

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOELASTİK YÖNTEMLE DUVAR PANELLERİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sina SHABAHANG

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Eylül 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOELASTİK YÖNTEMLE DUVAR PANELLERİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sina SHABAHANG
(501131042)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir Çağlayan

Eylül 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501131042 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sina SHABAHANG, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FOTOELASTİK METODU İLE DUVAR PANELLERİN ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir Çağlayan**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Hale Ergün**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge Doran
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 7 Eylül 2018
Savunma Tarihi : 10 Eylül 2018





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmada uygulaması kolay ve sonuçları güvenilir deneysel yöntemlerden fotoelastisite deneyleri ,yayılı yükler etkisindeki duvar panellerin analiz sonuçlari ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı Ansys programı kullanılmıştır.

Çalışmalarım boyunca her zaman desteğini gördüğüm, yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü olanağı sağlayan değerli hocalarım Prof.Dr.Şenol Ataoğlu, Prof. Dr. Ziya ABDULALIYEV, Dr. Öğr. Üyesi Osman Bulut 'a, Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir Çağlayan , Dr. Öğr. Üyesi Hale ERGÜN, 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.

Eylül 2018

Sina Shabahang
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ....	1
2. OPTİK.....	3
2.1 Işığın Davranışı	3
2.2 Polarize Işık	5
2.3 Düzlem Polarizörler	6
3. FOTOELASTİSİTE TEORİSİ.....	11
3.1 Teori Anlatımı	11
3.1.1 Fotoelastisite tarihi	11
3.1.2 Türkiye'ye gelişi	12
3.2 Fotoelastoik Davranış	13
3.3 İki Boyutlu Fotoelastisite	14
3.4 İzokramatik Model	15
3.5 İzokromatik Desenlerin Yorumlanması	14
3.6 Dairesel Polariskop	17
3.7 Ana Gerilmelerin Yönlendirilmesi Dairesel Polariskop	20
3.8 Gerilmelerin Yönleri	21
3.9 Beyaz Işık Aydınlatması	23
3.10 Fraksiyonel Saçak Düzeylerinin Belirlenmesi	24
3.11 Analizör Döndürme	25
3.12 Dengeleme	26
3.13 Saçak Çoğaltma	27
4. FOTOELASTİK VERİLERİN YORUMU	29
4.1 Kalibrasyon	29
4.2 Serbest Sınır Gerilmeler	29
4.3 Gerilme Yörüngeleri	31
4.4 İç Noktalarında Gerilme Çözümü	31
4.5 İki Boyutlu Modeller	33
4.6 Fototelastik Kaplama Yöntemi	34
5. DUVAR PANEL DENEYİ	41
5.1 Deney Hazırlıkları	41
5.2 Referans Numune	42
5.3 İkinci Referans Numune	53

5.4 Daire Delikli Numune	61
5.5 Oyuklu Numune	70
5.6 Dört Nokta Çekme Deneyi	78
5.7 Ansys Modeli.....	79
5.7.1 Referans numune.....	79
5.7.2 Verilerin analizi referans numune	82
5.7.3 Daire delikli numune.....	87
5.7.4 Verilerin analizi delikli numune.....	89
5.7.5 Oyuklu numune	94
5.7.6 Verilerin analizi oyuklu numune (Y = 10).....	96
5.7.7 Verilerin analizi oyuklu numune (Y = 25).....	101
5.7.8 Verilerin analizi oyuklu numune (Y = 80).....	105
5.8 Üç Deneyde X Doğrultudaki Gerilmeler (Sx).....	110
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	139

KISALTMALAR

P. Açısı : Polarizör Açısı



SEMBOLLER

ϵ	: Birim şekil değıştirme
ϵ_0	: Ön birim şekil değıştirme
σ	: Gerilme
σ_2	: Üst lifte oluşan gerilme
σ_1	: Sağ lifte oluşan gerilme
σ_0	: İlk öngerilme değeri
P	: Kuvvet
W	: Yayılı yük
E	: Elastisite modülü
M	: Moment
I	: Atalet momenti
γ	: Artık öngerilme faktörü
ν	: Asal eksenlerdeki dalga hızı
λ	: Dalga boyu
T	: Peryot
f	: Frekans
ω	: Açısal frekans
Δ	: Faz farkı
h	: Plak kalınlığı
ν	: Poisson oranı
f	: Optik hassasiyet katsayısı
R	: Yarıçap
N	: İzokromatik şerit sayısı
ν	: Poisson oranı
A	: Dalganın genliği
z	: İlerleme doğrultusu üzerindeki konumu
t	: Zaman
c	: Dalganın ilerleme hızı
n	: Işığın havadaki kırılma indisi
f	: Optik katsayısı
t	: Model kalınlığı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Fringe düzeyinde karşılaştırma.	38
Çizelge 5.1 : Yüklenmiş model, Referans numune.	46
Çizelge 5.2 : Yüklenmiş model, İkinci Referans Numune.	53
Çizelge 5.3 : Yüklenmiş model, Delikli numune.	62
Çizelge 5.4 : Yüklenmiş model, Oyuklu numune.	71
Çizelge 5.5 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 10$ mm, Referans numune.	83
Çizelge 5.6 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 10$ mm, Delikli numune.	90
Çizelge 5.7 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 10$ mm, Oyuklu numune.	97
Çizelge 5.8 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 25$ mm, Oyuklu numune.	102
Çizelge 5.9 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 80$ mm, Oyuklu numune.	106
Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 10$ mm, Üç numune.	111



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yayılan ışığın ilerleme doğrultusu.	3
Şekil 2.2 : Işık vektörünün genliğinin ilerleme doğrultusuna göre fonksiyonu.	4
Şekil 2.3 : Düzlem polarizasyon.	5
Şekil 2.4 : Dairesel polarizasyon.	5
Şekil 2.5 : Eliptik polarizasyon.	6
Şekil 2.6 : Polarizör.	7
Şekil 2.7 : Polarizörden geçen ışığın fotoelastik plakta çift kırılması.	8
Şekil 3.1 : Düzlem-polarize ışık dalgalarının çift.	13
Şekil 3.2 : İngiliz anahtarı için fotoelastik model.	14
Şekil 3.3 : Gerilme durumu ...	15
Şekil 3.4 : İzokromatik desen oluşturulması için Artan yükler.	16
Şekil 3.5 : Ortak düzlem dalga bileşenlerin iletimi.	18
Şekil 3.6 : Objektif tipi dairesel polariskop.	18
Şekil 3.7 : Polariskopta ışık dalgalarının dairesel olarak polarizasyonu.	19
Şekil 3.8 : Kiriş kırıntılarının iki boyutlu analizi için izokromatik modeller.	19
Şekil 3.9 : Yüzey polariskopundaki ışık dalgalarının polarizasyonu.	21
Şekil 3.10 : Merkezi yüklemeli kemer modelinde izoklinik fringleri.	22
Şekil 3.11 : Analizör dönüşümü ile fraksiyonel fring serisi.	25
Şekil 3.12 : Karşılıklı gecikmenin tazminat ile geçersiz kılınması.	26
Şekil 3.13 : fotoelastik saçak çoğaltımı ...	27
Şekil 3.14 : Saçak Çoğaltma için optik sistem ...	28
Şekil 4.1 : Serbest sınır gerilmeler.	30
Şekil 4.2 : Fotoelastik kaplama gözlemleri için yansıma polariskop ayarı.	35
Şekil 4.3 : Fotoelastik kaplama yöntemi kullanılarak alüminyum.	36
Şekil 5.1 : Yükleme aparatı için kullanılan aletler ...	41
Şekil 5.2 : Yükleme aparatı.	42
Şekil 5.3 : Modelin boyutları mm olarak, Referans numune.	43
Şekil 5.4 : Cnc cihazıyla kesim, Referans numune.	43
Şekil 5.5 : Model, Referans numune ...	44
Şekil 5.6 : Üzerinde yük olmayan model, Referans numune.	44
Şekil 5.7 : Yüklemeye hazır düzenek, Referans numune.	45
Şekil 5.8 : Polariskop ve yükleme düzeneği, Referans numune.	45
Şekil 5.9 : Cnc cihazında delik açma işlemleri, Delikli numune ...	61
Şekil 5.10 : Üçüncü deney modelin boyutları mm olarak, Delikli numune ...	62
Şekil 5.11 : Oyuklu numune boyutları mm olarak.	70
Şekil 5.12 : Dört nokta çekme mekanizisi.	78
Şekil 5.13 : Y=20mm , N=3.	78
Şekil 5.14 : Kırmızı işaretli bölüm, Referans numune.	79
Şekil 5.15 : Sx, Referans numune.	79

Şekil 5.16 : Sy, Referans numune.	80
Şekil 5.17 : Sxy, Referans numune.	81
Şekil 5.18 : Şekil değiştirmiş hali, Referans numune.	81
Şekil 5.19 : Y = 10 mm, X = 0-200 mm, kırmızı çizgi, Referans numune.	82
Şekil 5.20 : $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı, Referans numune.	86
Şekil 5.21 : Kırmızı işaretli bölümde eleman ağı arttırılmıştır, Delikli numune.	87
Şekil 5.22 : Sx, Delikli numune.	87
Şekil 5.23 : Sy, Delikli numune.	88
Şekil 5.24 : Sxy, Delikli numune.	88
Şekil 5.25 : Şekil değiştirmiş hali, Delikli numune.	89
Şekil 5.26 : Y = 10 mm, X = 0-200 mm, Kırmızı çizgi, Delikli numune.	89
Şekil 5.27 : $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı, Delikli numune.	93
Şekil 5.28 : Kırmızı işaretli bölüm, Oyuklu numune. . .	94
Şekil 5.29 : Sx, Oyuklu numune.	94
Şekil 5.30 : Sy, Oyuklu numune.	95
Şekil 5.31 : Sxy, Oyuklu numune.	95
Şekil 5.32 : Modelin şekil değiştirmiş hali, Oyuklu numune.	96
Şekil 5.33 : Noktaların arasındaki mesafe: 5mm, Oyuklu numune.	96
Şekil 5.34 : $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.518$ diyagramı, Oyuklu numune.	100
Şekil 5.35 : X = 35mm, Y = 25mm noktası, Oyuklu numune.	101
Şekil 5.36 : Y = 25 mm , X = 0-200 mm çizgisi, Oyuklu numune.	101
Şekil 5.37 : X = 35mm, Y = 25mm noktası, Oyuklu numune.	105
Şekil 5.38 : Y = 80 mm, X = 0-90 mm çizgisi, Oyuklu numune.	105
Şekil 5.39 : X = 50 mm, Y = 80 mm noktası, Oyuklu numune.	108
Şekil 5.40 : Üç deneyin $(\sigma_1 - \sigma_2)/(W*9.81)$ diyagramı. . .	109
Şekil 5.41 : Üç deneyin Sx/(W*9.81) diyagramı, Y = 10 mm çizgisi üzerinde.	133

FOTOELASTİK METODU İLE DUVAR PANELLER ANALİZİ

ÖZET

Fotoelastisite, kuvvet altında cisimlerde oluşan gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeleri saptamak amacıyla kullanılan ve mekanikte, dış etkiler sonucunda yapıların içinde oluşan gerilmelerin belirlenmesi olanağını sağlayan optik deneysel bir yöntemdir. Gerilme analizi yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Modelin tümünde oluşan gerilmelerin doğrudan doğruya gözlenebilmesini mümkün kılar.

Fotoelastisite, matematiksel metodların uygulanma güçlüğü gösterdiği durumlarda baskı ve gerilme analizleri için kullanılır. Bu yöntemin esasını, 1816'da David Brewster'in basınç altında bırakılarak polarize ışık ile incelenen bir cam parçasında gerilme nedeniyle parlak renkli şekillerin görülmesi hakkındaki buluşu oluşturur. Konunun teorisi Neumann, Maxwell ve Wertheim tarafından geliştirilmiştir.

Fotoelastisite ile verilen yükler altında yapının en çok zorlanan noktaları gözle kolayca görülebileceği gibi nümerik sonuçlar da elde edilebilir. Birçok basit taşıyıcı elemanlar için elemanter mukavemet bilgilerini kullanarak gerilmeler bulunabilir. Daha karmaşık elemanlar ve dış yükler etkisinde elemanter mukavemet bilgisi yetersiz kalabilir. Elastisite teorisi ile problemlerin çözümü yapılabilir. Ancak elastisite teorisi her zaman, özellikle karmaşık sınır şartları halinde matematik güçlük nedeni ile sonuç vermez. Halbuki fabrikada imalat yapan bir mühendis, ya da taşıyıcı sistemi planlayan kişi çabuk, güvenilir ve ekonomik bir yöntemle sonuca gitmek zorundadır. Fotoelastisite kullanılarak dış yükler altında yapının davranışı gözle görüldüğü için taşıyıcı sistem uygun biçimde değiştirilerek, yapının çalışma bütünlüğü sağlanabilir.

Fotoelastisite yeni bir konu değildir. 1816 yılında Brewster in gerilme altında, cam plağı çift kırılma özelliği gösterdiğini farketmesi ile başlar. Fakat olayın teorisi daha sonra 1841 ve 1853 yıllarında ayrı ayrı Neumann ve Maxwell tarafından kuruldu.

Fotoelastik yöntem, bazı şeffaf malzemelerin, özellikle bazı plastiklerin kendine mahsus olan bir özelliğine dayanmaktadır. Bazı yapısal parçaları fotoelastik bir malzemeden yapılmış bir model düşünün. Modele basınç uygulandığında ve bir ışık ışını ana gerilmelerin bir doğrultusunda girdiğinde dikkat çekici bir şey olur. Işık, her biri titreşim düzlemi (kutuplaşma düzlemi) ile diğer ana düzlemlerden (kayma gerilmenin sıfır olduğu düzlemler) birine paralel olan iki dalga bileşenine ayrılmaktadır. Ayrıca, maddedeki geriye kalan iki ana gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak ışık bu iki yol boyunca farklı hızlarla ilerlemektedir.

Dairesel bir polariskopta bir düzlem-gerilme model. Modele harici kuvvetler veya yükler uygulandığında görüntüleme ekranında koyu ve açık bant modelleri oluşur ve bu bantların sayısı modele uygulanan dış kuvvetler ile orantılı olarak artar. Model boyunca N değerlerini sağlayan bu desenler uygun bir şekilde izokromatik desenler adını alır.



WALL PANEL'S ANALYSIS USING PHOTOELASTICITY

SUMMARY

Photoelasticity is an experimental technique for stress and strain analysis that is particularly useful for members having complicated geometry, complicated loading conditions, or both. For such cases, analytical methods (that is, strictly mathematical methods) may be cumbersome or impossible, and analysis by an experimental approach maybe more appropriate. While the virtues of experimental solution of static, elastic, two dimensional problems are now largely overshadowed by analytical methods, problems involving three dimensional geometry, multiple component assemblies, dynamic loading and inelastic material behavior are usually more amenable to experimental analysis. References, figures and tables must not be given in Summary.

The name photoelasticity reflects the nature of this experimental method: photo implies the use of light rays and optical techniques, while elasticity depicts the study of stresses and deformations in elastic bodies. Through the photoelastic-coating technique, its domain has extended to inelastic bodies. It is recommended that the summary in English is placed before the summary in Turkish.

Photoelastic analysis is widely used for problems in which stress or strain information is required for extended regions of the structure. It provides quantitative evidence of highly stressed areas and peak stresses at surface and interior points of the structure and often equally important, it discerns areas of low stress level where structural material is utilized inefficiently.

This thesis is intended to introduce the basic concepts to emphasize those elements that are fundamental to the photoelastic method. The details involving characteristics of specific photoelastic materials their formulation, optical and mechanical properties , machining techniques, etc. and the details involved in the use of specialized auxiliary instruments and accessories are not included.

The photoelastic method is based upon a unique property of some transparent materials, in particular, certain plastics. Consider a model of some structural part made from a photoelastic material. When the model is stressed and a ray of light enters along one of the directions of principal stress, a remarkable thing happens. The light is divided into two component waves, each with its plane of vibration (plane of polarization) parallel to one of the remaining two principal planes (planes on which shear stress is zero). Furthermore, the light travels along these two paths with different velocities, which depend upon the magnitudes of the remaining two principal stresses in the material.

The foregoing is a rather general description of the formation of photoelastic patterns. It applies equally well to two-dimensional and three-dimensional photoelasticity and to the method of photoelastic coatings. Now, let us restrict the

discussion to plane-stress systems, so that the basis of photoelasticity can be developed without needless complications. A plane-stress problem is approached when the thickness (lateral dimension) of the prototype and the model is small in relation to dimensions in the plane, and the applied forces act in the plane at midthickness. For such a system, we are concerned with stresses acting parallel to the plane of the model only, for all other stress components are zero.

A pattern of dark and light bands forms in the viewing screen when external forces or loads are applied to the model, and the number of these bands increases in proportion to the external forces. These patterns, which provide the value of N throughout the model, are appropriately called isochromatic patterns.

The formation of the photoelastic pattern has been described as a case of optical interference. Each ray that enters the model is divided into two components. and after emerging from the model they combine to yield either constructive or destructive interference. The relation between fringe order and light intensity is given by the equation of two-beam interference.

The polariscope components can be divided into two categories; elements that direct and focus the light rays, and elements that control the wavelength and polarization of the waves. The two field lenses and the camera lens are in the first category. The first field lens is located such that the light source lies at its focal point; thus, a parallel or collimated beam of light issues from the field lens into the model zone. The second field lens converges this beam so that all the light enters the camera lens. The camera, in turn, is focused to project an image of the model onto the camera screen or photographic film.

In the second category, a color filter is usually employed to isolate a small band of wavelengths by absorbing all colors except that which is desired. The functions of the polarizing elements, polarizer, quarter-wave plates and analyzer are shown in. The polarizer divides the incident light waves into vertical and horizontal components. It absorbs all the vertical components and transmits the remaining plane-polarized light (horizontal).

In general, the directions of principal stresses vary continuously from point to point in a photoelastic model. Therefore, occur simultaneously at different regions in the model. Again, since changes in stresses and stress directions occur in a continuous manner in a body, points at which the principal stresses have a common direction lie along a continuous curve. For any orientation of the model, the focus of points at which $\phi = 0^\circ$ forms a continuous black (extinction) curve, called an isoclinic, or an isoclinic fringe. Elsewhere, for values of ϕ not equal to zero, the isochromatic pattern is present.

Isoclinics are developed in a plane polariscope, which is merely a circular polariscope with the quarter-wave plates removed; the axes of polarization for polarizer and analyzer are crossed.

With the concepts of model photoelasticity now well in hand, consideration of the photoelastic-coating method is a simple transition. In this case, the photoelastic material is applied as a thin layer on the surface of an actual structural part. The part is made uniformly reflective usually by use of a reflective paint or reflective cement so that light traverses the coating and reflects back for a second traversal of the photoelastic material. The part may be loaded in situ in tests of the prototype assembly. This method is particularly useful for determining stresses on free

(unloaded) surfaces of three-dimensional bodies, where the prototype is already available.

An important basic distinction exists between the photoelastic-coating method and model photoelasticity. In the coating method, the actual structural part is analyzed, usually under actual working forces. In contrast, non-metallic models and simulated loading is required in model photoelasticity. Furthermore, the coating method is not restricted to elastic deformation. Correctly chosen coating materials exhibit linear strain-birefringence behavior, regardless of the magnitude and nature of the strains developed in the structure.

For problems it is important to determine the complete state of stress at interior points. The complete state of stress is determined by three quantities: σ_1 , σ_2 and ϕ . However, the photoelastic methods discussed above provide only two quantities, namely $(\sigma_1 - \sigma_2)$ and ϕ . Thus, the isochromatic pattern and the isoclinic curves are not sufficient, by themselves, to provide the complete stress solution for interior points. Supplementary information must be provided, and this additional information may take various forms.



1. GİRİŞ

19. yüzyılda deneysel gerilme analizi yöntemleri içinde yer alan fotoelastisite yöntemi 20. yüzyılda Prof. Dr. Mustafa İnan hocamızın önerileri ile İstanbul Teknik Üniversitesi’de çalışmaya başlanmıştır. Böylece ülkemizde mekanikteki gerilme analizi problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlamıştır.

Elastisite problemlerinin çözümlerinde kullanılan yöntemlerden biri de sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı hazır programlardan biri olan ansys programı bu çalışmada teorik analizlerde yer almıştır.

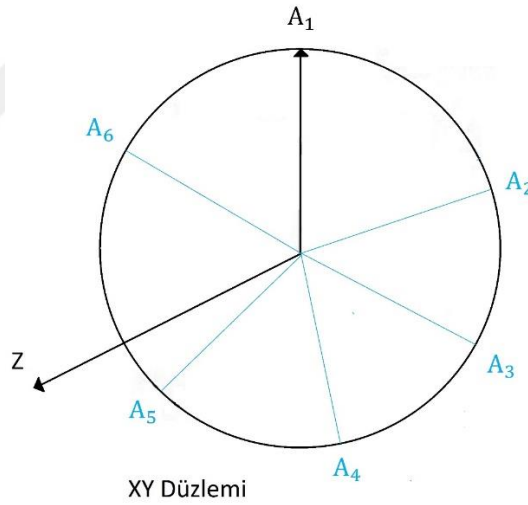
Duvar panelin düzlem içi yükleme durumunda teorik çözümü Ansys ile yapılmış, fotoelastisite çözümü ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmaların 2. bölümünde fotoelastisitenin mekanik problemlerinde deneysel yöntem olarak kullanımına araç olan optik kanunları açıklanmaktadır. 3. Bölümde fotoelastisite hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. Çalışmanın 4. Bölümünde fotoelastik verilerin nasıl yorumlanacağı ve gerilme değerlerinin nasıl bulunduğü anlatılmıştır. 5. Bölümde duvar panel deneyleri açıklanmış deneylerden ve Ansys programında modellenmiş numunelerin gerilme analizleri verilmiştir. Son bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmektedir.

2. OPTİK

2.1 Işığın Davranışı

Işığın Davranışı Newton tarafından açıklanmış olan Corpuscular Teori, son derece küçük parçacıklardan oluşan ışığın her yöne yayıldığını iddia eder. Işığın fotoelastisitedeki etkisinin açıklanması, Maxwell tarafından elde edilen elektromagnetik ışık teorisinin temel denklemleriyle yapılmaktadır. Bu teoride ışığı, yayılma doğrultusuna dik ışık vektörlerinin oluşturduğu söylenir. Bir elektrik ampülünden yayılan adi ışık tanımlanırken sınırlandırılmaz. Yayılan bu ışık ilerleme doğrultusuna dik düzlemde keyfi titreşimler yapar (Şekil 2.1) (Frocht, 1941).



Şekil 2.1 : Yayılan ışığın ilerleme doğrultusu.

Adi ışık çeşitli frekanslarda birçok yönde rastgele titreşen birçok ışık vektöründen ibarettir. Işık ilerleme doğrultusuna dik bir titreşim olarak alınıp A vektörü ile gösterilebilir. Eğer bu titreşimler düzenli hale getirilebilirse düzenli haldeki ışığa polarize ışık denir. Öyle bir süzgeç levha varsayalım ki süzgeçten geçen ışık tek doğrultuda titreşim yapabilsin. İşte bu süzgece polarizör adı verilir. Işığın tek doğrultudaki dalga hareketi için 2.1 ifadesi yazılabilir.

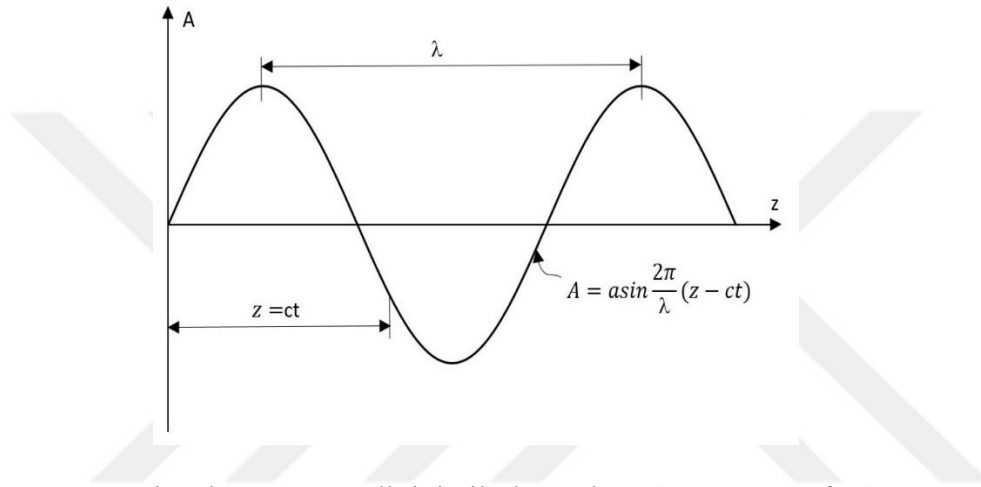
$$A = f (z - ct) + g (z + ct) \quad (2.1)$$

Burada A dalganın genliği, z, ilerleme doğrultusu üzerindeki konumu, t, zaman ve c ise dalganın ilerleme hızıdır. Basit bir ifade ile belirtmek gerekirse fotoelastik etki, ışığın z eksenini yönünde sinüsoidal dalga hareketinin pozitif bileşeni alınarak elde edilebilir. Böylece 2.1 ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A = f (z - ct) \quad (2.2)$$

$$A = \alpha \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad (2.3)$$

Işık vektörünün grafik olarak gösterimi Şekil 1.3 te verilmektedir:



Şekil 2.2 : Işık vektörünün genliğinin ilerleme doğrultusuna göre fonksiyonu.

Dalga hareketinin iki maksimum (pik) nokta arasındaki hareketi için geçen süre periyot T olarak adlandırılır, λ dalga boyunun, ışığın ilerleme hızına oranı olarak ifade edilebilir.

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (2.4)$$

Frekans periyodun tersi olup birim zamanda dalga hareketinin yaptığı salınımların sayısını ifade etmektedir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

Gözün görebildiği ışığın rengi, ışığın frekansı ile belirlenir. Gözle görebildiğimiz tayf renkleri koyu kırmızı ($f = 390 \times 10^{12}$ cps) ve koyu mor ($f = 770 \times 10^{12}$ cps) arasında değişir. Fotoelastisite incelemelerinin çoğunda, tayfların gözle görülebilir olması oranında ışık kullanılmasına rağmen fotoelastisite prensipleri, radiant enerjinin kızıl ötesi ve mor ötesi bölgelerinde geçerlidir.

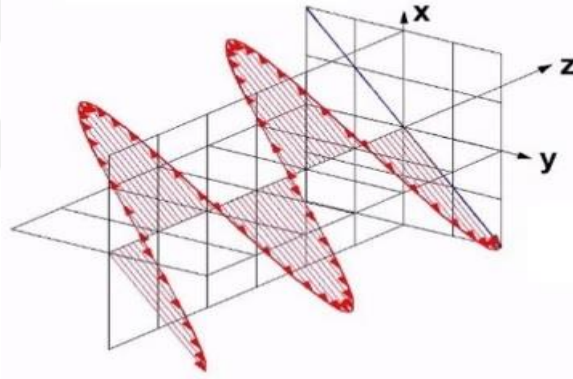
Keyfi olarak titreşen ışık vektörleri aynı frekansa sahip olduklarında yayılan ışık frekansa bağlı olarak tek bir renktir ve bu durumdaki ışığa monokromatik ışık denir. Işık vektörleri farklı frekansa sahipse her renk birbirine karışacağından ışık beyaz renktir.

2.2 Polarize Işık

Bilinen adı ışık, yayılma doğrultusuna dik dalgalar halinde, keyfi olarak titreşir. Eğer ışığın tek doğrultuda titreşim yapması sağlanırsa bu olaya polarizasyon, bu durumda elde edilen ışığa polarize ışık denir.

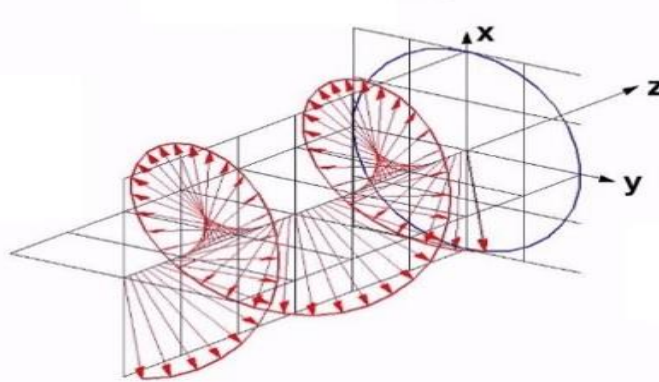
Fotoelastisitede gerilme analizinde kullanılan üç tip polarize ışık vardır:

- 1) Lineer veya düzlem polarize ışık; polarizasyon düzlemi olarak bilinen tek bir düzlemde titreşimi sınırlandırılmış olan ışıktır (Şekil 2.3).



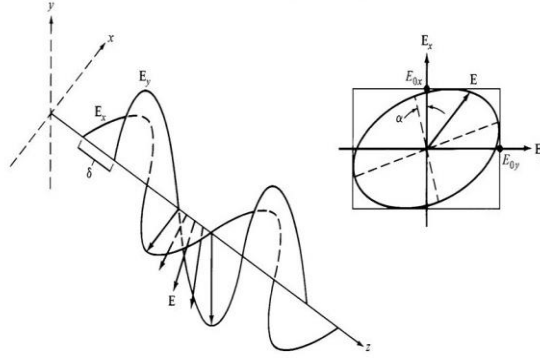
Şekil 2.3 : Düzlem polarizasyon (Ssinath ve Froch, 1963).

- 2) Dairesel polarize ışık; titreşen ışık vektörü bir dairesel helis tanımlarsa bu tip polarize ışığa dairesel polarize ışık denir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Dairesel polarizasyon (Ssinath ve Froch, 1963).

- 3) Eliptik polarize ışık; polarize olmuş ışığın eliptik helis tanımlamasına karşı gelir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Eliptik polarizasyon (Ssinath ve Froch, 1963) .

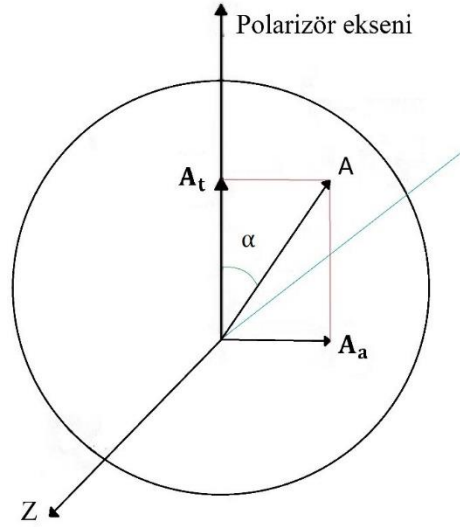
Aslında eliptik polarize ışık, polarize ışığın en genel halini tanımlar. Elipsin büyük ve küçük eksen uzunlukları a ve b diye düşünülürse; $a = 0$ olması polarizasyon düzleminin yz düzlemi olduğu, $b = 0$ olması polarizasyon düzleminin xz düzlemi olduğu düzlem polarize ışığı tanımlar. $a = b$ olması ise dairesel polarize ışığa karşı gelir.

Düzlem polarize ışık düzlem polarizer diye bilinen tek bir optik elemanla, dairesel ve eliptik polarize ışıklar ise iki optik elemanla üretilir.

Işık vektörleri ilerleme doğrultusuna dik yönde titreşim (vibrasyon) hareketi yaparlar. XY düzleminde yapılan bu salınım hareketi arasında her bir ışık vektörünün frekansı aynı ise tek bir renk görünür. Eğer salınım hareketi yapan vektörler (A_1, A_2, A_3 , vs.) farklı frekanslara sahipse göz ile algıladığımız, farklı renklerin karışımı olan beyaz ışıktır (Şekil 2.1). Polarize ışıkta elektromanyetik dalga hareketinin titreşimleri ilerleme doğrultusuna dik olan düzlemde sadece belli bir ekseninde salınım yapar (Şekil 2.6). Polaroid levha olarak da adlandırılan iki optik levhayı geçirme eksenleri birbirlerine dik olacak şekilde ışık kaynağının önüne koyarsak ışık kaynağına bakan kimse hiç ışık görmez. Birinci levhanın polarizasyon eksenine dik şekilde yerleştirilen ikinci polaroid levhaya analizör adı verilmektedir.

2.3 Düzlem Polarizörler

Polarizasyon eksenine dik olan ışık vektörünü geçirmeyen optik elemanlardır, Işığın polarizasyonunu sağlayan polarizörler sentetik ve kompozit olan optik birer levhadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 : Polarizör.

Z doğrultusunda hareket eden ışık vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} c t \quad (2.6)$$

$$A = a \sin 2\pi f t = a \sin \omega t \quad (2.7)$$

Burada $\omega=2\pi f$ açısal frekansı olup kısaca ω ile ifade edilmektedir. Z ekseninde ilerleyen bir ışık ilerleme doğrultusuna dik yönde bir polarizör ile karşılaştığında ışığın genliği 2.8 ve 2.9 ile ifade edilir.

$$A_a = a \sin \omega t \sin \alpha \quad (2.8)$$

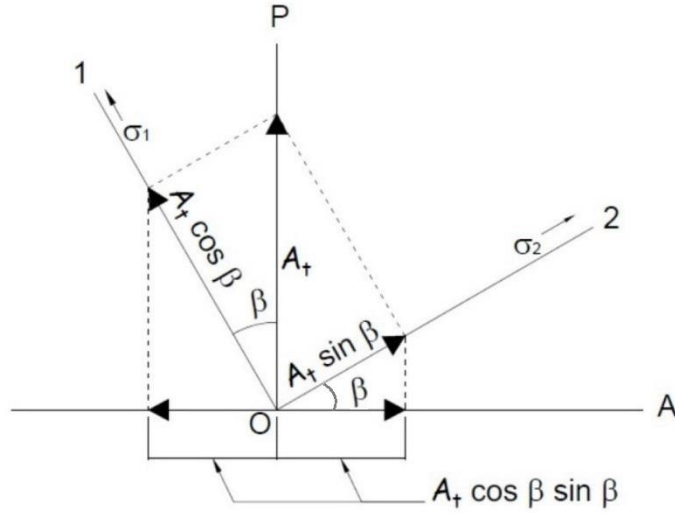
$$A_t = a \sin \omega t \cos \alpha \quad (2.9)$$

Burada α ışık vektörünün salınım yönü ile polarizasyon eksenini arasındaki açıdır (Şekil 2.7). Belli bazı malzemelerden yapılmış plaklar ışık vektörünü birbirlerine dik iki eksende kırılmasını sağlarlar. Bu özellik çift kırılma olarak adlandırılmaktadır. Polarize ışık vektörü çift kırılma özelliği gösteren bir plak ile karşılaştığında birbirlerine dik (asal eksenler) olan bileşenleri 2.10 ve 2.11 ile ifade edilir (Şekil 2.8).

$$A_{a1} = a \cos \alpha \sin \omega t \cos \beta = k \sin \omega t \cos \beta \quad (2.10)$$

$$A_{a2} = a \cos \alpha \sin \omega t \sin \beta = k \sin \omega t \sin \beta \quad (2.11)$$

burada $k = a \cos \alpha$ dır.



Şekil 2.7 : Polarizörden geçen ışığın fotoelastik plakta çiftkırılması, P, polarizasyon eksenini, 1 ve 2, asal doğrultular.

Çift kırılma özelliği gösteren plakdan geçen birbirlerine dik iki ışık vektörü plak kalınlığından geçerken birbirlerinden farklı hızlarla hareket ederler (c_1 ve c_2). Bu hız farkı ışıkların plaktan farklı zamanlarda çıkmasına neden olur. İki bileşenin arasında oluşan bu mesafe farkı (faz farkı)'nın bulunması için her bir vektörün gecikmesi ayrı ayrı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta_1 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n) \quad (2.12)$$

$$\Delta_2 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - n) \quad (2.13)$$

burada n ışığın havadaki kırılma indisidir. Faz farkı Δ açısal faz farkını veya çift kırılan ışığın plaktan çıkarkenki mesafe farkını vermektedir. Bu durumda;

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (2.14)$$

olur. Böylece faz farkı olan Δ , çift kırılma özelliği gösteren levhanın kalınlığına (h), ışığın dalga boyuna (λ), ve dalga plağı olarak adlandırılan plağın kırılma indisi özelliklerine ($n_1 - n_2$) bağlıdır. Eğer levha ışığın çıkıştaki faz farkının $\frac{\pi}{2}$ olmasını sağlayacak şekilde dizayn edilirse buna çeyrek dalga plağı, π ve 2π olduğu durumlarda ise sırası ile yarım ve tam dalga plağı olarak adlandırılmaktadır. Plaktan ayrılırken Δ kadar gecikme yapan ışık bileşenleri için 2.15 ve 2.16 ifadeleri yazılabilir (Drucker, 1948).

$$A'_{t1} = k \cos\beta \sin(\omega t + \Delta) \quad (2.15)$$

$$A'_{t2} = k \sin\beta \sin\omega t \quad (2.16)$$

Bu iki bileşenden oluşan dalganın genliği için 2.17 ifadesi yazılabilir.

$$A'_{t1} = \sqrt{A'^2_{t1} + A'^2_{t2}} = k \sqrt{\sin^2(\omega t + \Delta) \cos^2\beta + \sin^2\omega t \sin^2\beta} \quad (2.17)$$

Ayrıca çift kırılma özelliği gösteren plakta ayrılan bileşenlerden hızlı olanı 1 ekseninde ise, ışığın plaktan çıkarken 1 eksenine ile yaptığı açı da γ olur ve 2.18 ile ifade edilebilir.

$$\tan\gamma = \frac{A'_{t2}}{A'_{t1}} = \frac{\sin\omega t}{\sin(\omega t + \Delta)} \tan\beta \quad (2.18)$$

Elde edilen ifadelerden anlaşıldığı üzere hem dalganın genliği hem de levhadan çıkarken dönme açısı dalga plağı ile kontrol edilebilir. Bu durumda kontrol parametreleri faz farkı olan Δ ve yönelim açısı olan β olarak belirlenebilir. Bu iki kontrol parametrelerinin varyasyonları ile düzlem, dairesel ve eliptik polariskoplar elde edilir.

Eğer β açısı 0 olup Δ serbest kalacak şekilde dalga plakları tasarlanırsa 2.19 ile verilen ifadeler elde edilir.

$$A'_t = \frac{\sqrt{2}k}{2} \sqrt{\sin^2\omega t + \cos^2\omega t} = \frac{\sqrt{2}}{2} k \quad (2.19)$$

$$\tan\gamma = \tan\omega t \quad \gamma = \omega t \quad (2.20)$$

Bu durumda genlik ve açı zamanla değiştiğinden dalga hareketi ilerleme doğrultusunda eliptik bir helisel çizerek yayılır. Bu duruma uygun dizayn edilen polariskoplar eliptikbolariskop olarak adlandırılır. Dairesel ve düzlem polariskoplar eliptik polariskopların özel durumlarıdır. Fotoelastisitede en çok kullanılan polariskop çeşidi ise dairesel polariskoptur.

Gerilmeye maruz kalmış çift kırılma özelliği gösteren bir plak optik anizotrop özelliği ile dalga plağı gibi hareket eder. Polarize olan bir ışık vektörü gerilmeli bir plaktan geçerken faz farkına uğrayarak bileşenlerine ayrılır.

$$n_1 - n_2 = (c_1 - c_2) (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.21)$$

$$n_1 - n_2 = \frac{\lambda\Delta}{2\pi h} \quad (2.22)$$

$$\Delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (c_1 - c_2) (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.23)$$

Faz farkını ifade eden 2.23 ifadesinde $c_2 - c_1$ yerine c yazdığımızda görelî gecikme Δ için,

$$\Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.24)$$

yazılabilir. 2.24 gerilme-optik kanunu olarak bilinmektedir. Görelî gecikme olan Δ asal gerilmelerin farkı olan $\sigma_1 - \sigma_2$ ve plak kalınlığı olan h ile doğrusal orantılı, dalga boyu olan λ ile ters orantılı olarak değişmektedir. Burada c , çift kırılma özelliği gösteren fotoelastik malzemenin bir özelliğidir. Denklemden $N = \frac{\Delta}{2\pi}$ ve optik hassasiyet katsayısı olan $f_\sigma = \frac{\lambda}{c}$ ifadeleri yazıldığında asal gerilme farkı için fotoelastik gerilme analizlerinde kullanılan 2.25 denklemi elde edilir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{t} f_\sigma \quad (2.25)$$

Burada N görelî gecikmeyi temsil etmekle beraber şerit sayısını, f_σ optik hassasiyet katsayısını ve t ise analiz yapılan fotoelastik modelin kalınlığını temsil etmektedir. Kısaca açıklamak gerekirse birbirlerine dik yönde titreşen iki ışık vektörü analizörden çıkarken oluşturdukları faz farkının büyüklüğüne göre şeritleri oluştururlar. Faz farkı renklerin dalga boylarının tam katı kadar olduklarında izoklin olarak adlandırılan renk demetinin belirli noktalarında parlaklığı değiştirirler. Her rengin dalga boyuna göre bu durum asal gerilme farklarının şiddeti ölçüsünde yüklü numunenin noktalarında farklı renklerle belirir. Fotoelastisite yöntemi her bir noktada elde edilen gerilme durumlarının ölçülmesine yukarıda bahsedilen mekanizmaya dayanarak imkan verir. Bu bakımdan fotoelastisite yöntemi diğer deneysel yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır.

3. FOTOELASTİSİTE TEORİSİ

3.1 Teori Anlatımı

Fotoelastisite, kuvvet altında cisimlerde oluşan gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeleri saptamak amacıyla kullanılan ve mekanik'te, dış etkiler sonucunda yapıların içinde oluşan gerilmelerin belirlenmesi olanağını sağlayan optik deneysel bir yöntemdir. Gerilme analizi yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntem budur. Modelin tümünde oluşan gerilmelerin doğrudan doğruya gözlenebilmesini mümkün kılar.

Fotoelastisite, matematiksel metodların uygulanma güçlüğü gösterdiği durumlarda baskı ve gerilme analizleri için kullanılır. Bu yöntemin esasını, 1816'da David Brewster'ın basınç altında bırakılarak polarize ışık ile incelenen bir cam parçasında gerilme nedeniyle parlak renkli şekillerin görülmesi hakkındaki buluşu oluşturur. Konunun teorisi Neumann, Maxwell ve Wertheim tarafından geliştirilmiştir.

Fotoelastisite ile verilen yükler altında yapının en çok zorlanan noktaları gözle kolayca görülebileceği gibi nümerik sonuçlar da elde edilebilir. Birçok basit taşıyıcı elemanlar için elemanter mukavemet bilgilerini kullanarak gerilmeler bulunabilir. Dana karmaşık elemanlar ve dış yükler aldığımız zaman elemanter mukavemet bilgisi yetersiz kalacaktır. O zaman matematik elastisite teorisi ile problemlerin çözümü yapılabilir. Ancak elastisite teorisi her zaman, özellikle karmaşık sınır şartları halinde matematik güçlük nedeni ile kolayca sonuç vermez. Pratikte mesela fabrikada imalât yapan bir mühendis, ya da taşıyıcı sistemi planlayan kişi çabuk, güvenilir ve ekonomik bir yöntemle sonuca gitmek zorundadır. Fotoelastisite model yapının kullanılarak dış yükler altındaki davranışı gözlemlendiğinde, gerilme yığılmalar kolaylıkla belirlenebilir.

3.1.1 Fotoelastisite tarihi

Fotoelastisite yeni bir konu değildir. 1816 yılında Brewster in gerilme altında, cam plağı çift kırılma özelliği gösterdiğini farketmesi ile başlar. Fakat olayın teorisi daha sonra 1841 ve 1853 yıllarında ayrı ayrı Neumann ve Maxwell tarafından kuruldu.

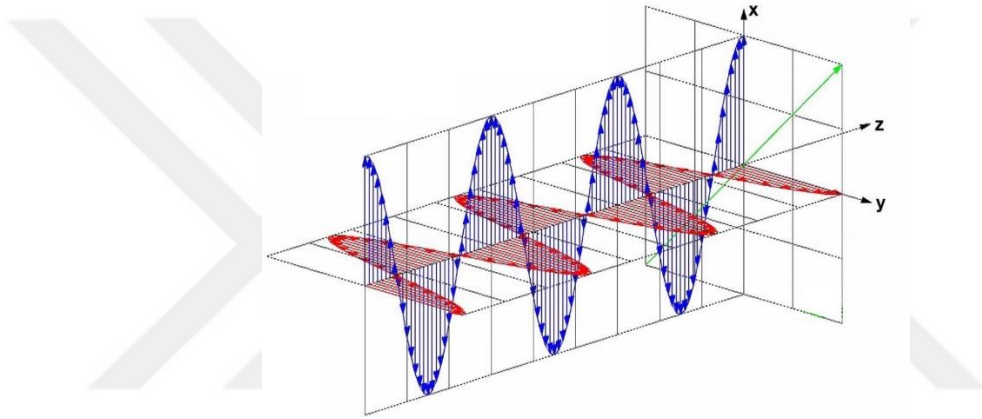
Ancak malzeme ve polarize ışık elde etmedeki birçok güçlükler nedeni ile fotoelastisite üniversitelerin fizik laboratuvarlarında teorik bir konu olarak kalmıştı. 1912 yılında ilk kez Mesnager basit geometrisi olan cam bir köprü modeli üzerinde gerilmeleri hesapladı. 1909-1931 arasında Filon ve Coker'in sürekli çalışmaları fotoelastisiteyi mühendislerin kullanacağı bir araç, Londrayı da fotoelastisite merkezi haline getirdi. Sanayi kesiminin konuya el atması da bu devre rastlar. İlk kez iki Amerikan şirketi Westinghouse ve General Electric adamlarını Londra'ya yollayarak bu konuyu kendi ülkelerine taşıdılar. 1930'lar civarında diğer ülkelerde de birçok laboratuvar açılmaya başladı. Fransa'da Mesnager, Almanya'da Föppl ve Mesmer, İsviçre'de Favre, Japonya'da Tuzi, Amerika'da Frocht aktif laboratuvar kurdular. Konunun daha yaygın hale gelmesi ile malzeme ve aletler de yeni gelişmeler oldu. Böylece fotoelastisite düzlem problemler için mühendislerin isteklerine cevap verecek bir ölçüye ulaşmış oluyordu.

3.1.2 Türkiye'ye gelişi

Fotoelastisitenin ülkemize girişi Prof. Dr. Mustafa İnan'la başlar. 1941 yılında zamanının önemli fotoelastisite merkezlerinden biri olan İsviçre'de virendel köprü kirişleri üzerine doktora çalışmasını yapmıştır. 1943-1944 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Mukavemet Kürsüsü kurucularından Prof. Dr. Fikri Santur fotoelastisite konusunda İTÜ dergisinde bir seri yazı yazmıştır. İlk laboratuvar kurma çalışmaları 1954-1955 yıllarında İTÜ'de Prof. Dr. Mustafa İnan'ın öncülüğü ile başlamış fakat ithal güçlükleri nedeni ile sadece gösteri maksadı ile kullanılabilen yerli küçük polariskoplar yapılabilmektedir, Araştırma çalışmalarının yapılabildiği laboratuvar 1958 yılından sonra Prof. Dr. Mustafa İnan ve Prof. Dr. İlhan Kayan'ın ortak gayretleri ile kurulabilmektedir. Bu yıldan sonra birçok diploma çalışması ve araştırma çalışmaları yapılmış olup, yapılan çalışmalar arasında inşaat mühendislerini ilgilendirmesi bakımından şu örnekler verilebilir: İlk gerilme ile takviye edilen Kirişlerin Etüdü, Fotoelastisite ile Hiperstatik sistemlerin çözümü, Tablalı Kirişlerde çalışan tabla genişliği, Boşluklu duvar perdelerin hesabı, Yüksekliği değişen kirişlerin hesabı, Lifli yapıya sahip ortotropik cisimlerde Fotoelastisite teorisi.

