

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİKLERDE VICKERS SERTLİK DEĞERLERİNE  
UYGULANAN YÜK ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aykut ARGINCIKLIGİL**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM ve İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Erdal KARADENİZ**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİKLERDE VICKERS SERTLİK DEĞERLERİNE  
UYGULANAN YÜK ETKİSİNİN İNCELENMESİ

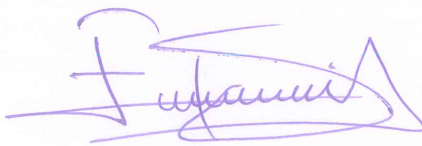
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aykut ARGINCIKLIGİL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM ve İMALAT

Bu tez.....tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

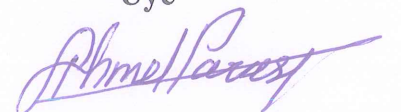
Dr. Öğr. Üyesi  
Erdal KARADENİZ  
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi  
Ersin Asım GÜVEN  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Sunal Ahmet PARASIZ  
Üye



## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Aykut ARGINCIKLIGİL

18.06.2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Erdal KARADENİZ'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Yine mikro-sertlik ölçümlerinin yapılması konusunda tüm imkanlarını bize sunan Prof. Dr. Fatih ÜSTEL ve Dr. Öğr Üyesi Şenol ŞAHİN hocalarıma, deney malzemeleri konusunda yardımlarını esirgemeyen Gültekin AHİ'ye, laboratuvar konularında yardımlarını esirgemeyen dostlarım Murat İLTER ve Ömer ULUSAKARYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak; hayatım boyunca her koşulda desteklerini hissettiren, her zaman yanımda olan sevgili eşime ve aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
SERTLİK ÖLÇME .....	4
2.1. Tanımı ve Önemi .....	4
2.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri .....	4
2.2.1. Rockwell sertlik ölçme yöntemi .....	5
2.2.2. Brinell sertlik ölçme yöntemi .....	6
2.2.3. Vickers sertlik ölçme yöntemi .....	7
2.2.4. Knoop sertlik ölçme yöntemi .....	8
2.2.5. Shore (Kıyı) sertlik ölçme yöntemi .....	8
2.2.6. Sertlik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması .....	10
2.3. Sertlik-Yük İlişkileri .....	10
2.3.1. Giriş .....	10
2.3.2. İz boyut etkisi modelleri .....	11
2.3.2.1. Meyer's kanunu .....	11
2.3.2.2. PSR modeli .....	12

2.3.2.3. MPSR modeli .....	13
2.3.2.4. Hays-Kendall yaklaşımı .....	13
2.3.2.5. Bull'un elastik/plastik deformasyon modeli .....	14
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	15
3.1. Malzemeler ve Uygulanan Isıl İşlemler .....	15
3.2. Metalografik Çalışmalar .....	16
3.3. Sertlik Ölçme Çalışmaları .....	17
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL BULGULAR .....	18
4.1. Mikro Yapı Sonuçları .....	18
4.2. Vickers Sertlik Sonuçları .....	21
4.2.1. Deneysel sonuçlar .....	21
4.2.2. Meyer's yasası sonuçları .....	22
4.2.3. PSR modeli sonuçları .....	23
4.2.4. MPSR modeli sonuçları .....	25
4.2.5. Hays-Kendall modeli sonuçları .....	26
4.2.6. Matematiksel eğri uydurma sonuçları .....	28
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	30
5.1. Deneysel ve Model Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	30
5.1.1. Meyer's deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması .....	30
5.1.2. PSR deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması .....	31
5.1.3. MPSR deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması .....	33
5.1.4. Hays-Kendall deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması	34
5.1.5. Matematiksel eğri uydurma deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması .....	36
5.2. Tartışma .....	37

KAYNAKLAR .....	39
ÖZGEÇMİŞ .....	42



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\alpha_1$	: Orantılı numune direnci katkısı - mikrosertliğe PSR modelinin katkısı
$\alpha_2$	: Yükten bağımsız sertlik terimi
$C_p$	: Uç sabiti
$d$	: İz köşegen uzunluğu
$H_B$	: Brinell sertliği
$H_k$	: Knoop sertliği
HRA	: A tipi rockwell sertlik skalası
HRB	: B tipi rockwell sertlik skalası
HRC	: C tipi rockwell sertlik skalası
$H_v$	: Vickers sertliği
ISE	: Batırma izi etkisi büyüklüğü
PSR	: Orantılı numune direnci
MPSR	: Modifiye edilmiş orantılı numune direnci
RISE	: Ters batırma izi etkisi büyüklüğü
$\zeta$	: Malzemenin çekme mukavemeti ( $\text{kgf/mm}^2$ )



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Rockwell sertlik testinin şematik görünümü .....	5
Şekil 2.2. Brinell sertlik ölçme yöntemi şematik gösterimi .....	6
Şekil 2.3. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.4. Knoop sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.5. Shore A ve Shore D karşılaştırılması .....	9
Şekil 2.6. Shore D ile Rockwell M karşılaştırılması .....	9
Şekil 2.7. Sertlik ölçme yöntemleri uygulama alanları .....	10
Şekil 2.8. ISE ve RISE'nin tipik gösterimi .....	11
Şekil 3.1. İndüksiyon uygulama işlemi .....	15
Şekil 3.2. İndüksiyon uygulama işlemi .....	15
Şekil 3.3. Metalografik iş akış şeması .....	16
Şekil 3.4. Shimadzu HMV-2 mikrosertlik cihazı .....	17
Şekil 3.5. Numune yüzey ölçüm şablonu .....	17
Şekil 4.1. Temperlenmiş AISI 52100 çeliği mikroyapı .....	18
Şekil 4.2. Isıl işlem uygulanmamış AISI 52100 çeliği mikroyapı .....	18
Şekil 4.3. Temperlenmiş AISI 1040 çeliği mikroyapı .....	19
Şekil 4.4. Isıl işlem uygulanmamış AISI 1040 çeliği mikroyapı .....	19
Şekil 4.5. Temperlenmiş AISI 4140 çeliği mikroyapı .....	19
Şekil 4.6. Isıl işlem uygulanmamış AISI 4140 çeliği mikroyapı .....	19
Şekil 4.7. Deney çeliklerinin HV-Uygulanan yük ilişkisi grafiği .....	21
Şekil 4.8. AISI 52100 çeliği Meyer's modeli grafiği ve verileri .....	22
Şekil 4.9. AISI 1040 çeliği Meyer's modeli grafiği ve verileri .....	23
Şekil 4.10. AISI 4140 çeliği Meyer's modeli grafiği ve verileri .....	23
Şekil 4.11. AISI 52100 çeliği PSR modeli grafiği ve verileri .....	24
Şekil 4.12. AISI 1040 çeliği PSR modeli grafiği ve verileri .....	24
Şekil 4.13. AISI 4140 çeliği PSR modeli grafiği ve verileri .....	24

Şekil 4.14. AISI 52100 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri .....	25
Şekil 4.15. AISI 1040 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri .....	26
Şekil 4.16. AISI 4140 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri .....	26
Şekil 4.17. AISI 52100 çeliği Hays-Kendall modeli grafiği ve verileri .....	27
Şekil 4.18. AISI 1040 çeliği Hays-Kendall modeli grafiği ve verileri .....	27
Şekil 4.19. AISI 4140 çeliği Hays-Kendall modeli grafiği ve verileri .....	28
Şekil 5.1. AISI 52100 çeliği Meyer's ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	30
Şekil 5.2. AISI 1040 çeliği Meyer's ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	31
Şekil 5.3. AISI 4140 çeliği Meyer's ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	31
Şekil 5.4. AISI 52100 çeliği PSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği	32
Şekil 5.5. AISI 1040 çeliği PSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği	32
Şekil 5.6. AISI 4140 çeliği PSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği	32
Şekil 5.7. AISI 52100 çeliği MPSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	33
Şekil 5.8. AISI 1040 çeliği MPSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği	33
Şekil 5.9. AISI 4140 çeliği MPSR ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği	34
Şekil 5.10. AISI 52100 çeliği Hays-Kendall ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	35
Şekil 5.11. AISI 1040 çeliği Hays-Kendall ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	35
Şekil 5.12. AISI 4140 çeliği Hays-Kendall ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	35
Şekil 5.13. AISI 52100 çeliği eğri uydurma matematiksel eşitliği ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	36
Şekil 5.14. AISI 1040 çeliği eğri uydurma matematiksel eşitliği ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	36
Şekil 5.15. AISI 4140 çeliği eğri uydurma matematiksel eşitliği ve deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği .....	37

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. AISI 52100, AISI 1040, AISI 4140 deney malzemeleri kimyasal analiz sonuçları .....	15
Tablo 4.1. Deney çeliklerinin ortalama HV değerleri .....	21
Tablo 4.2. Deney çeliklerinin ortalama HV Meyer's değerleri .....	22
Tablo 4.3. Deney çeliklerinin ortalama HV PSR değerleri .....	23
Tablo 4.4. Deney çeliklerinin ortalama HV MPSR değerleri .....	25
Tablo 4.5. Deney çeliklerinin ortalama HV Hays-Kendall değerleri .....	27
Tablo 4.6. Eğri uydurma matematiksel eşitlik katsayıları .....	28
Tablo 4.7. Deney çeliklerinin ortalama HV eğri uydurma yöntemi değerleri ...	29

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikrosertlik, ISE, Eğri uydurma, İndüksiyon sertleştirme, AISI 52100 çeliği (100Cr6), AISI 1040 çeliği, AISI 4140 çeliği

Bu çalışmada, AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi ve temperlenmesi sonucu uygulanan yük ile sertlik değerleri değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda toplam 7 yük değeri 50 gr. - 2000 gr. arası seçilmiştir. Elde edilen deneysel sonuç eğrileri iz boyut etkisi modellerinden Meyer's kanunu, PSR, MPSR, ve Hays-Kendall ISE modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bundan başka deneysel veriler için matematiksel eğri uydurma yöntemi araştırılmıştır.

Deneysel sonuçlar, AISI 52100 ve AISI 1040 çelikleri için matematiksel eğri uydurma modellemesinden elde edilen eşitliğin en uyumlu sonuçlar olduğunu göstermiştir.

# **INVESTIGATION OF THE APPLIED LOAD EFFECT VICKERS HARDNESS VALUE OF STEELS**

## **SUMMARY**

Keywords: Microhardness, ISE, Curve fitting, Induction hardening, AISI 52100 steel (100Cr6), AISI 1040 steel, AISI 4140 steel.

In this study, values change of the AISI 52100, AISI 1040 and AISI 4140 steels as a result of the induction surface hardening and tempering were investigated. Load values selected for experimental studies are total 7 values from 50 grams to 2000 grams. The experimental result curves were compared with Meyer's law, PSR, MPSR and Hays-Kendall models. Furthermore, the most appropriate mathematical equation for experimental curve was investigated.

The experimental results, for AISI 52100 and AISI 1040 steels, showed that the mathematical curve fitting model was the most concordant of the equation obtained.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mühendislik ürünlerinin çalışma koşullarında başarılı performans gösterebilmelerinin başlangıç aşaması uygun malzeme seçimidir. Malzeme seçiminde, çalışma koşulları için gerekli özelliklerin tespiti ve malzemelerin bu özelliklerinin doğru belirlenmesi oldukça önemlidir.

Malzeme özellikleri; mekanik özellikler, fiziksel özellikler ve teknolojik özellikler şeklinde sınıflandırılabilir. Makine mühendisliği uygulamalarında mekanik özellikler en çok dikkate alınan malzeme özellikleridir. Mekanik özellikler ürünlerin çalışma koşullarındaki mekanik zorlanmaya karşı performans değerlendirmesinde yararlı olmaktadır.

Mekanik özelliklerin; sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, süneklik, elastisite modülü, rezilyans, tokluk, darbe dayanımı, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı ve sürtünme dayanımı vb. çeşitleri mevcuttur.

Sertlik ölçme yöntemleri malzemenin küçük bir hacmine uygulanabilir, düşük maliyet, kolay ve hızlı sonuç alınabilir olması nedenleriyle malzeme özelliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır [1]-[4]. Sertlik ölçme yöntemlerinden vickers mikro-sertlik ölçme yöntemi ise sertleştirilmiş yüzeylerin [5], [6], kaplamaların [7], kaynak birleştirmelerin [8], seramik [9], [10] ve insan kemiği [11] gibi çok sayıda ürünün malzeme özelliklerinin, metalografik faz farklılıklarının [12] ve kalıntı gerilme [13] değerlendirilmesi için tercih edilir [3], [14]. Bu yöntemin başlıca tercih nedeni farklı sertlik değerlerine sahip malzemelere uygulanabilmesidir.

Vickers sertlik ölçme yöntemi makro, mikro ve nano sertlik şeklinde üç gruba ayrılır. Bu sınıflandırma uygulanan yük değerleri esas alınarak yapılır. Genellikle, 1 kg üzeri yükler ile uygulanan vickers sertlik deneyleri makro vickers, 30 gr. İle 1 kg arası yükler ile uygulanan vickers sertlik deneyleri mikro vickers ve 30 gr. dan daha az yükler ile uygulanan vickers sertlik deneyleri nano vickers olarak tanımlanır [15], [16].

