

# DELİK DELME YÖNTEMİYLE KALICI/KALINTI GERİLMELERİN ÖLÇÜLMESİ VE GERİNİM ÖLÇERLERİN KALİBRASYONU

Alpay ÖZER<sup>1</sup>, Yusuf ÖZÇATALBAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Gazi Meslek Yüksekokulu, Çubuk/Ankara/ aozer@gazi.edu.tr

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Beşevler/Ankara/ yusufoz@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 02.12.2010; Kabul/Accepted: 11.03.2011)

## ÖZET

Bu çalışmada, delik delme metoduyla H-Drill kalıntı gerilme analiz programı kullanılarak kalıntı/kalıcı gerilmelerin ölçülmesi ve rozet tip gerinim ölçerlerin kalibrasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı en kesit alanlarına sahip çelik çekme levhasına ASTM'ye göre standart ve standart dışı  $D_0/D$  oranlarına sahip farklı iki tip rozet gerinim ölçerler (RGÖ) uygulanmıştır. Yatay çekme presi ile çelik çekme levhasına 30, 45 ve 60 kN'luk eksenel kuvvetler uygulanmış ve bu kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeler ölçülmüştür. Ayrıca, 60 kN'luk çekme kuvvetinin çelik levhanın farklı kesitlerinde oluşturduğu kalıcı gerilmeler belirlenmiştir. Eksenel çekme gerilmelerinin belirlenmesinde, farklı RGÖ'lerden yaklaşık aynı gerinimler elde edilmiş ve teorik gerilme değerlerine yakın sonuçlar belirlenmiştir. Kalıcı gerilme ölçüm sonuçlarında ise, standarda uygun RGÖ'ler teorik değere yakın gerilme değerleri vermiştir. Ancak, standart dışı RGÖ'lerden düşük ölçüm hassasiyeti ve yaklaşık 36MPa daha düşük gerilme değerleri alınmıştır. Bununla birlikte, artan veya azalan kalıcı gerilmeye rağmen bu sapma miktarının yaklaşık aynı değerde olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kalıntı/kalıcı gerilme, delik delme metodu, rozet gerinim ölçer, kalibrasyon

## MEASURING THE RESIDUAL/PERMANENT STRESSES BY USING HOLE DRILLING METHOD AND CALIBRATION OF ROSETTE STRAIN-GAUGES

### ABSTRACT

Aims of this study are to measure residual/permanent stresses by using hole drilling technique with H-Drill stress analyzer program and to calibrate the strain-gauges. For these purposes, two types of rosette strain gauges (RSGs) with different  $D_0/D$  ratio, according to ASTM standards or not, were applied to steel tensile plate which had different cross-sectional areas. Axial tensile forces of 30, 45 and 60 kN were applied the plate by means of horizontal tensile press and then generated stresses in the plate were measured. However, permanent stresses created by axial tensile force of 60 kN in different cross-sections of steel plate were determined. During the measuring of axial tensile stresses, similar stress values were generated by two different types of RSGs and these values were close the theoretical stress values. Permanent stress results indicated that stress values generated with standard RSGs were near theoretical values. However, low accuracy of measurement and lower stress value of 36MPa were determined by using non-standard RSGs. On the other hand, in spite of increasing or decreasing at permanent stress, variation in the stress found was approximately the similar values.

**Keywords:** Residual/permanent stress, hole-drilling method, rosette strain gauges, calibration

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalıntı gerilmeler, bir yapıda tüm yükler kaldırıldığı zaman ortaya çıkan elastik gerilmelerdir ve ulaşabileceği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi ile sınırlıdır [1-5]. Metal yapılarda mekanik

ve termal uygulamalar gibi birçok işlem teknikleri kalıntı gerilmelere neden olabilmektedir [1]. Kalıntı gerilmelerin ölçümlerinde tahribatlı veya tahribatsız teknikler kullanılabilir. Tahribatlı tekniklerde,

mekaniksel işlemler sonucunda, parçada oluşan yeni gerilme denge durumuna göre kalıntı gerilmeler belirlenir. Bu gerilmelerin ölçümünde genellikle gerinim ölçer kullanılır. Delik delme ve katman kaldırma yöntemleri en sık kullanılan tahribatlı kalıntı gerilme ölçüm teknikleridir. Tahribatsız yöntemler ise malzemedeki gerilme durumunun, malzemenin fiziksel veya kristalografik özelliklerine bağlı olması durumunda kullanılır. X-ışını kırınımı, nötron kırınımı, manyetik ve fotoelastik yöntemler bu tür yöntemlere örnek olarak verilebilir [6-10].

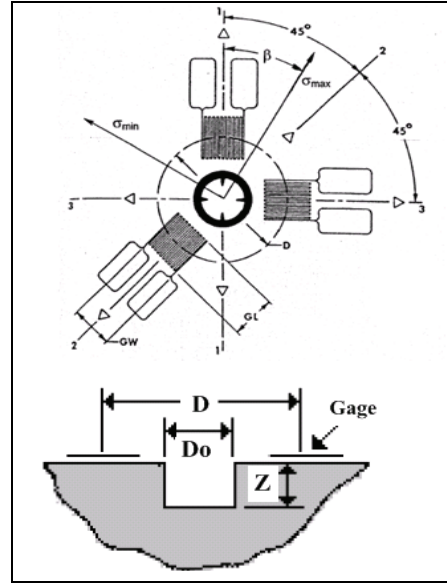
İmalat yöntemi dışında, uygulanan öngerilmenin etkisiyle gerilmeler oluşturulabilmektedir. Uygulanan öngerilmeye bağlı, bilinçli olarak oluşturulan gerilmeler kalıcı gerilmeler (permanent stress) olarak adlandırılır [11-13]. Dolayısıyla yapılan bu deneysel çalışmada, çelik çekme levhasına uygulanan çekme kuvveti ile oluşturulan öngerilmeler kalıcı gerilmeler olarak adlandırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, kalıntı/kalıcı gerilme ölçüm metodlarından olan delik delme metodunun uygulanışını, kalibrasyonu ve gereksinimlerini açıklamaktır. Bu amaçla, genel amaçlı kalıntı/kalıcı gerilme ölçümü için ASTM E 837 [14] standardına uygun ve standart dışı üretilmiş rozet gerinim ölçerler (RGÖ) farklı en kesit alanlarına sahip çelik levha yüzeyine uygulanmıştır. Yatay tip çekme presi vasıtasıyla, çelik levhaya bilinen aksenal yükler uygulanarak oluşturulan elastik kalıcı gerilmeler analitik ve deneysel olarak, delik delme yöntemi kullanılarak RGÖ'ler vasıtasıyla belirlenmiştir.