3.2 Fotoelastoik Davranış

Fotoelastik yöntem, bazı şeffaf malzemelerin, özellikle bazı plastiklerin kendine mahsus olan bir özelliğine dayanmaktadır. Bazı yapısal parçaları fotoelastik bir malzemeden yapılmış bir model düşünün. Modele basınç uygulandığında ve bir ışık ışını ana gerilmelerin bir doğrultusunda girdiğinde dikkat çekici bir şey olur. Işık, her biri titreşim düzlemi (kutuplaşma düzlemi) ile diğer ana düzlemlerden (kayma gerilmenin sıfır olduğu düzlemler) birine paralel olan iki dalga bileşenine ayrılmaktadır. Ayrıca, maddedeki geriye kalan iki ana gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak ışık bu iki yol boyunca farklı hızlarla ilerlemektedir (Şekil 3.1).



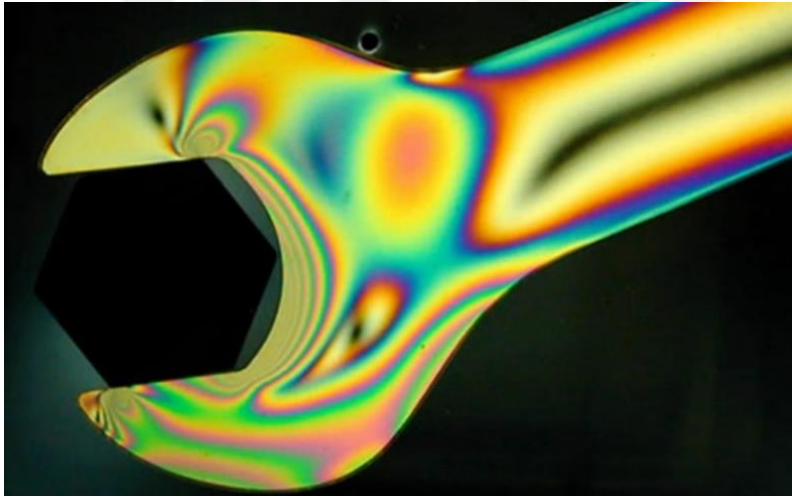
Şekil 3.1: Düzlem-polarize ışık dalgalarının çift mercekli modeli (Post, 1982).

Gelen ışık, σ_1 ve σ_2 ana gerilmeleri doğrultusuna paralel olan düzlem titreşimlere sahip bileşenlere ayrılır. Bu dalgalar vücudun enine farklı hızlarda geçtiğinden, dalgalar yeni bir faz ilişkisi veya nispi gecikme ile ortaya çıkar. nispi gecikme, gövde içinde dolaşan iki ışının karşılaştığı dalga çevrimlerinin sayısı arasındaki farktır. Bu durum çift kırılma veya çift kırılım olarak adlandırılır ve bazı optik kristaller tarafından sergilenenlerle aynıdır ancak fotoelastisitede çift kırılma suni olmaktadır ve gövdedeki her noktadaki gerilme veya gerginlik durumu ile kontrol edilmektedir.

Fotoelastik polariskopta iki dalga bir araya getirilir ve optik girişime katılmalarına izin verilir.

Eğer nispi gecikme N 'in döngü sayısı 0, 1, 2, 3. . . ise, dalgalar birbirini güçlendirir ve bu birleşik etki büyük bir ışık şiddetidir. Eğer N faz farkı döngüleri $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$ ise, iki etkileşen dalganın genliği her yerde eşit ve zıttır; yok edici girişim ortaya çıkar ve ışık şiddeti sıfıra iner (Yok olma).

Orta düzeydeki gerilmeler, N 'nin ara değerleri için geliştirilmiştir. Bu nedenle, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi karanlık ve ışık bantlarının fotoelastik deseni, şu şekilde oluşturulur: $N = 0$ olduğu noktaların konumu bir ışık bandı oluşturur: $N = \frac{1}{2}$ 'deki noktaların konumu komşu bir koyu bant oluşturur; bir diğer ışık bandı, $N = 1$ 'deki fotoelastik malzemeyi enine geçen ışınlar tarafından oluşturulur; ve ardışık karanlık ve aydınlık bantları N değerlerini yükseltmek için oluşturulur. Optik girişim terminolojisinde, bu bantlar saçak olarak adlandırılır ve saçak düzeyi sözü edilen bant boyunca N değeri olarak tanımlanmaktadır (Frocht, 1941).

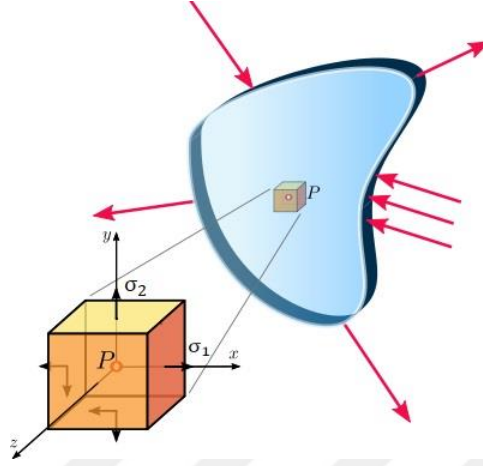


Şekil 3.2: İngiliz anahtarı için fotoelastik model (Post, 1982).

3.3 İki Boyutlu Fotoelastisite

Yukarıda, fotoelastik modellerin oluşumunun genel bir açıklaması verilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu fotoelastisiteye ve fotoelastik kaplama yöntemine uygulanması eşit derecede uygundur. Şimdi, tartışmayı düzlemsel gerilme sistemleriyle sınırlayalım, böylece fotoelastisitenin temeli gereksiz komplikasyonlar olmaksızın geliştirilebilir. Düzlemsel gerilme problemine, prototipin ve modelin kalınlığı (yanal boyut) düzlemdeki boyutlarla ilişkili olarak küçük olduğunda ve orta kalınlıktaki

düzlem üzerinde uygulanan kuvvetlerde yaklaşılr (Şekil 3.3). Böyle bir sistem için, sadece modelin düzlemine paralel hareket eden gerilmelerle ilgileniyoruz, diğer tüm gerilme bileşenleri sıfırdır.

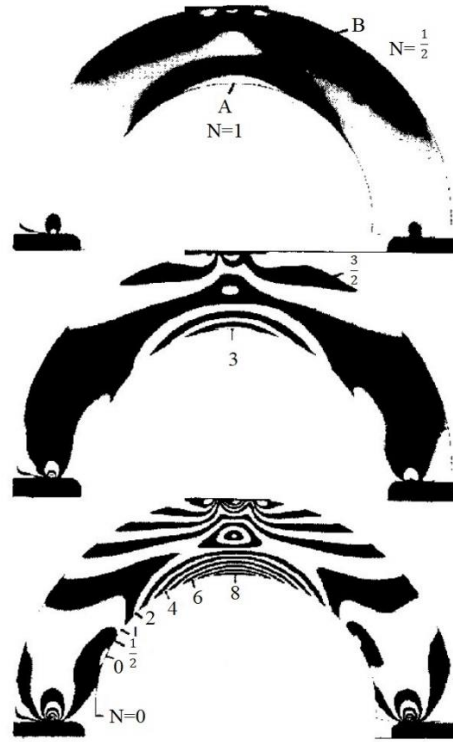


Şekil 3.3: Gerilme Durumu (Dally ve Riley, 1978).

Rasgele olarak, ana düzlemlerden olan bileşenlerin yüzey lerinde bulunan herhangi bir küçük parçayı çıkarın. Modelin yüzeyleri otomatik olarak ana düzlemlerdir (bu yüzeyler üzerinde rol oynamayan kayma gerilmesi için). Temel düzlemlerde σ_1 her zaman iki ana stresin cebirsel olarak daha büyük olanını temsil edelim; böylece ($\sigma_1 - \sigma_2$) her zaman pozitif olur. Amaç şimdi, gerilmelerin ve gerilme yönlerinin fotoelastik modellerden nasıl türetildiğini göstermektir.

3.4 İzokramatik Model

Dairesel bir polariskopta bir düzlem-gerilme model. Modele harici kuvvetler veya yükler uygulandığında görüntüleme ekranında koyu ve açık bant (Şekil 3.4) modelleri oluşur ve bu bantların sayısı modele uygulanan dış kuvvetler ile orantılı olarak artar. Model boyunca N değerlerini sağlayan bu desenler uygun bir şekilde izokromatik desenler adını alır (Post, 1970).



Şekil 3.4: İzokromatik desen oluşturulması için Artan yükler (Dally ve Riley, 1978).

İzokromatik desen, gerilme-optik yasasına göre gerilme sistemiyle ilgilidir. Yani:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f}{t} N \quad (3.1)$$

buradaki f gerilme optik katsayısıdır, model malzemesine ve kullanılan ışığın dalga boyuna bağlı bir sabittir, t model kalınlığıdır ve N deseni oluşturan ışınların nisbi gecikmesidir. N terimi aynı zamanda izokromatik saçak düzeyi (isochromatic fringe order) olarak da bilinmektedir (Dally ve Riley, 1978).

Denklem (3.1) modeldeki her noktadaki görelî gecikmenin, N , nokta üzerindeki $\sigma_1 - \sigma_2$ ana gerilmelerin farkıyla doğru orantılı olduğunu belirtmektedir.

f sabiti toplu bir sabittir, yani $f = \frac{\lambda}{(c_1 - c_2)}$, burada λ deneyde kullanılan monokromatik ışığın dalga boyu ve c_1 , c_2 , gerilme materyali boyunca ışık yayılımının iki hızının ölçülmesi ile elde edilen, fotoelastik malzemenin bağımsız sabitleridir.

3.5 İzokromatik Desenlerin Yorumlanması

σ_1 - σ_2 model boyunca sürekli bir şekilde değiştiği için, N de sürekli olarak değişir. Karanlık bir saçaktan bitişik bir ışık saçığına yapılan bir değişiklik, N değerinde $\frac{1}{2}$ değerinde bir artış veya azalmayı temsil eder; herhangi başka bir değer vermek süreklilik ilkesini ihlal eder.

İzokromatik desen açısından, bir noktadaki izokromatik saçak düzeyi, N , izokromatik desen, spesifik olarak, harici yüklerin uygulanması sırasında nokta boyunca geçen saçakların sayısı olarak tanımlanır. Böylece, Şekil 3.4'teki A noktasında, N yükü 0'dan 1'e ve 3'ten 8'e artar. Benzer şekilde, bu desenler için B noktasından geçen saçakların sayısı $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$ ve 4'tür. Bu nedenle, herhangi bir noktada N 'yi belirlemek için izokromatik modelin oluşumunu gözlemleyebiliriz.

Alternatif olarak, gerilmenin sıfır olduğu noktadan modeldeki herhangi bir noktaya kadar bir izokromatik desendeki saçakları saymayı öğrenebiliriz. Bu durumda, saçak düzeyinin saçak sayısı yolu boyunca azaldığını ya da arttığını tanıyabilmek önemlidir. Ek tartışma "Serbest Sınırlı Gerilmeleri" başlığı altında bulunmaktadır.

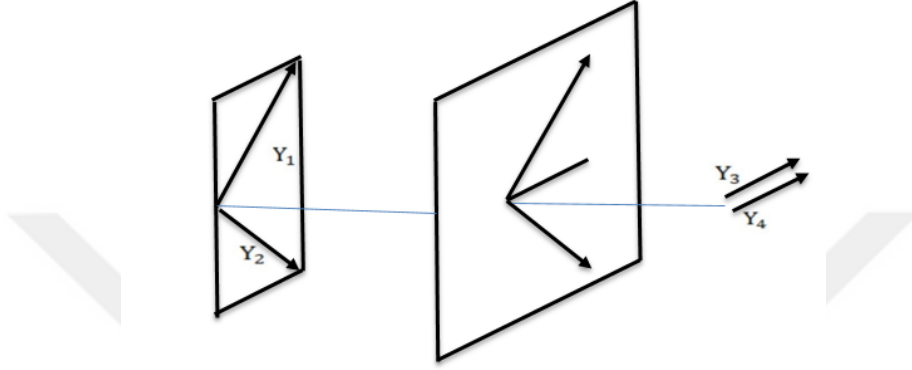
3.6 Dairesel Polariskop

Fotoelastik modelin oluşumu, bir optik girişim olayı olarak tanımlanmıştır. Modele giren her ışın iki bileşene ayrılır ve modelden çıktıktan sonra yapıcı ya da yıkıcı girişim yaratmak için birleşirler. Saçak düzeyi ile ve ışık yoğunluğu arasındaki ilişki, iki ışınlı girişim denklemi ile verilir.

$$I = a^2 \sin^2 \pi \bar{N} \quad (3.2)$$

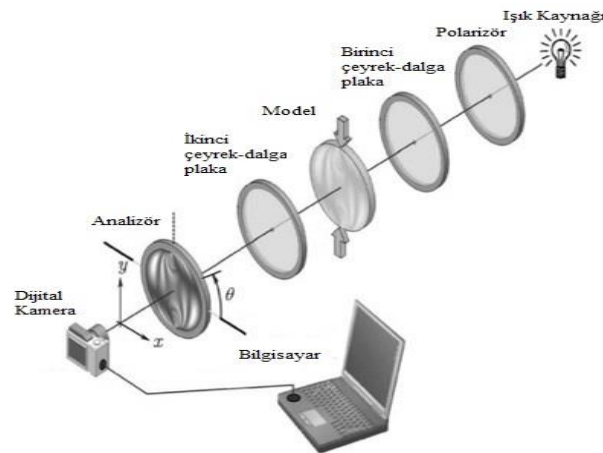
Ancak, dalgaların uyumlu olmadıkları sürece ya da aynı düzlem üzerinde polarize edilmedikçe optik girişim yapmak üzere bir araya gelemelikleri ışık temel derslerinde iyi bir şekilde belirtilmiş ve gösterilmiştir. Fotoelastik polariskop, bu dalgaları ortak bir düzleme getirir ve böylece optik girişim oluşabilir. Polariskop bu ışınların polarizasyon düzlemlerini döndürmez, bunun yerine yalnızca girişim yapan ortak bir düzlemde (analizörün polarizasyon düzlemi) ışınların bileşenlerini iletir.

Örneğin, Şekil 3.5'teki Y_1 ve Y_2 okları, iki dalga bileşeninin polarizasyon düzlemlerini temsil etsin. Işıklar, iletim eksenini yatay olacak şekilde yönlendirilmiş polarize edici bir ortama (Polaroid düzlem-polarizasyon tabakası gibi) geçerse, bu dalgaların dikey bileşenleri durdurulur (emilir) ve Y_3 ve Y_4 yatay bileşenleri iletilir. Şimdi Y_3 ve Y_4 ortak düzlemdeki kutuplanmış dalgalardır ve optik girişim oluşturmak için birleşebilirler.



Şekil 3.5: Ortak düzlem dalga bileşenlerin iletimi.

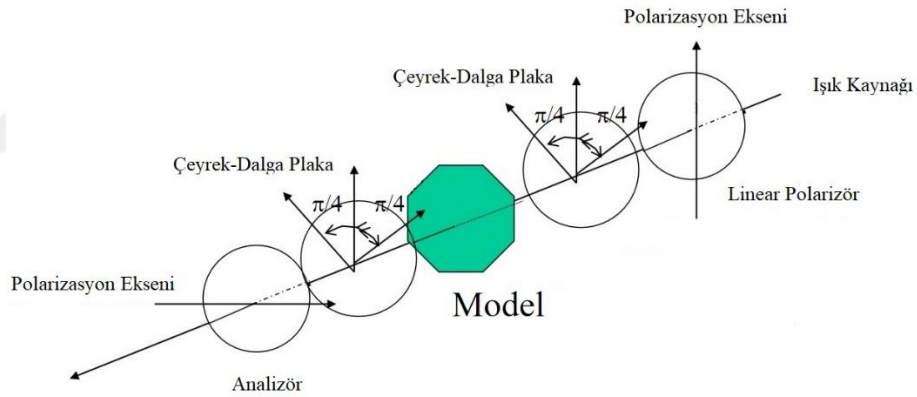
İzokromatik desenleri göstermek için kullanılan cihaz dairesel polariskop olarak adlandırılır, Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Fotoelastik polariskopun başta dağınık ışık polariskopu ve yansıtma veya ikiye katlama polariskopu olmak üzere bazı versiyonları geliştirilmiştir. Ancak objektif sistem polariskopu genelde fotoelastik incelemeler için en çok yönlü araç olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.6: Objektif tipi dairesel polariskop (Dally ve Riley, 1978).

Polariskop bileşenleri iki kategoriye ayrılabilir; Işınları yönlendiren ve odaklayan elemanlar ve dalgaların dalgaboyu ve polarizasyonunu kontrol eden elemanlar. İki alanlı lensler ve kamera lensi birinci kategoridedir. İlk alan lensi, ışık kaynağının odak noktasında bulunduğu şekilde bulunur; böylece, paralel veya koşullanmış ışık demeti alan lensinden model bölgesine yayılır. İkinci alan lensi bu ışın demetini birleştirir, böylece tüm ışık kamera merceğine girer. Fotoğraf makinesi, dolayısıyla, modelin bir görüntüsünü kamera ekranına veya fotoğraf filmine yansıtmaya odaklanır.

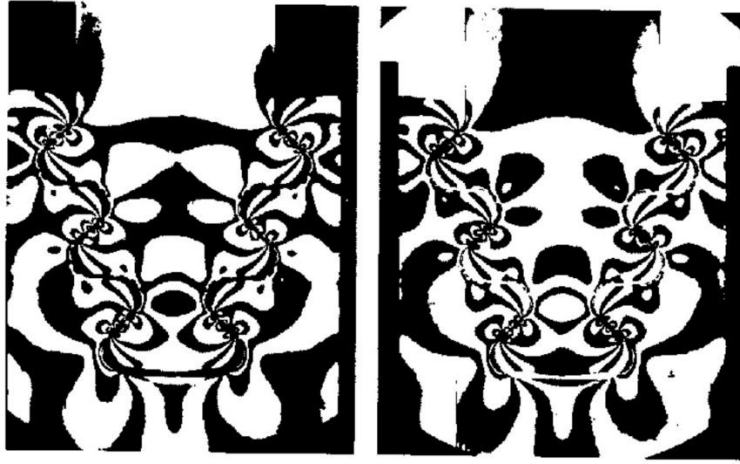
İkinci kategoride, arzu edilenin dışındaki tüm renkleri absorbe ederek küçük bir dalga boyu bandını izole etmek için genellikle bir renk filtresi kullanılır. Polarize edici elemanlar; polarizör, çeyrek-dalga plakaları ve analizörün fonksiyonları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Polarizör, gelen ışık dalgalarını dikey ve yatay bileşenlere ayırır. Tüm dikey bileşenleri emer ve kalan düzlem polarize ışığı (yatay) iletir. Tüm dikey bileşenleri emer ve kalan düzlem polarize ışığı (yatay) iletir.



Şekil 3.7: Polariskopta ışık dalgalarının dairesel olarak polarizasyonu.

Çeyrek-dalga plakası, tam olarak $N = \frac{1}{4}$ eşit dağılımlı çift kırılıma sahip bir fotoelastik modele gibi davranan bir elemandır. Polarizörün eksenine 45° açı ile ana düzlemleri (veya bu durumda ana eksenler) ile yönlendirilir. Çeyrek-dalga plakanın amacı, modelin her noktasında iki polarizasyon düzleminin her birinde eşit miktarda ışık kaynağı sağlamaktır. Genellikle, çeyrek dalga plakaları çakışmaktadır, yani birinci plakadaki yüksek hızlı dalgaların kutuplanma düzlemi, ikinci çeyrek dalga plakasındaki yavaş dalganın düzlemiyle çakışır (Vassarheli, 1951).

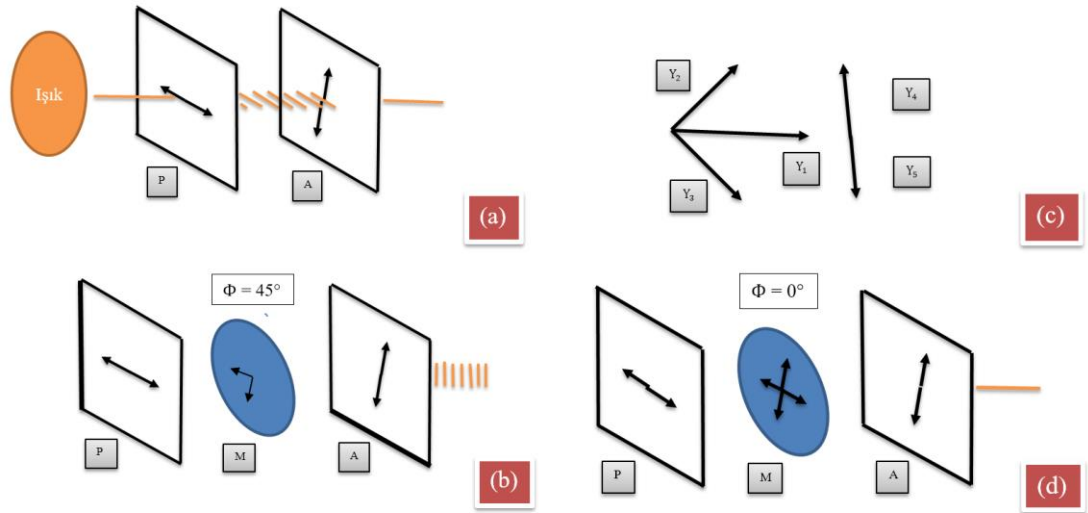
Analizör aslında ikinci bir polarizördür. Polarizör eksenini ile çakışan polarize edici eksenini polarize edici eksen ile yönlendirilirse, şekil 3.8de sağdaki gibi bir karanlık alan izokromatik desen oluşur. Şu halde, karanlık saçakların merkezleri N ($N = 0, 1, 2, 3, \dots$) integral değerlerinin noktalarıdır. Eğer polarizör ve analizör eksenleri paralel ise, bir aydınlık alan izokromatik desen oluşur ve ışık saçaklarının merkezleri N 'nin integral değerlerinin noktalarıdır (Şekil 3.8). Genellikle aydınlık alan modeli tercih edilir, zira model sınırları açıkça tanımlanmıştır.



Şekil 3.8: Kiriş kırıntılarının iki boyutlu analizi için izokromatik modeller(Vassarheli, 1951).

3.7 Asal Gerilmelerin Yönlendirilmesi

Eğer yukarıda açıklanan polariskoptan çeyrek dalga plakalarını çıkartırsak, Şekil 3.9da şematik olarak gösterilen sistemle karşı karşıya kalırız. Düzlem polarize ışık (yatay) polarizör ile analizör arasında kalan bölgeden geçmektedir. Eğer ki analizörün polarizasyon eksenini yataysa, bu ışık sistem üzerinden geçer; eksen dikey ise ışık, analizör tarafından durdurulur ve tamamen yok oluş ile sonuçlanır. Daha sonra, gerilme eş çizgilerinin yönü dikeyden $\varphi = 45^\circ$ açılı olacak şekilde elemanlar arasına bir model yerleştirin. Girilen modele göre, düzlem polarize edilmiş ışık Y_1 , (Şekil 3.9 (c)) iki bileşene ayrılır, $Y_2 = Y_1 \sin\varphi = \frac{Y_1}{2}$ ve $Y_3 = \frac{Y_1}{2}$ ve bu bileşenler modeli geçerler. Düşey bir düzlemde bulunan Y_2 ve Y_3 bileşenleri analizörden geçebilme yeteneğine sahiptir. Aslında, bu bileşenler, Y_4 ve Y_5 , analizör tarafından iletilir ve model tarafından tanıtılan N değerlerine bağlı olan bir optik girişim deseni oluşturmak üzere bir araya getirilir. Elbette, bu şimdi tanınan izokromatik modeldir.



Şekil 3.9: Yüzey polariskopundaki ışık dalgalarının polarizasyonu.

Şekil 3.9 (d) diyagramındaki düzenleme benzerdir, ancak burada gerilme eş çizgilerinin doğrultuları yönündeki model polarizör ve analizör eksenlerine paralel olacak şekilde yönlendirilmiştir ($\phi = 0^\circ$). Model, gelen ışığı gerilme eş çizgilerine paralel olacak şekilde bileşenlere ayırır, ancak bu durumda gelen ışığın dikey yönde hiçbir bileşeni yoktur. Bütün ışık yatay bir titreşim düzlemi ile iletilir. Analizöre ulaştığında, dikey yönde hala hiçbir bileşen yoktur ve ışık tamamen sönüktür. Böylece $\phi = 0^\circ$ koşulu için, N değerine bağlı olmaksızın tüm ışık söner.

3.8 Gerilmelerin Yönleri

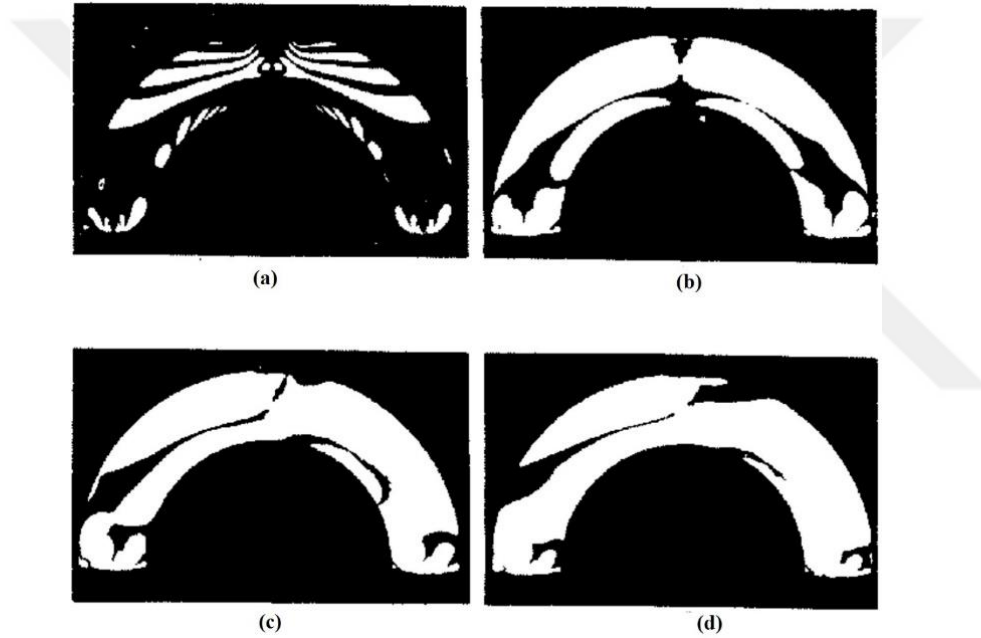
Genel olarak, gerilme eş çizgilerinin yönleri fotoelastik modelde noktadan noktaya sürekli olarak değişir. Şekil 3.9 (b) ve (d)'de gösterilen koşullar, bu nedenle, modelin farklı bölgelerinde aynı anda gerçekleşir. Yine, gerilme ve gerilme yönündeki değişiklikler gövdede sürekli bir şekilde meydana geldiğinden, gerilme eş çizgilerindeki noktalar ortak bir yöne sahip noktalar sürekli bir eğri boyunca uzanan ortak bir doğrultuya sahiptir. Modelin herhangi bir yönlendirmesi için $\phi = 0^\circ$ 'deki noktaların odak noktası, eş eğim veya eş eğim saçağı olarak adlandırılan sürekli bir siyah (yok olma) eğrisi oluşturur. ϕ 'nin sıfıra eşit olmadığı değerler için izokromatik desen mevcuttur.

Eş eğimler, düzlemsel bir polariskopta geliştirilmiş olup, bu da sadece çeyrek-dalga plakaları çıkarılan bir dairesel polariskoptur; Polarizör ve analizör için polarizasyon

eksenleri çakışır. Bir düzlem polariskopta yoğunluk dağılımı için denklem şu şekildedir:

$$I = a^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \pi \bar{N} \quad (3.3)$$

N'nin değerine bakılmaksızın 0'ın sıfır olduğu her noktada ortaya çıkan yoğunluğun sıfır olduğu aşikardır. Buna ek olarak, $N = 0, 1, 2, 3 \dots$ olduğunda $I = 0$ olur ve bu, $\phi \neq 0^\circ$ olan bölgelerde izokromatik saçak oluşumunu öngörür. Esas itibariyle, düzlem polariskopu izokromatik deseni verir, ancak bu desenin yoğunluğu, $\sin 2\phi$ eş eğim terimi ile değiştirilir.



Şekil 3.10: Merkezi yüklemeli kemer modelinde izoklinik fringleri: (a) ve (b) 0° derece; (c) 10° derece; (d) 20° derece (Drucker, 1948).

Bir düzlem polariskopta üretilen bir fotoelastik model Şekil 3.10 (a)da gösterilmektedir. Bu, izokromatik desen ile birlikte sıfır derece eş eğimi göstermektedir. Açıkçası, eş eğim eğrisini izokromatiklerden ayırt edemeyen biri için desen belirsizdir. Bu problem, beyaz ışıklı aydınlatma kullanılarak minimize edilebilir. Beyaz ışıkta, izokromatik desen $N = 0$ olduğu noktalar dışında her yerde renklidir. Ancak $\phi = 0^\circ$ olduğunda, tüm dalga boylarında yok olma hakim olur ve eş eğim daima siyahtır. Şekil 3.10 (b), panokromatik film üzerinde beyaz ışıklı

aydınlatma ile fotoğraflanan aynı sıfır derece eş eğimini göstermektedir (Drucker, 1948).

Yükleme sabit kalırken polarizör ve analizör çakıştırılır ve 90° boyunca birlikte döndürülürse, modelin her noktasından eş eğimli bir saçak geçecektir. Bu, dönüş sırasında polarizör ve analizör eksenlerinin, modelin her noktasında gerilme eş çizgilerinin yönlerine paralel olması gerektiğinden anlaşılacaktır. Modelden gerilme eş çizgilerinin yönlerinin belirlenmesi için, polarizör ve analizörün ardışık açısall konumları için eş eğimli saçaklar kaydedilir. 10° ve 20° döndürülen polarizör ve analizör ile alınan eş eğimlerin fotoğrafları Şekil 3.10 (c) ve (d) de gösterilmektedir.

3.9 Beyaz Işık Aydınlatması

(3.1) ve (3.2) denklemleri, bir deneyde tek renkli ışığın kullanımını ifade eder. Görünür spektrumun tüm dalga boylarıyla eş zamanlı aydınlatma olan beyaz ışıklı aydınlatmanın etkisini bu denklemleri ve eşitlik (3.1) için dipnot kullanarak inceleyebiliriz. Böylece, her dalga boyu için,

$$\bar{N} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)t(C_1 - C_2)}{\lambda} \quad (3.4)$$

Ve (3.2) denklem içine girerek:

$$I = a^2 \cos^2 \left[\pi(\sigma_1 - \sigma_2)(C_1 - C_2) \frac{t}{\lambda} \right] \quad (3.5)$$

($C_1 - C_2$) verilen herhangi bir deneyde, noktadan noktaya, dalga boyu λ (veya ışığın rengi) ve gerilme parametresi $\sigma_1 - \sigma_2$ 'in bir fonksiyonu olarak sabit olduğu için gösterilebilir. Farklı dalga boyundaki dalgalar etkileşime girmez. Bunun yerine, her dalga boyu kendi yoğunluk desenini kendi renginde gösterir. Sonuç kullanılan tüm dalga boyları için desenlerin üst üste yerleştirilmesidir. Modelin herhangi bir noktasında, gölge (veya renk kombinasyonu), $\sigma_1 - \sigma_2$ 'nin özgün bir fonksiyonudur ve eşit $\sigma_1 - \sigma_2$ bitişik noktaları renkli izokromatik modelde bir bant içerir.

Estetik güzelliğinin yanı sıra, beyaz ışıklı izokromatik desenler, $\sigma_1 - \sigma_2$ değerinin doğru bir şekilde belirlenmesine izin verir. İzokromatik saçak düzeyleri düşükse,

örneğin $N = 3$ veya daha düşükse bu yararlıdır, ancak azami izokromatik saçak düzeyi yüksekse gereksizdir. İnsan gözü, hassasiyetle renk farklılıklarını fark edebilir, bu sayede tek renkli bir modelde maksimum veya minimum yoğunluk noktalarını algılayabilmektedir. Uygulamada, N 'nin bir fonksiyonu olarak bilinen bir rengin ayrı bir kalibrasyon numunesi olarak kullanılması ile renk eşlemesi yapılmaktadır. Gözlemler, ilk üç saçak düzeyi için "geçiş renkleri" olarak adlandırılan mor bantların konumlarıyla sınırlandırılmışsa, hassasiyet daha da artırılmıştır. Bunlar, izokromatik modelde kırmızı ve mavi saçaklar arasında çok dar, keskin biçimde tanımlanmış mor bantlar şeklinde bulunur ve geçiş tonu renk saçaklarının pozisyonları yüksek hassasiyetle tespit edilebilir.

3.10 Fraksiyonel Saçak Düzeylerinin Belirlenmesi

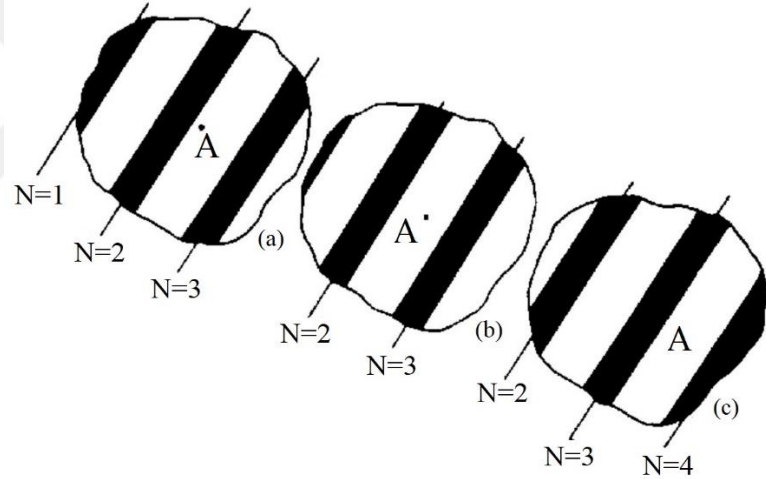
Tek renkli ışıktan izokromatik desenler için, herhangi bir eksen boyunca saçak düzeyi (N) dağılımı, ekseni kesen izokromatik saçakların orta düzeyi ve integral merkezlerinin konumlarının doğru bir şekilde anlaşılması ile çizilebilir. Yüksek hassasiyet, ilgi alanı çok sayıda saçakla kesişen durumlarda doğrudan saçak fotoğraflarından elde edilir. Maksimum saçak düzeyinin veya saçak düzeyi varyasyonunun düşük olduğu durumlarda, integral ve yarı düzeydeki saçak bölgeleriyle yetinmeyiz. Bunun yerine, N (fraksiyonel veya ondalık değerler)'in ara veya kısmi değer noktalarını bulma kabiliyeti gereklidir.

Genel olarak, kısmi saçaklı ölçüm yöntemi dengeleme, analizör dönüşü ve saçak çoğaltımı olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar genel bir objektif ile karakterizedir eşitlik (3.2) 'nin modifikasyonu, şöyle ki; yoğunluk maksimum ve minimumları sadece modelde görelî gecikmenin integral ve yarı düzey değerlerinde değil ara noktalarda da ortaya çıkar. Analizör döndürme ve dengeleme, nokta yöntemidir, zira gerilme eş çizgilerinin yönü, fraksiyonel saçak düzeyi ölçülmeden önce her noktada belirlenmelidir. Saçak çoğaltımı tam saha yöntemidir. Her üç yöntem de, alınan verilerin hassasiyetini yaklaşık bir derece artırır.

3.11 Analizör Döndürme

Analizör döndürme yöntemi ek ekipmana ihtiyaç duyulmaması avantajına sahiptir. Tek renkli ışık kullanan bir karanlık alan dairesel polariskopu kullanılır.

İlk olarak, çeyrek dalga plaka yayları çıkarılır ve polarizör ve analizör, bir eş eğimli saçılma gerilmeli fotoelastik modelde ölçülen noktada merkezlenene kadar döndürülür, Şekil 3.11’de A noktası. Böylece, polarize edici ve analizör, A’daki gerilme eş çizgileri yönlerinde hizalanır. Çeyrek dalga plakaları, karanlık alan dairesel polarizasyonu için normal 45° hizalamayla yeniden yerleştirilir ve Şekil 3.11 (a)deki gibi saçaklar elde edilir. Ardından, saçakları izlerken analizörü (yalnızca analizör) döndürerek, 3.11 de belirtildiği gibi, komşu saçaklardan herhangi birinin A noktasına taşınabileceğini tespit ederiz (Post, 1955).



Şekil 3.11: Analizör dönüşümü ile fraksiyonel fring serisi: (a) analizör döndürmeden önce;(b) Analizör dönüşü sırasında; (c) analizör dönüşünden sonra(Post, 1955).

Işık yoğunluğunun dağılımını düzenleyen ilişki sonuca göre türetilir:

$$I = a^2 \sin^2(\pi \bar{N} + \beta) \quad (3.6)$$

Burada β normal (çakışan) konumdan analizör dönüşü açısıdır. Böylece, analizörü döndürerek ışığın kesilmesi ($I = 0$) gözlemlenir:

$$(\beta + \pi \bar{N}) = 0, 180, 360 \dots$$

Argümanı biçimlendirmek için, β , analizör dönüşü için pozitif olsun, böylece yüksek integral düzeyi komşu saçak veya M düzeyi dikkate alınan noktaya getirilir. Daha sonra, $I = 0$ şu durumlarda:

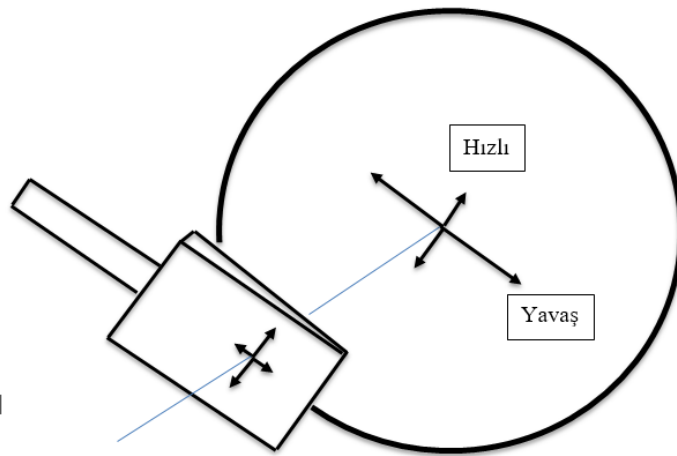
$$\beta + \pi \bar{N} = \pi \bar{M} \quad \text{ve sunucunda:} \quad \bar{N} = \bar{M} - \frac{\beta}{\pi}$$

Fotometrik cihazlar, yoğunluk minimumunu tespit etmek için, yani bir saçak merkezinin söz konusu noktada olduğu zaman kullanılabilir. Görsel gözlem ile de benzer bir doğruluk yalnızca büyük bir dikkat gösterilirse mümkün iken, bir saçak düzeyinin $\frac{1}{1000}$ 'üncü ölçümleri fotosel cihazı ile yapılabilir.

Burada açıklanan analizör döndürme yöntemi, diğer adıyla, Tardy Yöntemi olarak bilinir.

3.12 Dengeleme

Dengelemede, belirli bir noktadaki modelin çift kırılmasına, toplam göreceli gecikmeyi sıfıra getirmek için eşit ve ters bir çift kırılma eklenir. Bu, Şekil 3.12de gösterildiği gibi, modele bitişik optik yola bir alet (dengeleyici) yerleştirerek yapılır. Dengeleyici, fotoelastik model üzerindeki belirli bir noktaya sıfır dereceli bir saçak merkezini getirmek üzere ayarlanır ve saçak düzeyi dengeleyici ile birlikte cihazdan okunur, bu değer modeldeki saçak düzeyine karşılık gelir.

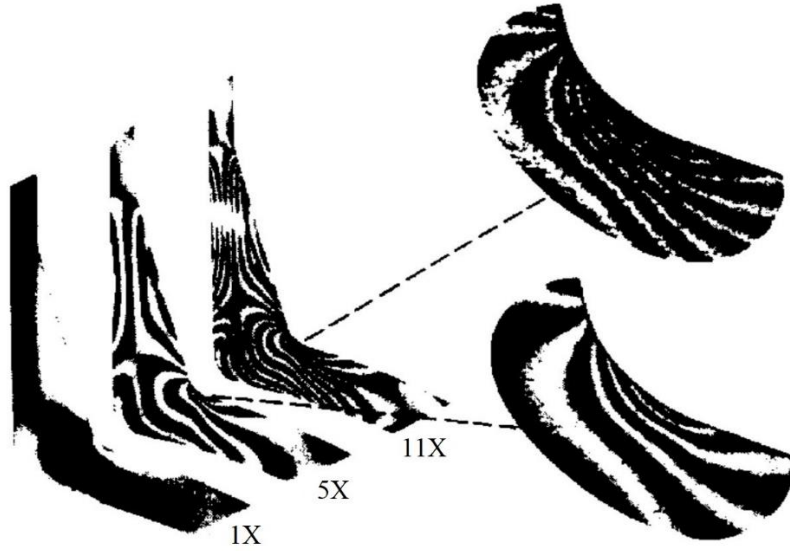


Şekil 3.12: Dengeleyicinin çalışma düzeneği.

Dengeleyicinin aktif elemanı genellikle dengeye ya da sıfır nisbi gecikmeye ulaşılncaya kadar herhangi bir nokta boyunca sürekli bir çift kırıcı kristal kamasıdır: alternatif olarak önceden belirlenmiş basit bir gerilme sistemine sahip bir fotoelastik model aktif element olarak kullanılır. Basit kama, Babinet dengeleyicisi ve Babinet Soleil dengeleyicisi bu kategoridedir. Kristal yerine gerilmiş bir fotoelastik numune kullanılarak fotoelastik laboratuarlarda eşdeğer araçlar yapılmıştır.

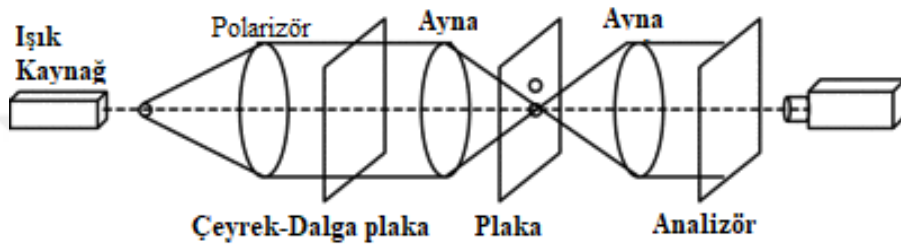
3.13 Saçak Çoğaltma

Saçak çoğaltılması, ışığın model boyunca ileri geri geçirilmesi ile elde edilir, böylece her geçitte oluşan nisbi gecikme biriktirilir ve toplam, çoğaltılmış izokromatik desende görüntülenir. Şekil 3.13, çok düşük nisbi gecikme gösteren bir numune örneğidir. 1X, 5X ve 11X olarak etiketlenmiş desenler, sırasıyla sıradan izokromatik desen, aynı örnek boyunca beş kez geçen ışıktan beş kez arttırılmış desen ve aynı örnek için on bir kez arttırılmış desendir. Ekler, 5X ve 11X desenleri için gerilme konsantrasyon bölgelerinin genişletilmiş görüntülerini saçak çözünürlüğünden ödün vermeyen bir yöntem olduğunu ortaya koyarak göstermektedir (Post, 1955).



Şekil 3.13: Fotoelastik saçak çoğaltımını (1, 5 ve 11) X ile gösteren izokromatik modeller(Frotch, 1941).

Saçak çoğaltılması, şekil 3.14te gösterildiği gibi, gelen ışığın yüzde 85ini yansıtıp yüzde 15ini geçiren model aynaların her bir yüzeyine kısmi bir ayna yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Aynalar hafif eğiktir, böylece ışık demetleri modeldeki geçiş sayısına göre biraz daha farklı yönde ortaya çıkmaktadır. Üzerinde küçük bir delik olan bir plaka, tüm istenmeyen ışın demetlerini durdurur ve yalnızca istenilen çoğaltım desenini taşıyan demetin gözlemcinin gözüne (gösterildiği şekilde) veya bir kameraya geçmesine izin verir.



Şekil 3.14: Saçak Çoğaltma için optik system (Frotch, 1941).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f \bar{N}}{t \alpha} \quad (3.7)$$

Burada α saçak çarpım faktörü veya ışığın modelden kaç kez geçtiğini ve N çoğaltılan desenden okunan saçak düzeyini belirtir.

Saçak çoğaltımı, hem iki boyutlu modeller hem de üç boyutlu dondurulmuş gerilme modellerinden alınan kesitler için uygulanabilir. Bununla birlikte, ölçümlerin hassasiyetinin artırılması ihtiyacı iki boyutlu çalışmada daha az gereklidir. Şekil 3.13, üç boyutlu bir sorundan alınan bir örnektir.

4. FOTOELASTİK VERİLERİN YORUMU

4.1 Kalibrasyon

Modelin her bir noktasındaki asal gerilmelerin farkı ($\sigma_1 - \sigma_2$), noktadaki çift kırılma N ile orantılıdır. Peki orantılılık sabiti nedir? Bu, sabitin haricinde tüm miktarların bilindiği (veya ölçülen) bir deneyle belirlenebilir. Böylece, çok basit bir model, örneğin, saf gerilmedeki çubuk veya saf esneklikte bir demet seçilebilir (Leven, 1963). Bu durumlarda asal gerilmeler, modelin boyutları ve uygulanan yük açısından iyi bilinmektedir. Model kalınlığı ve saçak düzeyi ölçülür ve gerilme optik katsayısı, yada optik hassasiyet katsayısı (4.1) eşitliği ile aşağıdaki gibi hesaplanır (Frotch, 194.

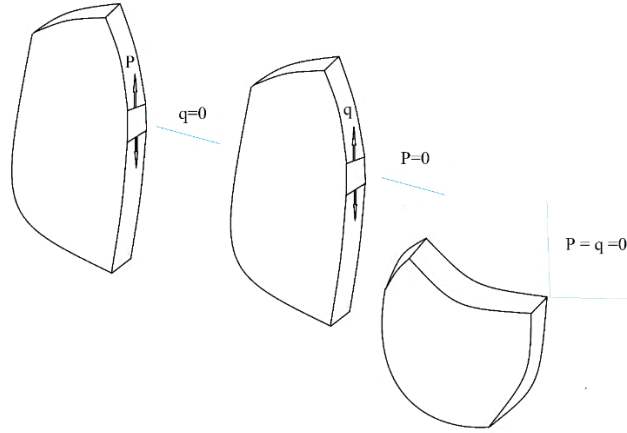
$$f_{\sigma} = t (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{1}{N} \quad (4.1)$$

Normalde kalibrasyon çubukları, ilgili fotoelastik model ile aynı tabaka veya fotoelastik malzemeden kesilir ve kalibrasyon ölçümü hem model malzemesi hem de kullanılan ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olan f_{σ} için aynı ışık kaynağı ile gerçekleştirilir.

4.2 Serbest Sınırdaki Gerilmeler

$\sigma_1 - \sigma_2$ büyüklüğü, izokromatik desen elemanlarından türetilir. Bununla birlikte, serbest sınırlarda, yani dış kuvvetler uygulanmayan sınırlarda, asal gerilmelerden biri sıfırdır. Bu nedenle, diğer asal gerilme, izokromatik saçak düzeyi ile özgün olarak belirlenir. Şekil 4.1 te gösterildiği üzere, sınır gerilmelerinin belirlenmesi, $\sigma_1 > \sigma_2$ önermesiyle uyumlu olmalıdır. Serbest sınır gerilmeleri, gerilme analizinde çok

önemli bir rol oynamaktadır, çünkü gövdedeki kritik gerilmeler çoğunlukla bir sınır noktasında görülür.



Şekil 4.1: Serbest sınır gerilmeler.

Serbest bir dış köşede, dış kuvvetlerin yokluğu, iç direnç kuvvetlerinin veya gerilmelerinin tam olarak yokluğunu beraberinde getirir, bu nedenle serbest sınırlarda $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ve izokromatik saçak düzeyi daima sıfırdır. Bu durum statik iki boyutlu gerilme sistemlerinin yanı sıra dinamik ve üç boyutlu gerilme sistemleri için de aynı şekilde geçerlidir (Frocht ve Guernsey, 1955). Serbest bir köşede $N = 0$ olan bir örnek Şekil 3.4'te görülmektedir. Bir noktada saçak düzeyinin iyice bilinmesi, özellikle de yük uygulaması sırasında desenin gelişimi gözlenmediğinde, fotoğraftaki izokromatik desenin yorumlanmasında son derece yararlıdır.