Makro vickers deney sonuçları genel olarak uygulanan yükten bağımsız sonuçlardır. Mikro ve nano vickers deney sonuçları ise uygulanan yüke bağımlıdır [3], [11], [14], [16]. Bu bağımlılık, malzeme türü ve iç yapısına göre farklı davranış gösterir. Aynı özellik grubundaki malzemelere farklı yüklerde çalışılmış uygulanan yüke bağımlı Vickers sertlik ölçme sonuçları arasında ilişki kurulabilmesi ilgili sektörler için yararlı olacaktır. Bu ilişki literatürde, iz boyut etkisi (ISE) olarak ifade edilir [1]-[4], [10], [14], [15], [17]. ISE araştırma sonuçları mikro sertlik uygulanan yük ilişkilerinin iki farklı davranış gösterdiğini ifade eder. Bunlar, uygulanan yük değer artışı ile azalan sertlik değerleri şeklindeki ISE ve uygulanan yük değer artışı ile artan sertlik değerleri şeklindeki ters iz boyut etkisi (RISE) olarak sınıflandırılır [2], [3], [9], [14]. Bu davranış farklılığının nedenleri; ölçüm cihazı, personel, malzeme özelliği ( elastik geri dönüş ve pekleşme vb.), sürtünme, titreşim, çatlak ve kalıntı gerilme kaynaklı olabilmektedir. ISE'nin ölçüm cihazı, personel, malzeme özelliği ( elastik geri dönüş ve pekleşme vb. ) ve sürtünme kaynaklı olduğu ifade edilir [2], [3], [14], [16], [17]. RISE'nin ise titreşim, çatlak ve kalıntı gerilme kaynaklı olduğu ifade edilir [2], [3], [14]. Literatür genel olarak, ISE oluşumunun seramik gibi gevrek malzemelerde, RISE oluşumunun ise sünek malzemelerde görüldüğünü ifade etmektedir [2], [3].

Malzemelerin mikrosertlik ve uygulanan yük arasındaki ilişkileri yaygın olarak Meyer's yasası, orantılı numune direnci (PSR), modifiye edilmiş orantılı numune direnci (MPSR), Hays-Kendall modelleri, ANOVA istatistiksel varyans analizi ve grafiksel olarak incelenmiştir [1]-[4], [9], [10], [14], [17].

Çelikler endüstride en çok kullanılan mühendislik malzemeleri olup yüzeyi sertleştirilmiş ürünlerin malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi için Vickers mikro-sertlik yöntemi yaygın bir şekilde kullanılır. Çelikler için yapılan çalışmalarda, Meyer's yasası, PSR, MPSR ve Hays – Kendall ISE modellerinin biri veya birkaçının deneysel sonuçlar ile uyumu araştırılmıştır [1], [2], [18]-[20]. Düşük alaşımli ve paslanmaz çelik için yapılmış bir çalışmada ise sadece grafiksel sonuçlar yorumlanmıştır [4].

Bu çalışmada, AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi ve temperlenmesi sonucu uygulanan yük ile sertlik değerleri değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda yük değerleri 50 gr. – 2000 gr. arası seçilmiştir. Elde edilen deneysel sonuç eğrileri iz boyut etkisi modellerinden Meyer's kanunu, PSR, MPSR ve Hays-Kendall ISE modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bundan başka, deneysel veriler için en uygun matematiksel eğri uydurma modeli araştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, AISI 52100 ve AISI 1040 çelikleri için matematiksel eğri uydurma modellemesinden elde edilen eşitliğin en uyumlu sonuçlar olduğunu göstermiştir.



## **BÖLÜM 2. SERTLİK ÖLÇME**

### **2.1. Tanımı ve Önemi**

Sertlik malzemelerin mekanik özelliklerinden biridir. Genel olarak malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç şeklinde ifade edilir [21].

Mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde genel bir bilgi sunması nedeniyle sertlik ölçümleri en yaygın uygulanan malzeme özelliği tayin etme deneyleridir. Mekanik özelliklerden başka malzemenin elektriksel vb. diğer özellikleri hakkında da bir değerlendirme kriteri olmaktadır [28]. Sertlik ölçme deneyleri basit uygulanabilir, diğer deneylere göre numuneleri daha az tahrip etmeleri ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilirler [1]-[4].

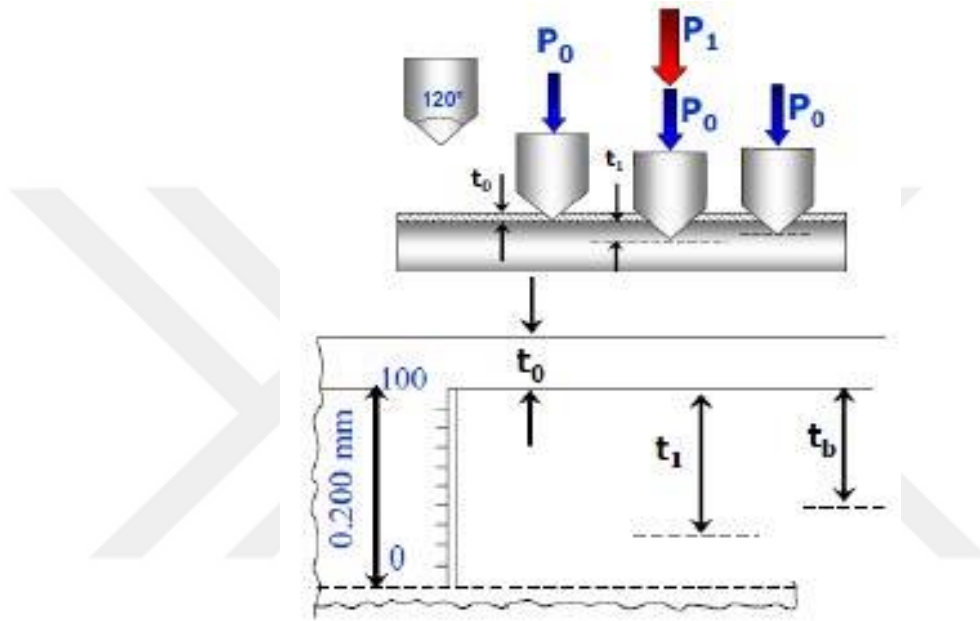
### **2.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri**

Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan çok sayıda sertlik ölçme yöntemi mevcuttur. Bunlar uzun yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda her bir sertlik ölçme yönteminin uluslararası standartları oluşmuştur.

Sertlik ölçme yöntemleri statik ve dinamik yöntemler şeklinde iki gruba ayrılabilirler. Statik sertlik ölçme yöntemleri genel anlamda laboratuvar tipi sertlik ölçme yöntemleri ailesindedir. Bunlar; Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop vb. sertlik ölçme yöntemleridir. Dinamik sertlik ölçme yöntemlerine örnek olarak Shore sertlik ölçme yöntemi verilebilir.

### 2.2.1. Rockwell sertlik ölçme yöntemi

Rockwell ölçme yöntemi batırıcı uç yardımıyla yapılan sertlik ölçme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde batırıcı uç malzeme üzerinde bir iz oluşturur (Şekil 2.1.). Rockwell sertlik değeri bulunmasında önemli olan bulgu batırıcı ucun yüzeyden içeri doğru battığı derinliktir.



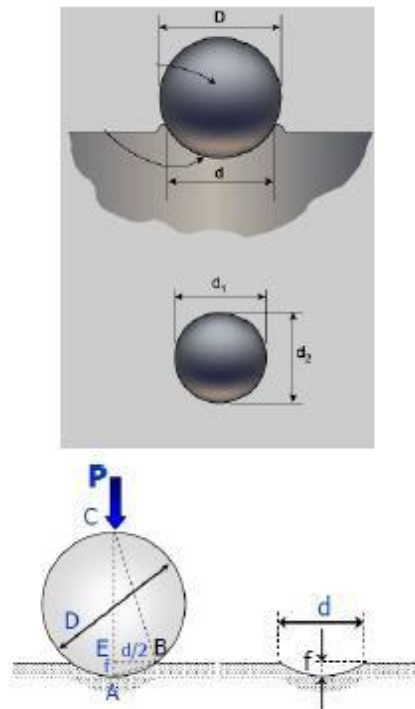
Şekil 2.1. Rockwell sertlik testinin şematik görünüşü [21]

Rockwell sertlik testinde sertlik değerleri daima bir sembol harf ile belirtilir ki bu sembol harf batırıcı ucun tipini, kullanılan yükün miktarını ve kadran üzerinde okunacak bölümü belli eder [28].

Rockwell sertlik testi için çeşitli uç/yük varyasyonları oluşturulabilir. Bu sayede çok çeşitli skalalar ile malzemelerin sertliklerinin ölçülmesine imkan tanınmış olur. Bahsi geçen skalaları içerisinde en çok kullanılanı C ve B skalalarıdır. Örneğin, C skalası; sert metaller için, B skalası yumuşak metaller için kullanılır.

### 2.2.2. Brinell sertlik ölçme yöntemi

Brinell sertlik ölçme yöntemi yük ve zaman değişkenlerini kullanan bir sertlik ölçme yöntemidir. Bahsedilen yük, malzeme yüzeyine sert bir bilya yardımıyla belirli bir süre uygulanır. Bilyanın kaldırılmasından sonra yüzeyde küresel bir iz kalır (Şekik 2.2.). Bu kuvvetin oluşan izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri elde edilir [19].



Şekil 2.2. Brinell sertlik ölçme yöntemi şematik gösterimi [28]

Brinell sertlik değeri aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$BSD = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D f} \quad BSD = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

Bu formülasyona göre BSD, P kg, D (mm) ve d (mm) değişkenlerine bağlıdır. Standart deney koşullarında çapı 10 mm olan bilya kullanılır. Yük, malzemenin cinsine göre seçilir ve uygulama süresi 10-15 saniye arasında değişir. Malzemenin üzerine

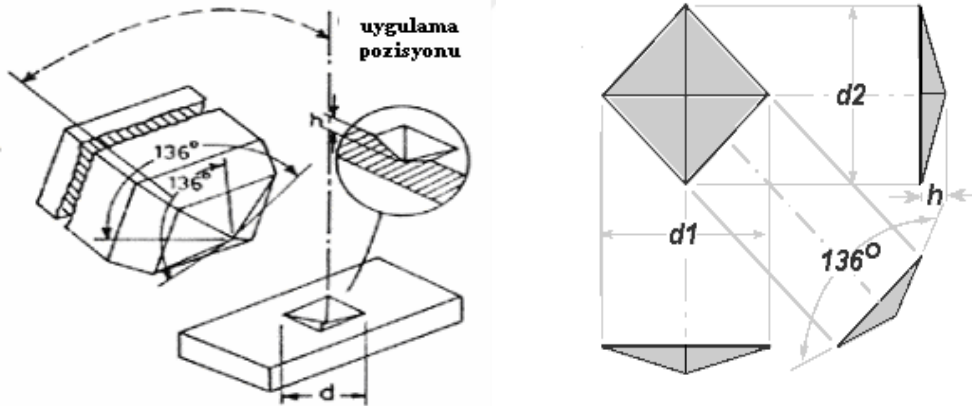
uygulanacak yük değeri sertliği ölçülecek malzemenin cinsine ve bilya çapına göre seçilmektedir.

### 2.2.3. Vickers sertlik ölçme yöntemi

Vickers sertlik değeri, parçanın yüzeyinde belirli bir yük altında bastırılan ucun kaldırılmasından sonra, parça yüzeyinde bıraktığı izin köşegenlerinin ölçülmesiyle bulunur. Vickers testinde kullanılan elmas uç, kare tabanlıdır ve karşılıklı kenarları merkezde açı oluştururlar (Şekil 2.3.). Vickers sertlik değeri (Hv) aşağıdaki ifadeden hesaplanır.

$$VSD = \frac{1.854 \times P}{d^2} \quad (2.2)$$

Burada F, parçaya etki eden kuvvet,  $d^2$  parçada oluşan izin milimetrekare cinsinden alanıdır. Alanı hesaplamak için ölçülen köşegenlerin uzunluklarının ortalaması alınır.

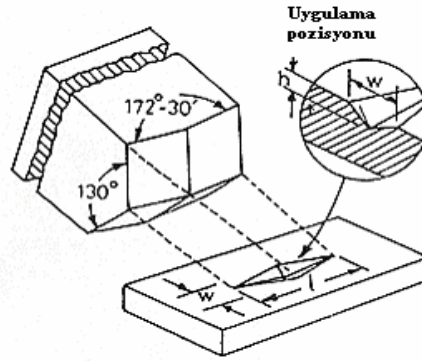


Şekil 2.3. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi [21]

Kullanılan ucun elmas olması, elmasın sertlik değerinin yüksek olmasından dolayı bu yöntemin tüm malzemelere uygulanabilir olmasını doğurmuştur. Vickers sertlik ölçme yöntemi, hızlı uygulama, küçük batma derinliğine sahip olması nedeniyle parça yüzeyinde gözle görülür bir iz bırakmama, doğru okuma alınması, tüm yüzeyler için tek bir uç kullanılması ve düşük maliyetli olması sebebiyle çok tercih edilen bir sertlik ölçme yöntemidir.

#### 2.2.4. Knoop sertlik ölçme yöntemi

Knoop sertlik testinde piramit şeklindeki elmas uçlar (Knoop sertlik uçları) materyal üzerine batırılır. Bir iz elde edilir ve sertlik, Knoop ucunun izinin derinliğinden hesaplanır [29]. Kuvvetleri düşük tutarak cam ve seramik gibi gevrek maddelerin sertlik testini yapmaya olanak sağlar.



Şekil 2.4. Knoop sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi

Knoop testinde kullanılan elmas uç, Şekil 2.4.'te görüldüğü gibi, dört taraflı bir piramit olup, karşılıklı birinci iki yüzey arasındaki açı yaklaşık  $170^{\circ}$  ve diğer iki yüzey arasındaki açı  $130^{\circ}$  dir [21].

$$KSD = \frac{14,229 F}{d^2} \quad (2.3)$$

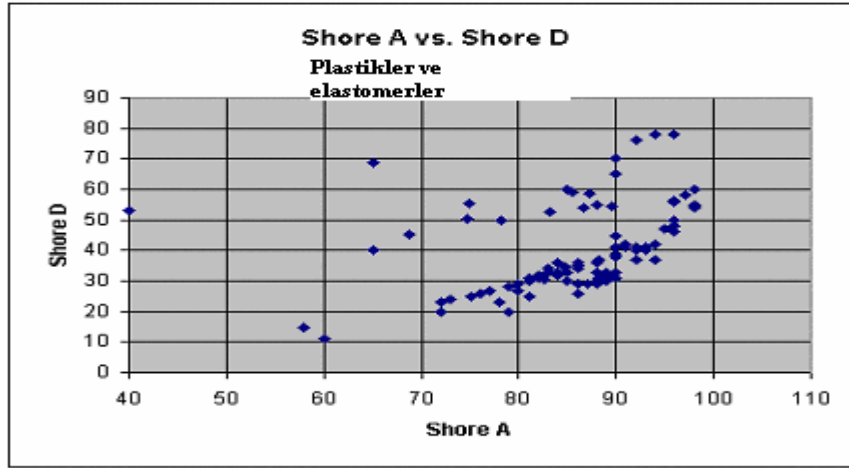
Denklem 2.3.'te Knoop sertlik değeri hesaplama formülü gösterilmiştir. Bu denkleme göre P, uygulanan kuvvet,  $d^2$  ölçülen izin milimetrekare cinsinden alanıdır.