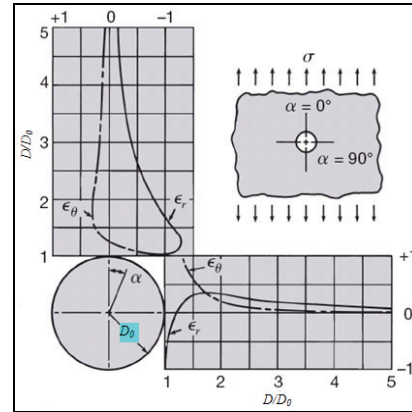
### Delik Delme Metodu

Delik delme metodu kalıntı/kalıcı gerilmelerin ölçülebilmesi için kullanışlı ve etkili bir yöntemdir. İlk olarak Mathar tarafından 1934 yılında geliştirilmiştir. Yarı tahribatlı kalıntı/kalıcı gerilme ölçme tekniği olarak da adlandırılır. ASTM E 837'ye göre standartlaştırılmıştır. Bu yöntem ile yüzeye yakın kalıntı/kalıcı gerilmeler oldukça hassas bir şekilde ölçülebilir. Ölçüm hassasiyeti delme derinliğine bağlı olarak değişir. Artan delme derinliği ile ölçüm hassasiyeti azalır. Delme derinliği yaklaşık olarak gerinim ölçer dairesinin çapının ( $D$ ) yarısını geçmemelidir [14,15]. Şekil 1'de kullanılan tipik bir üç elementli RGÖ şematik olarak gösterilmiştir. Burada  $D$  gerinim ölçer dairesinin çapını,  $D_0$  ise delik çapını göstermektedir. ASTM E 837 standardına göre  $D_0=0,3-0,5D$  aralığında ve maksimum derinlik ( $Z$ )  $0,4D$  olmalıdır ( $Z/D=0,4$ ) [14,16,17]. RGÖ merkezindeki deliğin büyük çaplı delinmesi önerilir. Çünkü  $D_0/D$  oranı arttıkça ölçüm hassasiyeti  $(D_0/D)^2$  ile orantılı olarak artar. Delik çapı en az, maksimum çapın %60 kadar olmalıdır. Ayrıca numune üzerinde birden fazla ölçüm alınacak ise, delikler arası mesafenin en az delik çapının altı katı olması önerilir

[18]. Tek aksenal bir yükleme durumunda boşalan gerinimin delik yüzeyinden olan mesafe ile değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Boşalan gerinim miktarı delik merkezinden uzaklaştıkça azalır. Bu nedenle, ölçüm hassasiyetini arttırmak için RGÖ üzerindeki ölçerler delik merkezine yakın konumlandırılmalıdır. Öte yandan delik yakınlarında da sinyallerde parazit oluşma eğilimi yükselir. Bu nedenle RGÖ dairesinin çapı ( $D$ ) ile delik çapı arasında  $D_0=0,3-0,5D$  oranı korunmalıdır [10].



**Şekil 1.** Üç elementli rozet tip gerinim ölçerin şematik gösterimi (Schematic illustration of rosette type strain gage with three elements) [14,16]



**Şekil 2.** Delik merkezinden uzaklığa bağlı boşalan radyal ( $\epsilon_r$ ) ve teğetsel ( $\epsilon_\theta$ ) gerinimlerin değişimi (Variation of relieved radial ( $\epsilon_r$ ) and tangential ( $\epsilon_\theta$ ) strains with distance from the center of the drilled hole) [10]

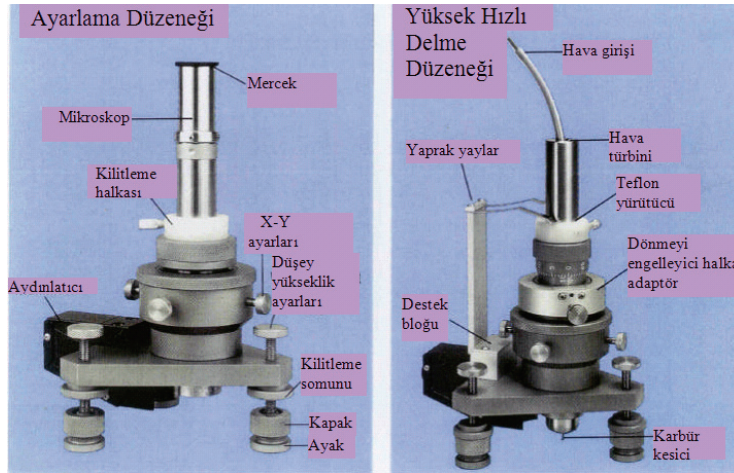
Yöntemin uygulanışı altı temel adımdan oluşur [10],

- Malzemede, kalıntı gerilmelerin ölçüleceği noktaya RGÖ yapıştırılır,
- Ölçerler kablolarla bir strain indikatöre bağlanır,

- Yüksek hızlı bir delici hassas bir şekilde rozetin delik merkezine yerleştirilir,
- Gerinim ölçerlerin algıladığı gerinim değerleri sıfırlanır ve RGÖ üzerindeki delme işlemi gerçekleştirilir,
- Delme işlemi ile birlikte adım adım gerinimler daire merkezinden okunur,
- Çeşitli analitik işlemler veya paket programlar yardımıyla, belirlenen gerinimlerden asal ve

eksenel gerilmeler ile asal gerilmelerin oluştuğu açı bulunur.

Şekil 3’de RGÖ üzerindeki deliğin merkezlenmesi ve delinme işleminde kullanılan ve Vishay Micro-measurement firması tarafından üretilen deney setleri görülmektedir. Delme işleminde rozetin delik çapına uygun çeşitli çaplarda kaplamalı ve kaplamasız düz tabanlı karbür delici uçlar kullanılabilir.