Serbest sınırlar, izokromatik modellerin fotoğraflarından saçak düzeyinin tespiti için ek ipuçları sağlar. Mühendis, genellikle, sınır gerilmelerinde gerilme veya sıkıştırma olup olmadığı ve bir sınır boyunca gerilmenin artmakta mı yoksa azalmakta mı olduğunu, model geometrisinden ve yükünden tahmin edebilir.

Bu, bir veya daha fazla noktadaki saçak düzeyinin bilgisi ve saçak düzeylerinin sürekli, sistemli olarak değiştiğinin bilgisi ile birlikte, genellikle deneycinin sınırlar boyunca gerilme değerlerini belirleyebilmesine izin verir. Saçak düzeyi herhangi bir izokromatik bant boyunca sabit olduğu için, model içindeki tüm noktalardaki saçak düzeylerinin belirlenmesi basit bir adımdır.

4.3 Gerilme Yörüngeleri

Yüklenen elemanlardaki asal gerilmelerin yönelimlerini gösteren haritalar, gerilme sistemlerini anlamak için faydalı yardımcı maddelerdir. Bu gerilme akış veya stress yörünge diyagramlarıyla çalışarak bir mühendis, formal analizden önce bir bölümdeki gerilme sistemini tahmin etme yeteneği geliştirebilir.

Gerilme yörüngeleri, ana gerilme yönlerinin yola teğet olduğu noktalardan oluşan yollardır. Ortogonal bir ağ, biri σ_1 e ve diğeri σ_2 ye teğet olan iki yörünge ailesi tarafından oluşturulur. Eş eğimli bir dizi, örneğin 10° artışlarla 0° ila 80° eş eğimler gerilme yörüngeleri çizmek için veri sağlar.

4.4 İç Noktalarında Gerilme Çözümü

Bazı problemler için iç noktalardaki gerilmenin tam durumunun belirlenmesi önemlidir. gerilmenin tam durumu üç nicelik ile belirlenir: σ_1 , σ_2 ve ϕ . Bununla birlikte, yukarıda tartışılan fotoelastik yöntemler, yalnızca iki nicelik, yani $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ve ϕ sağlar. Dolayısıyla, izokromatik desen ve eş eğimli eğriler, iç noktalar için tam bir gerilme çözümü sağlamak için tek başına yeterli değildir. Tamamlayıcı bilgiler sağlanmalı ve bu ek bilgiler çeşitli şekillerde alınabilir.

Üçüncü niceliği elde etmek için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Eğik yansıma metot ,saçak düzeyinin ikinci veya daha fazla ölçümünü kullanır, ancak ışık ışını modelin yüzeyine göre eğik bir çizgi boyunca çaprazlama geçer. Böylelikle, gerilmeler ile ölçülen saçak düzeyi arasındaki ek bir ilişki elde edilir. $\sigma_1 - \sigma_2$ ve ϕ bilgisiyle birlikte, tek tek ana gerilmelerin, σ_1 ve σ_2 , hesaplanmasına izin verir. Teorik olarak eğik yansımanın herhangi bir yönü kullanılabilir, ancak, pratik nedenlerden dolayı, yansıma düzlemi (modele eğik gelen ışık düzlemi ve model düzleminin normali) genellikle ana gerilme yönlerinden birini içermeye yöneliktir.

Üçüncü gerekli bilgiyi sağlamak için kullanılan diğer yöntemler, her elastik sistem tarafından yerine getirilmesi gereken esneklik teorisinde türetilmiş ilişkilerden yararlanmaktadır. Kayma farkı ve sayısal iterasyon yöntemleri bu kategoriye girer. Bunlar sıkıcı hesaplamalar gerektirir, özellikle de veriler birbirine çok yakın hat

aralıkları için işlenirse, birçok önemli sorunun çözümünde kullanılırlar. Bugün, bu programlanmış hesaplamaları gerçekleştirmek için modern bilgisayarların kullanılmasıyla iş gücü azaltılabilir. Bütün gerilme çözümü için ek bilgi sağlamak için geliştirilen diğer yöntemler, hala gerilme sisteminin birkaç elektrikli ve mekanik analogunu içermektedir.

Izofazik yöntemler, modelin kalınlığının değişimi ölçümleriyle üçüncü bilgi parçasını sağlar. gerilmenin iki boyutlu durumları için, yanal gerilme veya kalınlığın değişimi $\sigma_1 + \sigma_2$ ile orantılıdır. Bu, $\sigma_1 - \sigma_2$ 'nin fotoelastik ölçümleri ile birlikte σ_1 ve σ_2 'nin tek tek değerlerinin hesaplanmasına izin verir. Bu kalınlık değişikliklerinin noktadan noktaya ölçümleri için çeşitli mekanik, elektromekanik ve optomekanik ekstensiyometreler geliştirilmiştir. Tam alan optic girişim metodları da kalınlık değişimini ölçmek için kullanılabilir, ancak burada kırılma indeksi gerilme değişmeyen bir materyalin, örneğin metilmetakrilat (Plexiglas, Lucite, vb.) kullanıldığı ikinci bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Sabit yanal gerginliğe veya sabit $\sigma_1 + \sigma_2$ e sahip bir model boyunca noktaların yeri izofazik kontur olarak adlandırılır.

Eğer bir fotoelastik model bir interferometrede kullanılıyorsa, girişim saçakları, ışık hızındaki değişikliklerin yanı sıra model kalınlığının değişiminin bir fonksiyonudur. Modelin her bir noktası için ışık iki farklı hıza (farklı kutuplanma düzlemleri ile) sahip olduğundan, interferometreden iki birleştirilmiş saçak deseni ortaya çıkar. Bunlar, tek tek ana gerilmeleri σ_1 ve σ_2 hesaplamak için yeterli bilgi verir. Fotoelastik modeller kullanan tüm interferometrik ölçümler, göreceli gecikme ölçümlerinden farklı olarak mutlak gecikme ölçümleri kategorisinde yer almaktadır. Mutlak retardasyon yöntemleri, dinamik çalışmalar için özellikle değerlidir, çünkü alan boyunca σ_1 ve σ_2 hesaplamak için eksiksiz bilgiler bir fotoğraftan elde edilmektedir. Pek çok optik interferometreler, özellikle Series Interferometer ve son zamanlarda geliştirilen holografik interferometri metodu, mutlak retardasyon ölçümleri için kullanılabilir.

4.5 İki Boyutlu Modeller

Fotoelastik modeller için sert plastikler 300,000 ila 500,000 psi (2,1 GPa ila 3,5 GPa) arasında bir elastisite modülü ile karakterizedir. Genellikle gevrek ve kopma dayanımına yaklaşan gerilme seviyelerine kadar lineer gerilme çift kırma davranışının yanında doğrusal gerilme davranışı sergilerler. Paraplex ve Homalite 100 gibi polyester reçineler, CR-39 gibi alil reçineler ve çeşitli epoksi formülasyonları bu kategoridedir. Epoksi reçineler çoğunlukla, fotoelastik hassasiyetleri ve mekanik ve optik sünme serbestisitesinin artması nedeniyle tercih edilir. Diğerleri renksiz reçineler olup döküm kalıplarına benzer cam benzeri yüzeyler sunar.

5000 psi (0.345 MPa) düzeyinde elastikiyet modülü ile karakterize edilen yumuşak plastikler, dinamik fotoelastisitede birincil uygulama bulmuştur. Elastik dalga yayılımı bu düşük modüllü materyallerde çok daha küçüktür ve 10000 kare/sn sınıfında nispeten yaygın olan yüksek hızlı kameraların kullanılmasına izin verir. Üretan kauçuklar en yaygın olanıdır, yüksek derecede plastikleştirilen epoksi formülasyonları da kullanılmaktadır. Her ikisi de benzersiz mekanik ve optik sabitlerden ziyade viskoelastik davranış sergiler.

Temiz yüzeylere sahip modeller yüzey işlemi olmadan kullanılabilir, oysa yüzeyleri dağılmış olanlar özel ilgi gerektirmektedir. Yüzeyler ince aşındırıcılar ve pürüzlü malzemeler ile zımparalanabilir ve parlatılabilir. Alternatif olarak, dakika düzensizliklerini doldurmak için yağ veya hafif gres ile kaplanabilirler ve böylece optik olarak pürüzsüz yüzeyler sergileyebilirler. Daha kalın plakalar halinde kesilmiş epoksi ve üretan levhaları böyle bir işleme gerek duyar. Bu reçineler pürüzsüz Teflon kalıplarına veya kalıp bırakma maddelerinin pürüzsüz katmanlarına sahip kalıplara karşı dökülürken, model yüzeyleri genellikle doğrudan kullanım için yeterince temizdir.

Bu model malzemelerin mekanik olarak işlenmesi en iyi karbür çapakları veya 5000 ila 50000 rpmde çalışan frezeler ile gerçekleştirilir. Hızlı ve kolay bir model oluşturma prosedürü, önce şerit testere veya testere ile $\frac{1}{16}$ ila $\frac{1}{8}$ inç (1.5 ila 3 mm) büyük boyutlu modellerin kesilmesini içerir. Parça daha sonra, çift yüzlü basınca

duyarlı bant ile bir metal şablona yapıştırılır. Model ve şablon kompoziti, bir tıkaçın kesme aletinin tam altındaki masaya sabitlendiği yüksek hızlı bir yönlendirme makinesine yerleştirilir. Model şablonu tıkaçla temas edinceye kadar bir dizi teğetsel darbeye elle kesiciye iletirilir. Tıkaç daha sonra bir limit durdurma görevi görür ve tıkaç yüzeyinin tamamı şablona dokunduğunda model şablonla eşleşir. Sert ve yumuşak plastiklerin tamamı bu yöntemle işlenir.

Aşırı basınç ve aşırı ısıtmaya izin verilirse, modelleme sınırları boyunca mekanik gerilmeler ve bunlarla ilişkili çift kırılma meydana gelir. Keskin aletler, yüksek hızlar ve makul beslemeler gerilmesiz modeller verir.

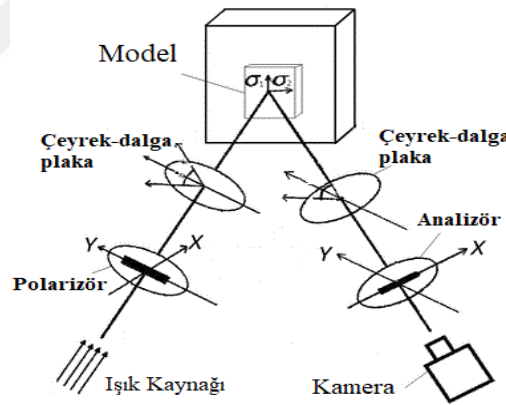
Tüm model materyalleri atmosferden nemi emer. Yeni kesilmiş kenarlarda absorbe edilen nem, sınırlar boyunca malzemenin şişmesine veya hacimsel olarak genişlemesine neden olur, yerel sıkıştırma stresleri ve eşlik eden çift kırılmalar meydana gelir. Benzer şekilde, yeni kesilen sınırlar boyunca kaybedilen nem gerilme sınır streslerine neden olur. Bu ikincil çift kırılım artışı zamana bağlı bir etkidir ve 'zaman-kenar etkisi' olarak adlandırılır. Malzeme işlem öncesi ve sonrasında sabit nem içeren ortamda tutularak bu durum engellenebilir, bu sayede malzeme içerisindeki nem miktarı atmosfer ile dengede kalacaktır. Model kenarı, silikon kaplama gibi bir su yalıtım maddesi ile kaplanarak zaman-kenar etkisi en aza indirebilir. Bununla birlikte, genel olarak, modelin işlendikten sonra birkaç saat içinde test uygulayarak zaman sınır etkisi önlenir ve böylece sınır çift kırılmasının artışı engellenir (Tallor ve Schweiker, 1961).

4.6 Fototelastik Kaplama Yöntemi

Model fotoelastisitesi kavramlarının iyi bir şekilde ele alınması ile fotoelastik kaplama yönteminin göz önüne alınması basit bir geçiş olacaktır. Bu durumda, fotoelastik malzeme, gerçek bir yapısal parçanın yüzeyinde ince bir tabaka halinde uygulanır. Homojen olarak yansıtıcı bir parça ise genellikle yansıtıcı bir boya veya yansıtıcı çimento kullanılarak ışığın kaplamayı geçer fotoelastik malzemeden ikinci kez yansır. Parça, prototip tertibatının testlerinde in situ yüklenebilir. Bu yöntem, özellikle prototipin mevcut olduğu üç boyutlu cisimlerin serbest (boşa alınmış) yüzeylerindeki gerilmeleri belirlemek için kullanışlıdır.

Fotoelastik kaplama yöntemi ile model fotoelastisitesi arasında önemli bir temel ayrım mevcuttur. Kaplama yönteminde, gerçek yapısal parça, genellikle gerçek çalışma kuvvetleri altında analiz edilir. Buna karşılık, model fotoelastisitede metalik olmayan modeller ve taklit yükleme gereklidir. Ayrıca, kaplama yöntemi elastik deformasyonla sınırlı değildir. Doğru seçilmiş kaplama malzemeleri, yapıda geliştirilen gerilmenin büyüklüğü ve niteliğine bakılmaksızın, lineer gerilme çift kırılım davranışı sergiler.

Tipik bir optik sistem şematik olarak Şekil 4.2da gösterilmektedir. Uygulamada, aydınlatma eğrisi küçüktür, normalde 5° den daha azdır ve normal etki alanı koşulları varsayılır. Çapı birkaç inç olan alanları taramak ve gözlemlemek için kullanılan geniş alanlı aletler ve noktasal ölçümler için kullanılan küçük alan veya mikroskop tipi aletler genellikle bu şekilde tasarlanır. Her iki durumda da cihaz genellikle, döner, kalibre edilmiş bir analiz cihazı ile analizör dönüşü ile fraksiyonel saçak düzeyi ölçümlerine izin verecek şekilde yapılır.



Şekil 4.2: Fotoelastik kaplama gözlemleri için yansıma polariskop ayarı (Tallor ve Schweiker, 1961).

Fotoelastik etki bir ve aynı olmakla birlikte, kaplama çalışmasında geniş bir kullanım alanına sahip olan semboller, bu metinde kullanılanlardan farklıdır. Gerinim optik ilişki genellikle aşağıdaki şekilde yazılır:

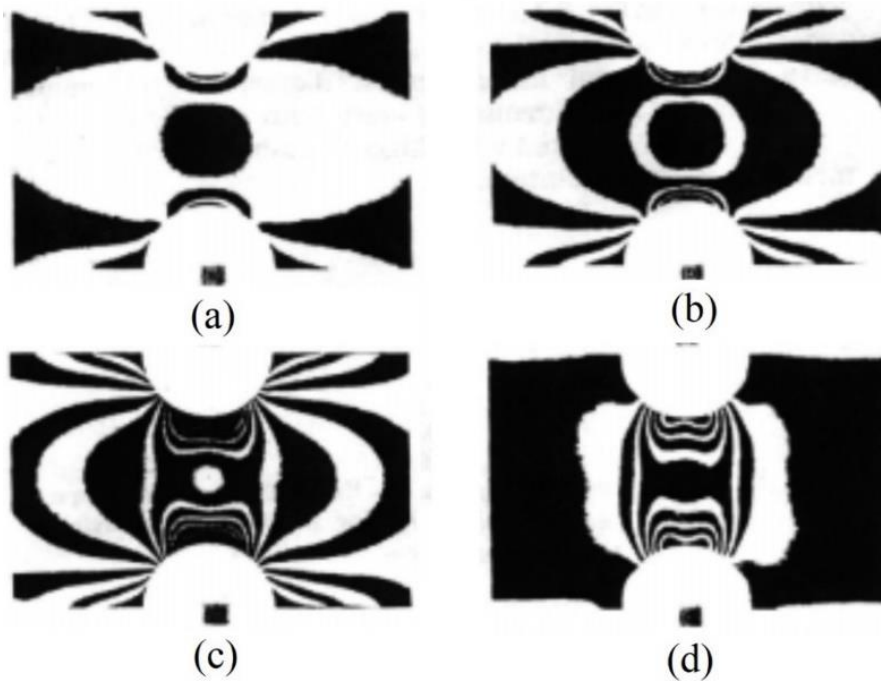
$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{\delta}{2tK} \quad (4.2)$$

burada ϵ_1 ve ϵ_2 kaplamadaki bir noktadaki ana gerilmelerdir, $2t$ kaplama yolu uzunluğu, t kaplama kalınlığı, δ nisbi gecikme, aynı birimleri ile ölçülen t ve K , optik katsayısı, boyutsuz sayılardır.

$$f = \frac{E\lambda}{1+\nu} \left(\frac{1}{K} \right) \quad (4.3)$$

Lineer gerilme rejiminde çalışan fotoelastik malzemeler için gerilme-optik ve gerinim-optik katsayıları arasında doğrudan bir ilişki vardır, yani burada ν Poisson oranı ve λ da dalga boyudur. Açıkçası, optik efekti tanımlamak için iki katsayı da kullanılabilir.

Fotoelastik kaplama yönteminin ilginç bir gösterimi Şekil 4.3de gösterilmektedir. Desenler, 0.070 inç (1.8 mm) kaplamalı, çentikli bir alüminyum çekme örneği için optik etki sergiler. (a) da deformasyon elastiktir; (b) de maksimum gerilme, verim geriniminin küçük bir katıdır ve (c) 'de alüminyum plastiğin alana sıkıca basılmıştır. Boşaltma üzerine, plastik deformasyon sonucu ortaya çıkan rezidüel gerilmeler, (d) 'de gösterilen izokromatik modelden üretilmiştir.



Şekil 4.3: Fotoelastik kaplama yöntemi kullanılarak alüminyum çekme çubuğu için izokromatik modeller: (a) elastic gerilme; (b) ve (c) plastic gerilme; (d) artık gerilme (Tallor ve Schweiker, 1961).

Homojen plastik malzemeler için çentik sınırının merkezinde tepe gerilmeyi beklenirken, Şekil 4.3 (c) ve (d)deki çentikte meydana gelen ilginç çift pik, muhtemelen sarılmış alüminyumun anizotropik malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Serbest köşelerde siyah sıfır saçak düzenlerinden anlaşıldığı gibi karanlık alan dairesel polariskopu kullanıldı. Bu durumda, arka plan aydınlatması ve parlak arka plan ve sınırların keskin tanımlanmasını kullanmaktadır.

Kontur levha yöntemi, karmaşık yüzeylerin kaplanması için nispeten kolay, son derece uygun bir yöntemdir. Önceden belirlenmiş kalınlıkta bir tabaka atmak için düz, yapışkan olmayan bir yüzeye bir reçine dökmekten oluşur. Tabaka jel aşamasına geldiğinde, kalkar ve yapısal parçanın şekline göre konturlanır. Jel aşamasında, plastik çok esnek ve şekillendirilebilir ve parmaklarla karmaşık şekillerde işlenebilir.

Deneyimler, levhanın kalınlığında sonuçta meydana gelen değişimlerin oldukça küçük olduğunu ortaya koymaktadır. Konturlu levhanın eğrisi devam ederken yapısal parçanın üzerinde kalmasına izin verilmiştir. Daha sonra kürlenmiş kaplama çıkarılır, yansıtıcı bir çimento uygulanır ve kaplama yapısına bağlanır. bir kısmı konturlu kaplamanın halihazırda çimentolanmış halde ve bir başka bölüm de yapıştırmaya hazır metal bir parçayı göstermektedir.

Yapıların veya numunelerin net yüzeylerine kaplamalar uygulamak için, önceden belirlenmiş kalınlığa sahip tam olarak sertleştirilmiş tabakalar yerine yapıştırılır. Sınır şekilleri (örneğin delikler ve kavisli kenarlar) kaplamada ya yapıştırmadan önce ya da sonra kesilebilir, ancak kaplama ile yapısal bileşenin sınır biçimi her zaman aynı olmalıdır.

Kaplama analizlerinde, kaplamaya uygulanan sınırlayıcı gerilme, iş parçasındaki sınırlayıcı gerilme (örneğin inceleme altındaki yapısal parça) tarafından yönetilir. Sıklıkla, bu değer fotoelastik malzeme için elastik sınır gerilmesinden daha düşüktür ve kaplamanın fotoelastik hassasiyetinden tam olarak yararlanmıyoruz. Günümüzde mevcut olan en büyük gerilme optik duyarlılığa sahip kaplamalar için $K = 0.2$. Çizelge 4.1, $\frac{1}{8}$ inç (3.18 mm) kalınlığında kaplama hassasiyetine geliştirilen

izokromatik saçak sırasını N göstermektedir; çalışılan parça elastik sınırına kadar gerilmiş bir çekme örneğidir.

Çizelge 4.1 : Fringe düzeyinde karşılaştırma, $K = 0.2$; $t = 0.8$; $l = 550$ mm; $n = 0.3$.
 $1 \text{ psi} = 6.895 \text{ kPa}$; $1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$.

Materyal	$(\mu\epsilon)$	$N = \frac{\epsilon_{\max}}{(1+\nu)2tK/\lambda}$	Elastic limit, σ_{EL}		Young's modulus, E	
			(ksi)	(MPa)	(10^6 psi)	(GPa)
Yapısal Çelik	1330	4.0	40	275	30	207
Alüminyum 2024T4	4190	12.6	44	303	10.5	72
Alüminyum 7075T6	7200	21.6	77	517	10.4	72
Magnezyum	4620	13.9	30	207	6.5	45
Beton	600	0.8	3	21	5	35
Ahşap	2700	8.0	4	28	1.5	1

Alüminyum, magnezyum ve ahşap ($\frac{1}{8}$ inç. 3.18 mm) üzerindeki kaplamaların tipik olarak fotoelastisite ve hassasiyetin sınırlama olmadığı bir modelin geliştirilmesinde pek çok saçığın sağlanması için uygun olduğunu bulduk. Beton veya yapısal çeliklerde saçak düzeyleri daha düşüktür ve kantitatif analizlerde fraksiyonel saçak düzeylerinin belirlenmesi için kullanılacaktır. Benzer şekilde, ince kaplamalar kullanılıyorsa veya çalışma stresleri elastik sınırın çok altında olursa, fraksiyonel saçak düzeyleri alüminyum vb. ile ölçülecektir. Analizör dönüşümü, dengeleme ve renk eşleme sıklıkla kullanılmaktadır.

Hassasiyet kaplama kalınlığı ile orantılı olduğu için, kaplamanın ne kadar kalın yapılabilir olması ilgi görmüştür. Genelleştirmek için, kaplamadaki gerinimin, arayüzde herhangi bir çekme kuvveti veya kesme kuvveti oluşmadığında, yapı kaplama arayüzündeki gerinmenin tam olarak eşleştiğini gösterebiliriz . Dolayısıyla, kaplama kalınlığı üzerinde direkt bir sınırlama yoktur.

Düzlemsel gerilmedeki yapısal parçalar için arayüz izleri, bütün sandviç boyunca gelişmemiştir, ancak sadece kaplamanın alttaki yapı ile aynı yer değiştirmeleri zorunlu kıldığı dış sınırların yakınında gelişmiştir. Örneğin, düzensiz sınır

biçimindeki düz bir gerilme çubuğunun aynı şekildeki düz bir kaplama malzemesiyle eşleştirilmesine izin verelim. Eğer kaplama gerilme çubuğunun ucuna sadece kelepçelenirse, iki eleman kelepçelerin hemen yakınında olmaksızın her yerde aynı yer değiştirme ve gerginlik yaşayacaktır. Eğer kaplama tüm yüzey boyunca birleştirilirse, kesilme izleri daha önce sıkıştırılmış olan uçların yakınında gelişir ve sandviçin geri kalanında yapıştırıcıda hiçbir kuvvet gelişmez. Gerinim, kaplamanın kalınlığı boyunca sabittir ve arayüz gerginliğine eşittir. Bu koşullar altında - sıfır arayüz çekişi - fotoelastik ölçümler yapının yüzey gerginliğinin doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar.

Bu argüman tam olarak Poisson'ın yapının ve kaplamanın oranının tam olarak eşit olması durumunda geçerlidir. Poisson oranı çoğu yapısal malzeme ve ortak kaplama malzemeleri için hemen hemen aynı olduğu için, bu uyumsuzluk ile ilişkili önemli tutarsızlıklara ilişkin bir kanıt bulunmamaktadır.

Kaplama bir düzlem stres halinde değilse, kaplama çalışılan parçanın yüzeyi ile tam olarak aynı şekilde deforme olmaz. Burada, yapıştırıcı arayüzde aynı yer değiştirmeleri sağlamak için iç bölgelerde kayma çekmeleri geliştirir. Kayma çekmeleri kaplamanın bir tarafında hareket ettiğinde, gerilmenin kaplamanın kalınlığı boyunca sabit kalmadığını buluruz. Çift kırılma ölçümünden elde edilen gerinim, arayüz gerginliği değil, entegre veya ortalama gerinimdir. Kaplama daha inceltildiğinde, ölçülen gerinim, çalışılan parçanın yüzeyindeki gerçek gerilme yaklaşıp.

Mühendislik yapılarıyla ilgili tecrübe, bu sapmanın nadiren büyük bir miktara sahip olduğunu gösterir. Kaplamanın geometrisine ve sınır sınırlamalarına tabi tutulan doğal deformasyonu, genellikle aynı yüzey şekline sahip bir gövdenin yüzey deformasyonuna çok benzerdir. Kayma çekmeleri, kaplamanın toplam deformasyonundan sorumlu değildir; daha ziyade, aynı arayüz yer değiştirmeleri için gerekli olan ince ayarlamayı getirmektedir. Daha sonra kayma çekmeleri küçülür ve kaplama kalınlığı boyunca ortalama gerilme arayüz gerginliğine yaklaşık bir düzeyde kalır.

Herhangi bir belirsizlik olması durumunda, araştırmacı, ölçülen ortalama gerilmenin gerçek arayüz gerilmelerini yeterince temsil edip etmediğini tespit etmelidir. En uygun test, ilave bir kaplama uygulanarak veya birinci kaplamaya mekanik işlem uygulanarak kaplama kalınlığının arttırılması veya azaltılması ile gerçekleştirilir. Birim kaplama kalınlığı başına çift kırılma değişmezse, ortalama gerilme arayüz gerilmelerine eşittir. Aksi takdirde, analiz daha ince bir fotoelastik kaplama ile tekrarlanmalıdır.



5. DUVAR PANEL DENEYİ

Duvar panel deneyinde amçlanan, yüksek kiriş gibi çalışacak monoblok bir duvar panelinde, dairesel boşluk olması, ve bu boşluktan sağı sola doğru açılmış oyukların olması durumunun, panel gövdesindeki gerilmelerde ve mesnet bölgesindeki gerilmelerde oluşan farkları gözlemektir. Bu amaçla üretilen modeller $\frac{1}{14}$ oranında küçültülecek 200 mm × 125 mm × 5mm boyutundaki araldit levhadır.

5.1 Deney Hazırlıkları

Deneye başlamadan önce laboratuvardaki imkanları değerlendirep ve yükleme aparatına ihtiyacımız olduğunu anladık ve elimizdeki imkanları kullanarak bize yayılı yük temin edecek bir yükleme aparatı üretilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1: Yükleme aparatı için kullanılan aletler.

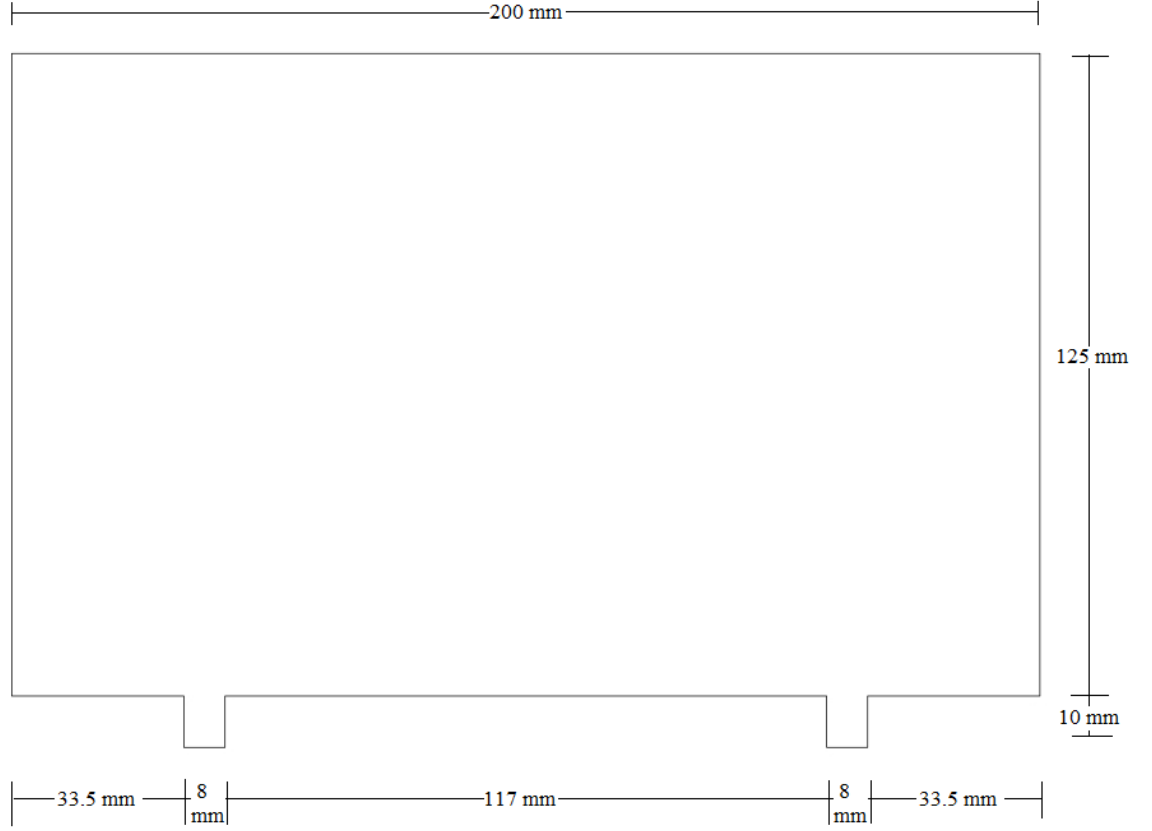


Şekil 5.2: Yükleme aparatı.

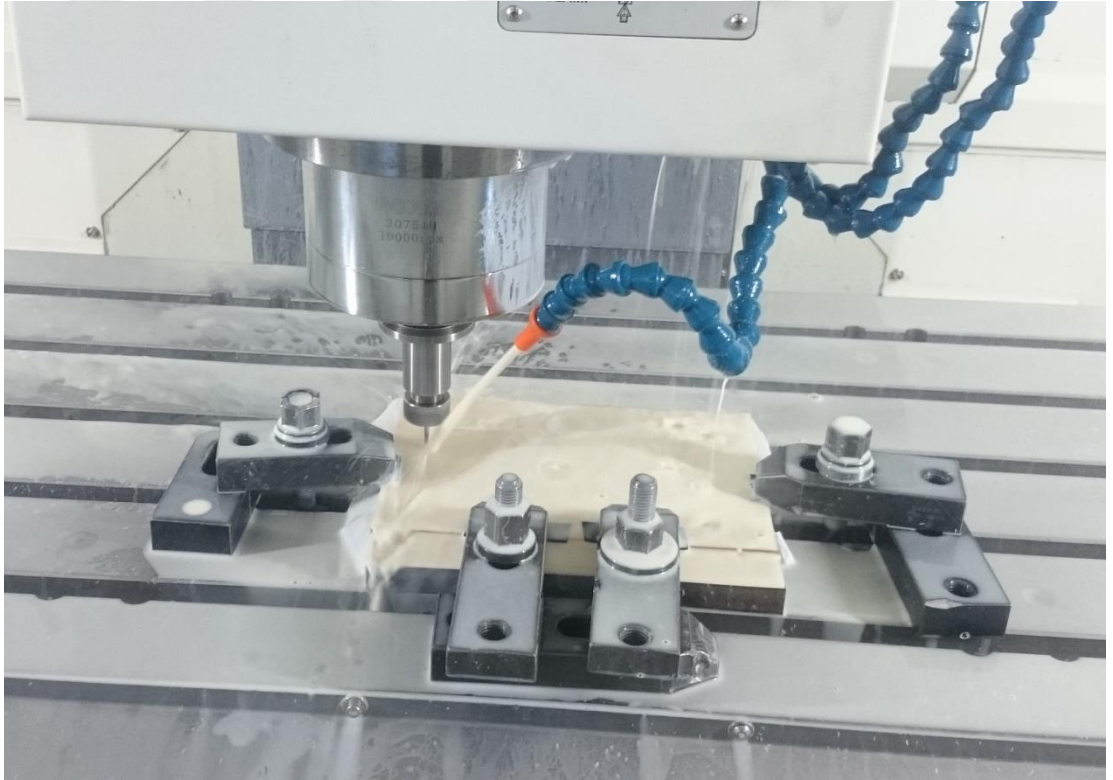
5.2 Referans Numune

Referans numune deneyde iki kolon üzerine oturan bir duvar paneli gerçeğine göre $\frac{1}{14}$ oranda küçültüp şeffaf araldit malzemeden yapılmış 5mm incelikte olan levhanın üzerinde modellenmiştir (Şekil 5.3). Modelde, duvar panel 200mm × 125mm ve mesnetler 8mm × 10mm boyutlarındadır. Şekil 5.4 te görüldüğü gibi model, sanayide bulunan bir CNC cihazı ile kesilmesi sağlanmıştır. Kesilmiş numune Şekil 5.5 te görülmektedir. Kesim işleminden dolayı malzemede artık gerilmeler kalıp kalmadığını kontrol etmek amacıyla, Polariskop cihazına yerleştirilen yüklenmemiş numunede Şekil 5.6 da görüldüğü gibi herhangi bir renk oluşmadığı gözlenmiştir. Şekil 5.7 de Polariskop cihazının içinde numune ve yükleme düzeneğinin yakından resmi görülmektedir. Düzeneğin düzlemde kalmasını sağlamak ve simetrik izokromatlar elde edebilmek için deneyler öncesinde özellikle çaba sarfedilmiştir. Deneyler için, Şekil 5.8 de görülen İTÜ Deneysel Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Polariskop cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.8 deki fotoğrafın çekildiği konumda kurulan tripod üzerine sabitlenen, yaklaştırma özelliği bulunan fotoğraf makinası ile numunelerin izokromat ve izoklinik resimleri çekilmiştir.

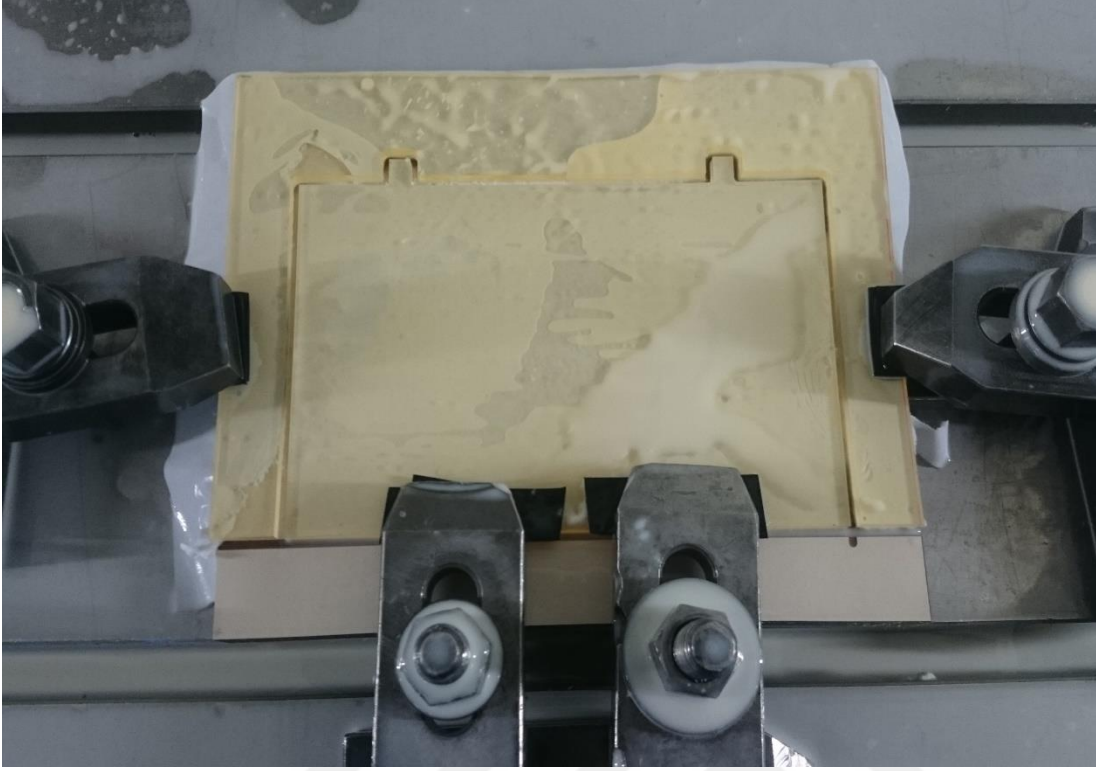
Çizelge 5.1 de ilk kolonda deney resimleri, ikinci kolonda üstten numuneye verilen basınç değerleri ve son kolonda ise Polariskop cihazında izoklinik resimlere ait polarizör ve analizör levhaları arasındaki açı değerleri sunulmuştur.



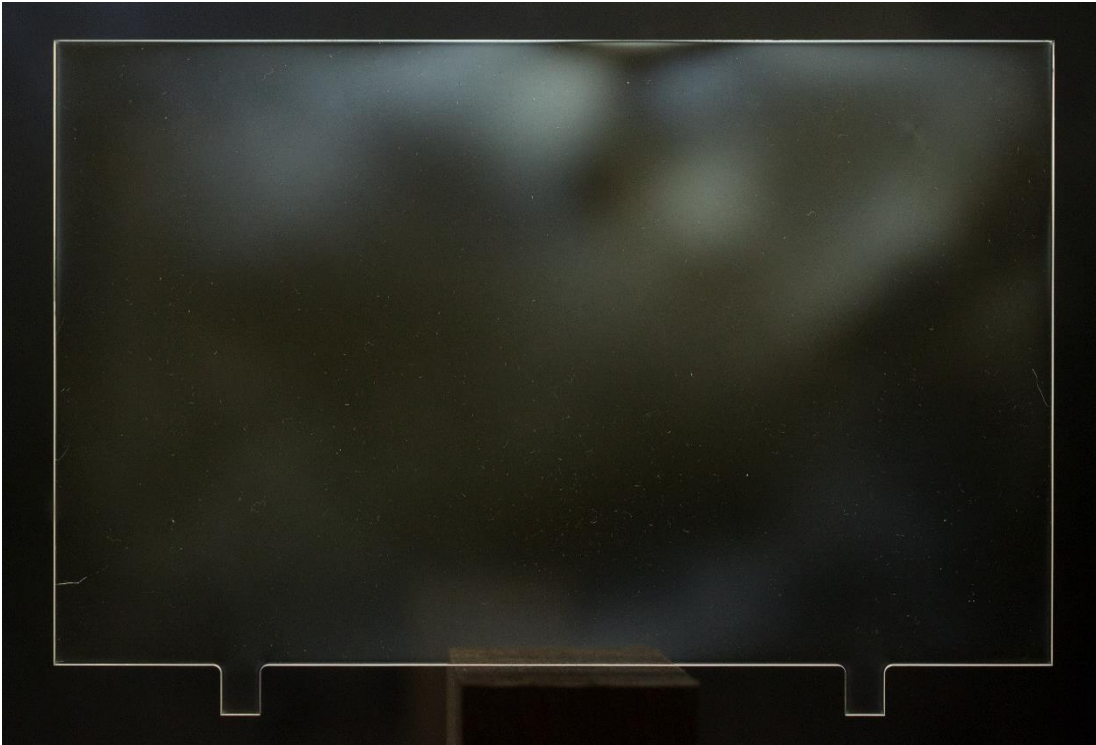
Şekil 5.3: Araldit başlangıç modelin boyutları, Referans numune.



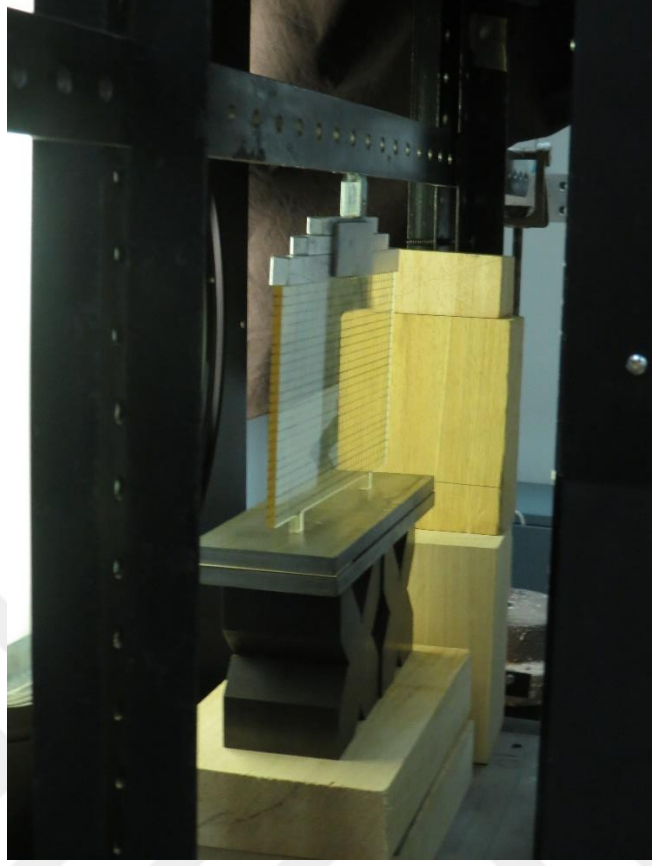
Şekil 5.4: CNC cihazıyla kesim, Referans numune.



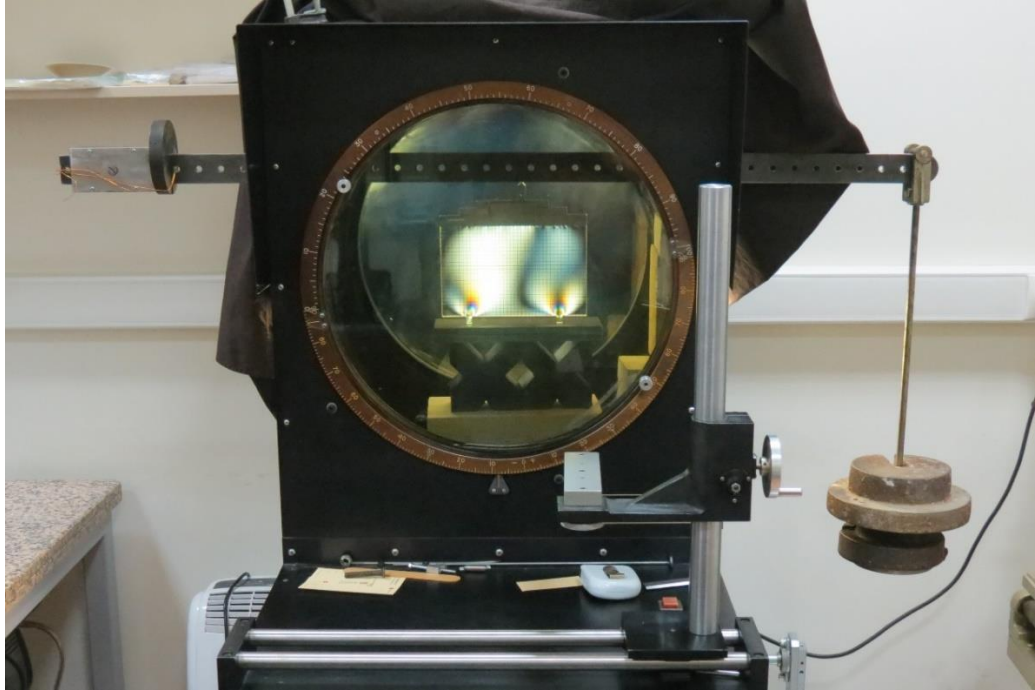
Şekil 5.5: Model, Referans numune.



Şekil 5.6: Yüksüz modelin polarize ışık altında görünümü, Referans numune.

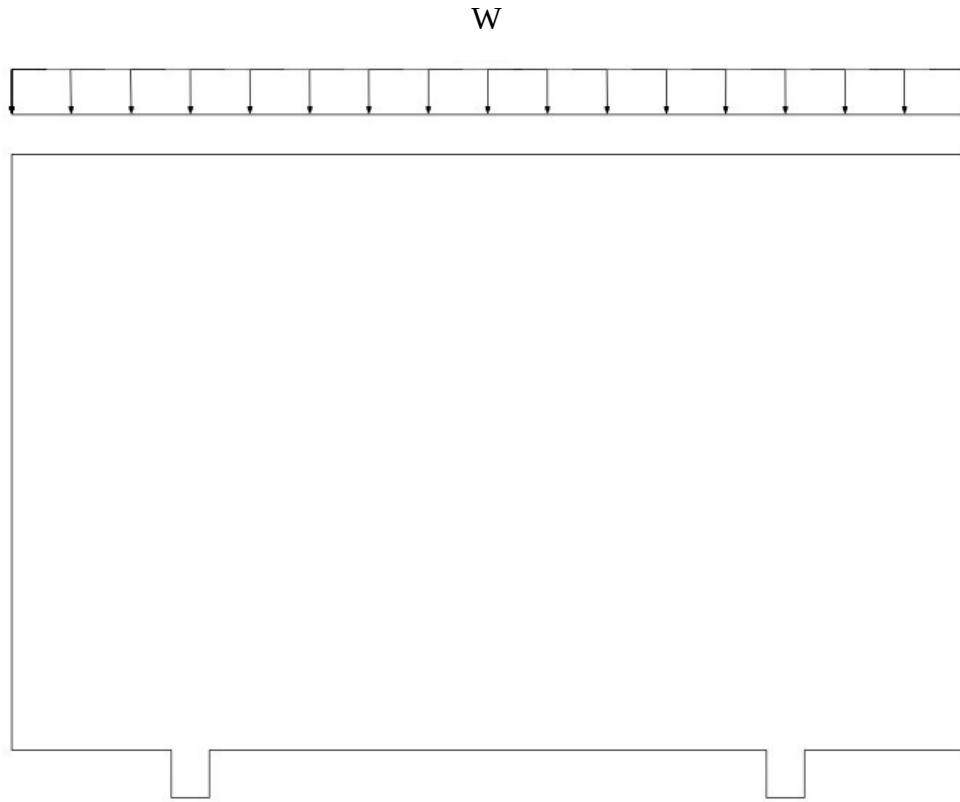


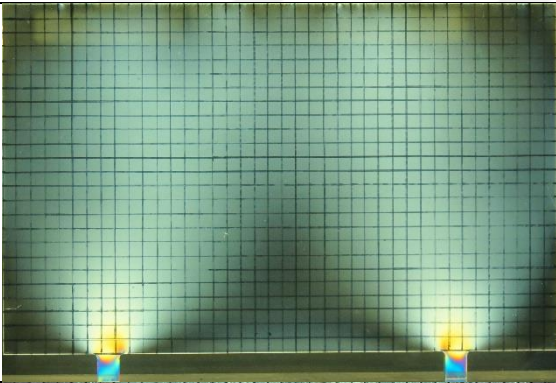
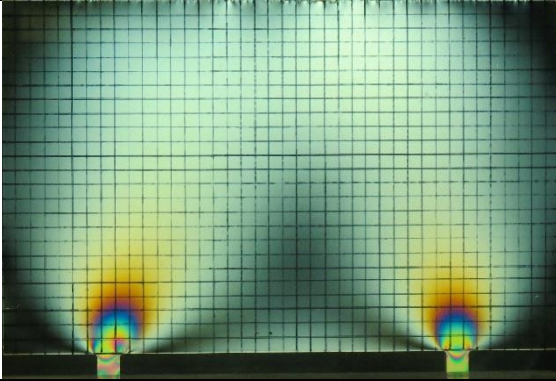
Şekil 5.7: Yükleme hazır düzenek, Referans numune.



