاستیسیته شامل پلاریزه شدن نور، پلاریسکوپ و انواع آن، صفحه‌ی ربع موج و مواد bi-refringement و... داده می‌شود و پس از آن در مورد ضریب تمرکز تنش به صورت خلاصه صحبت خواهد شد؛ در بخش سوم توضیحاتی در مورد چگونگی انجام آزمایش بر روی نمونه‌ی مورد نظر و همچنین وسایل مورد استفاده در انجام این آزمایش آورده می‌شود و منابع احتمالی خطا به طور خلاصه توضیح داده خواهند شد؛ در بخش چهارم در ابتدا ضریب حساسیت میانگین ماده (f) و میزان خطای این ضریب به دو روش مختلف محاسبه می‌شوند و در انتهای این بخش نیز ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ‌های موجود روی نمونه و خطای آن‌ها بر مبنای دو ضریب حساسیت به دست آمده در قسمت قبل محاسبه شده و با مقادیر تئوری مورد مقایسه قرار می‌گیرند؛ در بخش پنجم نتایج آزمایش مورد بحث و بررسی بیشتر قرار خواهند گرفت و در مورد علل اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج به دست آمده از روابط تئوری که همان عوامل ایجاد کننده‌ی خطا در آزمایش می‌باشند، توضیحاتی ارائه خواهد شد.

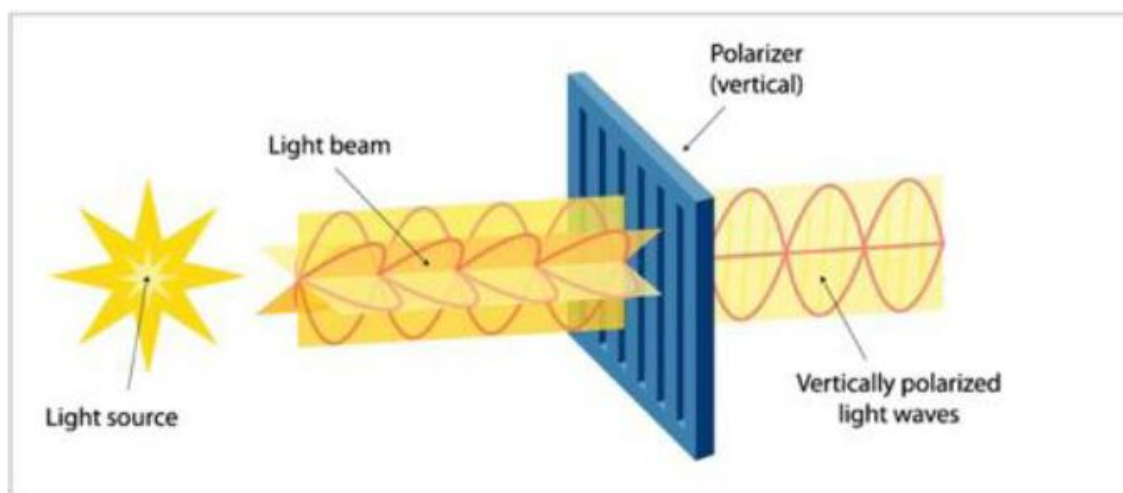
لغات کلیدی: تنش، مقاومت مصالح، طراحی، تئوری الاستیسیته، روش اجزای محدود، روش تفاضل محدود، کرنش‌سنج مقاومت الکتریکی، روش فتوالاستیسیته، تحلیل تجربی تنش، دستگاه پلاریسکوپ، اپوکسی، ضریب تمرکز تنش، پلاریزه شدن نور، صفحه‌ی ربع موج، واد bi-refringement، ضریب حساسیت ماده.

۲- تئوری

۲-۱- پلاریزه شدن نور

اصلی‌ترین رکن روش فتوالاستیسیته، نور است. نیوتن بر این عقیده بود که نور یک ذره است اما یانگ^۱ اعلام کرد که نور یک موج است ولی هیچ‌یک از این نظرات به تنهایی برای توجیه رفتار نور کافی نبود تا اینکه انیشتین نور را یک فوتون (ذره-موج) نامید. برای ساده کردن محاسبات در مبحث فتوالاستیسیته، از نظریه‌ی موج ماکسول استفاده می‌کنیم که براساس این تئوری موج شامل بردارهای الکتریک (E) و مغنتیک (H) می‌باشد و صفحاتی که این بردارها در آن قرار دارند بر هم عمود هستند؛ به طور کلی، چنین موجی را موج الکترومغناطیس می‌نامیم. نورهای مرئی در محدوده‌ی طول موج‌های ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر قرار دارند.

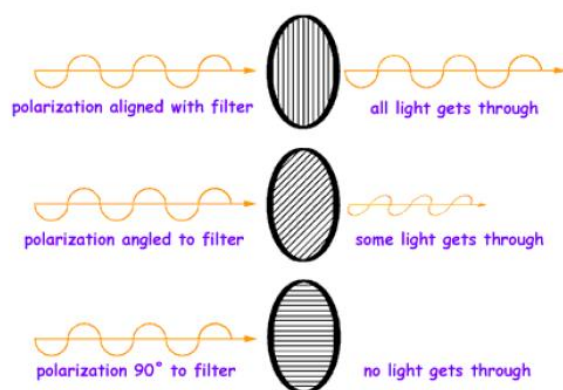
نور به صورت یک موج در فضا شبیه یک تابع سینوسی منتشر می‌شود و اگر به یک اشعه‌ی نور نگاه کنیم، این امواج را طوری می‌بینیم که گویی در طول تعداد محدودی صفحه کشیده شده‌اند.



شکل ۱: حرکت نور در طول صفحات مشخص شده و پلاریزه شدن آن

¹ - Young

در شکل بالا تعدادی از این صفحات نشان داده شده‌اند. یکی از اجزای نور در صفحه‌ی افقی و جزء دیگر در صفحه‌ی عمودی نشان داده شده‌اند. در شکل بالا یک صفحه‌ی پلاریزه کننده‌ی تخت عمودی وجود دارد که نور را تنها در راستای قائم از خود عبور می‌دهد، بر این اساس این صفحه تنها مؤلفه‌ی قائم امواج مایل را از خود عبور می‌دهد و بنابراین موجی که به صورت مایل به این صفحه برخورد می‌کند، کم نورتر به نظر می‌رسد تا جایی که موج افقی به طور کامل توسط آن جذب می‌شود و یک صفحه‌ی تاریک قابل مشاهده است. این فرایند در شکل زیر به صورت ساده نشان داده شده است:



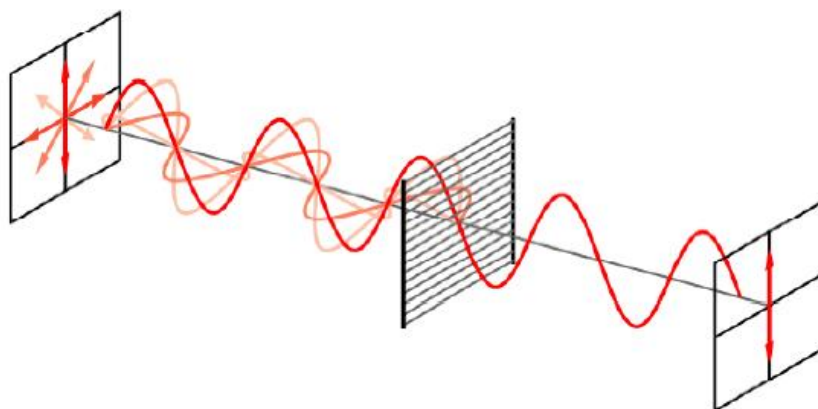
شکل ۲: اساس کار یک صفحه‌ی پلاریزه کننده‌ی تخت عمودی

۲-۲- پلاریسکوپ

دستگاهی که به کمک آن می‌توان آزمایش فتوالاستیسیته را انجام داد، پلاریسکوپ نام دارد و معمولاً به دو شکل صفحه‌ای و دایره‌ای است که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۲-۱- پلاریسکوپ صفحه‌ای^۲

پلاریسکوپ صفحه‌ای، ساده‌ترین سیستم اپتیکی است که در فتوالاستیسیته استفاده می‌شود. ابتدا یک منبع نور داریم، این منبع نور هم می‌تواند شامل نور سفید باشد و هم شامل نور تک رنگ (مثل نور قرمز، سبز و...). اگر نور سفید باشد، در قطعه‌ی مورد آزمایش هاله‌های رنگی به وجود می‌آید و اگر نور تک رنگ باشد، در قطعه‌ی مورد آزمایش هاله‌های سیاه پدید خواهد آمد. پس از منبع نور صفحه‌ای اپتیکی قرار می‌گیرد، که پلاریزر^۳ نام دارد؛ پس از پلاریزر، نمونه‌ی فتوالاستیک قرار می‌گیرد، با توجه به آنکه تنش مستقل از جنس قطعه است، نمونه از جنس مخصوصی است که هاله‌های تنش را نشان دهد. پس از نمونه هم صفحه‌ی دیگری قرار می‌گیرد که آنالیزر^۴ نام دارد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که محور پلاریزر و آنالیزر بر هم عمود است و هاله‌های تنش، از سمت دیگر آنالیزر مشاهده می‌شوند.



شکل ۳: شماتیک یک پلاریسکوپ صفحه‌ای

پلاریزر در راستای ۴۵ درجه نسبت به افق و آنالیزر در راستای ۱۳۵ درجه نسبت به افق قرار می‌گیرند که در این وضعیت ناظر هیچ نوری را مشاهده نمی‌کند.

اگر یکی از صفحات را بچرخانیم، نور رؤیت می‌شود، به جای چرخاندن صفحه، نمونه‌ی مورد آزمایش را بین دو صفحه قرار می‌دهند زیرا با عبور نور از نمونه، نور در راستای تنش‌های اصلی شکسته می‌شود به طوری که پس از عبور نور از نمونه امواج آن در دو راستای عمود بر هم قرار می‌گیرند که بین این دو راستا اختلاف فاز وجود دارد.

عبور این امواج از آنالیزر سبب تشکیل طیف‌های رنگی می‌شود به طوری که هرچه نیروی اعمالی و به عبارت دیگر تنش ایجاد شده در قطعه بیشتر شود، این طیف‌ها باریک‌تر شده و تغییر رنگ می‌دهند. وقتی نور یک نقطه از نمونه به تاریکی می‌گراید، نشان می‌دهد که یک اختلاف فاز بین دو نصف طول موج به وجود آمده است.