Şekil 3. Delik delme deney setleri (Hole drilling test kits) [10]

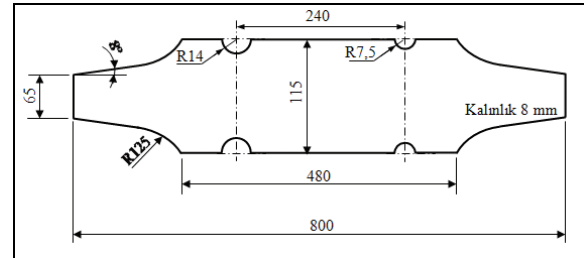
## 2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme (Material)

Şekil 4’de bilinen kalıcı gerilmelerin oluşturulması için tek eksenli çekme kuvvetinin uygulandığı çelik çekme levhası gösterilmiştir. Fe42 kalitede (TS 2162 EN 10025) çekme levhası, hadde doğrultusunda eksenel yük uygulanacak şekilde lazer kesme yöntemiyle şekillendirilmiştir. Çekme levhası kenarlarında R14 ve R7,5 yarıçaplarında kanallar oluşturularak eksenel yüklemeye dik kesitte farklı çekme gerilmelerinin oluşması sağlanmıştır. Çelik çekme levhasının mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

### 2.2. Deneylerde Kullanılan RGÖ’ler (RSGs Used In Experiments)

Deneylerde, teknik özellikleri Tablo 2’de verilen (farklı firmalar tarafından üretilmiş) ASTM E 837 standardına uygun ve standart dışı iki tip RGÖ kullanılmıştır.





Şekil 4. Deneylerde kullanılan çelik çekme levhası (Steel tensile plate used in experiments)

Tablo1. Çelik çekme levhanın mekanik özellikleri (Mechanical properties of steel tensile plate)

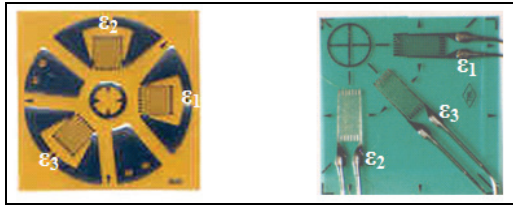
Malzeme	Elastikiyet modülü, E (MPa)	Akma gerilmesi, $\sigma_a$ (MPa)	Çekme gerilmesi, $\sigma_c$ (MPa)	% Uzama
Fe42 çelik levha (TS 2162 EN 10025)	210 000	364	450	29

**Tablo 2.** Gerinim ölçerlerin özellikleri (Strain gage specifications)

Rozet Gerinim Ölçer			Gage boyu (mm)	Gage merkez dairesi çapı (D) (mm)	Delik çapı ( $D_0$ ) (mm)	Gage faktörü (K)	Direnç ( $\Omega$ )	$D_0/D$
Kodu	Türü							
RGÖ-1	EA-06-062RE-120		1,57	5,13	maks. 2	2,09	120	0,39
RGÖ-2	FRAS 2-11		2	7	maks. 2	2,13	120	0,28

RGÖ-1'in gerinim ölçer dairesi çapı 5,13 mm'dir ( $D_0=0,39D$ ) ve standarda uygun sınırlar içindedir. RGÖ-2'nin ise gerinim ölçer dairesinin çapı 7 mm'dir ve  $D_0/D$  oranı ( $D_0=0,28D$ ) standart aralığın dışındadır.

RGÖ'ler üzerindeki ölçerlerin numaraları Şekil 5'de gösterilmiştir. RGÖ üzerinde bulunan 1 numaralı ölçer  $x$  eksenine (eksenel çekme) doğrultusunda olacak şekilde çelik çekme levhasına yapıştırılmış ve ölçer sıra numarasına göre RGÖ'ler strain indikatöre bağlanmıştır. Delici uç olarak ise 1,6 mm çapında düz tabanlı kaplamalı karbür uç kullanılmıştır.



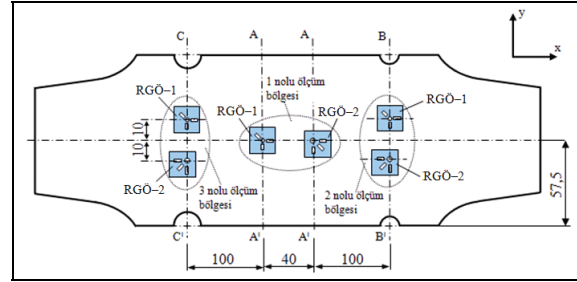
**Şekil 5.** RGÖ-1 ve RGÖ-2 üzerindeki gerinim ölçer numaraları (Strain gage numbers on RSG-1 and RSG-2)

### 2.3. Deneysel Metot (Experimental Method)

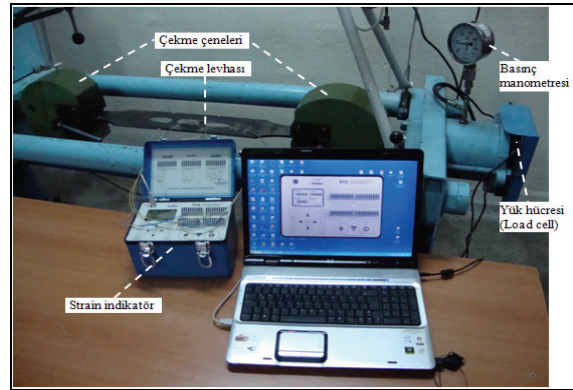
#### 2.3.1. Uygulanan gerilmelerin deneysel olarak belirlenmesi ve RGÖ'lerin kalibrasyonu (Experimental determination of applied stress and calibration RSGs)

İki farklı türdeki 6 adet RGÖ çekme levhası üzerine Şekil 6'da gösterilen konumlarda yapıştırılmıştır. Bir numune üzerinde birden fazla ölçüm alınacak ise, delikler arası mesafenin en az delik çapının altı katı olması gerekmektedir [18]. Bu nedenle ölçümler sırasında RGÖ'lerin birbirinden etkilenmemesi için, en yakın ölçüm aralığı 20 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Çekme levhasının A-A' kesit alanı 920 mm<sup>2</sup>, B-B' kesit alanı 800 mm<sup>2</sup>, C-C' kesit alanı 696 mm<sup>2</sup> dir.

Gerinim ölçme tekniğine uygun olarak hazırlanan çekme levhası Şekil 7'de gösterilen nümerik kontrollü yatay çekme presi çeneleri arasına yerleştirilerek,  $\pm 100N$  hassasiyette 30, 45 ve 60 kN'luk bilinen çekme kuvvetleri uygulanmıştır. Bu deney düzeneği vasıtasıyla, çekme levhasında oluşturulan gerilmelerin meydana getirdiği gerinimler indikatör ve bilgisayar vasıtasıyla  $\pm 1\mu\epsilon$  hassasiyette ölçülmüştür.



**Şekil 6.** Kalıcı gerilme ölçüm bölgeleri (Measuring areas of permanent stress)



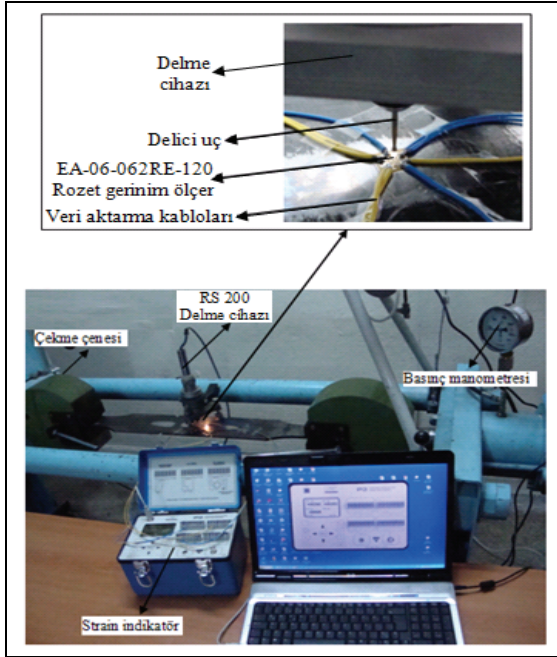
**Şekil 7.** Kalıcı gerilme ölçüm test düzeneği (test set-up to measure permanent stress)

#### 2.3.2 Delik delme metodu ile kalıcı gerilmelerin belirlenmesi ve RGÖ'lerin kalibrasyonu (Determination of permanent stress by hole drilling method and calibration of RSGs)

Uygulanan eksenel çekme kuvvetlerinin çekme levhasında oluşturduğu kalıcı gerilmeler Şekil 8'de görülen deney düzeneği vasıtasıyla deneysel olarak belirlenmiştir. Çekme levhasındaki gerilmelerin belirlenmesi Şekil 6'da gösterilen 1, 2 ve 3 nolu ölçüm bölgelerinde RGÖ-1 ve RGÖ-2'den ölçülen gerinimler vasıtasıyla yapılmıştır.

Delik delme metodu ile gerilmelerin ölçülmesinde 276 kPa basınçta 300 000 devir/dakika dönme hızına ulaşan RS200 yüksek hızlı hava türbini kullanılmıştır (Şekil 3 ve Şekil 8) [19]. Delme işlemi her 0,25 mm derinlikte durdurularak gerinim verileri strain indikatörden  $\mu\epsilon$  olarak okunmuştur. Her delme

işleminde delme derinliği 2 mm olarak belirlenmiş ve delme işlemi sekiz adımda tamamlanmıştır [7,9].



**Şekil 8.** Delik delme metodu ile kalıcı gerinim ölçme deney düzeneği (Test set-up to measure the permanent strain by Hole Drilling Method)

1, 2 ve 3 nolu ölçüm bölgelerinde, çekme levhasının kesit alanındaki değişimlerden dolayı gerilme değerlerinde farklılıklar olacaktır. Bu bölgelerde ölçüm yapılmasının amacı RGÖ-1 ve RGÖ-2'nin algılayacağı değişen gerinimlerle belirlenecek gerilme değerleri ile bu bölgeler için hesaplanan teorik gerilme değerleri arasında kıyas yapılabilmesidir.

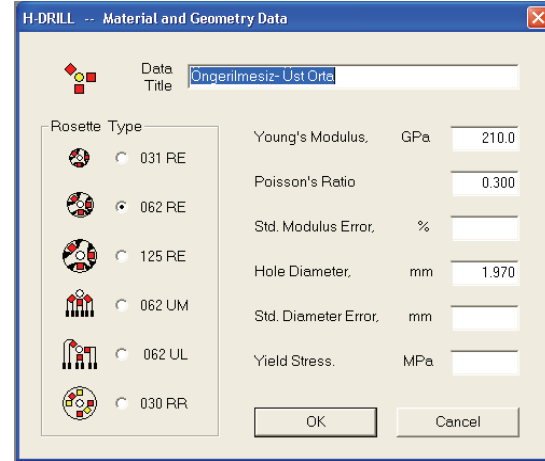
### 2.3.3. Gerinim analiz programı (Strain analysis program)

Yüksek hızlı delme işlemi sonrası elde edilen gerinim verileri H-drill programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu program için geçerli olan elastisite teorisi ve gerinim analizlerinin analitik yaklaşımlarına *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method* [14], *Hole Drilling Techniques* [16], *The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique* [18] vb. kaynaklardan ulaşmak mümkündür.

H-drill programı test numunesinin delinme şekline göre, numune kalınlığı boyunca veya kör delik olmak üzere farklı iki tür analiz içerir. İlgili standarda göre kalınlığı  $0,4D$ ' den az olan numuneler kalınlığı boyunca delinmelidir [14].

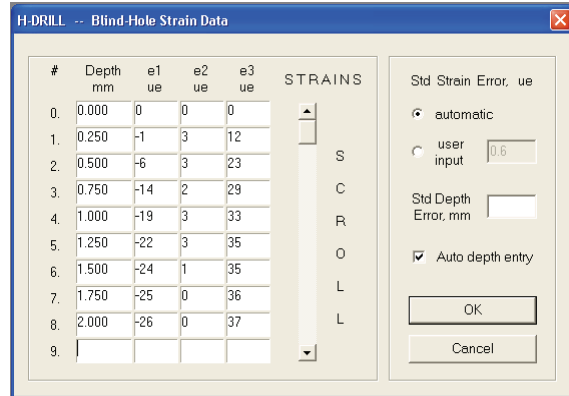
Kör delik analizi seçildikten sonra deneylerde kullanılan RGÖ'nün tipi, kullanılan malzemenin özellikleri ve delme işlemi sonrası ölçülen delik çapı programa girilir (Şekil 9). Burada "standart modulus

error" değeri tam olarak hesaplanamıyorsa yaklaşık %0,2 girilebilir. Ancak bu durumda program hesaplamalarda kısıtlanmış olacaktır. Bu bölüm boş bırakılarak Şekil 10'da görülen "standart strain error" *automatic* seçeneği aktifleştirildiğinde, program tüm standart hata yüzdelerini girilen gerinim verilerine göre kendi belirleyecektir ki, bu durum tavsiye edilir [15].



**Şekil 9.** RGÖ seçimi ve malzeme özelliklerinin girilmesi (RSG selection and imputing material properties)

Delme işlemi sırasında her 0,25 mm derinlikte indikatörden okunan gerinim verileri Şekil 10'da gösterildiği gibi programa girilir ve ardından gerilme hesaplama basamaklarına geçilir.



**Şekil 10.** Gerinim verilerinin girilmesi (Imputing strain data)

Programda üç tür analiz yapılabilmektedir.

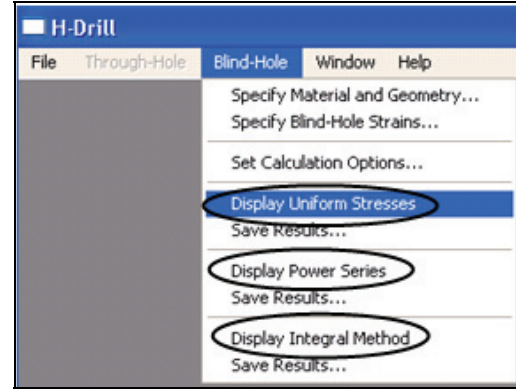
*Uniform Stress (Üniform Gerilme):* Kalıntı gerilmelerin, malzemenin yüzeyinden tüm kesiti (kalınlığı) boyunca düzenli olduğu gerilme durumlarında kullanılır.

*Power Series (Güç Serisi):* Kalıntı gerilmelerin, malzemenin yüzeyinden kalınlığı boyunca lineer bir şekilde değiştiği gerilme durumlarında tercih

edilmelidir. Ünitiform gerilme metoduna göre deneysel hataların etkilerine karşı daha duyarlıdır.

*Integral method (İntegral Metodu):* Bu metot delik delme ölçümleri sırasında kullanılan her derinlik aşamasındaki kalıntı gerilmelerin ayrı ayrı değerlendirilmesini sağlar. Bir kesit/alan boyunca değişken kalıntı gerilmelerin ölçümleri için uygundur [15].

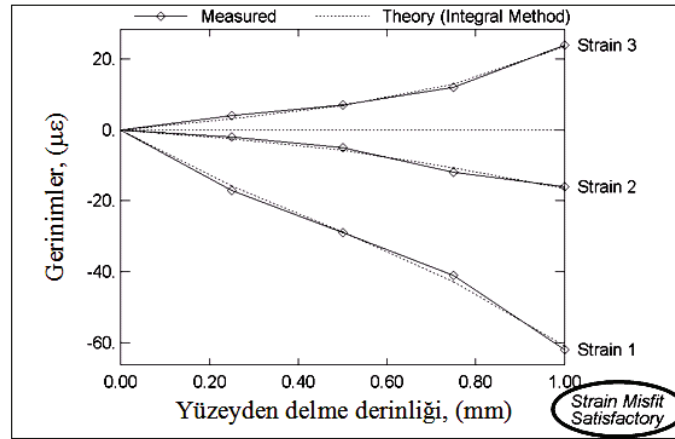
Ancak bir sistemde oluşabilecek gerilmelerin dağılım durumunu tahmin etmek çok güç olabilir. Bu nedenle gerinim verileri girildikten sonra bu üç yöntemin hepsi ayrı ayrı denemek gerilmeler hesaplanmalıdır (Şekil 11).



Şekil 11. Kör delik analizi (Blind hole analysis)

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION											
-----					Integral Method						
200-Üst Orta											
Rosette type	=	062 RE	Rosette mean diameter	=	5.13 mm						
Young's modulus	=	210.0 GPa	Hole diameter	=	1.970 mm						
Poisson's ratio	=	0.300	Stress depth limit	=	1.03 mm						
Std strain err (auto)	=	1.1 ue									
Rms strain misfit	=	0.8 ue	<--	satisfactory							
beta=angle Smax clockwise from gage 1											
--- STRAINS --- 90% --- STRESSES (X is in gage 1 direction) ---											
Depth	e1	e2	e3	prob.	Smax	Smin	Tmax	beta	SX	SY	TXY
mm	ue	ue	ue	bound	MPa	MPa	MPa	deg	MPa	MPa	MPa

Şekil 12. İntegral metodu veri sayfası (Data page of integral method)



Şekil 13. İntegral metodu gerinim-derinlik grafiği (Strain-depth graphic for integral method)

Burada dikkat edilmesi gereken husus, programın kullanılan analiz yöntemleri ile ilgili vermiş olduğu uyarılardır. Analizler sonrasında elde edilen sayısal veriler sayfasında satisfactory (tatmin edici) veya grafiklerde “strain misfit satisfactory” uyarısı varsa, seçilen yöntem deney numunesindeki gerilmelerin belirlenmesi için uygundur (Şekil 12 ve Şekil 13). Eğer program marginal (sınırdan) veya excessive (aşırı) uyarılarını veriyor ise, bu durumda seçilen analiz yöntemi uygun değildir. Program, bu uyarı ifadelerini gerinim hatasının “Rms (root-mean-square)” değerine

göre belirlemektedir. Rms gerinim hatası, standart gerinim hatasının yaklaşık  $\sqrt{2}$  katı kadar ise H-drill “satisfactory” uyarısını verecektir. Eğer, Rms gerinim hatası, standart gerinim hatasının yaklaşık 2 katı ise program “marginal” uyarısını verecektir. Bu durumların dışında bir oran söz konusu ise “excessive” uyarısını verecektir. Program herhangi iki hesaplama yöntemi içinde “satisfactory” uyarısını veriyorsa bu durumda Rms gerinim hatası sifira en yakın olan hesaplama türü seçilmelidir [15].

### 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1 Eksenel Gerilmeler İle RGÖ'lerin

##### Doğrulanması (Determination Of Prestresses In Tensile Plate By RSG)

Çelik çekme levhaya 30, 45, 60 kN'luk eksenel çekme kuvvetleri uygulanarak levhanın 1 nolu bölgesindeki ( $AA'=920 \text{ mm}^2$ ) gerilmeler analitik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca uygulanan her kuvvet aşamasında yükleme durdurularak, her RGÖ üzerindeki  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$  ölçerlerinden çekme yönündeki eksenel gerinim verileri alınmıştır (Tablo 3). Bu gerinim verileri kullanılarak Hook kanununa göre gerilmeler hesaplanmıştır. Tablo 4'de analitik ve deneysel olarak belirlenen gerilme değerleri verilmiştir.

Şekil 14'de eksenel olarak uygulanan kuvvetler sonucunda her iki RGÖ'nün benzer gerinim değerlerini verdiği görülmektedir. Bu durum farklı gerinim ölçerlerin kalıcı/kalıntı gerilme ölçümü dışında genel amaçlı gerinim ölçümünde kullanıldığında, ortalama %1,3 sapma ile benzer

gerinim değerleri verdiğini göstermektedir. Bu nedenle Tablo 4'de görüldüğü gibi uygulanan tek eksenli gerilme hali için, teorik gerilme değerleri ve deneysel olarak elde edilen gerilme değerleri ortalama %3,75 sapma ile aynıdır.

Şekil 15'de RGÖ'lerden elde edilen gerinim verileri ile hesaplanan poisson oranlarının çelikler için belirlenen 0,27-0,3 aralığında olduğu görülmektedir. Farklı gerilmeler için belirlenen Poisson oranındaki sapmalar eksenel yüklemelerdeki yükün uygulama hassasiyetine bağlanabilir.

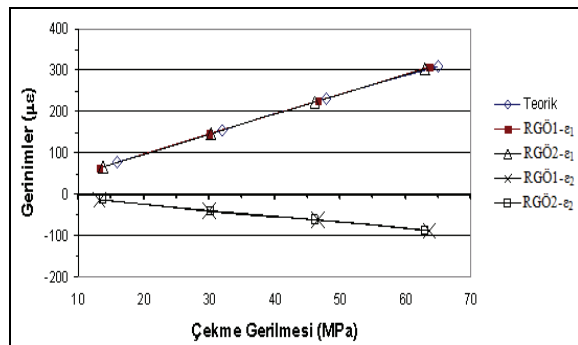
Teorik gerilme hesaplamaları ile RGÖ-1'den alınan gerinim verileri kullanılarak yapılan gerilme hesaplamaları sonucunda ortalama 1,55 MPa fark, RGÖ-2'den alınan gerinim verileri kullanılarak yapılan gerilme hesaplamaları sonucunda ise ortalama 1,89 MPa fark olduğu belirlenmiştir (Tablo 4). Çelik levhanın çekme kuvvetine maruz kalması ile oluşturulan gerilme değerlerinin birbirine yakın olmasının nedeni, uygulanan gerilmenin üniform ve eksenel gerilme olması ve RGÖ'nün şerit gerinim ölçer gibi davranmasındandır. Bu gibi durumlarda RGÖ'nün ölçer daresi çapının önemi yoktur.

**Tablo 3.** Uygulanan çekme kuvvetlerinin RGÖ'lerde oluşturduğu gerinimler  
(Applied tensile forces and generated strains in RSG)

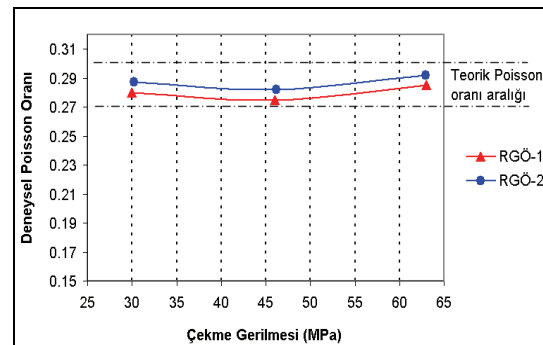
Kuvvet (kN)	x eksenindeki teorik gerinim değeri ( $\mu\epsilon$ )	RGÖ-1 gerinim verileri ( $\mu\epsilon$ )		RGÖ-2 gerinim verileri ( $\mu\epsilon$ )		Poisson oranı ( $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ )	
		$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	RGÖ-1	RGÖ-2
30	155	145	-41	146	-42	0,28	0,287
45	232	225	-62	223	-63	0,275	0,282
60	310	308	-88	304	-89	0,285	0,292

**Tablo 4.** Teorik ve ölçülen gerinimlere göre hesaplanan gerilmeler  
(Theoretically and calculated stress from measured strains)

Kuvvet (kN)	Teorik gerilme değerleri ( $\sigma_i$ ) (MPa)	RSG-1		RSG-2	
		Gerilme değerleri ( $\sigma_{RSG-1}$ ) (MPa)	Gerilme Farkı ( $\sigma_i - \sigma_{RSG-1}$ ) (MPa)	Gerilme değerleri ( $\sigma_{RSG-2}$ ) (MPa)	Gerilme Farkı ( $\sigma_i - \sigma_{RSG-2}$ ) (MPa)
30	32	30,015	1,985	30,22	1,78
45	48	46,575	1,425	46,161	1,839
60	65	63,756	1,244	62,92	2,08
Ortalama Fark:			1,55	1,89	



**Şekil 14.** RGÖ'lerde gerilim-gerinim ilişkisi  
(Relationship stress-strain in RGSs)



**Şekil 15.** RGÖ'lerde ölçülen gerilme-Poisson oranı ilişkisi  
(Relationship stress-Poisson ratio measured via RSG)

### 3.2. Kalıcı Gerilmeler ile RGÖ'lerin Doğrulanması (Determination of applied permanent stress by means of hole drilling method)

Çekme levhasındaki üç ölçüm bölgesinde, iki rozet tipinin kullanılmasıyla, her 0,25 mm delme derinliğinde ölçülen gerinim verileri Tablo 5'de

gösterilmiştir. Bu değerler, H- drill programında kör delik metodu ve üniform stres metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Ölçüm sürecinde çekme levhasında oluşturulan kalıcı gerilmeler; 1 nolu ölçüm bölgesinde 64 MPa, 2 nolu ölçüm bölgesinde 73,5 MPa ve 3 nolu ölçüm bölgesinde 84,5 MPa'dır.

