



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Elastik Sınırlar İçerisinde Oluşan Gerilmelerin Fotoelastisite Yöntemiyle Belirlenmesi

Bekir ÇEVİK<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Kaynak Teknolojisi Bölümü, Gümüşova MYO, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bekircevik@duzce.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada, çelik çekme levhasında elastik sınırlar içerisinde oluşturulan aksel çekme gerilmelerinin klasik gerilme formülleri ve fotoelastisite yöntemi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyle Fe37 kalite çelik levhalar kullanılmıştır. Levha üzerine fotoelastik kaplama uygulanmıştır. Kaplama malzemesi kalibre edilerek gerinim-optik katsayısı ve fringe (kuvvet çizgi sayısı) sayıları belirlenmiştir. Daha sonra levha 30, 45, 60, 75 kN aksel çekme kuvvetlerine maruzken, levhada oluşan gerilmeler fotoelastisite analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Fotoelastisite ile ölçülen aksel gerilmeler ile teorik gerilme sonuçlarının ortalama % 3 sapma ile yakın değerler verdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotoelastisite, gerilme, gerilme analizi

## Determination of the Consisting Stresses in Elastic Limits by Photoelasticity Method

### ABSTRACT

In this study, the axial tensile stress formulas in the steel plates were determined by classical and photoelasticity methods. Fe37 steel sheets were used for the experimental work. Photoelastic coating was applied on the steel sheets. Strain-optic coefficient of the coating material calibrated and fringe (number of lines of force) was determined. While the plates were exposed force of 30,45,60,75 KN, plain stresses were determined by photoelasticity and analysis method. Results shown that measured and calculated stress values are quite close and their average standard deviation was 3%.

**Keywords:** Photoelasticity, stress, stress analysis

## I. GİRİŞ

**B**İR sistemde birim alana etkiyen kuvvete gerilme denir. Gerilme, normal gerilme ve kayma gerilmesi olarak iki farklı şekilde oluşabilmektedir. Yüzeye dik olan ve aksenal bir kuvvet altında oluşuyor ise normal gerilme ( $\sigma$ ), yüzeyin teğet düzleminde yani açılı bir kuvvet altında oluşuyorsa kayma gerilmesi ( $\tau$ ) adı verilmektedir [1-3].

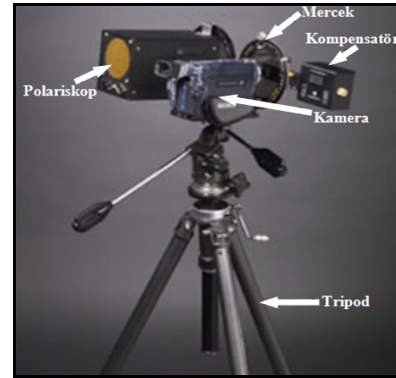
Gerilmelere maruz bir sistemde (yapı elemanı) makro ve mikro kusurlar mevcut ise gerilmeler kusurların bulunduğu bölgelerde yoğunlaşır ve sistemin mukavemetini olumsuz yönde etkiler. Bu durumda yapı elemanı görevini yerine getiremez ve hasar meydana gelir. Bu da büyük kayıpların (malzeme, zaman, enerji, ekonomik v.s) oluşmasına neden olur. Sistemde kullanılacak malzemelerin hasara neden olabilecek bölgeleri tespit edilerek, o bölgelerin güçlendirilmesi bu olumsuzlukların minimize edilmesine olanak sağlar. Sistemde oluşan gerilmeler değişik yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntemlerden birisi de fotoelastisite gerilme analizidir.

Fotoelastisite yöntemi bir malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin ve gerilme dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan en etkili yöntemlerden birisidir. Ayrıca bu yöntemle gerilme yığılmalarının meydana geldiği kritik bölgeler de rahatlıkla belirlenebilir. Dolayısıyla bu yöntem ile malzemenin hangi bölgesinden hasara uğrayacağı tespit edilebilmektedir [4-7].