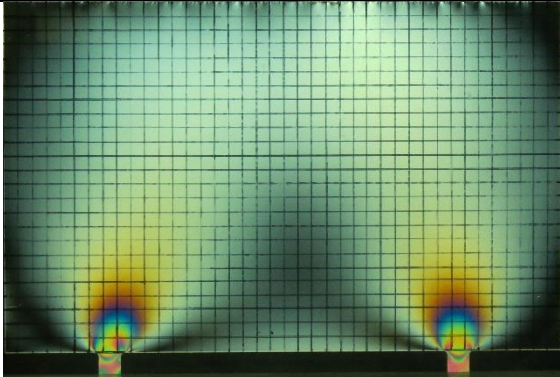
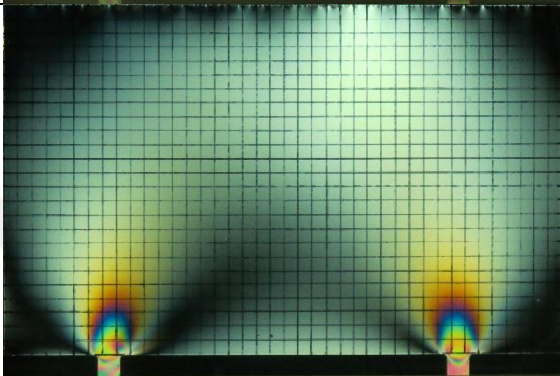
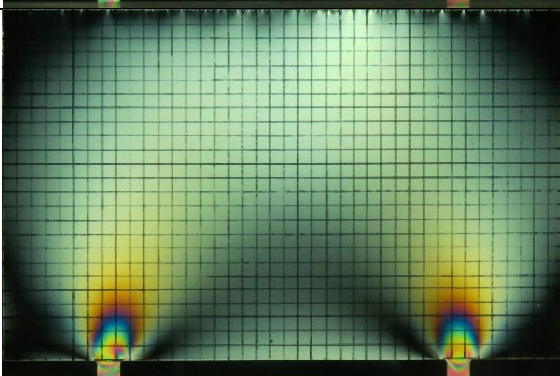
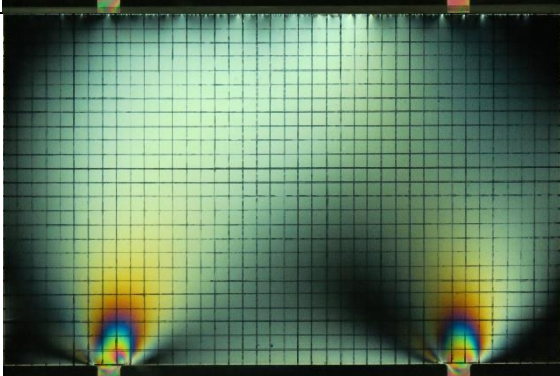
Şekil 5.8: Polariskop ve yükleme düzeneği, Referans numune.

Çizelge 5.1: Yüklenmiş model, Referans numune.

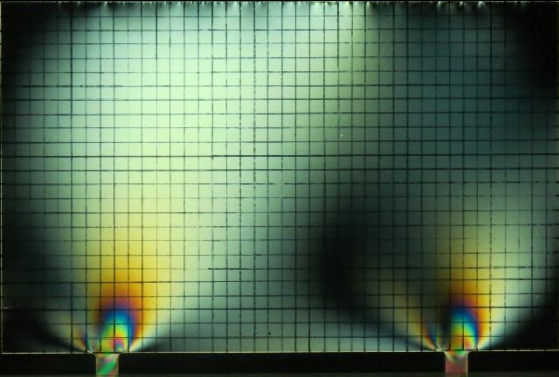
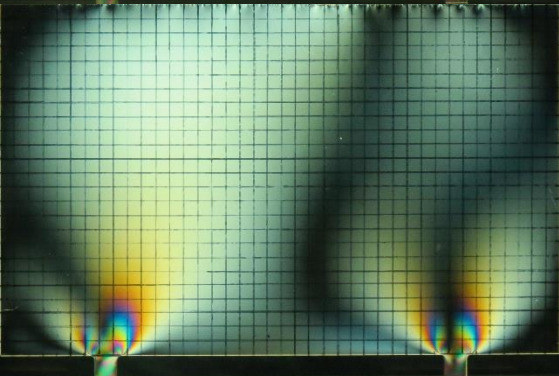
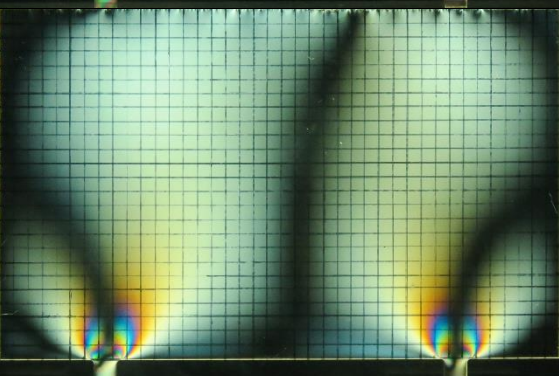
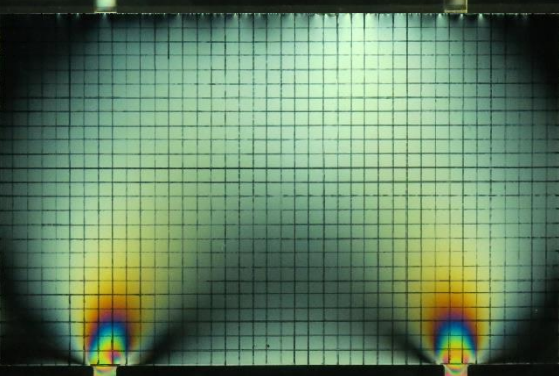


1		$W = 0.01901 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
2		$0.0473 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

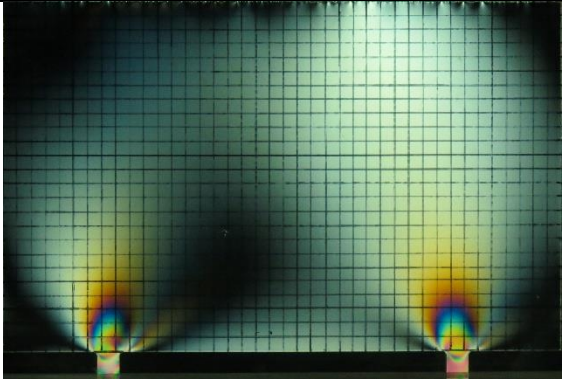
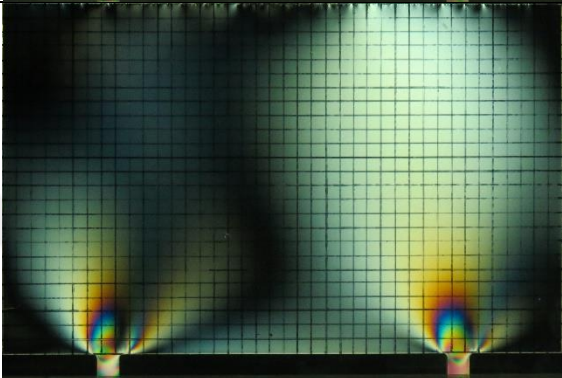
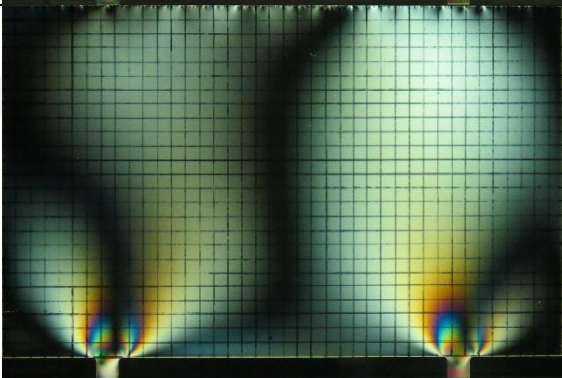
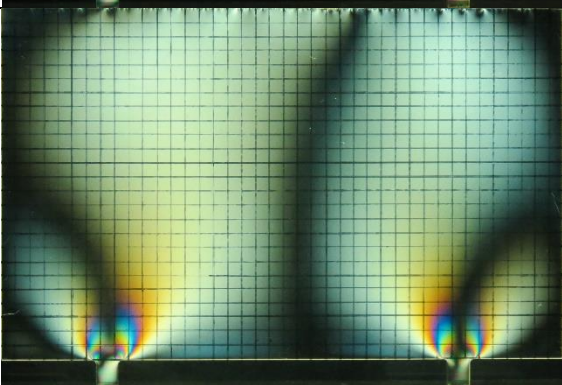
Çizelge 5.1 : Yüklenmiş model, Referans numune (devam)

3		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
4		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	P. Açısı = +42°
5		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+52°
6		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+62°

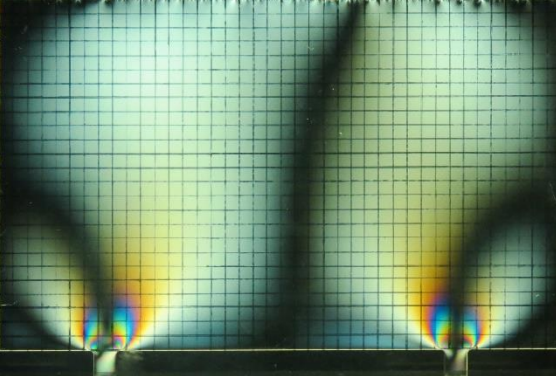
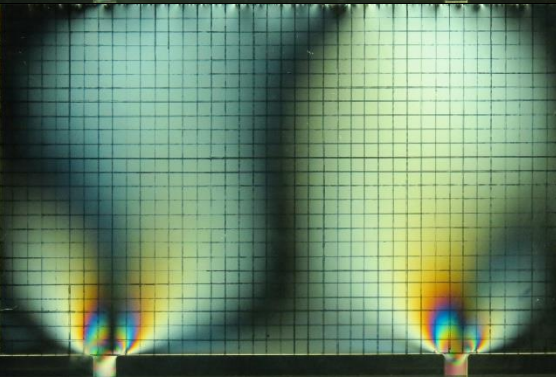
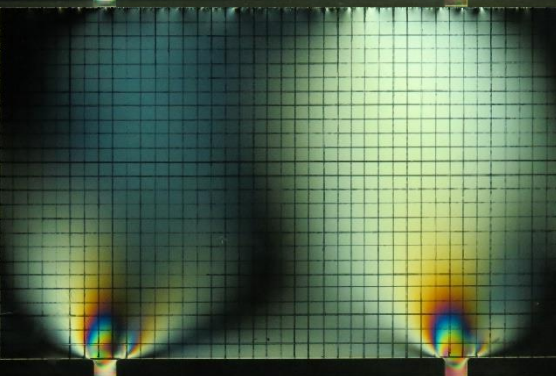
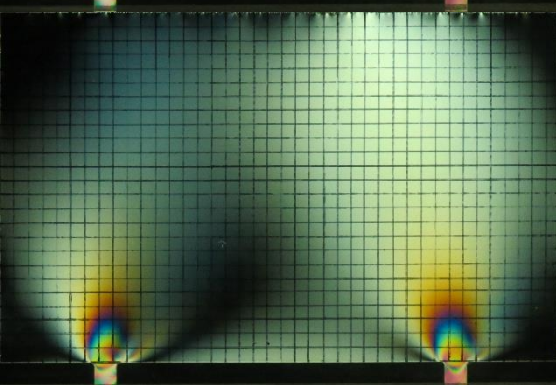
Çizelge 5.1 : Yüklendiş model, Referans numune (devam)

7		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+47°
8		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+82°
9		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+92°
10		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+47°

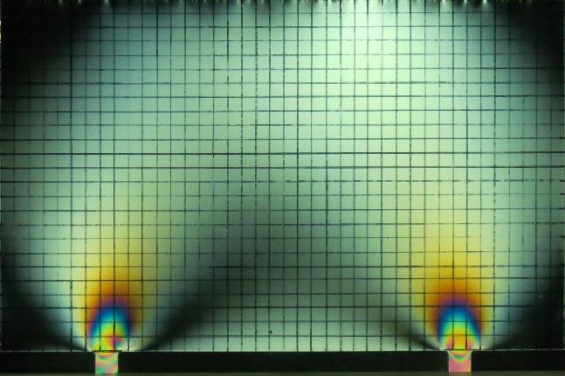
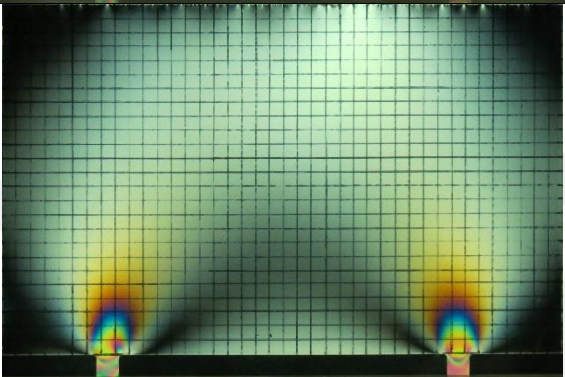
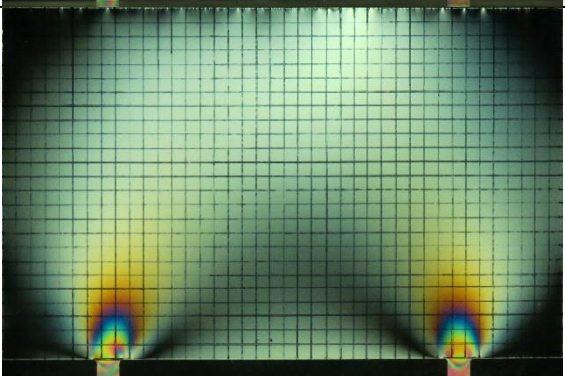
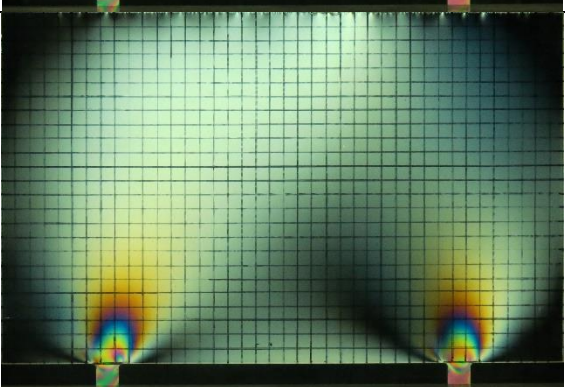
Çizelge 5.1 : Yüklenmiş model, Referans numune (devam)

11		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+32°
12		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+22°
13		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+12°
14		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+2°

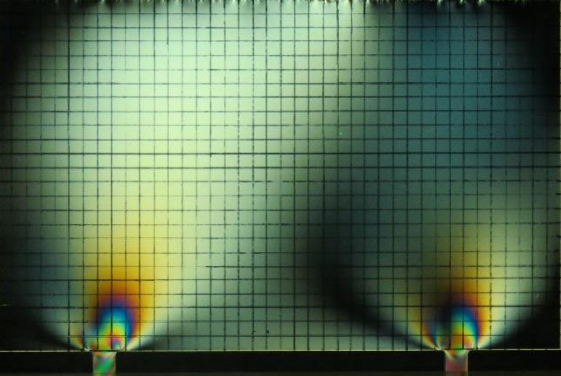
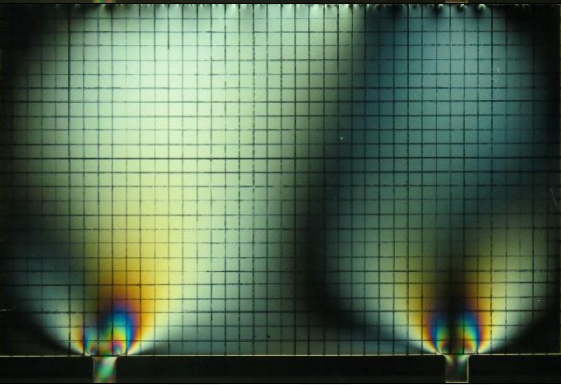
Çizelge 5.1 : Yüklendiş model, Referans numune (devam)

15		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-88°
16		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-78°
17		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-68°
18		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-58°

Çizelge 5.1 : Yüklendiş model, Referans numune (devam)

19		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-48°
20		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-43°
21		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-38°
22		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-28°

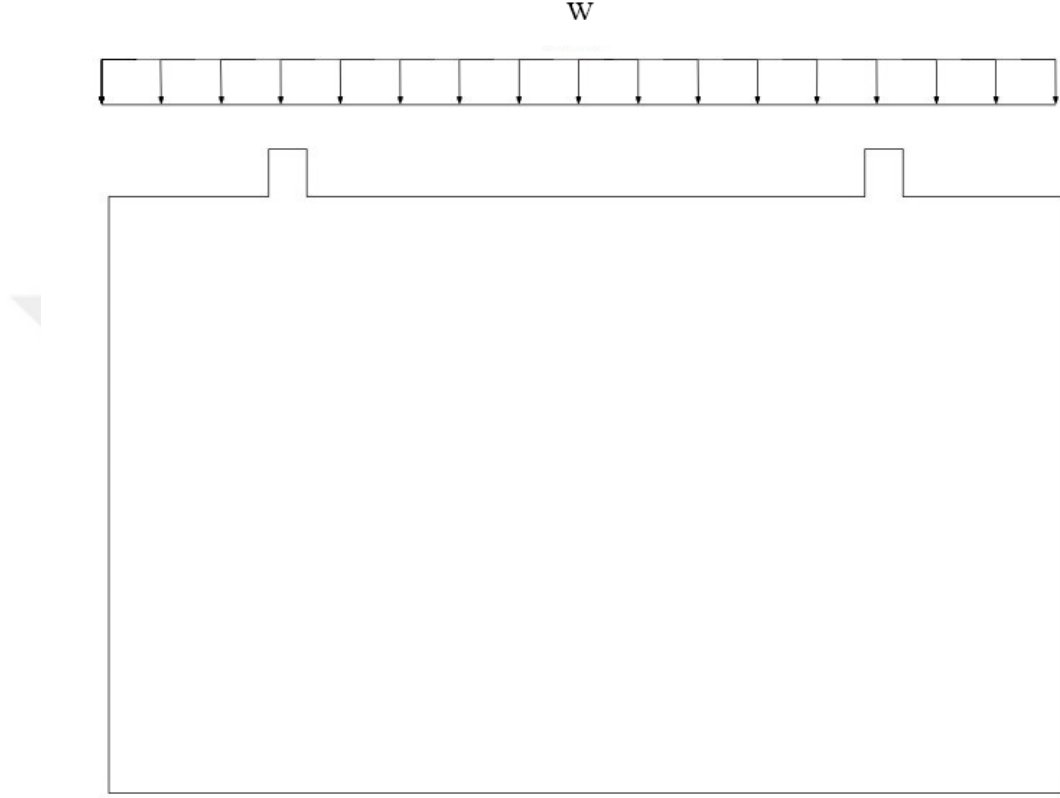
Çizelge 5.1 : Yüklendiş model, Referans numune (devam)

23		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-18°
24		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-8°

5.3 İkinci Referans Numune

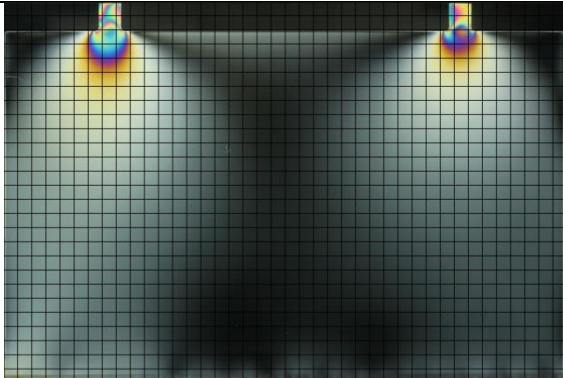
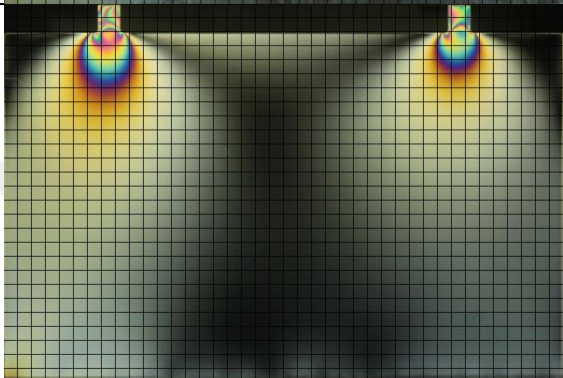
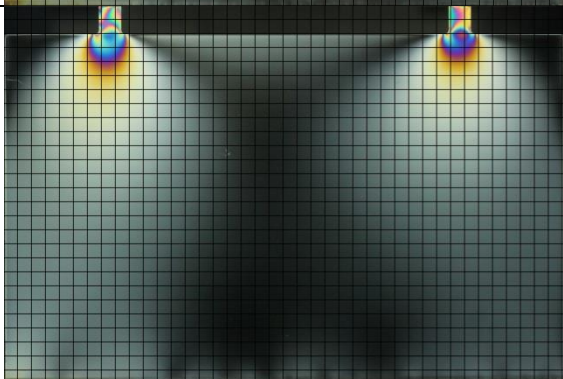
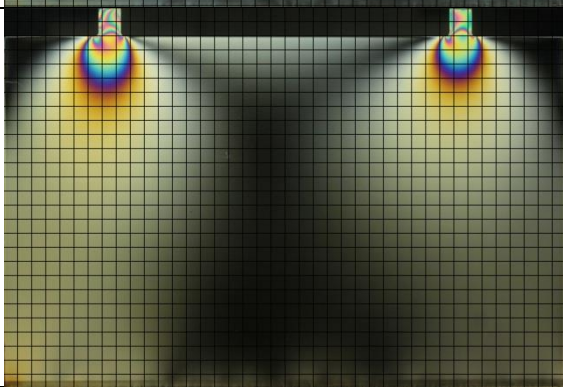
İkinci referans numunede aynen referans numunedeki yol izlenmiştir. Aradaki tek fark, kolonların duvar panelin üzerinde yer alması olmuştur.

Çizelge 5.2 : Yüklenmiş model, İkinci Referans Numune.

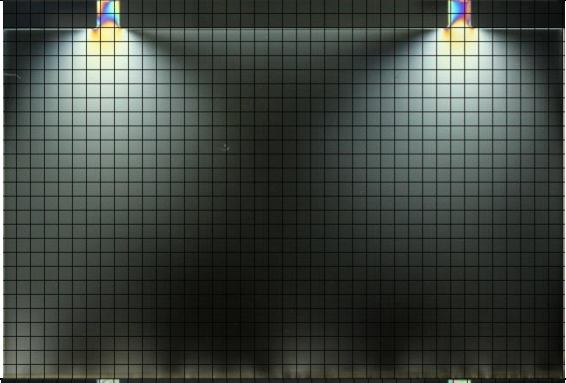
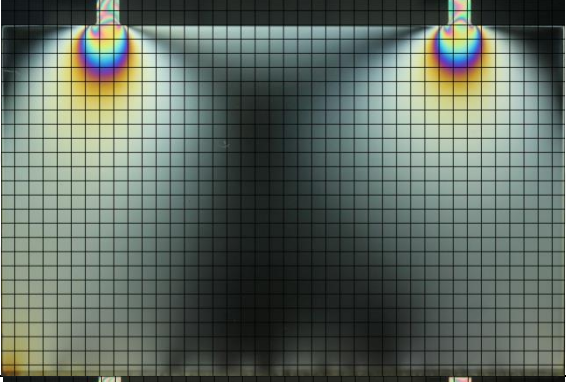
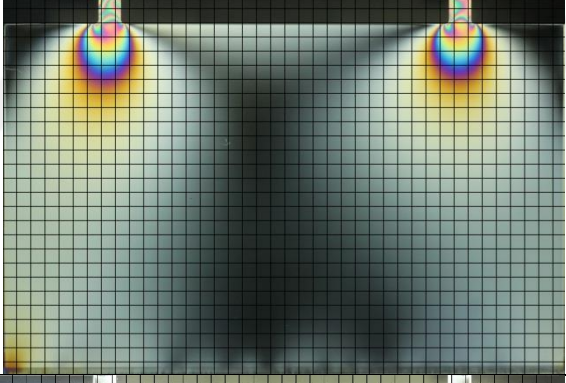
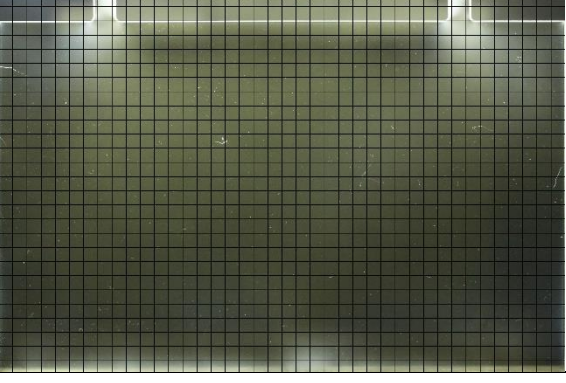


1		$W = 0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
---	--	--	--

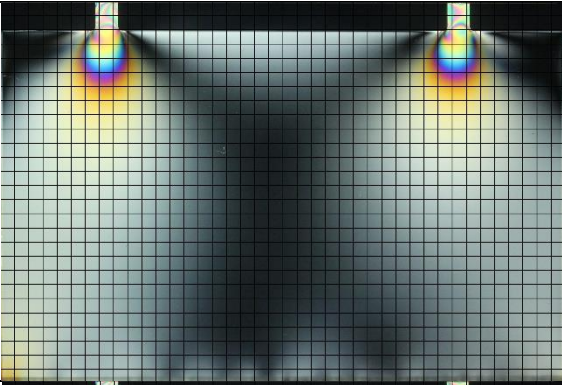
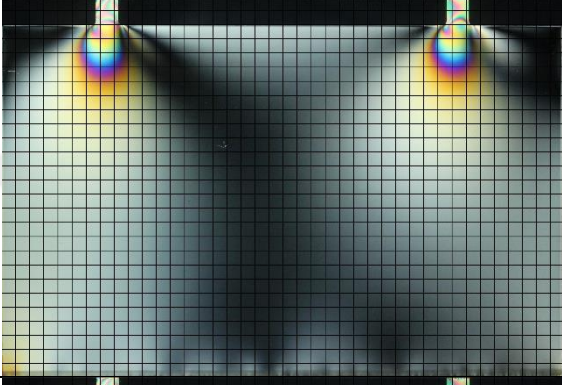
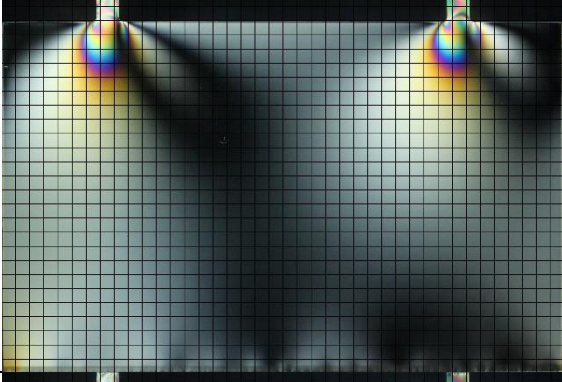
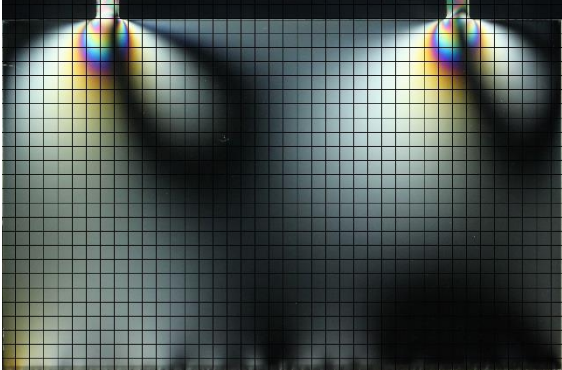
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

2		$0.0351 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
3		$0.0508 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
4		$0.0346 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
5		$0.0499 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

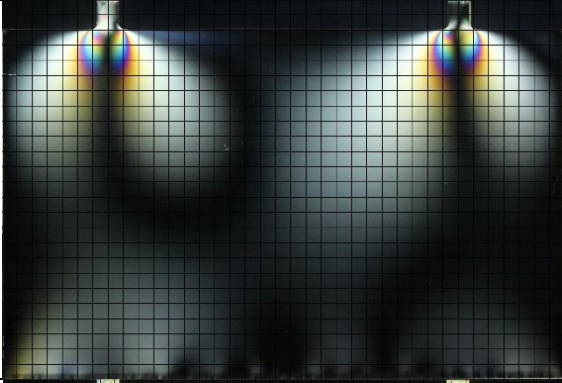
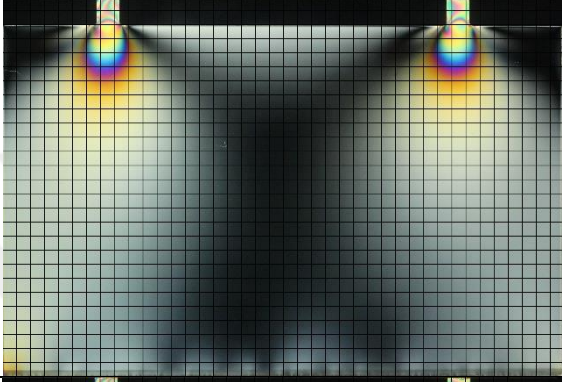
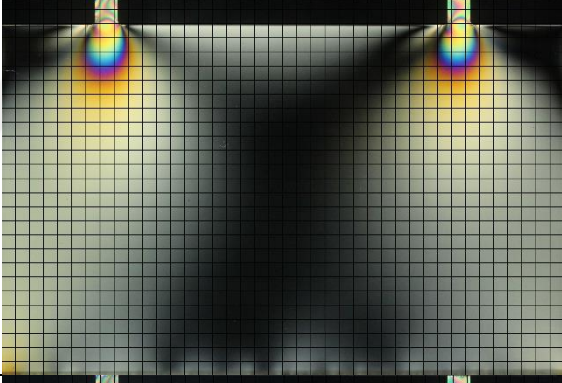
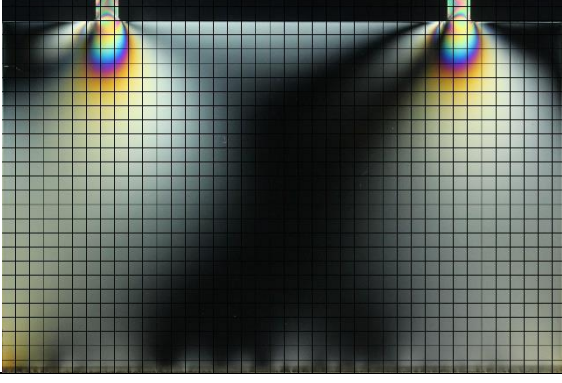
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

6		$0.0182 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
7		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
8		$0.0550 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
9		$0.0017 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

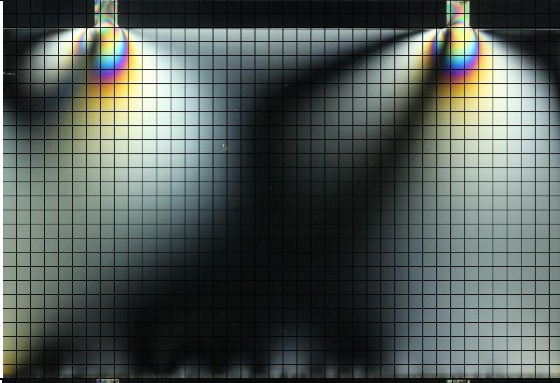
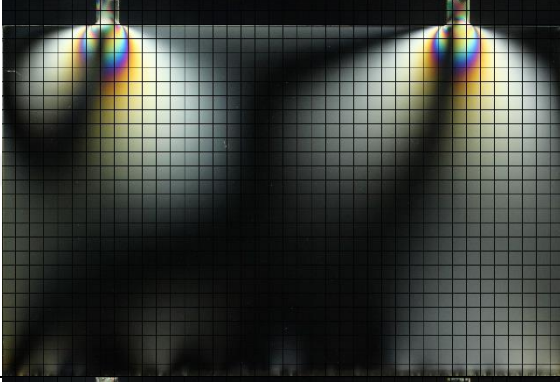
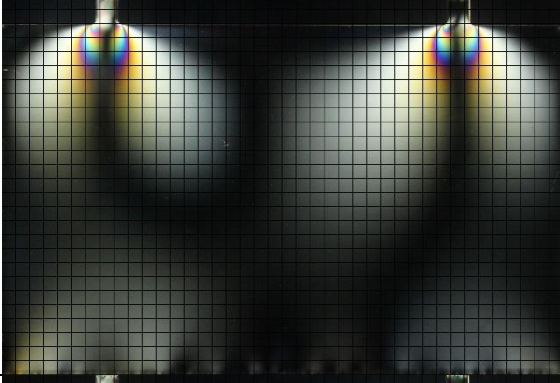
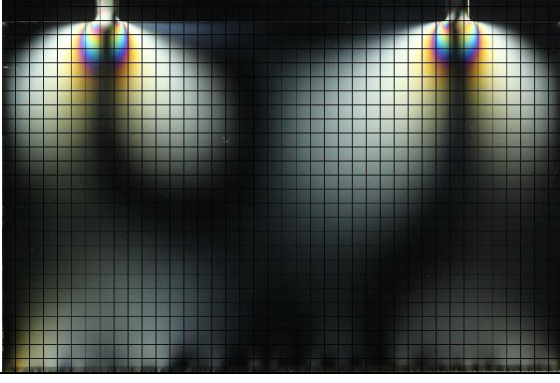
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

10		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	P. Açısı = +52°
11		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+62°
12		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+72°
13		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+92°

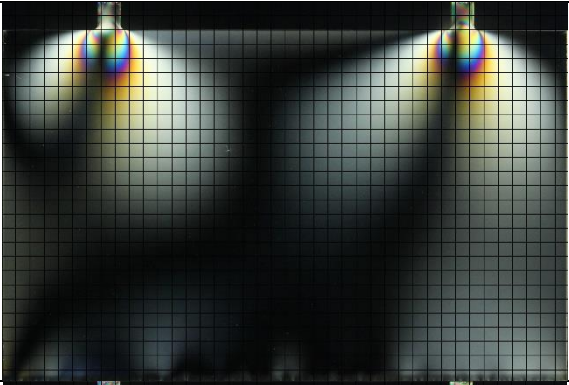
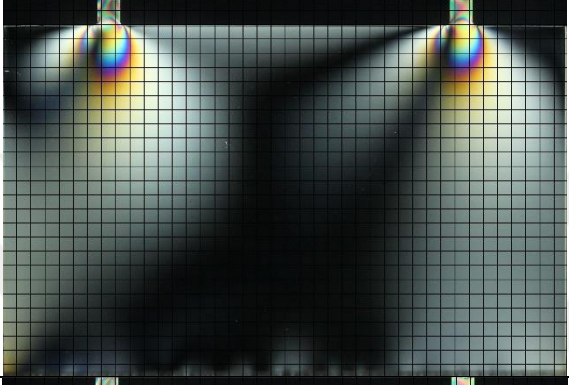
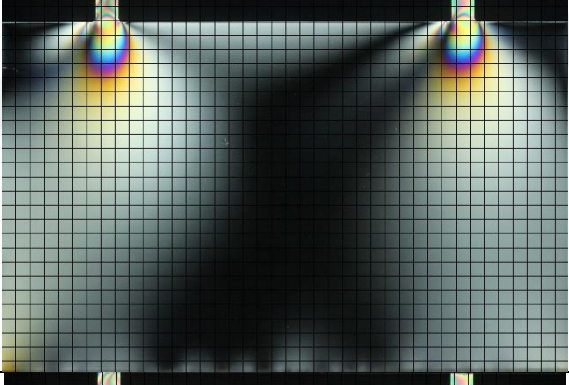
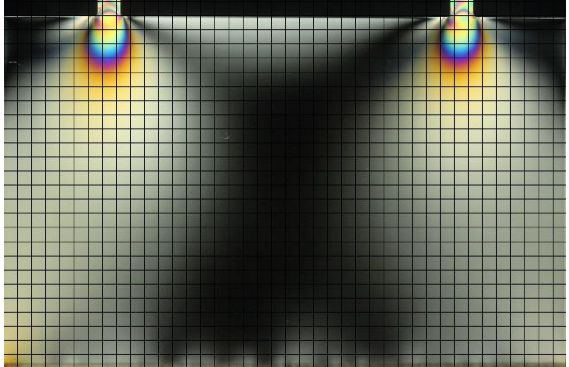
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

14			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+47°
15			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+42°
16			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
17			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+32°

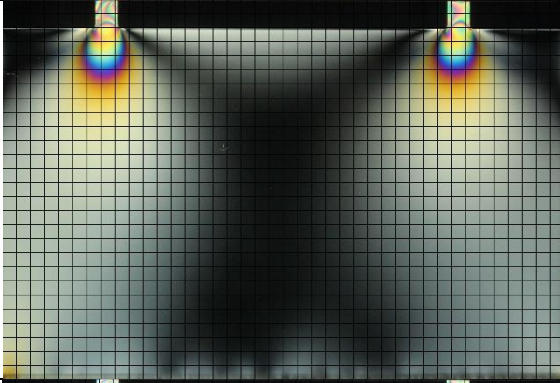
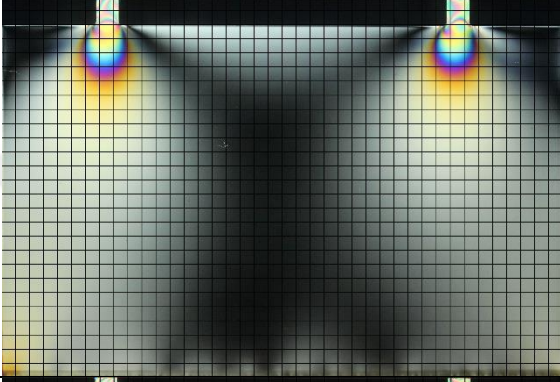
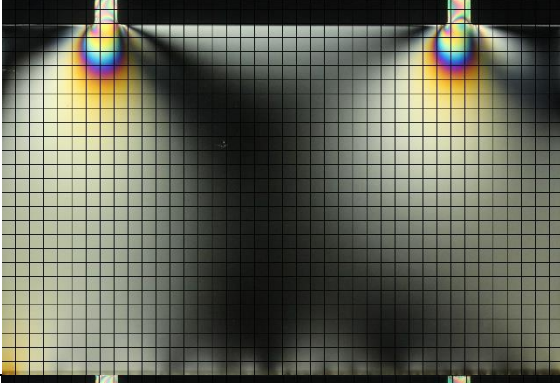
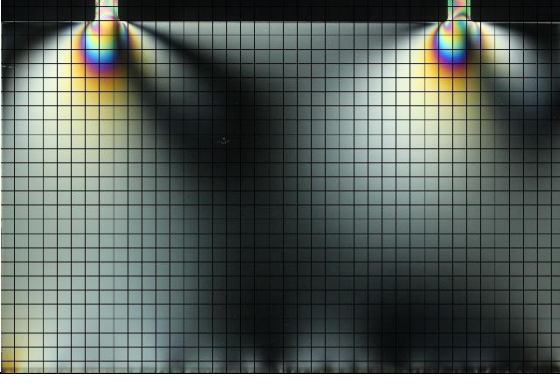
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

18		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+22°
19		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+12°
20		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+2°
21		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-88°

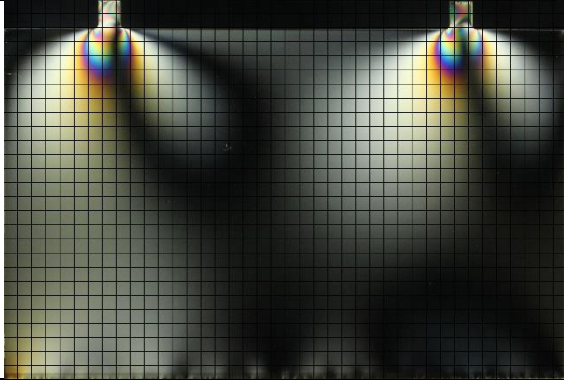
Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

22			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-78°
23			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-68°
24			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-58°
25			$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-48°

Çizelge 5.2 : Yüklendiş model, İkinci Referans Numune (devam).

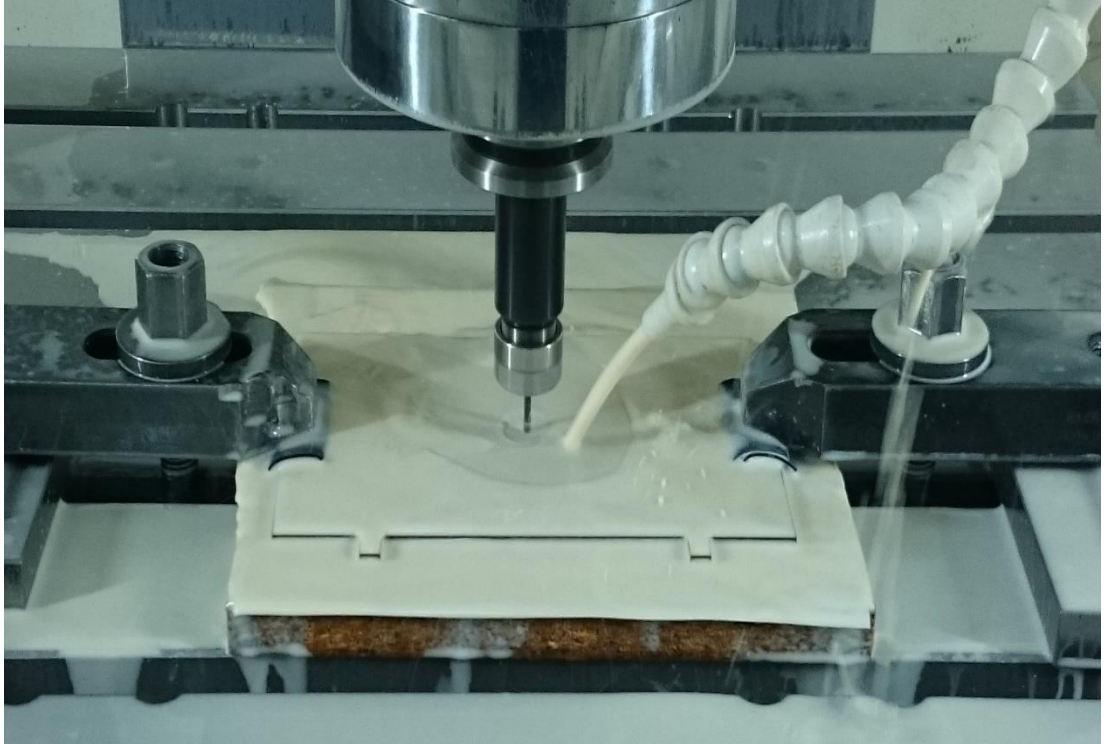
26		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-43°
27		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-38°
28		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-28°
29		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-18°

Çizelge 5.2 : Yüklendi model, İkinci Referans Numune (devam).

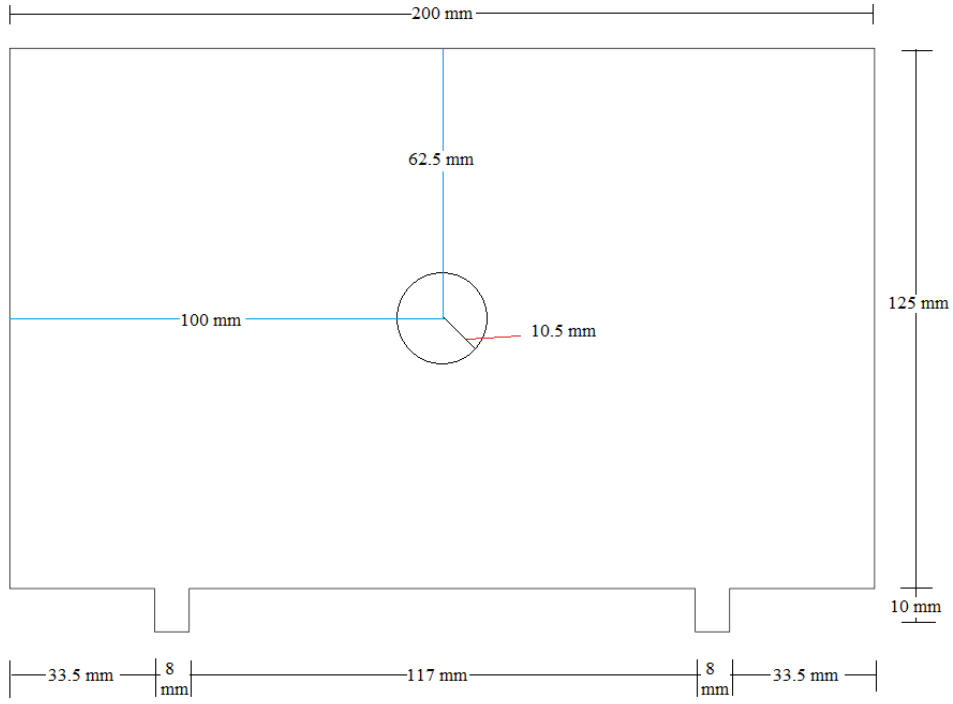
30		$0.0492 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-8°
----	---	--	-----

5.4 Daire Delikli Numune

Daire delikli numune deneyinde duvar panelin tam ortasına 21 mm çapında bir delik açtırılmıştır (Şekil 5.10) ve deneyi aynen referans numune deneydeki gibi uygulanmıştır.

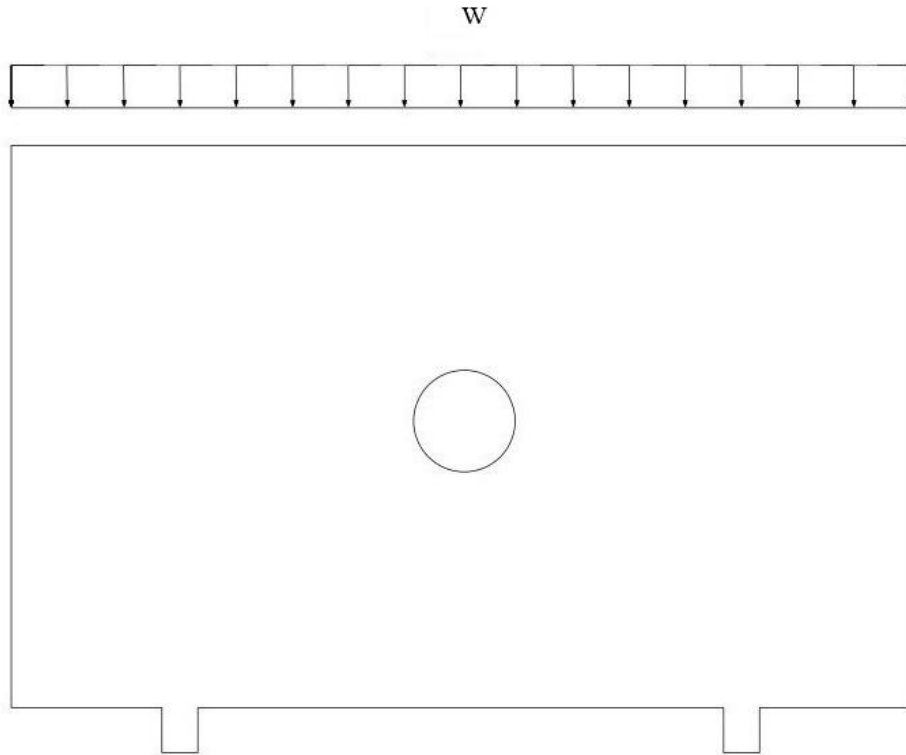


Şekil 5.9: CNC cihazında delik açma işlemleri, Delikli numune.