Knoop sertlik testi yavaş uygulanabilir bir testtir. Bu nedenle diğer sertlik ölçme testlerine göre daha az tercih edilebilir durumda olduğu söylenebilir.

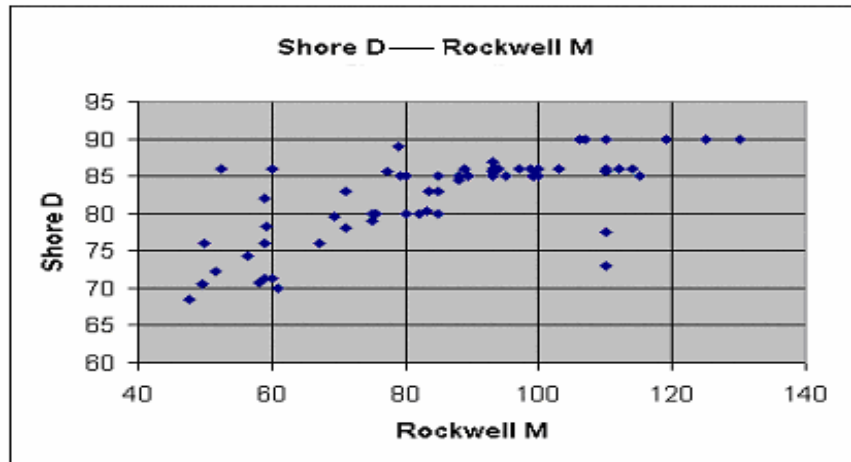
#### 2.2.5. Shore (Kıyı) sertlik ölçme yöntemi

Shore testi, malzemenin elastiklik mekanik özelliği ile ilgili sonuç veren bir sertlik test yöntemidir. Başka bir deyişle Shore testi bize malzemenin sertliğini elastiklik cinsinden verir. Bilinen bir yükseklikten bırakılan elmas uçlu çekicinin materyale

çarpması düzeneğiyle ortaya Shore sertlik değeri çıkar. Shore deneyinde sertlik, çekicinin bırakıldığı yüksekliğe bağlıdır. Shore testi; Shore A ve Shore D olmak üzere iki çeşitte değerlendirilir.

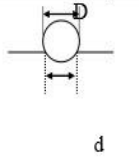

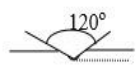



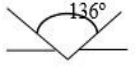


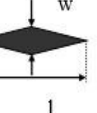


Şekil 2.5. Shore A ve Shore D karşılaştırılması [21]



Şekil 2.6. Shore D ile Rockwell M karşılaştırılması [21]

## 2.2.6. Sertlik ölçme yöntemlerinin uygulama alanlarının karşılaştırılması

Sertlik	Simge	Batıcı Uç	İz Şekli		Yük	Sertlik Değeri Formulu	Uygulama	
			Ön Görünüş	Üst Görünüş				
Brinell	H <sub>B</sub>	10 mm çapında çelik veya tungsten karbür bilya			500-3000 kg	$BHN = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	Dökme demir, çelikler ve demir dışı alaşımlar	
Rockwell	A	R <sub>A</sub>			60 kg	100-500 t	Çok sert malzemeler	
	C	R <sub>C</sub>			150 kg		Yüksek mukavemetli çelikler	
	D	R <sub>D</sub>			100 kg		Yüksek mukavemetli çelikler	
	B	R <sub>B</sub>	1/16 inç. Çapında çelik bilya			100 kg	130-500 t	Pirinç ve düşük mukavemetli çelikler
	F	R <sub>F</sub>				60 kg		Çok yumuşak malzemeler
	G	R <sub>G</sub>				150 kg		Yumuşak malzemeler ve alüminyum
	E	R <sub>E</sub>				100 kg		Yumuşak malzemeler ve alüminyum
Vickers	HV, DPH	Elmas pramit			10-30kg	$VHN = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$	Sert malzemeler	
Knoop Mikrosertlik	KHN	Elmas pramit			25-10000 gr	$KHN = 14,2 \cdot \frac{F}{l^2}$	Yapıyı oluşturan bileşenler, nitritüz e edilmiş parçalar, elektrolitik kaplanmış malzemeler	

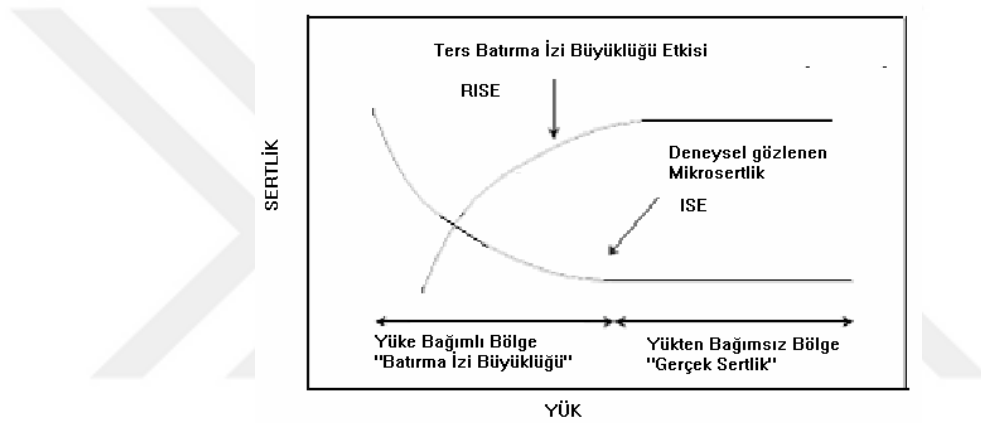
Şekil 2.7. Sertlik ölçme yöntemleri uygulama alanları

## 2.3. Sertlik-Yük İlişkileri

### 2.3.1. Giriş

Yapılan çalışmalar, katıların mikrosertlikleri ile katıya uygulanan test yükü arasında bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Bu ilişki literatürde indentation size effect (ISE) batırma izi büyüklüğü etkisi olarak yer almakta olup uygulanan test yükü ile

mikrosertliğin azalması olarak bilinir [2], [3], [14]. Bu durum normal ISE olarak bilinmekte olup bir de artan yük ile mikrosertliğin artması olarak tanımlanan reverse indentation size effect, RISE, (ters batırma izi büyüklüğü etkisi) çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya atılmıştır (Şekil 2.7.). ISE, batırma esnasındaki sertleşme, kendine gelme, malzemenin elastik ve plastik deformasyona cevabı, dislokasyonlar civarındaki zorlanma gradientleri, batırıcı uç ile malzeme sürtünmesi gibi olaylar ile açıklanırken RISE, malzeme-ortam arasındaki distorsiyon sınırı, düşük zor değerlerindeki titreşimler enerji kayıpları, çatlaklar ile izah edilmeye çalışılmıştır [2], [3], [9], [14]. Dolayısıyla ISE ve RISE' yi açıklamak için aşağıdaki modeller oluşturulmuştur. Bunlar;



Şekil 2.8. ISE ve RISE' nin tipik gösterimi[21]

- Meyer's kanunu
- PSR modeli
- MPSR modeli
- Hays-Kendall yaklaşımı
- Matematiksel eğri uydurma yöntemleri

### 2.3.2. İz boyut etkisi modelleri

#### 2.3.2.1. Meyer's kanunu

Malzemelerin ISE davranışlarını açıklamak için ortaya atılan en basit model Meyer's kanunudur [22]. Meyer's kanunu ISE modeli  $\log P - \log d$  verileri arasındaki ilişkinin



korelasyonu sonucu elde edilen eşitlikten Meyer's ortalama  $d$  değerlerinin elde edilmesi esastır.

$$P = Ad^n \quad (2.4)$$

2.4. denleminden yola çıkarak her iki tarafın logaritması alınarak logaritmik denklem elde edilir;

$$\log P = \log A + n \cdot \log d \quad (2.5)$$

İfadede  $n$  Meyer sabiti (ya da sertleşme sabiti).  $A$  ise malzeme sabitidir. ISE için  $n < 2$ , RISE için  $n > 2$  dir. Diğer yandan  $n=2$  olduğu zaman sertlik uygulanan yükten bağımsızdır [22]. Ayrıca  $n$  malzemelerin sert yada yumuşak olmalarının bir ölçüsü olarak ta kullanılmaktadır. Eğer  $n$ , 1,6' dan küçük ise malzeme yumuşak, büyük ise malzeme serttir. Meyer's kanunu ampirik bir ifade olup uygulanan yük ile batırma izi büyüklüğü arasındaki ilişkiyi verir. Ayrıca düşük yük değerlerinde uygun sonuçlar vermediğinden kullanım alanı sınırlıdır.

### 2.3.2.2. PSR (Orantılı Numune Direnci) modeli

Son zamanlarda Li ve Bradt  $TiO_2$  ne  $SnO_2$  deki ISE davranışını izah etmek için bu modeli ortaya atmışlardır. Bu modele göre uygulanan test yükü  $P$  ile nihai iz değeri  $d$  arasında [23],[24],[25],

$$\frac{P}{d} = a_1 + a_2 d \quad (2.6)$$

$$P = a_1 d + a_2 d^2 \quad (2.7)$$

şeklinde bir ifade vardır. Denklemin kökleri ikinci derecedendir. Bu modele göre numunede gözlenen ISE davranışı,  $a_1$  ile tanımlanan orantılı numune direnci katkısı (mikrosertliğe PSR modelinin katkısı) ve  $a_2$  ile tanımlanan yükten bağımsız sertlik ile ilgilidir. Başka bir deyişle PSR,  $P/d - d$  verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu

sonucu elde edilen eşitlikten PSR ortalama d değerlerinin elde edilmesi esastır. Numune direnci ise, test numunesinin elastik direnci ile test numunesi ile batan ucun yüzeyleri arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Aslında bu model Kays-Kendall modelinin ISE' ye yaklaşımının geliştirilmiş bir yaklaşımından başka birşey değildir. Bu modelin kullanılabilirliği yine P/d - d' nin lineerliği ile sınırlı olup, P/d - d grafiğinden hareketle yükten bağımsız sertlik değeri bulunabilir.

### 2.3.2.3. MPRS (Modifiye Edilmiş Orantılı Numune Direnci) modeli

Bu modele göre uygulanan test yükü P ile nihai iz değeri d arasında [23],[24],[25],

$$P = a_0 + a_1d + a_2d^2 \quad (2.8)$$

şeklinde bir ifade vardır. Bu modelde de PSR modelinde olduğu gibi denklemin kökleri ikinci derecedendir. Modifiye edilmiş orantılı numune direnci (MPSR) modeli P ve d verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen polinom eşitliğinden MPSR ortalama d değerlerinin elde edilmesi esastır. Bu modelin kullanılabilirliği yine P - d' nin lineerliği ile sınırlı olup, P - d grafiğinden hareketle yükten bağımsız sertlik değeri bulunabilir.

### 2.3.2.4. Hays-Kendall yaklaşımı

Hays ve Kendall, plastik deformasyonun başlayabilmesi için minimum bir test yükü (W)' nün gerekli olduğunu ve bunun altında yalnızca elastik deformasyonun meydana geldiğini ifade ederek sertliğin yükte bağımlılığını;

$$P = W + A_1d^2 \quad (2.9)$$

şeklinde ifade etmişlerdir [23],[24],[25]. İfadede W plastik deformasyon için gereken minimum yük, A<sub>1</sub> ise yükten bağımsız bir sabittir. Uygulanan yük ve ölçülen iz değerlerinden hareketle çizilen 1/d<sup>2</sup> - P/d<sup>2</sup> grafiğinden hareketle W ve A<sub>1</sub> değeri hesaplanabilir. Başka bir deyişle Hays-Kendall modeli P ve d<sup>2</sup> verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen eşitlikten Hays-Kendall ortalama d değerlerinin elde edilmesi esastır. Ancak düşük yük durumlarında alınan ölçüler için

negatif  $W$  değerleri ve  $1/d^2 - P/d^2$  grafiklerinde özellikle RISE için zayıf uyum göze çarpmaktadır. [23].

### 2.3.2.5. Bull'un elastik/plastik deformasyon modeli

Keskin olmayan bir uç ve malzemenin plastik deformasyonunun da ortaya çıkan yeni kayma bantları ile ilgili elastik kendine gelme durumunda ISE için batırma izinin yüke bağımlılığı,

$$P = A_2 (d + d_0)^2 \quad (2.10)$$

ifadesi ile verilir [23]. İfadedeki  $A_2$  yükten bağımsız sabit,  $d_0$  ise üstteki faktörler yüzünden  $d$  deki düzeltme terimidir. Artan yük ile  $d_0 / d$  azalır, dolayısıyla ölçülen sertlik azalır.  $A_2$  ve  $d_0$  değerleri ise  $P^{1/2} - d$  grafiğinden elde edilir. Eğer malzeme RISE davranışı sergiliyor ise  $d_0$  düzeltme terimi  $5\mu m$  den küçük ve negatif bir niceliktir.