Fotoelastisite analizi, bir malzemedeki statik veya dinamik kuvvetlerin neden olduğu yüzeydeki birim deformasyonlar ile gerilmelerin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız gerilme ölçme tekniğidir [8]. Bu metotta ilk olarak test parçasına birim deformasyona duyarlı özel fotoelastik kaplama malzemesi yapıştırılır (Şekil 1). Daha sonra test ya da servis yükleri parçaya uygulanır. Polariskoptan gelen polarize ışık ile kaplama aydınlatılır. Polariskop aracılığıyla kaplamanın gösterdiği renkler gerilmelerin dağılımını ve yüksek gerilme bölgelerini gösterir. Polariskoba yerleştirilen optik dönüştürücü (kompansatör) ile gerilme analizleri kolay ve hızlı bir şekilde yapılır (Şekil 2) [9,10].



Şekil 1. Kaplamanın yüzeye uygulanması[4,9]



Şekil 2. Fotoelastisite analiz cihazı[9]

Fotoelastisite analizi ile test parçası üzerindeki gerilmeler ve gerilme dağılımları hem görsel olarak hem de sayısal olarak belirlenebilmektedir. Pratikte model yapmaya gerek olmadan, servis şartlarında doğrudan test edilecek makine parçası veya yapı elemanlarına (kolon, kiriş v.b) uygulanabilmesi yöntemin en önemli avantajlarından birisidir. İncelenen yüzeyde görülen muhtelif renklere göre yüzeyde oluşan deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşılık gelen gerilmeler optik cihazlarla

ölçülerek hesaplanmaktadır. Fotoelastisite analiz yöntemi her çeşit yük altındaki yüzeye uygulanabilmektedir [4,8-10].

Bu çalışmanın amacı, gerilme ölçüm metodlarından olan fotoelastisite analiz yönteminin kalibrasyonu yapılarak, çekme levhası üzerinde oluşan gerilmelerin deneysel olarak belirlenmesini araştırmaktır. Bu amaçla, çekme levhasının bir yüzeyine fotoelastik kaplama malzemesi yapıştırılmış ve eksenel çekme kuvveti uygulanarak oluşan gerilmeler fotoelastisite analiz yöntemi ile belirlenmiştir.

## II. MALZEME ve YÖNTEM

### A. MALZEME VE METOD

Bu çalışmada, 50x7 mm en kesitinde 750 mm uzunluğunda Fe37 kalite yapı çeliği levha malzemeler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo1.** Levha malzemenin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	C	Si	S	P	Mn	Kalan
Fe37	0,13	0,28	0,010	0,013	0,36	Fe

**Tablo 2.** Levha malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma dayanımı $\sigma_a$ (MPa)	Çekme dayanımı $\sigma_c$ (MPa)	Kopma uzaması (%)
Fe 37	372	459	29

**Tablo 3.** PL1 fotoelastik resinin bazı fiziksel özellikleri [10]

Kaplama malzemesi yoğunluğu (gr/inç <sup>2</sup> )	18,5
Optik gerinme katsayısı (K)	0,094
Uzama oranı (GPa)	% 3-5
Elastik modülü	2,9
Poisson katsayısı	0,36
Hassas olduğu sıcaklık (°C)	82
Kullanılabilen maksimum sıcaklık (°C)	232

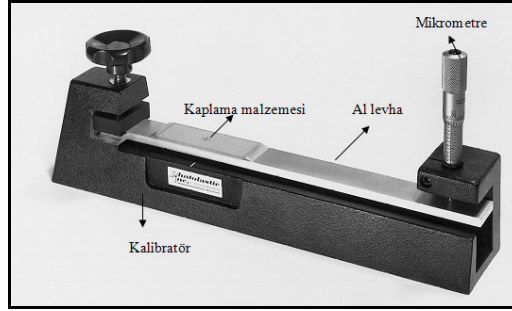
Fotoelastisite yöntemi ile gerilmelerin belirlenebilmesi amacıyla levha malzeme yüzeyine birim deformasyona duyarlı kaplama malzemesi uygulanmıştır. Kaplama malzemesi olarak PL1 (Resin) ve PLH1 (Sertleştirici) kullanılmıştır. Hazırlanan kaplama malzemesi ölçüm yapılacak bölgeye PC1 (Resin) ve PCH1 (Sertleştirici) kullanılarak üretilen yapıştırıcı vasıtasıyla birleştirilmiştir (Şekil 3). Tablo 3’te fotoelastik kaplama malzemesinin (resin) bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.