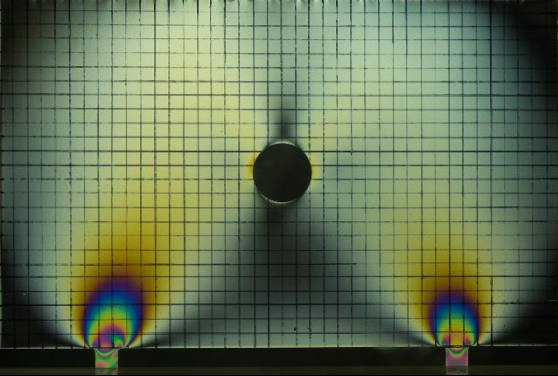
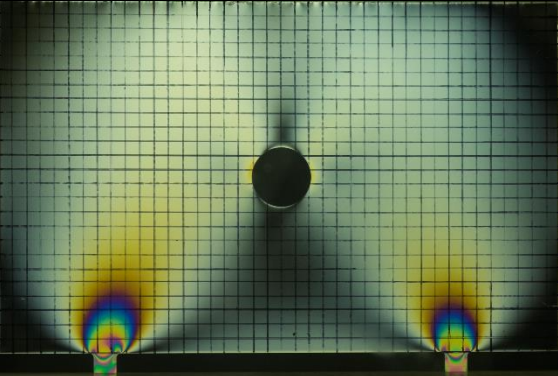
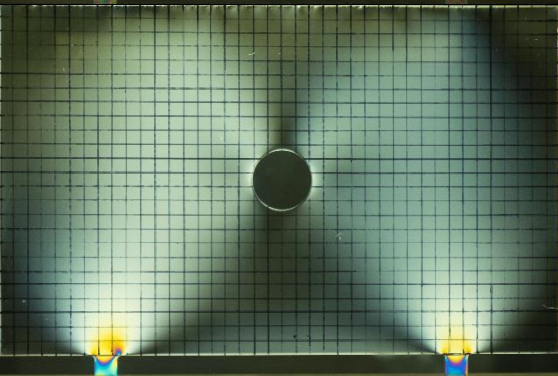
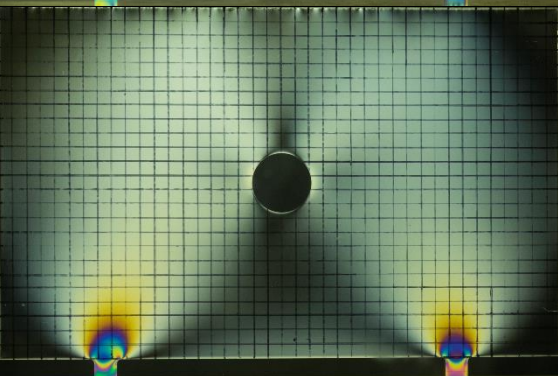


Şekil 5.10: Delikli modelin boyutları.

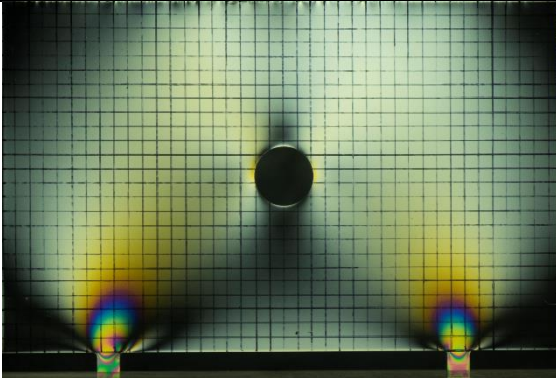
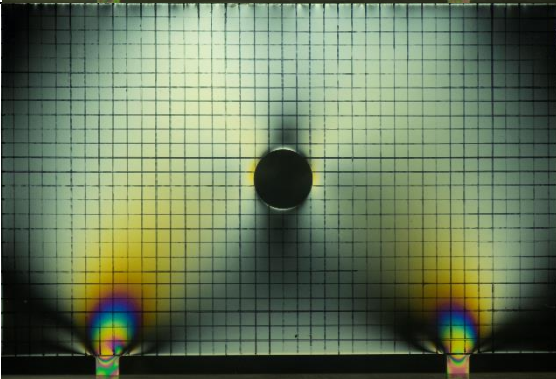
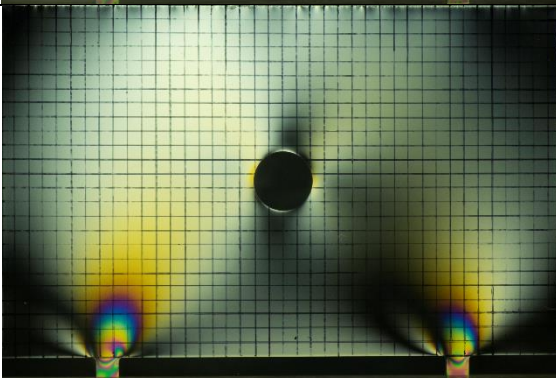
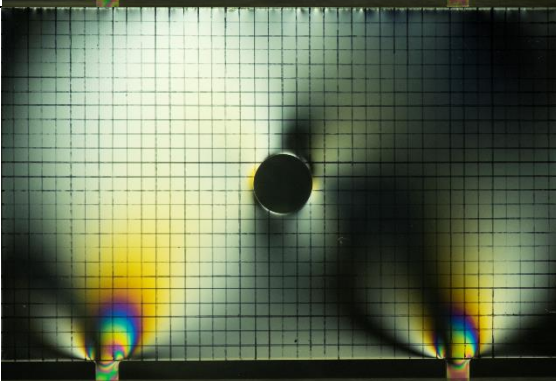
Çizelge 5.3 : Yüklenmiş model, Delikli numune.



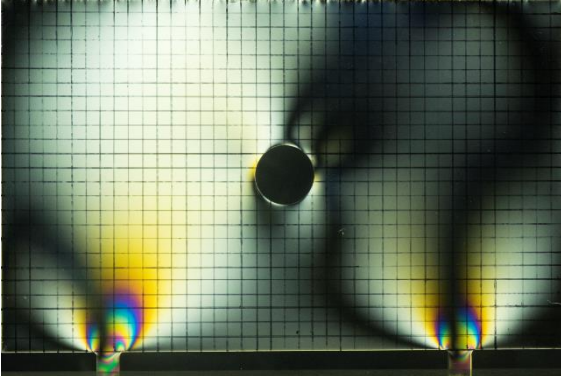
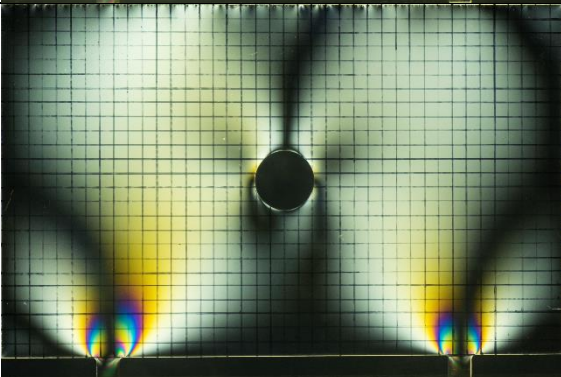
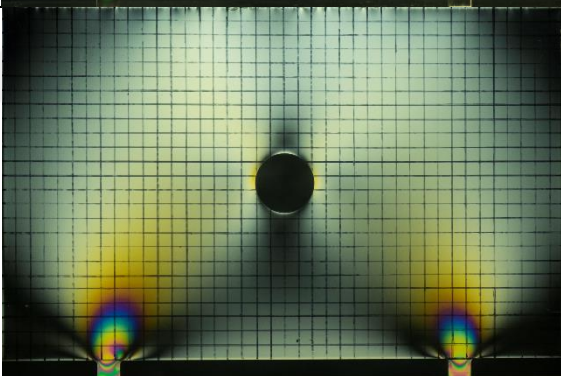
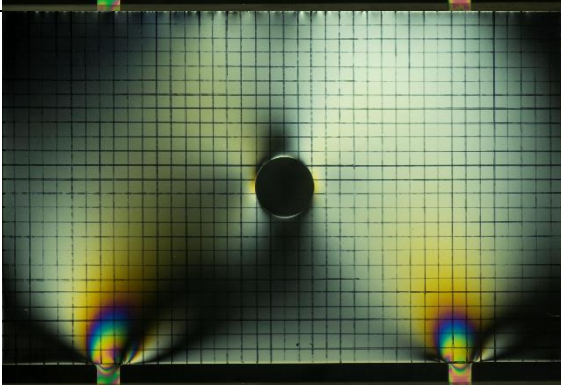
Çizelge 5.3 : Yüklendiş model, Delikli numune (devam).

1		$W = 0.0552 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
2		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
3		$0.0183 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
4		$0.0299 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

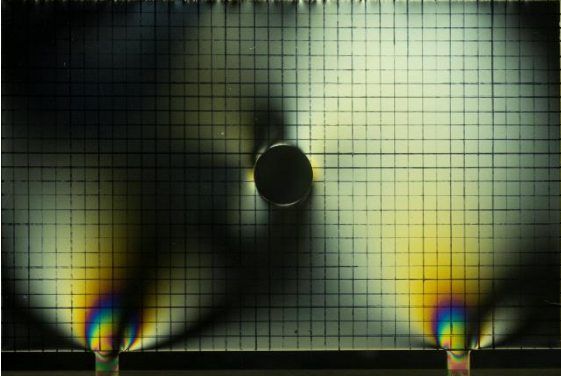
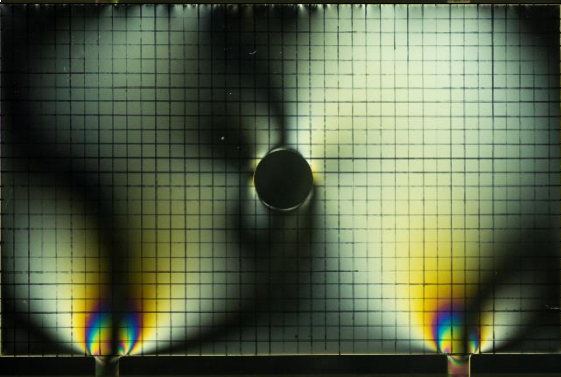
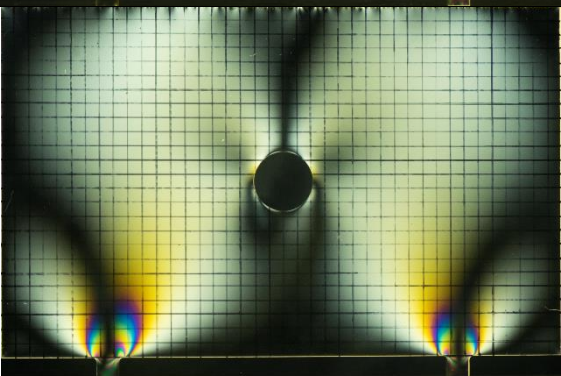
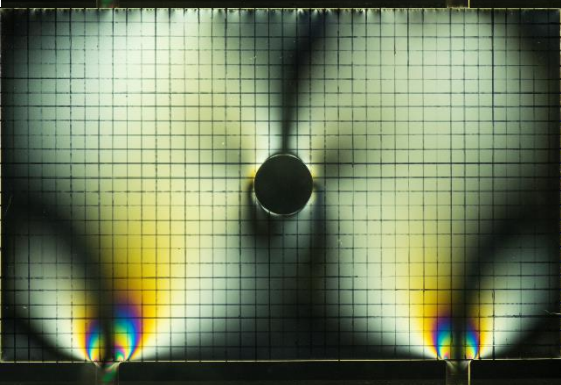
Çizelge 5.3 : Yüklenmiş model, Delikli numune (devam).

5		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	P. Açısı = +42°
6		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+52°
7		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+62°
8		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+72°

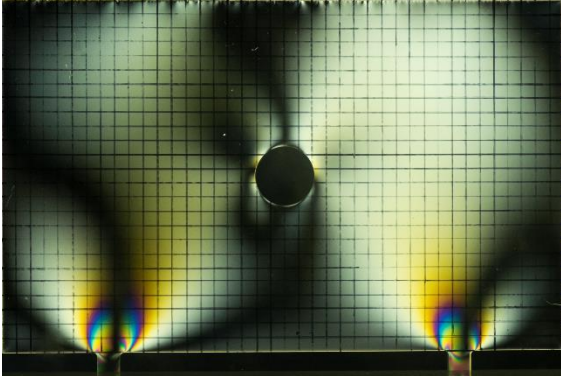
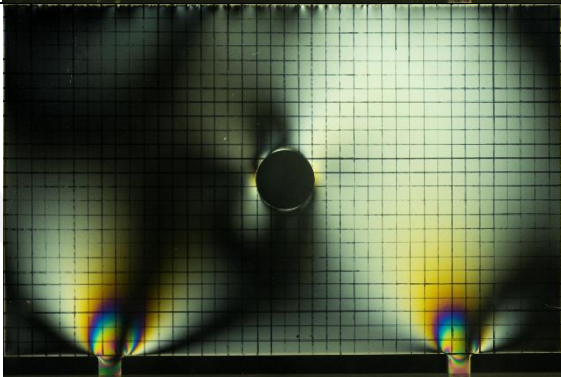
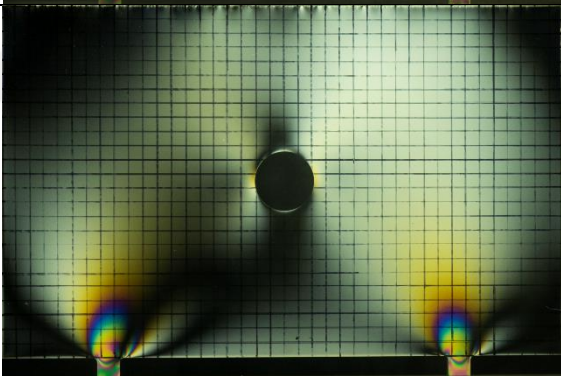
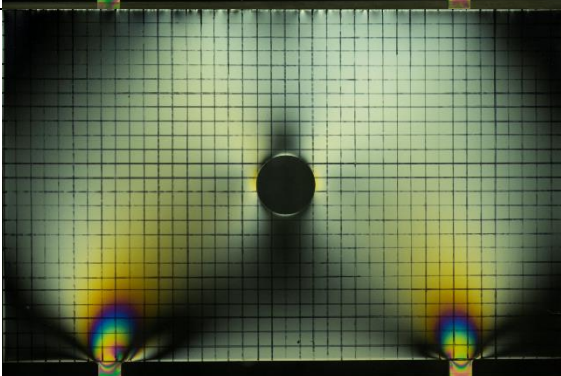
Çizelge 5.3 : Yüklendi model, Delikli numune (devam).

9		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+82°
10		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+92°
11		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+47°
12		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+32°

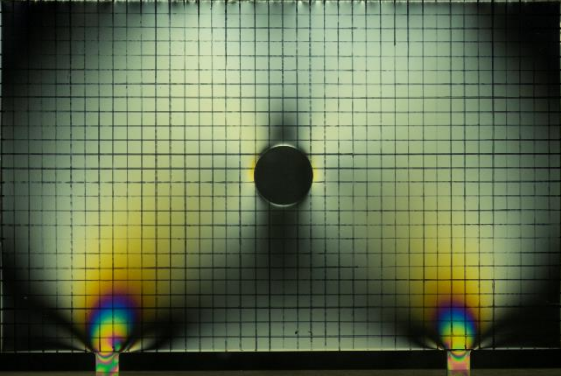
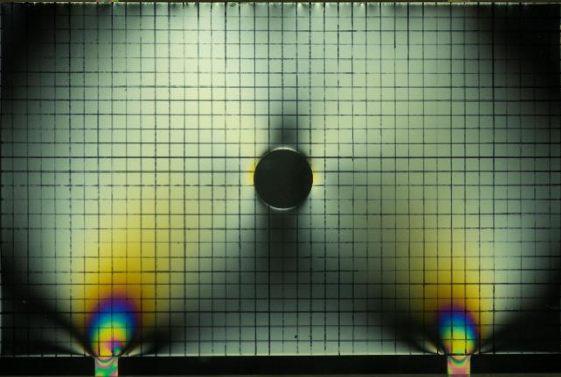
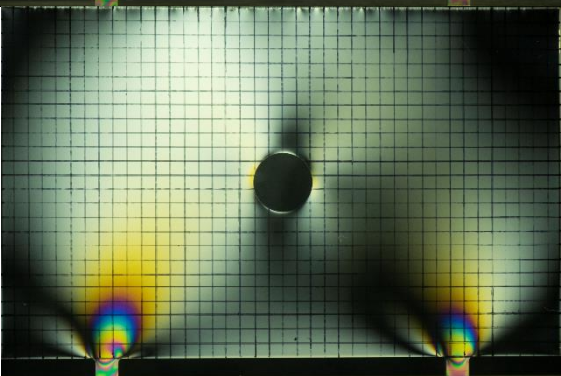
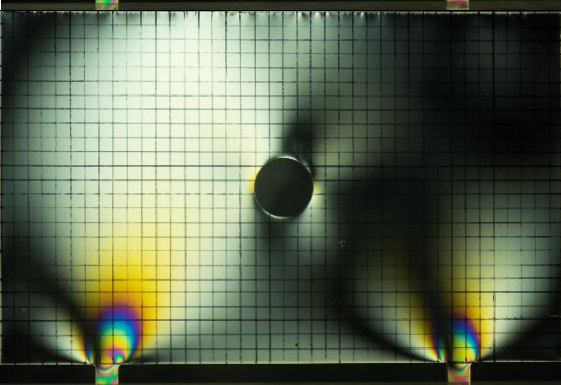
Çizelge 5.3 : Yüklendiş model, Delikli numune (devam).

13		0.0494 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+22°
14		0.0494 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+12°
15		0.0494 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+2°
16		0.0494 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-88°

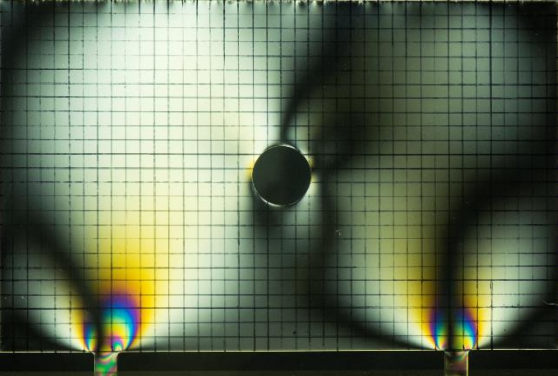
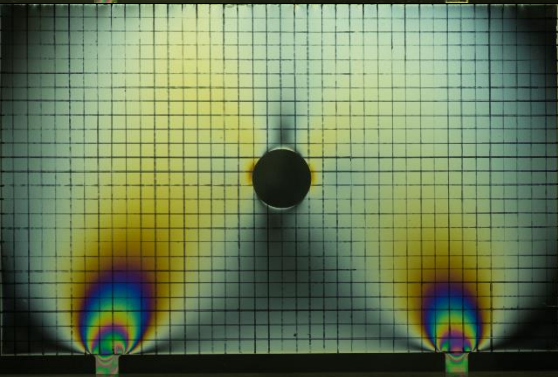
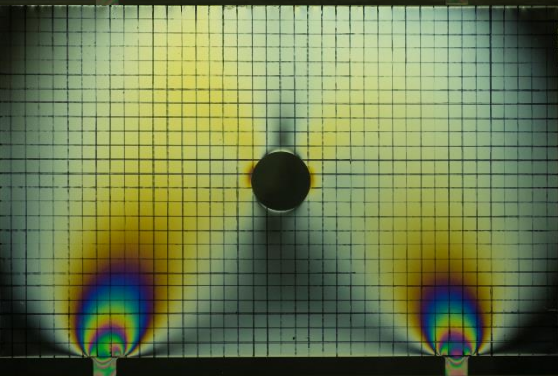
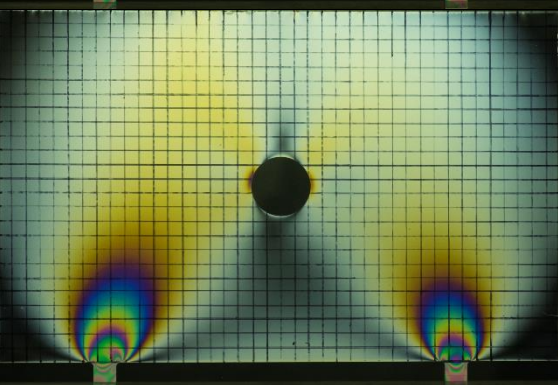
Çizelge 5.3 : Yüklendi model, Delikli numune (devam).

17		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-78°
18		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-68°
19		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-58°
20		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-48°

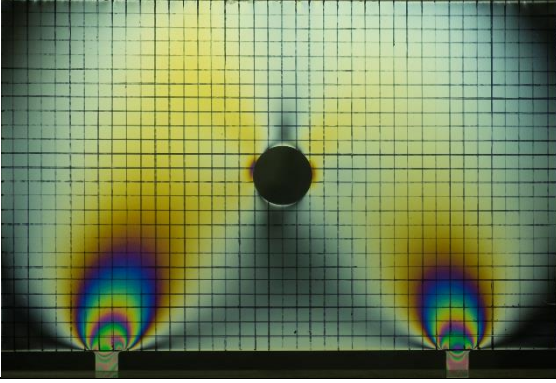
Çizelge 5.3 : Yüklendiş model, Delikli numune (devam).

21		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-43°
22		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-38°
23		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-28°
24		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-18°

Çizelge 5.3 : Yüklendiş model, Delikli numune (devam).

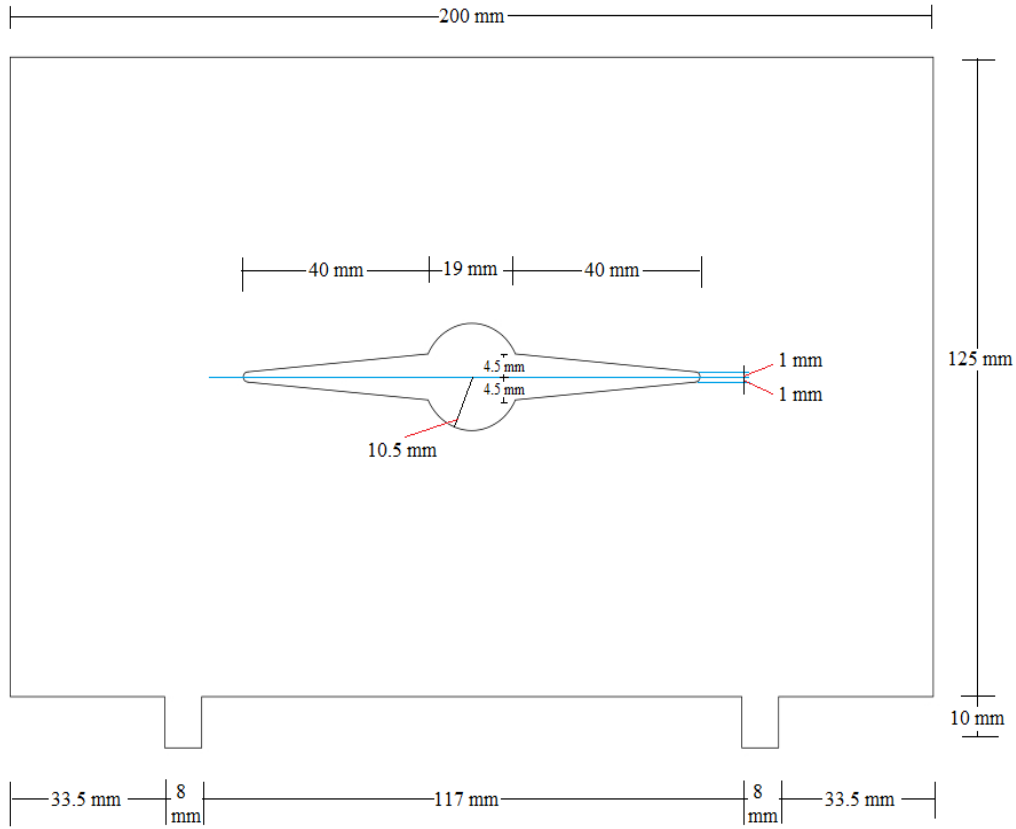
25		$0.0494 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-8°
26		$0.0653 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
27		$0.0682 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
28		$0.0711 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

Çizelge 5.3 : Yüklenmiş model, Delikli numune (devam).

29		$0.0740 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
----	---	--	--

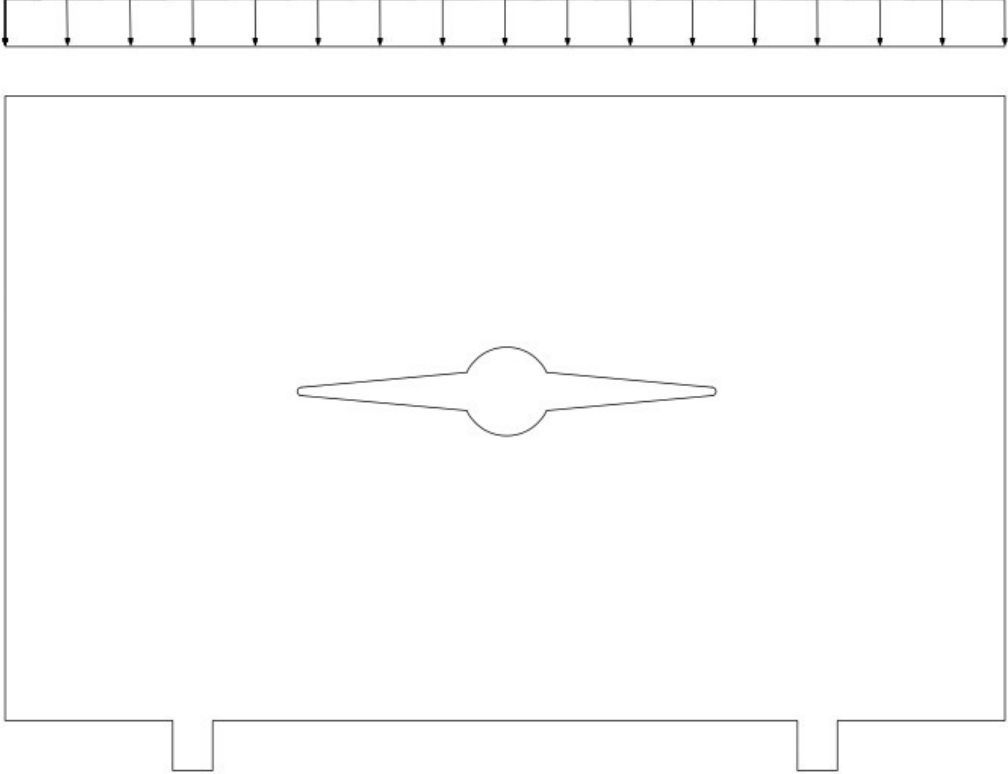
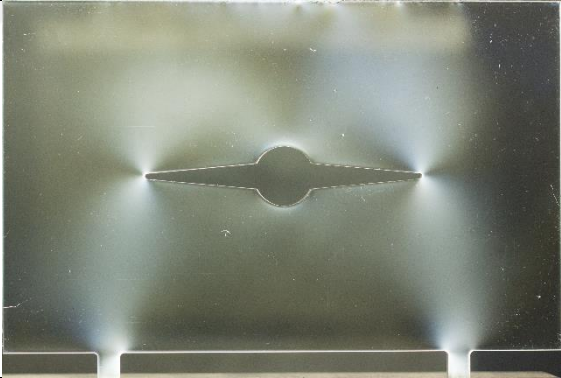
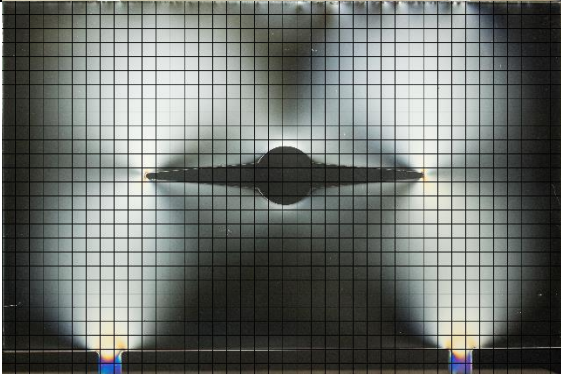
5.5 Oyuklu Numune

Dördüncü deneyde, Şekil 5.11 de görüldüğü gibi, duvar paneldeki daire deliğin sağ ve sol taraflarına 40 mm uzunlukta birer çentik açtırılmıştır (Şekil 5.11) ve deneyi aynen referans numune deneydeki gibi uygulanmıştır.

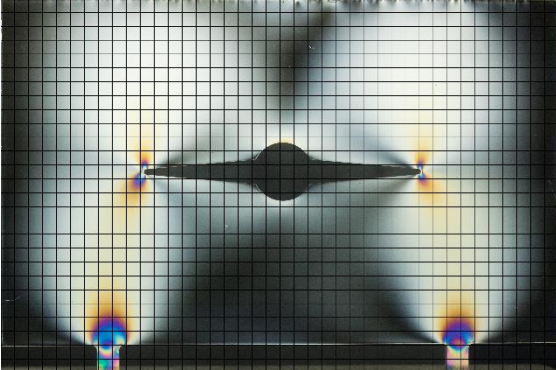
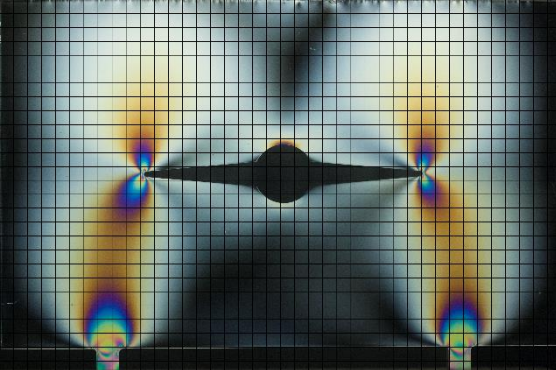
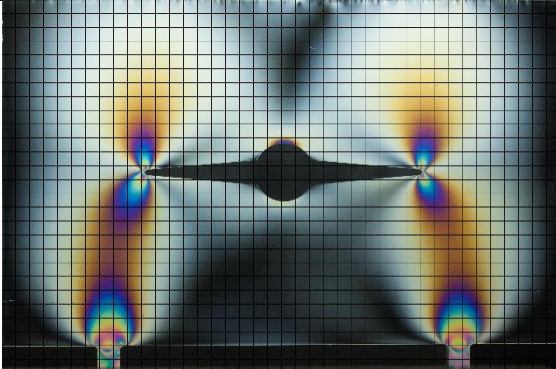
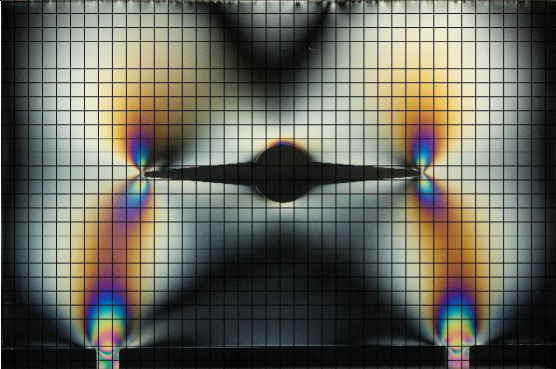


Şekil 5.11: Oyuklu numune boyutları.

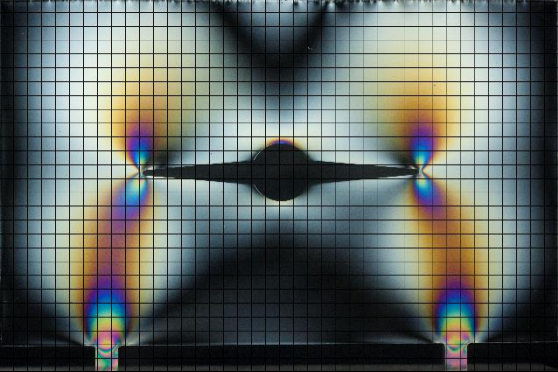
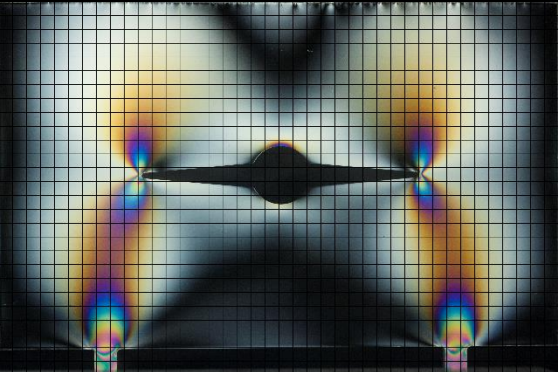
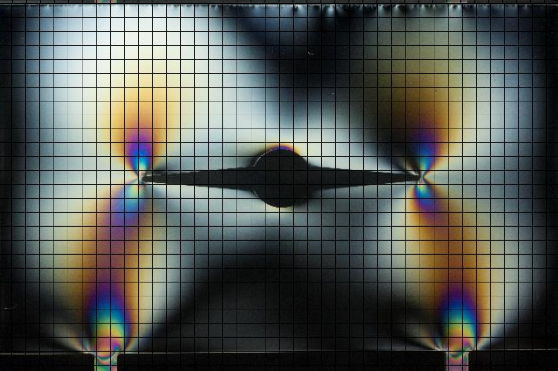
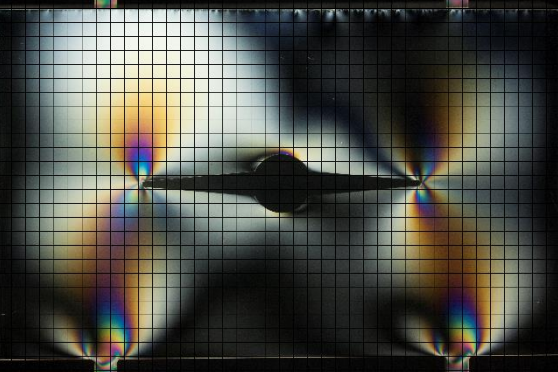
Çizelge 5.4 : Yüklenmiş model, Oyuklu numune.

		W 	
1		$W = 0.0030 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
2		$0.0175 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	

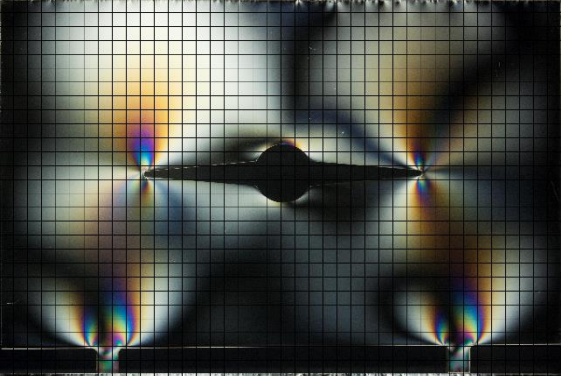
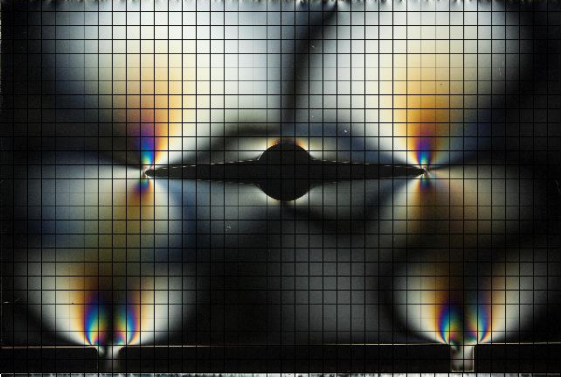
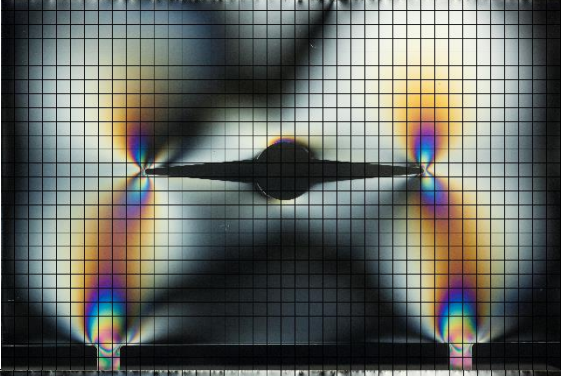
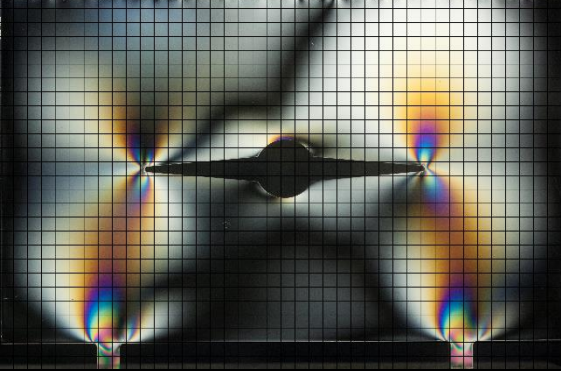
Çizelge 5.4 : Yüklenmiş model, Oyuklu numune (devam).

3		$0.0327 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
4		$0.0473 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
5		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	
6		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	P. Açısı = +42°

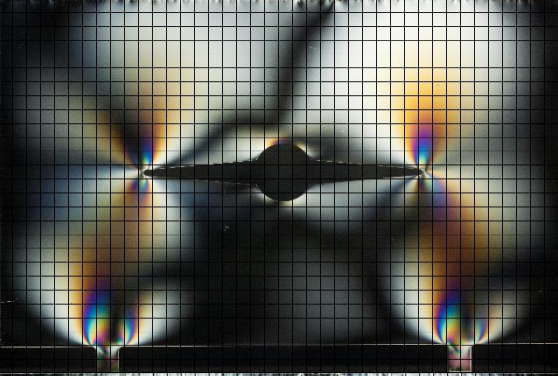
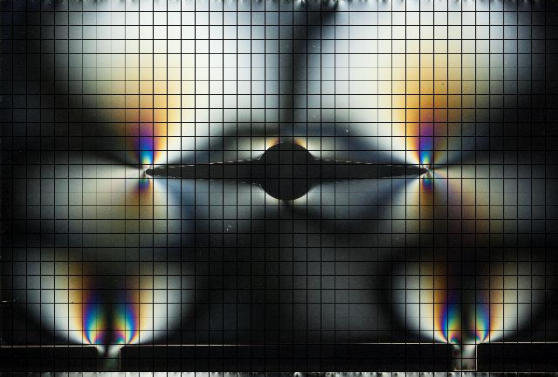
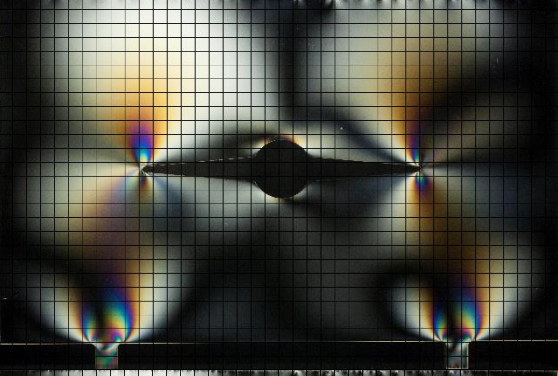
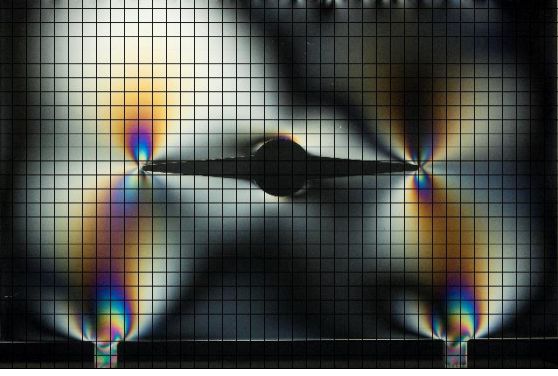
Çizelge 5.4 : Yüklendiş model, Oyuklu numune (devam).

7		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+47°
8		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+52°
9		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+62°
10		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+72°

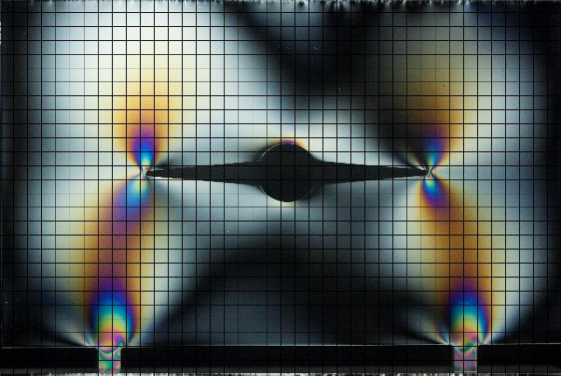
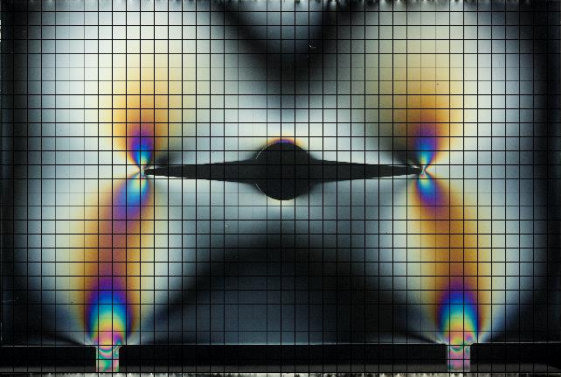
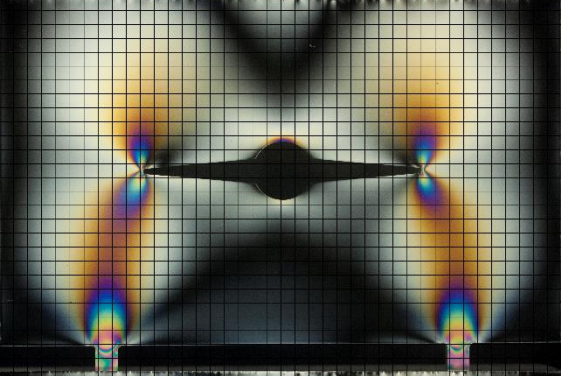
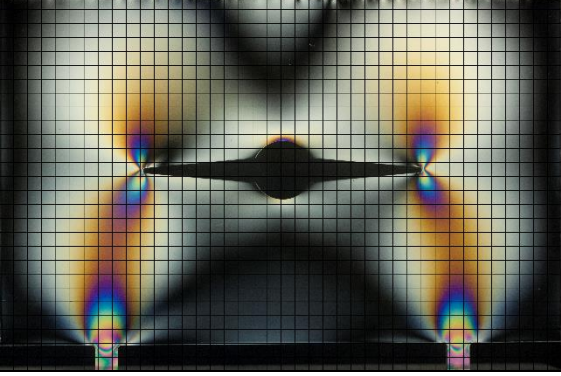
Çizelge 5.4 : Yüklenmiş model, Oyuklu numune (devam).

11		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+82°
12		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+92°
13		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+32°
14		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+22°

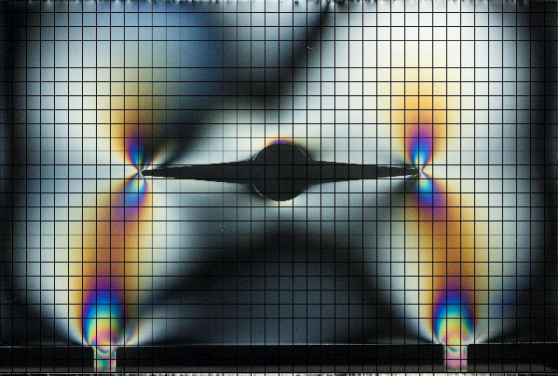
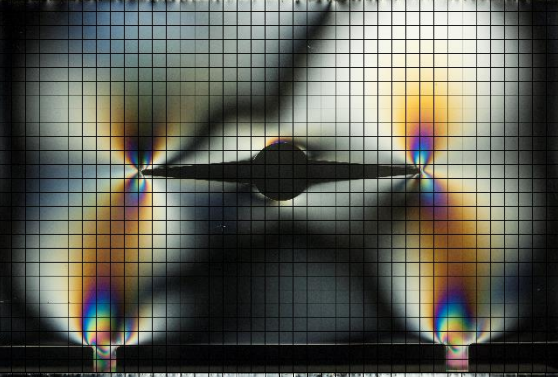
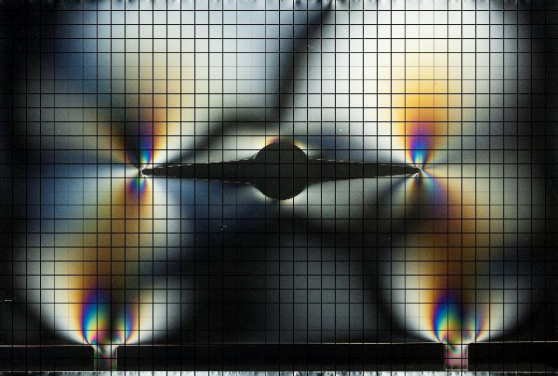
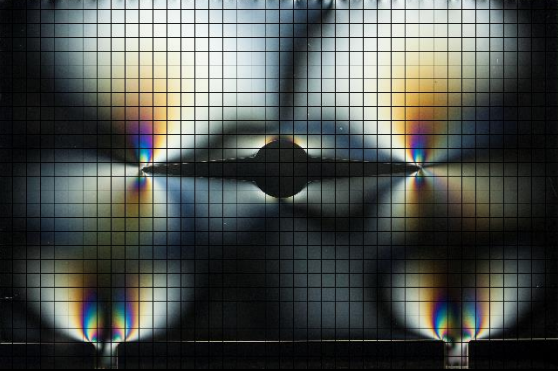
Çizelge 5.4 : Yüklendi model, Oyuklu numune (devam).

15		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+12°
16		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	+2°
17		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-8°
18		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-18°

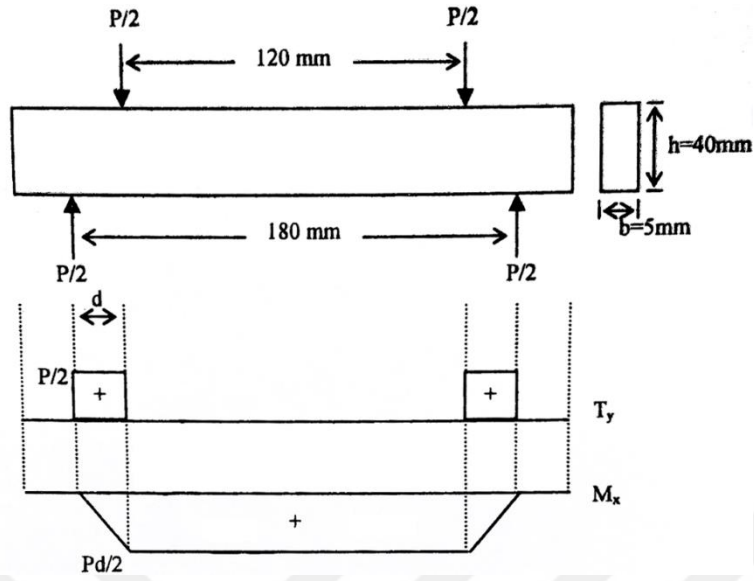
Çizelge 5.4 : Yüklendiş model, Oyuklu numune (devam).