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

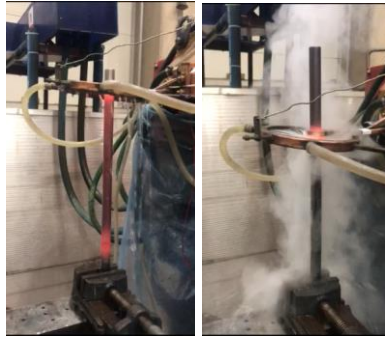
### 3.1. Malzemeler ve Uygulanan Isıl İşlemler

Bu çalışmada, AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi ve temperlenmesi sonucu uygulanan yük ile sertlik değerleri değişimi incelenmiştir. AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 52100, AISI 1040, AISI 4140 deney malzemeleri kimyasal analiz sonuçları

Malzeme	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% Ni
AISI 52100	1,01	0,213	0,361	1,4	0,0081	0,088
AISI 1040	0,417	0,175	0,725	0,109	0,0107	0,0854
AISI 4140	0,962	0,208	0,351	1,39	0,0068	0,0837

Ø24 mm çapında ve 500 mm uzunlukta numunelere indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri bobin iç çapı 32 mm, ilerleme hızı 9,25 mm/sn ve 5800 Hz frekans parametrelerinde dikey konumda uygulanmış olup (Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.), işlem süresince sıcaklıklar 800-820 °C ölçülmüştür. Isıtma sonrası soğutma, su ile gerçekleştirilmiştir. Soğutma sonrası numuneler 200 °C 'de 3 saat süreyle temperlenmiştir.

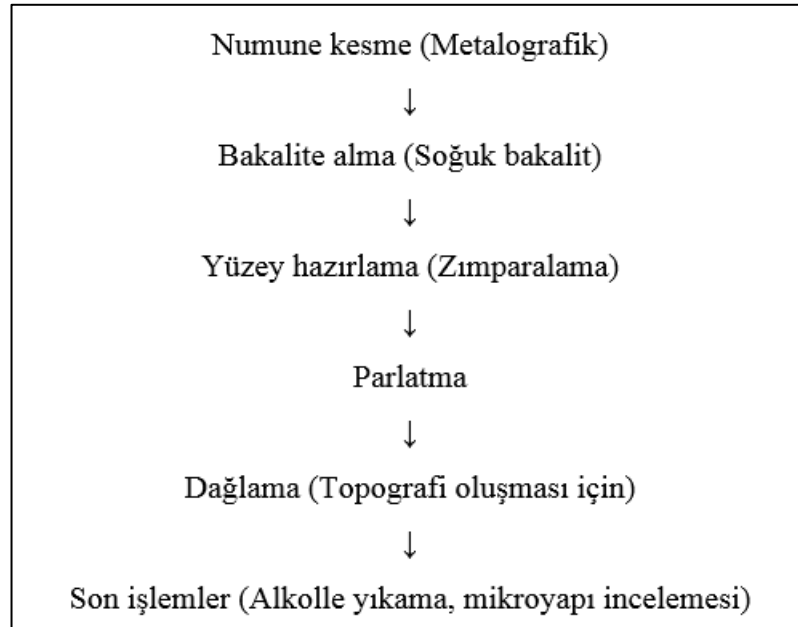


Şekil 3.1 ve Şekil 3.2. İndüksiyon uygulama işlemi fotoğrafı

### 3.2. Metalografik Çalışmalar

Bu aşamada deneysel çalışma olarak numune kesme, bakalite alma, yüzey zımparalama ve yüzey polisaj şeklinde metalografik çalışmalar yapılmıştır (Şekil 3.3.). Isıl işlem uygulanmış AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri metalografik kesme cihazında ekseni boyunca kesilmiş ve bakalite alınacak şekilde 4 eşit parça oluşturulmuştur. Numunelerden bir tanesi iç yapı incelemeleri (mikroyapı), diğer üç adet numune ise vickers (mikro) sertlik ölçümleri için kullanılmıştır. Daha sonra numuneler bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numunelere ilk olarak 25 N, 250 devir/dk parametrelerinde 120 kum ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra sıralı bir şekilde 220-320-600-800 ve 1000 kumlar ile numuneler zımparalanmış ve yüzeylerinin parlak, temiz bir hal alması sağlanmıştır. Parça yüzeyleri temiz bir hal aldıktan sonra 6 µ kadife (çuha) ve 6 µ elmas süspansiyon sıvısı kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır. Son olarak dağlama işlemi için %4 Nital<sub>2</sub> solüsyon hazırlanmış ve dağlama işlemi yapılmıştır.

Metalografik iş akışı şu şekilde oluşmuştur;



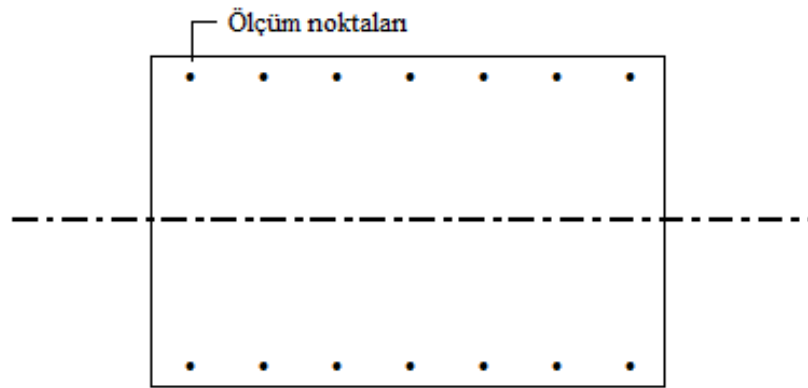
Şekil 3.3. Metalografik iş akış şeması

### 3.3. Sertlik Ölçme Çalışmaları

Sertlik ölçümleri için Shimadzu HVM-2 mikrosertlik cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4.). Bu cihaz ile oda sıcaklığında 50 gr, 100 gr, 200 gr, 300 gr, 500 gr, 1 kg ve 2 kg test yükleri Şekil 2.6'da geometrisi verilen uçlar ile her bir numunenin seçilen yüzeylerine 15 sn süre ile yüzeyin farklı noktalarına uygulandı ve iz ölçümleri kaydedildi. Numune yüzey ölçüm şablonu Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Her bir yük değeri için 5 farklı numune yüzeyinde ölçüm uygulanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Shimadzu HVM-2 mikrosertlik cihazı



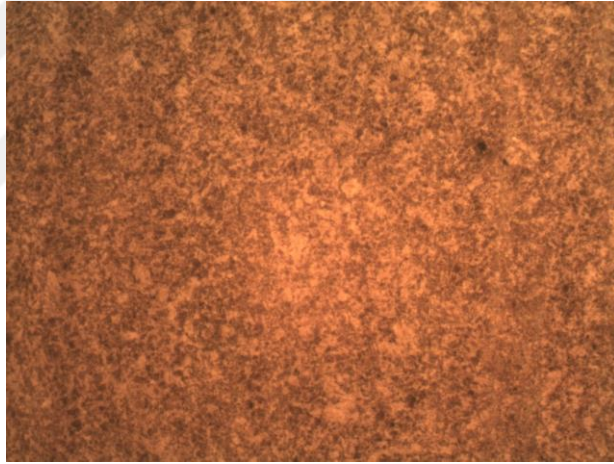
Şekil 3.5. Numune yüzey ölçüm şablonu

## BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR

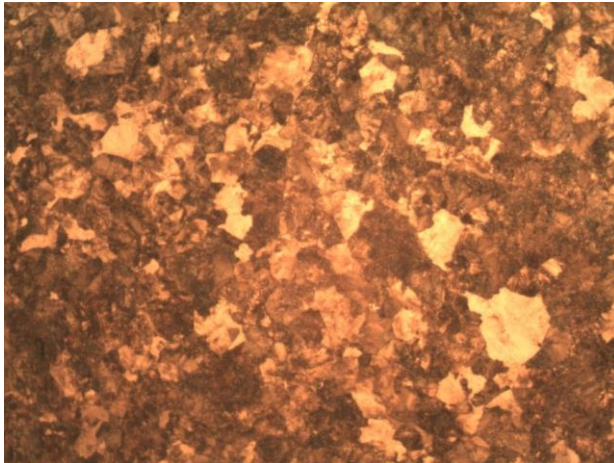
### 4.1. Mikroyapı Sonuçları

Yapılan metalografik çalışmalardan sonra AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin iç yapıları incelenmiş olup, Şekil 4.1. - Şekil 4.6.'da sunulmuştur.

İç yapı incelemelerine göre ısıtılmış yüzeylerde tane küçülmesi olduğu gözlemlenmiştir.

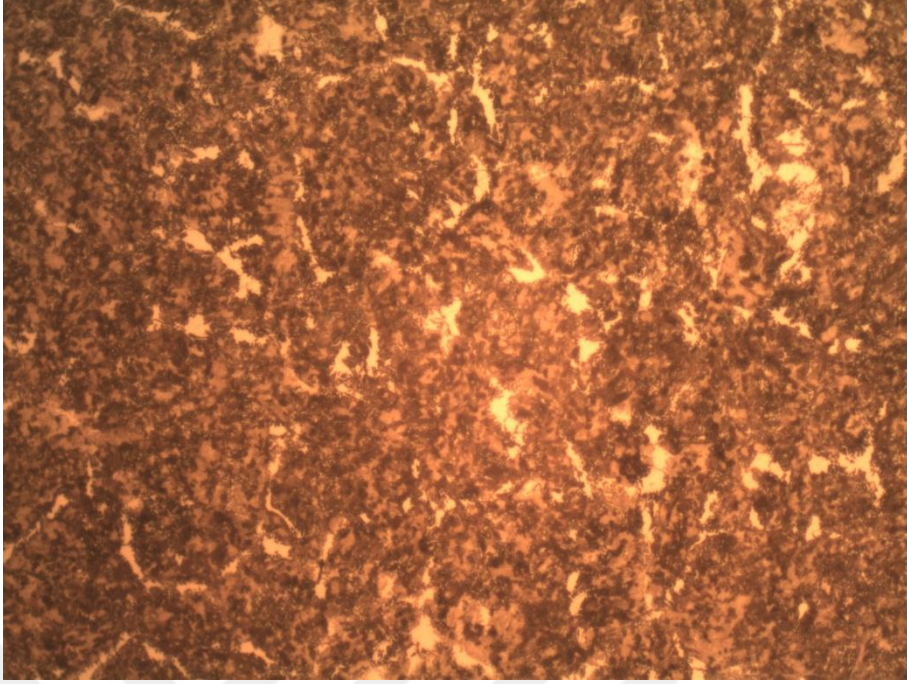


Şekil 4.1. Temperlenmiş AISI 52100 çeliği mikroyapı incelemesi , (200x büyütme)

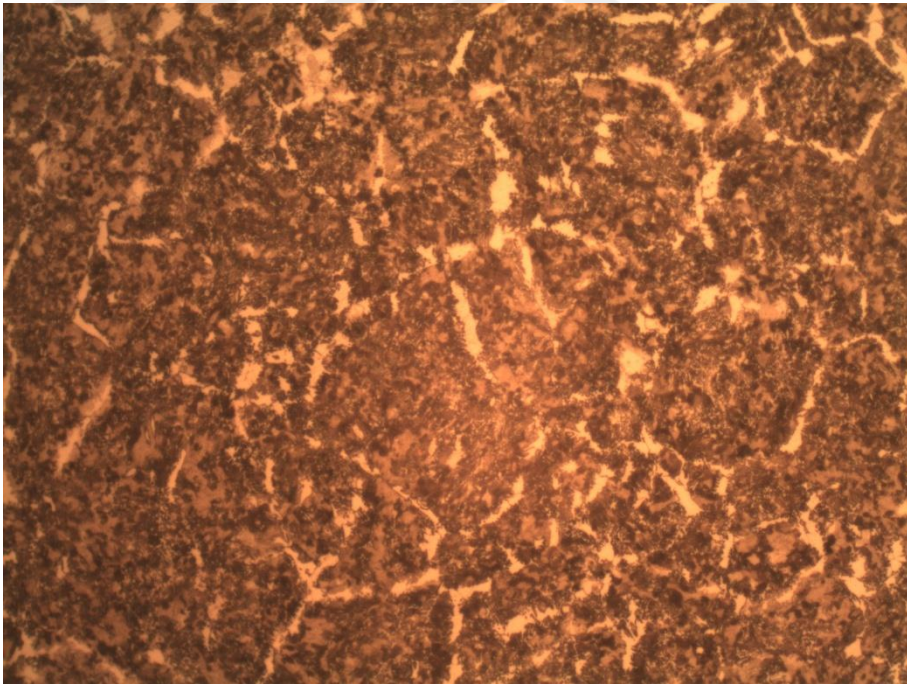


Şekil 4.2. Isıl işlem uygulanmamış AISI 52100 çeliği, (200x büyütme)



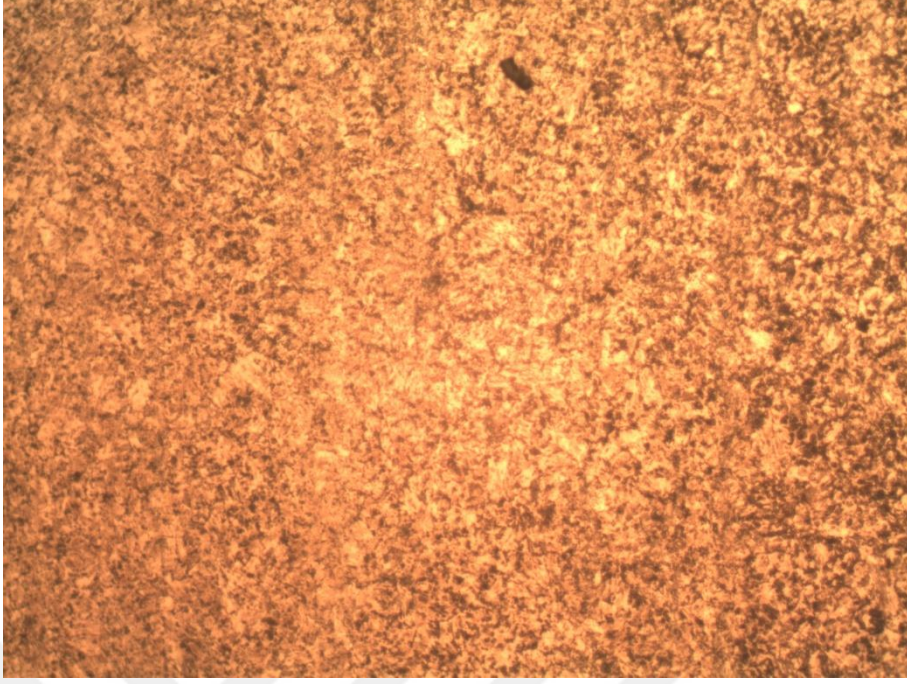


Şekil 4.3. Temperlenmiş AISI 1040 çeliği mikroyapı incelemesi , (200x büyütme)