**Şekil 3.** Fotoelastik kaplama malzemesi ile kaplanmış çekme levhası

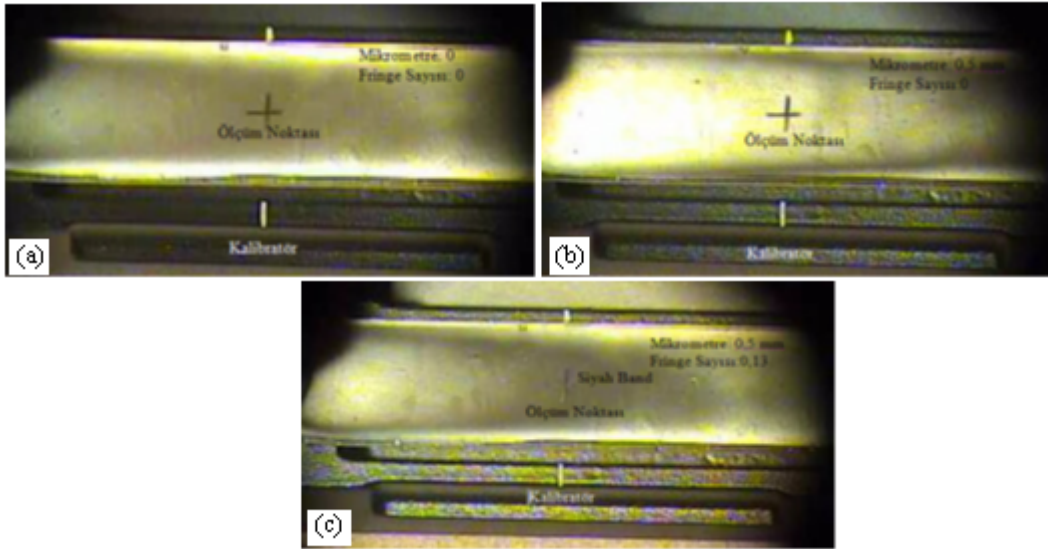
## B. FOTOELASTİK KAPLAMA MALZEMESİNİN KALİBRASYONU

Levha yüzeyine yapıştırılan resin kaplama malzemesinin kalibrasyonu yapılmıştır. Hazırlanan fotoelastik kaplama malzemesi alüminyum kalibrasyon levhası üzerine yapıştırılmıştır. Kaplama malzemesinin kalınlığı 2,7 mm ve yapıştırıcı kalınlığı 0,6 mm olarak ölçülmüştür. Hazırlanan kalibrasyon çubuğu kalibratöre yerleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Kalibratör ve kalibrasyon levhası [10]

Kalibrasyon levhasına yapıştırılan kaplama malzemesi üzerinde ölçüm alınacak nokta işaretlenmiştir (Şekil 5 a). Bir ucu sabit olan kalibrasyon levhasına kalibratör üzerindeki mikrometre ile bir eğilme kuvveti tatbik edilmiş ve konsol kiriş olarak çalışması sağlanmıştır. Kaplama malzemesi üzerinde uygulanan eğilme kuvvetine bağlı olarak siyah bir band oluşmuştur (Şekil 5 b ve 5 c).



Şekil 5. Kalibrasyon uygulaması, a) Fotoelastik kaplamada ölçüm noktası tayini, b) Mikrometre 0,5 mm eğim oluşturduğu durumda kalibrasyon levhasının görünümü, c) Mikrometre 0,5 mm ve kuvvet çizgisi (fringe) sayısı 0,13 olduğunda ölçüm noktası üzerinde görünen siyah band [10]

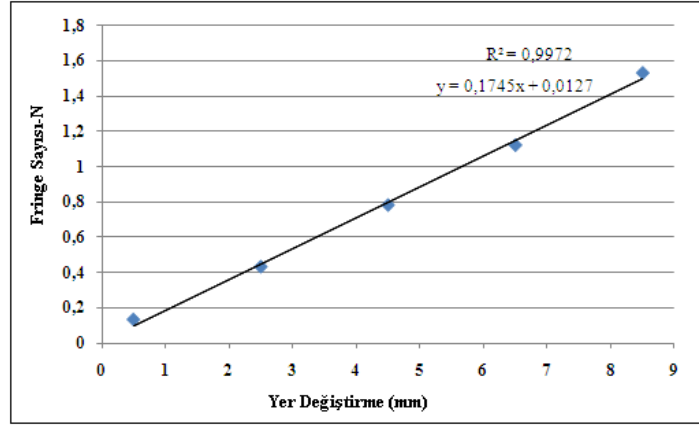
Siyah band kompensatör kullanılarak ölçüm alınacak nokta üzerine getirilmiştir ve kompensatörden kuvvet çizgilerinin (fringe) sayısı okunmuştur. Bu işlem mikrometre vasıtasıyla farklı yer değiştirmeler ile oluşturulan farklı eğilme kuvvetleri için tekrarlanmıştır (Tablo 4).



**Tablo 4.** Mikrometre ve kompensatörde okunan değerler [10]

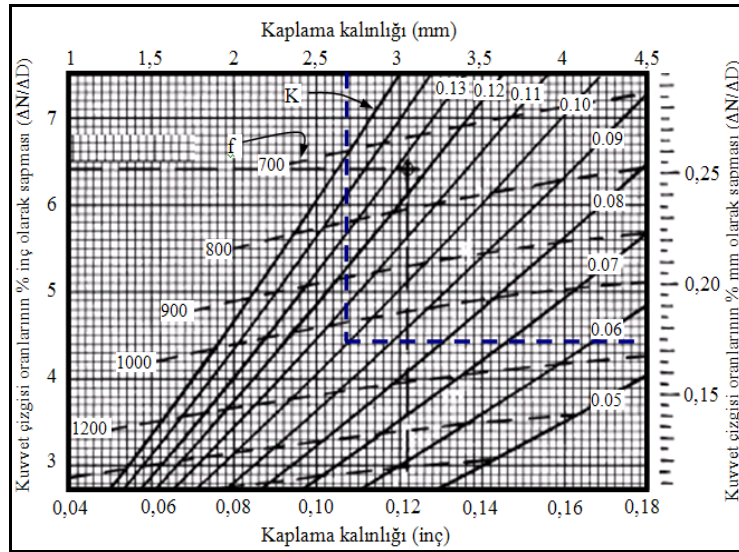
Mikrometrede okunan değer (mm)	Kuvvet çizgi sayısı(f)
0,5	0,13
2,5	0,43
4,5	0,78
6,5	1,12
8,5	1,53

Mikrometreden okunan farklı yer değiştirmeler ile buna karşılık gelen ve kompensatörden okunan kuvvet çizgisi değerleri kullanılarak Şekil 6'daki kalibrasyon grafiği elde edilmiş ve grafikte elde edilen doğrunun eğimi 0,174 olarak bulunmuştur.



**Şekil 6.** Fotoelastik kaplamanın kalibrasyon eğrisi [10]

Bulunan doğrunun eğimi Şekil 7'de verilen fotoelastik kaplamaların kalibrasyon çizelgesinde milimetre olarak verilen eğim sütununda işaretlenmiştir. Aynı çizelgede kaplama kalınlığı yine milimetre sütununda işaretlenmiş ve kesişen noktalardan  $K=0,102$  ve  $f=1045$  değerleri bulunmuştur. Burada; “K” resin kaplama malzemesinin gerinim-optik katsayısını, “f” ise resin kaplamanın kuvvet çizgisi oranını vermektedir [14].



**Şekil 7.** Fotoelastisite kaplama malzemesi kalibrasyon çizelgesi

### C. ÇEKME LEVHASININ GERİLME ANALİZİ

Yatay çekme cihazı kullanılarak fotoelastik kaplanmış levha 30, 45, 60 ve 75 kN'luk aksenal çekme kuvvetleri uygulanarak aksenal gerilmeye maruz bırakılmıştır. Uygulanan çekme kuvvetlerine bağlı olarak levha üzerinde tek eksende oluşan gerinim ve gerilme farkları fotoelastisite deney ekipmanları kullanılarak analiz edilmiştir.