۲-۲-۲- پلاریسکوپ دایره‌ای^۵

این پلاریسکوپ از آن جهت دایره‌ای نامیده شده که نور دایروی تولید می‌کند. مطابق شکل این پلاریسکوپ علاوه بر پلاریزر و آنالیزر دو صفحه‌ی ربع موج^۶ به ترتیب قبل و بعد از نمونه هم دارد. نور معمولی خارج شده از منبع نور، پس از عبور از پلاریزر

^۲ - Plane Polariscopes

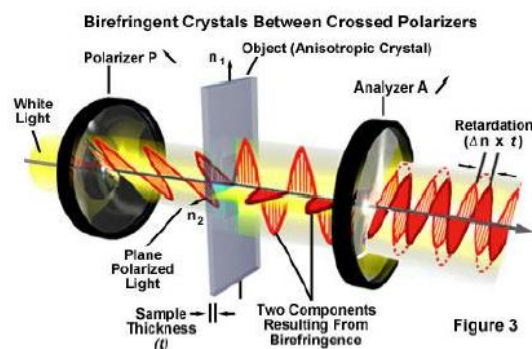
^۳ - Polarizer

^۴ - Analyzer

^۵ - Circular Polariscopes

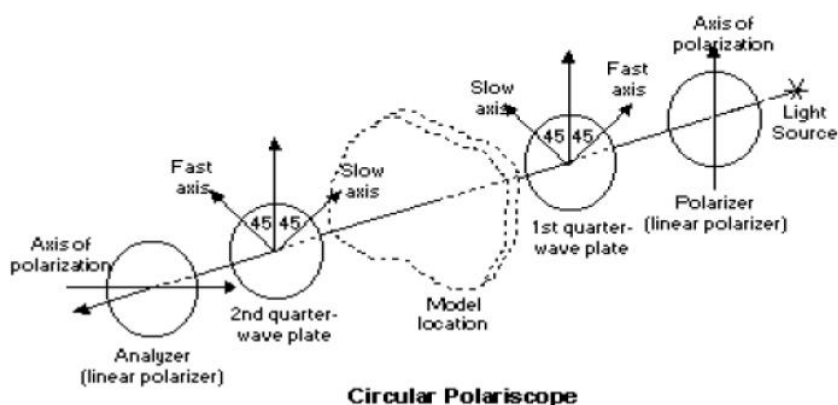
^۶ - Quarter Wave Plate

به صورت نور صفحه ای تغییر پیدا می کند و این نور صفحه ای پس از عبور از صفحه ی ربع موج اول، به صورت نور دایره ای، تغییر پیدا می کند، نور دایره ای به نمونه برخورد کرده و پس از عبور از صفحه ی ربع موج دوم، دوباره نور دایره ای به نور صفحه ای تبدیل می شود، این نور دایره ای سبب می شود تا تعدادی از هاله ها حذف شوند و تنها هاله هایی باقی بمانند که تنش های اصلی را در نمونه نشان می دهند.



شکل ۴: شمایی از یک پلاریسکوپ دایروی

در حقیقت این پلاریسکوپ شبیه یک پلاریسکوپ صفحه ای ساده است که دو عدد صفحه ی ربع موج قبل و بعد از نمونه ی مورد آزمایش قرار می گیرند. صفحه ی پلاریزر در راستای ۴۵ درجه نسبت به راستای قائم و صفحه ی آنالیزر در راستای ۱۳۵ درجه نسبت به راستای قائم (در راستای ۹۰ درجه نسبت به پلاریزر) قرار می گیرند. همان طور که در شکل زیر مشاهده می شود، هر صفحه ی ربع موج دارای دو محور تند^۷ و محور کند^۸ می باشد که با یکدیگر زاویه ی ۹۰ درجه می سازند و هرکدام از این دو محور در موقعیتی دارای زاویه ی ۴۵ درجه نسبت به صفحات پلاریزر و آنالیزر قرار می گیرند.



شکل ۵: پلاریسکوپ دایره ای

^۷ - Fast Axis

^۸ - Slow Axis

در نمونه‌ی تحت اعمال بار، تنش‌های اصلی و اختلاف تنش بین دو نقطه از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر تغییر می‌کند. با قرار دادن نمونه در پلاریسکوپ دایروی و تحت تابش نور سفید، مکان هندسی کلیه‌ی نقاطی که اختلاف تنش بین آن‌ها ثابت است یک طیف را تشکیل می‌دهد که نشان دهنده‌ی رنگ خاصی است. بنابراین با استفاده از پلاریسکوپ دایروی، آنچه که ناظر می‌بیند همان تفاضل تنش‌های اصلی در جسم است و با توجه با اینکه جسم در این آزمایش فقط تحت کشش قرار دارد، فقط در یک راستای اعمال نیرو تنش پدید می‌آید و رنگ‌های دیده شده نشان دهنده‌ی تنش در نقاط مختلف نمونه می‌باشند.

۲-۲-۳- صفحه‌ی ربع موج

صفحه‌ی ربع موج یک صفحه‌ی پلاریسکوپ است که نور را در دو راستای عمود بر هم از خود عبور می‌دهد و بین این دو راستا اختلاف فازی به اندازه‌ی یک چهارم طول موج ایجاد می‌کند.

۲-۳- مواد bi-refrangement

نمونه‌ای که مورد آزمایش فتوالاستیسیته قرار می‌گیرد باید شفاف باشد به طوری که نور را از خود عبور دهد و همچنین از نوع شکست دوگانه^۹ باشد، یعنی نور عبور کننده از نمونه در دو راستای مطلوب دارای دو سرعت متفاوت باشد؛ به این گونه مواد، bi-refrangement گفته می‌شود. این مواد دارای خاصیتی به نام مقدار هاله^{۱۰} می‌باشند که نشان دهنده‌ی حساسیت ماده است و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)t}{n}$$

که در این رابطه σ_1 تنش بیشینه، σ_2 تنش کمینه، t ضخامت و n نیز مرتبه‌ی هاله است.

با توجه به این که تنش کمینه بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است (چون بارگذاری فقط کششی و تنش تنها در یک راستا است) لذا σ_2 را برابر صفر فرض می‌شود. با این فرض رابطه‌ی بالا به صورت زیر ساده می‌شود:

$$f = \frac{\sigma_1 t}{n}$$

^۹ - Double Refracting

^{۱۰} - Fringe Value

جدول زیر مرتبه‌ی هاله را برای رنگ‌های مختلف ارائه می‌دهد:

جدول ۱: مرتبه‌ی هاله برای رنگ‌های مختلف

Color	Fringe Order
black	0
gray	0.28
white	0.45
yellow	0.6
orange	0.8
dull red	0.9
purple	1
deep blue	1.08
blue-green	1.22
green-blue	1.39
orange	1.63
red	1.82
purple	2
green	2.35
green-yellow	2.5
red	2.65
red-green	3

۲-۴- ضریب تمرکز تنش

در یافتن معادلات اصلی تنش برای حالت کشش، فشار، خمش و پیچش، فرض بر این است که هیچ‌گونه تغییر ناگهانی در مقطع عضوهای مورد بررسی وجود ندارد اما اجزاء ماشین در عمل، قطعاتی با تغییرات متنوع در سطح مقطع خود هستند. در طراحی شافت‌ها بایستی شانه‌هایی^{۱۱} برای نصب یاتاقان‌ها و همچنین تحمل بارهای محوری روی آن‌ها تعبیه کرد. علاوه بر این، برای نصب چرخ‌دنده یا چرخ تسمه بر روی شافت‌ها ناچار به ایجاد شیار خار بر روی آن‌ها هستیم. پیچ‌ها در یک طرف دارای کلاهک و در سر دیگر خود دارای رزوه‌هایی هستند که هرکدام به معنی تغییر ناگهانی سطح مقطع است. بسیاری از قطعات دارای سوراخ‌ها، مجاری روغن و انواع شیارها هستند. هرگونه ناپیوستگی در قطعات ماشین موجب تغییر توزیع تنش در اطراف این ناپیوستگی می‌شود، به‌گونه‌ای که معادلات ساده‌ی تنش دیگر قادر به بیان حالت تنش در قطعه نیستند. این ناپیوستگی به تنش‌افزاها^{۱۲} موسومند و مناطقی که در آن‌ها رخ می‌دهند را نواحی تمرکز تنش^{۱۳} گویند.

توزیع تنش الاستیک در امتداد یک مقطع می‌تواند یکنواخت باشد مانند یک میله‌ی تحت کشش، یا اینکه خطی باشد، مثل خمش یک تیر، یا ناگهانی و غیرخطی باشد مانند یک تیر خمیده. تمرکز تنش از غیریکنواختی‌های مصنوعی در مقطع جسم مانند سوراخ‌ها، شیارها، شکاف‌ها و رزوه‌ها ناشی می‌شود. هنگامی که هیچ‌گونه تنش‌افزایی در قطعه نباشد، تنش موجود را تنش اسمی گویند. این تعریف تنش اسمی^{۱۴} همه‌جا معتبر نیست و تعریف دقیق را باید در جداولی که برای تمرکز تنش استفاده می‌شود، جستجو کرد.

¹¹ - shoulders

¹² - stress raisers

¹³ - stress concentration

¹⁴ - nominal stress

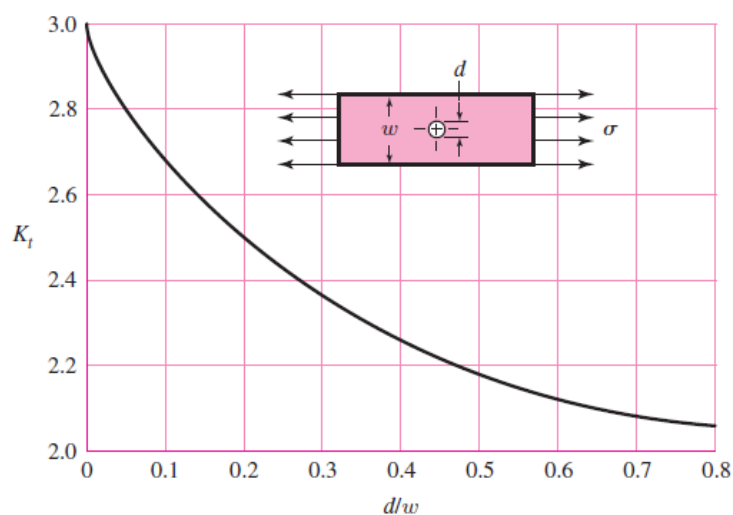
ضریب تمرکز تنش تئوری یا هندسی K_t یا K_{ts} برای ارتباط دادن بیشترین تنش واقعی در ناپیوستگی با تنش اسمی به کار می‌رود. این ضرایب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

$$K_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0}$$

که K_t برای تنش‌های عمودی و K_{ts} برای تنش‌های برشی به کار می‌رود. تعریف تنش اسمی σ_0 یا τ_0 بسیار مشکل است. به طور کلی، این تنش است که با استفاده از معادلات ساده‌ی تنش و سطح مقطع خالص محاسبه می‌شود. اما برخی اوقات سطح مقطع ناخالص به کار برده می‌شود؛ برای مثال برای یک ورق نازک با یک سوراخ عرضی در مرکز آن که تحت کشش یا فشار ساده قرار دارد، نیروی کششی خالص $F = \sigma wt$ است، که t ضخامت ورق است. تنش اسمی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_0 = \frac{F}{(w-d)t} = \frac{w}{(w-d)} \sigma$$



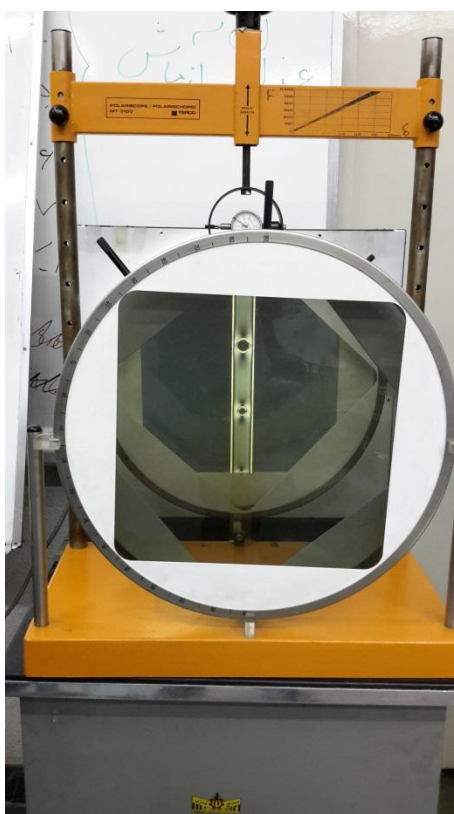
شکل ۶: نمودار مورد استفاده برای تعیین ضریب تمرکز تنش مربوط به یک ورق نازک تحت کشش ساده

۳- شرح آزمایش

۳-۱- وسایل مورد استفاده در آزمایش

- پلاریسکوپ دایره‌ای

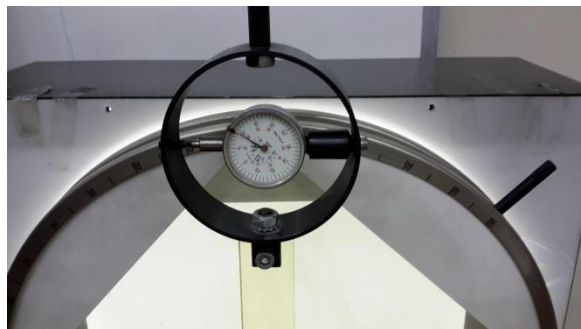
اصلی‌ترین دستگاه آزمایش یک دستگاه پلاریسکوپ دایره‌ای است که متشکل از یک منبع نور سفید و چهار فیلتر می‌باشد. فیلتر اول یک فیلتر معمولی است که اصطلاحاً پلارایزر نامیده می‌شود، فیلتر دوم یک صفحه‌ی ربع موج است و بعد از آن نمونه‌ی آزمایش از جنس پلکسی‌گلاس قرار می‌گیرد، فیلتر سوم نیز یک فیلتر ربع موج بوده و در نهایت فیلتر چهارم یک فیلتر معمولی است که اصطلاحاً آنالایزر نامیده می‌شود و هاله‌های تشکیل شده روی نمونه‌ی مورد بارگذاری از پشت این فیلتر مشاهده می‌گردد.



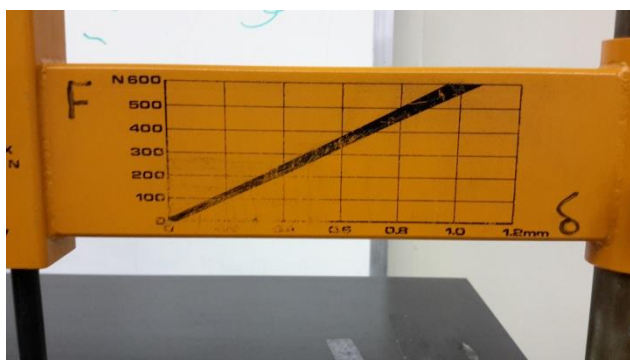
شکل ۷: پلاریسکوپ دایره‌ای مورد استفاده در آزمایش

- مکانیزم اعمال بار

در بالای تیر مورد آزمایش یک حلقه متصل شده است که سمت دیگر آن به پیچی متصل است. برای اعمال بار کششی به تیر، پیچ بالای حلقه بسته می‌شود و بدین ترتیب حلقه مورد کشش قرار گرفته و نیروی کششی را به تیر وارد می‌کند. برای مشخص شدن مقدار بار کششی یک ساعت عمود بر راستای اعمال نیرو و در قطر تیر قرار داده شده که میزان کوچک شدن قطر این حلقه را مشخص می‌کند (دقت این ساعت 0.01 میلی متر می‌باشد). در بالای دستگاه یک نمودار رسم گشته که رابطه‌ی تغییرات قطر حلقه و نیروی وارد شده به تیر را مشخص می‌کند و به کمک آن می‌توان در هر مرحله که پیچ بسته می‌شود، مقدار نیرو را محاسبه کرد.



شکل ۸: ساعت اندازه‌گیری میزان جابجایی حلقه‌ی اعمال کننده‌ی بار



شکل ۹: منحنی تغییرات بارکششی اعمال شده به قطعه برحسب میزان جابجایی حلقه‌ی اعمال کننده‌ی بار

- کولیس

برای اندازه‌گیری ابعاد تیر و قطر سوراخ‌های موجود روی آن از کولیس استفاده می‌شود که دقت آن برابر 0.02 میلی‌متر است.

۳-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش

ابتدا ابعاد مقطع تیر و هم‌چنین قطر دو سوراخ موجود روی تیر به کمک کولیس اندازه‌گیری می‌شود. برای شروع آزمایش دستگاه منبع نور روشن می‌گردد و در وضعیت تابش نور سفید قرار می‌گیرد؛ سپس زاویه‌ی فیلترها را تنظیم کرده بدین ترتیب که فیلتر اول در زاویه صفر درجه، فیلتر دوم در زاویه‌ی 45 درجه، فیلتر سوم در زاویه‌ی 135 درجه و فیلتر آخر در زاویه‌ی 90 درجه قرار می‌گیرند. از طریق گرداندن پیچ بالای تیر شروع به بارگذاری بر روی نمونه و ایجاد تنش در آن می‌کنیم. در شروع کار و قبل از شروع بارگذاری عددی که ساعت نشان می‌دهد خوانده می‌شود سپس بارگذاری را شروع کرده و در هر مرحله تغییر عدد ساعت نسبت به مقدار اولیه را مشخص کرده و بدین ترتیب به کمک نمودار موجود مقدار بار وارد شده به تیر مشخص می‌گردد. با گرداندن دسته، تیر تحت تنش قرار می‌گیرد و هاله‌هایی رنگی در تیر نمایان می‌شود. در

نزدیکی سوراخ‌ها به دلیل تمرکز تنش هاله دارای طیف رنگ می‌باشد و رنگ یکسانی برای هاله در این قسمت وجود ندارد بنابراین در هر مرحله با تغییر بار کششی در مکانی دور از سوراخ‌ها رنگ هاله مشخص شده و ثبت می‌گردد. برای دقت بیشتر، بهتر است از زمانی که هاله‌ی موجود در تیر به رنگ قرمز تیره درمی‌آید، ثبت رنگ‌های متناسب با نیرو شروع شود؛ ثبت داده‌ها به این صورت است که هر بار رنگ تیر با افزایش بار اعمالی به رنگ یکی از رنگ‌های داده شده در تئوری آزمایش درآمده و جابه‌جایی (و در نهایت نیروی) متناسب با آن رنگ ثبت می‌گردد.

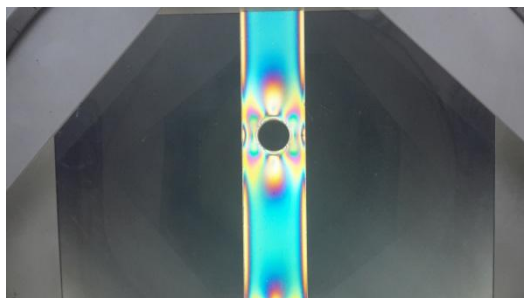


شکل ۱۰: هاله‌ی ایجاد شده در قطعه پیش از شروع بارگذاری

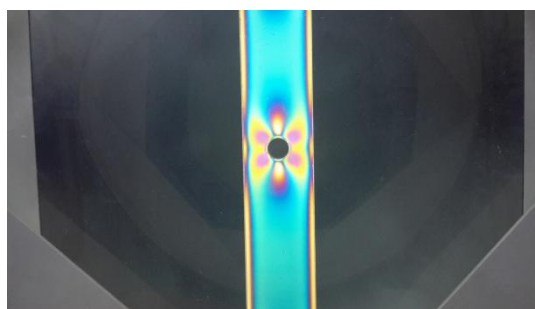


شکل ۱۱: هاله‌ی ایجاد شده در قطعه پس از اعمال بارگذاری در یکی از حالات آزمایش

در مرحله‌ی دوم آزمایش (تعیین ضرایب تمرکز تنش سوراخ‌های موجود روی نمونه) با چرخاندن دسته، نیروی ۱۸۰ نیوتون به تیر وارد می‌شود که معادل با تغییر عقربه‌ی ساعت به مقدار $0/3$ میلیمتر می‌باشد. تنش نامی از رنگ هاله در قسمت‌های دور از سوراخ یا از تقسیم نیروی وارد بر سطح مقطع مشخص می‌گردد؛ رنگ هاله در نزدیکی سوراخ به دلیل تمرکز تنش متمرکز است و به شکل طیف می‌باشد. برای تشخیص شماره‌ی هاله از نقطه‌ای دور از سوراخ شروع و به سمت لبه‌ی افقی سوراخ حرکت کرده و رنگ‌های مشاهده شده ثبت می‌گردد تا به رنگ موجود در لبه‌ی سوراخ رسیده و مرتبه هاله‌ی متناظر با آن ثبت می‌شود؛ این روند بار دیگر برای بار ۳۰۰ نیوتون انجام شده و نتایج به دست آمده ثبت یادداشت می‌گردد.



شکل ۱۲: طیف رنگی ایجاد شده در نزدیکی سوراخ بزرگ در اثر تمرکز تنش



شکل ۱۳: طیف رنگی ایجاد شده در نزدیکی سوراخ کوچک در اثر تمرکز تنش

۳-۳- عوامل خطا

۱- تنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعه در هنگام ساخت باعث می‌شوند تا قطعه پیش از اعمال بار دارای مقداری تنش باشد به گونه‌ای که در ابتدای آزمایش که هنوز باری بر قطعه اعمال نشده بود، رنگ هاله‌ی مشاهده شده به جای سیاه، خاکستری رنگ بود.

۲- لقی موجود بین پیچ اعمال کننده‌ی بار کششی و قطعه‌ی مورد آزمایش سبب می‌شود تا باری که با استفاده از تنظیم جابجایی حلقه‌ی موجود روی دستگاه اعمال کننده‌ی بار به وسیله‌ی ساعت مورد انتظار است، دقیقاً به نمونه وارد نشود.

۳- به علت ضخیم بودن خط مشخص کننده‌ی رابطه‌ی بین میزان جابجایی حلقه‌ی موجود روی دستگاه اعمال کننده‌ی بار و نیروی وارده به نمونه‌ی مورد آزمایش، به ازای یک جابجایی خاص برای حلقه می‌توان چند مقدار نیرو را از روی این منحنی قرائت کرد.

۴- به علت این که عمود بودن محور اعمال بار بر سطح مقطع قطعه دقیقاً بررسی نمی‌شود بنابراین ممکن است بار اعمال شده به نمونه بار کششی خالص نباشد.

۵- عدم قرارگیری فیلترها در زوایای مناسب تعیین شده باعث می‌شود تا بیننده در شرایطی که هیچ قطعه و نیرویی وجود ندارد، موج نوری را مشاهده کند و از آنجا که همین موج نور مشاهده شده مقیاسی برای تشخیص میزان تنش موجود در قطعه است بنابراین اندازه‌گیری تنش با استفاده از روش فتوالاستیسیته دارای خطا خواهد بود.

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- به دست آوردن ضریب حساسیت ماده (f)

داده‌های حاصل از آزمایش در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۲: داده‌های حاصل از آزمایش

$\delta(0.01mm)$	رنگ هاله	n
۳۱	قرمز تیره	۰/۹
۳۶	ارغوانی	۱
۴۲	آبی تیره	۱/۰۸
۵۲	آبی - سبز	۱/۲۲
۶۴	سبز - زرد	۱/۳۹
۷۲	نارنجی	۱/۶۳

ابعاد سطح مقطع تیر که به وسیله‌ی کولیس اندازه‌گیری می‌شود، برابر است با (دقت کولیس برابر $0.02mm$ است):

$$w = 30.00mm$$

$$t = 9.84mm$$

بین مقدار جابجایی حلقه‌ی موجود روی دستگاه اعمال نیرو و مقدار نیروی اعمالی یک رابطه‌ی تقریباً خطی وجود دارد (مطابق شکل موجود بر روی دستگاه اعمال کننده‌ی نیرو) به گونه‌ای که وقتی نیرویی بر قطعه‌ی مورد آزمایش وارد نمی‌شود، جابجایی حلقه نیز برابر صفر است و هنگامی که جابجایی حلقه به $1mm$ می‌رسد، نیرویی معادل $600N$ به قطعه‌ی مورد آزمایش وارد می‌شود بنابراین می‌توان گفت که هر $0.1mm$ جابجایی حلقه معادل $6N$ نیرو می‌باشد. با استفاده از این نکته می‌توان جدول شماره‌ی ۱ را به صورت زیر تکمیل کرد:

جدول ۳: داده‌های حاصل از آزمایش به همراه نیروی اعمالی به قطعه‌ی مورد آزمایش

$\delta(0.01mm)$	F(N)	رنگ هاله	n
۳۱	۱۸۶	قرمز تیره	۰/۹
۳۶	۲۱۶	ارغوانی	۱
۴۲	۲۵۲	آبی تیره	۱/۰۸
۵۲	۳۱۲	آبی - سبز	۱/۲۲
۶۴	۳۸۴	سبز - زرد	۱/۳۹
۷۲	۴۳۲	نارنجی	۱/۶۳

تنش‌های وارد به قطعه‌ی مورد آزمایش عبارتند از (x راستای اعمال بار است):

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = \frac{F}{wt} = \frac{F}{(30 \times 10^{-3})(9.84 \times 10^{-3})} = \frac{F}{295.2 \times 10^{-6}}$$

$$\sigma_y = \tau_{xy} = 0$$

و تنش‌های اصلی را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\rightarrow \sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = 0$$

همان گونه که در بخش تئوری ذکر شد، حساسیت ماده (f) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{\sigma_1 t}{n} = \frac{\frac{F}{wt} t}{n} = \frac{F}{wn} = \frac{F}{(30 \times 10^{-3})n}$$

نتایج محاسبات در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۴: نتایج محاسبات انجام شده

$\delta(0.01mm)$	F(N)	رنگ هاله	n	$\sigma_1(kPa)$	f(N/m)
۳۱	۱۸۶	قرمز تیره	۰/۹	۶۳۰/۰۸۱۳	۶۸۸۸/۸۸۸۹
۳۶	۲۱۶	ارغوانی	۱	۷۳۱/۷۰۷۳	۷۲۰۰
۴۲	۲۵۲	آبی تیره	۱/۰۸	۸۵۳/۶۵۸۵	۷۷۷۷/۷۷۷۸
۵۲	۳۱۲	آبی - سبز	۱/۲۲	۱۰۵۶/۹۱۰۶	۸۵۲۴/۵۹۰۲
۶۴	۳۸۴	سبز - زرد	۱/۳۹	۱۳۰۰/۸۱۳۰	۹۲۰۸/۶۳۳۱
۷۲	۴۳۲	نارنجی	۱/۶۳	۱۴۶۳/۴۱۴۶	۸۸۳۴/۳۵۵۸

مقدار حساسیت ماده را می‌توان با استفاده از میانگین‌گیری از حساسیت‌های به دست آمده در جدول بالا محاسبه کرد، بنابراین:

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6}{6} = 8072.3743 \frac{N}{m}$$

۴-۲- محاسبه‌ی میزان خطای ضریب حساسیت ماده (f)

طبق رابطه‌ای که برای محاسبه‌ی حساسیت ماده (f) به دست آمد، داریم:

$$f = \frac{F}{wn}$$

حال از دو طرف رابطه‌ی بالا دیفرانسیل لگاریتمی می‌گیریم:

$$\log(f) = \log(F) - \log(w) - \log(n)$$

$$\rightarrow \frac{df}{f} = \frac{dF}{F} - \frac{dw}{w} - \frac{dn}{n}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{F} \Delta F + \frac{1}{w} \Delta w + \frac{1}{n} \Delta n$$

حال می‌بایست میزان خطای موجود هر یک از پارامترها را محاسبه کنیم:

$$\Delta \delta = \frac{0.01}{2} mm = 0.005 mm \rightarrow \Delta F = 6 \times 0.005 = 3N$$

$$\Delta w = \frac{0.02}{2} = 0.01 mm$$

$$\Delta n = 0$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{F} \Delta F + \frac{1}{w} \Delta w$$

نتیجه‌ی محاسبات خطا برای هریک از مقادیر f به دست آمده در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۵: نتایج حاصل از محاسبات خطا

$\delta(0.01\text{mm})$	F(N)	رنگ‌هاله	n	$\sigma_1(\text{kPa})$	f(N/m)	$\Delta f/f$	$\Delta f(\text{N/m})$	f(N/m) پس از تصحیح ارقام
۳۱	۱۸۶	قرمز تیره	۰/۹	۶۳۰/۰۸۱۳	۶۸۸۸/۸۸۸۹	۰/۰۱۶۴۶	۱۱۳/۴۰۷۴	۶۹۰۰±۲۰۰
۳۶	۲۱۶	ارغوانی	۱	۷۳۱/۷۰۷۳	۷۲۰۰	۰/۰۱۴۲۲	۱۰۲/۴	۷۲۰۰±۲۰۰
۴۲	۲۵۲	آبی تیره	۱/۰۸	۸۵۳/۶۵۸۵	۷۷۷۷/۷۷۷۸	۰/۰۱۲۲۴	۹۵/۱۸۵۲	۷۷۸۰±۱۰۰
۵۲	۳۱۲	آبی - سبز	۱/۲۲	۱۰۵۶/۹۱۰۶	۸۵۲۴/۵۹۰۲	۰/۰۰۹۹۴۹	۸۴/۸۰۸۷	۸۵۳۰±۹۰
۶۴	۳۸۴	سبز - زرد	۱/۳۹	۱۳۰۰/۸۱۳۰	۹۲۰۸/۶۳۳۱	۰/۰۰۸۱۴۶	۷۵/۰۱۲۰	۹۲۱۰±۸۰
۷۲	۴۳۲	نارنجی	۱/۶۳	۱۴۶۳/۴۱۴۶	۸۸۳۴/۳۵۵۸	۰/۰۰۷۲۷۸	۶۴/۲۹۴۵	۸۸۳۰±۷۰

برای مقدار میانگین حساسیت ماده نیز داریم:

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6}{6}$$

$$\rightarrow \Delta f = \frac{1}{6} (\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 + \Delta f_4 + \Delta f_5 + \Delta f_6)$$

$$= \frac{1}{6} (113.4074 + 102.4 + 95.1852 + 84.8087 + 75.0120 + 64.2945) = 89.1845 \frac{N}{m}$$

بنابراین با توجه به مقدار خطای محاسبه شده می‌توان ضریب حساسیت ماده را پس از اعمال تصحیح ارقام به شکل زیر نوشت:

$$f = (8070 \pm 90) \frac{N}{m}$$

۴-۳- به دست آوردن حساسیت ماده (f) و خطای آن با استفاده از روابط رگرسیون

مقدار حساسیت ماده (f) و خطای آن را می‌توان به طریق دیگری نیز محاسبه کرد:

$$f = \frac{\sigma_1 t}{n} \rightarrow \sigma_1 = \frac{f}{t} n$$

بنابراین با رسم منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله (n) می‌توان مقدار حساسیت ماده را به دست آورد؛ برای

انجام این کار نیاز به استفاده از روابط مربوط به خط رگرسیون هستیم که در زیر اجمالاً به بررسی این روابط می‌پردازیم:

از آنجایی که طبق رابطه‌ی ذکر شده، نمودار تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله (n) خطی و مبدأگذر است، از این رو شیب خط رگرسیون آن برابر است با:

$$a = \frac{[XY]}{[XX]}$$

که در رابطه‌ی بالا X متناظر با مرتبه‌ی هاله و Y متناظر با تنش اصلی σ_1 است؛ هم‌چنین علامت $\square$ نشان دهنده‌ی حاصل جمع است.

مقدار ضریب رگرسیون (r^2) که دقت خط مورد نظر را بیان می‌کند نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$r^2 = \frac{[XY]^2}{[XX][YY]}$$

برای محاسبه‌ی خطای ضریب a نیز می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$\alpha^2 = \frac{[dd]}{N-2}$$

در رابطه‌ی فوق N برابر تعداد داده‌های آزمایش و d مقدار اختلاف بین مقدار به دست آمده از آزمایش و مقدار به دست آمده از خط رگرسیون است، یعنی:

$$d = aX - Y$$

در نهایت مقدار خطای ضرایب a و b از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\alpha_a^2}{N} = \frac{\alpha_b^2}{[XX]} = \frac{\alpha^2}{\Delta}$$

در رابطه‌ی بالا Δ برابرست با:

$$\Delta = \begin{vmatrix} [XX] & [X] \\ [X] & N \end{vmatrix}$$

حال می‌توان مقدار ضریب حساسیت ماده را با استفاده از روابط ذکر شده در بالا محاسبه کرد، اطلاعات لازم برای انجام این کار در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۶: اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات رگرسیون

	n	σ_1 (kPa)	nn	$n\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_1\sigma_1$ (MPa ²)	d(kPa)	dd(MPa ²)
	۰/۹	۶۳۰/۰۸۱۳	۰/۸۱	۵۶۷/۰۷۳۲	۳۹۷۰۰۲/۴۴۴۶	۱۳۵/۷۰۶۸	۱۸۴۱۶/۳۳۵۶
	۱	۷۳۱/۷۰۷۳	۱	۷۳۱/۷۰۷۳	۵۳۵۳۹۵/۵۷۲۹	۱۱۹/۱۶۸۴	۱۴۲۰۱/۱۰۷۶
	۱/۰۸	۸۵۳/۶۵۸۵	۱/۱۶۶۴	۹۲۱/۹۵۱۲	۷۲۸۷۳۲/۸۳۴۶	۶۵/۲۸۷۳	۴۲۶۲/۴۳۱۵
	۱/۲۲	۱۰۵۶/۹۱۰۶	۱/۴۸۸۴	۱۲۸۹/۴۳۰۹	۱۱۱۷۰۶۰/۰۱۶	-۱۸/۸۴۲۲	۳۵۵/۰۲۸۵
	۱/۳۹	۱۳۰۰/۸۱۳۰	۱/۹۳۲۱	۱۸۰۸/۱۳۰۱	۱۶۹۲۱۱۴/۴۶۱	-۱۱۸/۰۹۵۸	۱۳۹۴۶/۶۱۸۰
	۱/۶۳	۱۴۶۳/۴۱۴۶	۲/۶۵۶۹	۲۳۸۵/۳۶۵۸	۲۱۴۱۵۸۲/۲۹۱	-۷۶/۴۸۷۲	۵۸۵۰/۳۹۱۸
مجموع	۷/۲۲	۶۰۳۶/۵۸۵۳	۹/۰۵۳۸	۷۷۰۳/۶۵۸۵	۶۶۱۱۸۸۷/۶۲	۱۰۶/۷۳۷۳	۵۷۰۳۱/۸۱۳

مقدار شیب خط رگرسیون برابرست با:

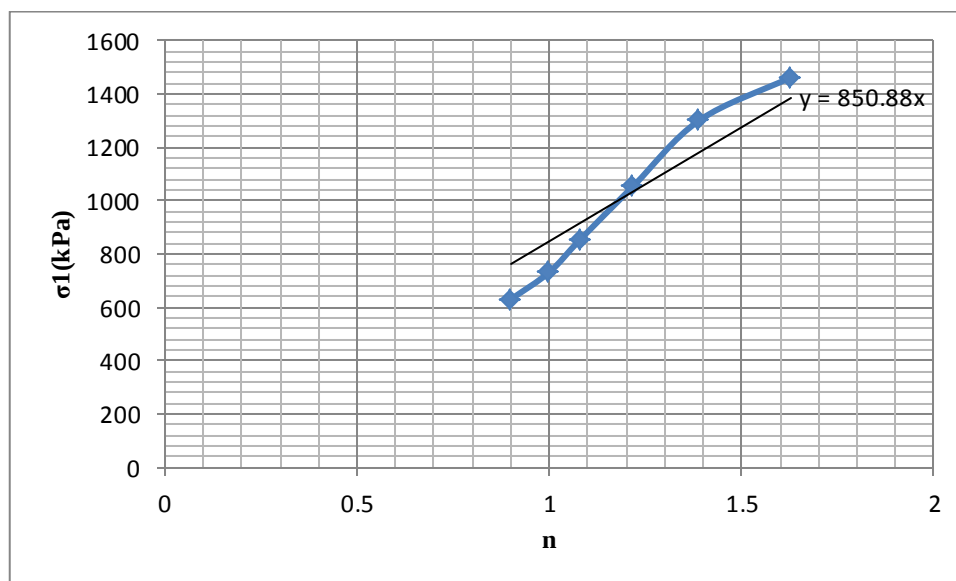
$$a = \frac{[n\sigma_1]}{[nn]} = \frac{7703.6585}{9.0538} = 850.8757 \text{ kPa}$$

و مقدار ضریب همبستگی (r^2) برابرست با:

$$r^2 = \frac{[n\sigma_1]^2}{[nn][\sigma_1\sigma_1]} = \frac{7703.6585^2}{9.0538 \times 6611887.62} = 0.9914$$

نزدیک بودن مقدار ضریب همبستگی به ۱ نشانگر این است که آزمایش از دقت خوبی برخوردار است.

نمودار تغییرات مقدار تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله (n) در شکل زیر آورده شده است:



شکل ۱۴: منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله

با توجه به رابطه‌ی بین تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله داریم:

$$a = \frac{f}{t} \rightarrow f = at = (850.8757 \times 10^3) \times (9.84 \times 10^{-3}) = 8372.6169 \frac{N}{m}$$

حال برای محاسبه‌ی میزان خطای مدول برشی می‌بایست ابتدا میزان خطای شیب خط رگرسیون را به دست آوریم:

$$\alpha^2 = \frac{[dd]}{N-2} = \frac{57031.813}{6-2} = 14257.9533 (MPa^2)$$

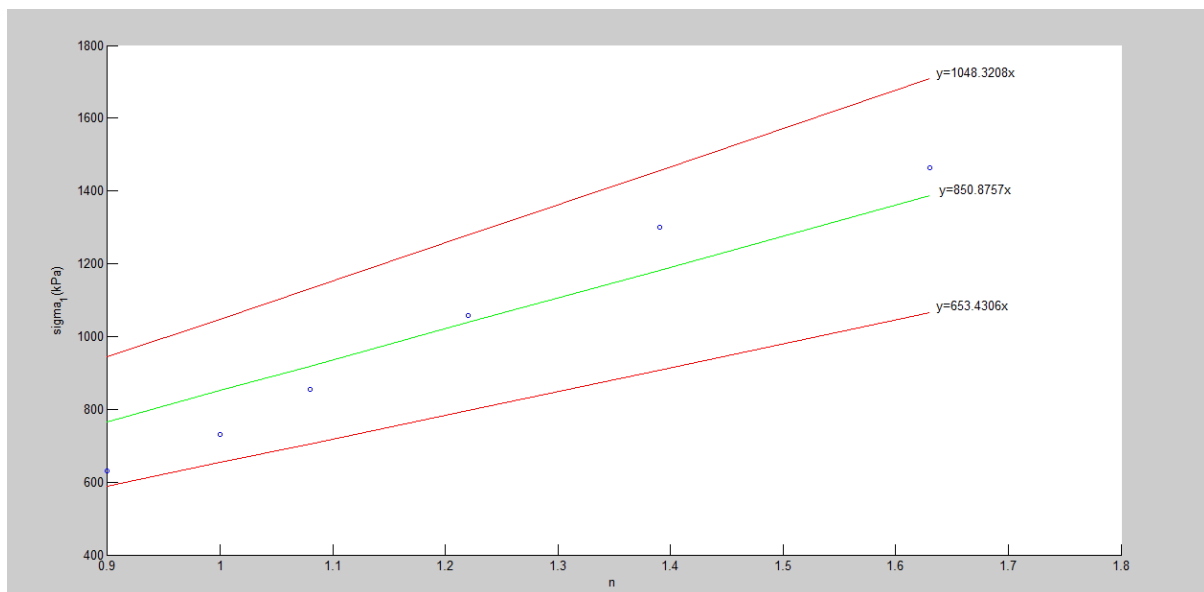
$$\Delta = \begin{vmatrix} [nn] & [n] \\ [n] & N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 9.0538 & 7.22 \\ 7.22 & 6 \end{vmatrix} = 2.1944$$

$$\frac{\alpha_a^2}{N} = \frac{\alpha^2}{\Delta} \rightarrow \frac{\alpha_a^2}{6} = \frac{14257.9533}{2.1944} \rightarrow \alpha_a = 197.4451 \frac{N}{m}$$

با به دست آمدن خطای شیب خط رگرسیون، می‌توان معادله‌ی خطوط اعتماد را به شکل زیر نوشت:

$$\sigma_1 = (850.8757 \pm 197.4451)n$$

خطوط اعتماد در شکل زیر آورده شده‌اند:



شکل ۱۵: منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله به همراه خطوط اعتماد

برای محاسبه‌ی میزان خطای ضریب حساسیت ماده، طبق رابطه‌ی ذکر شده داریم:

$$\sigma_1 = \frac{f}{t}n \rightarrow a = \frac{f}{t} \rightarrow f = at$$

حال از دو طرف معادله دیفرانسیل لگاریتمی می‌گیریم:

$$\log(f) = \log(a) + \log(t)$$

$$\rightarrow \frac{df}{f} = \frac{da}{a} + \frac{dt}{t}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{a}\Delta a + \frac{1}{t}\Delta t$$

حال می‌بایست میزان خطای موجود هر یک از پارامترها را محاسبه کنیم:

$$\Delta a = \alpha_a = 197.4451 \frac{N}{m}$$

$$\Delta t = \frac{0.02}{2} mm = 0.01 mm$$

$$\rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{8372.6169} \times 197.4451 + \frac{1}{9.84} \times 0.01 = 0.02460$$

$$\rightarrow \Delta f = 205.9539 \frac{N}{m}$$

بنابراین با توجه به مقدار خطای محاسبه شده می‌توان ضریب حساسیت ماده را پس از اعمال تصحیح ارقام به شکل زیر نوشت:

$$f = (8400 \pm 300) \frac{N}{m}$$

۴-۴ محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش (K_t)

۴-۴-۱ محاسبات مربوط به تعیین ضرایب تمرکز تنش

با توجه به اینکه ضریب حساسیت ماده (f) در قسمت‌های قبل محاسبه شده است بنابراین می‌توان به وسیله‌ی آن ضریب تمرکز تنش را برای هریک از سوراخ‌های روی قطعه‌ی مورد آزمایش محاسبه کرد. قطر سوراخ‌های موجود روی نمونه‌ی مورد آزمایش که به وسیله‌ی کولیس اندازه‌گیری می‌شود، برابر است با (دقت کولیس برابر 0.02mm است):

برای سوراخ بزرگ:

$$d_1 = 14.86\text{mm}$$

برای سوراخ کوچک (وسط):

$$d_1 = 9.02\text{mm}$$

داده‌های حاصل از آزمایش در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۷: داده‌های حاصل از آزمایش برای محاسبه‌ی ضرایب تمرکز تنش

مرتبه‌ی هاله‌ی سوراخ کوچک	رنگ سوراخ کوچک	مرتبه‌ی هاله‌ی سوراخ بزرگ	رنگ سوراخ بزرگ	F(N)
۱/۳۹	سبز-زرد	۲/۵	سبز-زرد	۱۸۰
۲/۳۵	سبز	۲/۶۵	قرمز	۳۰۰

ضریب تمرکز تنش برای سوراخ را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{max}}{F} = \frac{\sigma_{max}(w-d)t}{F}$$

بیشترین تنش ایجاد شده در قطعه (σ_{max}) در نزدیکی سوراخ اتفاق می‌افتد و می‌توان آن را با استفاده از ضریب حساسیت ماده (f) و مرتبه‌ی هاله (n) تعیین کرد:

$$\sigma_{max} = \frac{nf}{t}$$

نتایج محاسبات برای سوراخ بزرگ در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۸: نتایج حاصل از محاسبات مربوط به تعیین ضریب تمرکز تنش برای سوراخ بزرگ

F(N)	رنگ سوراخ بزرگ	مرتبه‌ی هاله‌ی سوراخ بزرگ (n)	σ_0 (MPa)	f_1 (N/m)	f_2 (N/m)	σ_{max1} (MPa)	σ_{max2} (MPa)	K_{t1}	K_{t2}
۱۸۰	سبز-زرد	۲/۵	۱/۲۰۸۲	۸۰۷۲/۳۷۴۳	۸۳۷۲/۶۱۶۹	۲/۰۵۰۹	۲/۱۲۷۲	۱/۶۹۷۴	۱/۷۶۰۶
۳۰۰	قرمز	۲/۶۵	۲/۰۱۳۷	۸۰۷۲/۳۷۴۳	۸۳۷۲/۶۱۶۹	۲/۱۷۴۰	۲/۲۵۴۸	۱/۰۷۹۶	۱/۱۱۹۷

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان ضریب تمرکز تنش برای سوراخ بزرگ را با استفاده از میانگین‌گیری از دو ضریب تمرکز تنش محاسبه شده به ازای نیروهای ۱۸۰ نیوتن و ۳۰۰ نیوتن به دست آورد:

ضریب تمرکز تنش میانگین براساس ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 :

$$K_t = \frac{1}{2}(1.6974 + 1.0796) = 1.3885$$

ضریب تمرکز تنش میانگین براساس ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 :

$$K_t = \frac{1}{2}(1.7606 + 1.1197) = 1.4402$$

نتایج محاسبات برای سوراخ کوچک (سوراخ وسط) در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۹: نتایج حاصل از محاسبات مربوط به تعیین ضریب تمرکز تنش برای سوراخ کوچک

F(N)	رنگ سوراخ کوچک	مرتبه‌ی هاله‌ی سوراخ کوچک (n)	σ_0 (MPa)	f_1 (N/m)	f_2 (N/m)	σ_{max1} (MPa)	σ_{max2} (MPa)	K_{t1}	K_{t2}
۱۸۰	سبز-زرد	۱/۳۹	۰/۸۷۱۹	۸۰۷۲/۳۷۴۳	۸۳۷۲/۶۱۶۹	۱/۱۴۰۳	۱/۱۸۲۷	۱/۳۰۷۸	۱/۳۵۶۵
۳۰۰	سبز	۲/۳۵	۱/۴۵۳۲	۸۰۷۲/۳۷۴۳	۸۳۷۲/۶۱۶۹	۱/۹۲۷۹	۱/۹۹۹۶	۱/۳۲۶۷	۱/۳۷۶۰

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان ضریب تمرکز تنش برای سوراخ کوچک را با استفاده از میانگین‌گیری از دو ضریب تمرکز تنش محاسبه شده به ازای نیروهای ۱۸۰ نیوتن و ۳۰۰ نیوتن به دست آورد:

ضریب تمرکز تنش میانگین براساس ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 :

$$K_t = \frac{1}{2}(1.3078 + 1.3267) = 1.3173$$

ضریب تمرکز تنش میانگین براساس ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 :

$$K_t = \frac{1}{2}(1.3565 + 1.3760) = 1.3662$$

۴-۴-۲- محاسبه‌ی خطای ضرایب تمرکز تنش

همان‌گونه که ذکر شد، ضریب تمرکز تنش برای سوراخ را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}(w-d)t}{F} = \frac{nf}{t}(w-d)t \frac{1}{F} = \frac{nf(w-d)}{F}$$

برای محاسبه‌ی خطای ضریب تمرکز تنش ابتدا از دو طرف معادله‌ی بالا دیفرانسیل لگاریتمی گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \log(K_t) &= \log(n) + \log(f) + \log(w-d) - \log(F) \\ \rightarrow \frac{dK_t}{K_t} &= \frac{dn}{n} + \frac{df}{f} + \frac{d(w-d)}{w-d} - \frac{dF}{F} = \frac{dn}{n} + \frac{df}{f} + \frac{dw}{w-d} - \frac{dd}{w-d} - \frac{dF}{F} \\ \rightarrow \frac{\Delta K_t}{K_t} &= \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta w}{w-d} + \frac{\Delta d}{w-d} + \frac{\Delta F}{F} \end{aligned}$$

حال می‌بایست میزان خطای موجود هر یک از پارامترها را محاسبه کنیم:

$$\Delta n = 0$$

$$\Delta f_1 = 89.1845 \frac{N}{m}, \Delta f_2 = 205.9539 \frac{N}{m}$$

$$\Delta w = \frac{0.02}{2} mm = 0.01 mm$$

$$\Delta d = \frac{0.02}{2} mm = 0.01 mm$$

$$\Delta \delta = \frac{0.01}{2} mm = 0.005 mm \rightarrow \Delta F = 6 \times 0.005 = 3 N$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 برای بارگذاری ۱۸۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{89.1845}{8072.3743} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{3}{180} = 0.02904 \rightarrow \Delta K_t = 0.04929$$

$$\rightarrow K_t = 1.70 \pm 0.05$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 برای بارگذاری ۱۸۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{205.9539}{8372.6169} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{3}{180} = 0.04259 \rightarrow \Delta K_t = 0.07498$$

$$\rightarrow K_t = 1.76 \pm 0.08$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 برای بارگذاری ۳۰۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{89.1845}{8072.3743} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{3}{300} = 0.02237 \rightarrow \Delta K_t = 0.02415$$

$$\rightarrow K_t = 1.08 \pm 0.03$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 برای بارگذاری ۳۰۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{205.9539}{8372.6169} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{0.01}{30.00 - 14.86} + \frac{3}{300} = 0.03592 \rightarrow \Delta K_t = 0.04022$$

$$\rightarrow K_t = 1.12 \pm 0.05$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ کوچک بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 برای بارگذاری ۱۸۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{89.1845}{8072.3743} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{3}{180} = 0.02867 \rightarrow \Delta K_t = 0.03749$$

$$\rightarrow K_t = 1.31 \pm 0.04$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 برای بارگذاری ۱۸۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{205.9539}{8372.6169} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{3}{180} = 0.04222 \rightarrow \Delta K_t = 0.05727$$

$$\rightarrow K_t = 1.36 \pm 0.06$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_1 برای بارگذاری ۳۰۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{89.1845}{8072.3743} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{3}{300} = 0.02200 \rightarrow \Delta K_t = 0.02919$$

$$\rightarrow K_t = 1.33 \pm 0.03$$

خطای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ بر مبنای ضریب حساسیت ماده‌ی f_2 برای بارگذاری ۳۰۰ نیوتن:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \frac{205.9539}{8372.6169} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{0.01}{30.00 - 9.02} + \frac{3}{300} = 0.03555 \rightarrow \Delta K_t = 0.04892$$

$$\rightarrow K_t = 1.38 \pm 0.05$$

در جدول زیر نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز تنش میانگین برای سوراخ بزرگ و کوچک آورده شده است:

جدول ۱۰: نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز تنش میانگین سوراخ‌های بزرگ و کوچک

	K_{t1}	ΔK_{t1}	تصحیح ارقام K_{t1} برای	K_{t2}	ΔK_{t2}	تصحیح ارقام K_{t2} برای
سوراخ بزرگ	۱/۳۸۸۵	۰/۰۳۶۷۲	۱/۳۹±۰/۰۴	۱/۴۴۰۲	۰/۰۵۷۶۰	۱/۴۴±۰/۰۶
سوراخ کوچک	۱/۳۱۷۳	۰/۰۳۳۳۴	۱/۳۲±۰/۰۴	۱/۳۶۶۲	۰/۰۵۳۱۰	۱/۳۷±۰/۰۶

۴-۳- محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش تئوری

برای سوراخ بزرگ نسبت قطر سوراخ به پهنای نمونه‌ی مورد آزمایش برابرست با:

$$\frac{d_1}{w} = \frac{14.86}{30.00} = 0.4953 \rightarrow K_t = 2.18$$

و درصد خطای ضریب تمرکز تنش میانگین به دست آمده از آزمایش برابرست با،

ضریب تمرکز تنش محاسبه شده بر مبنای ضریب حساسیت f_1 :

$$Error = \frac{|(K_t)_e - (K_t)_t|}{(K_t)_t} \times 100 = \frac{|1.3885 - 2.18|}{2.18} \times 100 = 36.31\%$$

ضریب تمرکز تنش محاسبه شده بر مبنای ضریب حساسیت f_2 :

$$Error = \frac{|(K_t)_e - (K_t)_t|}{(K_t)_t} \times 100 = \frac{|1.4402 - 2.18|}{2.18} \times 100 = 33.94\%$$

برای سوراخ کوچک نسبت قطر سوراخ به پهنای نمونه‌ی مورد آزمایش برابرست با:

$$\frac{d_1}{w} = \frac{9.02}{30.00} = 0.3007 \rightarrow K_t = 2.36$$

و درصد خطای ضریب تمرکز تنش میانگین به دست آمده از آزمایش برابرست با،

ضریب تمرکز تنش محاسبه شده بر مبنای ضریب حساسیت f_1 :

$$Error = \frac{|(K_t)_e - (K_t)_t|}{(K_t)_t} \times 100 = \frac{|1.3173 - 2.36|}{2.36} \times 100 = 44.18\%$$

ضریب تمرکز تنش محاسبه شده بر مبنای ضریب حساسیت f_2 :

$$Error = \frac{|(K_t)_e - (K_t)_t|}{(K_t)_t} \times 100 = \frac{|1.3662 - 2.36|}{2.36} \times 100 = 42.11\%$$

۵- بحث و بررسی نتایج آزمایش

هدف از انجام این آزمایش بررسی تنش ایجاد شده بر اثر بارگذاری خارجی در یک قطعه از جنس اپوکسی با استفاده از روش فتوالاستیسیتیته و دستگاه پلاریسکوپ است به گونه‌ای که طیف‌های رنگی ایجاد شده در قطعه هریک مقیاسی برای اندازه‌گیری تنش می‌باشند؛ ضمناً هدف دیگر از انجام این آزمایش تعیین ضریب تمرکز تنش ناشی از وجود سوراخ‌های روی نمونه‌ی مورد آزمایش از روش تجربی و بررسی نتایج حاصل با داده‌های تئوری می‌باشد.

در ابتدای بخش نتایج آزمایش هدف تعیین ضریب حساسیت ماده (f) و مقدار خطای آن براساس نتایج حاصل از آزمایش بود. برای تعیین این ضریب در این بخش از دو روش استفاده شد؛ ابتدا ضریب حساسیت ماده برای هریک از داده‌های به دست آمده از آزمایش محاسبه و سپس ضریب حساسیت میانگین با میانگین‌گیری از مقادیر محاسبه شده به دست آمد و خطای آن نیز به همین طریق مورد محاسبه قرار گرفت، در روش دوم این ضریب و میزان خطای آن با استفاده از روابط رگرسیون محاسبه شدند. نتایج به دست آمده از این دو روش در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۱۱: نتایج به دست آمده برای ضریب حساسیت ماده (f)

محدوده‌ی به دست آمده برای ضریب حساسیت پس از تصحیح ارقام (N/m)	$\Delta f(N/m)$	$f(N/m)$	
80.70 ± 9.0	89/1845	80.72/3743	روش اول
84.00 ± 3.00	20.5/9539	83.72/6169	روش دوم

از نتایج به دست آمده از محاسبات رگرسیون مشاهده می‌شود که بین مقدار تنش اصلی σ_1 و مرتبه‌ی هاله (Π) همبستگی خطی با دقت قابل قبولی برقرار است (نزدیک بودن ضریب همبستگی (r^2) به یک مؤید این موضوع است)، طبق رابطه‌ی تئوری ذکر شده ($f = \frac{\sigma_1 t}{n}$) نیز مشاهده می‌شود که تغییرات مقدار تنش اصلی σ_1 و مرتبه‌ی هاله به صورت خطی مبدأ گذر است که با نتایج به دست آمده از آزمایش مطابقت دارند. ضریب همبستگی محاسبه شده براساس نتایج آزمایش برابر 0.9914 می‌باشد که نشان می‌دهد روابط تئوری و نتایج حاصل از آزمایش به یکدیگر نزدیکند.

در قسمت دیگر بخش نتایج آزمایش ضرایب تمرکز تنش برای دو سوراخ موجود روی نمونه‌ی مورد آزمایش به وسیله‌ی نتایج حاصل از آزمایش به دست آمدند و با نتایج حاصل از نمودارهای موجود برای تعیین ضریب تمرکز تنش مربوط به سوراخ مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در این قسمت در جداول زیر آورده شده است:

جدول ۱۲: نتایج به دست آمده برای ضریب تمرکز تنش سوراخ بزرگ

درصد خطا	K_{tt}	تصحیح ارقام برای K_{te}	ΔK_{te}	K_{te}	
36/31	2/18	$1/39 \pm 0.04$	0.03672	1/3885	روش اول
33/94	2/18	$1/32 \pm 0.04$	0.03334	1/4402	روش دوم

جدول ۱۳: نتایج به دست آمده برای ضریب تمرکز تنش سوراخ کوچک

درصد خطا	K_{tt}	تصحیح ارقام K_{te} برای	ΔK_{te}	K_{te}	
۴۴/۱۸	۲/۳۶	$۱/۴۴ \pm ۰/۰۶$	$۰/۰۵۷۶۰$	۱/۳۱۷۳	روش اول
۴۲/۱۱	۲/۳۶	$۱/۳۷ \pm ۰/۰۶$	$۰/۰۵۳۱۰$	۱/۳۶۶۲	روش دوم

از نتایج جداول بالا می‌توان مشاهده کرد که ضریب تمرکز تنش به دست آمده از آزمایش برای سوراخ کوچک کمتر از ضریب تمرکز تنش به دست آمده برای سوراخ بزرگ است اما ضریب تمرکز تنش تئوری برای سوراخ کوچکتر بیشتر از مقدار این ضریب برای سوراخ بزرگ است؛ ضمناً درصد خطای نسبتاً قابل توجهی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج مورد انتظار از روابط تئوری وجود دارد که علل این دو موضوع را می‌توان در عوامل ایجاد کننده‌ی خطا جستجو کرد که در زیر آورده شده‌اند:

۱- تنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعه در هنگام ساخت باعث می‌شوند تا قطعه پیش از اعمال بار دارای مقداری تنش باشد به گونه‌ای که در ابتدای آزمایش که هنوز باری بر قطعه اعمال نشده بود، رنگ هاله‌ی مشاهده شده به جای سیاه، خاکستری رنگ بود؛ بنابراین مقدار تنش موجود در قطعه با تنش محاسبه شده $(\sigma_1 = \frac{F}{A})$ متفاوت است و این عامل سبب ایجاد خطا در محاسبه‌ی ضریب حساسیت ماده (f) و به تبع آن ضریب تمرکز تنش می‌شود.

۲- لقی موجود بین پیچ اعمال کننده‌ی بار کششی و قطعه‌ی مورد آزمایش سبب می‌شود تا باری که با استفاده از تنظیم جابجایی حلقه‌ی موجود روی دستگاه اعمال کننده‌ی بار به وسیله‌ی ساعت مورد انتظار است، دقیقاً به نمونه وارد نشود که باعث می‌شود تا تنش وارد شده به قطعه با مقدار در نظر گرفته شده در محاسبات متفاوت باشد و در نتیجه خطایی در محاسبه‌ی ضریب حساسیت ماده (f) و به تبع آن ضریب تمرکز تنش پدید آید.

۳- به علت ضخیم بودن خط مشخص کننده‌ی رابطه‌ی بین میزان جابجایی حلقه‌ی موجود روی دستگاه اعمال کننده‌ی بار و نیروی وارده به نمونه‌ی مورد آزمایش، به ازای یک جابجایی خاص برای حلقه می‌توان چند مقدار نیرو را از روی این منحنی قرائت کرد بنابراین امکان تعیین دقیق نیروی اعمال شده به قطعه وجود ندارد و نیروی در نظر گرفته شده برای محاسبه‌ی تنش یک نیروی تقریبی است بنابراین ضریب حساسیت ماده (f) و به تبع آن ضریب تمرکز تنش محاسبه شده دارای خطا هستند.

۴- به علت این که عمود بودن محور اعمال بار بر سطح مقطع قطعه دقیقاً بررسی نمی‌شود بنابراین ممکن است بار اعمال شده به نمونه بار کششی خالص نباشد و بنابراین تنش‌های اصلی ایجاد شده در نمونه با تنش‌های اصلی در نظر گرفته شده برای آن در محاسبات مربوطه اختلاف داشت باشند لذا ضریب حساسیت ماده (f) و به تبع آن ضریب تمرکز تنش محاسبه شده دارای خطا هستند.

۵- عدم قرارگیری فیلترها در زوایای مناسب تعیین شده باعث می‌شود تا بیننده در شرایطی که هیچ قطعه و نیرویی وجود ندارد، موج نوری را مشاهده کند و از آنجا که همین موج نور مشاهده شده مقیاسی برای تشخیص میزان تنش موجود در قطعه است بنابراین اندازه‌گیری تنش با استفاده از روش فتوالاستیسیته دارای خطا خواهد بود که در نتیجه‌ی آن ضریب حساسیت ماده (f) و به تبع آن ضریب تمرکز تنش محاسبه شده دارای خطا هستند.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از انجام این آزمایش تعیین تجربی تنش با استفاده از روش فتوالاستیسیته و به وسیله‌ی دستگاه پلاریسکوپ در یک مدل از جنس اپوکسی و تحت بارگذاری خارجی است. از آنجا که در این روش نقاطی که تنش‌های متفاوتی دارند، با طیف‌های رنگی مختلفی نمایان می‌شوند، از این رو می‌توان هر رنگ را مقیاسی برای اندازه‌گیری تنش‌ها در نظر گرفت. هدف دیگر این آزمایش استفاده از دستگاه پلاریسکوپ برای تعیین ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ‌های موجود روی قطعه و مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از آزمایش با نتایج تئوری است.

در بخش اول این گزارش مقدمه‌ای در مورد مفهوم روش‌های مختلف تحلیل تنش و به طور مشخص روش فتوالاستیسیته آورده شده است در ادامه‌ی این بخش نیز اهداف آزمایش بیان شده و جهت‌گیری گزارش نیز ذکر شده است.

در بخش دوم ابتدا توضیحاتی در مورد مفاهیم و ابزارهای مورد استفاده در آزمایش فتوالاستیسیته شامل پلاریزه شدن نور، پلاریسکوپ و انواع آن، صفحه‌ی ربع موج و مواد bi-refrangement ... داده شده است و پس از آن در مورد ضریب تمرکز تنش به صورت خلاصه صحبت شده است.

در بخش سوم توضیحاتی در مورد چگونگی انجام آزمایش بر روی نمونه‌ی مورد نظر و همچنین وسایل مورد استفاده در انجام این آزمایش آورده شده است و منابع احتمالی خطا به طور خلاصه توضیح داده شده‌اند.

در بخش چهارم و در قسمت اول آن، ضریب حساسیت میانگین ماده (f) با میانگین‌گیری از ضرایب حساسیت محاسبه شده برای هر داده‌ی آزمایش محاسبه شده است و در قسمت دوم این بخش نیز میزان خطای این ضریب با استفاده از همین روش توضیح داده شده است؛ در قسمت سوم این بخش، با استفاده از روشی متفاوت ضریب حساسیت ماده و خطای آن با استفاده از شیب منحنی تغییرات تنش اصلی σ_1 برحسب مرتبه‌ی هاله و با استفاده از روابط خط رگرسیون محاسبه شده است، ضمناً در این قسمت مشاهده شد که بین مقدار تنش اصلی σ_1 و مرتبه‌ی هاله همبستگی خطی با دقت قابل قبولی برقرار است (با توجه به ضریب همبستگی نزدیک ۱) که با فرمول‌های موجود تئوری مطابقت دارد؛ در قسمت چهارم این بخش نیز ضرایب تمرکز تنش برای سوراخ‌های موجود روی نمونه و خطای آن‌ها بر مبنای دو ضریب حساسیت به دست آمده در قسمت‌های قبل محاسبه شدند و با مقادیر تئوری مورد مقایسه قرار گرفتند.

در بخش پنجم نتایج آزمایش مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گرفتند و در مورد علل اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج به دست آمده از روابط تئوری که همان عوامل ایجاد کننده‌ی خطا در آزمایش می‌باشند، توضیحاتی ارائه شد.

نتایج کلی آزمایش در زیر به صورت خلاصه آورده شده است:

- مقدار ضریب حساسیت ماده (f) به دست آمده با استفاده از میانگین‌گیری از مقادیر ضریب حساسیت محاسبه شده در هر مرحله را با در نظر گرفتن خطای آن می‌توان به صورت زیر گزارش کرد:

$$f_1 = (8070 \pm 90) \frac{N}{m}$$

- بین تنش اصلی σ_1 و مرتبه‌ی هاله (n) همبستگی خطی با دقت قابل قبولی برقرار است. مقدار ضریب همبستگی همان گونه که رابطه‌ی تئوری موجود بیانگر این موضوع است. ضریب همبستگی محاسبه شده عبارتست از:

$$r^2 = 0.9914$$

- مقدار ضریب حساسیت (f) محاسبه شده با استفاده از شیب خط رگرسیون دقیقاً با ضریب حساسیت به دست آمده در مرحله‌ی قبل برابر نیست و مقدار این ضریب با در نظر گرفتن خطای آن را می‌توان به صورت زیر گزارش کرد:

$$f_2 = (8400 \pm 300) \frac{N}{m}$$

- ضریب تمرکز تنش میانگین محاسبه شده با استفاده از نتایج آزمایش برای سوراخ بزرگ موجود روی نمونه با در نظر گرفتن خطای آن و بر مبنای ضرایب حساسیت f_1 و f_2 برابر است با:

$$K_{te1} = 1.39 \pm 0.04, K_{te2} = 1.32 \pm 0.04$$

مقدار ضریب تمرکز تنش به دست آمده به روش تئوری برابرست با:

$$K_{te} = 2.18$$

ضریب تمرکز تنش میانگین بر مبنای ضریب حساسیت f_1 نسبت به مقدار تئوری دارای ۳۶/۳۱ درصد خطا و ضریب تمرکز تنش میانگین بر مبنای ضریب حساسیت f_2 دارای ۳۳/۹۴ درصد خطا می باشد.

همان گونه که ملاحظه می شود اختلاف نسبتاً قابل توجهی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج مورد انتظار از تئوری وجود دارد که علت این مسئله عوامل ایجاد کننده ی خطا می باشند که در بخش قبل به طور کامل مورد بررسی قرار گرفتند.

- ضریب تمرکز تنش میانگین محاسبه شده با استفاده از نتایج آزمایش برای سوراخ کوچک موجود روی نمونه با در نظر گرفتن خطای آن و بر مبنای ضرایب حساسیت f_1 و f_2 برابر است با:

$$K_{te1} = 1.44 \pm 0.06, K_{te2} = 1.37 \pm 0.06$$

مقدار ضریب تمرکز تنش به دست آمده به روش تئوری برابرست با:

$$K_{te} = 2.36$$

ضریب تمرکز تنش میانگین بر مبنای ضریب حساسیت f_1 نسبت به مقدار تئوری دارای ۴۴/۱۸ درصد خطا و ضریب تمرکز تنش میانگین بر مبنای ضریب حساسیت f_2 دارای ۴۲/۱۱ درصد خطا می باشد.

همان گونه که ملاحظه می شود اختلاف نسبتاً قابل توجهی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج مورد انتظار از تئوری وجود دارد که علت این مسئله عوامل ایجاد کننده ی خطا می باشند که در بخش قبل به طور کامل مورد بررسی قرار گرفتند.

- ضریب تمرکز تنش محاسبه شده برای سوراخ کوچک طبق نتایج آزمایش کمتر از ضریب تمرکز تنش محاسبه شده برای سوراخ بزرگ است اما طبق نمودارهای موجود، نتیجه ای عکس این مسئله مورد انتظار بود که علل آن در بخش قبل به طور کامل توضیح داده شدند.

۷- مراجع

[۱] دستور کار آزمایشگاه مقاومت مصالح

[۲] شیگیلی، جوزف؛ بادیناس، ریچارد؛ زارع پور، غلامرضا؛ طراحی اجزاء ماشین، انتشارات دانش نگار، تهران، ویرایش نهم، ۱۳۹۲.

۸- ضمايم

اصل تنش نور^{۱۵}:

زمانی که اشعه‌ای از نور از ماده‌ای فتوالاستیک عبور می‌کند، مؤلفه‌های موج الکترومغناطیسی آن در دو راستای تنش‌های اصلی تجزیه شده و به دلیل خاصیت دوگانگی هریک از مؤلفه‌ها، انکسار را با شاخص متفاوتی تجربه می‌کنند. اختلاف در انکسار، باعث ایجاد اختلاف فاز بین دو مؤلفه می‌شود. با فرض داشتن نمونه‌ای با رفتار همسانگرد^{۱۶} و دارای خاصیت فتوالاستیسیته‌ی دو بعدی، مقدار این تأخر فاز را می‌توان به‌وسیله‌ی "اصل تنش - نور" بیان نمود:

$$\Delta = \frac{2\pi t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2)$$

در رابطه‌ی بالا، Δ میزان تأخر فاز، C ضریب تنش - نور (بروستر^{۱۷})، t ضخامت نمونه، λ طول موج در خلأ، σ_1 تنش بیشینه و σ_2 تنش کمینه است.

لازم به ذکر است که این تأخر فاز، پلاریزاسیون نور عبوری را تغییر می‌دهد. پلاریسکوپ اختلاف حالت‌های پلاریزه شده را قبل و بعد از عبور از نمونه، ادغام می‌کند. براساس تداخل نوری این دو موج، الگوی هاله مشخص می‌شود. مرتبه‌ی هاله را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد که با تأخر فاز نسبی ارتباط دارد:

$$n = \frac{\Delta}{2\pi}$$

اثبات رابطه‌ی بروستر:

مطابق اصل تنش - نور و با جایگذاری مرتبه‌ی هاله در این رابطه داریم:

$$\Delta = \frac{2\pi t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) = 2\pi n \rightarrow n = \frac{t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2)$$

ضریب حساسیت ماده (ثابت هاله) به ازای λ و t مشخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{\lambda}{C}$$

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$n = \frac{t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{t}{f} (\sigma_1 - \sigma_2) \rightarrow f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)t}{n}$$

¹⁵ - Stress-Optic Law

¹⁶ - isotropic

¹⁷ - Brewster