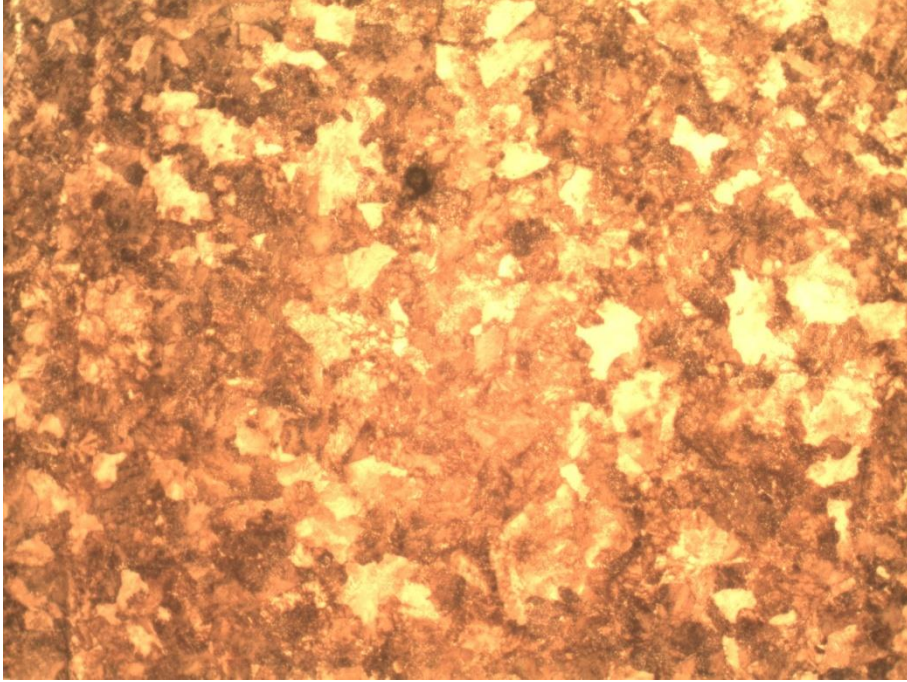


Şekil 4.4. Isıl işlem uygulanmamış AISI 1040 çeliği mikroyapı incelemesi , (200x büyütme)





Şekil 4.5. Temperlenmiş AISI 4140 çeliği mikroyapı incelemesi , (200x büyütme)



Şekil 4.6. Isıl işlem uygulanmamış AISI 4140 çeliği mikroyapı incelemesi , (200x büyütme)

## 4.2. Vickers Sertlik Sonuçları

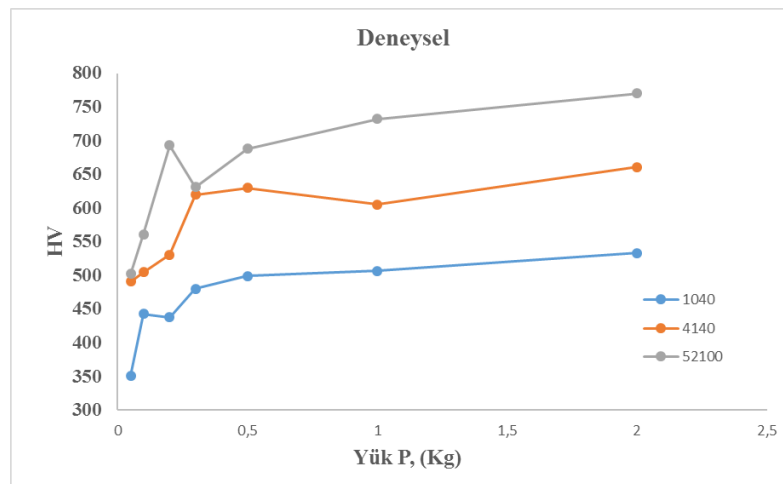
### 4.2.1. Deneysel sonuçlar

AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 52100 çelikleri için 5 farklı numune yüzeyinde ölçüm uygulanmış ve Denklem (2.2.) ifadesinden hareketle hesaplanan ortalama mikrosertlik (Hv) değerleri Tablo 4.1.'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Deney çeliklerinin ortalama Hv değerleri

Yük (Gr)	HV ort. (kg/mm <sup>2</sup> )		
	1040	4140	52100
0,05	351	491	502
0,1	443	505	561
0,2	438	531	693
0,3	480	620	631
0,5	499	630	688
1	507	605	732
2	533	661	770

Vickers sertlik değerinin uygulanan yüke göre değişimini gösteren deney sonuçları Şekil 4.7.'de sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, indüksiyonla yüzey sertleştirme ve temperleme uygulanmış AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklerinin vickers sertlik değeri-uygulanan yük ilişkilerinin ters iz boyut etkisi (RISE) şeklinde olduğunu göstermektedir.



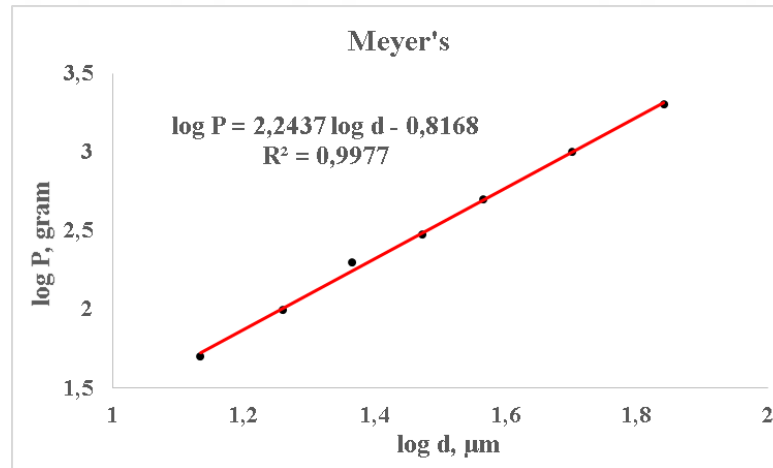
Şekil 4.7. Deney çeliklerinin HV-Uygulanan yük ilişkisi grafiği

#### 4.2.2. Meyer's yasası sonuçları

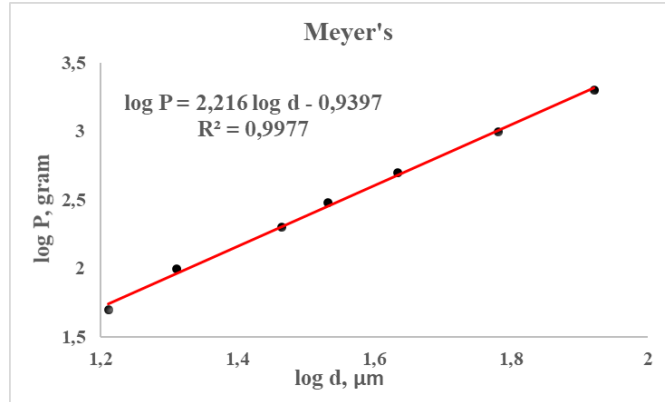
ISE modelleri iz boyut etkisini matematiksel olarak tanımlamanın bir yoludur. Meyer's kanunu ISE modeli  $\log P - \log d$  verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen eşitlikten Meyer's ortalama  $d$  değerlerinin elde edilmesi esastır. Deney verileri kullanılarak elde edilen bu ilişki Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da sunulmuştur.

Tablo 4.2. Deney çeliklerinin ortalama Hv Meyer's değerleri

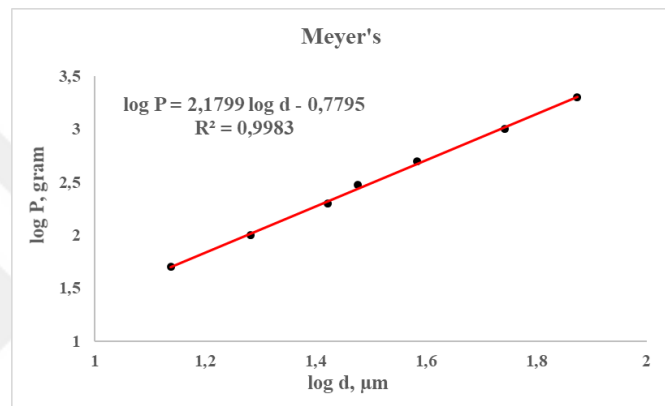
Yük (Gr)	HV Meyer's ort. (kg/mm <sup>2</sup> )		
	1040	4140	52100
0,05	385	493	530
0,1	412	523	572
0,2	441	553	617
0,3	459	572	644
0,5	482	597	681
1	516	632	734
2	552	669	792



Şekil 4.8. AISI 52100 çeliği Meyer's modeli grafiği ve sonuçları



Şekil 4.9. AISI 1040 çeliği Meyer's modeli grafiği ve sonuçları



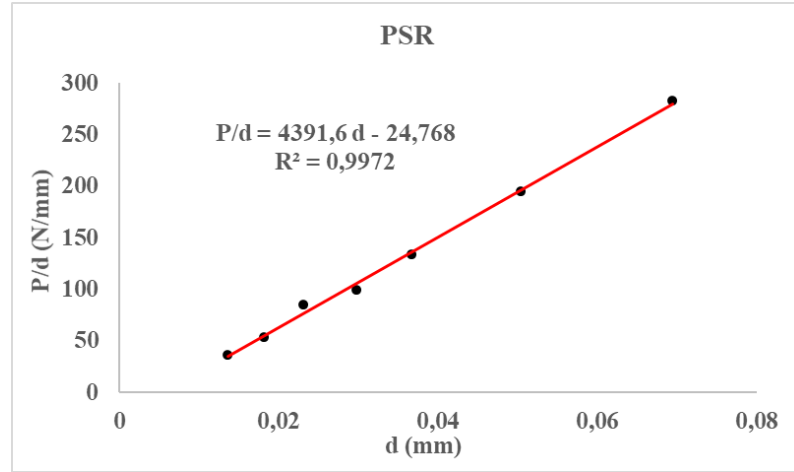
Şekil 4.10. AISI 4140 çeliği Meyer's modeli grafiği ve sonuçları

#### 4.2.3. PSR modeli sonuçları

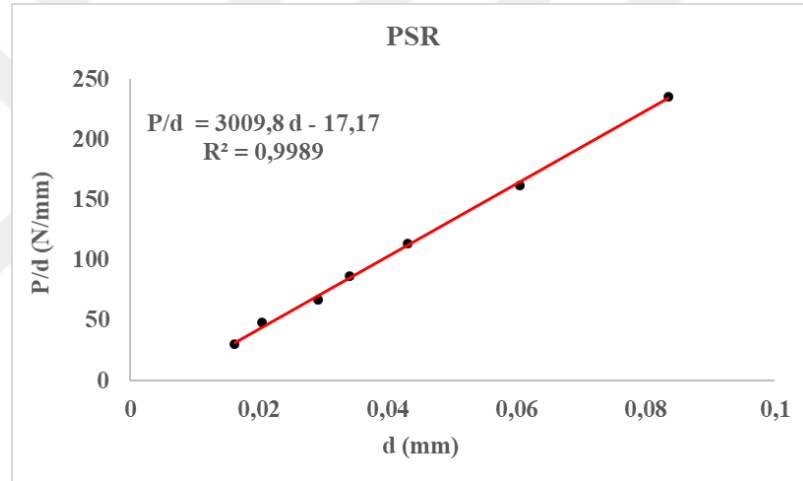
Orantılı numune direnci (PSR) modeli,  $P/d - d$  verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen eşitlikten PSR ortalama  $d$  değerlerinin elde edilmesi esastır. Deney verileri kullanılarak elde edilen bu ilişki Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te sunulmuştur.

Tablo 4.3. Deney çeliklerinin ortalama Hv PSR değerleri

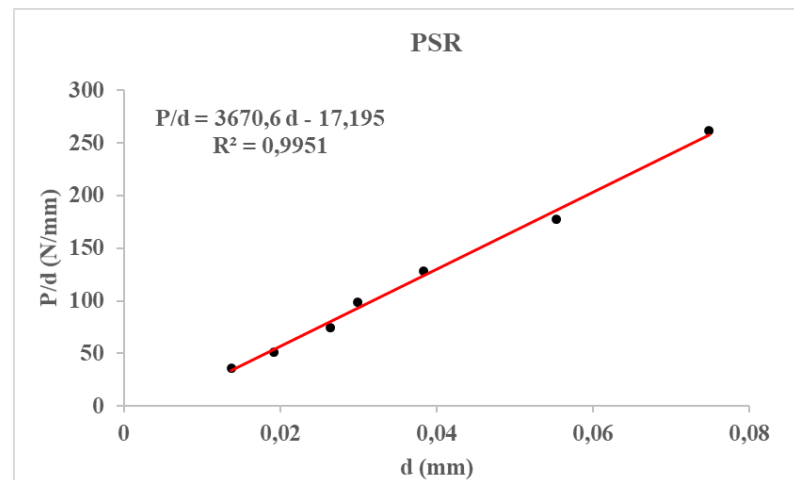
Yük (Gr)	HV PSR ort. (kg/mm <sup>2</sup> )		
	1040	4140	52100
0,05	396	497	548
0,1	434	541	606
0,2	466	577	657
0,3	481	596	682
0,5	499	615	711
1	517	636	742
2	531	652	766



Şekil 4.11. AISI 52100 çeliği PSR modeli grafiği ve sonuçları



Şekil 4.12. AISI 1040 çeliği PSR modeli grafiği ve sonuçları



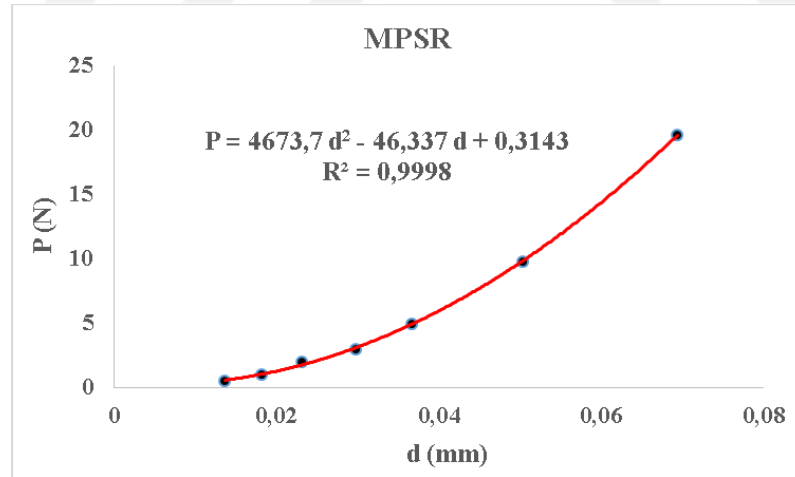
Şekil 4.13. AISI 4140 çeliği PSR modeli grafiği ve sonuçları

#### 4.2.4. MPSR modeli sonuçları

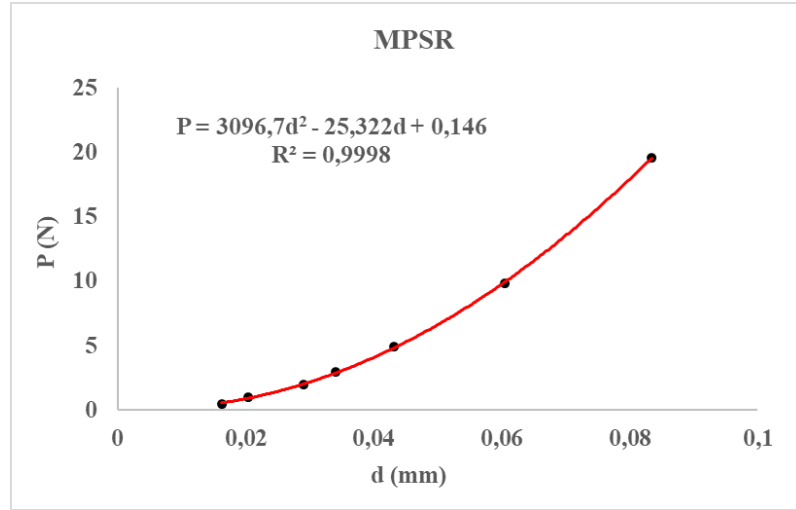
Modifiye edilmiş orantılı numune direnci (MPSR) modeli ise P ve d verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen polinom eşitliğinden MPSR ortalama d değerlerinin elde edilmesi esastır. Deney verileri kullanılarak elde edilen bu ilişki ve veriler Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da sunulmuştur.

Tablo 4.4. Deney çeliklerinin ortalama Hv MPSR değerleri

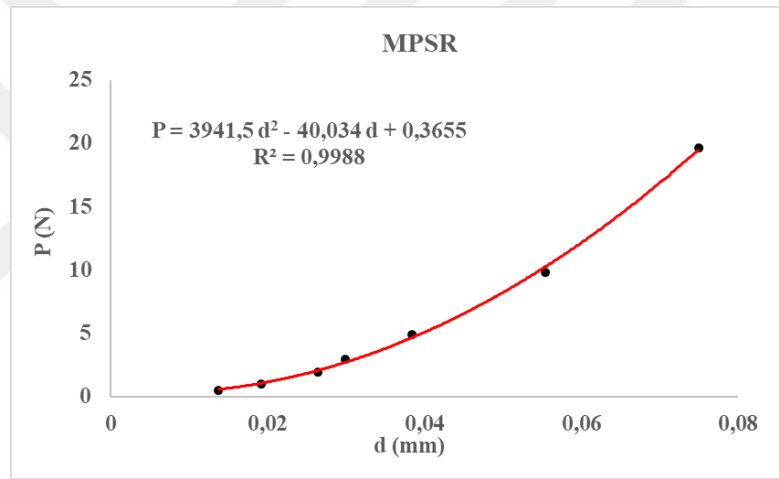
Yük (Gr)	HV MPSR ort. (kg/mm2)		
	1040	4140	52100
0,05	391	578	562
0,1	420	538	580
0,2	452	556	624
0,3	470	573	653
0,5	490	597	689
1	513	629	733
2	532	657	770



Şekil 4.14. AISI 52100 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri



Şekil 4.15. AISI 1040 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri



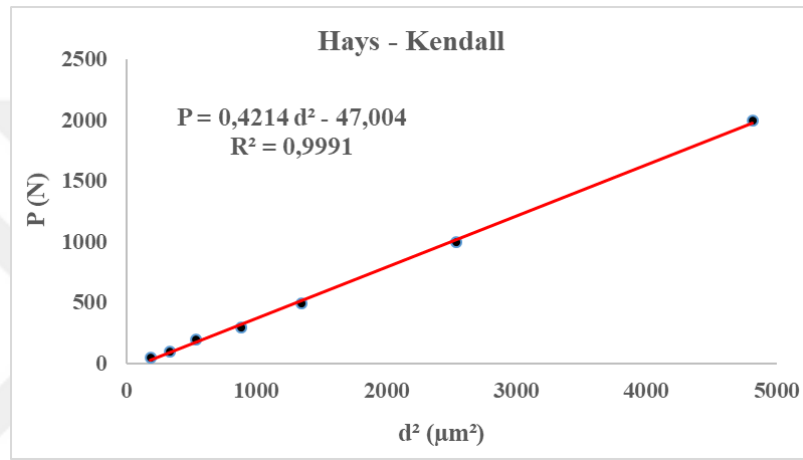
Şekil 4.16. AISI 4140 çeliği MPSR modeli grafiği ve verileri

#### 4.2.5. Hays - Kendall modeli sonuçları

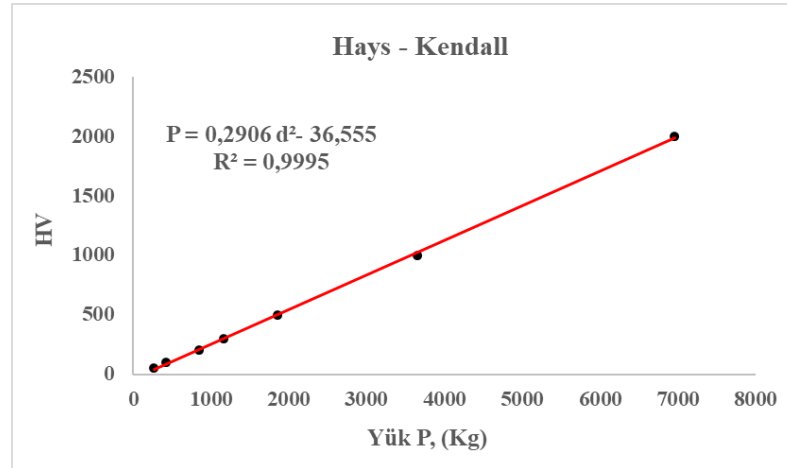
Hays-Kendall modeli P ve  $d^2$  verileri arasındaki ilişkinin korelasyonu sonucu elde edilen eşitlikten Hays-Kendall ortalama d değerlerinin elde edilmesi esastır. Deney verileri kullanılarak elde edilen bu ilişki ve veriler Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da sunulmuştur.

Tablo 4.5. Deney çeliklerinin ortalama Hv Hays-Kendall değerleri

HV Hays-Kendall ort. (kg/mm2)			
Yük (Gr)	1040	4140	52100
0,05	311	388	403
0,1	395	490	532
0,2	456	563	633
0,3	480	593	676
0,5	502	619	714
1	520	640	746
2	529	651	766

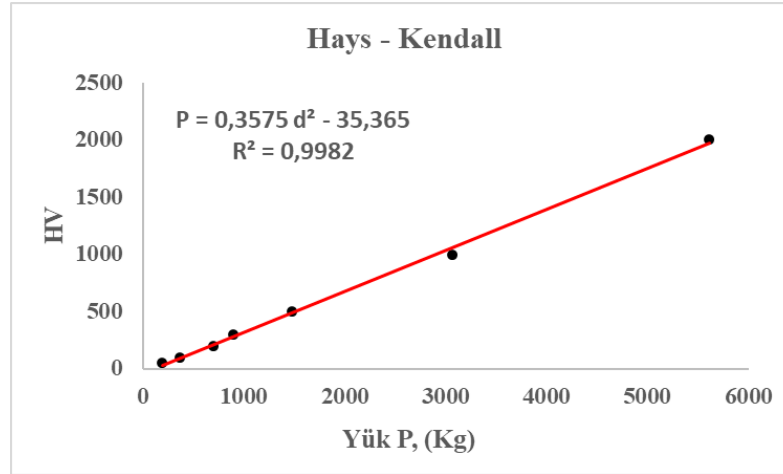


Şekil 4.17. AISI 52100 çeliği Hays - Kendall modeli grafiği ve verileri



Şekil 4.18. AISI 1040 çeliği Hays - Kendall modeli grafiği ve verileri





Şekil 4.19. AISI 4140 çeliği Hays - Kendall modeli grafiği ve verileri

#### 4.2.6. Matematiksel eğri uydurma sonuçları

Literatürdeki genel yaklaşımlardan farklı olarak bu çalışmada deneysel verilerden elde edilen HV-Yük eğrisi için matematiksel eğri uydurma yöntemleri çalışılmıştır. AISI 52100 çeliği ve AISI 1040 çelikleri için en uygun veriler matematiksel eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir.

AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için elde edilen matematiksel eşitlik:

$$HV = a P^b + c \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte, a, b ve c incelenen koşullardaki deney malzemesi sabitleridir. Bu değerler Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Eğri uydurma matematiksel eşitlik katsayıları

Malzeme	a	b	c	R <sup>2</sup>
<b>52100</b>	-353,8	-0,1668	1085	0,9504
<b>1040</b>	-40,03	-0,5287	553,8	0,921
<b>4140</b>	-176,1	-0,2094	809	0,9861

Eşitlik 4.1.'de Tablo 4.6. katsayı verileri kullanılarak her bir yük için HV değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.7.'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Deney çeliklerinin ortalama Hv Eğri uydurma yöntemi değerleri

Yük (Gr)	HV Eğri Uydurma Yöntemi ort. (kg/mm2)		
	1040	4140	52100
0,05	359	479	502
0,1	419	524	566
0,2	460	562	622
0,3	478	582	653
0,5	496	605	688
1	514	633	731
2	526	657	770

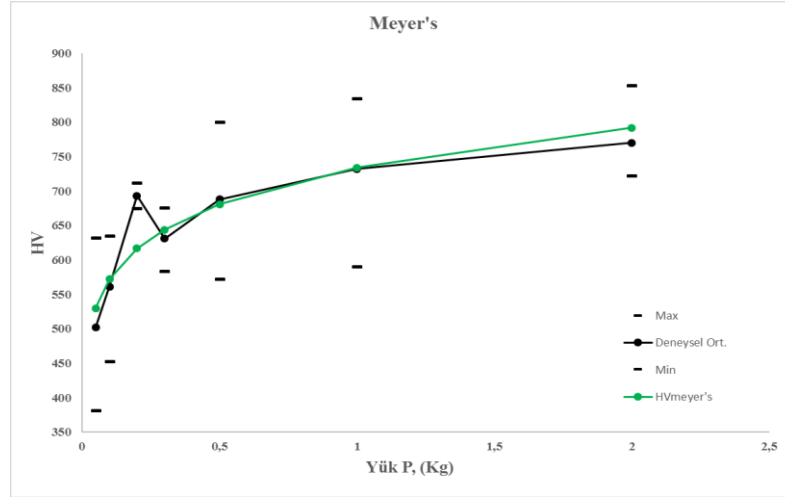
## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Deneysel ve Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

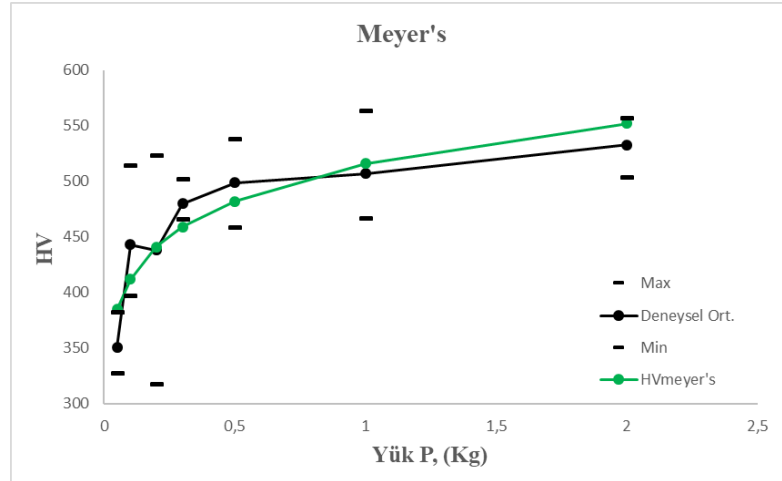
#### 5.1.1. Meyer's yasası deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. verileri kullanılarak elde edilen her bir yük için ortalama d değerleri ile Meyer's HV değerleri hesaplanmış (Tablo 4.2.) ve deneysel eğri ile Meyer's eğrisi Şekil 5.1., Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'te sunulmuştur.

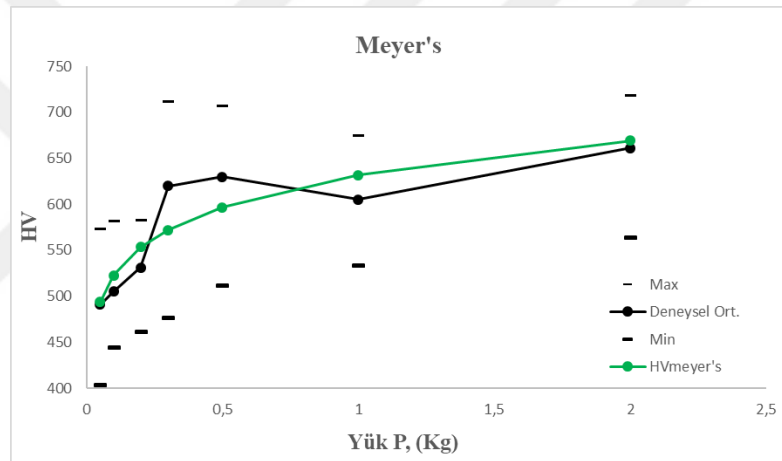
Şekil 5.1., Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'te sunulmuş olan deneysel sonuçlar ile Meyer's modeli sonuçları arasında bir benzerlik görülmektedir. Bu sonuç, deneysel çalışma koşullarındaki AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için HV-Yük ilişkisinin Meyer's modeli ile değerlendirilebileceği genel kanaatini vermektedir.



Şekil 5.1. AISI 52100 çeliği Meyer's ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.2. AISI 1040 çeliği Meyer's ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

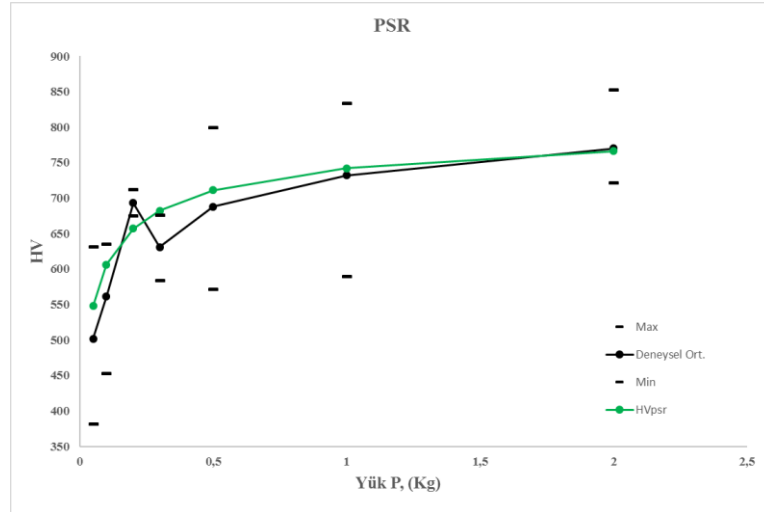


Şekil 5.3. AISI 4140 çeliği Meyer's ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

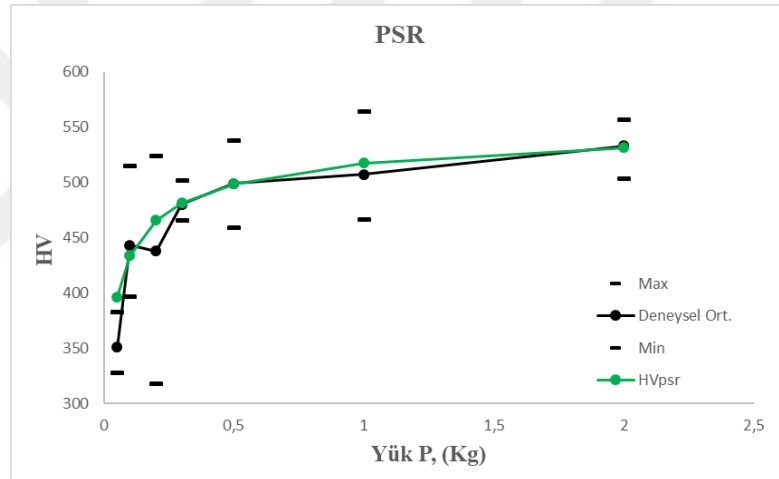
### 5.1.2. PSR modeli deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13. verileri kullanılarak elde edilen her bir yük için ortalama d değerleri ile PSR HV değerleri hesaplanmış (Tablo 4.3.) ve deneysel eğri ile PSR eğrisi Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da sunulmuştur.

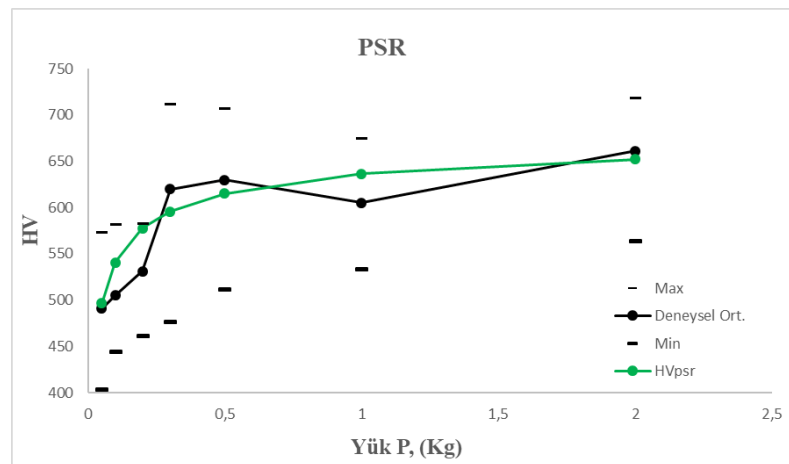
Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da sunulmuş olan deneysel sonuçlar ile PSR modeli sonuçları arasında bir benzerlik görülmektedir. Bu sonuçta, deneysel çalışma koşullarındaki AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için HV-Yük ilişkisinin Meyer's modeli gibi PSR modeliyle de değerlendirilebileceği genel kanaatini vermektedir.



Şekil 5.4. AISI 52100 çeliği PSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.5. AISI 1040 çeliği PSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

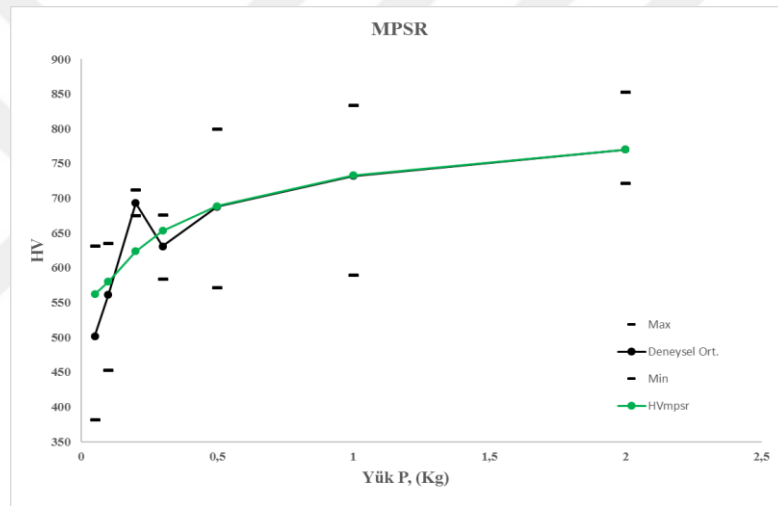


Şekil 5.6. AISI 4140 çeliği PSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

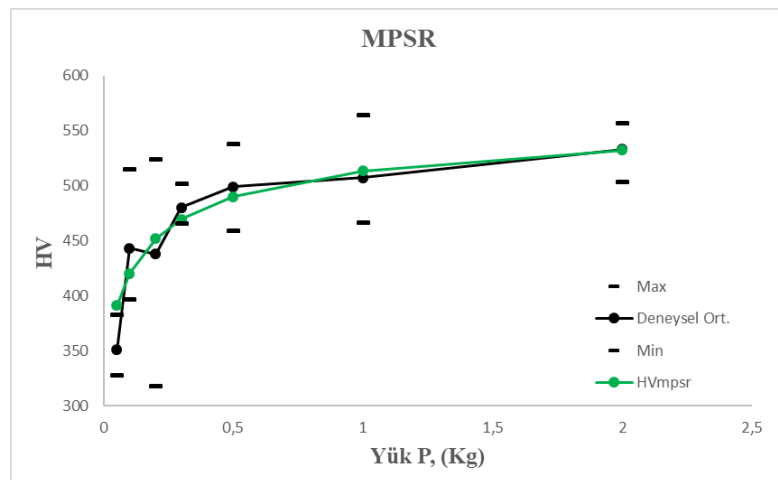
### 5.1.3. MPSR modeli deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16. verileri kullanılarak elde edilen her bir yük için ortalama d değerleri ile MPSR HV değerleri hesaplanmış (Tablo 4.4.) ve deneysel eğri ile MPSR eğrisi Şekil 5.7., Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.'da sunulmuştur.

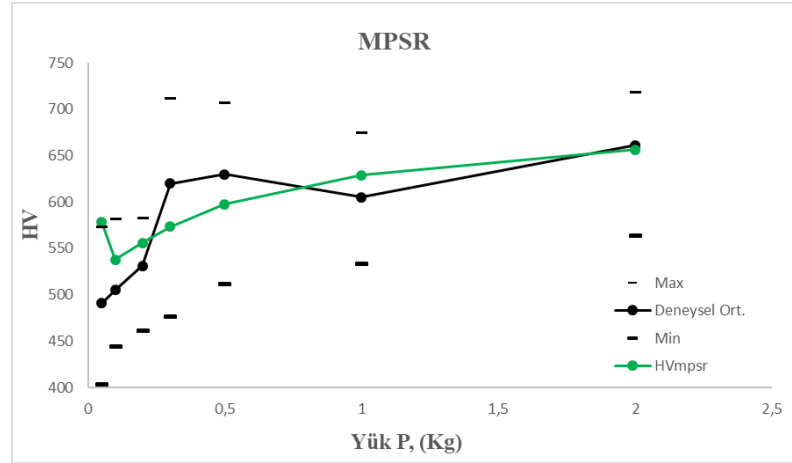
Şekil 5.7., Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.'da sunulmuş olan deneysel sonuçlar ile MPSR modeli sonuçları arasında da benzerlik görülmektedir. Bu sonuçta, deneysel çalışma koşullarındaki AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için HV-Yük ilişkisinin MPSR modeliyle değerlendirilebileceği genel kanaatini vermektedir.



Şekil 5.7. AISI 52100 çeliği MPSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.8. AISI 1040 çeliği MPSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

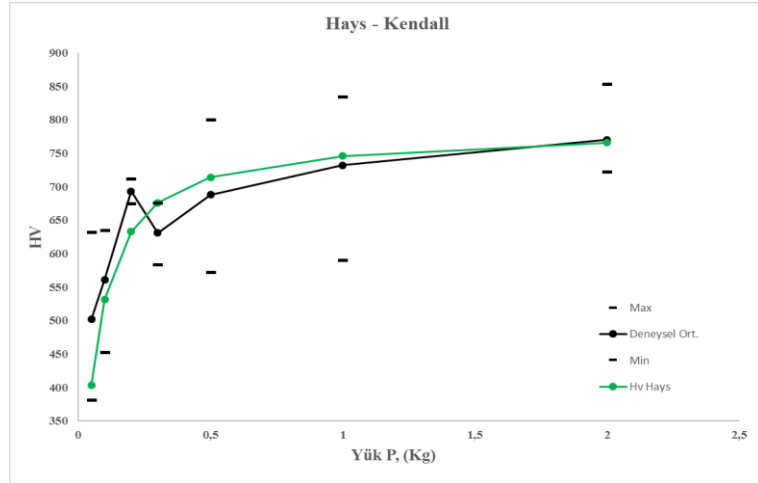


Şekil 5.9. AISI 4140 çeliği MPSR ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

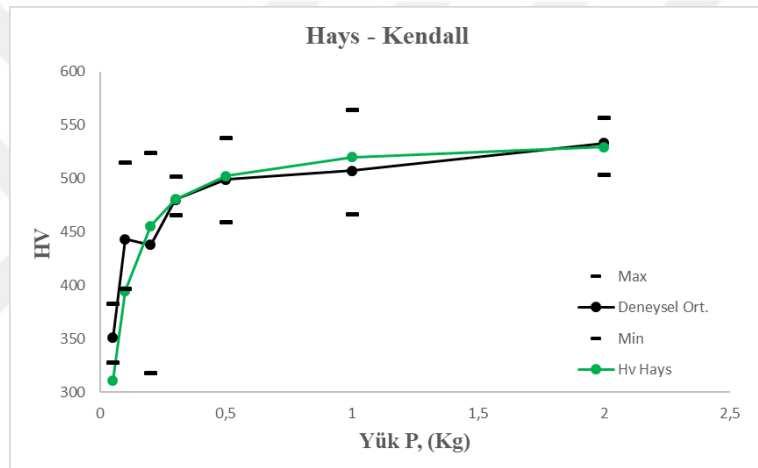
#### 5.1.4. Hays - Kendall modeli deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19. verileri kullanılarak elde edilen her bir yük için ortalama  $d$  değerleri ile Hays-Kendall HV değerleri hesaplanmış (Tablo 4.5.) ve deneysel eğri ile Hays-Kendall eğrisi Şekil 5.10., Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de sunulmuştur.