## III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Kademeli olarak 30, 45, 60 ve 75 kN'luk aksenal çekme kuvvetleri ile yüklenen çekme levhasında oluşan gerilme değerleri klasik gerilme (mühendislik gerilmesi) teorisine göre (Eş. 1) bulunabilir. Ancak karmaşık geometrik özelliklere sahip malzemelerde bu formülün kullanımı zor olmaktadır. Fotoelastik kaplama malzemesi yapılandırılan bir test elemanı farklı kuvvetlere maruz bırakıldığında, fotoelastisite gerilme analiz yöntemi ile test edilebilir ve kuvvet çizgi sayıları (fringe) kompensatör yardımı ile belirlenebilir. Kuvvet çizgisi sayıları bilindiği takdirde test elemanında oluşabilecek asal gerinim ve gerilmeler teorik olarak hesaplanabilir. Çekme levhası üzerinde oluşan gerilme değerleri fotoelastisite teorisi ile de Eş. 2 ve Eş. 3 kullanarak bulunabilir.

$$\sigma_{\max} = \sigma_x = \sigma_1 = \frac{F}{A_{\text{levha}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = N \times f \quad (2)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  : Asal gerinimler

$N$  : Kuvvet çizgi sayısı

$f$  : Resin kaplamanın kuvvet çizgisi oranını

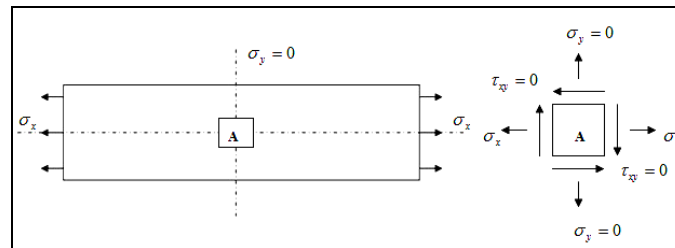
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1+\nu} \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3)$$

$\sigma_1, \sigma_2$  : Asal gerilmeler

$E$  : Elastikiyet modülü (210 GPa)

$\nu$  : Poisson oranı (0,29)

Test esnasında çekme levhası tek eksende gerilmeye maruz kalmaktadır. Bu nedenle levha üzerinde aksenal gerilmenin etkisi sadece "x" doğrultusunda oluşur. Dolayısıyla "y" doğrultusunda herhangi bir gerilme meydana gelmez. Sistemde x doğrultusunda  $\sigma_x$  gerilmesi oluşurken  $\sigma_y=0$  ve  $\tau_{xy}=0$  olacaktır (Şekil 8). Eş. 3'te  $\sigma_1 - \sigma_2$  gerilme farkındaki  $\sigma_1 = \sigma_{\max}$  ve  $\sigma_2 = \sigma_{\min}$ 'dir. Bu değerler Eş. 4 ve Eş. 5 kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 8. Çekme levhasında gerilme durumu [10]

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2\right)} \quad (4)$$

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

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2}$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_x = \sigma_1$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2\right)} \quad (5)$$

$\sigma_y = 0$  ve  $\tau_{xy} = 0$  olduğundan;

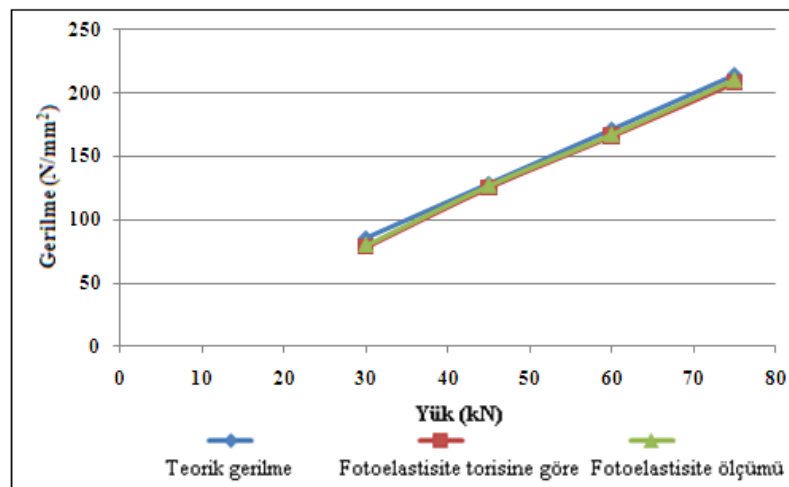
$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2}$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_y = \sigma_2 = 0$$