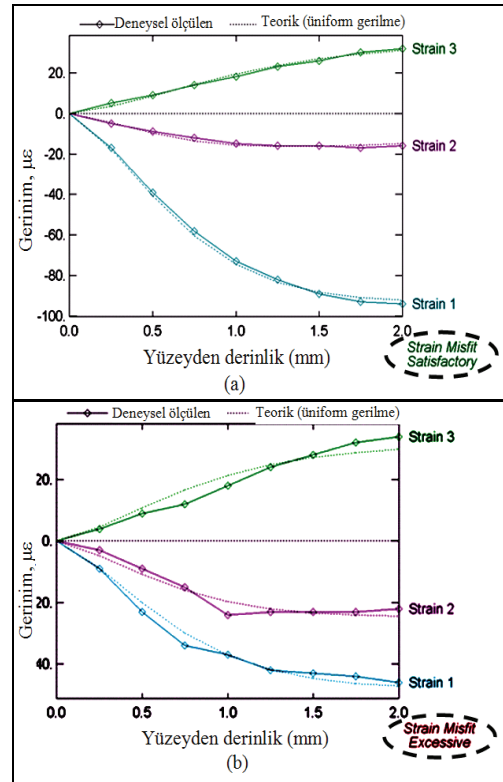
**Tablo 5.** Delik delme metodu ile belirlenen gerinimler (Measured strains by hole drilling method)

Delme derinliği (mm)	Ölçüm bölgesi: 1 RGÖ 1 (µε)			Ölçüm bölgesi:1 RGÖ 2 (µε)			Ölçüm bölgesi: 2 RGÖ 1 (µε)			Ölçüm bölgesi:2 RGÖ 2 (µε)			Ölçüm bölgesi 3 RGÖ 1 (µε)			Ölçüm bölgesi: 3 RGÖ 2 (µε)		
	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>
0,25	-17	-5	5	-9	-3	4	-17	0	7	-11	-2	7	-23	-4	4	-23	-4	4
0,50	-39	-9	9	-23	-9	9	-38	-2	13	-25	-5	13	-53	-9	10	-29	-5	13
0,75	-58	-12	14	-34	-15	12	-76	-6	20	-39	-9	20	-86	-13	15	-44	-8	19
1,00	-73	-15	18	-37	-23	18	-95	-12	25	-52	-12	25	-105	-15	21	-58	-11	24
1,25	-82	-16	23	-42	-23	24	-112	-15	28	-61	-15	28	-117	-16	25	-69	-12	27
1,50	-89	-16	26	-43	-23	28	-121	-17	30	-69	-16	30	-123	-15	28	-76	-14	30
1,75	-93	-17	30	-44	-23	32	-126	-18	32	-73	-16	32	-125	-16	30	-81	-14	31
2,00	-94	-16	32	-46	-22	34	-129	-20	32	-75	-17	32	-126	-16	31	-83	-16	30

**Tablo 6.** Üniform stres metodu analiz sonuçları (Results of analysis depend on uniform stress method)

Ölçüm bölgesi	x doğrultusundaki teorik gerilme değeri (σ <sub>t</sub> ), (MPa)	RGÖ 1, σ <sub>x</sub> , (MPa)	RGÖ 2, σ <sub>x</sub> , (MPa)	Fark	
				RGÖ 1, σ <sub>t</sub> - σ <sub>x</sub> , (MPa)	RGÖ 2, σ <sub>t</sub> - σ <sub>x</sub> , (MPa)
1	64	65	27	-1	37
2	73,5	76	40	-2,5	33,5
3	84,5	81	46	3,5	38,5

Yapılan kalıcı gerilme analizlerinin sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Burada σ<sub>x</sub>, RGÖ-1 ve RGÖ-2'nin x doğrultusundaki gerilme değerleridir. Her üç ölçüm bölgesi için RGÖ-1'in vermiş olduğu çekme doğrultusundaki gerilme değerleri ile hesaplanan teorik gerilme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu (maksimum fark 3,5 MPa) görülmektedir. RGÖ-1'in standarda uygun  $D_0/D$  oranı ve H-drill analiz programının standarda uygun yazılımından dolayı RGÖ-1, teorik değerler ile ortalama %1,5 sapma ile yakın sonuçlar vermiştir. Yine her üç ölçüm bölgesi için RGÖ-2'nin analiz sonuçları incelendiğinde, hesaplanan teorik değerlerden önemli miktarda farklı değerler belirlenmiştir (Tablo 6). Her üç ölçüm bölgesi için bu fark ortalama 36,3 MPa'dır. RGÖ-2 ile yapılan ölçümler sonucunda oluşan farklar, RGÖ-2'nin  $D_0/D$  oranından kaynaklanmaktadır. Zira  $(D_0/D)^2$  oranıtısı ile ölçüm hassasiyetinin azaldığı bilinmektedir. Literatürde bu tip RGÖ'ler kullanılarak yapılan çalışmalara rastlanılmıştır [20-22]. Ancak bu çalışmaların gerinim ölçümüne dayalı kalıntı veya kalıcı gerilme ölçüm sonuçlarının yeterli doğrulukta olmayacağı, yaklaşık 30-40 MPa'lık farklı ölçüm verilerinin elde edileceği söylenebilir. Bu durumu dikkate alan bazı araştırmacılar,  $D_0/D$  oranındaki uyumsuzluktan kaynaklanacak hatalı verileri, kullanılan RGÖ'lerin kalibrasyonu ile gidermeye çalışmışlardır [21].



**Şekil 16.** 1 nolu ölçüm bölgesinde gerinim/delme derinliği ilişkileri, (a) RGÖ-1, (b) RGÖ-2 (Relationships between strain and drilling depth in area 1, (a) RSG-1, (b) RSG-2)



Şekil 16'da, 1 numaralı ölçüm bölgesi için RGÖ-1 ve RGÖ-2'ye ait, yüzeyden delme derinliğine bağlı olarak gerinim değişimlerini veren çıktılar görülmektedir. Bu grafikler, çekme levhasına uygulanan gerilmenin aksel ve en kesit boyunca uniform olmasından dolayı, H-drill programında *Uniform Stress* metodu kullanılarak elde edilmiştir. Grafiklerde düz çizgiler deneysel olarak ölçülen gerinim verilerini, kesikli çizgiler ise girilen gerinim verilerine, RGÖ ve malzeme özelliklerine göre programın oluşturduğu idealleştirilmiş teorik gerinim verilerini göstermektedir.