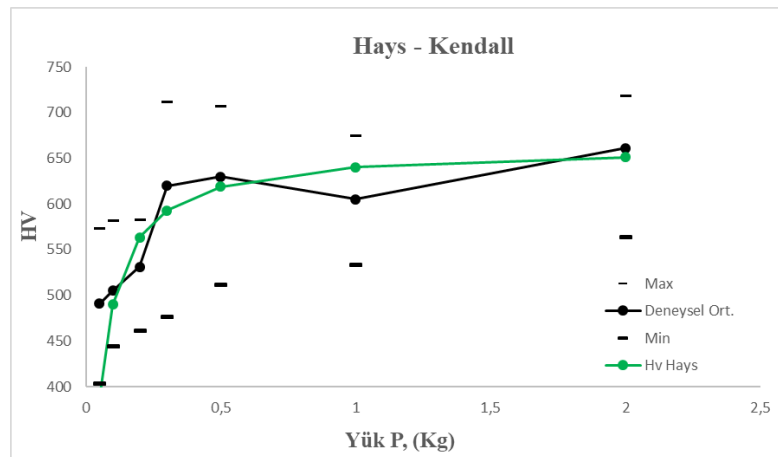
Şekil 5.10., Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de sunulmuş olan deneysel sonuçlar ile Hays-Kendall modeli sonuçları arasında da bir benzerlik görülmektedir. Bu sonuç, deneysel çalışma koşullarındaki AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için HV-Yük ilişkisinin Hays-Kendall modeli ile değerlendirilebileceği genel kanaatini vermektedir. Fakat bu modelin 50 gram sonuçları diğer üç ISE modeli sonuçlarından farklı olarak oldukça küçük ve deney sertlik değerinin de altında değerdir. Diğer üç modelde ise bu yük değeri için model sertlik değerleri deney sonucundan yüksek değerlerdedir.



Şekil 5.10. AISI 52100 çeliği Hays - Kendall ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.11. AISI 1040 çeliği Hays - Kendall ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



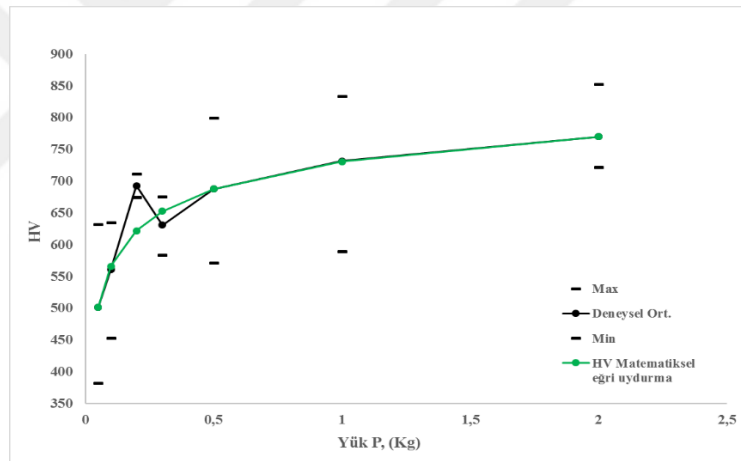
Şekil 5.12. AISI 4140 çeliği Hays - Kendall ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



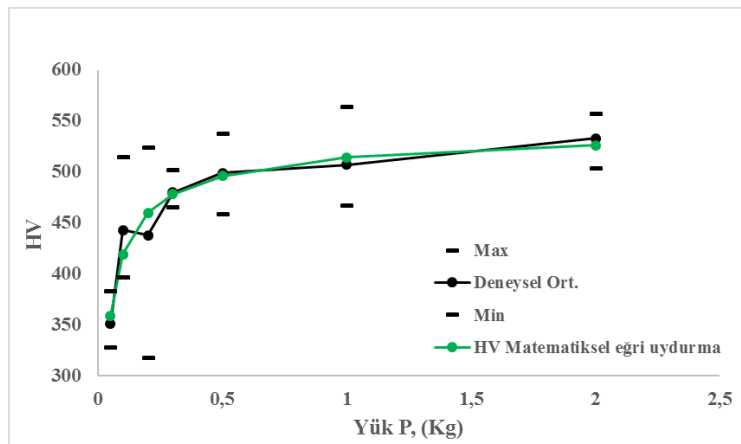
### 5.1.5. Matematiksel eğri uydurma deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Eşitlik 4.1.'de Tablo 4.6. katsayı verileri kullanılarak her bir yük için HV değerleri hesaplanmış (Tablo 4.7.) ve matematiksel eğri uydurma çalışmalarından elde edilen eşitlik sonuçları ve deneysel eğri sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.13., Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'te sunulmuştur.

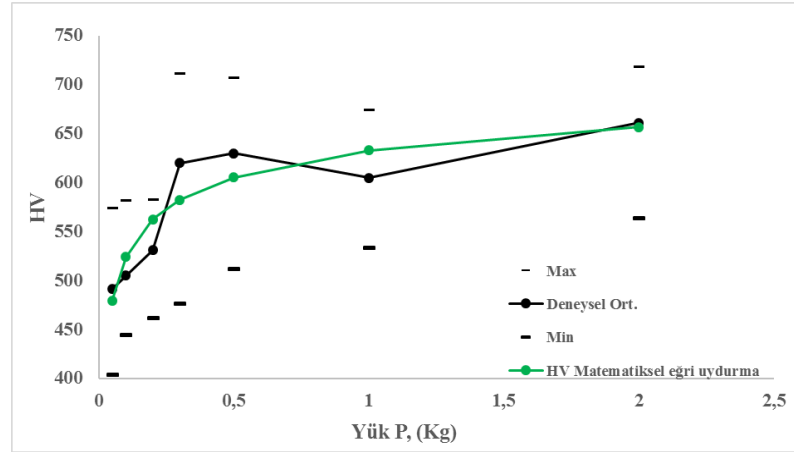
Çalışmada incelenen tüm ISE modellerine nazaran matematiksel modelleme sonuçları AISI 52100 çeliği için çok belirgin bir şekilde 50 gram dahil 2000 grama kadar yük aralığı için deneysel sonuçlar ile aynı denilebilecek (200 ve 300 gram hariç) benzerlikte olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.13. AISI 52100 çeliği Eğri uydurma matematiksel eşitliği ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.14. AISI 1040 çeliği Eğri uydurma matematiksel eşitliği ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 5.15. AISI 4140 çeliği Eğri uydurma matematisel eşitliği ve Deneysel eğri sonuçları karşılaştırma grafiği

## 5.2. Tartışma

Bu çalışmada, AISI 52100, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi ve temperlenmesi sonucu uygulanan yük ile sertlik değerleri değişimi incelenmiştir. Sertlik ölçümleri için Shimadzu HVM-2 mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile oda sıcaklığında 50 gr, 100 gr, 200 gr, 300 gr, 500 gr, 1 kg ve 2 kg test yükleri Şekil 2.6.'da geometrisi verilen uçlar ile her bir numunenin seçilen yüzeylerine 15 sn süre ile yüzeyin farklı noktalarına uygulanmış olup iz ölçümleri kaydedilmiştir. Her bir yük değeri için 5 farklı numune yüzeyinde ölçüm uygulanmış ve ortalama sertlik değerleri kullanılmıştır.

Bu değerler ile elde edilen deneysel sonuç eğrileri iz boyut etkisi modellerinden Meyer's kanunu, PSR, MPSR ve Hays-Kendall ISE modelleri ile karşılaştırılmıştır [20],[24],[25]. Bundan başka deneysel veriler için en uygun matematisel eğri uydurma yöntemi araştırılmıştır.

Araştırmamızın sonuçlarından elde edilen önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- AISI 52100 çeliği için incelenen tüm modellerin ve eğri uydurma matematisel eşitliklerinin, deneysel eğri ile uyumlu bir yönelişe sahip olduğu gözlemlenmiştir.

- b. AISI 52100 çeliği için matematiksel modelleme yöntemi sonuçlarının çok belirgin bir şekilde deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar olduğu (200 ve 300 gram hariç) gözlemlenmiştir.
- c. AISI 1040 çeliği için incelenen tüm modellerin ve eğri uydurma matematiksel eşitliklerinin, deneysel eğri ile uyumlu bir yönelişe sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- d. AISI 1040 çeliği için PSR, MPSR ve matematiksel modelleme yöntemleri sonuçlarının birbirine benzer nitelikte olduğu fakat MPSR modeli sonuçlarının deneysel sonuçlar ile diğer modellere göre daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.
- e. AISI 4140 çeliği için incelenen tüm modellerin ve eğri uydurma matematiksel eşitliklerinin, deneysel eğri ile uyumlu bir yönelişe sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- f. AISI 4140 çeliği için Meyer's, PSR, MPSR model sonuçlarının birbirine benzer nitelikte olduğu fakat MPSR modeli sonuçlarının deneysel sonuçlar ile diğer modellere göre daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] N. Budiarsa, A. Norbury, X. Su, G. Bradley and X. Ren, "Analysis of indentation size effect of Vickers hardness tests of steels," *Advanced Materials Research*, vol. 652-654, pp. 1307-1310, 2013.
- [2] J. Petřík, "The micro-hardness of heat treated carbon steel," *Materials Science (Medziagotyra)*, vol. 20, no. 1, pp. 21-24, 2014.
- [3] J. Petřík, "On the load dependence of micro-hardness measurements: analysis of data by different models and evaluation of measurement errors," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, no. 4, pp. 1819-1824, 2016.
- [4] V. Mares, M. Kraus and A. Podeprelova, "The effect of applied load on hardness of steels," *Materials Science Forum*, vol. 891, pp. 83-88, 2017.
- [5] A. Günen and E. Kanca, "Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu," *Pamukkale Univ. Müh. Bilim Derg.*, vol. 23, no. 4, pp. 411-416, 2017.
- [6] O. Asi, "An investigation of retained austenite contents in carburized in SAE 8620 steel." *G. U. Journal of Science*, vol. 17, no. 4, pp. 103-113, 2004.
- [7] A. Ş. Demirkıran and E. Avcı, "Evaluation of functionally gradient coatings produced by plasma-spray technique," *Surface and Coatings Technology*, vol. 116-119, pp. 292-295, 1999.
- [8] H. Karabulut and M. Türkmen, "Temperleme işleminin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen mikroalaşımli çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi," *mühendislik dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 587-594, Eylül 2016.
- [9] L. 'Curkovi'c, M. Lali'c and S. Šoli', "Analysis of the indentation size effect on the hardness of alumina ceramics using different models," *Kovove Mater.*, vol. 47, pp. 89-93, 2009.
- [10] A. R. Portune and C. D. Hilton, "Quantifying uncertainty in load-hardness relationships," *J Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 4851-4859, 2012.

- [11] E. Dall'Ara, C. Öhman, M Baleani and M Viceconti, "The effect of tissue condition and applied load on Vickers hardness of human trabecular bone," *Journal of Biomechanics*, vol. 40, pp. 3267–3270, 2007.
- [12] M. Garbiak, "Applying mikrohardness yo microstructure analysis," *Chem. Listy*. Vol. 104, pp. 267-270, 2010.
- [13] K. Palaniradja, N. Alagumurthi and V. Soundararajan, "Residual stresses in case hardened materials," *The Open Materials Science Journal*, vol. 4, pp. 92-102, 2010.
- [14] J. Petřík, P. Blaško, J. Bidulská, A. Guzanová and I. Sinaiová, "The automatic testers in microhardness measurement and ISE effect," *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 22, no. 3, pp. 195-205, 2016.
- [15] V. M. Matyunin, A. A. Dubov and A. Yu. Marchenkov, "Scale factor in determining the hardness of metal materials," *Inorganic Materials*, vol. 46, no. 15, pp. 1692–1695, 2010.
- [16] M. G. Loshak and L. I. Aleksandrova, "The effect of the indentation load on the results of measuring hardness of superhard materials," *Journal of Superhard Materials*, vol. 34, no. 5, pp. 305–307, 2012.
- [17] V. Navrátil and J. Novotná, "Some problems of microhardness of metals," *Aplimat – Journal of Applied Mathematics*, vol. 2, no. 3, pp. 241-244, 2009.
- [18] M. M. Renjo, V. Rede and L. Curkovic, "Reverse indentation size effect of a duplex steel," *Kovove Materials*, vol.52, pp. 299-304, 2014.
- [19] E. Karadeniz and M. İşçioğlu, "Uygulanan yükün Vickers sertlik değerlerine etkisi," in *Proc. ICADET'17*, 2017, pp. 2019-225.
- [20] E. Karadeniz and M. İşçioğlu, "AISI AISI 1040 çelikleri için mikro-sertlik uygulanan yük arasındaki ilişkinin incelenmesi," *Technological Applied Science (NWSATAS)*, vol. 13, no. 2, pp. 145-156, 2018.
- [21] M. Bektas, "Fe-Mn Alaşımlarının Mikrosertlik Ölçümleri," *Süleyman Demirel Univ, ISPARTA*, 2004.
- [22] Mott, B.W. , 1956. *Microindentation Hardness Testing*, Butterworhs, London.

- [23] Sangwal, K., 2000. On the reverse indentation size effect and microhardness measurement of solids, *Materials Chemistry and Physics*, 63, 145-152.
- [24] Gong, J., Miao, H., Zhao, Z., Guan, Z., 2001. Load-dependence of the measured hardness of Ti (C,N)-based cermets, *Materials Science and Engineering A303*, 179- 186.
- [25] Sangwal, K., Surowska, B., Blaziak, P., 2003. Relationship between indentation size effect and material properties in the microhardness measurement of some cobalt-based alloys, *Materials Chemistry and Physics* 80, 428-437.
- [26] Quinn, J., B., Quinn, G., D., 1997. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach, *J. Mater. Sci.* 32, s. 4331.
- [27] Lissende, C., J., Colaiuta, J., F., Lerch, B., A., 2004. Hardenig behavior of threemetallic alloys under combined stresses at elevated temprature. *ActaMechanica* 169, 53-77.
- [28] E. S. Kayalı, C. Ensarı, F. Dikeç, "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri," İSTANBUL, 1996.
- [29] Li, H., Bradt, R., C., 1991. Knoop microhardness anisotropy of single-crystal LaB6 *Mater. Sci. Eng.*, A142, 51.

## ÖZGEÇMİŞ

Aykut Argıncıklıgil, 07.06.1989 yılında Sakarya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya’da tamamladı. 2007 yılında Sakarya Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nü 2013 yılında bitirdi. 2013 yılında kurumsal bir firmada makina mühendisi olarak iş hayatına başladı. Çalışma hayatına devam ederken aynı zamanda Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen kurumsal bir firmada makina mühendisi olarak görev yapmaktadır.