Yapılan çalışmada, çekme levhasındaki gerilmeler fotoelastisite gerilme analizi yöntemi ile ölçülmüş ve belirlenen değerlerin doğruluğu analitik yöntemlerle de teyit edilmiştir. Çelik levhaya uygulanan çekme kuvvetlerine göre, Vishay PALC 3 Fotostres analiz programı kullanılarak belirlenen ve teorik olarak hesaplanan gerilme değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te verilen sonuçlar karşılaştırıldığında fotoelastisite analiz yönteminin ortalama % 3 sapma ile yakın değerler verdiği belirlenmiştir (Şekil 9).

**Tablo 5.** Çekme levhasında oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları

Uygulanan yük (kN)	Kuvvet çizgisi sayısı (Fringe)	Teorik gerilme	Fotoelastisite teorisine göre		Fotoelastisite ölçümü	
			$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$
30	0,47	85,71	491,15	78,8	494	80
45	0,75	128,57	738,75	125,7	788	127
60	0,99	171,42	1034,5	166	1040	167
75	1,24	214,28	1295,8	207,9	1303	210



**Şekil 9.** Çekme levhasında oluşması muhtemel gerilmeler ve fotoelastisite sonuçları grafiği

## IV. SONUÇ

Fotoelastik kaplama uygulanan çelik levha malzeme eksenel çekme kuvvetine maruz bırakılarak sistemde oluşan gerilmelerin fotoelastisite analiz yöntemiyle ve teorik olarak belirlendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Fotoelastisite yöntemi ile gerilme analizi elastik sınırlar içerisinde yapıldığından dolayı test edilen malzemelerde kalıcı bir hasar meydana gelmez. Dolayısıyla malzemeler üzerinde tekrar kullanılabilir.
- 2) Fotoelastisite analiz yöntemiyle servis şartlarında da oluşması muhtemel gerilmeler ve dağılımları kolaylıkla tespit edilebilir.
- 3) Karmaşık şekilli yapı ve makine elemanlarında oluşan gerilmeler fotoelastisite analiz yöntemi kullanılarak belirlenebilir.
- 4) Bu deneysel çalışmada fotoelastisite analiz yöntemi ve teorik olarak hesaplanan eksenel gerilme değerleri ortalama % 3 sapma ile yakın sonuçlar vermiştir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] M. Bakioğlu, “*Statik Mukavemet*”, Beta Yayınları, (2007).
- [2] O. Yazıcıoğlu, C. Güngör, R. Yazıcıoğlu, “*Makine Elemanları*”, Nobel Yayınları, (2006).
- [3] H. Binici, “*Çözümlü Mukavemet*”, Dilara Yayınevi, (2004).
- [4] B. Çevik, A. Özer, Y. Özçatalbaş, “*Köşe Kaynaklarında Oluşturulan Gerilmelerin Fotoelastisite Yöntemiyle Analizi*”, **The Sixth International Advanced Technologies Symposium**, (2011).
- [5] F. Kafkas, Ç. Karatas, A. Sozen, E. Arcaklioglu, S. Saritas, *Materials and Design*, **28** (2007) 2431,
- [6] M. Honner, P. Litos, M. Svantner, *Infrared Physics & Technology*, **45** (2004) 131.
- [7] J.W.H. Price, A.Z. Paradowska, et. all., *International Journal of Mechanical Sciences*, **50** (2008) 513.
- [8] O. Azeloğlu, İ. Keskin, M. Bayraktar, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **4** (2008) 41.
- [9] Vishay, TN-702-2, (2005), “*Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress® Method*”, Vishay Micro-measurement, 1-14.
- [10] B. Çevik, “*Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerine kalıcı gerilmelerin etkisinin deneysel olarak belirlenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 7-11, 30-36, 73-88, (2009).