19		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-28°
20		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-38°
21		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-43°
22		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-48°

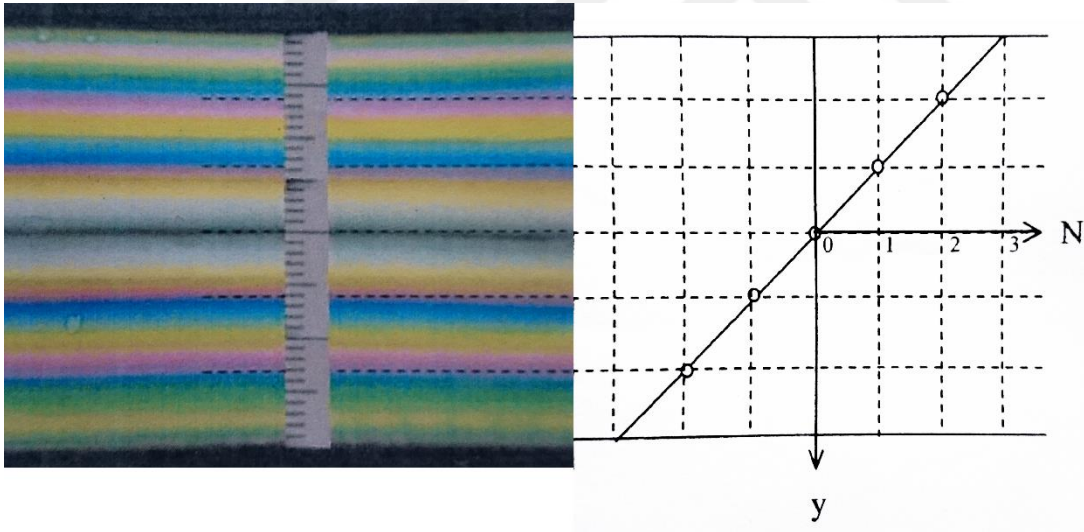
Çizelge 5.4 : Yüklendi model, Oyuklu numune (devam).

23		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-58°
24		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-68°
25		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-78°
26		$0.0528 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-88°

5.6 Dört Nokta Çekme Deneyi



Şekil 5.12: Dört nokta çekme mekanizi.



Şekil 5.13: Y=20mm , N=3.

$$P = 480 \text{ N}$$

$$M_x = \frac{Pd}{2} = \frac{480 \times 30}{2} = 7200 \text{ Nmm}$$

$$I_x = \frac{5 \times 40^3}{12} = 26666.67 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{I_x} \frac{h}{2} = \frac{7200}{26666.67} \times 20 = 5.4 \text{ MPa}$$

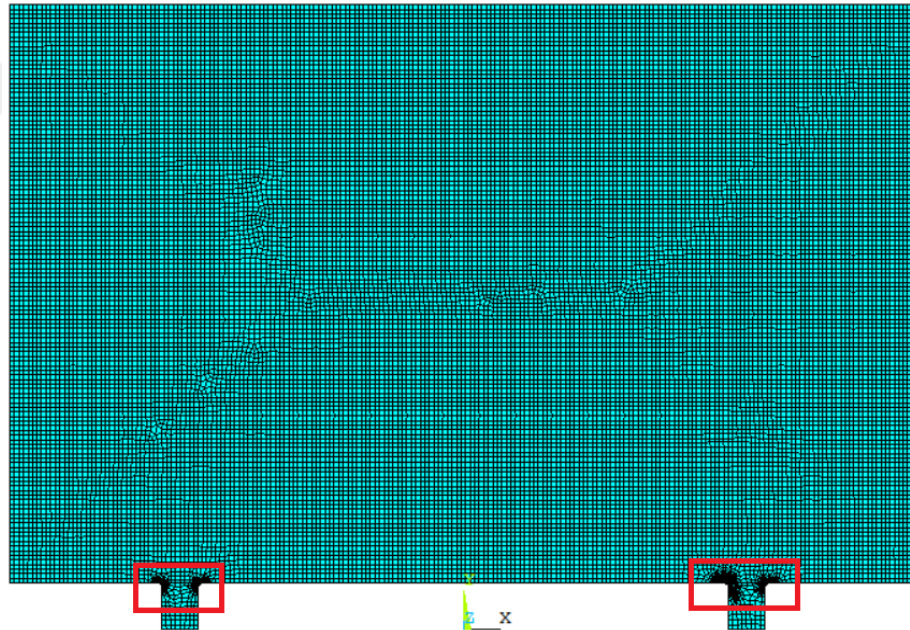
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{b} f_{\sigma} \rightarrow 5.4 = \frac{3}{5} f_{\sigma} \rightarrow f_{\sigma} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm} \cdot \text{fringe}}$$

5.7 Ansys Modeli

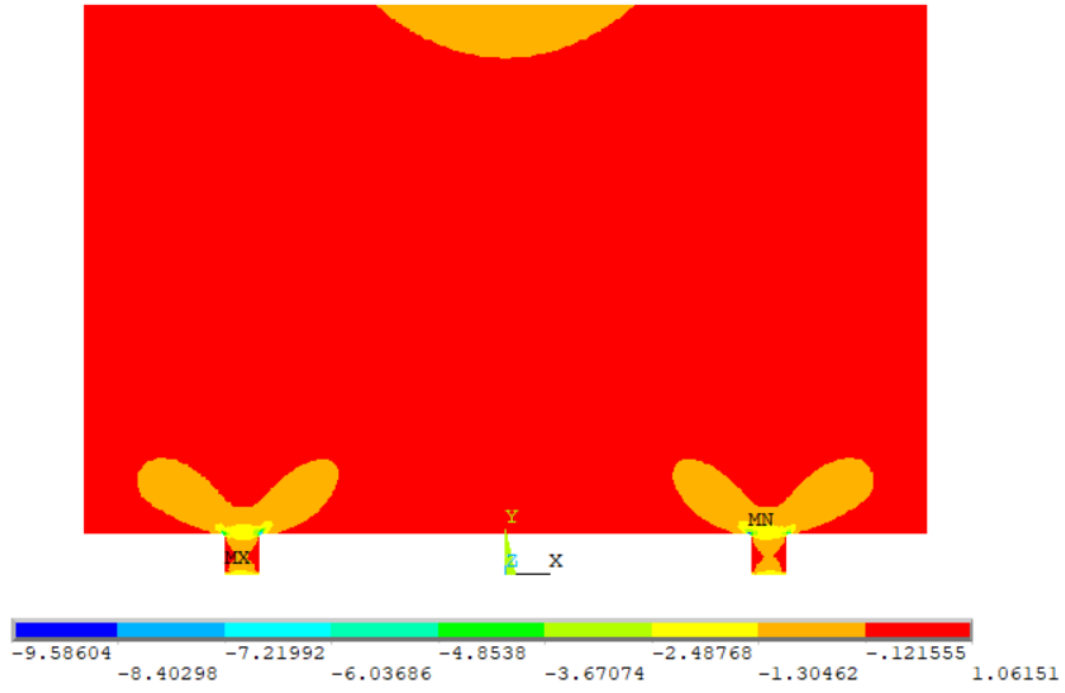
Bu bölümde, fotoelastisite deneyleri yapılan numunelerin, Ansys 8.0 sonlu elemanlar programı ile hazırlanan modelleri çözülmüştür. Modellerde, 8 düğüm noktası olan, her düğüm noktasında 2 yer değiştirme serbestliğine sahip, düzlem gerilme problemi için PLANE183 düzlem sonlu elemanı seçilerek, eleman kalınlığı $t=5\text{mm}$ olarak verilmiştir. Aşağıda referans, daire delikli ve oyuklu numunelerine ait modeller açıklanmıştır.

5.7.1 Referans numune

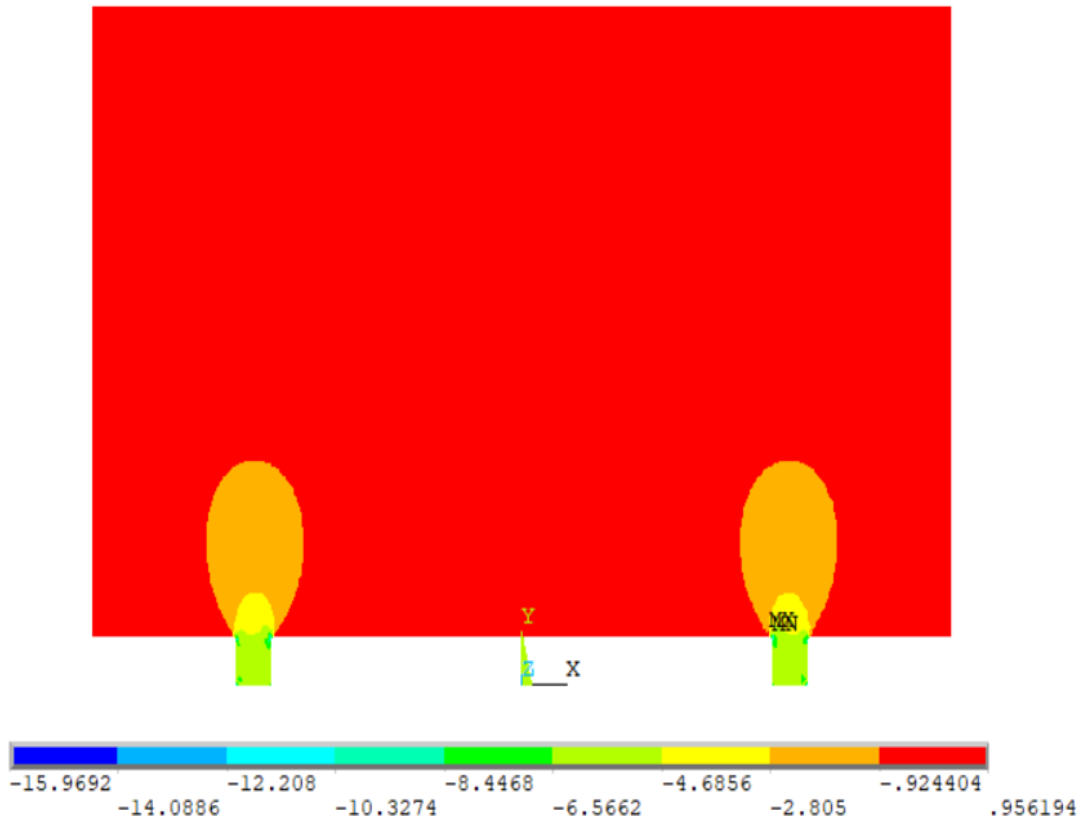
Bu aşamada, 0.485 MPa basınç yükü altında referans numunenin deneyi modellenmiştir. Malzemede, Elastisite modülü $E = 2.5\text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.38$ olarak lineer model kullanılmıştır. Modelin gerilme yığılması beklenen panel-mesnet birleşim köşelerinde sonlu eleman ağı sıklaştırılmıştır (Şekil 5.14).



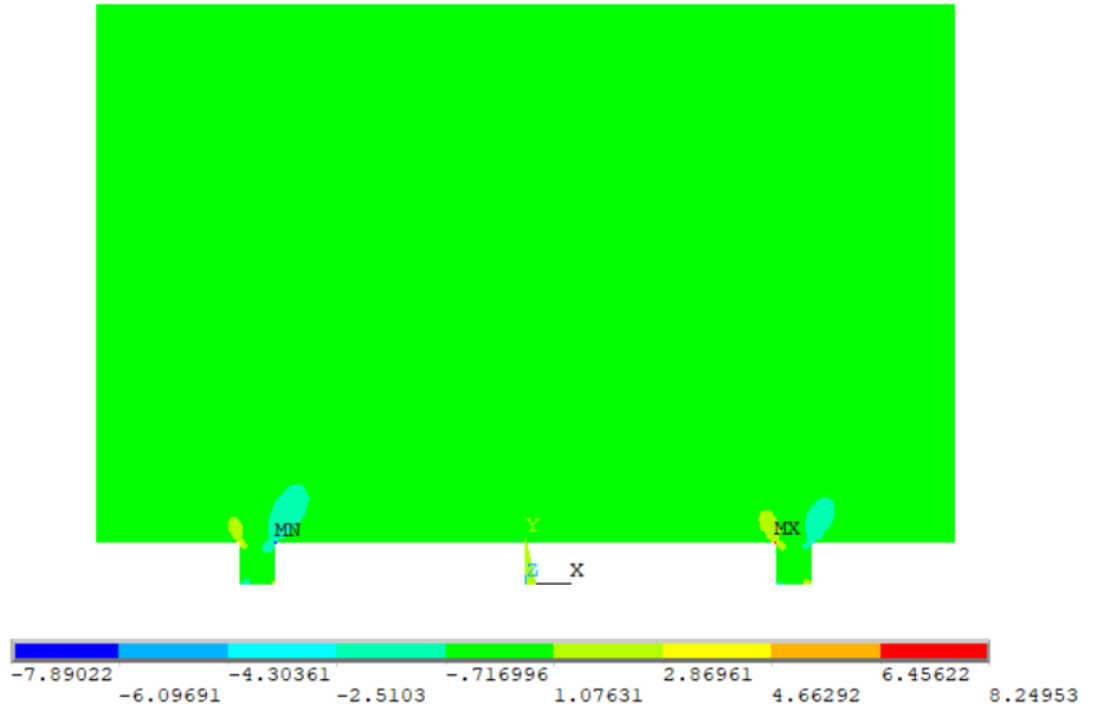
Şekil 5.14: Kırmızı işaretli bölümde sonlu eleman ağı arttırılmıştır, Referans numune.



Şekil 5.15: S_x , Referans numune.



Şekil 5.16: S_y , Referans numune.



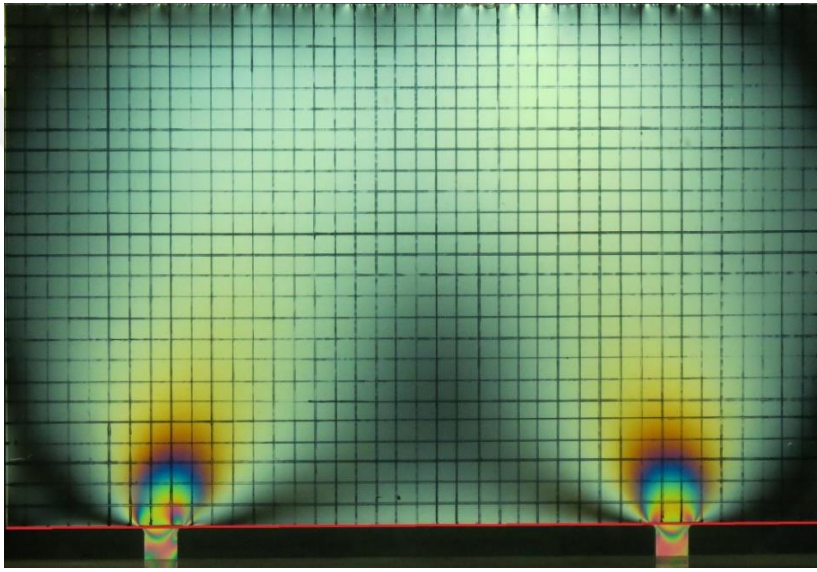
Şekil 5.17: S_{xy} , Referans numune.



Şekil 5.18: Şekil değiştirmiş hali, Referans numune.

5.7.2 Verilerin analizi referans numune

Fotoelastisite deney sonuçları ile, sonlu eleman sayısal çözümleri karşılaştırmak amacı ile, Şekil 5.19 da kırmızı çizgi ile görülen, panelin alt yatay sınırı seçilmiştir. Bu çizgi üzerinde, sonlu elemanlar çözümü olan S_x, S_y ve S_{xy} verileri alınarak, Excel programında $\sigma_1 - \sigma_2$ değerleri hesaplatılmıştır. Bu değerler Çizelge 5.5 te verilmiş ve $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı Şekil 5.20 de çizilmiştir.



Şekil 5.19: Y = 10 mm, X = 0-200 mm, kırmızı çizgi, Referans numune.

Çizelge 5.5 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Referans numune.

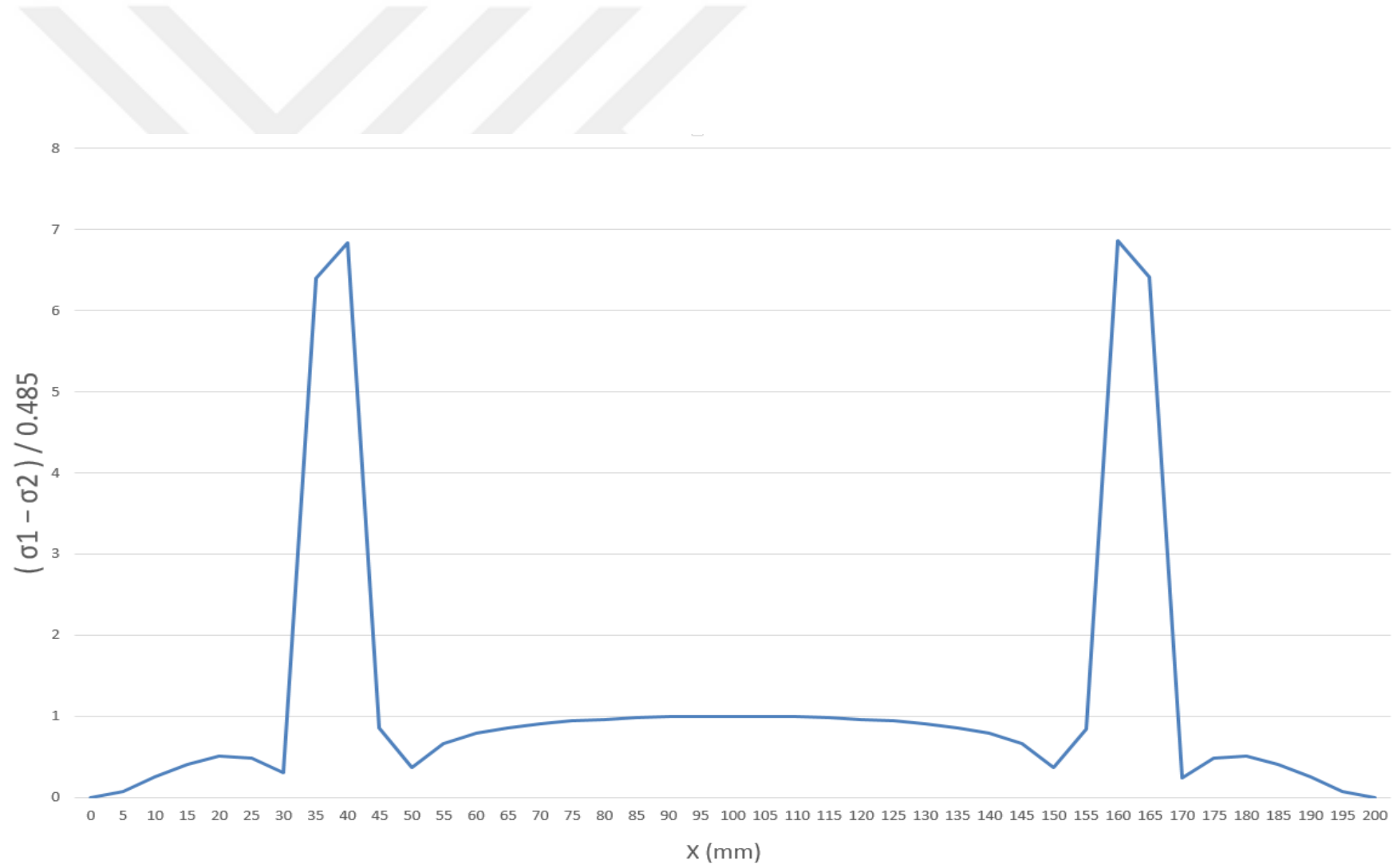
X(mm)	S _x (MPa)	S _y (MPa)	S _{xy} (MPa)	S ₀ (MPa)	R(MPa)	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ ₁ – σ ₂	$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{0.485}$
0	-1.46E-04	-1.53E-04	1.12E-04	-0.00015	0.000112	0.0000	-0.0003	0.0002	0.00046
5	3.63E-02	-1.16E-04	-3.62E-04	0.018106	0.018225	0.0363	-0.0001	0.0364	0.07515
10	0.12123	4.55E-05	-4.47E-04	0.060638	0.060594	0.1212	0.0000	0.1212	0.24987
15	0.19714	1.18E-04	-5.93E-04	0.098629	0.098513	0.1971	0.0001	0.1970	0.40624
20	0.24494	2.65E-04	-1.11E-03	0.122603	0.122343	0.2449	0.0003	0.2447	0.50451
25	0.23181	1.09E-03	-3.12E-03	0.116451	0.115401	0.2319	0.0011	0.2308	0.47588
30	-0.12868	1.41E-02	-1.82E-02	-0.05731	0.073656	0.0163	-0.1310	0.1473	0.30374
35	-2.1393	-4.98E+00	6.23E-01	-3.562	1.553059	-2.0089	-5.1151	3.1061	6.40437
40	-2.6078	-5.42E+00	-8.78E-01	-4.0146	1.658367	-2.3562	-5.6730	3.3167	6.83863
45	-0.40389	1.06E-02	1.78E-02	-0.19667	0.207984	0.0113	-0.4047	0.4160	0.85767
50	0.17795	1.28E-03	3.26E-03	0.089613	0.088397	0.1780	0.0012	0.1768	0.36452
55	0.31857	3.19E-04	1.08E-03	0.159445	0.159129	0.3186	0.0003	0.3183	0.6562
60	0.38114	1.16E-04	4.83E-04	0.190628	0.190512	0.3811	0.0001	0.3810	0.78562
65	0.41684	5.49E-05	2.56E-04	0.208447	0.208393	0.4168	0.0001	0.4168	0.85935
70	0.43989	3.07E-05	1.50E-04	0.21996	0.21993	0.4399	0.0000	0.4399	0.90693
75	0.45577	1.94E-05	9.34E-05	0.227895	0.227875	0.4558	0.0000	0.4558	0.93969

Çizelge 5.5 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Referans numune (devam).

80	0. 467	1. 37E-05	5. 99E-05	0. 233507	0. 233493	0. 4670	0. 0000	0. 4670	0. 96286
85	4. 75E-01	1. 05E-05	3. 81E-05	0. 23744	0. 23743	0. 4749	0. 0000	0. 4749	0. 97909
90	4. 80E-01	8. 72E-06	2. 27E-05	0. 240054	0. 240046	0. 4801	0. 0000	0. 4801	0. 98988
95	4. 83E-01	7. 82E-06	1. 06E-05	0. 241559	0. 241551	0. 4831	0. 0000	0. 4831	0. 99609
100	4. 84E-01	7. 55E-06	-3. 01E-11	0. 242049	0. 242041	0. 4841	0. 0000	0. 4841	0. 99811
105	4. 83E-01	7. 82E-06	-1. 06E-05	0. 241559	0. 241551	0. 4831	0. 0000	0. 4831	0. 99609
110	4. 80E-01	8. 72E-06	-2. 27E-05	0. 240054	0. 240046	0. 4801	0. 0000	0. 4801	0. 98988
115	4. 75E-01	1. 05E-05	-3. 81E-05	0. 23744	0. 23743	0. 4749	0. 0000	0. 4749	0. 97909
120	0. 467	1. 37E-05	-5. 99E-05	0. 233507	0. 233493	0. 4670	0. 0000	0. 4670	0. 96286
125	0. 45577	1. 94E-05	-9. 34E-05	0. 227895	0. 227875	0. 4558	0. 0000	0. 4558	0. 93969
130	0. 43989	3. 07E-05	-1. 50E-04	0. 21996	0. 21993	0. 4399	0. 0000	0. 4399	0. 90693
135	0. 41683	5. 49E-05	-2. 56E-04	0. 208442	0. 208388	0. 4168	0. 0001	0. 4168	0. 85933
140	0. 38114	1. 16E-04	-4. 83E-04	0. 190628	0. 190512	0. 3811	0. 0001	0. 3810	0. 78562
145	0. 31857	3. 20E-04	-1. 08E-03	0. 159445	0. 159129	0. 3186	0. 0003	0. 3183	0. 6562
150	0. 17838	1. 52E-03	-3. 60E-03	0. 08995	0. 088504	0. 1785	0. 0014	0. 1770	0. 36496
155	-0. 40711	1. 16E-03	-2. 86E-03	-0. 20298	0. 204153	0. 0012	-0. 4071	0. 4083	0. 84187

Çizelge 5.5 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Referans numune (devam).

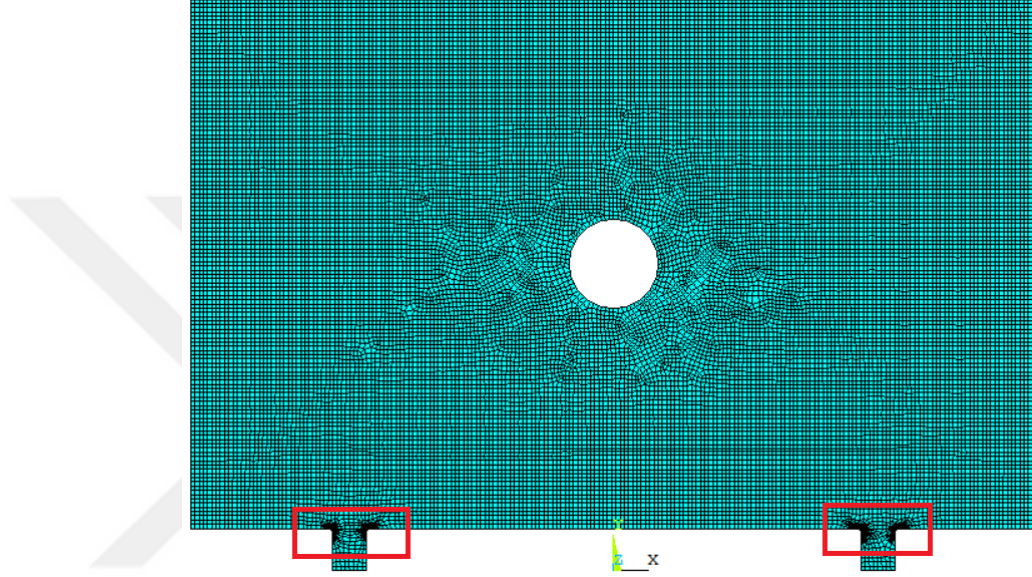
160	-2. 6	-5. 42E+00	8. 87E-01	-4. 00785	1. 663724	-2. 3441	-5. 6716	3. 3274	6. 86072
165	-2. 141	-4. 99E+00	-6. 25E-01	-3. 5647	1. 554814	-2. 0099	-5. 1195	3. 1096	6. 4116
170	-0. 11008	5. 80E-03	5. 12E-03	-0. 05214	0. 058164	0. 0060	-0. 1103	0. 1163	0. 23985
175	2. 32E-01	1. 05E-03	3. 18E-03	0. 116483	0. 115481	0. 2320	0. 0010	0. 2310	0. 47621
180	0. 24493	2. 65E-04	1. 11E-03	0. 122598	0. 122337	0. 2449	0. 0003	0. 2447	0. 50448
185	0. 19714	1. 18E-04	5. 93E-04	0. 098629	0. 098513	0. 1971	0. 0001	0. 1970	0. 40624
190	0. 12123	4. 55E-05	4. 47E-04	0. 060638	0. 060594	0. 1212	0. 0000	0. 1212	0. 24987
195	3. 63E-02	-1. 16E-04	3. 62E-04	0. 018106	0. 018225	0. 0363	-0. 0001	0. 0365	0. 07515
200	-1. 46E-04	-1. 53E-04	-1. 13E-04	-0. 00015	0. 000113	0. 0000	-0. 0003	0. 0002	0. 00046



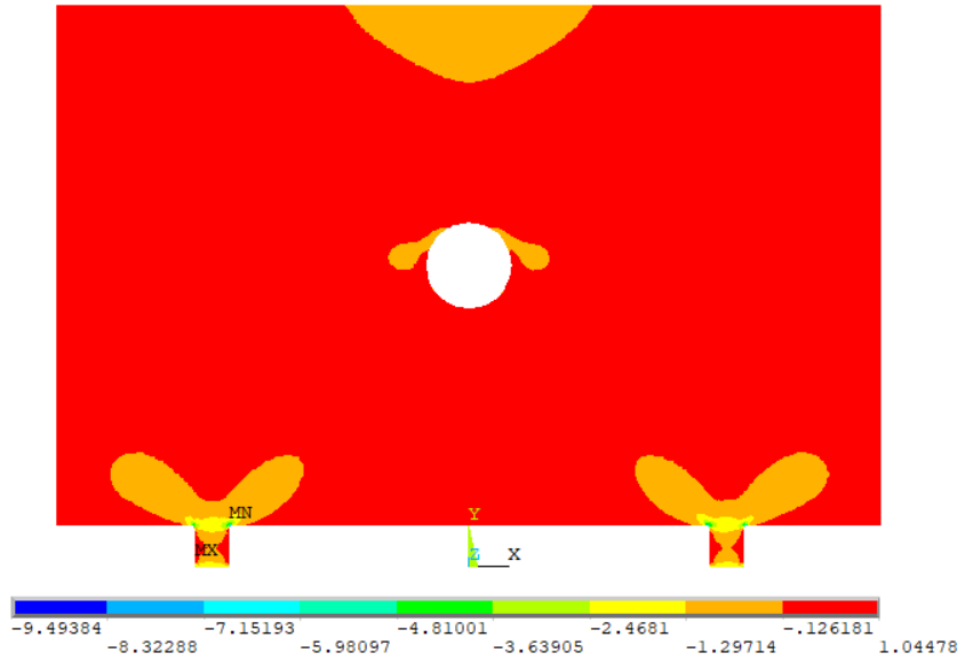
Şekil 5.20: $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı, Referans numune.

5.7.3 Daire delikli numune

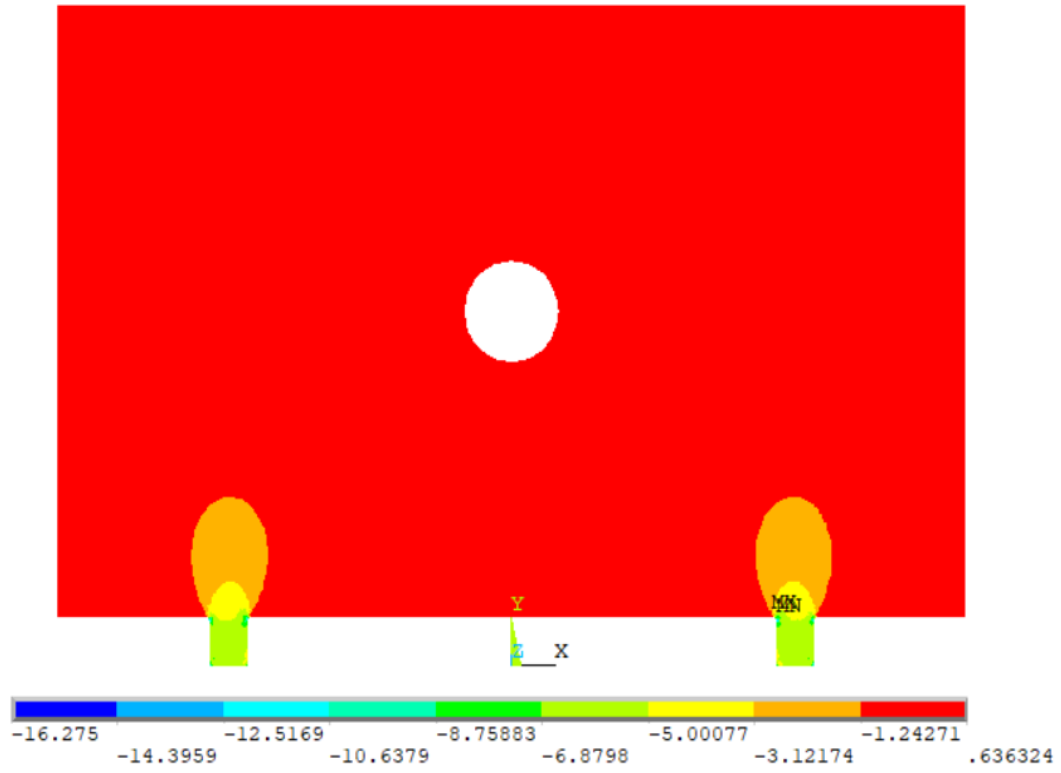
Bu aşamada, 0.485 MPa basınç yükü altında referans numunenin deneyi modellenmiştir. Malzemede, Elastisite modülü $E = 2.5 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.38$ olarak lineer model kullanılmıştır. Modelin gerilme yığılması beklenen panel-mesnet birleşim köşelerinde sonlu eleman ağı sıklaştırılmıştır (Şekil 5.21).



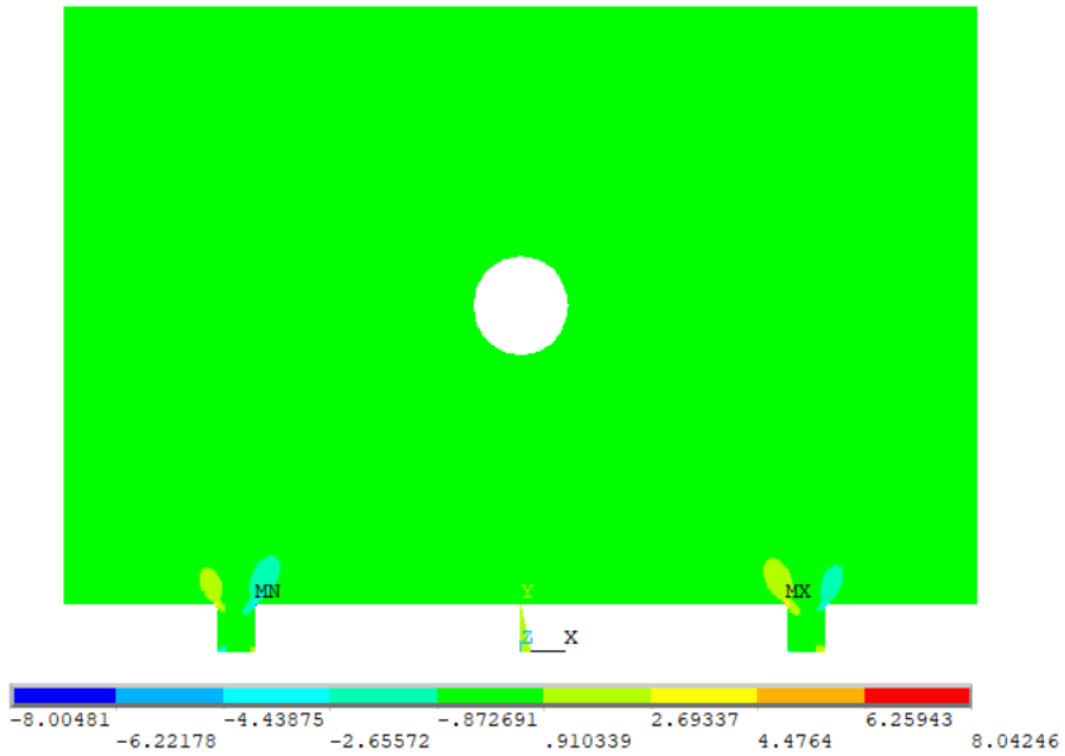
Şekil 5.21: Kırmızı işaretli bölümde sınır eleman ağı arttırılmıştır, Delikli numune.



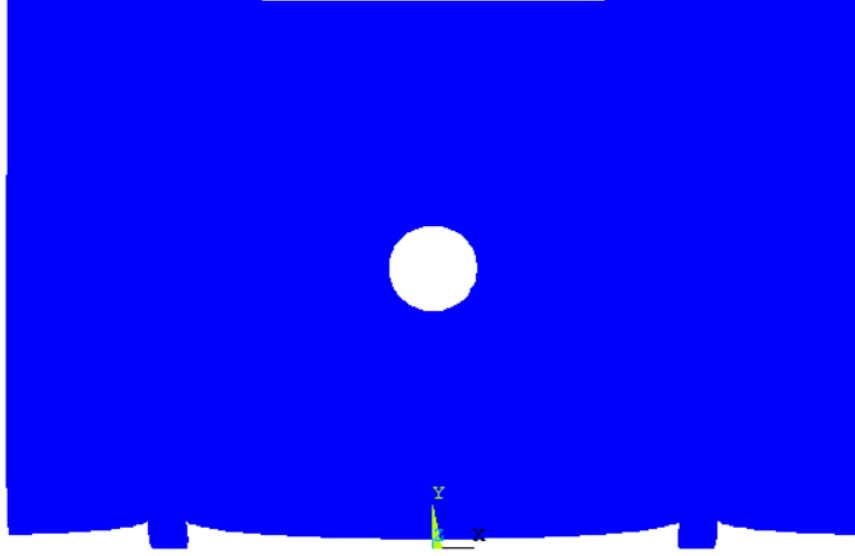
Şekil 5.22: S_x , Delikli numune.



Şekil 5.23: S_y , Delikli numune.



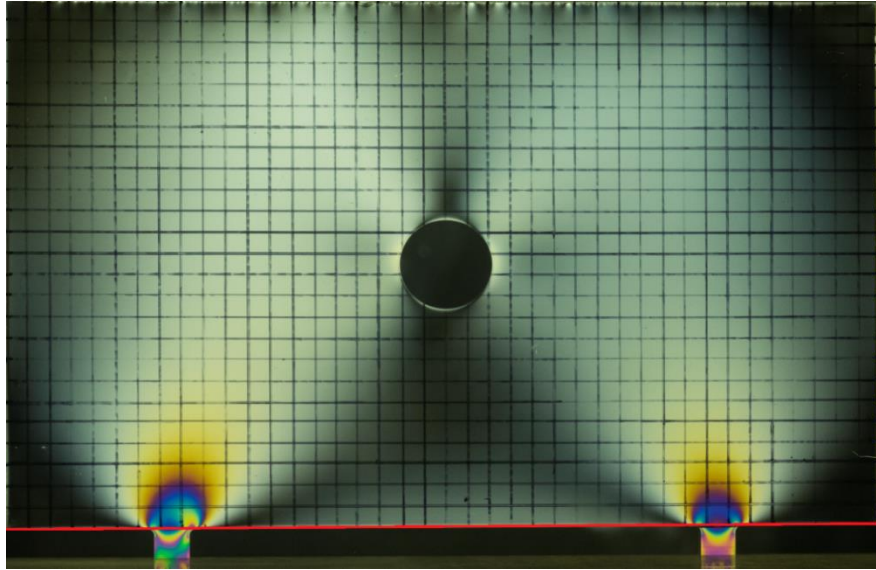
Şekil 5.24: S_{xy} , Delikli numune.



Şekil 5.25: Şekil değiştirmiş hali, Delikli numune.

5.7.4 Verilerin analizi delikli numune

Fotoelastisite deney sonuçları ile, sonlu eleman sayısal çözümleri karşılaştırmak amacı ile, Şekil 5.26 da kırmızı çizgi ile görülen, panelin alt yatay sınırı seçilmiştir. Bu çizgi üzerinde, sonlu elemanlar çözümü olan S_x , S_y ve S_{xy} verileri alınarak, Excel programında $\sigma_1 - \sigma_2$ değerleri hesaplatılmıştır. Bu değerler Çizelge 5.6 da verilmiş ve $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı Şekil 5.27 de çizilmiştir.



Şekil 5.26: $Y = 10$ mm, $X = 0-200$ mm, Kırmızı çizgi, Delikli numune.

Çizelge 5.6 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Delikli numune.

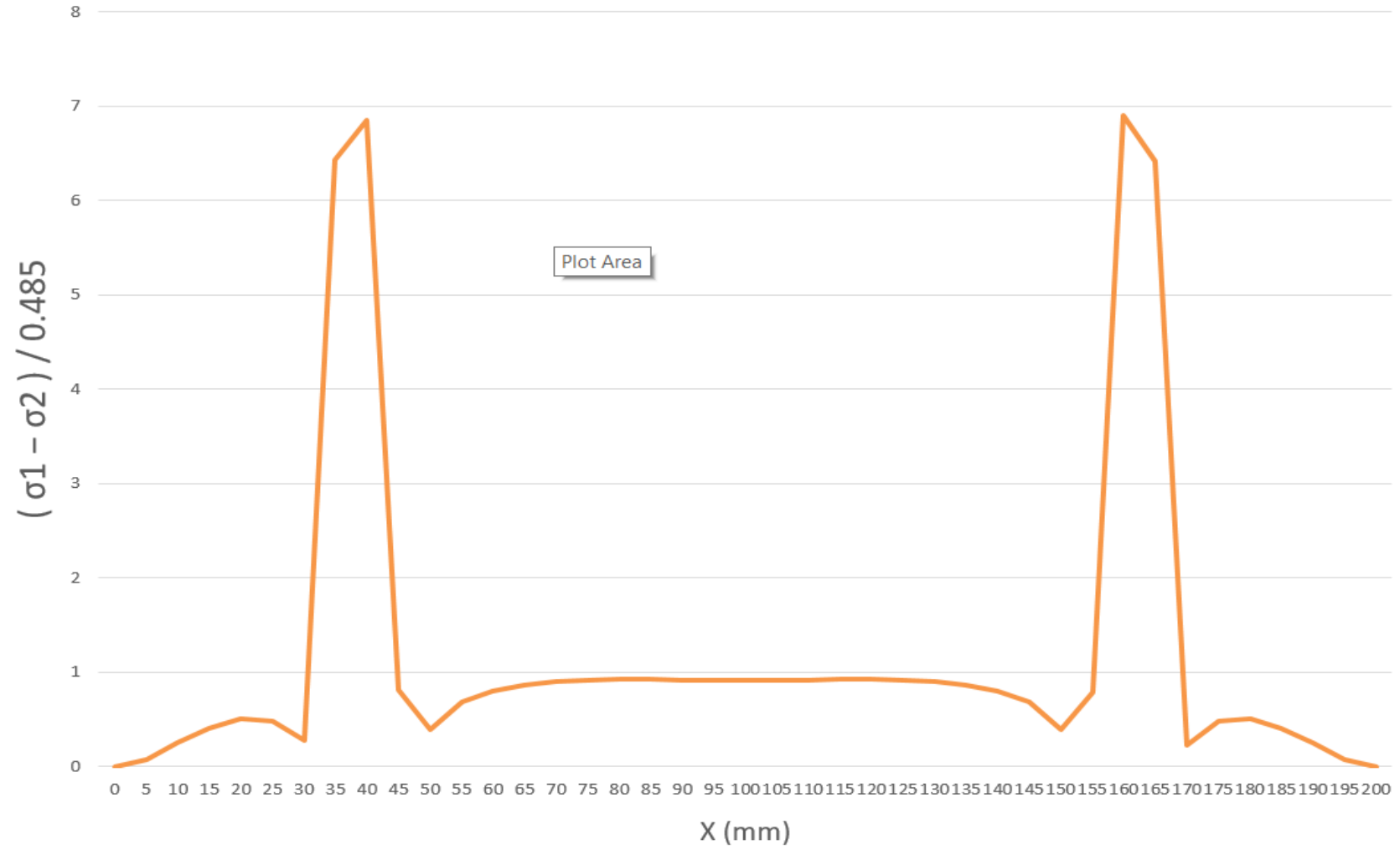
X(mm)	S _x (MPa)	S _y (MPa)	S _{xy} (MPa)	S ₀ (MPa)	R(MPa)	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ ₁ – σ ₂	$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{0.485}$
0	-1.42E-04	-1.50E-04	1.12E-04	-0.00015	0.000112	0.0000	-0.0003	0.0002	0.00046
5	3.62E-02	-1.18E-04	-3.60E-04	0.018026	0.018147	0.0362	-0.0001	0.0363	0.07499
10	0.12134	4.37E-05	-4.47E-04	0.060692	0.06065	0.1213	0.0000	0.1213	0.25062
15	0.19806	1.17E-04	-5.94E-04	0.099088	0.098973	0.1981	0.0001	0.1979	0.40898
20	0.24698	2.65E-04	-1.11E-03	0.123622	0.123363	0.2470	0.0003	0.2467	0.50976
25	0.235	9.94E-04	-2.94E-03	0.117997	0.11704	0.2350	0.0010	0.2341	0.48364
30	-0.10947	1.71E-02	-2.35E-02	-0.0462	0.067506	0.0213	-0.1137	0.1350	0.27895
35	-2.1398	-4.99E+00	6.28E-01	-3.5652	1.557614	-2.0076	-5.1228	3.1152	6.43642
40	-2.5793	-5.40E+00	-8.74E-01	-3.9899	1.659365	-2.3305	-5.6493	3.3187	6.85688
45	-0.38193	8.58E-03	8.33E-03	-0.18668	0.195431	0.0088	-0.3821	0.3909	0.80757
50	0.19393	1.38E-03	3.47E-03	0.097653	0.09634	0.1940	0.0013	0.1927	0.3981
55	0.33133	3.21E-04	1.07E-03	0.165826	0.165508	0.3313	0.0003	0.3310	0.68392
60	0.39027	1.21E-04	4.84E-04	0.195195	0.195075	0.3903	0.0001	0.3902	0.8061
65	0.42094	5.99E-05	2.60E-04	0.2105	0.21044	0.4209	0.0001	0.4209	0.86959
70	0.43739	3.51E-05	1.57E-04	0.218713	0.218677	0.4374	0.0000	0.4374	0.90363
75	0.44527	2.21E-05	1.03E-04	0.222646	0.222624	0.4453	0.0000	0.4452	0.91993

Çizelge 5.6 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Delikli numune (devam).

80	0. 44766	1. 34E-05	7. 15E-05	0. 223837	0. 223823	0. 4477	0. 0000	0. 4476	0. 92489
85	4. 47E-01	6. 44E-06	4. 97E-05	0. 223393	0. 223387	0. 4468	0. 0000	0. 4468	0. 92309
90	4. 45E-01	9. 15E-07	3. 21E-05	0. 222255	0. 222255	0. 4445	0. 0000	0. 4445	0. 91841
95	4. 42E-01	-2. 80E-06	1. 59E-05	0. 221209	0. 221211	0. 4424	0. 0000	0. 4424	0. 9141
100	4. 42E-01	-4. 13E-06	7. 84E-12	0. 220798	0. 220802	0. 4416	0. 0000	0. 4416	0. 91241
105	4. 42E-01	-2. 80E-06	-1. 59E-05	0. 221209	0. 221211	0. 4424	0. 0000	0. 4424	0. 9141
110	4. 45E-01	9. 15E-07	-3. 21E-05	0. 222255	0. 222255	0. 4445	0. 0000	0. 4445	0. 91841
115	4. 47E-01	6. 44E-06	-4. 97E-05	0. 223393	0. 223387	0. 4468	0. 0000	0. 4468	0. 92309
120	0. 44766	1. 34E-05	-7. 15E-05	0. 223837	0. 223823	0. 4477	0. 0000	0. 4476	0. 92489
125	0. 44527	2. 21E-05	-1. 03E-04	0. 222646	0. 222624	0. 4453	0. 0000	0. 4452	0. 91993
130	0. 43739	3. 51E-05	-1. 57E-04	0. 218713	0. 218677	0. 4374	0. 0000	0. 4374	0. 90363
135	0. 42094	5. 99E-05	-2. 60E-04	0. 2105	0. 21044	0. 4209	0. 0001	0. 4209	0. 86959
140	0. 39027	1. 21E-04	-4. 84E-04	0. 195195	0. 195075	0. 3903	0. 0001	0. 3902	0. 8061
145	0. 33133	3. 21E-04	-1. 07E-03	0. 165826	0. 165508	0. 3313	0. 0003	0. 3310	0. 68392
150	0. 19388	1. 43E-03	-3. 45E-03	0. 097656	0. 096286	0. 1939	0. 0014	0. 1926	0. 39787
155	-0. 38066	1. 48E-04	-6. 37E-03	-0. 19026	0. 190511	0. 0003	-0. 3808	0. 3810	0. 78723

Çizelge 5.6 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Delikli numune (devam).