Eğer kullanılan RGÖ'ler de  $D_0/D$  oranı uygun ve deneyler sırasında ölçümler hassas yapılmış ise ölçülen gerinim verilerinin eğrisi ile teorik gerinim verilerinin eğrisi birbirine yakın ve uyumludur (Şekil 16.a). Ancak Şekil 16.b'deki gibi bu eğriler arasındaki sapma ne kadar fazla ise, bu durumda deneylerde kullanılan RGÖ'lerin veya deney şartlarının uygun olmadığı söylenebilir. Bu çalışmada deney şartları tüm ölçümler için aynı olduğundan, Şekil 16.b'deki eğriler arasındaki fark kullanılan RGÖ-2'lerin ASTM E 837 standardına ve dolayısıyla H-drill programına uygun olmayışından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yine RGÖ-2'nin standart dışı geometrisi, çekme levhasına uygulanan gerilmenin aksel ve uniform olmasına karşın ölçülen gerinim verilerine göre, programın uniform stres analizi için Rms gerinim hatasını aşırı bulduğu (excessive) Şekil 16.b'de sağ alt köşede görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çelik çekme levhasına farklı aksel kuvvetler uygulanarak oluşturulan aksel ve uniform kalıcı gerilmelerin, farklı iki tip rozet gerinim ölçerler vasıtasıyla belirlenmesi ve bu ölçerlerin kalibrasyonunu içeren çalışmanın verilerine göre aşağıdaki sonuçlar söylenebilir;

1. Delik delme metodu ile elde edilen gerinim verileri H-drill programı ile analiz edilebilir. Analizlerde gerilmenin durumu dikkate alınarak uniform stres, güç serisi ve integral metodları kullanılabilir.
2. Aksel gerilme halinde, uygulanan gerilmelerin belirlenmesinde, standart dışı ( $D_0/D$  oranı için) rozet gerinim ölçerler (RGÖ) kullanılabilir. Bu gibi gerilme durumlarında RGÖ'ler şerit gerinim ölçer gibi davranmaktadırlar.
3. Delik delme metodunda kullanılan RGÖ'lerin ise kalıcı/kalıntı gerilmeleri yeter doğrulukta ölçebilmesi için ASTM E 837 standardına uygun olması gereklidir. Aksi durumlarda elde edilecek sonuçlar  $D_0/D$  oranındaki sapma miktarına göre hatalar içerir.
4. Standartta uygun RGÖ'ler ile yapılan deneylerde teorik sonuçlar ile yaklaşık aynı kalıcı gerilme değerleri elde edilmiştir. Ancak  $D_0/D$  oranındaki %6,5'lik sapma içeren standart dışı RGÖ'ler ile yapılan deneylerde ise teorik kalıcı gerilme değerlerinden yaklaşık 33-39 MPa kadar düşük kalıcı gerilme değerleri elde edilmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, 07/2009-21 kodlu proje kapsamında bu çalışmaya sağlanan desteklerden dolayı Gazi Üniversitesine teşekkürlerini sunar.

#### 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dieter, E.G., **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill Book Co., UK., 1988.
2. Weismon, C., "Fundamental of Welding", **Welding Handbook**, Volume-1, Editör: Kearns, W. H., American Welding Society, A.B.D., 221-230, 1976.
3. Bahadur, A., Kumar, B.R., Chowdhury, S.G., "Evaluation of Changes in X-Ray Elastic Constants and Residual Stress as a Fonction of Cold Rolling of Austenitic Steels", **Materials Science and Technology**, volume 20, No 3:387-392, 2004.
4. Kafkas, F., "Tornalanmış Parçalardaki Kalıcı Gerilmelerin Sapma Yöntemi Kullanılarak Tahmini" **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük, Türkiye, 1394, 1399, 13-15 Mayıs 2009.
5. Lin Y.C., Lee, K.H., "Effect of Preheating on the Residual Stressing Type 304 Stainless Steel Weldment", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 63, 797-801, 1997.
6. Price, J.W.H., Paradowska, A.Z., vd. "Comparison of Experimental and Theoretical Residual Stresses in Welds: The Issue of Gauge Volume", **International Journal of Mechanical Sciences**, Cilt 50, 513-521, 2008.
7. Macherauch, E., Kloos, H.K. "Origin, Measurement and Evolution of Residual Stresses", **Residual Stresses in Science and Technology**, Volume 1, Editör: Macherauch, E., and Hauk, V., Informationsgesellschaft, Verlag, Germany, 3-25, 1986.
8. Yiğit, O., "Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması", **Mühendis ve Makine**, Cilt:49, No: 579, 20-27, 2008.
9. Kafkas, F., Karataş, Ç., et.all., "Determination of Residual Stresses Based on Heat Treatment Conditions and Densities on a Hybrid (FLN2-4405) Powder Metallurgy Steel Using Artificial Neural Network", **Materials and Design**, Cilt: 28, 2431-2442, 2007.

10. Vishay, TN-503-6, Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Strain Gage Method, **Vishay Micro-measurement**, 19-34, 2007.
11. Korsunsky, A.M., Regino, G.M., Nowell, D., “Variational eigenstrain analysis of residual stresses in a welded plate”, **International Journal of Solids and Structures**, volume 44, 4574–4591, 2007.
12. Han, H.N., Lee, J.K., Kim, S.J., “An Observation of Permanent Strain During Recrystallization and Growth of Steel under Externally Applied Stress”, **Materials Letters**, volume 59, 158-161, 2005.
13. Smith, S.L., Wood, W.A., “X-ray Structure and Elastic Strain in Copper”, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences, volume 176, 966, 398-411, 1940.
14. ASTM E 837-01, Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole Drilling Strain Gage Method, 2002.
15. Schajer, G.S., H-Drill; Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program User Guide, Canada, 2006.
16. Lord, J., Hole Drilling Techniques, The NPL Materials Centre, UK, 2000.
17. Lee, H.T., Liu, C., “Optimizing the EDM hole-drilling strain gage method for the measurement of residual stress”, **Journal of Materials Processing Technology**, volume 209, 5626–5635, 2009.
18. Grant, P.V., Lord, J.D., Whitehead, P.S., **The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique**, National Physical Laboratory, UK, 2002.
19. Vishay, **Model RS-200 Milling Guide Instruction Manuel**, Vishay Measurement Group, USA, 1-9, 1992.
20. Bradley, G.R., James, M.N., **Residual Stresses/Strains Induced by the Metal Inert Gas and Friction Stir Welding Processes**, Department of Mechanical and Marine Engineering, University of Plymouth, England, 2000.
21. Buzluk, M., **Elektrik ve Gazaltı Ark Kaynağında Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
22. Buzluk, M., Özer A., Özçatalbaş Y., Kurt, A. “Örtülü Elektrot ile Ark Kaynağında Akım Şiddetinin Kalıntı Gerilmelere Etkisi” **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Karabük, 1591-1594, 13-15 Mayıs 2009.