İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LEVHALARDAKİ OYUKLAR CİVARINDA TERMAL GERİLME KONSANTRASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat DİLEK

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Şenol ATAOĞLU

NİSAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LEVHALARDAKİ OYUKLAR CİVARINDA TERMAL GERİLME KONSANTRASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat DİLEK
(501071076)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mart 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Nisan 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şenol ATAOĞLU (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet BAKİOĞLU (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Cihan DEMİR (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Deniz GÜNEY (YTÜ)

NİSAN 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Mekanik ve termal yüklere maruz basınç kapları endüstrinin bir çok kolunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Düzenli yapılan kontrollerde kapların içlerinde çeşitli boyutlarda korozyon kusurlarının olduğu görülmektedir. Bu çalışma, bu korozyon kusurları civarındaki termal gerilmeleri incelemeyi amaçlamaktadır.

Çalışmalarım boyunca her zaman desteğini gördüğüm, yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü olanağı sağlayan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Şenol ATAOĞLU, Prof. Dr. Ziya ABDULALIYEV, Prof. Dr. Mehmet BAKİOĞLU, Prof. Dr. Reha ARTAN, Yrd. Doç. Dr. Hale ERGÜN'e ve çalışmamı destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırma Kurumuna en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hayatımdaki tüm dönemlerde olduğu gibi bu önemli dönemde de bana destek veren aileme çok teşekkür ederim.

Aralık 2009

Murat Dilek

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
2. FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİ **3**
2.1 Fotoelastisite Yönteminin Kısaca Tarihi 3
2.2 Metodun Fiziksel Temelleri 4
2.3 Polariskopta Oluşan Olaylar 8
2.4 Asal Gerilmelerin Farkının ve Doğrultularının Tayin Edilmesi 13
2.4.1 Renklerin Karşılaştırılması Metodu 13
2.4.2 Şerit Metodu 15
2.4.3 Kompanse Metodu 17
3. TERMAL GERİLMELER **19**
3.1 Termal Gerilmelerin Fotoelastik Metod ile Araştırılması 20
4. DENEYSEL KISIM **23**
4.1 Malzemenin Viskoelastik Sıcaklığının Tayini 24
4.2 Optik Hassasiyet Oranının Belirlenmesi 25
4.3 Modelin y<0 Kısmının Mekanik Yüklenmesi 26
4.4 Viskoelastik Sıcaklıktaki Elastisite Modülünün Hesabı 30
5. TERMAL GENLEŞMELERİN MEKANİK MODELLENMESİ **31**
5.1 Çapları 2 ve 1.5 mm Olan Oyukların Termal Olarak Yüklenmesi 32
5.2 Çapları 2 ve 1.5 mm Olan Oyukların Termal Gerilmelerinin Hesaplanması 36
5.2.1 Modelin malzemesinin optik hassasiyetinin hesaplanması 36
5.2.2 Oyukların gerilme dağılımnlarının hesaplanması 37
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **41**
KAYNAKLAR **43**

KISALTMALAR

CNC **:** Bilgisayar Sayısal Kontrollü Tezgah

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : İzokrom renkleriyle ilgili gidiş farkları 14
Çizelge 4.1 : Numunenin genişliği doğrultusundaki birim şekil değiştirmeler 29
Çizelge 5.1 : 2 mm çapındaki oyuk civarında ilgili noktalardaki gerilmeler 37
Çizelge 5.2 : 1.5 mm çapındaki oyuk civarında ilgili noktalardaki gerilmeler 38

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Basit düzlem polariskop 4
Şekil 2.2 : Basit bir polariskop şeması 8
Şekil 4.1 : Basınç kabı örneği 23
Şekil 4.2 : Basınç kabının bölgesel modelinin şeması ve sıcaklık dağılımı 24
Şekil 4.3 : Kritik sıcaklık deney numunesinin şeması 24
Şekil 4.4 : Kritik sıcaklığın saptanması için uygulanan yükleme düzeneği 25
Şekil 4.5 : Numunenin polariskopta görüntüsü 26
Şekil 4.6 : Yükleme numunesi şeması 27
Şekil 4.7 : Yükleme numunesinin resmi 28
Şekil 4.8 : Yüklenmiş numunenin polariskoptaki görüntüsü 29
Şekil 5.1 : Yüksüz numunelerin şematik çizimi 31
Şekil 5.2 : Oyukların yapıştırıldıktan sonra yüklenmeden önce polariskopta çekilen görüntüsü 32
Şekil 5.3 : 2 ve 1.5 mm çapındaki oyukların yüklendikten sonra polariskobtaki görüntüsü 33
Şekil 5.4 : Çapı 2 mm olan oyuğun birleşim kenarına yakın olan ucu etrafindaki izokromatlar 34
Şekil 5.5 : Çapı 2 mm olan oyuğun birleşim kenarına uzak olan ucu etrafindaki izokromatlar 34
Şekil 5.6 : Çapı 1.5 mm olan oyuğun birleşim kenarına yakın olan ucu etrafindaki izokromatlar 35
Şekil 5.7 : Çapı 1.5 mm olan oyuğun birleşim kenarına uzak olan ucu etrafindaki izokromatlar 35
Şekil 5.8 : Oyuklardaki şerit dağılımı 36
Şekil 5.9 : 2 mm ve 1.5 mm'lik oyukların termal gerilme dağılımı 38

LEVHALARDAKİ OYUKLAR CİVARI TERMAL GERİLME KONSANTRASYONU

ÖZET

Petro-kimya, nükleer enerji üretimi gibi birçok sanayi dalında geniş uygulama alanı olan basınç kapları mekanik ve sıcaklık yükleri, kimyasal aktif sıvıların akıntısı gibi birçok faktörün etkisinde çalıştırılmaktadır. Sistematik olarak yapılan bakımlar sırasında ilgili basınç kablarının iç yüzeylerinde çeşitli formlarda korozyon çukurlarının olduğu belirlenmiştir.

Oyuklar, bölgesinde basınç kabının tasarımı sırasında tayin edilmiş cidar kalınlığını azaltır ve sivri formundan dolayı yüksek seviyede gerilme yığılmasına sebep olurlar. Sözü edilen bu faktörler, oyuklar bölgesinde kullanılan malzemenin güvenlik sınırlarının aşılmasına neden olabilirler. Dolayısıyla değişken mekanik, sıcaklık yüklerinin ve akışkanların oluşturduğu elektro-kimyasal proseslerin toplu etkisi oyuklar bölgesinde yorulma çatlağının oluşması için oldukça uygun ortam oluştururlar.

Dolayısıyla, basınç kabının çalışma süresinin güvenli hesaplanabilmesi için iç yüzeyinde oluşmuş oyuk bölgesinde oluşan gerilme durumu ile ilgili detaylı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. İlgili bilgi alanının genişletilmesi için deneysel yöntemlerle ilgili araştırmaların yapılmasına gerek vardır. Deneysel araştırmalar ilgili bilgi alanını genişletmekle beraber, aynı zamanda, sayısal yöntemlerle yapılan incelemelerde elde edilen sonuçların kontrol edilmesini de sağlarlar.

Deneysel yöntem olarak fotoelastik yöntem hassas sonuç vermesinden ve nokta nokta analiz yapılabilmesinden dolayı uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Bu çalışmada, fototermoelastisitenin mekanik modelleme yöntemi kullanılmıştır. Gerilme analizlerinde fotoelastisitenin şerit yöntemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar benzeşim teorisi kullanılarak gerçek yapılardaki gerilme değerlere ulaşılmış ve elde edilen değerler değerlendirilmiştir.

THERMAL STRESS CONCENTRATION AROUND CAVITY ZONES IN PLATES

SUMMARY

Pressure vessels used in nuclear power plants, petrochemical and different many industrial areas are exposed to high and variable temperature, pressure and rapid flow of chemical active liquids which cause cavities. Hence, cavities in different forms and dimensions leading to the cracks develop on walls of the vessels. These cavities are observed during the maintenance of the vessels.

The wall thickness is determined during the design process of the pressure vessel is reduced due to the cavities formed, simultaneously high stress concentrations around the cavity zones due to sharp forms of the cavities. The mentioned factors can cause exceeding safe stress limits of the used materials around the cavity zones. Moreover, tip regions of the cavities are suitable places to be fatigue cracks due to total effect of variable mechanical, thermal loads and electrochemical processes.

Concerning, during the design process, to know maximum values of stress components in the cavity region is important in order to predict the service life of the pressure vessels rationally. Therefore, a need is identified to evaluate stress state arising around the cavities in the inner surfaces of the pressure vessels in order to predict the service life. It is a necessity to make researches associated with the mentioned topics based on the experimental methods to increase the information. Experimental works allow not only increasing the knowledge but also checking the results obtained using different numerical methods.

As it is known, using methods of photoelasticity accurately enables to determine the general character of stress state in geometrical concentration zone. In this work, mechanical modelling of phototermoelasticity is used. Fringe method is selected to evaluate the stress components. The stress components values in actual structure are obtained using the similarity theorem.

1. GİRİŞ

Petro-kimya, nükleer enerji üretimi ve diğer sanayi alanlarında geniş olarak uygulanan basınç kapları, şiddetli, değişken mekanik ve sıcaklık yükleri, yüzeysel aktif kimyasal sıvıların hızlı akıntısı gibi birçok faktörün etkisi altında çalıştırılmaktadır. Sistematik olarak yapılan bakımlar sırasında ilgili kabların iç yüzeylerinde çeşitli formlarda korozyon çukurlarının oluştuğu belirlenmiştir. Ölçümlerde oyukların derinliklerinin 4-7 mm, genişliklerinin 2-10 mm ve uzunluklarının da 20 mm'ye kadar oldukları tesbit edilmiştir [1]. Oyuklar formlarına göre eksenleri kabın duvarına normal olan dönel yüzeyli ve ellipsoidal boşluklar gibi sınıflandırılabilirler.

Oyuklar, bölgelerinde basınç kabının tasarımı sırasında tayin edilmiş cidar kalınlığını azaltır ve sivri formlarından dolayı yüksek seviyede gerilme yığılmasına sebep olurlar. Sözü edilen faktörler, oyuklar bölgesinde kullanılan malzemenin güvenlik sınırlarının aşılmasına neden olabilirler. Dolayısıyla, değişken mekanik-sıcaklık yüklerinin ve akışkanların oluşturduğu elektro-kimyasal proseslerin toplu etkisi oyuklar bölgesinde yorulma çatlağının ortaya çıkması için uygun ortam oluştururlar. Bilindiği üzere yorulma çatlağının yayılma hızı onun tepesi için $\kappa_I = \lim_{R\to 0}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\pi R}\,\sigma_{max}\right)$ ifadesi ile hesaplanan gerilme şiddeti çarpanı ile ilgilidir [2].

Burada σ_{max} çatlak bölgesinde oluşan maksimum gerilme bileşeni, R çatlağın tepesindeki eğrilik yarıçapıdır. Dolayısıyla, basınç kabının çalışma süresinin güvenli hesaplanabilmesi için iç yüzeyinde oluşmuş oyuk bölgelerinde meydana gelen üç boyutlu gerilme durumu ile ilgili detaylı bilgi gerekmektedir. Fakat, mevcut kaynaklardan bu konuda kısıtlı bilgi edinmek mümkündür [3-6]. İlgili bilgi alanının genişletilmesi için teorik ve hassas deneysel yöntemlerle araştırmaların yapılmasına gereksinim duyulmaktadır. Deneysel araştırmalar ilgili bilgi alanını genişletmekle beraber, aynı zamanda, sayısal yöntemlerle yapılan incelemelerde elde edilen sonuçların test edilmesini ve uygulanmış yöntemlerin modernizasyonlarına gereksinimin belirlenmesini de sağlarlar. Bilindiği gibi üç boyutlu fotoelastisitenin

yöntemleri gerilme yığılma bölgesinde gerilme durumunun genel karakterinin belirlenmesini ve noktasal ölçmelerle gerilme bileşenlerinin maksimum değerlerinin hassas olarak tayin edilmesini sağlamaktadır [7,8].

1.1 Tezin Amacı

Bu tezdeki amaç, basınç kablarında çatlak oluşumuna sebep olan oyuklar civarındaki termal gerilme konsantrasyonlarını incelemektir. İnceleme deneysel olarak yapılmıştır.Yöntem olarak ise fotoelastisitenin termal genleşmelerin mekanik olarak modellenmesi metodu kullanılmıştır.

2. FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİ

Polarizasyon-optik metot, (fotoelastik, fotoplastik, fotodinamik vs.) saydam optik hassas malzemelerden yapılmış iki ve üç boyutlu modeller ile, karmaşık şekilli konstrüksiyon ve tesisatlarda mekanik ve termal yüklerin etkisiyle ortaya çıkan gerilme ve deformasyonların değer ve dağılımlarının hassas ve ayrıntılı olarak araştırılmasına olanak sağlamaktadır.

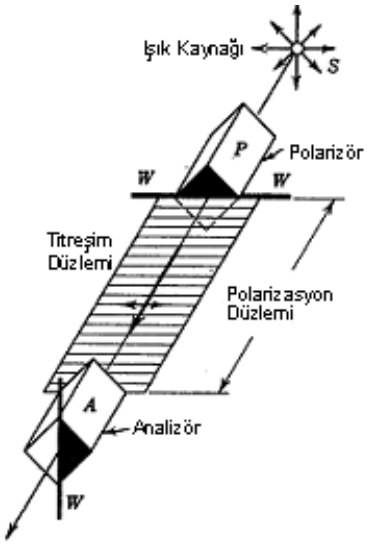
Gerilme ve deformasyon alanlarının, araştırılan konstrüksiyonun yüzeyinde ve hacminde istenilen kesitte bulunabilmesi, gerilme yığılma bölgelerinde ayrıntılı ölçmelerin yapılabilmesi, yüksek hassasiyet ve sonuçların güvenilirliği, ölçümlerin ve elde edilmiş verilerin işlemlerinin basitliği bu metodun sıkça tercih edilmesinin sebeplerindendir.

Gerçek konstrüksiyondaki gerilmeler, benzeşim teorisi veya ilgili birimlerin analizi ile elde edilmiş formüllerden faydalanılarak modelde ölçülmüş gerilmelere göre hesap edilmektedir.

2.1 Fotoelastisite Yönteminin Kısaca Tarihi

Fotoelastik metod David Brewster'in polorize ışık altında gerilmeye maruz bırakılan bir cam parçasında gerilme sebebi ile parlak renkli şeritlerin görülmesi hakkındaki buluşuna dayanmaktadır. Brewster, bu renkli şeritlerin kargir köprüler gibi mühendislik yapılarındaki gerilmelerin ölçülebilmesine olanak sağlayacağı fikrini öne sürmüştür. O zaman mühendisler tarafından bu fikre pek önem verilmemiştir. Fotoelastik modeldeki renk şeritleri ile analitik çözümler arasındaki karşılaştırmalar ilk olarak fizikçi Maxwell tarafından yapılmıştır. Fikir çok daha sonra Wilson tarafından tekil kuvvetle yüklü kirişteki gerilmelerin incelenmesine ve Mesnager tarafından da kemer köprülerin incelenmesinde uygulanmıştır. Metod, sellüloid'i ilk defa model malzemesi olarak kullanan Coker tarafından geliştirilmiş olup geniş ölçüde kullanılmıştır [9].

Alelade ışığa, ışın doğrultusuna dik olan her doğrultudaki titreşimlerden oluşmuş gözü ile bakılabilir. Bir tarafı siyah boyalı bir cam levhadan yansıtmak suretiyle veya bir polarizörden geçirmek suretiyle az çok polarize yani yalnız belirli bir doğrultuda enine titreşimlerden oluşmuş bir ışık demeti elde edilebilir. Bu doğrultu ile ışın doğrultusundan geçen düzleme polarizasyon düzlemi denir. Bu sistem gerilmelerin fotoelastik incelenmesinde kullanılır. Şekil 2.1'de şematik olarak bir basit düzlem polariskop gösterilmiştir [7].



Şekil 2.1 : Basit düzlem polariskop

2.2 Metodun Fiziksel Temelleri

Gerilmelerin fotoelastik metotla araştırılması, saydam izotrop malzemelerin çoğunluğunun gerilme ve şekil değiştirme etkisinde çift kırılma özelliğine (optik anizotropi) dayanır. Çift kırılmanın büyüklüğü gerilmenin değeri ile orantılıdır ve modelin polarize ışıkla aydınlatılmasıyla ölçülebilir.

Işığın polarize edilmesi ve saydam malzemenin çift kırılma özelliğinin anlaşılması için ışığın yayılmasının elektromanyetik teorisinden faydalanmak gerekmektedir. Elektromanyetik teoriye göre ışık dalgaları, ışına dikey düzlemde yerleşen, birbiriyle bağlı ve karşılıklı dikeyi periyodik değişen elektrik vektörü ve manyetik vektörün yer değiştirmesinden oluşur. Işığın yayılması genel olarak *E* elektrik vektörü ile gösterilir. Eğer elektrik vektörü *E* düzensiz titreşimler yaparsa doğal veya polarize edilmemiş ışık elde edilir. Elektrik vektörünün titreşimlerinin belirli kurallara uyması durumunda polarize ışık elde edilebilir. *E* vektörü şiddet açısını ve değerini

değiştirirken, ucu elips veya daire çizerse, eliptik veya dairesel polarize edilmiş ışık elde edilir. Elektrik *E* vektöründen geçen titreşimler düzlemi vaziyetini değiştirmemişse ışık düzlem polarize edilmiş olur.

Düzlem polarize ışık oluşturmak için, ışık titreşimlerini ancak bir düzlemde (titreşim düzleminde) geçirme özelliği olan optik elemanlar, polarizörler kullanılır. Bazı doğal kristallerden yapılmış prizmalar, aksettiriciler veya suni yapılmış polaroidler polarizör olarak kullanılabilirler. Suni polaroid filmleri ısıtılarak bir doğrultuda çekilmiş ve selüloid plaka yapıştırılmış ince polivinil ispirto levhadan oluşur. Bu levhanın açık yüzeyine, sonradan iyotla zenginleştirilmiş kompozitten kaplama yapılır. Modern cihazların çoğunluğunda suni polaroidler kullanılmaktadır. Bu suni polaroidler iki cam levha arasına yapıştırılmış polaroid filmden ibarettir.

Işın polaroidden geçtikten sonra, dalgaların titreşimleri ancak bir düzlemde oluşur. Bu ışınların yoluna ikinci bir polaroid konulduğu taktirde üç durumla karşılaşılır.

1. Polaroidlerin polarize düzlemlerinin paralel olması halinde ışık tamamen geçer (aydınlık form).
2. Polaroidlerin polarize düzlemlerinin karşılıklı dikey olması halinde ışık hiç geçmez (karanlık form).
3. Polaroidlerin polarize düzlemleri herhangi bir açı altında ise ışık ikinci polaroidden kısmen geçer.

Çift kırılma durumu bazı doğal saydam kristal cisimlerin optik özelliğidir. Işık saydam kristal levhadan geçerken, ışık dalgası iki düzlem üzerinde polarize edilmiş dalgaya bölünür. Elde edilen bu dalgaların titreşim düzlemleri karşılıklı dikeydir ve kristalin içerisinde çeşitli hızlarda yayılırlar.

Bazı hallerde bir sıra izotrop malzemelerde de çift kırılma durumu gözlemlenebilir. Bu durumu şöyle açıklamak mümkündür; bir sıra saydam malzemeler yüklerin etkisinde, optik özellik kazanırlar ve tıpkı kristallerde olduğu gibi çift kırılma özelliğine haiz olurlar. Bu tipteki malzemelere, optik hassas özellikli malzemeler denir. Bunlara örnek olarak cam, organik cam, selüolid, bakalit gibi saydam malzemeleri göstermek mümkündür.

Optik özellikler, anizotrop malzemenin her bir noktasında, kırılma elipsoidinin yardımıyla tarif edilir. Elipsoidin yarım eksenlerinin değerleri ışığın çevrede bu doğrultudaki yayılma hızları ile bağıntılı olan asal kırılma indisleri olan n_1, n_2, n_3' e eşittirler. Buna ek olarak elipsoidin yarım eksenlerinin doğrultuları bu noktadaki optik simetrinin asal eksenleri ile üst üste gelir.

Dalga uzunluğu λ olan ışık, d kalınlıklı çift kırılma özellikli levhadan geçerken asal optik simetri düzlemleri üzere yayılan bileşenleri, (2.1) bağıntıları ile verilen mutlak faz farkları alırlar.

$$\eta_1 = \frac{2.\pi.d}{\lambda}(n_1 - n') \qquad \textbf{(2.1a)}$$

$$\eta_2 = \frac{2.\pi.d}{\lambda}(n_2 - n') \qquad \textbf{(2.1b)}$$

Burada n' levha dışındaki ortamın kırılma indisidir.

Işınların levhadan çıktıktan sonra nispi faz farkı ise (2.2) bağıntısı ile verildiği gibi olacaktır.

$$\eta = \eta_1 - \eta_2 = \frac{2.\pi.d}{\lambda}(n_1 - n_2) \qquad \textbf{(2.2)}$$

Yüklenmiş modeldeki her bir noktanın asal gerilme ve şekil değiştirme doğrultularının asal optik simetri eksenleri ile üst üste geldiği ve σ_1, σ_2, σ_3 asal gerilmelerinin, ortamın kırılma indisleri ile doğru orantılı bağıntılarda oldukları yapılan çalışmalar neticesinde ispatlanmıştır. Bu ispat "Maxwell Denklemleri" ile (2.3) bağıntılarında gösterildiği gibidir.

$$n_1 - n_o = C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_2 + \sigma_3) \qquad \textbf{(2.3a)}$$

$$n_2 - n_o = C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_3 + \sigma_1) \qquad \textbf{(2.3b)}$$

$$n_3 - n_o = C_1\sigma_3 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2) \qquad \textbf{(2.3c)}$$

Burada n_o malzemenin gerilmesiz halindeki kırılma indisi, C_1 ve C_2 ise malzemenin verilmiş sıcaklık ve kullanılan ışık dalga boyu için gerilme katsayılarıdır.

Işık ince levha düzlemine dikey yani n_3 doğrultusunda düşerse, (2.3) bağıntıları ile verilen denklemleri basitleştirir ve (2.4) bağıntıları ile verilen denklemler oluşur.

$$n_1 - n_0 = C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2 \qquad \textbf{(2.4a)}$$

$$n_2 - n_0 = C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1 \qquad \textbf{(2.4b)}$$

Bu denklemlerin farkı alınarak (2.5) bağıntısı yazılabilir.

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \qquad \textbf{(2.5)}$$

Elde edilen bu bağıntı (2.2) bağıntısında yerine konulursa, (2.6) ile verilen bağıntı oluşur.

$$\eta = \eta_1 - \eta_2 = \frac{2.\pi.d}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \qquad \textbf{(2.6)}$$

Burada $C=C_1-C_2$ malzemenin nispi optik gerilme katsayısıdır.

Işınların η faz farkı ile δ gidişler farkı arasındaki ilişki (2.7) bağıntısı göz önüne alınarak (2.8) bağıntısı ile yazılabilir.

$$\eta = \frac{2.\pi.\delta}{\lambda} \qquad \textbf{(2.7)}$$

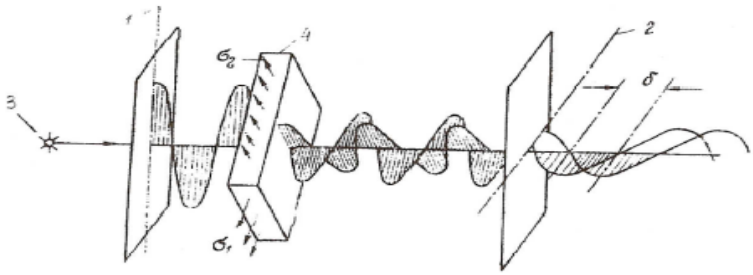
$$\delta = C \times d \times (\sigma_1 - \sigma_2) \qquad \textbf{(2.8)}$$

Yukarıda verilen (2.8) bağıntısı fotoelastik metodun temel bağıntısıdır (Wertheim kanunu) ve modelin incelenen noktasındaki optik etkiyle asal gerilmelerin farkı arasındaki orantıyı ifade eder. C katsayısı, model malzemesinin fiziki özelliklerine, kullanılan ışığın dalga boyuna bağlıdır ve Brewster (1 Brewster = 10^{-12} m^2/N) birimlerinde ifade edilir.

C katsayısı Brewster mertebesinde hesaplandığında δ bağıntısındaki fiziksel büyüklükler aşağıdaki birimlerde alınırlar: gerilmeler σ bar, modelin kalınlığı d mm, ışınların gidiş farkı δ Angström, (1 Angström = 10^{-10} m). Eğer C, 10^{-8} cm^2/N birimlerinde ifade edilmişse, gerilmeler N/cm^2, d cm, δ mmk birimleriyle alınırlar.

2.3 Polariskopta Oluşan Olaylar

Modelde asal gerilmelerin farkını tayin etmek için önceki kısımda elde edilmiş formüllerden (η, δ), kırılgan levhadan çıkan ışınların gidiş farkını veya titreşimlerinin faz farkını ölçmek gerekmektedir. Bu amaçlar için kullanılan cihazlara polariskop adı verilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Basit bir polariskop şeması

En basit polariskoplar, ışık kaynağı, ekran ve iki polaroidden oluşan cihazlardır ve düzlem polariskop adını alırlar. Işık kaynağına yakın olan polaroide polarizör, diğerine ise analizör adı verilir. Polarizör kaynaktan çıkan ışığı, optik etkiyi ölçmek için gerekli olan düzlem polarizelenmiş hale çevirir.

Polarize edilmiş ışığın doğrultusu üzerinde, optik hassas malzemeden yapılmış ve yüklenmiş modele denk gelirse, titreşim düzlemleri karşılıklı dikey olan ve asal gerilmelerin doğrultularıyla üst üste gelen iki düzlem üzere polarize edilmiş ışına ayrılır. Bu iki ışık dalgasının yayılma hızları birbirinden farklı olduğundan modelden çıktığında δ gidiş farkı kazanırlar. Gidiş farkının δ ölçülebilmesi için ışınların interferansını almak gerekir. Bu nedenle iki ışık dalgasının titreşimleri bir düzleme getirilmelidir. Bu amaçla modelden çıkan iki ışının yoluna ikinci polarize edici eleman, analizör konur. Genellikle polarizörin ve analizörin polarize düzlemleri çapraz yani 90^o lik açı altında ayarlanırlar. Analizörin yardımıyla, ışınların polariskopun ekranında alınmış interferansları, kullanılan ışığın özelliklerine bağlı olarak, renkli ve siyah beyaz görüntü şeklinde elde edilir.

Polariskopta kullanılan ışık kaynakları beyaz veya monokromatik ışık kaynaklarıdır. Gerilmeli model, beyaz ışık vasıtasıyla aydınlatılırken, beyaz ışığın farklı dalga boylarına sahip renklerden oluşmasından dolayı her bir bileşeni interferans edilir. Bu bileşenler birbirlerini karşılıklı olarak kuvvetlendirerek veya zayıflatmak suretiyle

polariskopun ekranında çeşitli şeritler oluştururlar. Ekranda oluşan aynı renkli şeritlere izokromlar denilir ve modelin, asal gerilmeler farkının aynı olduğu noktalarını birleştirirler. Polariskopta dalga boyu belli olan ışık yani monokromatik ışık kullanılırsa, cihazın ekranında oluşması beklenen renkli şeritler yerlerini aydınlık karanlık şeritler alır.

Monokromatik ışık kaynaklı ve polaroidleri çapraz hale getirilmiş düzlem polariskopta ışını takip edersek; ışık *z* ekseni yani xoy düzlemine dikey doğrultuda yöneltilmiştir. Işınların titreşim düzlemleri polarizörde yoz ve analizörde xoz, şeklinde ilgili olarak X ve Y gibi işaret edilmişlerdir. Modelin bakılan noktasındaki asal gerilmelerin doğrultuları ise σ_1 ve σ_2 olarak gösterilmişlerdir. Işınların polarizörden geçtikten sonra ancak *y* düzleminde titreşimleri olacaktır. Bu vektör aşağıdaki (2.9) bağıntısıyla ifade edilebilir.

$$y_p = a\cos(\omega.t) \qquad \textbf{(2.9)}$$

Burada y_p titreşimlerin y düzlemindeki değeri, *a* titreşimin genliği, ω titreşimlerin dairesel frekansı, *t* ise zamanı ifade etmektedir.

Işık modelden geçerken karşılıklı dikey σ_1 ve σ_2 düzlemlerinde $y_{\sigma 1}$ ve $y_{\sigma 2}$ bileşenlerine ayrılır;

$$y_{\sigma 1} = y_p \cos\theta \cos(\omega.t) \qquad \textbf{(2.10a)}$$

$$Y_{\sigma 2} = y_p \sin\theta \cos(\omega.t) \qquad \textbf{(2.10b)}$$

Burada θ, asal gerilme σ_1' in doğrultusuyla polarize ışınların titreşim düzlemi arasındaki açıdır. Bu iki ışın modelden çeşitli hızlarla geçtiklerinden, çıkarken ışınlardan biri öbürüne nispeten η fazlar farkını kazanır. Bu halde titreşim denklemleri (2.11) bağıntısı ile ifade edilen hali alır.

$$y_{\sigma 1} = a\cos\theta \cos(\omega.t) \qquad \textbf{(2.11a)}$$

$$y_{\sigma 2} = a\sin\theta \cos(\omega.t - \eta) \qquad \textbf{(2.11b)}$$

Işığın titreşimlerinin bileşenleri analizörden geçerken yeniden bir düzleme getirilir ve interferans edilirler. Bu halde toplam titreşim *x* düzleminde (analizörlerin polarize düzlemi) olacaktır.

$$x_A = x_A^{'} - x_A^{''} = y_{\sigma 1} \sin\theta - y_{\sigma 2} \cos\theta \qquad \textbf{(2.12)}$$

Elde edilen (2.12) bağıntısında $y_{\sigma 1}$ ve $y_{\sigma 2}$ 'nin değerleri yerlerine konursa aşağıdaki (2.13) bağıntısı bulunur.

$$x_A = -a \sin(2\theta) \sin(\eta/2) \sin(\omega.t - \eta/2) \qquad \textbf{(2.13)}$$

veya $x_A = A.\sin(\omega.t - \eta/2)$

$$A = -a.sin(2\theta).sin(\pi.\delta/\lambda) \qquad \textbf{(2.14)}$$

Burada *A* ışığın toplam titreşim genliği olup, sin(*2θ*).sin (*η/2*) orantılı basit harmonik titreşim olur. Bilindiği üzere ışığın şiddeti genliğinin karesi ile orantılıdır (2.15).

$$I = k \times A^2 \qquad \textbf{(2.15)}$$

Eğer genliğin ve fazlar farkının değerlerini dikkate alınacak olursa, *k* orantı katsayısı olmak üzere (2.16) bağıntısı elde edilmiş olur.

$$I = k \times a^2 \times sin^2(2\theta) \times sin^2(\pi.\delta/\lambda) \qquad \textbf{(2.16)}$$

Yukarıdaki (3.16) bağıntısından anlaşılacağı üzere araştırılan modelin polariskobun ekranındaki görüntüsü homojen bir şekilde aydınlanmayacaktır. Görüntü maksimum ve minimum şiddetle aydınlanmış bölgelerden oluşacaktır.

Işığın şiddetinin maksimum değeri, yani aydınlanmanın en büyük şiddeti aşağıda sayılan hallerde yer alacaktır. (Işınların gidiş farkı yarı dalgaların tek sayılı katlarına eşittir. $\delta = (2n+1) \times \lambda/2$, $n = 1, 2, 3, ...$ şeklinde istenilen tam sayıya eşittir. Asal gerilmelerin doğrultusu polariskobun polarize düzlemi ile 45^o lik açı verir)

Aydınlanmanın asgari şiddeti, ışığın kararması $I = 0$, durumunda modelin incelenen noktasında şu haller gözlemlenebilir;

1.Polariskobun polarize düzlemi asal gerilmelerden birinin doğrultusuyla üst üste geldiğinde veya onunla 90^o lik açı oluşturduğunda, yani $\theta = 0, 90^o, 180^o, 270^o$ olduğunda

2.Işınların gidiş farkı dalgaların tam katına eşit olduğunda ; $\delta=n\lambda$ (n =1,2,3….)

3.Işınların gidiş farkı δ=0 olduğunda; bu halde $\delta=C\times d\times(\sigma_1 - \sigma_2)$ denkleminden $\sigma_1-\sigma_2=0$ olduğu ortaya çıkar.

Böylelikle, monokromatik ışık kullanılırken düzlem polariskobun ekranında, modelde gerilmelerin dağılması ile belirli bağıntısı olan bir sıra kararmış ve aydınlanmış şeritlerin görüntüsü yer alır.

Işığın, $\theta = 0^o$ veya 90^o olduğunda kararma halini inceleyelim. Bu hal, modelin istenilen noktasında σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerinin doğrultusu hakkında esas bilgi verdiğinden, optik anizotropik cisimlerde gerilmelerin araştırılması açısından çok önemlidir. Düzlem polariskopta, polarizörün ve analizörün, polarize düzlemleri karşılıklı dikey olduğunda, modelin incelenen noktasında asal gerilmelerin doğrultuları, polarize düzlemleri ile üst üste düşerse ekranın ilgili yerinde kararma oluşur. Bu karanlık hatlara izoklinler denir ve bunlar asal gerilmelerinin doğrultuları aynı olan noktaları birleştirirler. Söz konusu doğrultular cihazın polarize düzleminin x eksenine eğim açısı θ ile tayin edilirler. Eğim açısı θ' ya izoklinin parametresi denir.

Çaprazlaştırılmış polarizör ve analizör senkron olarak 0' dan 90^o'' ye döndürüldüklerinde her bir dönme açısı için ilgili değerli parametresi olan izoklin oluşacaktır. Verilmiş parametreli izoklini oluşturmak için analizör ve polarizörü senkron olarak, değeri verilmiş parametreye eşit olan açı kadar saat yönünün tersine çevirmek gerekir. Aktarılanı yaparken polariskobun ilkin ayarlanmasının sıfır izoklinine uygun olmamasını engellemek amacıyla cihazın polarize düzleminin yatay olmasına dikkat etmek gerekir.

Işığın kararmasının ikinci halini, ışınların gidiş farkları δ' yı λ' ya eşit olurken inceleyelim; daha önce gösterildiği üzere, ışığın tam kararması modelde $\delta= n\lambda$ $(n=1, 2, 3, ...)$ ışığın en büyük şiddeti ise $\delta=(2n+1)\times\lambda/2$ olan noktalarında ortaya çıkar. Buna göre de ekrandaki karanlık ve aydınlık şeritler görüntüsünde karanlık şeritten aydınlık şeride geçerken farkı $\lambda/2$ kadar değişir. Gösterildiği gibi bu şeritler

modelin, ışınların gidiş farklarının aynı olduğu noktalarını, yahut fotoelastisite kuralına $\delta=Cd\ (\sigma_1 - \sigma_2)$' ye göre asal gerilmelerinin farkı veya maksimum kayma gerilmelerinin $\tau_{max} = (\tau_1 - \tau_2)/2$, aynı olduğu noktalarını birleştirir. Böylece, şeritler maksimum kayma gerilmeleri aynı olan noktaların geometrik yeridir.

Işığın gidiş farkı $\delta = 0$ olduğunda kararma halini inceleyelim. Bu halde araştırılan modelin gerilmeler alanında özel noktalar oluşur, ekranda karanlık görüntü verirler; polarizör ve analizörün senkronize döndürülmesiyle karanlıklarını korurlar ve konumlarını değiştirmezler. Bu noktalardan tüm parametreli izoklinler geçerler. Özel noktalarda kayma gerilmeleri sıfıra eşittirler, normal gerilmeler ise bazı özel noktalar dışında tüm doğrultularda aynıdırlar. Modelin gerilme halini incelerken, izotrop denilen bu noktalar büyük önem kazanırlar. Bununla birlikte, izoklin ve şeritlerin dağılma şeklini tayin ederler. Böylelikle, gerilmeli model monokromatik ışıkla aydınlatılırken polariskobun ekranında iki tip karanlık hatların görüntüleri yer alır. Cihazın ekranındaki görüntüde bu hatları birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. İzoklinler ile şeritlerin birbirinden kesin olarak ayırt edilmesi için polarizör ve analizör senkronize olarak döndürülmelidir. Zira, $\delta=n\lambda$ şartı θ' ya bağlı olmadığından polaroidlerin senkron dönmesinde şeritlerin konumu değişmez, buna karşın izoklinlerin şekilleri değişir.

İzoklinler, modeli beyaz ışıkla aydınlatmak suretiyle de ayırt edilebilirler. Bu halde ışığın kararması şartı, $\delta = n\lambda$ modelin her noktasında ancak belli bir dalga uzunluğu için olur. Diğer titreşimler bu şiddette veya değişik şiddetlerde analizörden geçecektir. Böylece, cihazın ekranında karanlık şeritlerin yerini renklileri alacaktır, izokrom ismi de bundan kaynaklanır ve aynı renkli hat anlamına gelir. İzoklinler ise ekranda, $\theta=0$ veya $\theta=90^o$ şartı, dalga uzunluğu λ' ya bağlı olmadığından önce olduğu gibi karanlık kalırlar. Ekranda ancak izokromların görüntüsünü oluşturmak için dairesel polariskoplar kullanılmaktadır. Bu tip polariskoplarda analizör ile polarizör arasına ilaveten iki, çeyrek ($\lambda/4$) dalga levhası olarak adlandırılan, polarizör levhalar konulmuştur. Çeyrek dalga polaroidlerinin polarize düzlemleri arasında $90^{o'}$ lik açı ayarlanır. Çeyrek dalga ($\lambda/4$) levhalarının kalınlığı öyle seçilmiştir ki ışın onlardan geçerken bileşenlerinin titreşimleri arasında $\pm\ n/2$ faz farkı oluşur. Polarizörle yakınındaki çeyrek dalga levhasının polarize düzlemleri arasında 45^{o}'' lik açı altında ayarlanması, geçirdiği titreşim bileşenlerinin genliklerinin eşitliğini sağlar ve böylelikle dairesel polarizelenmiş ışık elde edilir.

Dolayısıyla çeyrek dalga levhası polarizörden üstüne gelen düzlem polarizelenmiş ışığı dairesel polarizelenmiş ışığa çevirir. Modelden geçen dairesel polarizelenmiş ışığın karşısına, ters yönde dairesel polarize oluşturan ikinci çeyrek dalga levhası dikilir. Çeyrek dalga levhaları birbirlerinin etkilerini karşılıklı olarak yok ettiklerinden, ışın analizöre modelden geçerken aldığı gidiş farkı ile gelir.

Modelden geçen dairesel polarizelenmiş ışın için ilgili noktalardaki tüm doğrultular aynı etkiye sahiptir. Dolayısıyla, modelden ve ikinci çeyrek dalga levhasından geçen ışığın şiddeti ilgili noktalardaki asal gerilmelerin doğrultularına bağlı değildir. Böylelikle, dairesel polariskopta polarize düzleminin asal gerilmelerden birinin doğrultusuyla üst üste gelmesi söz konusu değildir. Dolayısıyla, ışığın $I=k\times a^2\times sin^2(2\theta)\times sin^2(\pi\delta/\lambda)$ denklemi ile tayin edilen şiddetini θ açısı etkilemeyecek ve ışığın şiddeti $sin^2(\pi\delta/\lambda)$ terimi ile doğru orantılı olacaktır. Dairesel polariskop izoklinlersiz, ancak şeritlerin manzarasını oluşturacak, monokromat ışık kullanılırsa siyah beyaz şeritlerin sıralamasını, beyaz ışıkta ise şeritlerin renkli manzarasını gösterecektir.

Çeyrek dalga levhaları polariskoplarda çekilebilen çerçevelerde monte edilir ve dolayısıyla modelin interferans şeritlerinin manzarasını düzlem ve dairesel polariskop durumlarında gözleme olanağı verir.

2.4 Asal Gerilmelerin Farkının ve Doğrultularının Tayin Edilmesi

Fotoelastik metotla, yapılan incelemeler sonucu, deneysel olarak asal gerilmelerin farkı ve araştırma yapılan düzlem üzerindeki doğrultuları bulunur. Asal gerilmelerin farkını tespit etmek için genel olarak renklerin karşılaştırılması ile şeritler ve kompanse metotları kullanılır.

2.4.1 Renklerin Karşılaştırılması Metodu

Bu metotla asal gerilmelerin farkı doğrudan beyaz ışık kaynağı kullanılmakla elde edilmiş renkli izokrom görüntüsüne göre bulunur. Model üzerinde görülen izokromların renkleri, Çizelge 2.1' de gösterilen Nyton halkalarının interferans renkleri ile karşılaştırılır. Çizelge 2.1' de incelenen modelde gerilmelerin tedricen arttırılması durumunda meydana gelen interferans renklerinin oluşma sırası ve interferans renklerine ilişkin optik gidiş farkının değerleri listelenmiştir.

Asal gerilmelerin farkının $(\sigma_1 - \sigma_2)$ arttırılması ve ilgili olarak optik gidiş farkının büyümesi renklerin ardışık olarak değişmesini ortaya koyar. Renkler ardışık olarak sarı, kırmızı ve yeşil olarak oluşurlar. Dalga uzunluğu X = 550 mmk olan kırmızı ışığın birinci mertebe renkleri sonlandırdığı ve yeşil ışığın ancak ikinci mertebe renklerinde ortaya çıktığı kabul edilmiştir. Eğer gidiş farkı artmaya devam ederse renkler bu ardışıklıkla tekrar oluşurlar. Ancak bu durumda renklerin bazı görünüş değişimleri söz konusu olmaktadır.

Çizelge 2.1 : İzokrom renkleriyle ilgili gidiş farkları

Renklerin mertebesi	Renklerin nosu	Çapraz polarizör ve analizör halinde renklerin adı	Işınların Gidiş Farkı (mmk)
1	1	Siyah	0
	2	Sarı - Siyah	50
	3	Lavanta - boz (gri)	100
	4	Boz - gök	150
	5	Bozumsu - beyaz	200
	6	Beyaz	250
	7	Açık sarı	300
	8	Parlak sarı	350
	9	Turuncu - sarı	430
	10	Turuncu	450
	11	Kırmızı - turuncu	500
	12	Kırmızı	550
2	13	Mor (erguvan)	565
	14	Menekşe	575
	15	Çivit	590
	16	Gök mavi	665
	17	Yeşilimsi mavi	730
	18	Yeşil	750
	19	Açık yeşil	800
	20	Sarı - yeşil	850
	21	Sarı	910
	22	Turuncu	950
	23	Turuncu - kırmızı	1000
	24	Kırmızı	1060
	25	Menekşe - kırmızı	1100
3	26	Menekşe	1130

Birinci ve ikinci mertebelerde parlak görüntülü renkler sonraki mertebelerde tedricen solgunlaşırlar ve beşinci, altıncı mertebelerde gri renge dönerek tamamen yok olurlar. Dolayısıyla, renkler tablosu kullanılarak, modelin istenilen noktasında izokromun rengi ve mertebesi tespit edilir. Buna bağlı olarak renkler kullanılarak ilgili gidiş farkları bulunur ve (2.8) bağıntısına göre asal gerilmelerin farkı hesaplanır

(modelin kalınlığı d ve malzemenin optik hassaslık katsayısı C önceden yapılmış olan ölçümlerle elde edilir). Gerilmeleri, renkleri karşılaştırarak değerlendirirken okuma hassasiyeti kaçınılmaz hatalar doğurur. Bu eksiği modelin malzemesinden yapılmış etalon numunelerini çekerken veya basarken ortaya gelen renklerin tonlarını resmetmekte, renkler skalası yaparak gidermek mümkündür.

2.4.2 Şerit Metodu

Asal gerilmelerin farkını bulmak üzere başvurulan en basit ve aynı zamanda yeterli derecede hassas olan yöntem şeritler metodudur. Özellikle, optik hassaslığı yüksek olan malzemelerden yapılmış modeller incelenirken bu metodun kullanımı önemli ölçüde kolaylık sağlar. Bu halde modelde büyük sayıda ve miktarda ve yüksek mertebeli şeritler meydana gelir, asal gerilmeler farkı ($\sigma_1 - \sigma_2$) şeritleri saymak yolu ile bulunabilir.

Modelin gerilme hali şeritler metodu ile araştırılırken monokromatik ışık kullanılır. Yeterli seviyede şiddetli monokramatik ışık oluşturmanın en iyi yolu civa ampulleri kullanmaktır. Bu ampuller görünen ışını iki hatta toplar (yeşil renkli 546 mmk dalga boylu ve menekşe renkli 436 mmk dalga boylu).

Civa lambası yeşil hat için filtreden geçerken menekşe ışın yutulur ve 546 mmk dalga boyunda net yeşil ışık kalır. Eğer monokromatik ışık polarizör ve analizörlerin çaprazlaştırılmış halinde kullanılırsa, her bir karanlık şeride bir dalga boyunda veya tam sayılı dalga boyuna eşit olan gidiş farkı karşılık gelecektir; $\delta = n\lambda$ (n = 1, 2, 3,...). Burada n şeritlerin mertebesidir. Böylece fotoelastisitenin temel kanunu olan (2.8) bağıntısı, (2.17) bağıntısı ile yazılabilir.

$$n.\lambda = c.d.(\sigma_1 - \sigma_2) \qquad \textbf{(2.17)}$$

(2.17) bağıntısında (σ_1-σ_2) yalnız bırakılırsa ;

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = n.\lambda / c.d \qquad \textbf{(2.18)}$$

Eğer, $\lambda / c.d = \sigma_o$ ise (2.19) bağıntısı elde edilmiş olur.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = n.\sigma_o \qquad \textbf{(2.19)}$$

Burada σ_o modelin malzemesi ve kalınlığına, polariskopta kullanılan ışığın dalga uzunluğuna bağlı olan sabittir. Bu sabite modelin şeridinin değeri denir ve modelin herhangi bir noktasında şeridin mertebesi bire eşit olduğunda meydana gelen asal gerilmeler farkı $\sigma_1 - \sigma_2$' ye eşittir.

Modelin kalınlığı d = 1 cm olursa ilgili şerit değerine malzemenin şeridinin değeri $\sigma_0^{1.0} = \sigma_0 \, d$, bağıntısı ile $\lambda / cd = \sigma_0$ göz önüne alınırsa $\sigma_0^{1.0} = \lambda / c$ elde edilir. Sözü geçen katsayı modelin malzemesi için sabittir ve onun optik hassaslığını niteler ve (2.20) bağıntısı yazılabilir.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \sigma_0^{1.0} \times n / d \qquad \textbf{(2.20)}$$

(2.20) bağıntısından görüleceği üzere, şeritler metodu ile asal gerilmeler farkı olan $(\sigma_1 - \sigma_2)$' yi tayin etmek için şeridin mertebesini ve modelin malzemesinin şerit değerini bilmek gerekmektedir. Malzemenin şerit değeri önceden yapılmış deney numunelerden bulunmaktadır.

Şeridin mertebesinin numarası polariskobun dairesel polarize durumunda izoklinlersiz şeritler görüntüsünden tayin edilir.

Ayrıca, şeritler görüntüsünden bir konum tutan noktaya rast gelinebilir ki, yükün ve ışık kaynağının değişmesiyle bağlantılı olmayarak karanlık kalırlar. İzotrop noktalarda asal gerilmeler değer ve işaretçe eşittirler, $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$. Böyle noktalara bazen özel noktalar da denir. Söz konusu noktalarda tüm doğrultular asal olduğundan çeşitli parametreli izoklinler burada kesişirler. İzotrop noktada; $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ şartı sağlanıyorsa, böyle noktalara sade nokta denir. İzotrop ve basit noktalarda şeritlerin mertebesi sıfıra eşittir.

Şeritler metodu ile $(\sigma_1 - \sigma_2)$ değerini hassas olarak tayin edebilmek için şeritlerin sayım başlangıcını bulmak gerekmektedir. Ölçme işlemleri ışığın dairesel polarize halinde, yani şeritlerin görüntüsünden izoklinlerin silindiği durumda yapılmalıdır. Şeritlerin mertebeleri birkaç yöntemle tespit edilebilir

1. Tedricen yüklenerek şeritlerin meydana gelişini izleyerek; bu en basit yöntemdir ve esas olarak karmaşık şerit görüntülerine sahip modelleri incelerken kullanılmaktadır.

2.Şeritlerin renkli görüntüsünü kullanarak; bilindiği üzere beyaz ışıkta şeritlerin mertebesi, renklerinin renkler skalası ile karşılaştırılması sonucu saptanabilir. Bu metodu kullanırken yüksek mertebeli şeritlerin renklerinin aşağı mertebeli şeritlerin renklerine oranla daha solgun olduğu dikkate alınmalıdır.

3.Modelde basit nokta mevcut ise, bu nokta sıfır mertebeli şerit gibi sayma başlangıcı olarak kabul edilir. Bu noktayı saptayabilmek için, modele etkiyen yük değiştirilir yada beyaz ışık kullanılır.

Modelde yüklenmemiş çıkıntı köşeler mevcut ise böyle köşelerde şeritlerin mertebesi sıfıra eşit olduğundan sayma başlangıcı olarak kabul edilebilir.

2.4.3 Kompanse Metodu

Bu metot asal gerilmelerin farkını ölçmek için kullanılan metotların içinde en hassası olmakla birlikte en çok uğraş gerektirenidir. Kompensatör adı verilen özel optik cihazlarla, gerilmeli modelden geçen ışınların farkının ölçülmesi şeklinde uygulanır.

Işınların gidiş farkının kompanse metodu ile ölçülmesi; modelde oluşmuş gidiş farkına kompensatörü kullanarak, değerce eşit ve ters işaretli farkı ilave edilmesine dayanır. Bu halde sonuçlayıcı gidiş farkı sıfıra eşit olur ve çapraz polariskopta ölçme yapılan noktada kararma gözlenir. Kompensatörü, polariskopta beyaz ışık kaynağı kullanılırken, ekranda şeritlerin renkli görüntüsü oluştuğunda uygulamak kolaylık sağlar.

Ölçme işlemlerinde Babine – Soleyl, Krasnov, Berek tipi kompensatörler kullanılır. İlk iki kompensatörün temelinde gidiş farkının iki kuvars kamanın, fazın toplam kalınlığının değişmesinden dolayı ölçülmesine dayanır. Pratikte en çok kullanılan kompensatör tipleri Krasnov ve Berek tipi kompensatörlerdir. Bu kompensatörlerde gidiş farkının değişmesi, özel kristal yerleştirilen ve ışına dikey olan eksen etrafında döndürülmesiyle elde edilir. Kristal levha öyle yönlendirilmiştir ki, ışık onu dikey doğrultuda aydınlattığında gidişin optik farkı sıfıra eşit olur. Levhayı döndürürken, gidiş farkı, ışının geçtiği yolun uzunluğuna bağlı olarak artar. Söz konusu kompensatör tipleri dördüncü mertebeye kadar ölçmeler yapmak için uygulanmıştır.

Kristal levha, üzerinde skala yapılmış küçük halkanın yardımıyla döndürülür. Halkanın skalasından alınmış ölçmenin neticesinde ve ayarlayıcı eğri veya tabloya göre araştırılan noktadaki gidiş farkı saptanır.

Böyle ölçmelerin yapıldığı cihazlara polarimetre denir. Modelin incelenen noktasında asal gerilmelerin doğrultularını tespit etmek için polarimetrelerde çapraz yerleştirilmiş polarizör ve analizörün senkron döndürülebilmesi olanağı sağlamıştır. Gidiş farklarının doğru ve hassas ölçülebilmesi için polarimetrenin polarize düzlemi modelin ilgili noktasındaki asal gerilmelerin doğrultularına $\theta = 45^{o}$' lik açı ile ayarlanmalıdır. Belli olduğu gibi bu halde incelenen noktada ışığın şiddeti maksimum değerine ulaşır ($I = I_{max}$). Kristal levhanın dönme ekseni ile cebri değeri küçük olan asal gerilmenin doğrultusuyla üst üste gelmelidir.

Kompanse metodu ışınların gidiş farkını yüksek hassaslıkla (dalga boyunun yüzde biri) ölçme imkânı tanır ve optik hassalığı düşük olan malzemelerden yapılmış modellerin araştırılmasında rahatlıkla kullanılabilir.

Bazı polarimetrelerde gidiş farkını ölçebilmek için Senarmon metodu kullanılır. Bu halde modelin ve analizörin arasına çeyrek dalga levhası konulur. Levhanın optik eksenleri, çapraz polarizör ve analizörin polarize düzlemleri ile üst üste gelir ve modelin incelenen noktasındaki asal gerilmelerin doğrultuları ile 45^{o}' lik açı ayarlanır. Ölçmeler monokromatik ışık kaynağıyla yapılır. İlgili noktadaki gidiş farkı analizörin, bu noktada kararma oluşana kadar dönme açısının değerine bağlantılı olarak bulunur.

3. TERMAL GERİLMELER

Termal gerilme bir sistemin kısmen ya da tamamen sıcaklık değişimleri sonucunda genleşmesine ya da daralmasına izin verilmediği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Sürekli cisimlerde geometri, dış sınırlamalar ya da sıcaklık farkının var olması genleşme ya da daralmanın bütün yönlerde serbest olarak meydana gelmesini engellemektedir ve bunun sonucunda iç zorlanmalar ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan bu tür gerilmelere termal gerilme denilmektedir.

Serbest bir cismin sıcaklığı üniform olarak değiştirilirse onun elemanlarının asal parçacıklarının kartezyen koordinat sisteminde şekil değiştirmeleri, α termal genleşme katsayısı ve ΔT sıcaklık değişimi olmak üzere (3.1) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha(\Delta T) \tag{3.1}$$

Bir çubuk, ekseni doğrultusundaki bir genleşmeyi engellemek için uç kısımlarından sınırlandırılır ve uniform sıcaklık artışına tabi tutulursa, eksenel doğrultuda serbestçe hareket edemeyeceğinden dolayı (3.2) bağıntısı ile verilen bir gerilme oluşur.

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(\Delta T) \tag{3.2}$$

Benzer şekilde, düz bir levha kenarlarından sınırlandırılıp sıcaklık artışına tabi tutulursa sıcaklık değişiminden kaynaklanan gerilme (3.3) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{\alpha(\Delta T)E}{1-\nu} \tag{3.3}$$

Denklem (3.2) ve (3.3) ile ifade edilen gerilmeler termal gerilme olarak adlandırılmaktadır. Sıkıştırılmış ya da sınırlandırılmış bir cismin sıcaklık değişimine bağlı olarak ortaya çıkmaktadırlar.

3.1 Termal Gerilmelerin Fotoelastik Metod ile Araştırılması

Tasarımı yapılan konstrüksiyonların kalite göstergelerinin çağdaş seviyede olmasını sağlayan önemli faktörlerden birisi de emniyet problemlerinin optimal çözümünün bulunmasıdır. Bu problemler, tasarım yapılan konstrüksiyonlarda sıcaklık gradyanından, mekanik yüklerden ve etkiyen diğer önemli faktörlerden oluşan şekil değiştirme ve gerilmelerin hassas ve ayrıntılı olarak araştırılmasını içermektedir. Yeni prototipi olmayan makine ve konstrüksiyonların tasarım sürecinde, bu nitelikte yapılacak araştırmaların başarılı olabilmesi için mevcut teorik, sayısal ve deneysel metotların birlikte uygulanması gerekmektedir.

Tasarım sürecinde sık uygulanan deneysel metotlardan biri de yüksek hassasiyetinden, kolaylığından ve düşük maliyetli olmasından ötürü fotoelastik yöntemdir. Bu metotla termal gerilmelerin araştırılması, esas olarak aşağıdaki yöntemlerle yapılır.

- Dislokasyon anolojisi
- Sıcaklık dağılımının modelde oluşturulması
- Serbest ısıl genleşmelerin mekanik modellenmesi

Yukarıda bahsedilen yöntemlerden ilk ikisi basit, düzlemsel gerilme problemlerinin araştırılmasında uygulanabilirler. Serbest ısıl genleşmelerin mekanik modellenmesi yöntemi ise termal gerilmelerin dağılımının üç boyutlu problemlerinin geniş bir yelpazede başarı ile araştırılmasınıda sağlamaktadır. Bu yöntem kullanıldığında, tasarım aşamasındaki konstrüksiyonların veya onların büyük ölçekli modellerinin sıcaklık değişiminin oluşturulması ve rejim halinin sağlanması gibi yüksek maliyetli sorunlar ortadan kalkar.

Mekanik modelleme metodu gereğince araştırılan konstrüksiyonun modeli, parçalarındaki ısıl genleşmelere tekabül edecek kadar, üniform şekil değiştirmeler "dondurulmuş" ilgili elemanların yapıştırılması ile elde edilir. Uygulamalarda kullanılan optik hassas malzemelerde, şekil değiştirmeler viskoelastik sıcaklıkta dondurulur.

Tasarımı yapılan modellerin parçaları, önceden çekme, basınç, eğilme momenti, iç ve dış basınçlar vs. etkisinde deforme edilmiş ve şekil değiştirmeleri dondurulmuş, numunelerden imal edilirler. Denemede uygulanan bazı numune tipleri için

karakteristik deforme etme yöntemleri, dondurulacak şekil değiştirmelerin ve ilgili etkiyen kuvvetlerin değerlerini tespit etmek için gerekli formüller verilmiştir [10].

Termal gerilmelerin, serbest ısıl genleşmelerinin mekanik modellenmesi metodu ile incelenmesi aşağıda açıklandığı gibi yapılır.

Konstrüksiyonun, malzemenin özelliklerine (elastisite modülü, ısıl genleşme katsayısı vs.), geometrisine ve sıcaklığın dağılım şekline bağlı olarak, *i* parçaya bölündüğü varsayılır. Bu parçaların serbest olduğu düşünülerek ve her biri için ilgili sıcaklık farkının ΔT_i ve ısıl genleşme katsayısının α_i olduğu göz önünde tutularak, serbest ısıl genleşmeleri hesaplanır.

$$\varepsilon_{oi} = \alpha_i \Delta T_i \qquad \textbf{(3.4)}$$

Gerilmelerin yığılma bölgelerinde, araştırmanın güvenilir şekilde yapılabilmesi bakımından, laboratuardaki teknoloji, deneysel donanım ve optik hassas malzemenin boyutları dikkate alınarak modelin geometrik benzeşim ölçeği;

$$\gamma = \frac{l_m}{l_w} \qquad \textbf{(3.5)}$$

olarak seçilir. Burada l_m ve l_w sırasıyla modelin ve gerçek konstrüksiyonun ilgili boyutlarıdır.

Modelde, emniyetli mukavemeti sağlamak koşulu ile maksimum optik etki oluşturularak, ölçme işlemlerinin hassasiyetinin yükseltilmesi açısından ısıl genleşmelerin modelleme ölçeği aşağıdaki (3.6) bağıntısıyla hesaplanır.

$$K = \frac{\varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{mi}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Burada ε_{mi} modelin *i*' nci parçasında dondurulacak üniform şekil değiştirmedir. Üniform şekil değiştirmeler, belirlenen ölçeğe göre modelin parçaları için hesaplanır. Bulunan şekil değiştirmeleri, mekanik olarak oluşturmak için gereken numunelerin şekilleri (dairesel veya kare kesitli çubuklar, silindirik veya küresel kabuklar vs.) tespit edilir. Bu numunenin boyutları ve ilgili yüklerin değerleri hesaplanır. Geometrileri belirlenmiş numuneler, optik hassas malzemeden, takım tezgahlarında imal edilirler.

Fırına konmuş numunelerde, ilgili mekanik yükleme sistemlerinin etkisiyle gerekli şekil değiştirmeler oluşturulur ve dondurulur. Modelin elemanları, numunelerin üniform şekil değiştirmeler oluşturulmuş ve dondurulmuş orta kısımlarından ilgili doğrultularda kesilip çıkarılırlar. Elemanlar ilgili sıra ve yüzeyleri boyunca birbirlerine yapıştırılırlar. Bu şekilde oluşturulmuş cisme takım tezgahlarında uygulanan işlemlerle, modelin son şekil ve boyutları verilir. Ardından model, fırına konularak malzemesinin viskoelastik sıcaklığına kadar ısıtılır. Modelin elemanlarında oluşturulmuş şekil değiştirmelerin geri alınması ve karşılıklı etkileşimlerinden dolayı modelde, gerçek konstrüksiyonun termal gerilme haline benzer bir gerilme hali oluşur.

Modelin oda sıcaklığına kadar soğutulması ile bu gerilme dağılımı dondurulmuş olur. Modelde oluşmuş gerilmeler, modelin önemli ve istenilen bölgelerinden kesilerek çıkarılan dilimlerin fotoelastik yöntemlerle analizinden bulunur. Dilimlerde yapılacak incelemelere göre gerilmeler;

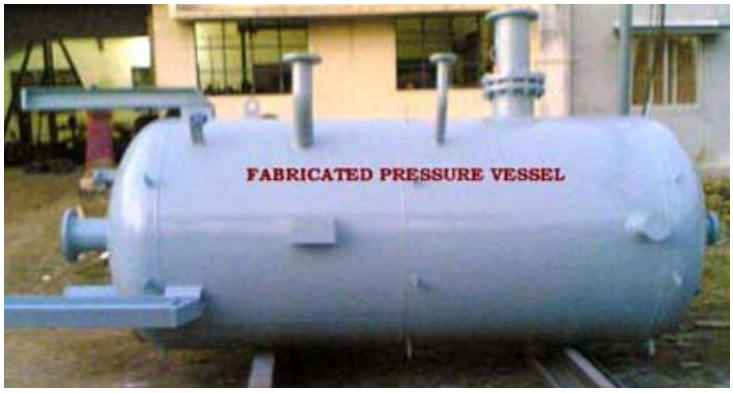
$$\sigma_m = \frac{m}{t}\sigma_o^{1.0} \qquad \textbf{(3.7)}$$

formülünün kullanılmasıyla hesaplanır. Burada m interferans şeritlerinin sayısı, t dilimin ölçme noktasındaki et kalınlığı (cm), $\sigma_o^{1.0}$ model malzemesinin optik hassaslık katsayısıdır (N/cm.şerit). Bu şekilde bulunan σ_m gerilmelerinden gerçek konstrüksiyondaki σ_n termal gerilmeler, benzeşim teorisi esas alınarak, (3.8) bağıntısı ile verilen dönüşüm formülü kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma_n = \frac{1-\nu_m}{1-\nu_n}\frac{E_n}{E_m}K\sigma_m \qquad \textbf{(3.8)}$$

4. DENEYSEL KISIM

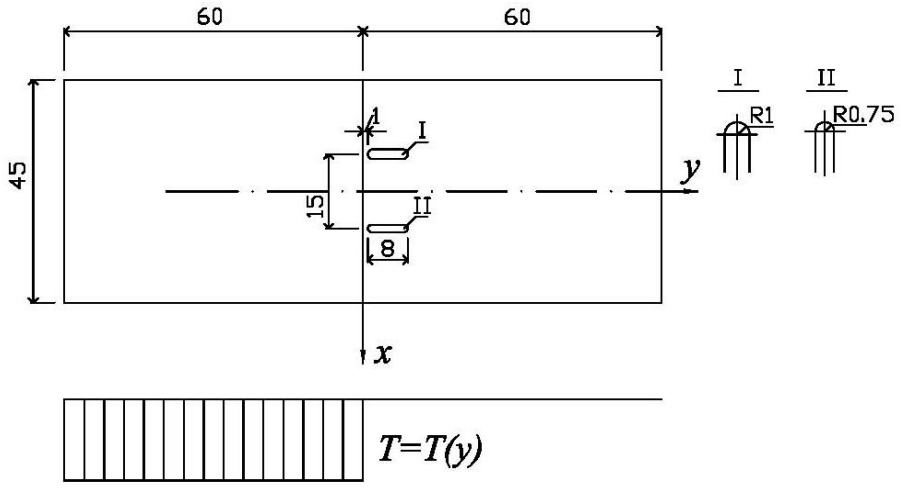
Araştırmamızın konusu olan silindirik basınç kabları, yarıçapları ve uzunlukları sırasıyla 450 ve 2000 mm civarlarında imal edilmektedirler. Şekil 4.1'de örnek bir basınç kabının resmi gösterilmiştir. Bu boyutlarda olan silindirik kablarda oyuklar bölgesinde oluşan termal gerilmeler yerel karakterlidirler ve değerleri kabın eğriliğinden, dikkat edilecek derecede etkilenmemektedir [9]. Dolayısıyla oyuklar şeklindeki defektlerin civarında oluşan termal gerilmeler bölgesel düzlem modeller ile araştırılabilmektedir.



Şekil 4.1 : Basınç kabı örneği

Bu çalışmada, sıcaklığın büyük gradyanla değiştiği durumlarda, silindirik kabukta farklı boyutlardaki oyuklar şeklindeki kusurların civarında oluşan termal gerilmelerin dağılımı, fotoelastisitenin serbest termal genleşmelerin mekanik modellenmesi yöntemi ile bölgesel düzlem modellerle incelenmiştir.

Modelin şeması ve sıcaklığın dağılma grafiği Şekil 4.2'de verilmektedir. Oyukların genişlikleri 2 mm ve 1.5 mm olup modelde, birbirlerinden ve modelin kenarlarından karşılıklı etkileşmemelerinin gerektiği uzaklıklarda konumlandırılmışlardır.

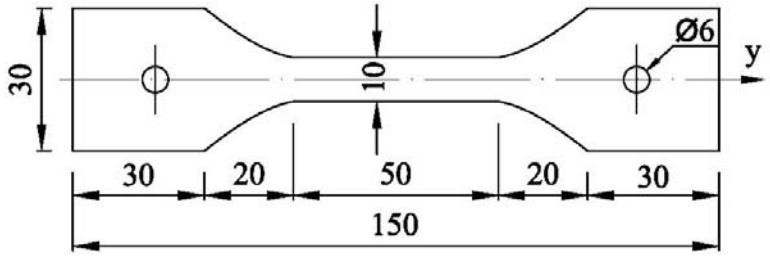


Şekil 4.2 : Basınç kabının bölgesel modelinin şeması ve sıcaklık dağılımı

Fototermoelastisite yöntemine dayanarak basınç kabının oyuklu bölgesinin modelinde, serbest termal genleşmeler ($\alpha\Delta T$), modelin sadece $y<0$ kısmında ilgili mekanik yükleme ile oluşturularak, dondurulacak modelin diğer $y>0$ kısmında şekil değiştirmelerin dondurulması işlemlerinin yapılması gerekmemektedir. Modelin $y>0$ kısmında önceden deneyde öngörülmüş oyuklar yapılmıştır.

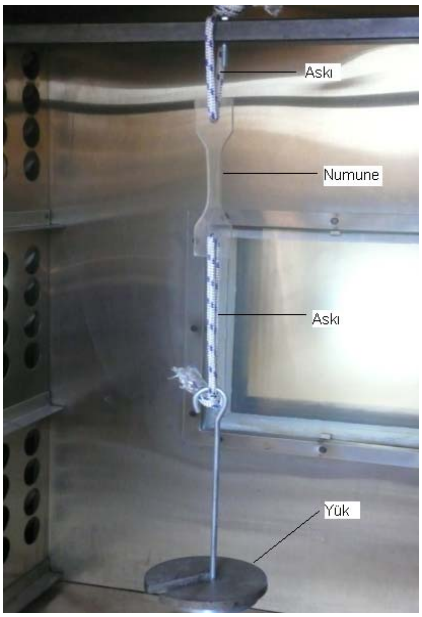
4.1 Malzemenin Viskoelastik Sıcaklığının Tayini

Deneyde kullanılan fotoelastik malzemenin viskoelastik sıcaklığının tespit edilmesi için özel bir numune Şekil 4.3'deki boyutlarda ilgili tezgahlarda hazırlanmıştır. Kenarlar pürüzsüz olacak şekilde zımpara ile düzeltilmiştir ve numunenin deney düzeneğine tutturulabilmesi için alt ve üst kısımlarında 6 mm çapında delikler açılmıştır.



Şekil 4.3 : Kritik sıcaklık deney numunesinin şeması

Fırın içerisinde numunenin eksenel yük almasını sağlamak amacıyla Şekil 4.4'deki düzenek oluşturulmuştur. Numunenin gerilme almasını sağlamak amacıyla toplam 1 kg'lık yük asılarak numunenin zayıf kesitinde 0.2 MPa'lık normal gerilme oluşturulmuştur. Fırın saatte 5 ^{o}C'lik artışla ısıtılmıştır. Bu sırada 5-10 saniye gibi çok kısa bir süre içerisinde fırının kapısı açılarak numune mevcut olan yüküne eklenen çekme kuvvetiyle etkilenir. Fırının analizörlü penceresinden ortaya çıkan yeni interferens şeritleri görünümünün ek kuvvetin kaldırılmasıyla kaybolma hızı gözlenir. Numunenin malzemesi, viskoelastik sıcaklığı seviyesinde ısıtıldığı durumda sözü edilen yeni interferens şeritleri görüntüsü ek yükün kaldırılması ile analizörün ekranından ani olarak kaybolurlar. Yapılan deneyde modelin malzemesinin 130 ^{o}C sıcaklıkta viskoelastik duruma ulaştığı tespit edilmiştir.

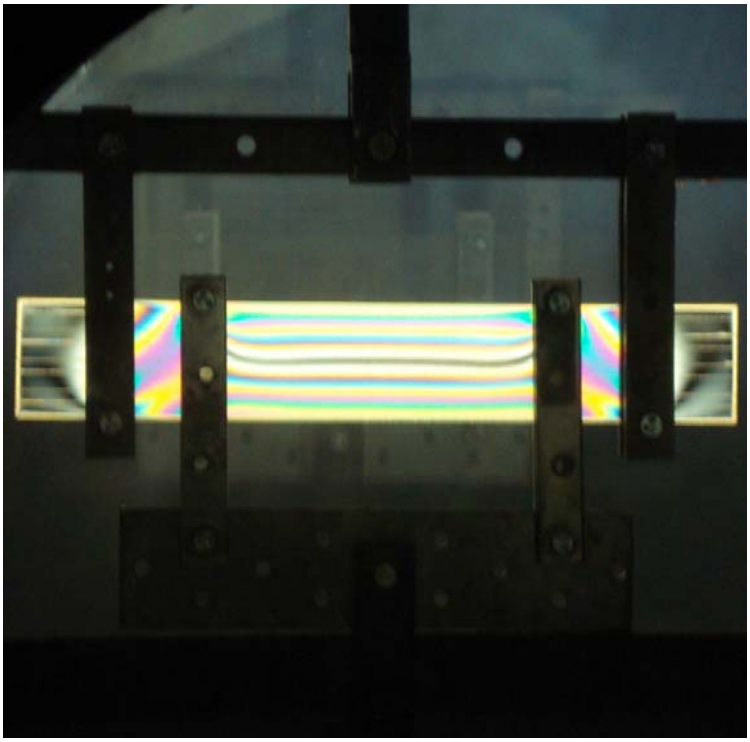


Şekil 4.4 : Kritik sıcaklığın saptanması için uygulanan yükleme düzeneği

4.2 Optik Hassasiyet Oranının Belirlenmesi

Fotoelastik yöntemle yapılmış deneylerde ilgili optik ölçmelerle elde edilmiş verilere göre modelde oluşmuş gerilmelerin hesaplanabilmesi için uygulanmış malzemenin optik hassasiyet oranının $\sigma_o^{1.0}$ değeri bilinmelidir. Sözü edilen parametrenin bulunması için, genel olarak, teorik olarak çözümleri bilinen problemlerle ilgili denemeler uygulanmaktadır [7].

Bu çalışmada, malzemenin optik hassasiyet oranının tespit edilmesi için Şekil 4.5'de gösterilen 4 nokta basit eğilme testi uygulanmıştır.



Şekil 4.5 : Numunenin polariskopta görüntüsü

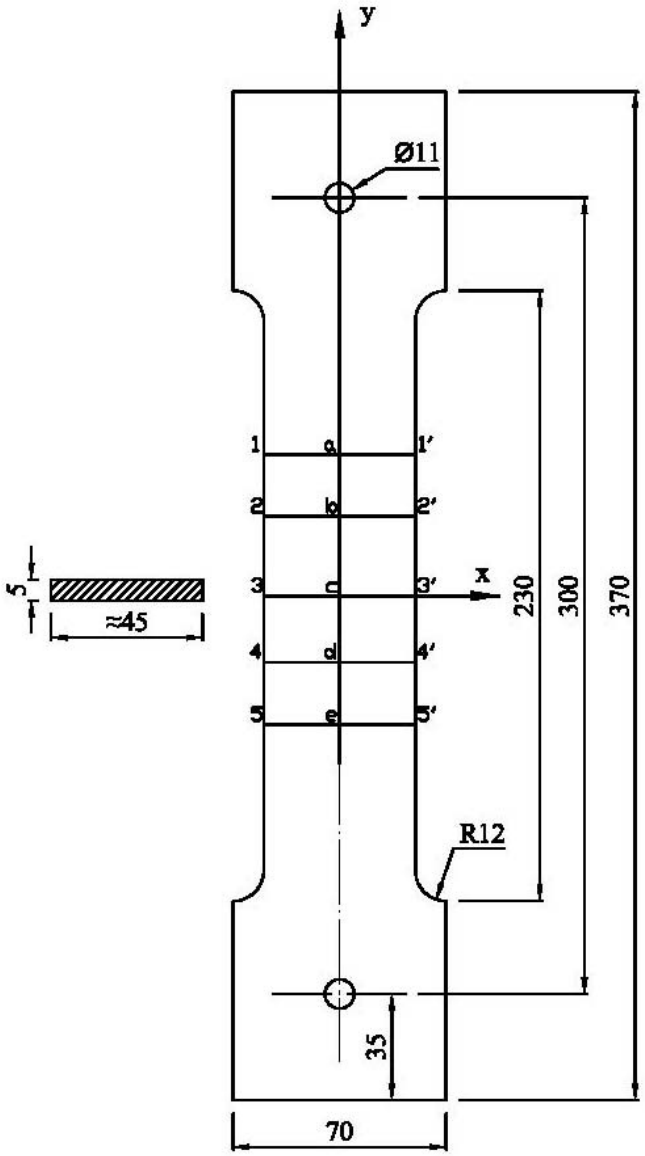
Teorik olarak $\sigma = \frac{M_x}{I_x} y$ formülü ile hesaplanan gerilme (3.20) bağıntısında yerine konularak malzemenin optik hassasiyeti hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{m}{t}\sigma_o^{1.0} \Rightarrow 0.3 = \frac{2.94}{5}\sigma_o^{1.0} \Rightarrow \sigma_o^{1.0} = 0.51 \frac{N}{mm.şerit}$$

4.3 Modelin y<0 Kısmının Mekanik Yüklenmesi

Modelin serbest termal genleşmeler dondurulmuş parçasının yapılması için eksenel çekme kuvvetiyle yüklenecek bir numune öngörülmüştür. Eksenel çekmenin etkisi ile numunenin orta kısmında homojen gerilme durumu ve serbest termal genleşmelerin modellenmesi için gereken şekil değiştirme durumu ortaya çıkmaktadır.

Numune Şekil 4.6'daki boyutlarda hazırlanmıştır. Numunenin enine doğrultusundaki birim şekil değiştirmesini hesaplamak için orta kısmında enine doğrultuda ($1-1'$, $2-2'$, $3-3'$, $4-4'$, $5-5'$) beş adet çizgi permanent kalem ile çizilmiştir.



Şekil 4.6 : Yükleme numunesi şeması

Numuneye eksenel yük uygulamak için fırın içerisinde düzenek hazırlanmıştır. Numuneye toplam 111 N'luk yük asılarak deneye başlanmıştır (Şekil 4.7). Malzemenin viskoelastik sıcaklığı kısım 4.1'de belirtildiği üzere 130 ^{o}C olarak belirlenmiştir. Numune oda sıcaklığından viskoelastik sıcaklığa 5 ^{o}C/saat'lik artışlarla çıkarak ve bu sıcaklıkta 1 saat bekleyerek tekrar oda sıcaklığına 5 ^{o}C/saat'lik ısıl inişler olacak şekilde fırın programlanmıştır.



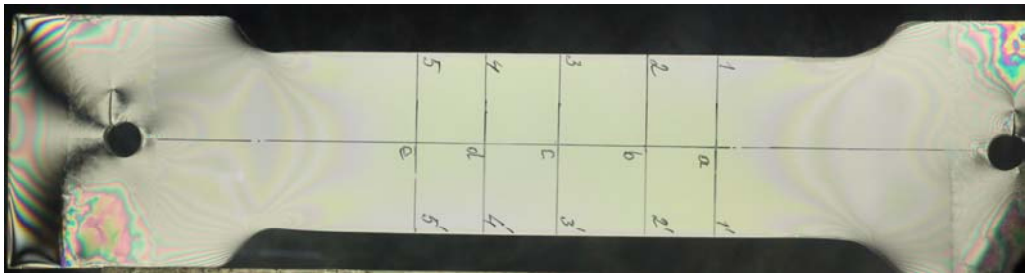
Şekil 4.7 : Yükleme numunesinin resmi

Numune dondurulmadan önce ve sonra Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi kalınlıkları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ölçüm hatalarını azaltmak için her noktadan üçer adet ölçüm alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Numunenin genişliği doğrultusundaki birim şekil değiştirmeler

No	Genişlik (mm)					$\varepsilon_x=(\Delta/l_i)$
	Yük.önce l_i	Yük.Önceki Ortalama $(l_i)_{ort}$	Yük.sonra l_s	Yük. Sonraki Ortalama $(l_i)_{ort}$	Δ (fark)	
1-1'	44.29	44.30	43.76	43.76	-0.54	-0.01212
	44.30		43.76			
	44.30		43.76			
2-2'	44.69	44.68	44.16	44.16	-0.52	-0.01164
	44.67		44.16			
	44.69		44.17			
3-3'	45.03	45.03	44.56	44.55	-0.49	-0.01081
	45.04		44.54			
	45.03		44.54			
4-4'	45.18	45.18	44.73	44.73	-0.46	-0.01011
	45.19		44.72			
	45.18		44.73			
5-5'	44.99	44.99	44.58	44.57	-0.42	-0.00941
	44.99		44.57			
	45.00		44.56			

Deney sonuçlarının ortalamasından $(\varepsilon_x)_{ort} \approx$ -0.01082 olarak bulunmuştur. Şekil 4.8'de yüklenmiş numunenin polariskobtaki görüntüsü gözükmektedir.



Şekil 4.8 : Yüklenmiş numunenin polariskoptaki görüntüsü

4.4 Viskoelastik Sıcaklıktaki Elastisite Modülünün Hesabı

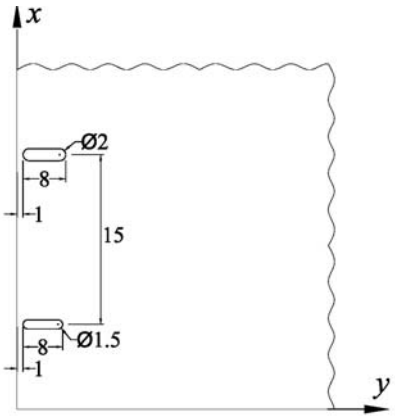
Yükleme sonuçlarından daha önceki kısımda belirtildiği gibi , ε_x = -0.01082 olarak hesaplanmıştır.

$\sigma_y = \frac{N}{A} = \frac{111}{183.8} = 0.6$ MPa ; $\sigma_x = 0$; $\sigma_z = 0$;

$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right]$ → $E = -\frac{\nu\sigma_y}{\varepsilon_x} = 27.7$ MPa olarak hesaplanmıştır.

5. TERMAL GENLEŞMELERİN MEKANİK MODELLENMESİ

Şekil 4.8'de gösterilmiş olan yüklenmiş numune $1-1'$ çizgisinin yukarısından ve $5-5'$ çizgisinin alt kısmından CNC tezgahı vasıtasıyla kesilerek çıkartılmıştır. Modelin y<0 parçası, numunenin $3-3'$ seviyesinde kesilerek ayrılmış bir parçasından yapılmıştır. Yüklenmiş numune ile aynı mekanik özelliklere sahip olan levhadan numune, boyutları yüklenmiş olan numuneye eşit olacak şekilde kesilerek oluşturulmuştur. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi oyuklar ilgili tezgahların yardımıyla oluşturulmuştur. Oyukların çapları 2 ve 1.5 mm olup bütün oyukların uzunlukları 8 mm ve birleşim kenarına olan uzaklıkları ise 1 mm'dir. Oyukların birbirlerinden etkilenmemesi için aralarındaki uzaklık 15 mm olacak şekilde oyuklar oluşturulmuştur.

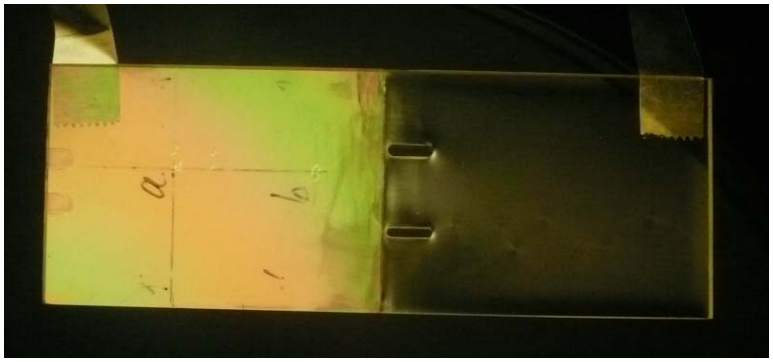


Şekil 5.1 : Yüksüz numunenin şematik çizimi

Oyuklar yüksüz numunede oluşturulduktan sonra yüklü ve yüksüz numuneler *x* doğrultusunda birbirlerine yapıştırılmıştır. Bu yapıştırma işleminde kullanılan yapıştırıcının özellikleri büyük önem taşımaktadır. Yüklü numunenin yüksüz numuneye yük uygulaması için sistemin 130 ^{o}C olan viskoelastik sıcaklığı kadar ısıtılması gerekmektedir bu yüzden kullanılacak olan yapıştırıcının çok yüksek sıcaklıkta özelliklerini koruması ve bununla birlikte şeffaf renkte olması gerekmektedir. Piyasada satılan yüksek sıcaklığa mukavim yapıştırıcaların çoğu metalik renktedir. Bu tez aşamasında uygun yapıştırıcının bulunması çok uzun vakit almıştır.

5.1 Çapları 2 ve 1.5 mm Olan Oyukların Termal Olarak Yüklenmesi

Numuneler yapıştırıldıktan sonra 1 gün süreyle yapıştırıcı kurumaya bırakılmıştır. Yapıştırıcının kuruma işlemi tamamlandıktan sonra bütün kenarlar ince zımparayla düzeltilerek pürüzsüz kenarlar elde edilmiştir. Şekil 5.2'de 2 ve 1.5 mm çapındaki oyuklara sahip modelin yapıştırıldıktan sonra, yüklenmeden önce polariskopta çekilen görüntüsü görülmektedir.

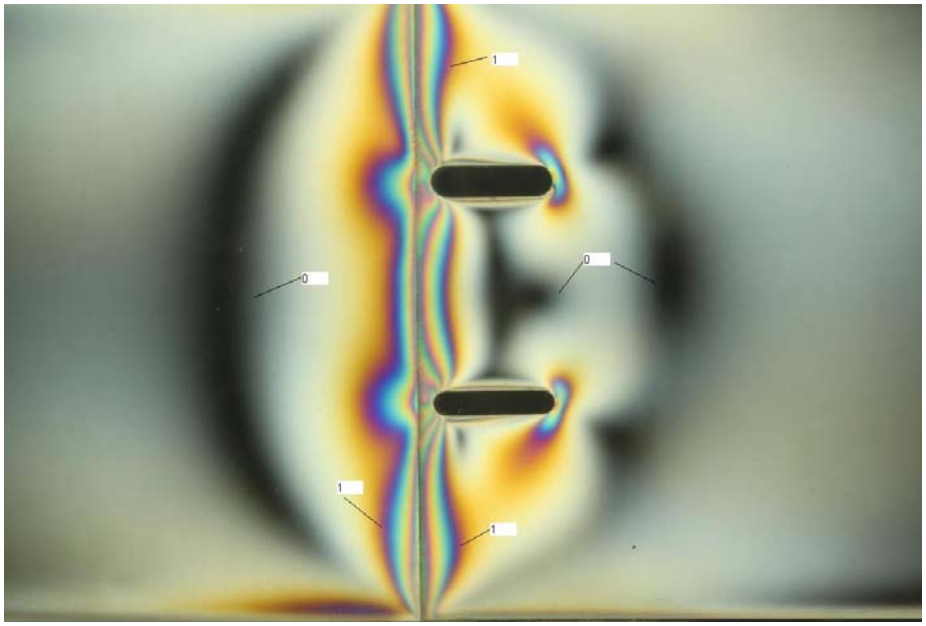


Şekil 5.2 : Oyukların yapıştırıldıktan sonra yüklenmeden önce polariskopta çekilen görüntüsü

Bilindiği üzere yüklü parça önceden uzun ekseni (y ekseni) doğrultusunda çekme kuvvetine maruz bırakılmıştı. Bunun sonucu olarak diğer doğrultularda numune kısalmıştır. Birleştirilen numuneler viskoelastik sıcaklığa kadar ısıtılırsa yüklü numune birleşim kenarı doğrultusunda yüksüz numuneye nazaran daha fazla genleşmek isteyecektir. Böylece parçalar arasında karşılıklı etkileşim oluşacaktır. Oluşan bu etkileşim termal gerilme haline benzer bir etkileşim olacaktır.

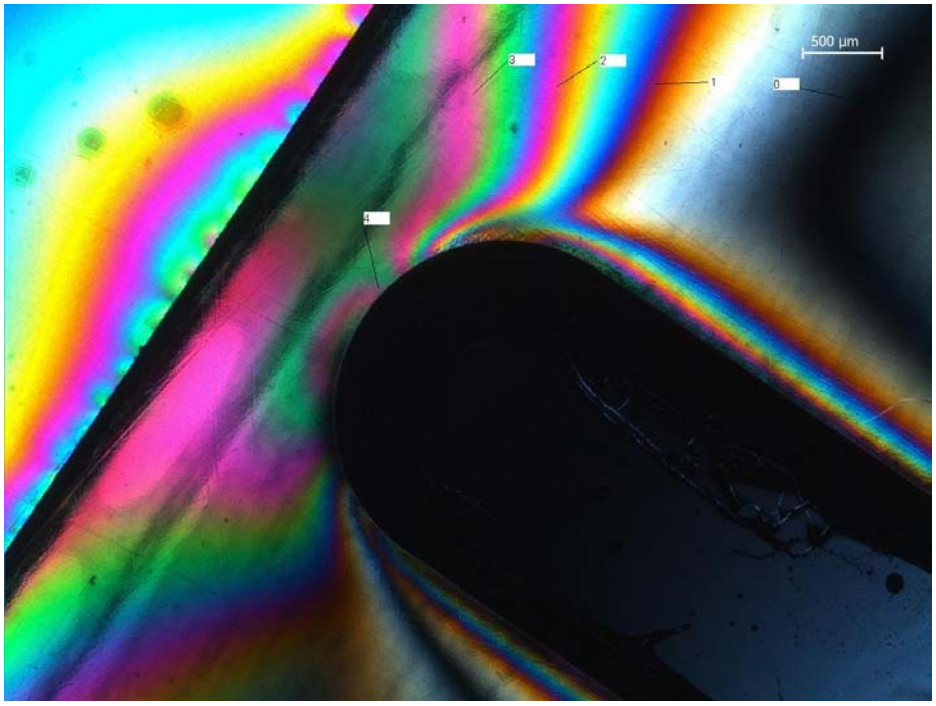
Yapıştırma ve zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra numune fırına konularak viskoelastik sıcaklığı olan 130 °C'ye kadar oda sıcaklığından 5'er derece artarak ve bu sıcaklıkta 1 saat bekleyip tekrar oda sıcaklığına 5'er derece inecek şekilde ısıtılmıştır.

Şekil 5.3'de birleşmiş olan parçalardan 2 ve 1.5 mm çapındaki oyuklara sahip modelin fırında yüklendikten sonra Kodak marka dijital fotoğraf makinesiyle polariskobta çekilen görüntüsü gözükmektedir.

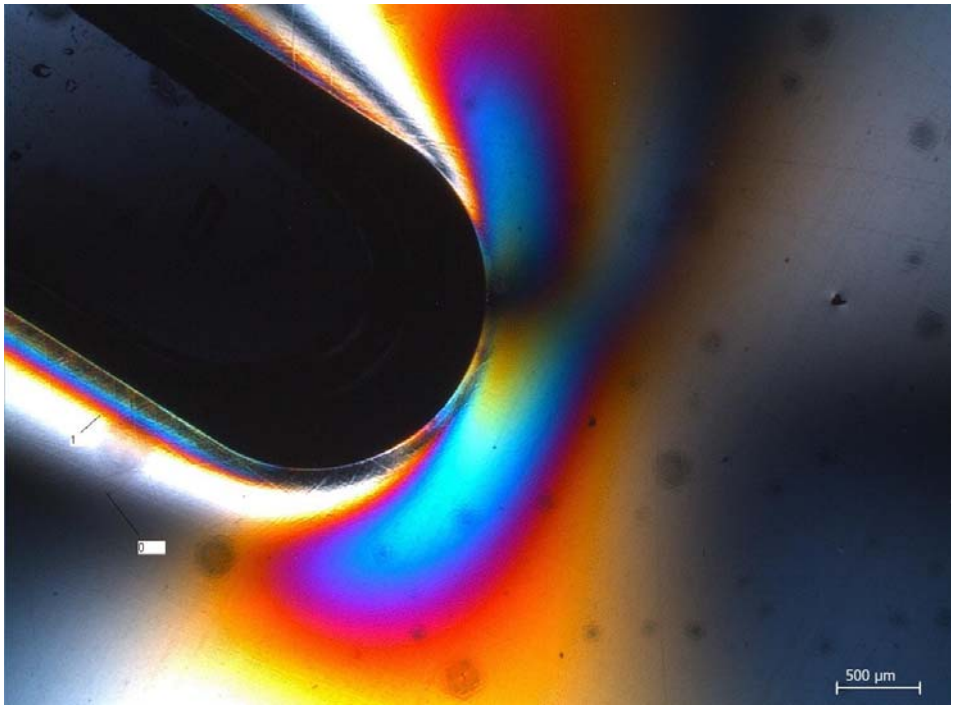


Şekil 5.3 : 2 ve 1.5 mm çapındaki oyukların yüklendikten sonra polariskobtaki görüntüsü

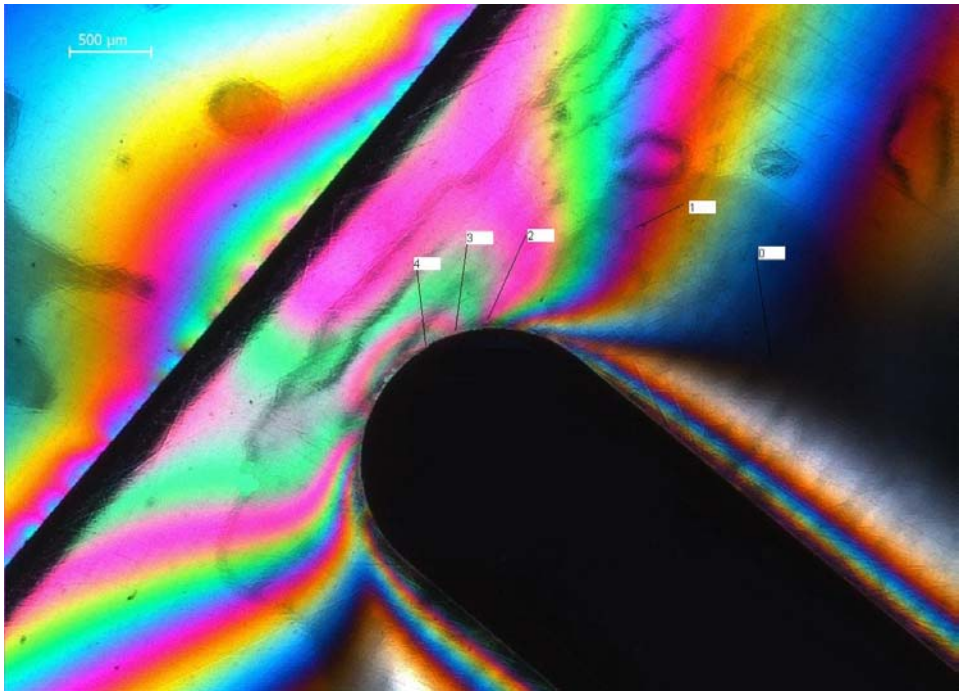
Oyuk civarındaki gerilmelerin detaylı görüntüleri, Leica marka mikroskopta 16 kat büyütülerek çekilmiştir. Mikroskopta her bir oyuğun ucundaki izokromatların görüntüsü alınmıştır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te sırasıyla 2 mm çapındaki oyuğun birleşim kenarına yakın ve uzak ucundaki izokromatların görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de ise sırasıyla 1.5 mm çapındaki oyuğun birleşim kenarına yakın ve uzak ucundaki izokromatların görüntüsü verilmektedir.



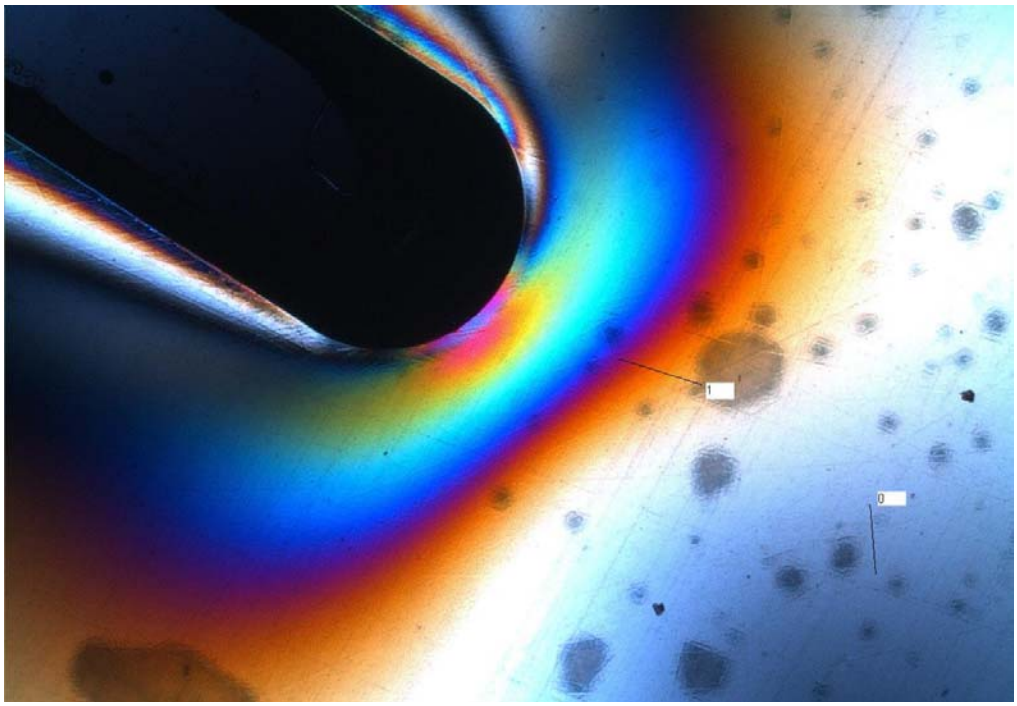
Şekil 5.4 : Çapı 2 mm olan oyuğun birleşim kenarına yakın olan ucu etrafindaki izokromatlar



Şekil 5.5 : Çapı 2 mm olan oyuğun birleşim kenarına uzak olan ucu etrafindaki izokromatlar



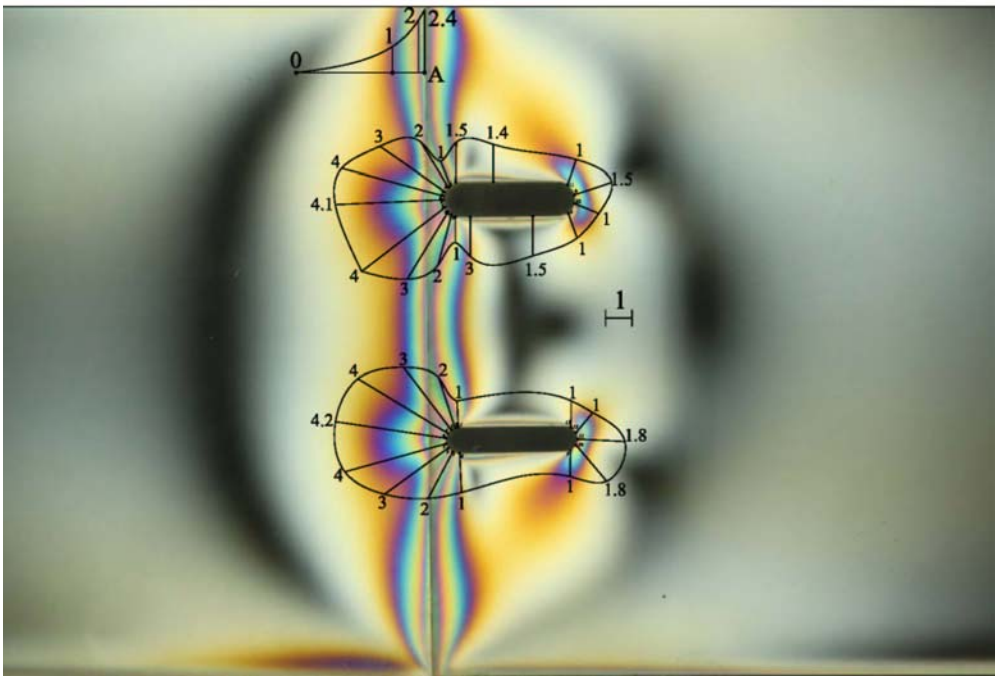
Şekil 5.6 : Çapı 1.5 mm olan oyuğun birleşim kenarına yakın olan ucu etrafindaki izokromatlar



Şekil 5.7 : Çapı 1.5 mm olan oyuğun birleşim kenarına uzak olan ucu etrafindaki izokromatlar

5.2 Çapları 2 ve 1.5 mm Olan Oyukların Termal Gerilmelerinin Hesaplanması

Oyuklar civarındaki şeritlerin dağılımında Şekil 5.8'de gösterildiği üzere oyukların birleşim bölgesine yakın olan uçlarında şerit sayıları, diğer uçlarına göre daha fazla ve maksimum şeritler birleşim kenarına yakın olan ucun tepesi civarındadır. Ayrıca 1.50 mm çapındaki oyuktaki maksim şeritlerin sayısı 2 mm çapına sahip oyuktaki şerit sayısından fazladır.



Şekil 5.8 : Oyuklardaki şerit dağılımı

5.2.1 Modelin malzemesinin optik hassasiyetinin hesaplanması

Bilindiği gibi birleştirilmiş geniş iki levhada temas doğrusu bölgesinde oluşan termal gerilmeler ,

$\sigma = 0.5\dfrac{\alpha(\Delta T)E}{1-\nu}$ değerine ulaşırlar.

Modelin malzemesinin viskoelastik durumda poisson oranının değeri $\nu \approx 0.5$ olarak kabul edilir. Bu durumda temas bölgesinde gerilmeler $\sigma = E\alpha\Delta T'$e eşit olurlar. İncelediğimiz modelin A noktasında oluşan gerilmeler,

$\sigma_x = E \times \varepsilon = 0.01082 \times 27.7 = 0.3$ MPa değerine eşit olur.

Ayrıca bu noktada oluşan gerilmeler (3.7) bağıntısında verildiği gibi $\sigma_m = \frac{m}{t}\sigma_o^{1.0}$ formülü ile hesaplanabilir. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi A noktasında ki şerit sayısı ekstrapolasyon ile m=2.4 olarak bulunmuştur. Böylelikle ;

$$\sigma_m = \frac{m}{t}\sigma_o^{1.0} \Rightarrow 0.3 = \frac{2.4}{4.07}\sigma_o^{1.0} \Rightarrow \sigma_o^{1.0} = 0.509\frac{N}{mm.şerit}$$

Optik hassasiyet hesaplanmış olur. Buradaki t=4.07 mm modelin A noktasındaki kalınlığıdır.

5.2.2 Oyukların gerilme dağılımınlarının hesaplanması

m şerit sayıları, *t* ilgili noktadaki kalınlıklar ve $\sigma_o^{1.0}$ malzemenin optik hassaslık katsayısı olmak üzere 2 ve 1.5 mm çapındaki oyuklar civarındaki gerilme değerleri sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : 2 mm çapındaki oyuk civarında ilgili noktalardaki gerilmeler

No	*m şerit*	*t (mm)*	*m/t*	$\sigma_o^{1.0}$ *(N.mm/şerit)*	σ_m *(MPa)*	*(SCF)*
1	1	4.070	0.246	0.509	0.125	0.42
2	2	4.070	0.491	0.509	0.250	0.83
3	3	4.070	0.737	0.509	0.375	1.25
4	4	4.070	0.983	0.509	0.500	1.67
a	4.1	4.070	1.007	0.509	0.513	1.71
5	4	4.070	0.983	0.509	0.500	1.67
6	3	4.070	0.737	0.509	0.375	1.25
7	2	4.070	0.491	0.509	0.250	0.83
8	1	4.070	0.246	0.509	0.125	0.42
9	1	4.070	0.246	0.509	0.125	0.42
10	1	4.070	0.246	0.509	0.125	0.42
b	1.5	4.070	0.369	0.509	0.188	0.63
11	1	4.070	0.246	0.509	0.125	0.42

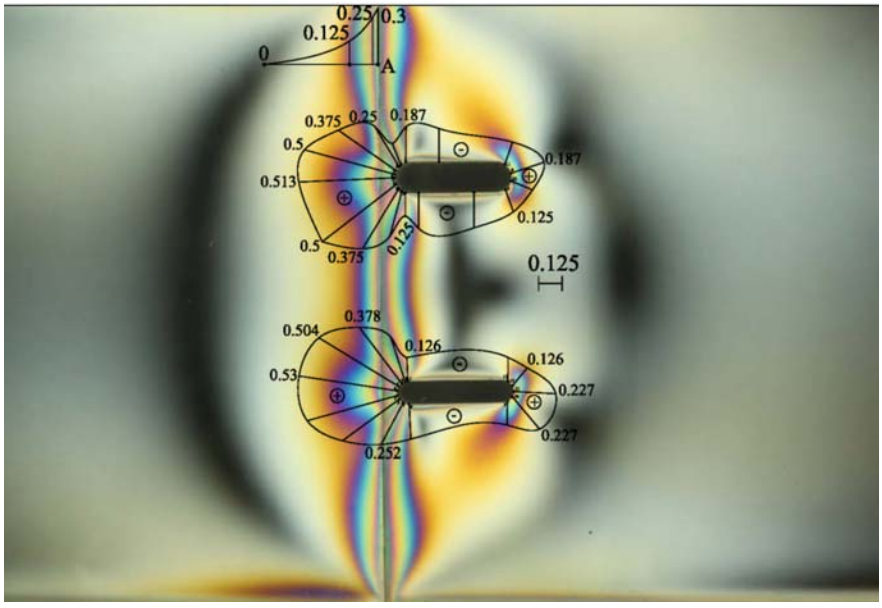
Maksimum gerilme a noktasında oluşmakta ve değeri 0.513 MPa'dır. Kısım 5.2.1'de hesaplandığı üzere birleşim bölgesindeki gerilme 0.3 MPa idi. Netice itibariyle birleşim bölgesine göre 1.71 kat daha büyük bir gerilme ortaya çıkmıştır.

Çizelge 5.2 : 1.5 mm çapındaki oyuk civarında ilgili noktalardaki gerilmeler

No	*m şerit*	*t (mm)*	*m/t*	$\sigma_o^{1.0}$ *(N.mm/şerit)*	σ_m *(MPa)*	*(SCF)*
1	1	4.036	0.248	0.509	0.126	0.42
2	2	4.036	0.496	0.509	0.252	0.84
3	3	4.036	0.743	0.509	0.378	1.26
4	4	4.036	0.991	0.509	0.504	1.68
a	4.2	4.036	1.041	0.509	0.530	1.77
5	4	4.036	0.991	0.509	0.504	1.68
6	3	4.036	0.743	0.509	0.378	1.26
7	2	4.036	0.496	0.509	0.252	0.84
8	1	4.036	0.248	0.509	0.126	0.42
9	1	4.036	0.248	0.509	0.126	0.42
10	1.8	4.036	0.446	0.509	0.227	0.76
11	1.8	4.036	0.446	0.509	0.227	0.76
12	1	4.036	0.248	0.509	0.126	0.42
13	1	4.036	0.248	0.509	0.126	0.42

Maksimum gerilme *a* noktasında oluşmakta ve değeri 0.530 MPa'dır. Ve birleşim bölgesine göre 1.77 kat daha büyük bir gerilme ortaya çıkmıştır.

İncelenen oyuklardaki gerilme diagramları Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekilde üstteki oyuğun genişliği 2 mm alttaki oyuğun genişliği ise 1.5 mm'dir ve değerler MPa olarak verilmiştir.



Şekil 5.9 : 2 mm ve 1.5 mm'lik oyukların termal gerilme dağılımı

Fotoelastik yöntemle bulunan gerilmelerin gerçek konstrüksiyonlardaki gerilmelere çevrilmesi için gerekli formül (3.8) bağıntısında verildiği gibidir. Hatırlanacağı üzere bu formülasyon $\sigma_n = \frac{1-\nu_m}{1-\nu_n}\frac{E_n}{E_m} K\sigma_m$; $K = \frac{\varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{mi}}$ idi.

Örnek olması açısından çelikten yapılmış gerçek basınç kabında ilgili sıcaklık dağılımında $\Delta T = 100\ ^oC$ olduğu durum için termal gerilmeler, modelde bulunmuş gerilmelerin değerleri uygulanarak yukardaki bağıntı yardımıyla, çeliğin ısıl genleşme katsayısının α=12x10^{-6} (1/^{o}C), Poisson oranının 0.3 ve elastisite modülünün E_n=200 GPa olduğunu dikkate alarak hesaplanabilir. 1.5mm genişlikli oyuk için uç noktada 304MPa, 2mm genişlikli oyuk ucu için 294MPa bulunur. Görüldüğü üzere, oyuklar bölgesinde ortaya çıkan termal gerilmelerin değerleri sanayinin geniş olarak kullandığı çeliklerin akma sınırı civarındadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Silindirik basınç kablarında ellipsoidal şeklindeki oyuklar civarında sıcaklığın büyük gradyanla değiştiği durumlarda termal gerilmelerin dağılımı, optik hassas malzemeden yapılmış modelde fototermoelastisite yöntemi ile incelenmiştir.

Sözü edilen termal gerilmelerin incelenmesi için basınç kabının bölgesel modeli tasarlanmıştır. Modelde serbest termal genleşmelerin simulasyonu için gereken yükleme tertibatı tasarlanmış ve yaptırılmıştır.

Amaçlanan sıcaklık değişimi basınç kabının oyuklar bölgesinin zonal modelinde modellendirilmiştir ve model başarılı olarak denenmiştir. Modelde oluşmuş termal gerilme durumu fotoelastisitenin ilgili yöntemleriyle araştırılmıştır.

Yapılan deney sonucunda termal gerilmelerin konsantrasyon oranının 1.5 mm genişliğindeki oyuk için 1.77, 2 mm genişliğindeki oyuk için ise 1.71 olduğu tespit edilmiştir.

Çelikten yapılmış gerçek basınç kabında 100 ^{o}C sıcaklık artımında ilgili bölgelerde termal gerilmelerin 294 MPa ve 304 MPa değerlerine ulaştıkları hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere, oyuklar bölgesinde ortaya çıkan termal gerilmelerin değerleri sanayinin geniş olarak kullandığı çeliklerin akma sınırı civarındadır.

KAYNAKLAR

[1] **Abdulaliyev Z, Ataoglu S, Bulut O, Kayali ES**, Three-dimensional stress state around corrosive cavities on pressure vessels, *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME***,** 132(1), 2010 DOI: 10.1115/1.4000508

[2] **Liebowitz, H.**, 1969, *Fracture: An Advanced Treatise*, *Vol. IV, Engineering Fracture Design,* Academic Press, New York.

[3] **Peterson, R.E.**, 1974, *Stress Concentration Factors*, Wiley, New York.

[4] **Savin, G.N.**, 1961, *The Stress Distribution around Holes*, Pergamon Press, London.

[5] **Broberg K.B.**, 1999, *Cracks and Fracture,* Academic Press, San Diego.

[6] **Cherepanov**, **G.P.**, 1979, *Mechanics of Brittle Fracture*, McGraw-Hill, New York.

[7] **Frocht, M.M.**, 1947, *Photoelasticity*, Wiley, New York.

[8] **Durelli A.J., and Riley W.F.**, 1965, *Introduction to Photomechanics*. Prentice-Hall, N.J.

[9] **Timoshenko S. P., and Goodier J. N.,** 1970, *Theory of Elasticitiy,* McGraw-Hill, New York.

[10] **Ataoğlu Ş. ve diğerleri** , *Basınç Kaplarında Oluşan Çeşitli Geometrili Oyuklar Bölgesinde Üç Boyutlu Sıcaklık Gerilmelerinin Fotoelastisite Yöntemi ile İncelenmesi*. 108M306 Tübitak Projesi 2009.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Murat Dilek

Doğum Yeri ve Tarihi: Elbistan-04/08/1985

Lisans Üniversite: Çukurova Üniversitesi-İnşaat Mühendisliği Bölümü