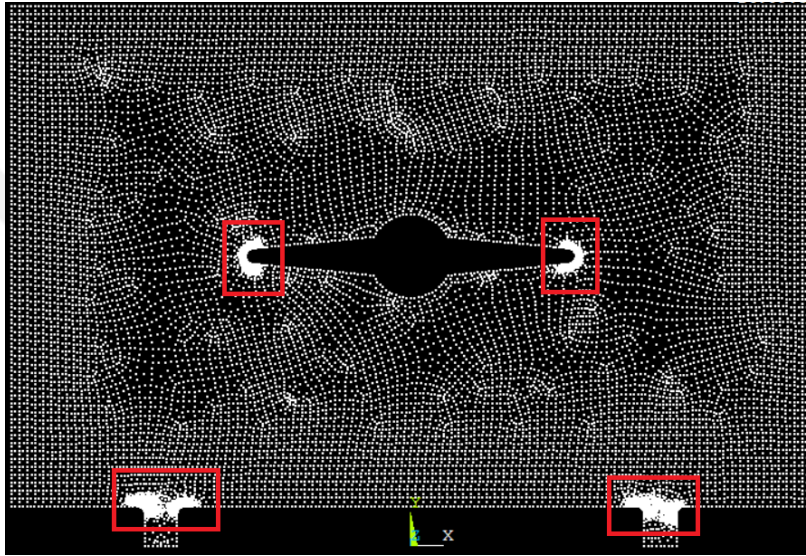
160	-2. 5687	-5. 41E+00	8. 79E-01	-3. 9877	1. 668976	-2. 3187	-5. 6567	3. 3380	6. 8966
165	-2. 1496	-4. 99E+00	-6. 25E-01	-3. 5707	1. 552446	-2. 0183	-5. 1231	3. 1049	6. 41506
170	-9. 84E-02	8. 60E-03	2. 01E-03	-0. 04491	0. 053542	0. 0086	-0. 0984	0. 1071	0. 22125
175	2. 35E-01	9. 71E-04	3. 08E-03	0. 118075	0. 117145	0. 2352	0. 0009	0. 2343	0. 48407
180	0. 24698	2. 65E-04	1. 11E-03	0. 123622	0. 123363	0. 2470	0. 0003	0. 2467	0. 50976
185	0. 19806	1. 17E-04	5. 94E-04	0. 099088	0. 098973	0. 1981	0. 0001	0. 1979	0. 40898
190	0. 12134	4. 38E-05	4. 47E-04	0. 060692	0. 06065	0. 1213	0. 0000	0. 1213	0. 25062
195	3. 62E-02	-1. 18E-04	3. 60E-04	0. 018026	0. 018147	0. 0362	-0. 0001	0. 0363	0. 07499
200	-1. 43E-04	-1. 50E-04	-1. 12E-04	-0. 00015	0. 000112	0. 0000	-0. 0003	0. 0002	0. 00046



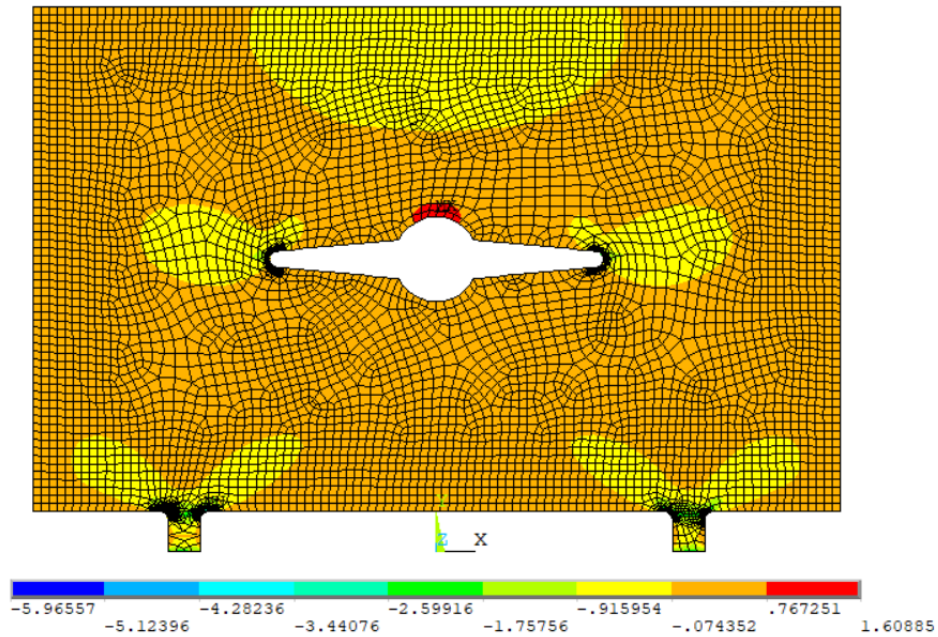
Şekil 5.27: $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı, Delikli numune.

5.7.5 Oyuklu numune

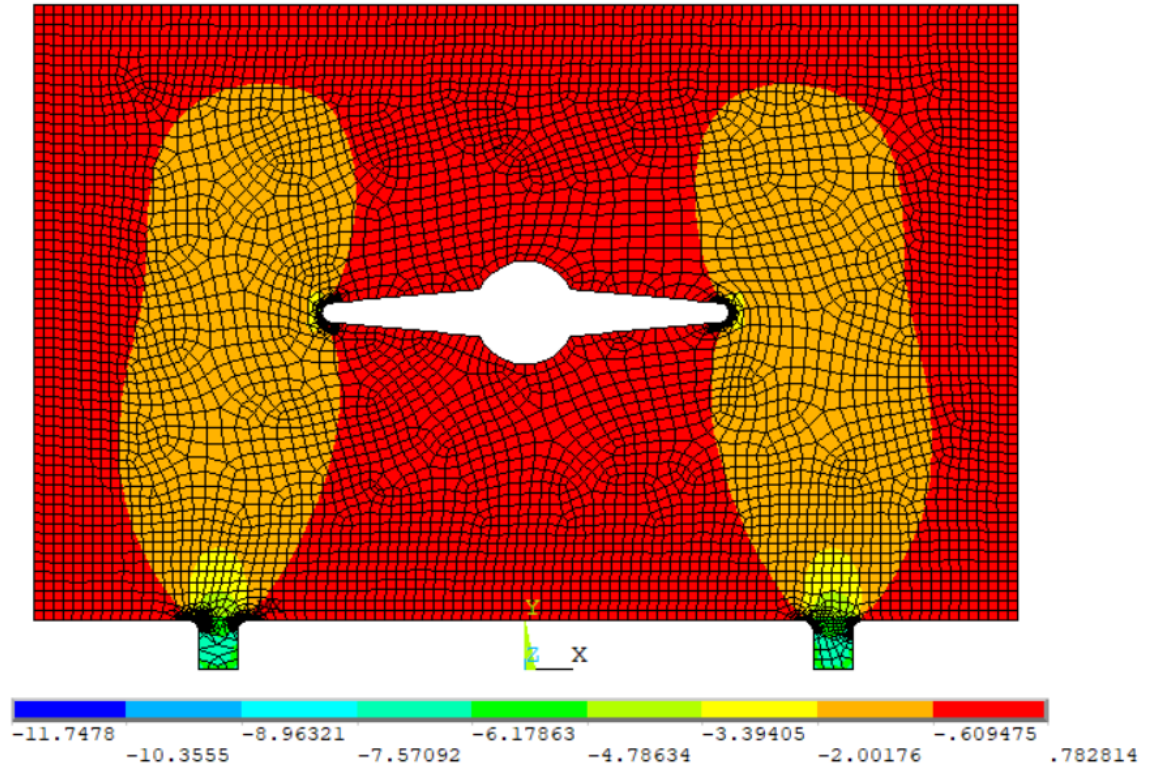
Bu aşamada, 0.518 MPa basınç yükü altında referans numunenin deneyi modellenmiştir. Malzemede, Elastisite modülü $E = 2.5 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.38$ olarak lineer model kullanılmıştır. Modelin gerilme yığılması beklenen panel-mesnet birleşim köşelerinde ve oyuk uçlarında sonlu eleman ağı sıklaştırılmıştır (Şekil 5.28).



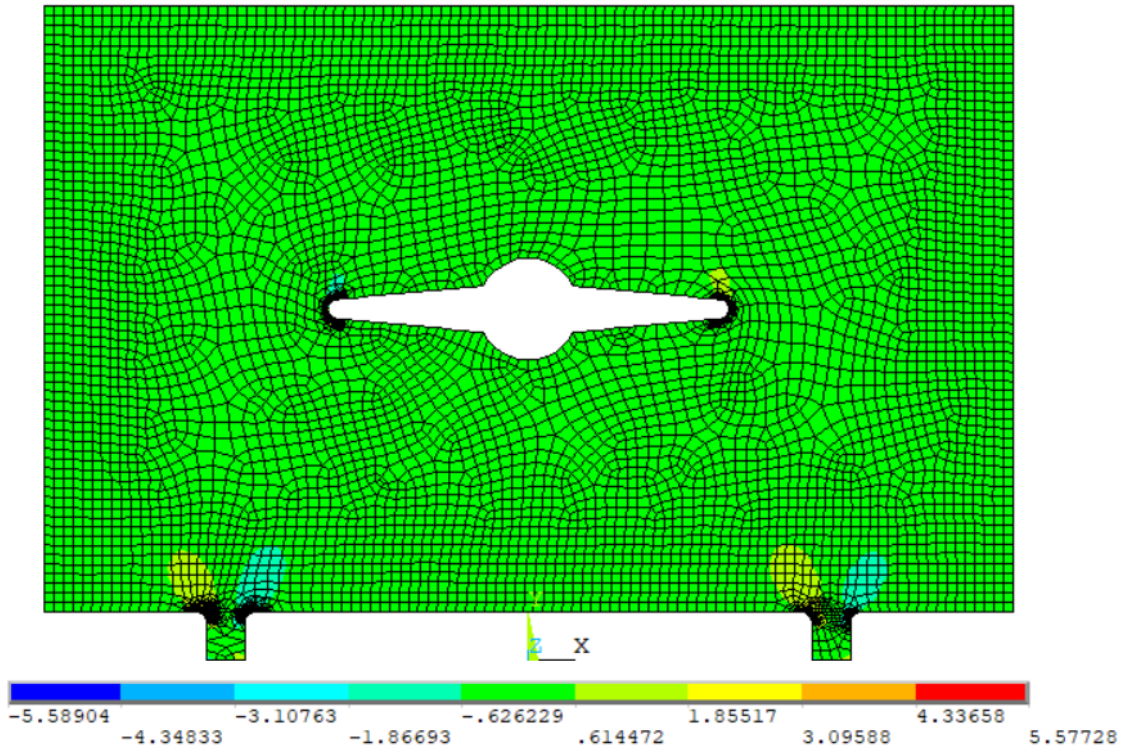
Şekil 5.28: Kırmızı işaretli bölümde sınır eleman ağı arttırılmıştır, Oyuklu numune.



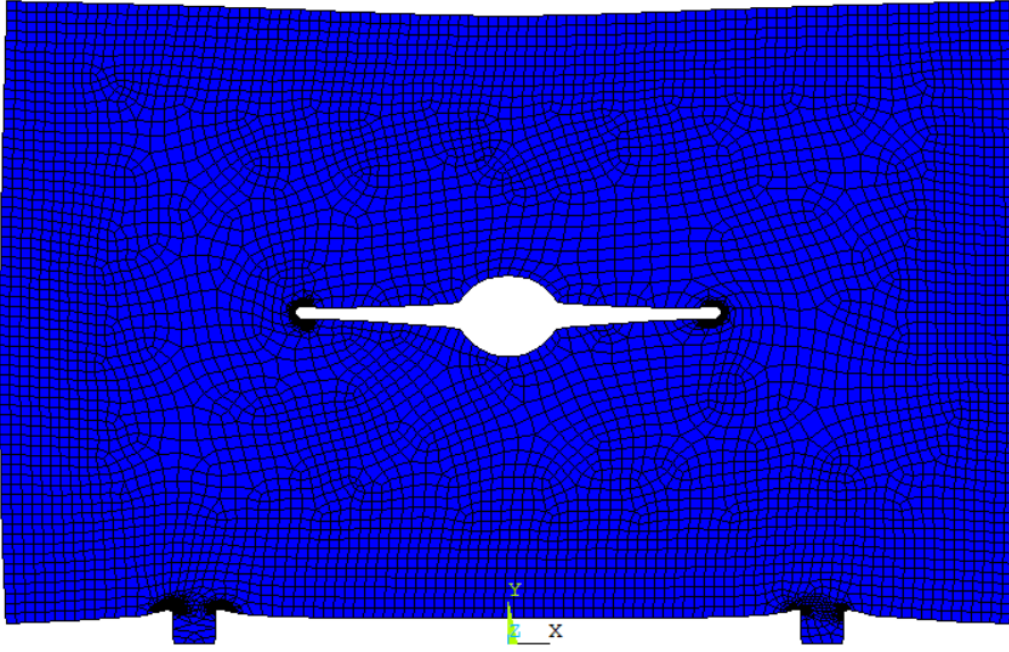
Şekil 5.29: S_x , Oyuklu numune.



Şekil 5.30: S_y , Oyuklu numune.



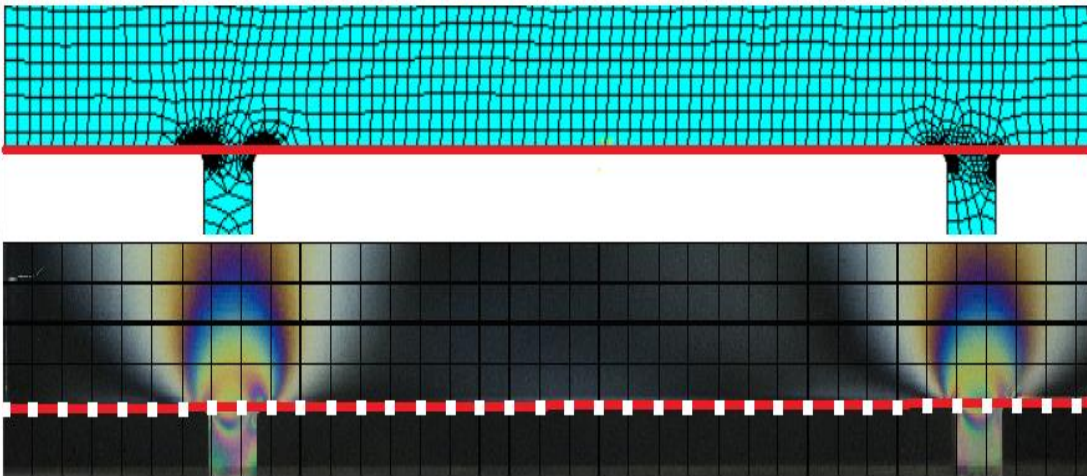
Şekil 5.31: S_{xy} , Oyuklu numune.



Şekil 5.32: Modelin şekil değiştirmiş hali, Oyuklu numune.

5.7.6 Verilerin analizi oyuklu numune (Y = 10)

Fotoelastisite deney sonuçları ile, sonlu eleman sayısal çözümleri karşılaştırmak amacı ile, Şekil 5.33 da kırmızı çizgi ile görülen, panelin alt yatay sınırı seçilmiştir. Bu çizgi üzerinde, sonlu elemanlar çözümü olan S_x , S_y ve S_{xy} verileri alınarak, Excel programında $\sigma_1 - \sigma_2$ değerleri hesaplatılmıştır. Bu değerler Çizelge 5.7 de verilmiş ve $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.485$ diyagramı Şekil 5.34 de çizilmiştir.



Şekil 5.33: Noktaların arasındaki mesafe: 5mm, Oyuklu numune.

Çizelge 5.7 : Belirli noktadaki değerler Y = 10 mm, Oyuklu numune.

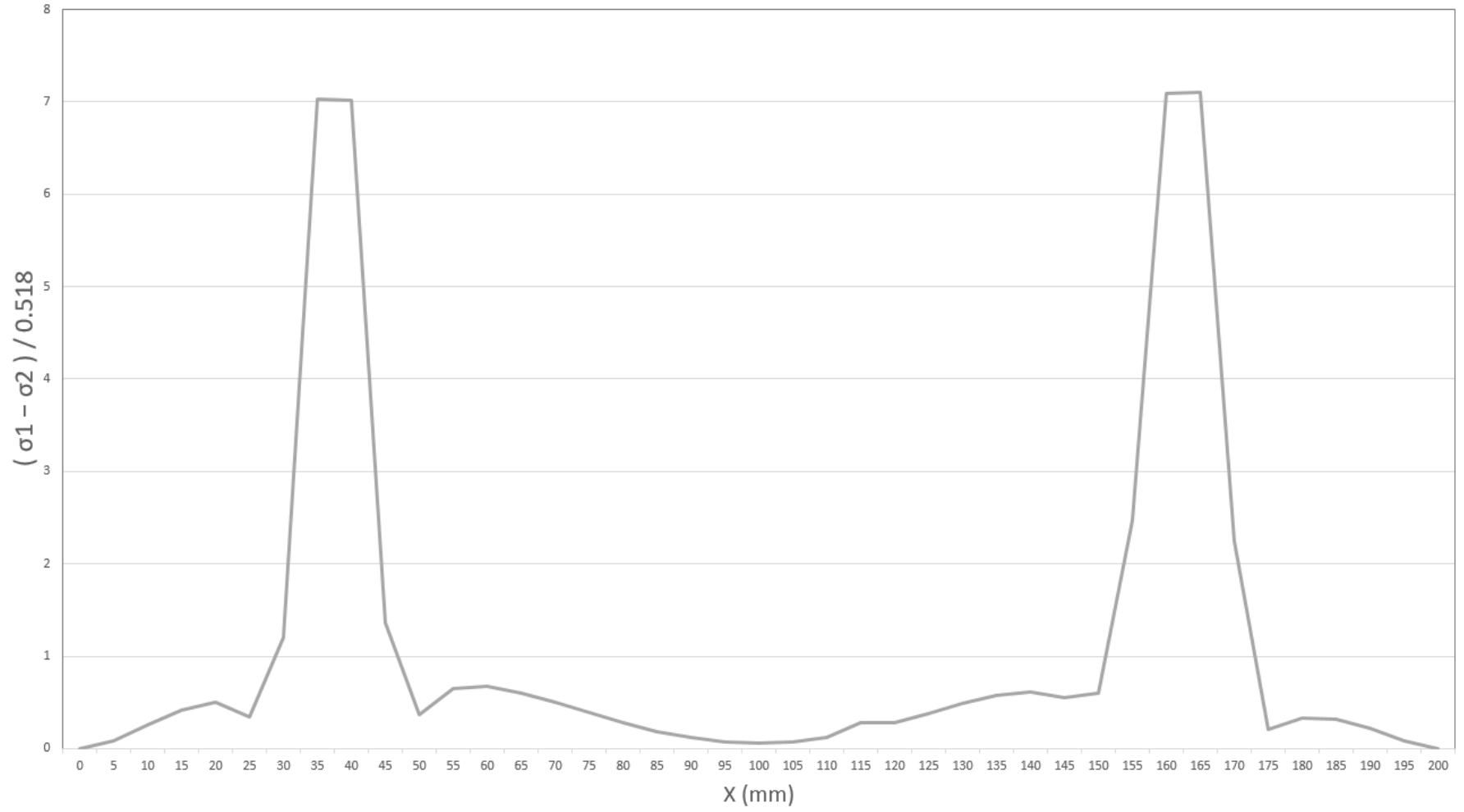
X(mm)	S _x (MPa)	S _y (MPa)	S _{xy} (MPa)	S ₀ (MPa)	R(MPa)	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ ₁ – σ ₂	$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{0.518}$
0	-1.44E-03	-1.47E-03	4.90E-04	-0.00145	0.00049	-0.0010	-0.0019	0.0010	0.00189
5	4.00E-02	-3.59E-04	-1.61E-03	0.01983	0.020253	0.0401	-0.0004	0.0405	0.0782
10	0.13358	1.95E-04	-2.59E-03	0.066887	0.066743	0.1336	0.0001	0.1335	0.25769
15	0.21752	5.81E-04	-3.15E-03	0.10905	0.108515	0.2176	0.0005	0.2170	0.41898
20	0.25966	1.36E-03	-3.73E-03	0.130508	0.129206	0.2597	0.0013	0.2584	0.49886
25	0.18928	1.01E-02	-6.77E-03	0.099686	0.08985	0.1895	0.0098	0.1797	0.34691
30	-0.58003	3.61E-02	5.25E-02	-0.27195	0.312517	0.0406	-0.5845	0.6250	1.20663
35	-1.8205	-5.19E+00	6.84E-01	-3.50715	1.820097	-1.6871	-5.3272	3.6402	7.0274
40	-1.8603	-5.18E+00	-7.41E-01	-3.5198	1.817312	-1.7025	-5.3371	3.6346	7.01665
45	-0.65695	2.53E-02	-8.69E-02	-0.31581	0.352042	0.0362	-0.6679	0.7041	1.35924
50	0.20158	1.10E-02	1.79E-04	0.106301	0.095279	0.2016	0.0110	0.1906	0.36787
55	0.33855	5.94E-04	-8.11E-04	0.169572	0.16898	0.3386	0.0006	0.3380	0.65243
60	0.34747	1.90E-04	1.82E-03	0.17383	0.17365	0.3475	0.0002	0.3473	0.67046
65	0.31345	7.62E-05	3.38E-03	0.156763	0.156723	0.3135	0.0000	0.3134	0.60511
70	0.26087	2.95E-05	4.22E-03	0.13045	0.130489	0.2609	0.0000	0.2610	0.50382
75	0.20241	2.15E-05	4.54E-03	0.101216	0.101296	0.2025	-0.0001	0.2026	0.3911

Çizelge 5.7 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Oyuklu numune (devam).

80	0.14602	3.05E-05	4.37E-03	0.073025	0.073125	0.1462	-0.0001	0.1463	0.28234
85	9.70E-02	4.86E-05	3.78E-03	0.048537	0.048635	0.0972	-0.0001	0.0973	0.18778
90	5.98E-02	7.03E-05	2.80E-03	0.029939	0.029999	0.0599	-0.0001	0.0600	0.11583
95	3.62E-02	9.26E-05	1.52E-03	0.018146	0.018117	0.0363	0.0000	0.0362	0.06995
100	2.86E-02	1.12E-04	-4.21E-06	0.014342	0.014231	0.0286	0.0001	0.0285	0.05494
105	3.62E-02	1.25E-04	-1.67E-03	0.018179	0.018132	0.0363	0.0000	0.0363	0.07001
110	5.97E-02	1.28E-04	-3.37E-03	0.029903	0.029965	0.0599	-0.0001	0.0599	0.1157
115	1.44E-01	1.19E-04	-4.98E-03	0.071839	0.071893	0.1437	-0.0001	0.1438	0.27758
120	0.14356	9.00E-05	-6.28E-03	0.071825	0.072009	0.1438	-0.0002	0.1440	0.27803
125	0.19713	3.66E-05	-7.08E-03	0.098583	0.098801	0.1974	-0.0002	0.1976	0.38147
130	0.25091	5.60E-05	-6.98E-03	0.125483	0.125621	0.2511	-0.0001	0.2512	0.48502
135	0.29597	-2.17E-04	-5.45E-03	0.147876	0.148194	0.2961	-0.0003	0.2964	0.57218
140	0.31698	-5.46E-04	-1.14E-03	0.158217	0.158767	0.3170	-0.0006	0.3175	0.613
145	0.28333	-1.61E-03	1.02E-02	0.140859	0.142833	0.2837	-0.0020	0.2857	0.55148
150	0.28333	-8.41E-03	5.45E-02	0.137461	0.155702	0.2932	-0.0182	0.3114	0.60116
155	-1.0555	-1.20E-01	4.35E-01	-0.58789	0.638822	0.0509	-1.2267	1.2776	2.46649

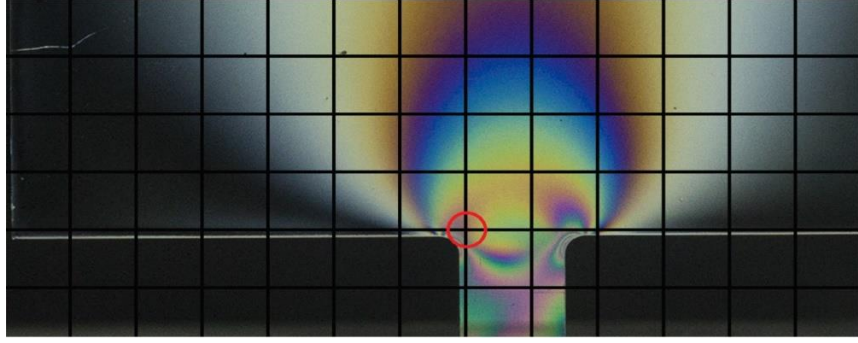
Çizelge 5.7 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Oyuklu numune (devam).

160	-1. 533	-4. 94E+00	6. 83E-01	-3. 2362	1. 835094	-1. 4011	-5. 0713	3. 6702	7. 08531
165	-1. 4607	-4. 91E+00	-6. 44E-01	-3. 18455	1. 840286	-1. 3443	-5. 0248	3. 6806	7. 10535
170	-0. 93011	-2. 23E-01	-4. 65E-01	-0. 5767	0. 583671	0. 0070	-1. 1604	1. 1673	2. 25356
175	1. 71E-02	-1. 09E-02	-5. 20E-02	0. 003076	0. 053827	0. 0569	-0. 0508	0. 1077	0. 20783
180	0. 16833	-2. 42E-03	-5. 54E-03	0. 082955	0. 085554	0. 1685	-0. 0026	0. 1711	0. 33033
185	0. 16413	-1. 00E-03	8. 66E-03	0. 081564	0. 083019	0. 1646	-0. 0015	0. 1660	0. 32054
190	0. 1066	-2. 94E-04	1. 47E-02	0. 053153	0. 055442	0. 1086	-0. 0023	0. 1109	0. 21406
195	3. 53E-02	1. 21E-03	1. 32E-02	0. 01825	0. 021582	0. 0398	-0. 0033	0. 0432	0. 08333
200	-1. 12E-03	3. 16E-04	-3. 30E-04	-0. 0004	0. 000789	0. 0004	-0. 0012	0. 0016	0. 00305



Şekil 5.34: $(\sigma_1 - \sigma_2)/0.518$ diyagramı, Oyuklu numune.

Fotoelastisite resimleri ile sonlu eleman sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla bu aşamada, oyuklu numune $X = 35$ mm, $Y=10$ mm noktadaki gerilme değeri göz önüne alınmıştır. Şekil 5.35 te fotoelastisite izokromat resminde kırmızı çemberle işaretlenen bu noktada saçak numarasının $N = 2$ olduğu görülmektedir.



Şekil 5.35: $X = 35$ mm, $Y = 10$ mm noktası, Oyuklu numune.

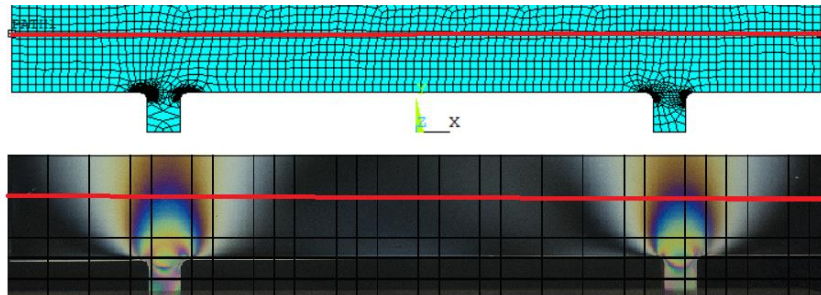
Daha önce (2.25) denklemi ile verilmiş olan optik–gerilme yasasına göre düzlemdeki asal gerilme farkı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{t} f_{\sigma} = \frac{2}{5} 9 = 3.6 \text{ MPa}$$

Aynı noktadaki bu değer Ansys modelinin çözümünden 3.64 MPa olarak elde edilmiştir.

5.7.7 Verilerin analizi oyuklu numune ($Y = 25$)

Fotoelastisite deney sonuçları ile, sonlu eleman sayısal çözümleri karşılaştırmak amacı ile, Şekil 5.36 da kırmızı çizgi ile görülen, yatay çizgi seçilmiştir. Bu çizgi üzerinde, sonlu elemanlar çözümü olan S_x , S_y ve S_{xy} verileri alınarak, Excel programında $\sigma_1 - \sigma_2$ değerleri hesaplatılmıştır (Çizelge 5.8).



Şekil 5.36: $Y = 25$ mm , $X = 0-200$ mm çizgisi, Oyuklu numune.

Çizelge 5.8 : Belirli noktadaki değerler Y = 25 mm, Oyuklu numune.

X(mm)	S_x (MPa)	S_y (MPa)	S_{xy} (MPa)	S_0 (MPa)	R(MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\sigma_1 - \sigma_2$
0	6. 65E-04	1. 41E-01	4. 28E-04	0. 070698	0. 070034	0. 1407	0. 0007	0. 1401
5	-2. 25E-02	-1. 15E-02	-1. 93E-02	-0. 01699	0. 020121	0. 0031	-0. 0371	0. 0402
10	-6. 90E-02	1. 95E-04	-7. 65E-02	-0. 0344	0. 083938	0. 0495	-0. 1183	0. 1679
15	-6. 90E-02	-2. 69E-01	-1. 81E-01	-0. 16893	0. 206686	0. 0378	-0. 3756	0. 4134
20	-0. 14335	-4. 94E-01	-3. 29E-01	-0. 31868	0. 373208	0. 0545	-0. 6919	0. 7464
25	-8. 23E-02	-8. 87E-01	-4. 79E-01	-0. 48452	0. 625754	0. 1412	-1. 1103	1. 2515
30	0. 10181	-1. 44E+00	-4. 87E-01	-0. 67025	0. 913032	0. 2428	-1. 5833	1. 8261
35	0. 30277	-1. 91E+00	-1. 95E-01	-0. 80457	1. 124434	0. 3199	-1. 9290	2. 2489
40	0. 3084	-1. 92E+00	2. 65E-01	-0. 80485	1. 144379	0. 3395	-1. 9492	2. 2888
45	0. 119	-1. 46E+00	5. 58E-01	-0. 67295	0. 969	0. 2961	-1. 6420	1. 9380
50	-6. 27E-02	-9. 10E-01	5. 41E-01	-0. 48646	0. 68711	0. 2006	-1. 1736	1. 3742
55	-0. 12683	-5. 17E-01	3. 79E-01	-0. 32211	0. 426198	0. 1041	-0. 7483	0. 8524
60	-0. 11384	-2. 89E-01	2. 14E-01	-0. 20121	0. 231306	0. 0301	-0. 4325	0. 4626
65	-7. 91E-02	-1. 60E-01	9. 52E-02	-0. 11981	0. 103509	-0. 0163	-0. 2233	0. 2070
70	-4. 79E-02	-8. 33E-02	1. 94E-02	-0. 06564	0. 026259	-0. 0394	-0. 0919	0. 0525
75	-2. 62E-02	-3. 49E-02	-2. 23E-02	-0. 03056	0. 022731	-0. 0078	-0. 0533	0. 0455

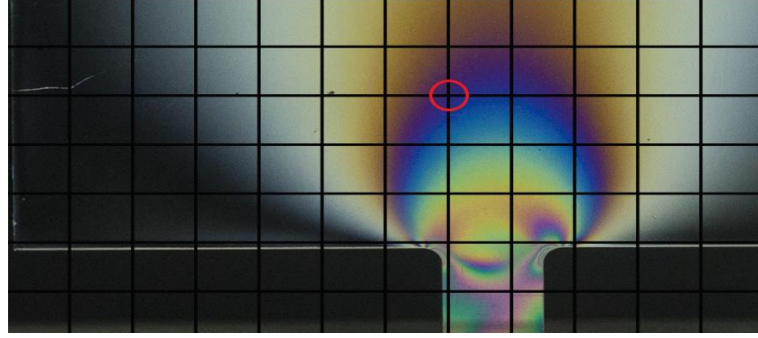
Çizelge 5.8 : Belirli noktalardaki değerler Y = 25 mm, Oyuklu numune (devam).

80	-1. 27E-02	-2. 91E-03	-4. 08E-02	-0. 00778	0. 041063	0. 0333	-0. 0488	0. 0821
85	-5. 35E-03	1. 81E-02	-4. 27E-02	0. 006373	0. 044265	0. 0506	-0. 0379	0. 0885
90	-1. 80E-03	3. 18E-02	-3. 41E-02	0. 014974	0. 038	0. 0530	-0. 0230	0. 0760
95	-4. 28E-04	3. 93E-02	-1. 86E-02	0. 019439	0. 027221	0. 0467	-0. 0078	0. 0544
100	-7. 87E-05	4. 19E-02	-5. 07E-06	0. 020894	0. 020972	0. 0419	-0. 0001	0. 0419
105	-4. 25E-04	3. 93E-02	1. 86E-02	0. 019448	0. 027226	0. 0467	-0. 0078	0. 0545
110	-1. 80E-03	3. 17E-02	3. 40E-02	0. 014948	0. 037906	0. 0529	-0. 0230	0. 0758
115	-5. 31E-03	1. 81E-02	4. 27E-02	0. 006413	0. 044277	0. 0507	-0. 0379	0. 0886
120	-1. 26E-02	-2. 89E-03	4. 08E-02	-0. 00775	0. 041059	0. 0333	-0. 0488	0. 0821
125	-2. 61E-02	-3. 49E-02	2. 23E-02	-0. 03051	0. 022756	-0. 0078	-0. 0533	0. 0455
130	-4. 79E-02	-8. 32E-02	-1. 93E-02	-0. 06556	0. 02618	-0. 0394	-0. 0917	0. 0524
135	-7. 93E-02	-1. 60E-01	-9. 52E-02	-0. 1198	0. 103455	-0. 0163	-0. 2233	0. 2069
140	-0. 11402	-2. 88E-01	-2. 14E-01	-0. 20121	0. 231256	0. 0300	-0. 4325	0. 4625
145	-0. 12665	-5. 18E-01	-3. 79E-01	-0. 32221	0. 426284	0. 1041	-0. 7485	0. 8526
150	-6. 35E-02	-9. 10E-01	-5. 43E-01	-0. 48658	0. 687946	0. 2014	-1. 1745	1. 3759
155	0. 11924	-1. 46E+00	-5. 55E-01	-0. 67238	0. 96697	0. 2946	-1. 6394	1. 9339

Çizelge 5.8 : Belirli noktalardaki değerler Y = 25 mm, Oyuklu numune (devam).

160	0.30958	-1.92E+00	-2.65E-01	-0.80551	1.146204	0.3407	-1.9517	2.2924
165	0.30133	-1.91E+00	1.95E-01	-0.80369	1.122073	0.3184	-1.9258	2.2441
170	0.10178	-1.44E+00	4.90E-01	-0.67071	0.914742	0.2440	-1.5855	1.8295
175	-8.22E-02	-8.87E-01	4.79E-01	-0.48445	0.625483	0.1410	-1.1099	1.2510
180	-0.14357	-4.94E-01	3.30E-01	-0.31874	0.373416	0.0547	-0.6922	0.7468
185	-0.11913	-2.69E-01	1.81E-01	-0.19412	0.19601	0.0019	-0.3901	0.3920
190	-6.91E-02	-1.29E-01	7.66E-02	-0.09883	0.082204	-0.0166	-0.1810	0.1644
195	-2.25E-02	-1.14E-02	1.94E-02	-0.01697	0.020168	0.0032	-0.0371	0.0403
200	7.02E-04	1.41E-01	-3.64E-04	0.070646	0.069945	0.1406	0.0007	0.1399

Fotoelastisite resimleri ile sonlu eleman sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla bu aşamada, oyuklu numune $X = 35$ mm, $Y=25$ mm noktadaki gerilme değeri göz önüne alınmıştır. Şekil 5.37 de fotoelastisite izokromat resminde kırmızı çemberle işaretlenen bu noktada saçak numarasının $N = 1.2$ olduğu görülmektedir.



Şekil 5.37: $X = 35$ mm, $Y = 25$ mm noktası, Oyuklu numune.

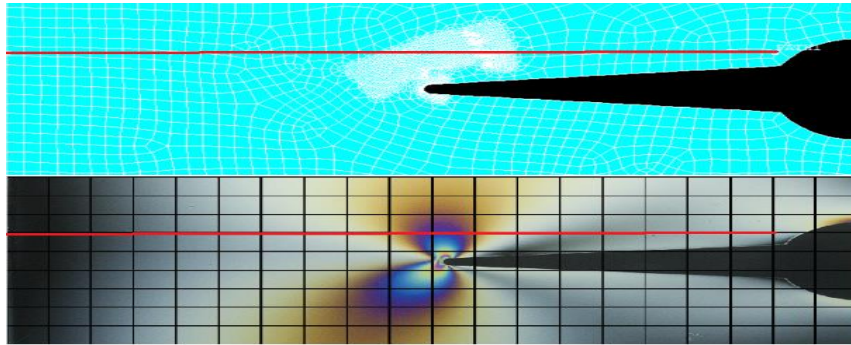
Daha önce (2.25) denklemi ile verilmiş olan optik–gerilme yasasına göre düzlemdeki asal gerilme farkı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{t} f_{\sigma} = \frac{1.2}{5} 9 = 2.16 \text{ Mpa}$$

Aynı noktadaki bu değer Ansys modelinin çözümünden 2.16 MPa olarak elde edilmiştir.

5.7.8 Verilerin analizi oyuklu numune ($Y = 80$)

Fotoelastisite deney sonuçları ile, sonlu eleman sayısal çözümleri karşılaştırmak amacı ile, Şekil 5.38 de kırmızı çizgi ile görülen, yatay çizgi seçilmiştir. Bu çizgi üzerinde, sonlu elemanlar çözümü olan S_x , S_y ve S_{xy} verileri alınarak, Excel programında $\sigma_1 - \sigma_2$ değerleri hesaplatılmıştır (Çizelge 5.9).



Şekil 5.38: $Y = 80$ mm, $X = 0-90$ mm çizgisi, Oyuklu numune.

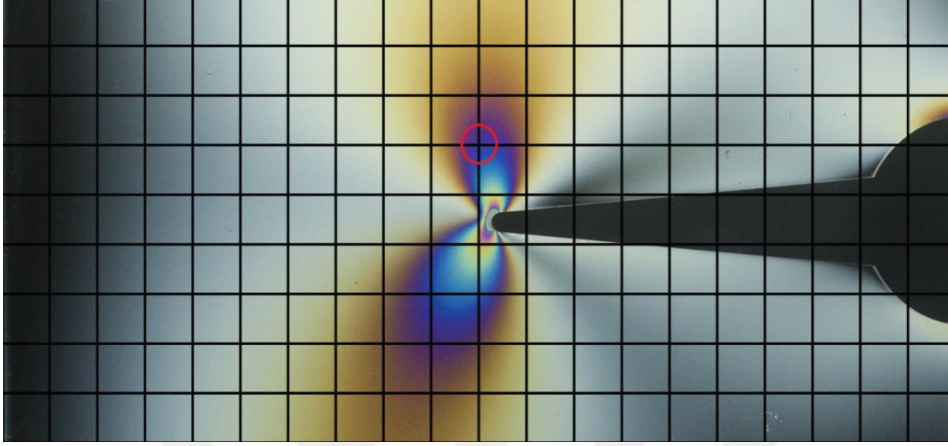
Çizelge 5.9 : Belirli noktadaki değerler Y = 80 mm, Oyuklu numune.

X(mm)	S _x (MPa)	S _y (MPa)	S _{xy} (MPa)	S ₀ (MPa)	R(MPa)	σ ₁ (MPa)	σ ₂ (MPa)	σ ₁ – σ ₂
0	2. 79E-04	1. 89E-02	2. 24E-04	0. 00957	0. 009294	0. 0189	0. 0003	0. 0186
5	-1. 01E-02	-1. 71E-01	2. 91E-02	-0. 09068	0. 085702	-0. 0050	-0. 1764	0. 1714
10	-3. 45E-02	-3. 35E-01	4. 76E-02	-0. 18498	0. 157801	-0. 0272	-0. 3428	0. 3156
15	-6. 96E-02	-4. 86E-01	5. 85E-02	-0. 27786	0. 2163	-0. 0616	-0. 4942	0. 4326
20	-0. 11435	-6. 34E-01	6. 52E-02	-0. 37395	0. 267652	-0. 1063	-0. 6416	0. 5353
25	-1. 68E-01	-7. 88E-01	7. 07E-02	-0. 47817	0. 317789	-0. 1604	-0. 7960	0. 6356
30	-0. 23019	-9. 65E-01	8. 06E-02	-0. 59744	0. 37598	-0. 2215	-0. 9734	0. 7520
35	-0. 28811	-1. 19E+00	9. 57E-02	-0. 74086	0. 462749	-0. 2781	-1. 2036	0. 9255
40	-0. 28625	-1. 54E+00	9. 40E-02	-0. 91068	0. 631454	-0. 2792	-1. 5421	1. 2629
45	-0. 11378	-1. 98E+00	-1. 31E-01	-1. 04739	0. 942771	-0. 1046	-1. 9902	1. 8855
50	-1. 27E-01	-1. 54E+00	-7. 69E-01	-0. 83188	1. 043175	0. 2113	-1. 8750	2. 0863
55	-0. 22986	-4. 92E-01	-5. 96E-01	-0. 3611	0. 610551	0. 2495	-0. 9716	1. 2211
60	1. 19E-02	-1. 50E-01	-2. 89E-01	-0. 06908	0. 299903	0. 2308	-0. 3690	0. 5998
65	2. 35E-01	-6. 20E-02	-1. 36E-01	0. 086392	0. 201087	0. 2875	-0. 1147	0. 4022
70	3. 93E-01	-3. 21E-02	-5. 36E-02	0. 180248	0. 218961	0. 3992	-0. 0387	0. 4379
75	5. 00E-01	-2. 06E-02	4. 98E-03	0. 2398	0. 260398	0. 5002	-0. 0206	0. 5208

Çizelge 5.9 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 80$ mm, Oyuklu numune (devam).

80	5. 60E-01	-1. 79E-02	6. 22E-02	0. 271206	0. 295713	0. 5669	-0. 0245	0. 5914
85	5. 66E-01	-2. 53E-02	1. 38E-01	0. 270219	0. 326281	0. 5965	-0. 0561	0. 6526
90	5. 66E-01	1. 47E-02	2. 62E-01	0. 290199	0. 380405	0. 6706	-0. 0902	0. 7608

Fotoelastisite resimleri ile sonlu eleman sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla bu aşamada, oyuklu numunede $X = 50 \text{ mm}$, $Y=80 \text{ mm}$ noktadaki gerilme değeri göz önüne alınmıştır. Şekil 5.39 da fotoelastisite izokromat resminde kırmızı çemberle işaretlenen bu noktada saçak numarasının $N = 1.1$ olduğu görülmektedir.

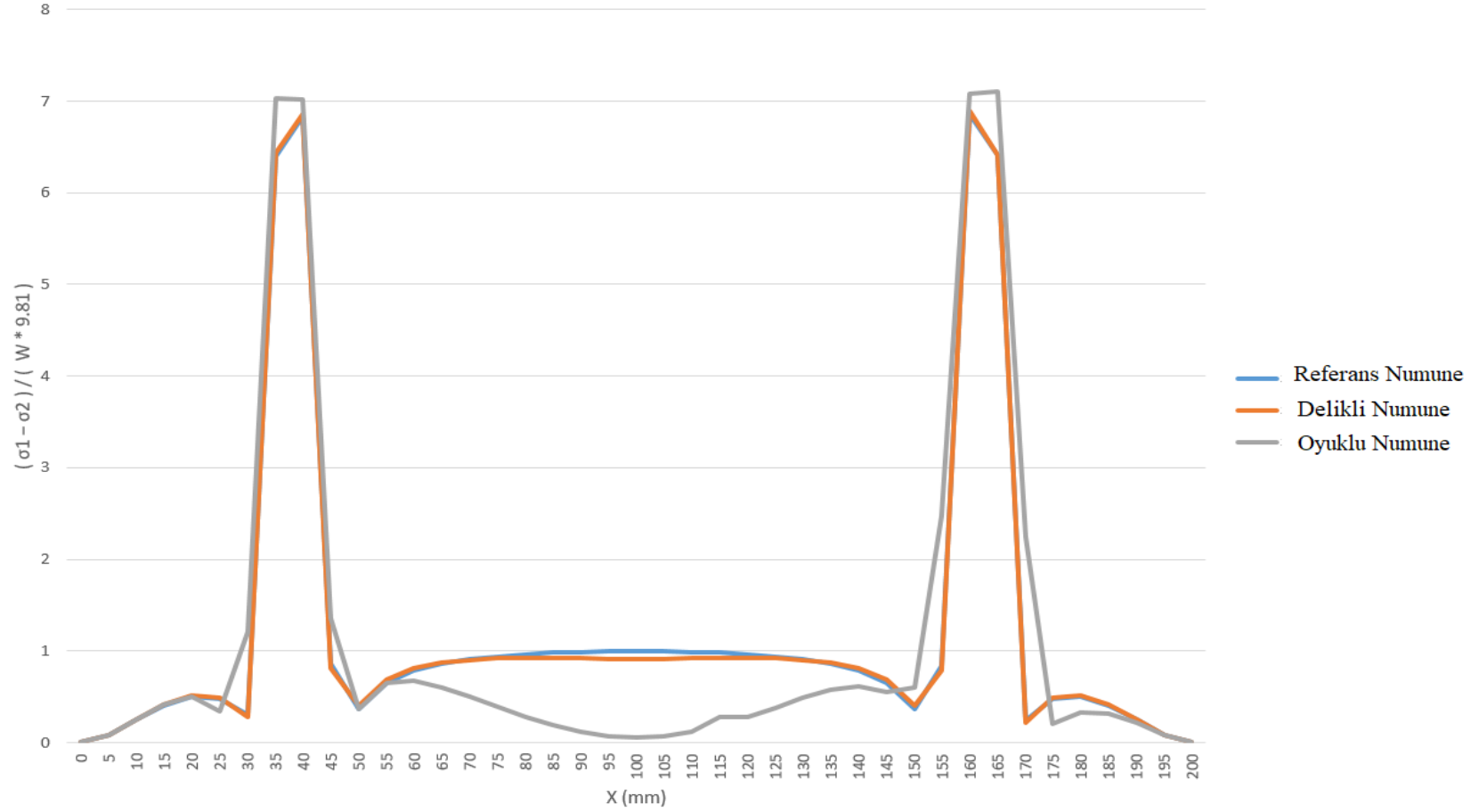


Şekil 5.39: $X = 50 \text{ mm}$, $Y = 80 \text{ mm}$ noktası, Oyuklu numune.

Daha önce (2.25) denklemi ile verilmiş olan optik–gerilme yasasına göre düzlemdeki asal gerilme farkı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{t} f_{\sigma} = \frac{1.1}{5} 9 = 1.98 \text{ Mpa}$$

Aynı noktadaki bu değer Ansys modelinin çözümünden 2.08 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.40: Üç deneyin $(\sigma_1 - \sigma_2)/(W*9.81)$ diyagramı, $Y = 10$ mm çizgisi üzerinde.

5.8 Üç Deneyde X Doğrultudaki Gerilmeler (S_x)

Şimdiye kadar yapılan tüm sonuçları karşılaştırmak amacı ile $Y=10$ mm çizgisinde panelin alt sınırı boyunca (Şekil 5.19, Şekil 5.26, Şekil 5.33) 0.5 mm aralıklarla 401 nokta belirlenerek bu noktalarda S_x değerleri alınmıştır. Bu değerler panellere uygulanan basınç gerilmelerine bölünerek normalize edilmiş ve Çizelge 5.10 da tablo halinde verilmiştir. Şekil 5.41 de bu verilerin grafiği görülmektedir.



Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune.

Referans Numune			Delikli Numune		Oyuklu Numune	
X(mm)	S _x (MPa)	S _x /−0.485	S _x (MPa)	S _x /−0.485	S _x (MPa)	S _x /−0.518
0	-1.46E-04	0.0003	-1.42E-04	0.000294	-1.44E-03	0.002779
0.5	-5.43E-04	0.00112	-5.47E-04	0.001127	-5.56E-04	0.001074
1	-8.85E-04	0.001825	-8.96E-04	0.001848	3.27E-04	-0.00063
1.5	5.35E-04	-0.0011	5.03E-04	-0.00104	1.21E-03	-0.00234
2	2.11E-03	-0.00435	2.06E-03	-0.00424	2.36E-03	-0.00456
2.5	6.05E-03	-0.01248	5.98E-03	-0.01232	7.55E-03	-0.01458
3	1.02E-02	-0.02097	1.01E-02	-0.02076	1.27E-02	-0.02459
3.5	1.60E-02	-0.03297	1.59E-02	-0.03273	1.79E-02	-0.03461
4	2.20E-02	-0.0453	2.18E-02	-0.04501	2.35E-02	-0.04538
4.5	2.91E-02	-0.05997	2.89E-02	-0.05966	3.18E-02	-0.06144
5	3.63E-02	-0.0749	3.62E-02	-0.07458	4.01E-02	-0.07751
5.5	4.43E-02	-0.0913	4.41E-02	-0.09098	4.85E-02	-0.09357
6	5.23E-02	-0.10788	5.22E-02	-0.10757	5.70E-02	-0.1101
6.5	6.08E-02	-0.1253	6.06E-02	-0.12501	6.67E-02	-0.12869
7	6.93E-02	-0.14282	6.91E-02	-0.14256	7.63E-02	-0.14727
7.5	7.79E-02	-0.16072	7.79E-02	-0.16052	8.59E-02	-0.16585
8	8.66E-02	-0.17864	8.66E-02	-0.1785	9.56E-02	-0.18457
8.5	9.54E-02	-0.19663	9.53E-02	-0.19656	0.10551	-0.20369

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

9	0. 10406	-0. 21456	0. 10407	-0. 21458	0. 11541	-0. 2228
9. 5	0. 11268	-0. 23233	0. 11274	-0. 23245	0. 12532	-0. 24193
10	0. 12123	-0. 24996	0. 12134	-0. 25019	0. 13511	-0. 26083
10. 5	0. 12964	-0. 2673	0. 12981	-0. 26765	0. 14464	-0. 27923
11	0. 13794	-0. 28441	0. 13817	-0. 28489	0. 15418	-0. 29764
11. 5	0. 14604	-0. 30111	0. 14635	-0. 30175	0. 16372	-0. 31606
12	0. 15401	-0. 31755	0. 15439	-0. 31833	0. 17295	-0. 33388
12. 5	0. 16174	-0. 33348	0. 16221	-0. 33445	0. 18167	-0. 35071
13	0. 16931	-0. 34909	0. 16986	-0. 35023	0. 19038	-0. 36753
13. 5	0. 17662	-0. 36416	0. 17725	-0. 36546	0. 1991	-0. 38436
14	0. 18372	-0. 3788	0. 18445	-0. 38031	0. 20729	-0. 40017
14. 5	0. 19055	-0. 39289	0. 19138	-0. 3946	0. 2148	-0. 41467
15	0. 19714	-0. 40647	0. 19806	-0. 40837	0. 2223	-0. 42915
15. 5	0. 20344	-0. 41946	0. 20447	-0. 42159	0. 22981	-0. 44365
16	0. 20946	-0. 43188	0. 21059	-0. 43421	0. 2365	-0. 45656
16. 5	0. 21518	-0. 44367	0. 21642	-0. 44623	0. 24238	-0. 46792
17	0. 22057	-0. 45478	0. 22192	-0. 45757	0. 24826	-0. 47927
17. 5	0. 22564	-0. 46524	0. 2271	-0. 46825	0. 25414	-0. 49062
18	0. 23031	-0. 47487	0. 23189	-0. 47812	0. 25876	-0. 49954

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

18.5	0.23465	-0.48381	0.23634	-0.4873	0.26239	-0.50654
19	0.23852	-0.49179	0.24032	-0.49551	0.26603	-0.51357
19.5	0.24202	-0.49901	0.24395	-0.50299	0.26967	-0.5206
20	0.24494	-0.50503	0.24698	-0.50924	0.27125	-0.52365
20.5	0.24747	-0.51025	0.24962	-0.51468	0.2716	-0.52432
21	0.24924	-0.5139	0.25151	-0.51858	0.27196	-0.52502
21.5	0.25059	-0.51668	0.25298	-0.52161	0.27231	-0.52569
22	0.25096	-0.51744	0.25346	-0.5226	0.26936	-0.52
22.5	0.25083	-0.51718	0.25345	-0.52258	0.26491	-0.51141
23	0.24939	-0.51421	0.25212	-0.51984	0.26046	-0.50282
23.5	0.24738	-0.51006	0.25021	-0.5159	0.25601	-0.49423
24	0.24353	-0.50212	0.24648	-0.50821	0.24555	-0.47403
24.5	0.239	-0.49278	0.24207	-0.49911	0.23308	-0.44996
25	0.23181	-0.47796	0.235	-0.48454	0.22062	-0.42591
25.5	0.22376	-0.46136	0.22709	-0.46823	0.20816	-0.40185
26	0.21166	-0.43641	0.2151	-0.44351	0.19216	-0.37097
26.5	0.19848	-0.40924	0.20201	-0.41652	0.17535	-0.33851
27	0.17892	-0.36891	0.18264	-0.37658	0.15854	-0.30606
27.5	0.15794	-0.32565	0.16189	-0.33379	0.14173	-0.27361

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

28	0. 12591	-0. 25961	0. 13032	-0. 2687	9. 05E-02	-0. 17472
28. 5	9. 19E-02	-0. 18948	9. 68E-02	-0. 19963	3. 44E-02	-0. 06635
29	3. 61E-02	-0. 07436	4. 20E-02	-0. 08653	-2. 18E-02	0. 042023
29. 5	-2. 28E-02	0. 046977	-1. 58E-02	0. 032637	-7. 79E-02	0. 150396
30	-0. 12868	0. 26532	-0. 10947	0. 225711	-0. 49118	0. 948224
30. 5	-0. 23928	0. 493361	-0. 2067	0. 426186	-0. 92826	1. 792008
31	-0. 42012	0. 866227	-0. 39109	0. 806371	-1. 3653	2. 635714
31. 5	-0. 69818	1. 439546	-0. 67972	1. 401485	-1. 8024	3. 479537
32	-1. 2832	2. 645773	-1. 2621	2. 602268	-4. 1455	8. 002896
32. 5	-3. 4905	7. 196907	-3. 4952	7. 206598	-4. 1855	8. 080116
33	-5. 3292	10. 98804	-5. 3716	11. 07546	-3. 1733	6. 126062
33. 5	-3. 2095	6. 617526	-3. 1701	6. 536289	-2. 4736	4. 77529
34	-2. 6089	5. 379175	-2. 6086	5. 378557	-2. 1457	4. 142278
34. 5	-2. 3362	4. 816907	-2. 3373	4. 819175	-1. 999	3. 859073
35	-2. 1393	4. 410928	-2. 1398	4. 411959	-1. 9063	3. 680116
35. 5	-1. 9894	4. 101856	-1. 9816	4. 085773	-1. 834	3. 540541
36	-1. 9191	3. 956907	-1. 9108	3. 939794	-1. 7763	3. 429151
36. 5	-1. 8488	3. 811959	-1. 8399	3. 793608	-1. 7421	3. 363127
37	-1. 859	3. 83299	-1. 8471	3. 808454	-1. 7205	3. 321429

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

37.5	-1.8692	3.854021	-1.8543	3.823299	-1.699	3.279923
38	-1.9409	4.001856	-1.9292	3.977732	-1.7673	3.411776
38.5	-2.0126	4.149691	-2.004	4.131959	-1.8357	3.543822
39	-2.1834	4.501856	-2.1636	4.461031	-1.8519	3.575097
39.5	-2.3543	4.854227	-2.3232	4.790103	-1.9134	3.693822
40	-2.6078	5.376907	-2.5793	5.318144	-1.9664	3.796139
40.5	-2.9104	6.000825	-2.884	5.946392	-2.0643	3.985135
41	-3.3178	6.840825	-3.2892	6.781856	-2.2193	4.284363
41.5	-4.1457	8.547835	-4.0759	8.403918	-2.5482	4.919305
42	-6.9213	14.27072	-6.8854	14.1967	-3.2761	6.324517
42.5	-4.9996	10.30845	-4.7958	9.888247	-4.3139	8.327992
43	-1.9935	4.110309	-1.9291	3.977526	-4.1978	8.103861
43.5	-1.2279	2.531753	-1.1864	2.446186	-2.1843	4.216795
44	-0.83119	1.713794	-0.80076	1.651052	-1.6751	3.233784
44.5	-0.54466	1.12301	-0.52891	1.090536	-1.166	2.250965
45	-0.40389	0.832763	-0.38193	0.787485	-0.6568	1.267954
45.5	-0.26312	0.542515	-0.23495	0.484433	-0.16288	0.31444
46	-0.17968	0.370474	-0.15418	0.317897	-8.84E-02	0.170587
46.5	-9.62E-02	0.198439	-7.34E-02	0.15134	-1.38E-02	0.026726

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

47	-3.98E-02	0.082126	-1.77E-02	0.036404	6.07E-02	-0.11713
47.5	1.66E-02	-0.03419	3.81E-02	-0.07853	0.13201	-0.25485
48	5.64E-02	-0.11629	7.53E-02	-0.15521	0.16108	-0.31097
48.5	9.62E-02	-0.1984	0.11246	-0.23188	0.19015	-0.36708
49	0.12575	-0.25928	0.14207	-0.29293	0.21922	-0.4232
49.5	0.15528	-0.32016	0.17167	-0.35396	0.2473	-0.47741
50	0.17795	-0.36691	0.19393	-0.39986	0.26703	-0.5155
50.5	0.20062	-0.41365	0.21619	-0.44575	0.28676	-0.55359
51	0.21861	-0.45074	0.23383	-0.48212	0.30649	-0.59168
51.5	0.2366	-0.48784	0.25146	-0.51847	0.32471	-0.62685
52	0.25115	-0.51784	0.26571	-0.54786	0.33375	-0.64431
52.5	0.2657	-0.54784	0.27995	-0.57722	0.34279	-0.66176
53	0.27772	-0.57262	0.29167	-0.60138	0.35183	-0.67921
53.5	0.28975	-0.59742	0.30338	-0.62553	0.36001	-0.695
54	0.29985	-0.61825	0.3132	-0.64577	0.36417	-0.70303
54.5	0.30996	-0.63909	0.32302	-0.66602	0.36833	-0.71106
55	0.31857	-0.65685	0.33133	-0.68315	0.3725	-0.71911
55.5	0.32719	-0.67462	0.33963	-0.70027	0.37596	-0.72579
56	0.33462	-0.68994	0.34674	-0.71493	0.37678	-0.72737

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

56.5	0.34206	-0.70528	0.35385	-0.72959	0.37761	-0.72898
57	0.34855	-0.71866	0.36	-0.74227	0.37844	-0.73058
57.5	0.35504	-0.73204	0.36614	-0.75493	0.37874	-0.73116
58	0.36075	-0.74381	0.37148	-0.76594	0.37743	-0.72863
58.5	0.36647	-0.75561	0.37682	-0.77695	0.37612	-0.7261
59	0.37154	-0.76606	0.38149	-0.78658	0.37481	-0.72357
59.5	0.37661	-0.77652	0.38617	-0.79623	0.37304	-0.72015
60	0.38114	-0.78586	0.39027	-0.80468	0.37008	-0.71444
60.5	0.38568	-0.79522	0.39438	-0.81315	0.36712	-0.70873
61	0.38975	-0.80361	0.398	-0.82062	0.36416	-0.70301
61.5	0.39383	-0.81202	0.40163	-0.8281	0.36085	-0.69662
62	0.39752	-0.81963	0.40483	-0.8347	0.35679	-0.68878
62.5	0.40121	-0.82724	0.40803	-0.8413	0.35272	-0.68093
63	0.40456	-0.83414	0.41086	-0.84713	0.34866	-0.67309
63.5	0.40791	-0.84105	0.4137	-0.85299	0.3443	-0.66467
64	0.41097	-0.84736	0.41621	-0.85816	0.33939	-0.65519
64.5	0.41403	-0.85367	0.41872	-0.86334	0.33449	-0.64573
65	0.41684	-0.85946	0.42094	-0.86792	0.32958	-0.63625
65.5	0.41964	-0.86524	0.42316	-0.87249	0.32444	-0.62633

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

66	0. 42222	-0. 87056	0. 42512	-0. 87654	0. 31894	-0. 61571
66. 5	0. 42479	-0. 87586	0. 42709	-0. 8806	0. 31343	-0. 60508
67	0. 42717	-0. 88076	0. 42882	-0. 88416	0. 30793	-0. 59446
67. 5	0. 42954	-0. 88565	0. 43055	-0. 88773	0. 30226	-0. 58351
68	0. 43174	-0. 89019	0. 43207	-0. 89087	0. 29635	-0. 5721
68. 5	0. 43394	-0. 89472	0. 43358	-0. 89398	0. 29045	-0. 56071
69	0. 43597	-0. 89891	0. 43491	-0. 89672	0. 28455	-0. 54932
69. 5	0. 438	-0. 90309	0. 43624	-0. 89946	0. 27853	-0. 5377
70	0. 43989	-0. 90699	0. 43739	-0. 90184	0. 27239	-0. 52585
70. 5	0. 44178	-0. 91089	0. 43854	-0. 90421	0. 26625	-0. 514
71	0. 44354	-0. 91452	0. 43953	-0. 90625	0. 2601	-0. 50212
71. 5	0. 44529	-0. 91812	0. 44052	-0. 90829	0. 25391	-0. 49017
72	0. 44693	-0. 92151	0. 44137	-0. 91004	0. 24767	-0. 47813
72. 5	0. 44856	-0. 92487	0. 44221	-0. 91177	0. 24142	-0. 46606
73	0. 45008	-0. 928	0. 44292	-0. 91324	0. 23518	-0. 45402
73. 5	0. 45161	-0. 93115	0. 44363	-0. 9147	0. 22894	-0. 44197
74	0. 45303	-0. 93408	0. 44421	-0. 9159	0. 22272	-0. 42996
74. 5	0. 45445	-0. 93701	0. 4448	-0. 91711	0. 21649	-0. 41793
75	0. 45577	-0. 93973	0. 44527	-0. 91808	0. 21027	-0. 40593

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

75.5	0.4571	-0.94247	0.44574	-0.91905	0.20411	-0.39403
76	0.45834	-0.94503	0.44611	-0.91981	0.19801	-0.38226
76.5	0.45957	-0.94757	0.44647	-0.92056	0.1919	-0.37046
77	0.46073	-0.94996	0.44675	-0.92113	0.1858	-0.35869
77.5	0.46189	-0.95235	0.44702	-0.92169	0.17983	-0.34716
78	0.46297	-0.95458	0.44721	-0.92208	0.17394	-0.33579
78.5	0.46404	-0.95678	0.44739	-0.92245	0.16806	-0.32444
79	0.46505	-0.95887	0.4475	-0.92268	0.16217	-0.31307
79.5	0.46606	-0.96095	0.44761	-0.92291	0.15647	-0.30207
80	0.467	-0.96289	0.44766	-0.92301	0.15088	-0.29127
80.5	0.46794	-0.96482	0.4477	-0.92309	0.1453	-0.2805
81	0.46881	-0.96662	0.44768	-0.92305	0.13971	-0.26971
81.5	0.46968	-0.96841	0.44766	-0.92301	0.13437	-0.2594
82	0.4705	-0.9701	0.44758	-0.92285	0.12915	-0.24932
82.5	0.47131	-0.97177	0.44751	-0.9227	0.12393	-0.23925
83	0.47207	-0.97334	0.44739	-0.92245	0.11871	-0.22917
83.5	0.47282	-0.97489	0.44727	-0.92221	0.11379	-0.21967
84	0.47352	-0.97633	0.44712	-0.9219	0.109	-0.21042
84.5	0.47422	-0.97777	0.44696	-0.92157	0.10422	-0.2012

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

85	0. 47487	-0. 97911	0. 44678	-0. 9212	9. 94E-02	-0. 19195
85. 5	0. 47551	-0. 98043	0. 44659	-0. 9208	9. 50E-02	-0. 18339
86	0. 47611	-0. 98167	0. 44638	-0. 92037	9. 07E-02	-0. 17509
86. 5	0. 4767	-0. 98289	0. 44617	-0. 91994	8. 64E-02	-0. 16678
87	0. 47725	-0. 98402	0. 44594	-0. 91946	8. 21E-02	-0. 15848
87. 5	0. 4778	-0. 98515	0. 44571	-0. 91899	7. 82E-02	-0. 15096
88	0. 47829	-0. 98616	0. 44547	-0. 91849	7. 44E-02	-0. 14368
88. 5	0. 47879	-0. 9872	0. 44523	-0. 918	7. 07E-02	-0. 1364
89	0. 47924	-0. 98812	0. 44499	-0. 91751	6. 69E-02	-0. 12912
89. 5	0. 4797	-0. 98907	0. 44475	-0. 91701	6. 36E-02	-0. 12273
90	0. 4801	-0. 9899	0. 44451	-0. 91652	6. 04E-02	-0. 11656
90. 5	0. 48051	-0. 99074	0. 44427	-0. 91602	5. 72E-02	-0. 11038
91	0. 48087	-0. 99148	0. 44403	-0. 91553	5. 40E-02	-0. 1042
91. 5	0. 48124	-0. 99225	0. 4438	-0. 91505	5. 13E-02	-0. 099
92	0. 48156	-0. 99291	0. 44358	-0. 9146	4. 87E-02	-0. 09399
92. 5	0. 48188	-0. 99357	0. 44336	-0. 91414	4. 61E-02	-0. 08897
93	0. 48216	-0. 99414	0. 44315	-0. 91371	4. 35E-02	-0. 08396
93. 5	0. 48244	-0. 99472	0. 44295	-0. 9133	4. 14E-02	-0. 08001
94	0. 48268	-0. 99522	0. 44277	-0. 91293	3. 95E-02	-0. 0762

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

94. 5	0. 48291	-0. 99569	0. 44258	-0. 91254	3. 75E-02	-0. 0724
95	0. 48311	-0. 9961	0. 44242	-0. 91221	3. 55E-02	-0. 0686
95. 5	0. 48331	-0. 99652	0. 44227	-0. 9119	3. 42E-02	-0. 06593
96	0. 48346	-0. 99682	0. 44214	-0. 91163	3. 28E-02	-0. 06338
96. 5	0. 48362	-0. 99715	0. 44201	-0. 91136	3. 15E-02	-0. 06082
97	0. 48374	-0. 9974	0. 4419	-0. 91113	3. 02E-02	-0. 05827
97. 5	0. 48386	-0. 99765	0. 4418	-0. 91093	2. 95E-02	-0. 05692
98	0. 48393	-0. 99779	0. 44174	-0. 9108	2. 88E-02	-0. 05564
98. 5	0. 48401	-0. 99796	0. 44167	-0. 91066	2. 82E-02	-0. 05436
99	0. 48405	-0. 99804	0. 44163	-0. 91058	2. 75E-02	-0. 05308
99. 5	0. 48409	-0. 99812	0. 4416	-0. 91052	2. 75E-02	-0. 05306
100	0. 48409	-0. 99812	0. 4416	-0. 91052	2. 75E-02	-0. 05306
100. 5	0. 48409	-0. 99812	0. 4416	-0. 91052	2. 75E-02	-0. 05306
101	0. 48405	-0. 99804	0. 44163	-0. 91058	2. 75E-02	-0. 05309
101. 5	0. 48401	-0. 99796	0. 44167	-0. 91066	2. 82E-02	-0. 05438
102	0. 48393	-0. 99779	0. 44174	-0. 9108	2. 88E-02	-0. 05567
102. 5	0. 48386	-0. 99765	0. 4418	-0. 91093	2. 95E-02	-0. 05695
103	0. 48374	-0. 9974	0. 4419	-0. 91113	3. 02E-02	-0. 05831
103. 5	0. 48362	-0. 99715	0. 44201	-0. 91136	3. 15E-02	-0. 06087

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

104	0.48346	-0.99682	0.44214	-0.91163	3.29E-02	-0.06343
104.5	0.48331	-0.99652	0.44227	-0.91119	3.42E-02	-0.06599
105	0.48311	-0.9961	0.44242	-0.91221	3.56E-02	-0.06866
105.5	0.48291	-0.99569	0.44258	-0.91254	3.75E-02	-0.07247
106	0.48268	-0.99522	0.44277	-0.91293	3.95E-02	-0.07628
106.5	0.48244	-0.99472	0.44295	-0.9133	4.15E-02	-0.08009
107	0.48216	-0.99414	0.44315	-0.91371	4.35E-02	-0.08405
107.5	0.48188	-0.99357	0.44336	-0.91414	4.61E-02	-0.08907
108	0.48156	-0.99291	0.44358	-0.9146	4.87E-02	-0.09409
108.5	0.48124	-0.99225	0.4438	-0.91505	5.13E-02	-0.09911
109	0.48087	-0.99148	0.44403	-0.91553	5.40E-02	-0.10432
109.5	0.48051	-0.99074	0.44427	-0.91602	5.72E-02	-0.1105
110	0.4801	-0.9899	0.44451	-0.91652	6.04E-02	-0.11669
110.5	0.4797	-0.98907	0.44475	-0.91701	6.36E-02	-0.12287
111	0.47924	-0.98812	0.44499	-0.91751	6.70E-02	-0.12927
111.5	0.47879	-0.9872	0.44523	-0.918	7.07E-02	-0.13655
112	0.47829	-0.98616	0.44547	-0.91849	7.45E-02	-0.14384
112.5	0.4778	-0.98515	0.44571	-0.91899	7.83E-02	-0.15113
113	0.47725	-0.98402	0.44594	-0.91946	8.22E-02	-0.15865

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

113. 5	0. 4767	-0. 98289	0. 44617	-0. 91994	8. 65E-02	-0. 16696
114	0. 47611	-0. 98167	0. 44638	-0. 92037	9. 08E-02	-0. 17527
114. 5	0. 47551	-0. 98043	0. 44659	-0. 9208	9. 51E-02	-0. 18358
115	0. 47487	-0. 97911	0. 44678	-0. 9212	9. 95E-02	-0. 19214
115. 5	0. 47422	-0. 97777	0. 44696	-0. 92157	0. 10432	-0. 20139
116	0. 47352	-0. 97633	0. 44712	-0. 9219	0. 10911	-0. 21064
116. 5	0. 47282	-0. 97489	0. 44727	-0. 92221	0. 11391	-0. 2199
117	0. 47207	-0. 97334	0. 44739	-0. 92245	0. 11883	-0. 2294
117. 5	0. 47131	-0. 97177	0. 44751	-0. 9227	0. 12405	-0. 23948
118	0. 4705	-0. 9701	0. 44758	-0. 92285	0. 12927	-0. 24956
118. 5	0. 46968	-0. 96841	0. 44766	-0. 92301	0. 1345	-0. 25965
119	0. 46881	-0. 96662	0. 44768	-0. 92305	0. 13984	-0. 26996
119. 5	0. 46794	-0. 96482	0. 4477	-0. 92309	0. 14543	-0. 28075
120	0. 467	-0. 96289	0. 44766	-0. 92301	0. 15103	-0. 29156
120. 5	0. 46606	-0. 96095	0. 44761	-0. 92291	0. 15662	-0. 30236
121	0. 46505	-0. 95887	0. 4475	-0. 92268	0. 16232	-0. 31336
121. 5	0. 46404	-0. 95678	0. 44739	-0. 92245	0. 16821	-0. 32473
122	0. 46297	-0. 95458	0. 44721	-0. 92208	0. 1741	-0. 3361
122. 5	0. 46189	-0. 95235	0. 44702	-0. 92169	0. 18	-0. 34749

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

123	0. 46073	-0. 94996	0. 44675	-0. 92113	0. 18597	-0. 35902
123. 5	0. 45957	-0. 94757	0. 44647	-0. 92056	0. 19208	-0. 37081
124	0. 45834	-0. 94503	0. 44611	-0. 91981	0. 19819	-0. 38261
124. 5	0. 4571	-0. 94247	0. 44574	-0. 91905	0. 2043	-0. 3944
125	0. 45577	-0. 93973	0. 44527	-0. 91808	0. 21046	-0. 40629
125. 5	0. 45445	-0. 93701	0. 4448	-0. 91711	0. 21669	-0. 41832
126	0. 45303	-0. 93408	0. 44421	-0. 9159	0. 22292	-0. 43035
126. 5	0. 45161	-0. 93115	0. 44363	-0. 9147	0. 22915	-0. 44237
127	0. 45008	-0. 928	0. 44292	-0. 91324	0. 23539	-0. 45442
127. 5	0. 44856	-0. 92487	0. 44221	-0. 91177	0. 24164	-0. 46649
128	0. 44693	-0. 92151	0. 44137	-0. 91004	0. 24789	-0. 47855
128. 5	0. 44529	-0. 91812	0. 44052	-0. 90829	0. 25415	-0. 49064
129	0. 44354	-0. 91452	0. 43953	-0. 90625	0. 26035	-0. 50261
129. 5	0. 44178	-0. 91089	0. 43854	-0. 90421	0. 2665	-0. 51448
130	0. 43989	-0. 90699	0. 43739	-0. 90184	0. 27265	-0. 52635
130. 5	0. 438	-0. 90309	0. 43624	-0. 89946	0. 2788	-0. 53822
131	0. 43597	-0. 89891	0. 43491	-0. 89672	0. 28482	-0. 54985
131. 5	0. 43394	-0. 89472	0. 43358	-0. 89398	0. 29073	-0. 56125
132	0. 43174	-0. 89019	0. 43207	-0. 89087	0. 29665	-0. 57268

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

132. 5	0. 42954	-0. 88565	0. 43055	-0. 88773	0. 30256	-0. 58409
133	0. 42717	-0. 88076	0. 42882	-0. 88416	0. 30824	-0. 59506
133. 5	0. 42479	-0. 87586	0. 42709	-0. 8806	0. 31376	-0. 60571
134	0. 42221	-0. 87054	0. 42512	-0. 87654	0. 31927	-0. 61635
134. 5	0. 41964	-0. 86524	0. 42316	-0. 87249	0. 32479	-0. 62701
135	0. 41683	-0. 85944	0. 42094	-0. 86792	0. 32994	-0. 63695
135. 5	0. 41403	-0. 85367	0. 41872	-0. 86334	0. 33487	-0. 64647
136	0. 41097	-0. 84736	0. 41621	-0. 85816	0. 3398	-0. 65598
136. 5	0. 40791	-0. 84105	0. 4137	-0. 85299	0. 34473	-0. 6655
137	0. 40456	-0. 83414	0. 41086	-0. 84713	0. 34911	-0. 67396
137. 5	0. 40121	-0. 82724	0. 40803	-0. 8413	0. 3532	-0. 68185
138	0. 39752	-0. 81963	0. 40483	-0. 8347	0. 35729	-0. 68975
138. 5	0. 39383	-0. 81202	0. 40163	-0. 8281	0. 36138	-0. 69764
139	0. 38975	-0. 80361	0. 398	-0. 82062	0. 36469	-0. 70403
139. 5	0. 38567	-0. 7952	0. 39438	-0. 81315	0. 36764	-0. 70973
140	0. 38114	-0. 78586	0. 39027	-0. 80468	0. 37059	-0. 71542
140. 5	0. 37661	-0. 77652	0. 38617	-0. 79623	0. 37354	-0. 72112
141	0. 37154	-0. 76606	0. 38149	-0. 78658	0. 37535	-0. 72461
141. 5	0. 36646	-0. 75559	0. 37682	-0. 77695	0. 37671	-0. 72724

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

142	0. 36075	-0. 74381	0. 37148	-0. 76594	0. 37806	-0. 72985
142. 5	0. 35504	-0. 73204	0. 36614	-0. 75493	0. 37942	-0. 73247
143	0. 34855	-0. 71866	0. 36	-0. 74227	0. 37911	-0. 73187
143. 5	0. 34206	-0. 70528	0. 35386	-0. 72961	0. 37825	-0. 73021
144	0. 33462	-0. 68994	0. 34675	-0. 71495	0. 3774	-0. 72857
144. 5	0. 32719	-0. 67462	0. 33963	-0. 70027	0. 37654	-0. 72691
145	0. 31857	-0. 65685	0. 33133	-0. 68315	0. 37304	-0. 72015
145. 5	0. 30995	-0. 63907	0. 32302	-0. 66602	0. 36884	-0. 71205
146	0. 29985	-0. 61825	0. 31321	-0. 64579	0. 36464	-0. 70394
146. 5	0. 28975	-0. 59742	0. 3034	-0. 62557	0. 36044	-0. 69583
147	0. 27771	-0. 5726	0. 29165	-0. 60134	0. 35181	-0. 67917
147. 5	0. 26568	-0. 54779	0. 2799	-0. 57711	0. 34224	-0. 66069
148	0. 25117	-0. 51788	0. 26566	-0. 54775	0. 33267	-0. 64222
148. 5	0. 23667	-0. 48798	0. 25141	-0. 51837	0. 32311	-0. 62376
149	0. 21887	-0. 45128	0. 23379	-0. 48204	0. 30553	-0. 58983
149. 5	0. 20107	-0. 41458	0. 21617	-0. 44571	0. 28664	-0. 55336
150	0. 17838	-0. 36779	0. 19388	-0. 39975	0. 26775	-0. 51689
150. 5	0. 1557	-0. 32103	0. 17159	-0. 35379	0. 24886	-0. 48042
151	0. 12769	-0. 26328	0. 14255	-0. 29392	0. 21655	-0. 41805

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

151. 5	9. 97E-02	-0. 20554	0. 11351	-0. 23404	0. 18267	-0. 35264
152	5. 97E-02	-0. 12319	7. 44E-02	-0. 15331	0. 14879	-0. 28724
152. 5	1. 98E-02	-0. 04083	3. 52E-02	-0. 07259	0. 11491	-0. 22183
153	-3. 50E-02	0. 072099	-1. 65E-02	0. 033975	4. 11E-02	-0. 07926
153. 5	-8. 97E-02	0. 185033	-6. 82E-02	0. 140538	-3. 58E-02	0. 069135
154	-0. 17501	0. 360845	-0. 15066	0. 310639	-0. 1283	0. 247683
154. 5	-0. 26028	0. 53666	-0. 23316	0. 480742	-0. 25976	0. 501467
155	-0. 40711	0. 839402	-0. 38066	0. 784866	-0. 44456	0. 858224
155. 5	-0. 55394	1. 142144	-0. 52816	1. 08899	-0. 72287	1. 395502
156	-0. 83188	1. 715216	-0. 80702	1. 663959	-1. 16	2. 239382
156. 5	-1. 2141	2. 503299	-1. 1806	2. 434227	-2. 318	4. 474903
157	-1. 9711	4. 064124	-1. 9246	3. 968247	-4. 2704	8. 244015
157. 5	-4. 9289	10. 16268	-4. 8304	9. 959588	-4. 2953	8. 292085
158	-6. 9228	14. 27381	-6. 8694	14. 16371	-3. 2667	6. 306371
158. 5	-4. 0526	8. 355876	-4. 0542	8. 359175	-2. 5194	4. 863707
159	-3. 3204	6. 846186	-3. 2853	6. 773814	-2. 2391	4. 322587
159. 5	-2. 924	6. 028866	-2. 8834	5. 945155	-2. 0678	3. 991892
160	-2. 6	5. 360825	-2. 5687	5. 296289	-1. 9605	3. 784749
160. 5	-2. 3307	4. 805567	-2. 3098	4. 762474	-1. 8723	3. 614479

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

161	-2. 174	4. 482474	-2. 1552	4. 443711	-1. 8077	3. 489768
161. 5	-2. 0173	4. 159381	-2. 0005	4. 124742	-1. 7611	3. 399807
162	-1. 9414	4. 002887	-1. 9256	3. 970309	-1. 7234	3. 327027
162. 5	-1. 8655	3. 846392	-1. 8508	3. 816082	-1. 7156	3. 311969
163	-1. 8556	3. 825979	-1. 8495	3. 813402	-1. 7184	3. 317375
163. 5	-1. 8458	3. 805773	-1. 8482	3. 810722	-1. 7408	3. 360618
164	-1. 9129	3. 944124	-1. 9264	3. 971959	-1. 7787	3. 433784
164. 5	-1. 9801	4. 08268	-2. 0046	4. 133196	-1. 8278	3. 528571
165	-2. 141	4. 414433	-2. 1496	4. 432165	-1. 9078	3. 683012
165. 5	-2. 3388	4. 822268	-2. 3344	4. 813196	-2. 0006	3. 862162
166	-2. 608	5. 37732	-2. 6104	5. 382268	-2. 1466	4. 144015
166. 5	-3. 1423	6. 478969	-3. 1863	6. 569691	-2. 459	4. 747104
167	-5. 2752	10. 8767	-5. 3768	11. 08619	-3. 173	6. 125483
167. 5	-3. 5347	7. 288041	-3. 5102	7. 237526	-4. 1204	7. 95444
168	-1. 2722	2. 623093	-1. 2831	2. 645567	-4. 1789	8. 067375
168. 5	-0. 70136	1. 446103	-0. 69341	1. 429711	-2. 8026	5. 410425
169	-0. 41922	0. 864371	-0. 39804	0. 820701	-1. 7018	3. 285328
169. 5	-0. 21728	0. 448	-0. 2089	0. 430722	-1. 0884	2. 101158
170	-0. 11008	0. 226969	-9. 84E-02	0. 202911	-0. 69658	1. 344749

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

170. 5	-7. 72E-03	0. 015916	6. 64E-03	-0. 01369	-0. 3229	0. 623359
171	4. 63E-02	-0. 0954	5. 74E-02	-0. 1183	-0. 22185	0. 428282
171. 5	9. 77E-02	-0. 2014	0. 10556	-0. 21765	-0. 1208	0. 233205
172	0. 13044	-0. 26895	0. 13528	-0. 27893	-1. 98E-02	0. 038137
172. 5	0. 16117	-0. 33231	0. 16361	-0. 33734	7. 27E-02	-0. 14029
173	0. 18057	-0. 37231	0. 18414	-0. 37967	0. 10471	-0. 20214
173. 5	0. 19884	-0. 40998	0. 20322	-0. 41901	0. 13676	-0. 26402
174	0. 21198	-0. 43707	0. 21578	-0. 44491	0. 1688	-0. 32587
174. 5	0. 22402	-0. 4619	0. 22734	-0. 46874	0. 19754	-0. 38135
175	0. 23192	-0. 47819	0. 23518	-0. 48491	0. 21197	-0. 40921
175. 5	0. 239	-0. 49278	0. 24219	-0. 49936	0. 22639	-0. 43705
176	0. 24353	-0. 50212	0. 24656	-0. 50837	0. 24082	-0. 4649
176. 5	0. 24738	-0. 51006	0. 25025	-0. 51598	0. 25287	-0. 48817
177	0. 24939	-0. 51421	0. 25213	-0. 51986	0. 25779	-0. 49766
177. 5	0. 25083	-0. 51718	0. 25345	-0. 52258	0. 26271	-0. 50716
178	0. 25095	-0. 51742	0. 25346	-0. 5226	0. 26763	-0. 51666
178. 5	0. 25058	-0. 51666	0. 25297	-0. 52159	0. 27093	-0. 52303
179	0. 24924	-0. 5139	0. 25151	-0. 51858	0. 27066	-0. 52251
179. 5	0. 24746	-0. 51023	0. 24962	-0. 51468	0. 27039	-0. 52199

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

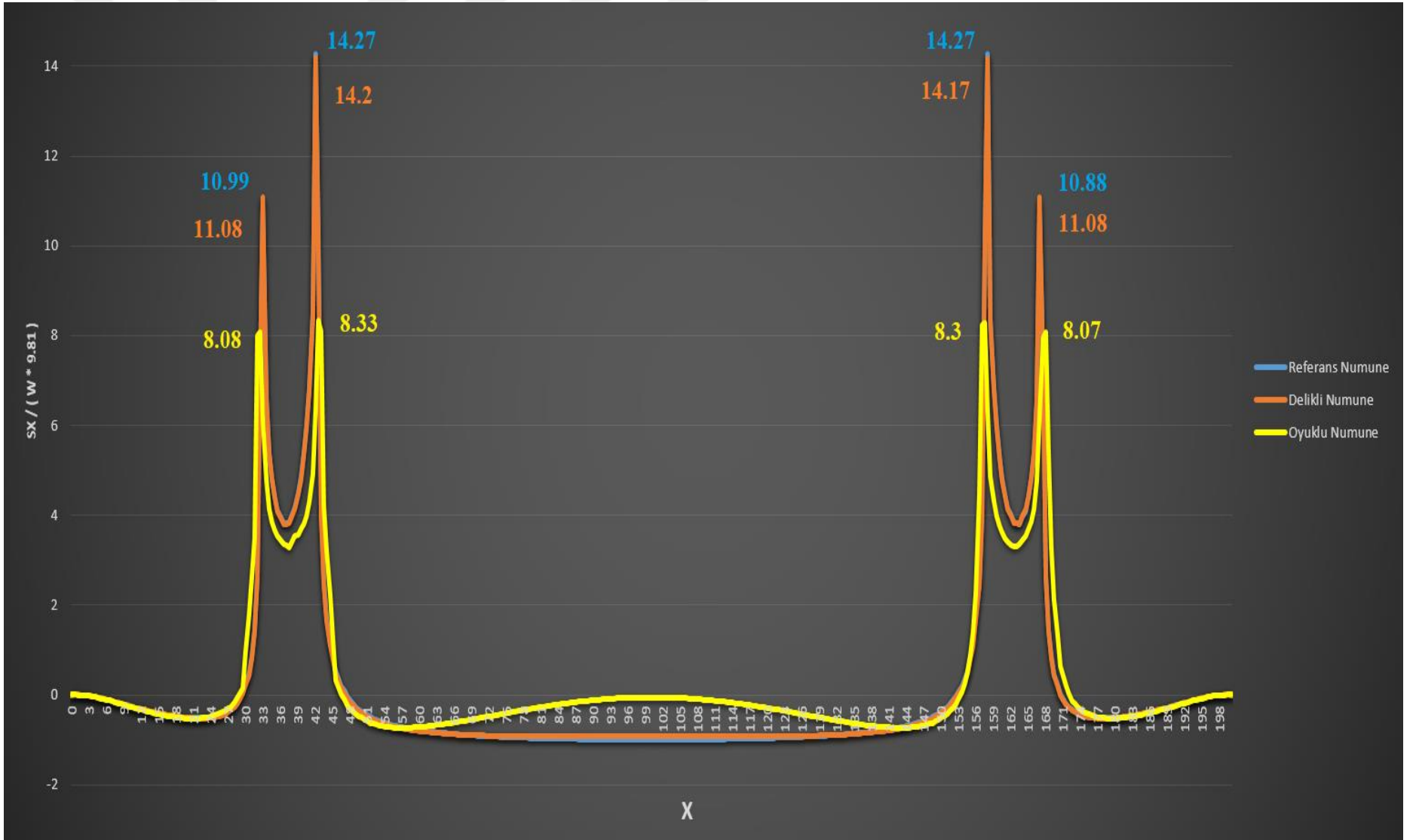
180	0. 24493	-0. 50501	0. 24698	-0. 50924	0. 27012	-0. 52147
180. 5	0. 24202	-0. 49901	0. 24395	-0. 50299	0. 26863	-0. 51859
181	0. 23851	-0. 49177	0. 24032	-0. 49551	0. 26509	-0. 51176
181. 5	0. 23465	-0. 48381	0. 23634	-0. 4873	0. 26156	-0. 50494
182	0. 23031	-0. 47487	0. 23189	-0. 47812	0. 25802	-0. 49811
182. 5	0. 22564	-0. 46524	0. 2271	-0. 46825	0. 25347	-0. 48932
183	0. 22056	-0. 45476	0. 22192	-0. 45757	0. 24761	-0. 47801
183. 5	0. 21518	-0. 44367	0. 21642	-0. 44623	0. 24176	-0. 46672
184	0. 20946	-0. 43188	0. 21059	-0. 43421	0. 2359	-0. 45541
184. 5	0. 20344	-0. 41946	0. 20447	-0. 42159	0. 22923	-0. 44253
185	0. 19714	-0. 40647	0. 19806	-0. 40837	0. 22175	-0. 42809
185. 5	0. 19055	-0. 39289	0. 19138	-0. 3946	0. 21426	-0. 41363
186	0. 18372	-0. 3788	0. 18445	-0. 38031	0. 20678	-0. 39919
186. 5	0. 17662	-0. 36416	0. 17725	-0. 36546	0. 19862	-0. 38344
187	0. 16931	-0. 34909	0. 16986	-0. 35023	0. 18994	-0. 36668
187. 5	0. 16174	-0. 33348	0. 16221	-0. 33445	0. 18126	-0. 34992
188	0. 15401	-0. 31755	0. 15439	-0. 31833	0. 17258	-0. 33317
188. 5	0. 14604	-0. 30111	0. 14635	-0. 30175	0. 16338	-0. 31541
189	0. 13794	-0. 28441	0. 13817	-0. 28489	0. 15385	-0. 29701

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler Y = 10 mm, Üç numune (devam).

189. 5	0. 12964	-0. 2673	0. 12981	-0. 26765	0. 14433	-0. 27863
190	0. 12123	-0. 24996	0. 12134	-0. 25019	0. 1348	-0. 26023
190. 5	0. 11268	-0. 23233	0. 11274	-0. 23245	0. 12503	-0. 24137
191	0. 10406	-0. 21456	0. 10407	-0. 21458	0. 11514	-0. 22228
191. 5	9. 54E-02	-0. 19663	9. 53E-02	-0. 19656	0. 10525	-0. 20319
192	8. 66E-02	-0. 17864	8. 66E-02	-0. 1785	9. 54E-02	-0. 1841
192. 5	7. 79E-02	-0. 16072	7. 79E-02	-0. 16052	8. 57E-02	-0. 16543
193	6. 93E-02	-0. 14282	6. 91E-02	-0. 14256	7. 61E-02	-0. 14689
193. 5	6. 08E-02	-0. 1253	6. 06E-02	-0. 12501	6. 65E-02	-0. 12835
194	5. 23E-02	-0. 10788	5. 22E-02	-0. 10757	5. 69E-02	-0. 10981
194. 5	4. 43E-02	-0. 0913	4. 41E-02	-0. 09098	4. 83E-02	-0. 09332
195	3. 63E-02	-0. 0749	3. 62E-02	-0. 07458	4. 00E-02	-0. 07731
195. 5	2. 91E-02	-0. 05997	2. 89E-02	-0. 05966	3. 18E-02	-0. 0613
196	2. 20E-02	-0. 0453	2. 18E-02	-0. 04501	2. 35E-02	-0. 04529
196. 5	1. 60E-02	-0. 03297	1. 59E-02	-0. 03273	1. 79E-02	-0. 03454
197	1. 02E-02	-0. 02097	1. 01E-02	-0. 02076	1. 27E-02	-0. 02455
197. 5	6. 05E-03	-0. 01248	5. 98E-03	-0. 01232	7. 54E-03	-0. 01455
198	2. 11E-03	-0. 00435	2. 06E-03	-0. 00424	2. 36E-03	-0. 00456
198. 5	5. 36E-04	-0. 0011	5. 03E-04	-0. 00104	1. 21E-03	-0. 00233

Çizelge 5.10 : Belirli noktalardaki değerler $Y = 10$ mm, Üç numune (devam).

199	-8. 85E-04	0. 001825	-8. 96E-04	0. 001847	3. 24E-04	-0. 00063
199. 5	-5. 43E-04	0. 00112	-5. 47E-04	0. 001128	-5. 60E-04	0. 00108
200	-1. 46E-04	0. 000302	-1. 43E-04	0. 000295	-1. 44E-03	0. 002787



Şekil 5.41: Üç deneyin $S_x/(W * 9.81)$ diyagramı, $Y = 10$ mm çizgisi üzerinde.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düzgün yayılı yüklemeye altındaki üç farklı gövde özelliğine sahip duvar panellerin ve sonlu elemanlar yöntemleri ile gerilme analizi yapılmıştır.

Fotoelastisite yönteminde asal gerilme farkları elde edilirken kullanılan modelin optik hassasiyet katsayısı ve deney sırasında okunan N eş-renk (fringe, saçak) çizgilerinin sayısal değeri sonuçlar ile lineer bağıntı içindedir. Bir diğer deyişle, N sayılarının okunma hassasiyeti gerilme sonuçlarını birebir etkilemektedir. Eş-renk çizgilerinin sayılarının okunmasının hassasiyet gerektiren bir işlem olduğu bu çalışma sırasında anlaşılmıştır. Gerektiğinde ilave bir optik cihazla (büyüteç, mikroskop) okunması gerektiği anlaşılmıştır.

Ansys sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan hazır bir program olup, eleman sayısının artırılması, sonuçların kesin çözüme yakınsamasını sağlamaktadır. Sınırdan yada bölgede model elemanlara ayrılırken bilgisayar programının çalışması açısından homojenliğine dikkat edilmesi gerekir. Eksen takımlarının seçimi programın verdiği sonuçlarda farklılık göstermemektedir.

Sınırdan bölgeye geçiş oluşturan kolon-panel birleşim bölgelerinde, gövde içindeki oyuk kenarlarında en büyük gerilmelerin elde edildiği analiz ve deney sonuçlarından denetlenmiştir.

Sınırdan bölgeye geçiş oluşturan kolon ve panelin birleştiği alt sınırdan oluşan gerilmeler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Gerek analiz gerekse fotoelastik sonuçlar birbiri ile büyük uyum göstermekte ve hatta sonuçların üstüste düştüğü gözlenmiştir.

Alt sınır bölgesinde, yüklemeye göre normalize edilmiş değerler ile hazırlanan Şekil 5.41 de sunulan grafikte de görüldüğü gibi, başlangıç model ve dairesel delikli model sonuçları birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, oyuklu, 3.model sonuçları iki mesnet arasındaki serbest sınırdan oluşan yatay doğrultudaki gerilmelerin basınçtan çekmeye döndüğünü göstermiştir. Ayrıca, mesnet

kenarlarındaki normalize edilmiş gerilme değerleri, başlangıç modelinin 1.7 katına kadar çıkmaktadır.

Analizler sırasında, mesnet sınır şartları yer değiştirmeler cinsinden tanımlanmış olup, bu sınır koşullarının yükleme cinsinden tanımlanması durumunda sonuçlara etkisi bu çalışmada incelenmemiştir.



KAYNAKLAR

Ansys Mechanical APDL 18.2 Yardım dosyaları

Dally. J. W. and Riley. W. F. (1978). Experimental Stress Analysis (New York: McGraw-Hill, 1978).

Dönmez. A. (2015). Öngerilmeli İnşaat Elemanlarında Gerilme Analiz, Doktora tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Durelli. A. J. and Riley. W. F. (1965). Introduction to Photomechanics (Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, Inc. , 1965).

Drucker. D .C. (1948). Photoelastic separation of principal stresses by oblique incidence, J. Appl. Mech. , Trans ASME, 10(3), A156 (1943); M. M. Frocht, Photoelasticity, Vol. II (New York: John Wiley and Sons, 1948).

Frocht. M. M. (1941). Photoelasticity (New York: John Wiley and Sons(1941).

Frocht. M. M. and Guernsey. R. (1955). Further work on the general three dimensional photoelastic problem, J. Appl. Mech (1955).

Goldsmith. W. (1962). Dynamic photoelasticity, Experimental Techniques in Shock and Vibration, W. J. Worley, ed. , ASME, 25-54 (1962).

Leven. M. M. (1963). Epoxy resins for photoelastic use, Photoelasticity, M. M. Frocht, ed. (New York: Pergamon, 1963).

Post. D. (1955). A new photoelastic interferometer suitable for static and dynamic measurements, Proc. SESA (1955).

Post. D. (1955). Isochromatic fringe sharpening and fringe multiplication in photoelasticity Proc. SESA (1955).

Post. D. (1961). Accuracy of birefringent coating method for coatings of arbitrary thickness, Experimental Mechanics, (1961).

Post. D. (1970). Photoelastic-fringe multiplication—for tenfold increase in sensitivity, Experimental Mechanics (1970).

Post. D. (1972). Generic nature of absolute-retardation photoelasticity, Experimental Mechanics (1967) and D. Post, Holography and interferometry in photoelasticity, Experimental Mechanics (1972).

Post. D. (1982). The core method, Experimental Mechanics (1982).

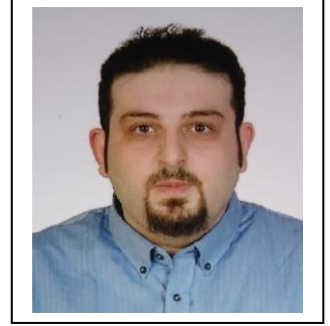
Srinath L. S. And Frocht. M. M. (1963). The potentialities of the method of scattered light, Photoelasticity , M. M. Frocht, ed. , (New York: Pergamon, 1963).

Taylor. C. E. and Schweiker. J. W. (1959). A three-dimensional photoelastic investigation of stresses near a reinforced opening in a reactor vessel, Proc. SESA, (1959).

- Vassarheli. D.** (1951). Contribution to the calculation of stresses from photoelastic values, Proc. SESA (1951).
- Wells. A. A. and Post. D.** (1958). The dynamic stress distribution surrounding a running crack a photoelastic analysis, Proc. SESA (1958).



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad :Sina SHABAHANG
Doğum Tarihi ve Yeri : 10/08/1987 Ahvaz
E-posta : shabahang@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, IAU Ahvaz, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendislik