



**MAL KAS T (C₄H₆O₅) KATKILI MgB₂
SÜPER LETKEN N N
MEKAN KSEL ÖZELL KLER**

Sadık ERYILMAZ

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Prof. Dr. U ur KÖLEMEN
2015
Her hakkı saklıdır**

T.C
GAZ OSMANPA A ÜN VERS TES
FEN B L MLER ENST TÜSÜ
F Z K ANAB L M DALI

YÜKSEK L SANS TEZ

MAL K AS T (C₄H₆O₅) KATKILI MgB₂ SÜPER LETKEN N N
MEKAN KSEL ÖZELL KLER

Sadık ERYILMAZ

TOKAT

2015

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Uğur KÖLEMEN danışmanlığında, Sadık ERYILMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma 23.12.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr. Telhat ÖZDOĞAN

İmza:

Üye: Prof.Dr. Uğur KÖLEMEN

İmza:

Üye: Doç.Dr. Sertaç ÖZTÜRK

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. M. Ali SAKIN

Enstitü Müdürü

24.12.2015

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyuldu unu, ba kalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunuldu unu, tezin içerdi i yenilik ve sonuçların ba ka bir yerden alınmadı ını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadı ını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya ba ka bir üniversitedeki ba ka bir tez çalı ması olarak sunulmadı ını beyan ederim.

Sadık ERYILMAZ

ÖZET

Y.Lisans Tezi

MALİK ASİT ($C_4H_6O_5$) KATKILI MgB_2 SÜPER LETKENİNİN MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİ

Sadık ERYILMAZ

Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur KÖLEMEN

Bu çalışmada farklı miktarlarda (0, %2 ve %4) Malik asit içeren MgB_2 süperiletkeni katıhal tepkime metodu kullanılarak üretildi. Numunelerin mekaniksel özellikleri Berkovich uçlu ultra dinamik nano çentik testi kullanılarak karakterize edildi. 100, 200, 300, 400 ve 500 mN yükler uygulanarak çentme testlerinden yük-girme derinliği ve rileri elde edildi ve daha sonra mekaniksel özelliklerin (sertlik ve elastisite modülü) belirlenmesi için Oliver-Pharr yaklaşımı kullanıldı. Çentik deneylerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerlerinin yükün artması ile birlikte azaldığı eklemlinde yüke bağlı bir davranış gösterdiği tespit edildi. Malzemelerin gerçek sertlik değerleri Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci (GOND) modeli ile hesaplandı. Malzemelerin gerçek sertlik değerleri sırasıyla, katkısız MgB_2 , %2 katkılı MgB_2 ve %4 katkılı MgB_2 için, 1.15 GPa, 1.98 GPa ve 1.66 GPa bulundu. Malik asit ($C_4H_6O_5$) katkısı ile birlikte sertlik ve indirgenmiş elastisite modülü değerlerinde bir artış gözlemlendi. İndirgenmiş elastisite modülü değerleri sırasıyla, katkısız MgB_2 , %2 katkılı MgB_2 ve %4 katkılı MgB_2 için, 35.4-24.27 GPa, 62.37-52.22 GPa ve 52.37-34.13 GPa aralıklarında elde edildi. Elde edilen sonuçların literatürde diğer yöntemlerle üretilen malzemelerin sertliklerine göre daha düşük olduğu ve böylece bu çalışmada üretilen malzemelerin esnek olmalarını gerektiren tel, erit ve ince film gibi malzemelerin üretiminde kullanılmasının uygun olduğu önerilebilir. Ayrıca, yük-girme derinliği ve rilerinden yapılan hesaplamalar sonucunda MgB_2 numunesinin iç sürtünme miktarlarının Malik asit miktarının artması ile birlikte arttığı gözlemlendi. İlk ve 14'üncü döngüler arasında elde edilen iç sürtünme değerleri katkısız MgB_2 için 0.0256' dan 0.0067' e, %2 katkılı MgB_2 için 0.0432' den 0.0143' e ve %4 katkılı MgB_2 için 0.0444' den 0.0161' e kadar değişmiştir.

2015, 86 sayfa

Anahtar Kelimeler: Süperiletken, MgB_2 , Nanoçentme, GOND Modeli, Mekaniksel Özellikler, Malik Asit.

ABSTRACT

THE MECHANICAL PROPERTIES OF MgB₂ SUPERCONDUCTOR WITH MALIC ACID (C₄H₆O₅) ADDITION

Sadık ERYILMAZ

Gaziosmanpa a University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. U ur KÖLEMEN

In this research, MgB₂ superconductors including different amount of malic acid (0, 2 and 4 wt.%) were prepared by using solid state method. Mechanical properties of the samples were characterized by using a dynamic ultra nano indentation test with Berkovich tip. The load-penetration depths with the loads of ranging 100, 200, 300, 400 and 500 mN were obtained from the indentation tests, and then analyzed using Oliver-Pharr approach in order to determine the mechanical properties, namely hardness and reduced elastic modulus. The indentation experiments revealed that the hardness and reduced elastic modulus exhibited peak-load dependence, in other words, decreased with increasing load. The true hardness values were calculated by Modified Proportional Specimen Resistance (MPSR) Model. The true hardness values were found to be 1.15GPa, 1.98GPa and 1.66 GPa for undoped MgB₂, doped MgB₂ with 2% and 4% malic acid, respectively. It was also observed that the change of indentation hardness and reduced elastic modulus values showed an increasing trend with Malic Acid (C₄H₆O₅) addition. Elasticity modulus values were obtained between 35.4-24.27 GPa, 62.37-52.22 GPa and 52.37-34.13 GPa for undoped MgB₂, doped MgB₂ with 2% and 4% malic acid, respectively. The obtained results of hardness values were lower than those obtained using other models in the literature to produce materials, thus, the produced materials in this study could be suggested that they are useful in producing materials such as wire, tape, and thin film required being flexible. Moreover, we found that internal friction of the MgB₂ samples, which was calculated from load-penetration depth, increased with increasing amount of malic acid. Internal friction values obtained through the first to 14th cycle ranged from 0.0256 to 0.0067 for undoped MgB₂, 0.0432 to 0.0143 for doped MgB₂ with 2% and 0.0444 to 0.0161 for 4% malic acid.

2015, 86 pages

Keywords: Superconductor, MgB₂, Nano indentation, MPSR Model, Mechanical properties, Malic Acid.

ÖNSÖZ VE TE EKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince tez çalışmamı yapmamı oldu u katkılarında ve desteklerinden dolayı hiçbir şekilde ilgisini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Uur KÖLEMEN' e en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans çalışmamdaki numuneleri üreten Karadeniz Teknik Üniversitesinde Öretim üyesi olarak görev yapan Yrd. Doç. Dr. Burcu AVA KAN' a ve Bülent Ecevit Üniversitesinde Öretim üyesi olarak görev yapan Yrd. Doç. Dr. Ezgi Taylan KOPARAN' a teşekkür ederim. Bu çalışmada, TÜB TAK tarafından desteklenen 113T008 nolu proje kapsamında elde edilen numuneler kullanılmıştır.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca SEM ölçümlerinin alınmasını sağlayan Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Orhan UZUN' a ve Uzman Cengiz TEMİZ' e teşekkür ederim.

Lisansüstü çalışmam boyunca görüşlerinden yararlandığım ve bana her konuda yardımcı olan hiçbir zaman ilgisini esirgemeyen bölümümüz elemanlarından çalışmamı Arş. Gör. Dr. Fikret YILMAZ' a ve Uzman Dr. Semra ERGEN' e teşekkür ederim.

Son olarak, yüksek lisans öğrenimi boyunca göstermiş oldukları ilgiden dolayı ev arkadaşlarıma ve hayatımın tüm amaçlarında maddi, manevi desteklerini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen babama, anneme ve kız kardeşime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Sadık ERYILMAZ

Aralık, 2015

Ç NDEK LER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
Ç NDEK LER	iv
S MGELER VE KISALTMALAR D Z N	vi
EK LLER D Z N	ix
Ç ZELGELER D Z N	xii
1. G R	1
2.KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Süperiletkenlik	7
2.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri.....	7
2.2.1. Kritik Sıcaklık (T_c)	7
2.2.2.Kritik Manyetik Alan (H_c)	8
2.2.3. Kritik Akım Yo unlu u (J_c)	9
2.3. I ve II. Tip Süperiletkenler	10
2.4. MgB_2 'nin Kristal Yapısı	12
2.5. Mekaniksel Özellikler.....	13
2.5.1. Sertlik.....	14
2.5.1.1.Vickers Sertli i	14
2.5.1.2.Brinell Sertli i.....	15
2.5.1.3. Rockwell Sertli i	16
2.5.1.4. Knoop Sertli i.....	17
2.5.1.5. Berkovich Sertli i	18
2.5.2. Elastisite Modülü	19
2.5.3. ç Sürtünme Katsayısı (S).....	20
2.5.4. Yı lma (pile-up) ve Çökme (sink-in) Davranı ları	21
2.6. Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Deneyel Yöntem.....	22
2.6.1. Derinlik Duyarlı Çentik Testi (DDÇ)	22
2.6.2. Çentik Boyut Etkisi (ÇBE) ve Sebepleri	25

Sayfa

2.7. Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Teorik Yöntemler	27
2.7.1. Oliver-Pharr Metodu	27
2.7.2. Meyer's Kanunu	30
2.7.3. Hays-Kendal Yaklaşımı	30
2.7.4. Elastik/Plastik Deformasyon Modeli	31
2.7.5. Orantılı Numune Direnci (OND) Modeli (Proportional Specimen Resistance; PSR)	32
2.7.6. Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci (GOND) Modeli	33
2.7.7. Enerji Yaklaşımı Modeli	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM	36
3.1. Numunelerin Üretilmesi	36
3.2. Malzemelerin Hazırlanması ve Parlatılması	36
3.3. Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi	38
3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	40
3.5. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
4.1. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri	42
4.2. SEM Analizleri	44
4.3. Mekanik Karakterizasyon (Nanoçentme Analizi)	46
4.4. Çevrim (cycle) Testi Analizi	59
5. SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
T_c	Kritik sıcaklık
J_c	Kritik akım yoğunluğu
H_c	Kritik magnetik alan
H_{c1}	Alt kritik magnetik alan
H_{c2}	Üst kritik magnetik alan
Hg	Cıva
Pt	Platin
Gd	Gadolinyum
La	Lantan
Ba	Baryum
(a,c)	Örgü parametreleri
K	Kelvin
R	Direnç
M	Mıknatıslanma Özdirenç
Mg	Magnezyum
B	Bor
C	Karbon
E	Elastite Modülü
H_v	Vickers sertlik değeri
H_B	Brinell sertlik değeri
H_{BE}	Berkovich sertlik değeri
H_K	Knoop sertlik değeri
d	zincin köşegen uzunluğu
D	Bilya Çapı
h_p	Plastik derinlik, (Kontakt derinliği)
P	Uygulanan yük
E_T	İndirgenmiş elastiklik modülü

Simge	Açıklama
ν	Poisson oranı
	Konik uç için geometrik sabit
H	Malzemenin sertliği
S	Ç Sürtünme Katsayısı
S	Kontakt katılığı
δP	Yükteki artı
δh	Yer de i tirmedeki artı
A_c	Kontakt alanı
n	Meyer üssü (index)
W	Numunede kalıcı deformasyon oluşurabilmesi için gerekli minimum yük
P_{maks}	Uygulanan maksimum yük
h_c	Kontakt derinliği
H_{HK}	Hays- Kendall yaklaşımı için yükten bağımsız sertlik değeri
H_{EP}	Elastik/Plastik deformasyon modeli için yükten bağımsız sertlik değeri
h_o	Elastik geri kazanımdan dolayı h_c 'ye eklenen düzeltme terimi
k	Çentici geometrisine bağlı sabit
h	Yükün uygulandığı herhangi bir andaki toplam yer de i tirme
h_s	Kontakt çevresindeki yüzeyin yer de i tirmesi
ϵ	Konik uç için geometrik sabit

Kısaltmalar	Açıklama
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
ÇBE	Çentik Boyut Etkisi
DDÇ	Derinlik Duyarlı Çentik Testi
EMK	Elektromotor kuvvet
FC	Alan So utma
OND	Orantılı Numune Direnci
GOND	Geli tirilmi Orantılı Numune Direnci
PSR	Orantılı Numune Direnci
MPSR	Geli tirilmi Orantılı Numune Direnci
H_{PSR}	Orantılı numune direnci modeli için yükten ba ımsız sertlik de eri
H_{MPSR}	Düzeltilmi orantılı numune direnci modeli için yükten ba ımsız sertlik de eri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TÇBE	Ters Çentik Boyut Etkisi
SPM	Taramalı Uç Mikroskobu
XRD	X-I ını Kırınımı
ZFC	Sıfır Alan So utma

EKLER DİZİNİ

Sayfa

ekil 1.1.	Hg metalinin direnç-sıcaklık e risi.....	1
ekil 1.2	Süperiletkenin manyetik alana kar ı davranı	2
ekil 2.1.	Süperiletken ve süperiletken olmayan iki malzeme için direncin sıcaklıkla de i imi.....	8
ekil 2.2.	Kritik H_c alanının sıcaklıkla de i imi.....	9
ekil 2.3.	Süperiletkenlik için faz diyagramı.....	10
ekil 2.4.	I. tip (a) ve II. tip (b) süperiletkenlerin mıknatıslanma e rileri ve I. tip (c) ve II. tip (d) süperiletkenlerin faz diyagramları.....	11
ekil 2.5.	MgB_2 süperiletkenin kristal yapısı.....	12
ekil 2.6.	Vickers çentici ve izin diagonal boyu.....	15
ekil 2.7.	(a) Brinell çentici (b) zin çapı.....	16
ekil.2.8.	Rockwell çentisinin ematik gösterimi.....	17
ekil 2.9.	Knoop çentisinin ematik gösterimi.....	17
ekil 2.10.	Berkovich çentisinin geometrisi.....	18
ekil 2.11.	Çekme etkisinde eksenel ve yanal ekil de i tirme.....	19
ekil 2.12.	Vickers çentici ile yapılan bir çentik testinde a) kusursuz plastik deformasyon b) yı lma ve c) çökme davranı ı.....	21
ekil 2.13.	Tipik bir çentme testi için a) Yükleme profili b) Yük-yer de i tirme e risi.....	23
ekil 2.14.	Elastiklikteki farklılıkları gösteren yük yerde i tirme e rileri a) deal elastik b) Elasto-plastik c) Katı plastik numune.....	23
ek 2.15.	Mikrosertli in test yüküne göre de i imi.....	26
ekil 2.16.	(a) Çenti in yatay kesiti (b) Oliver-Pharr metodunda kullanılan yük-yer de i tirme e risinin ematik gösterimi.....	28
ekil 2.17.	ematik P-h e risi üzerinde W_T , W_P , W_E enerjilerinin gösterimi.....	34
ekil 3.1.	Kullanılan kalıp malzemeleri ve kalıplanmı numune örne i.....	37
ekil. 3.2.	Parlatma cihazı.....	38
ekil 3.3.	Nano-çentik test cihazı (UMT/NH-2, Bruker).....	39
ekil 3.4.	Taramalı elektron mikroskobu.....	40

Sayfa

ekil 3.5.	X-1 inleri difraktometresi.....	41
ekil 4.1.	X-1 inleri kırınım desenleri.....	43
ekil 4.2.	Katkısız (a,b), %2 Malik asit katkılı (c,d), %4 Malik asit katkılı (e,f) MgB ₂ numunelerine ait dü ğük (500X) ve yüksek büyötmelerde (2500X) alınan SEM görüntüleri.....	45
ekil 4.3.	Katkısız MgB ₂ numunesinin 100 mN yük-yer de i tirme e risi.....	46
ekil 4.4.	Katkısız MgB ₂ numunesinin 200 mN yük-yer de i tirme e risi.....	47
ekil 4.5.	Katkısız MgB ₂ numunesinin 300 mN yük-yer de i tirme e risi.....	47
ekil 4.6.	Katkısız MgB ₂ numunesinin 400 mN yük-yer de i tirme e risi.....	48
ekil 4.7.	Katkısız MgB ₂ numunesinin 500 mN yük-yer de i tirme e risi.....	48
ekil 4.8.	%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 100 mN yük-yer de i tirme e risi.....	49
ekil 4.9.	%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 200 mN yük-yer de i tirme e risi.....	49
ekil 4.10.	%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 300 mN yük-yer de i tirme e risi.....	50
ekil 4.11.	%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 400 mN yük-yer de i tirme e risi.....	50
ekil 4.12.	%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 500 mN yük-yer de i tirme e risi.....	51
ekil 4.13.	%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 100 mN yük-yer de i tirme e risi.....	51
ekil 4.14.	%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 200 mN yük-yer de i tirme e risi.....	52
ekil 4.15.	%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 300 mN yük-yer de i tirme e risi.....	52
ekil 4.16.	%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 400 mN yük-yer de i tirme e risi.....	53
ekil 4.17.	%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin 500 mN yük-yer de i tirme e risi.....	53
ekil 4.18.	Sertli in yüke ba lı de i imi.....	54
ekil 4.19.	ndirgenmi elastisite modölünün yüke ba lı de i imi.....	55
ekil 4.20.	Katkısız MgB ₂ numunesine ait P-h _c ' göre grafi i.....	57

Sayfa

ekil 4.21. %2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesine ait P-h _c ' göre grafi i.....	58
ekil 4.22. %4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesine ait P-h _c ' göre grafi i.....	58
ekil 4.23. Katkısız MgB ₂ numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük-yer de i tirme e risi.....	60
ekil 4.24. %2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük-yer de i tirme e risi.....	61
ekil 4.25. %4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük-yer de i tirme e risi.....	61
ekil 4.26. Katkısız MgB ₂ numunesine ait 1'inci ve 14'üncü çevrimlerinden olu an ilmek alanlar.....	62
ekil 4.27. Katkısız, %2 ve %4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunelerine ait iç sürtünme katsayısı de erleri.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

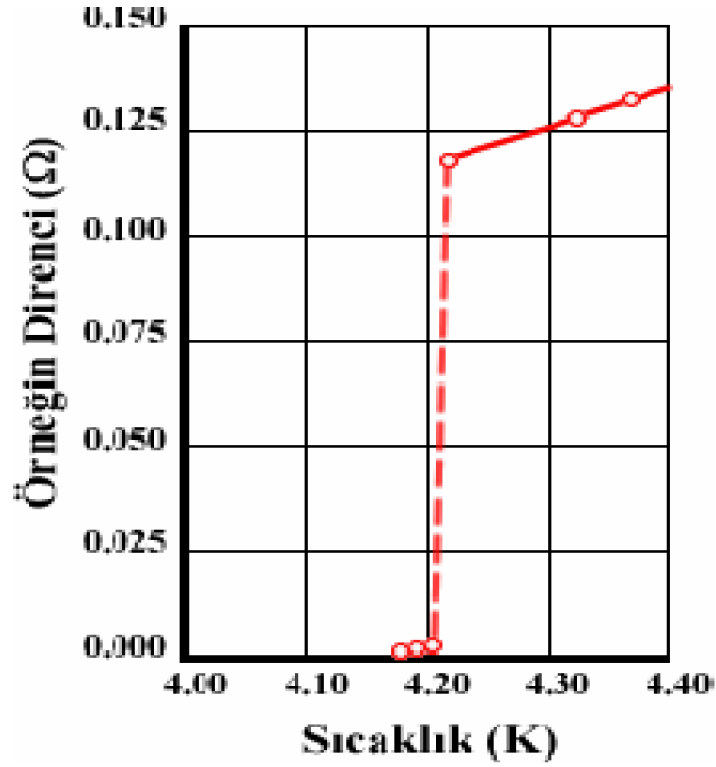
Sayfa

Çizelge 4.1. Katkısız, %2 ve %4 Malik Asit katkılı MgB ₂ tabletlerinin örgü parametreleri, örgü parametrelerinin oranları, hücre hacimleri ve yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) değerleri.....	43
Çizelge 4.2. Katkısız ve malik asit katkılı MgB ₂ numunelerine ait sertlik ve elastisite modülü değerleri.....	56
Çizelge 4.3. Literatürden alınmış farklı numunelere ait sertlik ve elastisite modülü değerleri.....	59

1. G R

Süperiletkenlik, 1911 yılında H. Kamerlingh Onnes ve arkadaşları tarafından keşfedilmiştir ve özellikle belli iletkenlerin (Pt, Hg) sıfır DC elektriksel direnç göstermesiyle açıklanmıştır (Onnes, 1911).

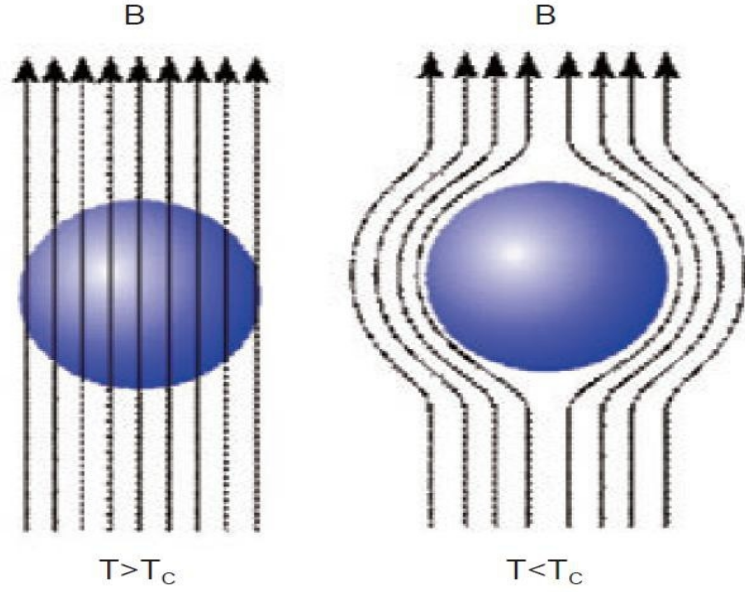
Onnes, 1911 yılında civa (Hg) metali ile yaptığı bir çalışmada, 4.2 °K'de civa metali direncinin aniden sıfıra düştüğünü gözlemlemiştir (ekil 1.1). Bu durum süperiletkenlik olarak adlandırılmıştır.



ekil 1.1. Hg metalinin direnç-sıcaklık eğrisi

Süperiletkenliği belirleyen iki belirleyici özellik vardır. Bunlar sıfır direnç ve diamanyetik özelliklerdir. Sıfır direnç özelliği, devrede elektrik akımının ilke olarak kayıpsız akmasıdır. Normal bir metalde, örgüden saçılma ve örgü kirliliği gibi nedenlerden dolayı iletim elektronlarına karşı direnç oluşur. Buna karşılık süperiletken malzemelerde elektronlar çiftler olarak örgüden saçılmadan yük taşıdıkları teorik ve deneysel olarak açıklanmıştır (Borden ve ark., 1957).

Süperiletkenler aynı zamanda ideal diamanyetik özellik göstererek manyetik alanı dışarılarlar. W. Hans Meissner ve Robert Ochsenfeld 1933 yılında yaptıkları çalışmada, süperiletkenlerin manyetik özelliklerini incelediler ve manyetik alanda soğutulmuş süperiletkenin, kritik sıcaklık (T_c) altında manyetik akıyı dışarıladığını buldular (Meissner ve Ochsenfeld, 1933).



ekil 1.2. Süperiletkenin manyetik alana karşı davranışı

Süperiletkenliğin kefinden günümüze kadar bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde yüksek sıcaklık süperiletkenleri kefedilmeye başlanmıştır. J. G. Bednorz ve K.A. Müller (Bednorz ve Müller, 1986) tarafından 1986 yılında, ilk yüksek sıcaklık süperiletkeni olan LaBaCuO (LBCO) sisteminde $40 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de süperiletkenliğe ulaşıldığından sonra, özellikle oksit süperiletkenler üzerinde çalışmalar hız kazanmıştır. M.K. Wu ve arkadaşları, 1987 yılında YBaCuO (YBCO) sisteminde $90 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de süperiletkenliğe ulaşmışlardır. 1988 yılında H. Maeda ve arkadaşları (Maeda ve ark., 1988) tarafından, $110 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de BiSrCaCuO (BSCCO) ve aynı yılda Sheng ve arkadaşları (Sheng ve ark., 1988) tarafından, $125 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de TlBaCaCuO (TBCCO) sistemlerinin, süperiletken özellik gösterdikleri gözlenmiştir. 1993 yılında, Putilin ve arkadaşları (Putilin ve ark., 1993) tarafından, en yüksek geçiş sıcaklığına sahip olan, HgBaCaCuO (HBCCO) sisteminde $134 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de süperiletkenliğe ulaşılmıştır (Ate 2001).

Veerender ve ark., (1994), $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ süperiletkeninin mekaniksel özellikleri (sertlik ve elastite modülü) üzerine ara tırma yapımı lardır. Numune üzerine Pb katkısının ($x=0; 0,1; 0,25; 0,3; 0,35$ ve $0,4$) etkisini incelemi lerdir. Ara tırmalar sonucunda katkı miktarı ile birlikte sertli in belirgin bir ekilde arttı nı gözlemleni lerdir.

Uzun ve ark., (2005), farklı pik yükleri altında ($0,49; 0,73; 0,98$ ve $1,22$ N) polikristal YBaCuO süperiletken malzemesi üzerinde derinlik duyarlı Vickers çentme deneyleri yapımı lardır. Elde ettikleri yük-yerde i tirme e rilerini kullanarak bu malzemelerin mekaniksel özelliklerini (elastiklik modülü ve sertlik) analiz etmi lerdir. Analizlerinde kontak katlı nı düzelterek, enerji-denge modeli ile yükten ba ımsız sertlik ve elastiklik modülü de erlerini elde etmi lerdir.

Kölemen ve ark., (2006), $\text{Bi}_{1,6}\text{Pb}_{0,4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2-x}\text{Sm}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x=0,0; 0,001; 0,005$ ve $0,1$) süperiletken malzemelerini katıhal tepkimesi yöntemi ile elde etmi lerdir. Çalı malarında sertlik de erlerinin artan yük miktarı ile birlikte eksponansiyel olarak azalan bir davranı gösterdi ini tespit etmi lerdir. Gözlenen Çentik Boyut Etkisi (ÇBE) davranı nın analizini yapmak ve gerçek sertlik de erini bulabilmek için Kick yasası, Hays-Kendall yakla ımı ve Geli tirilmi Orantılı Numune Direnci (GOND) modelini kullanımı lardır. Bu incelemeler sonucunda, BSCCO süperiletkeninin gerçek sertli inin bulunması için en uygun modelin GOND modeli oldu nu ortaya koymu ladır.

Kölemen ve ark., (2006), derinlik duyarlı Vickers çentme deneylerini kullanarak yaptıkları çalı mada, MgB_2 süperiletken numunesinin yük-yer de i tirme e rilerini Oliver-Pharr (1992) metodu ile analiz etmi lerdir. Sertlik ve elastik modüllerinin yüke ba lı olarak de i ti ini gözlemi lerdir. Ayrıca, farklı yüklerdeki h_f/h_m (h_f : son derinlik h_m ; maksimum derinlik) de erlerinin ortalamasını literatürde verilen kritik de erden ($0,7$) daha dü ük olarak bulmu lar ve buna göre MgB_2 numunesinin çökme (sink-in) davranı ı gösterdi ini ortaya koymu lardır.

Uzun ve ark., (2008), MgB_2 süperiletkeninin yük-yer de i tirme e rilerinin üzerine analizler yapımı lardır. Ara tırmalarında, enerji modeli ile Oliver-Pharr modeli arasında kar ıla tırma yaparak malzemenin do ru sertli ini tespit etmi ler ve ayrıca malzemeyi karakterize edecek bazı enerji sabitleri ortaya koymu lardır.

Uzun ve ark., (2008), MgB_2 süperiletkenlerinde 300 'den 1500 mN'a kadar de i en aralıktaki yükleri uygulayarak oda sıcaklı ında Vicker's mikro iz testlerini

yaptılar. Yük-girme derinliği ölçmeleri ve enerji datalarını mekanik özelliklerini belirlemede kullandılar. Sertlik ve elastik modül değerleri Oliver-Pharr modeli ile oldukça uyum içerisinde olduğunu rapor ettiler.

Aydın ve ark., (2009), $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_3\text{Gd}_x\text{O}_y$ süperiletken numunelere $x = 0.0, 0.1, 0.3$ ve 0.5 olmak üzere Gd katkısı yaparak Vickers sertliğinin (H_v) yük bağımsız olduğunu rapor ettiler. Yükten bağımsız (gerçek) mikrosertlik değerlerini Kick's kanunu, Orantılı Numune Direnci (OND) modeli, Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci (GOND) modeli ve Hays-Kendall yaklaşımıyla inceledi ve sonuçlarını karşılaştırdı. Sonuç olarak Gd katkısının süperiletkenlik ve mekanik özellikleri üzerine etkisini rapor etti.

Karaca ve ark., (2009), BSCCO süperiletkenlerine Zn ilavesinin etkilerini mikrosertlik ölçüm yöntemi ile mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırdılar. Mikro sertlik ölçümlerinin deneysel sonuçlarını Oliver-Pharr modeli ile incelediler. Yapılan inceleme sonucunda Zn ilavesinin artış miktarına bağlı olarak iz boyutu etkisini gösterdiğini rapor ettiler..

Savaşkan ve ark., (2014), Hacimsel (Bulk) MgB_2 numunesine farklı miktarlarda malik asit katkısı ($a = \%0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15$) yaparak kaldırma kuvvetinin etkisini incelemişlerdir. Örneklerin hepsi, magnezyum tozu, amorf bor tozu, malik asit ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$), ve toluen kullanılarak, katı hal tepkime metodu ile hazırlanmıştır. Sıfır alan soğutma (ZFC) ve alan soğutma (FC) rejimleri için, yatay ve dikey kaldırma kuvveti ölçümleri farklı ($24, 28$ ve 32 °K) sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Uygun malik asit miktarı eklenmesiyle, kaldırma özellikleri üzerine olumlu bir etkiye sahip olduğunu tespit edilmiştir. $a = \%4$ ve $\%6$ malik asit katkılı numuneler için 24 ve 28 °K' de, yüksek kaldırma 18.60 N' a karşılık gelmektedir. Katkısız numunede ZFC rejimi için 24 °K'de 16.95 N olduğunu gösterir. Bu çalışmada, MgB_2 numunesine eklenen malik asit katkısı, kaldırma kuvvetine özelliklerine artırıcı yönde etkisi olmuştur.

Toplu ve ark., (2015), BSCCO süperiletkenine Zn katkısı yaparak malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu incelemelerde Zn katkılı BSCCO süperiletkenin gerçek sertlik değerini araştırmışlardır. Bu incelemeler sonucunda araştırmacılar üretilen malzemenin gerçek sertlik değerini belirlemede kullanılacak en ideal modelin Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci Modeli (GOND) olduğunu ortaya koymuşlardır.

1950'li yıllarda kullanılmaya başlanan MgB_2 bileşiminin ilk kez süperiletkenlik özelliği Akimitsu ve arkadaşları tarafından 2001 yılında 39 °K geçiş sıcaklığına sahip olduğu bulunmuştur. MgB_2 bileşimi alaşımlar ve metaller içinde en yüksek kritik geçiş sıcaklığına sahip olması, bolluğu ve ucuz maliyeti açısından günümüzde teknolojik uygulamalar için yoğun şekilde çalışılan bir malzeme konumuna gelmiştir. Özellikle, en çekici özellikleri yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip olmalarıdır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda Malik asit'in ($C_4H_6O_5$) MgB_2 malzemesine katılınması ile birlikte kritik akım yoğunluğu ve akı tuzaklanması değerlerindeki artış bilimsel camiada bu malzemeler üzerine olan ilginin daha da artmasına sebebiyet vermiştir (Hossain ve ark., 2007; Maeda ve ark., 2011; Savaşkan ve ark., 2014). Fakat MgB_2 numunesine malik asit katkısı yapılan mevcut çalışmalarda katkı miktarlarının etkilerinin olumlu veya olumsuz olarak tartışılması bu malzemelere yapılacak olan optimum katkı miktarlarını belirlemeyi gündeme getirmiştir. Bu sebeple optimum katkı miktarlarının belirlenmesi noktasında daha iyi sonuçların ortaya konulması amacıyla MgB_2 malzemesine % 2, 4, oranında Malik asit katkısı yapılmıştır. Bu çalışmada, malik asit'in MgB_2 malzemesinin mekaniksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenerek, optimum katkı miktarlarının belirlenmesine katkı sağlayacak bilgilere ulaşılmaya amaç edinilmiştir. MgB_2 numunesinin fiziksel, elektriksel ve manyetik özelliklerini incelemek için numuneye birçok katkılama yapılmıştır. Bu çalışmamızda, MgB_2 numunesine Malik asit katkılanması yapılarak numunenin mekaniksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Genel olarak, malzemenin ham halden (bulk formundan) endüstride kullanılacak formlara (plaka, levha, tel) getirilmesi esnasında, mekaniksel özellikler (sertlik, elastite modülü, iç sürtünme) en belirleyici unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle, bir dış kuvvet etkisi altında malzemelerin davranışlarını inceleme esasına dayanan mekanik karakterizasyon teknikleri, endüstrinin ihtiyacı olan uç ürünlerin performans değerlendirilmelerinde kullanılan başlıca yöntemlerdir (Uzun ve ark., 2004).

Özellikle süperiletken malzemelerin teknolojik alanda tel, erit ve film yapımında kullanılmak istenmesi süperiletken malzemelerin mekaniksel özelliklerini incelenmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Malzemelerin mekaniksel özelliklerini belirlemek için sıklıkla kullanılan yöntem sertlik testidir (Gong ve ark., 2001). En doğrusu

sertlik ölçme yöntemlerinden birisi, dinamik sertlik olarak bilinen Derinlik Duyarlı Çentik Testi (DDÇ) yöntemidir (Cann, 2004). Bu çalışmada kullanılan DDÇ testi geleneksel çentme testine göre daha avantajlıdır (Kölemen ve ark., 2004). DDÇ yöntemiyle malzemelerin sertliklerinin yanı sıra elastisite modülü belirlenebilmektedir. DDÇ tekniğiyle yük-çentme derinliği verilerinin sürekli olarak kaydedilmesi bu çentme testinin en büyük avantajıdır. Geleneksel çentme testlerinde çentik çapının ölçülmesi sırasında hata payı çok yüksektir. Ancak, DDÇ tekniği, aletsel ve gözlemleyiciden kaynaklanan hataların azaltılmasına olanak sağlar.

Bu çalışmada, malzemelerin mekanik özelliklerini (sertlik ve elastisite modülü) belirlemede Oliver-Pharr modeli kullanılmıştır. Bu model, DDÇ deneyinden elde edilen yükleme (load)-boşaltma (unload) eğrilerinin kullanılmasına dayanmaktadır. DDÇ tekniğiyle elde edilen veriler analiz edilerek malik asit katkılı MgB_2 numunelerinin gerçek sertlik değerlerinin Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci (GOND) modeli ile belirlenmesi ve malzemede gözlenen ÇBE davranışının açıklanması amaç edinilmiştir.

2. KURUMSAL TEMELLER

Bu bölümde, süperiletkenlerin genel özellikleri ve mekaniksel özelliklere ilişkin bilgiler yer almaktadır.

2.1.Süperiletkenlik

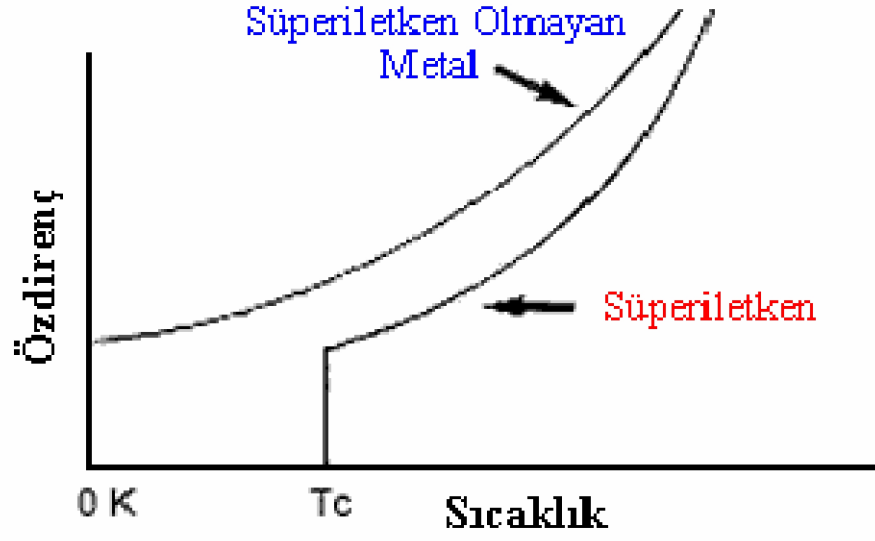
Süperiletkenlik, belirli bir kritik sıcaklığın (T_c) altında malzemelerin dirençsiz olarak elektrik akımını taşımalarına denir. Süperiletken bir malzemeye elektrik akımı verildiğinde hiçbir şekilde dirençle karşılaşmayacağı için bu akım süperiletken numunede sonsuza kadar dolaşabilir. Ancak, sıcaklığın kritik sıcaklığın altında olması ve akımında belirli bir kritik değeri geçmemesi gerekir.

2.2.Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

Malzemelerin süperiletkenlik özelliğini koruyabilmesi üç önemli parametreye bağlıdır. Bunlar, kritik sıcaklık (T_c), kritik manyetik alan (H_c), kritik akım (J_c) olarak adlandırılır. Ancak, süperiletken malzemeler bu özelliklerden herhangi birinin kritik değerini aşması durumunda süperiletkenlik özelliğini yitirmektedir.

2.2.1 Kritik Sıcaklık (T_c)

Bir malzemede süperiletkenlik olduğu en yüksek sıcaklık değeridir. Bu sıcaklık kritik sıcaklık veya geçiş sıcaklığı olarak denilmektedir. Bu kritik sıcaklık değerinin altında bir malzemenin direnci sıfıra düşmekte ve malzeme diamanyetik duruma geçerek, uygulanan manyetik alanı dışarıda tutmaktadır. Şekil 2.1’de öz direncin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.



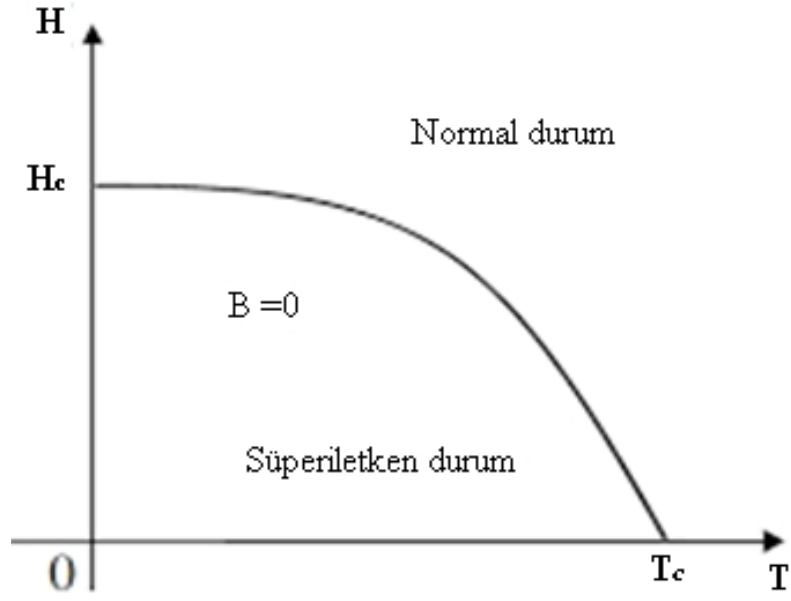
ekil 2.1. Özdirençin sıcaklıkla değişimi.

2.2.2. Kritik Manyetik Alan (H_c)

Süperiletkenliğin bir diğer önemli özelliği ise kritik manyetik alandır ve H_c ile ifade edilmektedir. Bir malzeme, kritik sıcaklık değeri altında süperiletkenlik özelliği gösterirken, kritik sıcaklık değerinin üstünde ise normal iletken gibi davranır. Kritik manyetik alan içinde aynı durum geçerlidir. Yani, süperiletkene uygulanan dış manyetik alan bu kritik değerin altında olduğu zaman süperiletken durum, üstünde olduğu zaman ise normal durum söz konusudur. ekil 2.2’de Kritik H_c alanının sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.

Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağımlılığı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

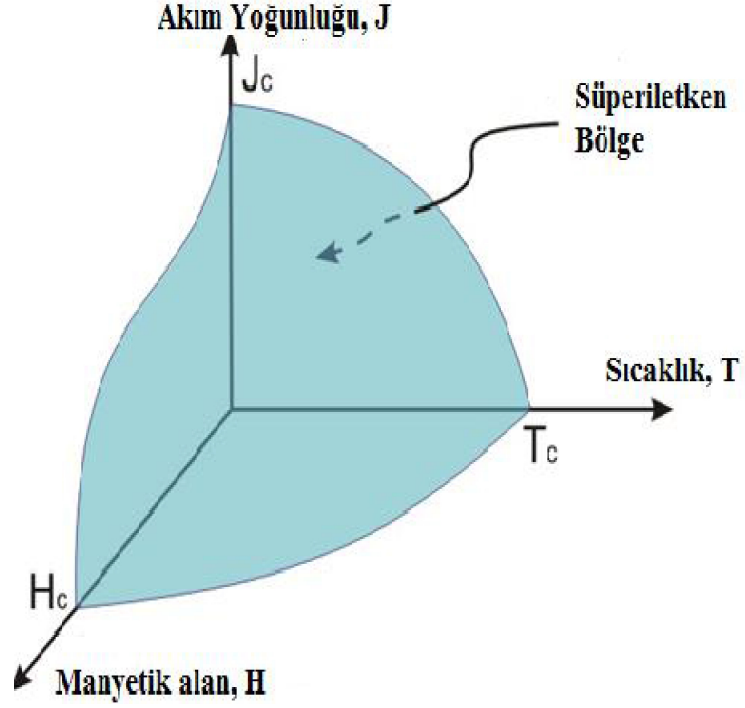


ekil 2.2. Kritik H_c alanının sıcaklıkla de i imi

2.2.3. Kritik Akım Yo unlu u (J_c)

Kritik akım yo unlu u, süperiletken malzemeler için kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan kadar önemlidir. Kritik akım yo unlu u bir süperiletkenin dirençsiz olarak taşıyabilece i elektrik akımının maksimum de eridir. Bu de ere kritik akım yo unlu u denir ve J_c ile ifade edilir. Cooper çiftleri kritik akım yo unlu unu belirleyen etmenlerden biridir.

Cooper çiftleri bozulursa bunların yo unluklarına ba lı olarak numunede normal iletken davranı ı gözlemlenebilmektedir. Kritik sıcaklık, kritik manyetik alan, kritik akım yo unlu u süperiletkenlik için önemli özelliklerdir. Süperiletkenlik için bu üç parametre birbirlerine çok ba lıdır. ekil 2.3.'de süperiletkenlik faz diyagramı gösterilmektedir.

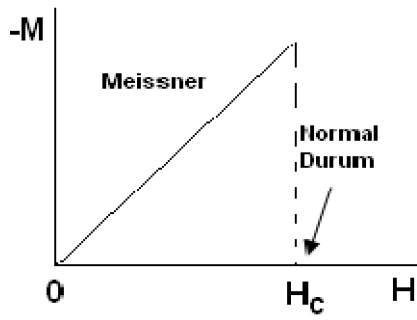


ekil 2.3. Süperiletkenlik faz diyagramı

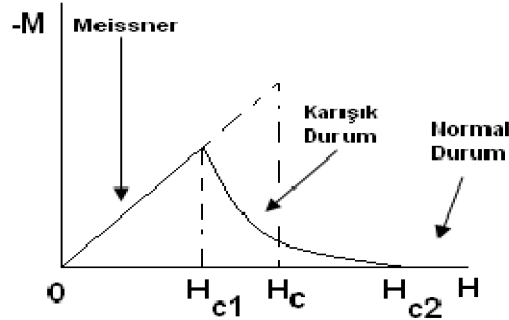
Bu özelliklerin herhangi biri kritik de erin üstüne çıktı ı takdirde ekil 2.3.'de görüldü ü gibi süperiletkenlik durumu bozulmaktadır.

2.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler

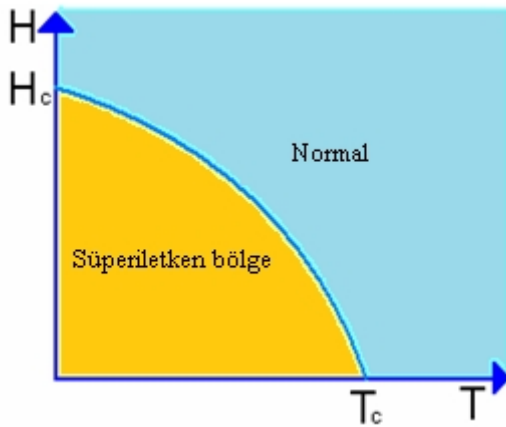
Süperiletkenlerin 1950 yılına kadar tek tip oldu u dü ünölmekteydi. Ginzburg ve ark., (1950) yılında geli tirdikleri teoriye göre, süperiletkenlerin manyetik alan altındaki davranı larına ba lı olarak II. Tip süperiletkenli in varlı mı ortaya çıkarmı lardır. ekil 2.4'de I. ve II. Tip süperiletkenlere ait mıknatıslanma e rileri (M-H) ve faz diyagramları gösterilmi tir.



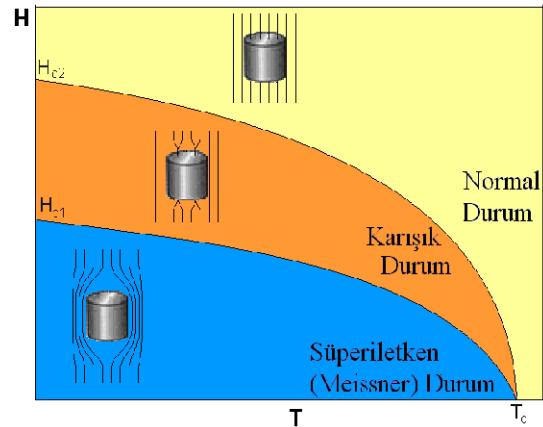
(a)



(b)



(c)



(d)

ekil 2.4. I. tip (a) ve II. tip (b) süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrileri ve I. tip (c) ve II. tip (d) süperiletkenlerin faz diyagramları.

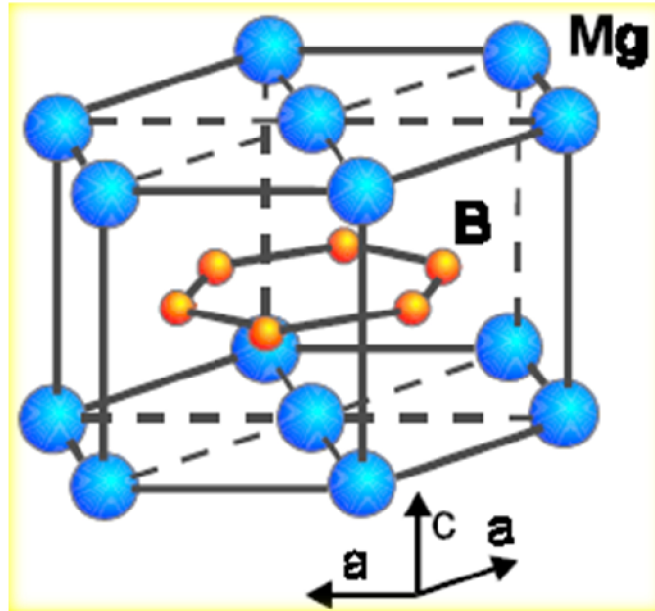
I. ve II. tip süperiletkenlerde, süperiletkenlik mekanizması arasında hiçbir farklılık yoktur. Sadece, Meissner etkisi farklılık göstermektedir. I. tip süperiletkenlik grubunu Saf metaller veya elementler oluşturur. Bu tip süperiletkenlerde tek bir kritik manyetik alan değeri vardır. Bu değerin altına numune Meissner etkisi davranışı göstererek manyetik alanı dışlarlar. Bu değerin (kritik manyetik alan değeri) üstünde süperiletkenlik yok olarak numune normal iletken gibi davranmaya başlar.

II. tip süperiletkenlik grubu, alaşımlar ve bileşiklerden oluşmaktadır. Örneğin, MgB_2 , $YBaCuO$, $BiSrCaCuO$ vb. bileşik ve alaşımlar II. Tip süperiletkenlik grubuna aittir. I. tip süperiletkenlerde tek bir kritik manyetik alan değeri varken, II. tip süperiletkenlerde H_{c1} ve H_{c2} (alt ve üst kritik manyetik alan değeri) olmak üzere iki tane kritik manyetik alan değeri vardır. II. tip süperiletkenler, H_{c1} kritik manyetik alan değerine kadar I. tip süperiletkenlik özelliği gösterirler ve H_{c1} değerine kadar manyetik alanı dışarıda tutarak negatif yönde mıknatıslanırlar. Burada, H_{c1} değerine alt kritik

manyetik alan denir. H_{c1} de erinin üstünde malzeme uygulanan alanın bir kısmını dı lamakta, bir kısmı da malzemeye nüfuz edebilmektedir. Bu durumda malzeme süperiletkenlik özelli ini sürdürmektedir. ekil 2.4' de (d) ıkkından da görüldü ü gibi $H_{c1} < H < H_{c2}$ de erleri arasındaki bu duruma karı ık durum denilmektedir. Karı ık durumda malzeme süperiletken durumda ve sıfır dirence sahiptir. Alan çizgileri malzemenin içindeki bazı bölgelere nüfuz edebilmektedir (Annet, 2003). Manyetik alan de eri H_{c2} dedi imiz üst kritik manyetik alan de erine ula tı ı anda, ekil 2.4' de (d) ıkkından da görüldü ü gibi uygulanan manyetik alan malzemeye nüfuz ederek süperiletkenlik durumunun yok olmasına neden olur.

2.4. MgB_2 'nin Kristal Yapısı

MgB_2 bile i i $P6/mmm$ uzay grubuna dahil olan, basit Hekzagonal yapıya sahip bile iktir. Bu yapı Mg (Magnezyum) atomlarının Hekzagonal tabakaları ile B (Bor) atomlarının Hekzagonal düzlem tabakalarından oluşmaktadır. MgB_2 ' deki B tabakaları grafitteki Hekzagonal C (karbon) tabakalarına benzer yapıdadır (King, 2002).



ekil 2.5. MgB_2 süperiletkenin kristal yapısı

Birim hücre parametreleri $a=3,086 \text{ \AA}$, $c=3,524 \text{ \AA}$ olarak bulunmu tur. Bor düzlemleri arasındaki mesafe B-B arasındaki mesafeden uzundur. MgB_2 'nin süperiletkenli inde B tabakaları önemli rol oynar (Buzea ve Yamashita, 2001).

2.5. Mekaniksel Özellikler

Süperiletken maddelerin mekaniksel özelliklerini incelemekteki amaç, mekaniksel özelliklerin süperiletken durum ile olan bağlantısı, uygulanan zor altındaki mekaniksel kararlılık ve zorun süperiletken özellikleri üzerindeki etkisini anlayabilmektir. Süperiletken maddelerin mekaniksel özellikleri, onların hazırlama metoduyla ve malzemelerin kimyasal özellikleri ile son derece ilgilidir. Bunlar; bileşik, alaım, mikroyapı, faz saflığı, malzeme hazırlama geçmişi; elastik, plastik ve çatlak özellikleri dikkate alınıp hesaba katılarak alınması gereken önemli sınırlardır. Süperiletkenler için T_c , H_c , J_c parametrelerinin iyileştirilmesine kadar önemli ise, bu malzemelerin doğrudan teknolojik alanda kullanılmak istenilmesinden dolayı malzemelerin mekaniksel özelliklerini belirlemede bir o kadar önemlidir.

Malzemenin uygulanan bir kuvvete karşı gösterdiği tepki mekanik davranış, dış kuvvetlerin etkisi altında değişik zorlamalar karşısında malzemede oluşan eğilme deformasyonları ve malzemenin gösterdiği dayanma gücü özelliklerine mekanik özellik adı verilir. Cisimler artan yük altında önce eğilme deformasyonu geçirirler, daha sonra dayanımını yitirerek kırılmaya başlarlar.

Malzemelerin mekaniksel özellikleri neden önemlidir;

- a. Malzemelerin endüstride kullanılabilirliğini belirleyen başlıca faktörlerden biri olması,
- b. Hacimsel (Bulk) özelliklerin, aslında çok daha küçük boyutlardaki (mikro-nano) yapılar ve etkileşimler tarafından belirleniyor olması
- c. Gelişen teknoloji ile birlikte gittikçe artan minyatürizasyon talebi doğrultusunda üretilen küçük boyutlu malzemelerin deformasyon karakteristiklerinin belirlenebilmesi

2.5.1 Sertlik

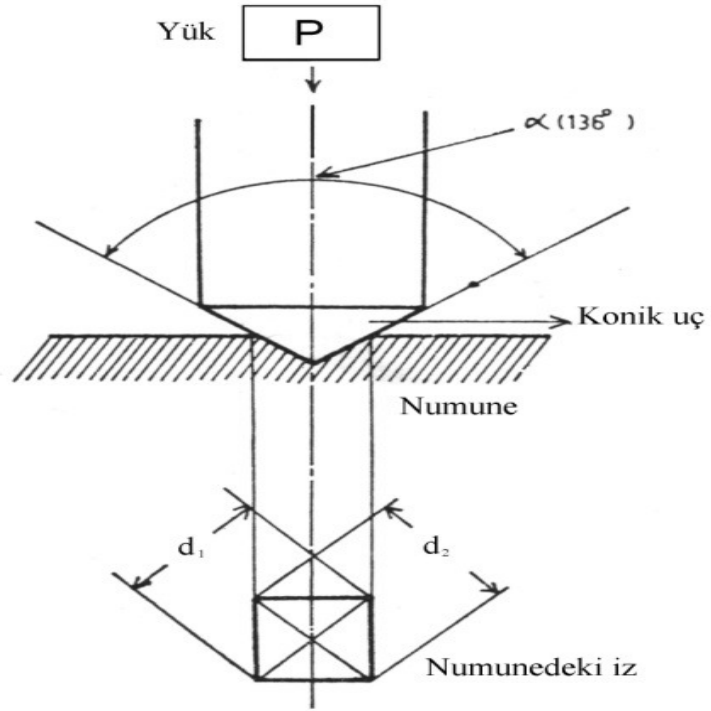
Sertlik testi, malzemeye hasar vermemesi ve yapılı ının basit olmasından dolayı malzeme üzerine yapılan en genel mekanik deneylerden biridir. Malzeme özelli i olarak ele aldı ımızda sertlik, malzemelerin çizilmeye, kesilmeye, sürtünmeye ve plastik deformasyona kar ı gösterdi i direncin bir ölçüsüdür. Bilimsel alanda ise dislokasyon hareketine kar ı malzemenin gösterdi i direnç olarak tarif edilebilir. Sertlik testi genellikle belirli bir uç yardımıyla ölçülmek istenen numunenin yüzeyine seçilen bir yük altında belirli bir süre batırılması ile olu an izin kö egen uzunluklarının ölçülmesinden ibarettir.

Sertlik ölçümünde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Örne in; malzemelerin ölçme yüzeylerinin düzgün ve birbirine paralel olması gerekir. Malzemenin kalınlı ı, iz derinli inin en az on katı olması gerekir. Batıcı uç, numunenin kenarlarına yakın bölgede uygulanması ve izler arasında iz çapının veya ortalama kö egen uzunlu unun en az 2-3 katı kadar bir uzaklık bulunmalıdır. Malzemenin sertli i, uygulanan yüke ba lı olarak, numune yüzeyinde olu an kalıcı izin yüzey alanına veya batıcı ucun batma derinli ine göre belirlenir. Genelde sertlik, uygulanan yükün numunede olu an kalıcı izin yüzey alanına bölünmesiyle belirlenir (Sava kan, 1999).

En genel sertlik ölçme yöntemleri; Vickers, Brinell, Rockwell, Knoop ve Berkovich'dir. Sertlik ölçümleri yapılırken, numune üzerinde birçok ölçüm yapıp bu ölçümlerin ortalaması alınmalıdır.

2.5.1.1 Vickers Sertli i

Sertlik deneyinde kullanılan batıcı uç elmastan yapılmı piramit biçimindedir. Piramidin tepe açısı 136° 'dir. Söz konusu Vickers sertlik deneyi; kullanılan batıcı ucun numunenin yüzeyine, uygulanan yük altında belirli bir süre batırılması ile olu an izin kö egen uzunluklarının ölçülmesine dayanır. ekil 2.6.' dan görüldü ü gibi olu an iz dikdörtgen biçimindedir.



ekil 2.6. Vickers çentiçi ve izin diagonal boyu

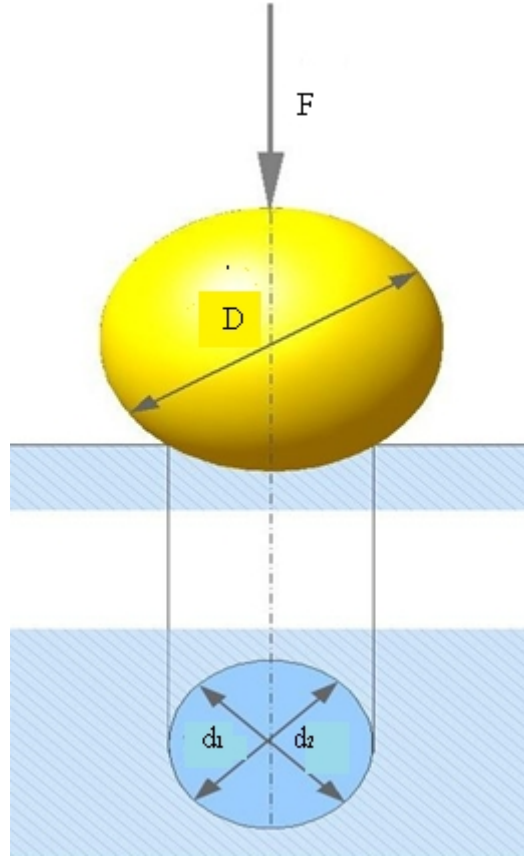
Vickers sertlik değeri a a ıdaki e itlikle belirlenir.

$$H_V = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

Burada, P; uygulanan yük, d; izin ortalama ($d=(d_1+d_2)/2$) kö egen uzunlu udur.

2.5.1.2 Brinell Sertli i

Brinell sertlik yönteminde, kullanılan uç bir bilye olup belirli bir yük (P) ile malzemenin yüzeyine batırılır, olu an izin çapı (d) ölçülerek P yükü, izin yüzey alanına bölünerek Brinell sertlik değeri hesaplanır.



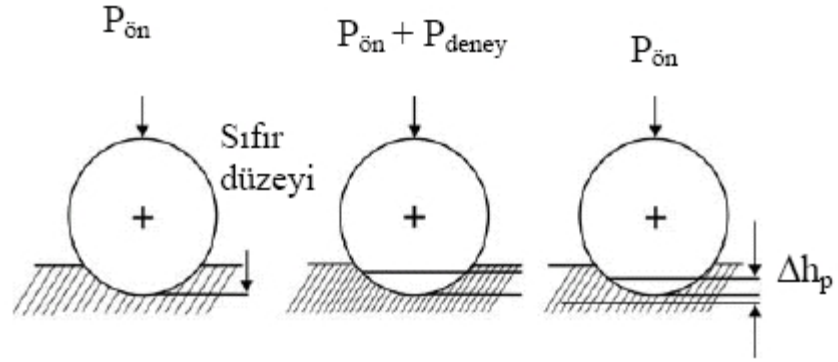
ekil 2.7. (a)Brinell çentiçi (b) zin çapı

ekil 2.7.' den görüldü ü gibi, d olu an izin çapı, D bilya çapı olmak üzere Brinell sertlik de eri a a ıdaki e itlikle belirlenir.

$$H_B = \frac{2P}{fD(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

2.5.1.3 Rockwell Sertli i

Rockwell sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç bilya veya koni eklindedir. Bu uçlar belirli bir yük ile numune yüzeyine batırılıp, olu an izin derinli i ölçülerek sertlik de eri elde edilir. Numunenin yüzey pürüzlülü ü sertlik de erini etkileyebilir. Bunun için bir ön yükleme uygulayarak cihaz sıfır düzeyine getirilir.

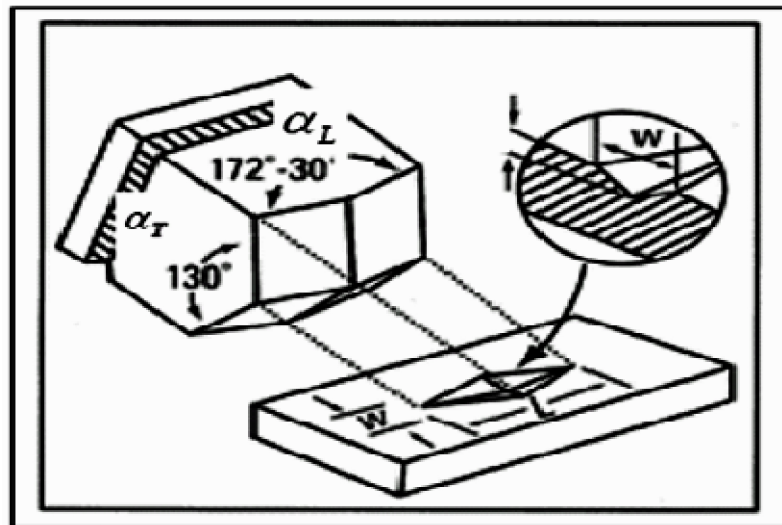


ekil 2.8. Rockwell Çentiçinin ematik Gösterimi

ekil 2.8.'den görüldü ü gibi deney yükü belirli bir hızda uygulandıktan sonra kaldırılır. Daha sonra olu an izin derinli i ölçülür. Ancak, Rockwell sertlik testinde olu an izin derinli i yerine buna kar ılık gelen bir sayı belirtilir. Elde edilen sertlik de erleri R_a , R_b ,...vb. gibi simgelerle ifade edilir. Bu sayılar 0-100 arasında bir de er alır. Bu sertlik testi pratik olmasının yanında endüstride çok yaygın olarak kullanılan bir testtir.

2.5.1.4 Knoop Sertli i

Knoop sertlik testi, çok ince malzemeler için Vickers sertlik testine alternatif olarak kullanılır. Knoop sertlik testi geometrisi, Vickers sertlik testi geometrisinden farklıdır.



ekil 2.9. Knoop Çenticinin ematik Gösterimi

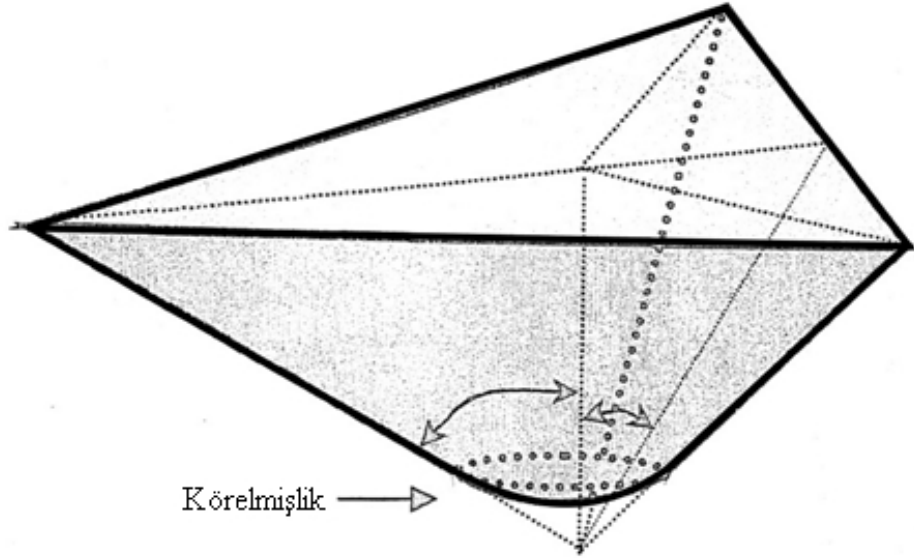
ekil 2.9.'dan görüldü ü gibi çentici e kenar dörtgen tabanlı piramit eklindedir. Çentici arasındaki açılar birbirinden farklıdır. Büyük açı 172,30° ve küçük açı 130° dir. Knoop sertlik de eri a a ıdaki e itlikle ifade edilir.

$$H_K = \frac{F}{\frac{1}{2}Lw} = \frac{2F}{L^2 \cot(r_L/2)\tan(r_T/2)} = 14.229 \frac{F}{L^2} \quad (4)$$

E itlik 4'de bulunan F uygulanan kuvvet, L, w, r_L , r_T ise ekil 2.9.'da gösterilmi tir.

2.5.1.5 Berkovich Sertli i

Berkovich sertli inde kullanılan batıcı uç üç kö e tabanlı piramit eklindedir. Bu batıcı uç mikro ve nanoçentme deneylerinde kullanılır.



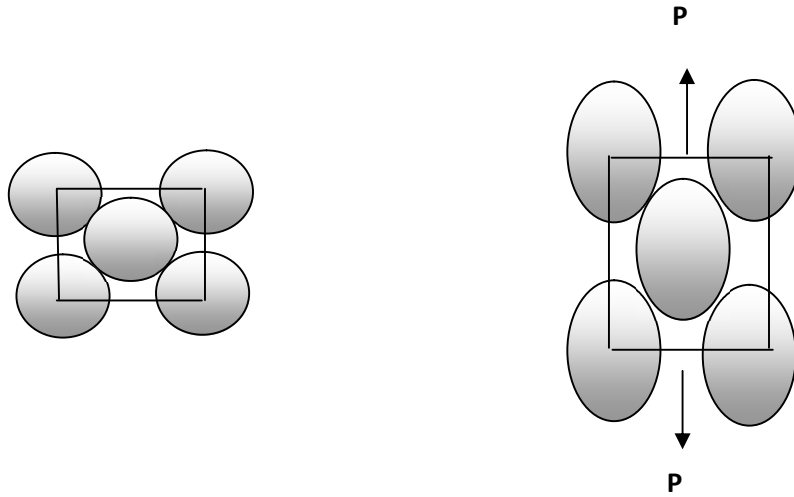
ekil 2.10. Berkovich çentisinin geometrisi

$$H_{BE} = \frac{P_{maks}}{A_c} = \frac{P_{maks}}{24.5h_c^2} \quad (5)$$

Berkovich uç için sertlik değeri E itlik (5) ile hesaplanır (Peng, ve ark., 2004).

2.5.2. Elastisite Modülü

Elastisite modülü, malzemenin dayanımının (mukavemetinin) bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bazı kaynaklarda Young modülü diye geçmektedir. Bir malzemenin elastisite modülü değeri büyük ise, malzemenin dayanıklılığı yüksek ve ekleme direncine karşı o kadar dirençlidir. Elastisite modülü, birim uzama başına oluşan gerilme miktarını gösterir. Birim uzama ile normal gerilme arasındaki ilişki Elastisite modülünü verir. Çekme halinde σ gerilmesi ile oluşan v_x ekleme direnci arasındaki oran lineer elastik cisimlerde sabittir ve bu sabite E elastisite modülü denir. Aynı gerilme altında oluşan yan ekleme direnci v_y aksel ekleme direnci v_x ile orantılı olup orantı sabitine Poisson oranı denir (ekil 2.11). Çekme yan ekleme direnci eksi yöndedir.



ekil 2.11.Çekme etkisinde aksel ve yan ekleme direnci

Poisson oranı artı i aretli bir malzeme sabiti oldu undan denkleme (-) i areti konmu tur. (Aymak, 2006).

$$\text{Poisson oranı; } \nu = -\frac{V_y}{V_x}, \quad \nu > 0 \quad (6)$$

$$\text{Elastisite modülü; } E = \frac{\dagger}{V_x} \quad (7)$$

2.5.3. ç Sürtünme Katsayısı (S)

Çentik testleri küçük hacimli malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemenin en uygun yoludur. Derinlik duyarlı çentik testi ise malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemenin en geli mi yöntemlerinden birisidir. Nanoçentme testi ise küçük hacimli malzemelerin sertlik, elastisite modülü ve di er mekaniksel özelliklerini belirlenmesinde standart hale gelmi tir (Chudoba ve Richter, 2001; Fischer-Cripps, 2004).

Dinamik çentik testi sırasında yüksek frekanslarda dü ük genlikli osilosyon güç sinyaline uygulanır. Bu osilosyona bir reaksiyon olarak, çentik derinli i de aynı frekansta bir osilosyon gösterir. Bu metotla incelenen malzeme viskoelastik karaktere sahip ise, yük ile derinlik arasında bir faz farkı meydana gelmektedir. Meydana gelen bu faz farkı sıcaklı a ve frekansa ba lıdır. Viskoelastik bir malzemenin ç sürtünme (S) de eri a a ıdaki e itlikle ifade edilir (Mano ve ark., 2004).

$$S = \sin u \approx \tan u \quad (8)$$

Burada S; iç sürtünme, $\ll 1$ ise çentik derinli i ile yük arasında olu an açıdır. Bu dinamik metodun prensibi çok basittir, fakat de erinin kaydedilmesi için çok hassas derinlik ölçen bir cihaza ihtiyaç duyulmaktadır. (Raman ve Beniche, 1992).

Her yükleme bo altma çevriminde yapılan çentme için yapılan i in bir kısmı kaybolmaktadır. Bu kaybolan enerji kaybının nedeni iç sürtünmeden kaynaklanmaktadır.

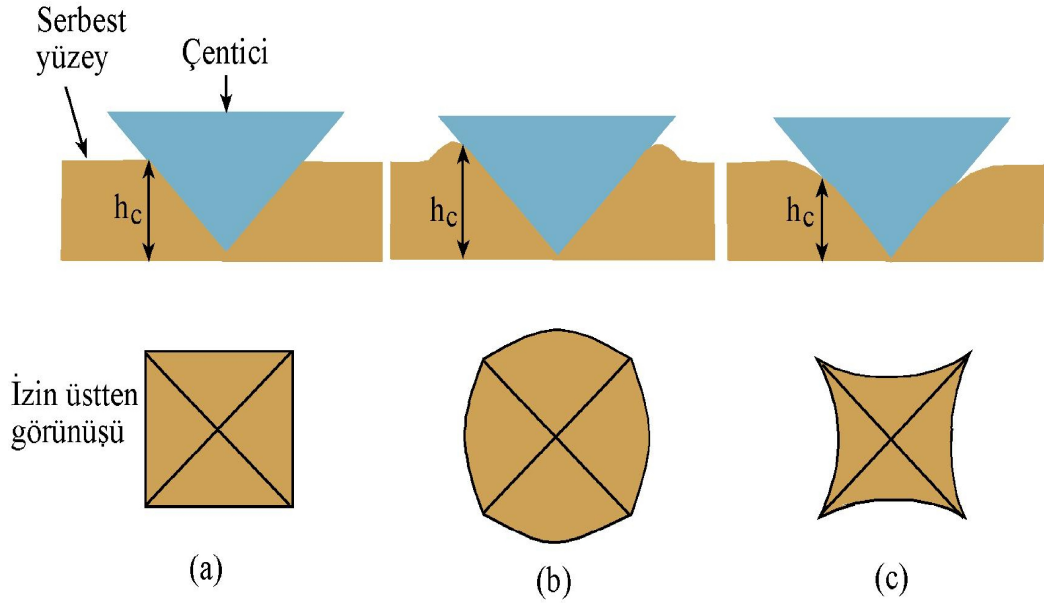
ç sürtünmenin de eri a a ıdaki e itlikle bulunmaktadır.

$$S = \frac{1}{2f} \frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

Burada ΔW ; her bir çevrimde kaybolan enerjiyi, W ise dış zor tarafından yapılan toplam işi temsil eder (Mano ve ark., 2004).

2.5.4. Yığılma (Pile-Up) ve Çökme (Sink-in) Davranışları

DDM ölçümlerinin en zayıf yanı, malzeme iz etrafında yığılma veya çökme türünde ortaya çıkar (McElhaney ve ark., 1998).



ekil 2.12. Vickers çentici ile yapılan bir çentik testinde a) kusursuz plastik deformasyon b) yığılma ve c) çökme davranışları

ekil 2.12.'de yığılma ve çökme davranışlarının elastik gösterimi verilmiştir. Oliver-Pharr (1992) yaklaşımı, çentik esnasında elastik-plastik kontak olduğunu kabul eder. Kontak derinliği h_c 'nin doğruluğu, kontak etrafında geri kazanımın tamamıyla

elastik oldu u kabulünün do rulu una ba lıdır. Malzeme yı ıldı nda veya çöktü ünde, kontak alanına göre plastik deformasyon ku a ı etkilenecek ve Oliver-Pharr yakla ımı kullanılarak yapılan hesaplamaların hatalı çıkmasına sebep olacaktır. Bahr ve ark., (1998), göre yı ılma ve çökme olayları çentici altındaki dislokasyonların numune yüzeyine çapraz kaymasıyla açıklanmıştır. Çökme genellikle yüksek zorlanma kapasitesine sahip malzemelerde (iyi tavlanmı) görülür. Çünkü bu tür malzemelerde, deformasyon geni derinliklere e it olarak yayılabilir. Di er taraftan, i lem sertle meli malzemeler gibi dü ük zorlanma kapasitesine sahip malzemelerde, zorlanmalar malzeme içerisinde da ılamaz ve malzeme yüzeyinin dı arı do ru itilmesine (yı ılma) sebep olur (Yılmaz, 2008)

2.6. Malzemelerin Mekanik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Deneysel Yöntem

2.6.1. Derinlik Duyarlı Çentik Testi (DDÇ)

Numunelerin sertlik analizleri için genellikle çentme testleri kullanılır. Derinlik Duyarlı Çentik (DDÇ) testlerinde, belirli bir çentici ile belirli bir yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra kontak alanını belirlemek için olu an iz optiksel olarak ölçülür. Çentme i leminde uygulanan yükün, izin kontak alanına oranı sertlik olarak adlandırılır.

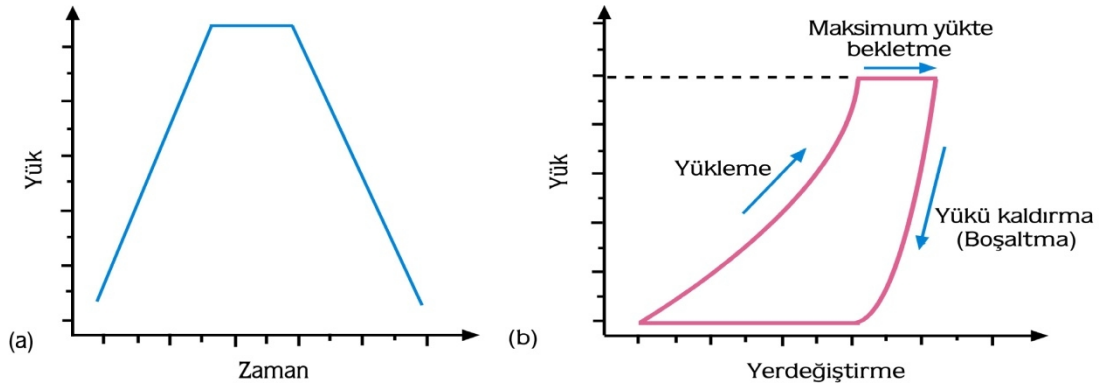
$$H_{makro} = \frac{P_{uygulanan}}{A_{kalan}} \quad (10)$$

E itlik (10)' dan elde edilen sertlik de erleri, numunenin uygulanan yüke gösterdiği plastik tepki olarak tanımlanır. Kontak alanının daha iyi bir ekilde belirlenebilmesi için Taramalı Uç Mikroskobu (SPM) veya Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılması gerekmektedir. Ancak, nanometre boyutundaki ölçümlerde genellikle, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılması gerekmektedir.

Yer de i tirme verilerini daha do ru bir ekilde ölçen ve yükün daha hassas bir biçimde uygulanmasını sa layan test yöntemleri, çentme i lemi yapılan bölgede mikroskopik yöntemlerle incelenme gereklili ini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, geleneksel tekniklerle numune yüzeyinde kalan plastiklik ölçülmesine ra men, DDÇ

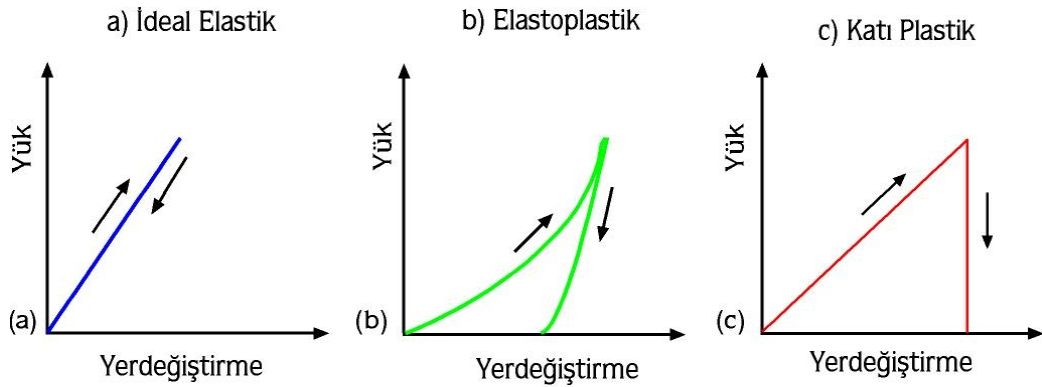
teknik ile yük kaldırıldıktan sonra ortaya çıkan elastik geri kazanım ve bağıng elastiklik de ölçülebilir hale gelmiştir (Ahin, 2006).

Nanoçentme deneylerinde, yükün uygulanması ve kaldırılması sırasında yer de i tirme verileri sürekli olarak kaydedilmektedir (Baker ve Burnham, 2000).



ekil 2.13. Tipik bir çentme testi için a) Yükleme profili b) Yük-yerdeğiştirme eğrisi

ekil 2.13’de DDÇ için yükleme profili ve yük-yerdeğiştirme eğrileri gösterilmektedir. Burada, yük kaldırıldıktan sonra girme derinli indeki geri kazanım miktarı, do rudan numunenin elastiklik derecesi ve geri kazanılmı elastik deformasyonla ilgilidir.



ekil 2.14. Yük-yerdeğiştirme eğrileri a) deal elastik b) Elasto-plastik c) Katı plastik numune

ekil 2.14. a’ dan görüldü ü gibi elastik olarak deforme olmu bir numunede, yükleme sırasında olu an iz, yük kaldırıldıktan sonra ortadan kalkarak ilk konumuna geri döner. Bu durumda numune ideal elastiklik bir durum sergiler.

ekil 2.14. b' de elasto-plastik numuneye ait yük-yer de i tirme e risi gösterilmektedir. Bu tür davranı sergileyen numuneler hem elastik hem de plastik davranı ın karı ımını sergilemektedir.

ekil 2.14. c' de ise katı plastik davranı sergileyen numuneye ait yük- yer de i tirme e risi gösterilmektedir. Bu tür davranı ta, plastik olarak deforme olmu numunede hiçbir geri kazanım gözlenmez.

Geleneksel çentme testleriyle belirlenemeyen elastiklik özelli i, DDÇ test yöntemiyle belirlenebilmektedir ve büyük bir avantaj sunmaktadır.

Yükleme-bo altma e risinin her bölümü için farklı teknikler geli tirilmi tir. Yüklemeye kısmı hem elastikli i hem de plastikli i içeren bir model gerektirir. Yükü tutma kısmı sürünme (creep) davranı ını incelemek için kullanılır. Nanoçentme deneylerinden elde edilen verilerin yorumlanması amacıyla kullanılan teknikler, genel olarak dört varsayım üzerine kurulmu tur.

Buna göre; (i) çentimin e rilik yarıçapı numune yüzeyi ile kar ıla tırıldı ında çok küçük oldu u, (ii) çentimin ve numune boyutlarının kontak alanına kıyasla çok büyük oldu u, (iii) çentik boyutunun, tüm sistemle kar ıla tırıldı ında çok küçük oldu u, (iv) kontak halindeki cisimlerin sürtünmesiz oldu u ve sadece normal do rultudaki kuvvetin numuneye iletildi i kabul edilmektedir (ahin, 2006).

Çentme i lemlerinden elde edilen yük-yer de i tirme verilerinin yorumlanması için birçok ara tırma grupları tarafından çalı malar yapılmı tur. Stillwell ve Tabor, 1961 yılında yaptıkları çalı mada konik çentimler kullanarak elastik toparlanmayı ve bunların mekaniksel özellikleri incelemi lerdir (Tabor, 1961). Bulychew ve ark. (1975) yılında yaptıkları çalı mada ilk kez kontak alanını, yük- yer de i tirme e rilerinin bo altma kısmını kullanarak belirlediler (Bulychew ve ark., 1975). Doerner ve Nix (1986), çentik boyutunun optiksel aletler kullanarak ölçülemeyecek kadar küçük oldu unu söylediler ve milinewton (mN) aralı ında DDÇ tekni ini ilk kez kullanmı lardır (Doerner ve Nix, 1986). Oliver ve Pharr (1992) yılında bu tekni i düzelterek kullanı lı hale getirmi lerdir. Yukarıda özetlenen çentme teknikleri, idealize edilmi bir küre ile düz yüzeyin konta ımın incelenmesine dayanır.

Sneddon (1965) yılında çe itli geometrilerdeki katı çentimler ile kontak alanı için bir ifade geli tirerek, kontak katı lı ını (Contact Stiffness; S), yükteki artı ın (uP), yer de i tirmedeki artı a (uh) oranı olarak tanımlamı tur.

$$S = \frac{u P}{u h} \Big|_{\text{elastik}} \quad (11)$$

Yük-yerde i tirme e risindeki yükün kaldırılması kısmının ba langıcı ile ili kili olan bu oran, bo altma kısmının ba langıcının tamamen elastik oldu u kabulüne dayanır. Ço u malzeme, hem elastik hem de plastik tarzda deforme olsa da, yükün bo altılmasına ba lı geri kazanımın büyük bir kısmının elastik oldu u varsayılır. Geride kalan (artık) deformasyon, en son derinlikle (h_p) ilgili olan plastikli i temsil eder. Aynı zamanda, çentici ucun ideal bir katı oldu u varsayılır. Bununla birlikte, çenticide meydana gelebilecek herhangi bir elastik deformasyonun, indirgenmi elastiklik sabitinin hesaplanmasında dikkate alındı ının hatırlanması yararlı olacaktır.

Bu ba lamda, kontak katılı ν , maksimum yükteki indirgenmi elastiklik modülü ve kontak alanının (A_c) bir fonksiyonu olarak a a ıdaki ekilde ifade edilir (Sneddon, 1965).

$$S = \frac{2}{\sqrt{f}} E_r \sqrt{A_c} \quad (12)$$

E itlik (12)' ye Sneddon'un katılık denklemi denir. Kontak alanı (A_c), kullanılan çentici ucunun ekline ba lıdır. E itlik (12)' den görüldü ü gibi bo altma e risinin e imi, kontak alanının karekökü ve elastiklik sabitiyle orantılıdır.

Nanoçentme deneylerinden elde edilen yük-yerde i tirme e rileri kullanılarak sertlik ve elastiklik sabitinin belirlenmesi amacıyla, literatürde farklı metotlar geli tirilmi tir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Oliver-Pharr metodudur (ahin, 2006).

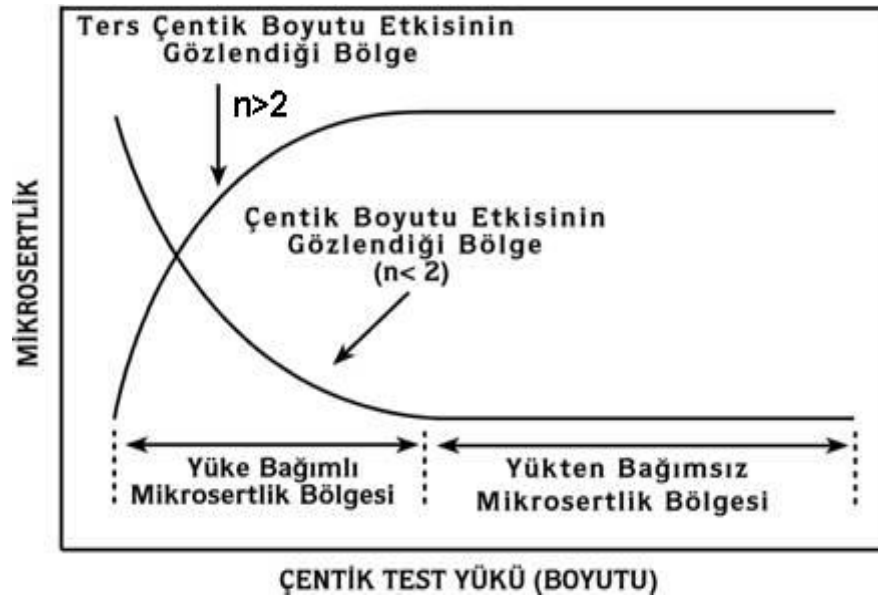
2.6.2. Çentik Boyut Etkisi (ÇBE) ve Sebepleri

Son yıllarda yapılan çalı malarda çentik testleri üzerine ilginin artmasına sebebiyet vermi tir. Bunun nedeni ise, küçük yüklerde büyük sertlik de erlerinin elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Küçük çentik test yüklerinde plastik deformasyon a amalarının dikkatli takibi, çentik testlerinin iyi anla ılmasına yardımcı olacaktır. Çentik testleri üzerine ilginin

artması, hem çentik yükü/deformasyon davranışı hem de çentme işleminden sonra numune yapısının gözlemlenmesinde (test aletlerinin duyarlı hale gelmesinden dolayı) bu zamana kadar yapılan çalışmalara yeni bir boyut kazandırmıştır (Armsrong et al., 2006).

Literatürde farklı numuneler üzerine yapılan çalışmalarda, mikrosertlik in uygulanan test yüküne bağımlı olduğu gözlemlenmiştir (Gong et al., 1999, 2000, 2001, 2004; Uzun et al., 2004, 2005; Şahin et al., 2005, 2006).



ek 2.15. Mikrosertlik in test yüküne göre değişimi

ekil 2.15.' den görüldüğü gibi mikrosertlik; çentik test yükünün (çentik boyutu) artması ile azalan çentik boyut etkisi (ÇBE) ve çentik test yükünün artması ile artan ters çentik boyut etkisi (TÇBE) davranışı görülmektedir. Belirli bir yük değerinden sonra numunenin sertliği sabit kalmaktadır.

Çentik Boyut Etkisinin Sebepleri;

- Çentimin elastik toparlanması (Tate, 1945; Mott, 1956),
- Çentme işlemi sırasında oluşan işlem sertleşmesi (Mott, 1956; Bückle 1973),
- Plastik deformasyonun olabilmesi için gerekli olan minimum yük (Hays ve Kendall, 1973),

- Çentme işlemi sırasında oluşan dislokasyon ilmeklerinin büyüklüğü (Upit ve Varchenya, 1973),
- Malzemelerin elastik/plastik deformasyona tepkisi (Bull ve ark., 1989),
- Çentici/numune arasındaki sürtünme direncinin elastik direnç ile ilişkisi (Li ve Bradt, 1993; Li ve Han, 1994),
- Yüzeysel izlerde (derin olmayan), çentici köşelerinin plastik bir menteşe gibi hareketi (Ma ve Clarke, 1995),
- Yüzeyde meydana gelen oksitlenme veya kimyasal kirlilikler (Sargent, 1986; Liu ve Ngan, 2001)
- Sıcaklık (Ren ve ark., 2002),
- Çentici etrafında oluşan yığılma (pile-up) ve çökme (sink-in) (Ren ve ark., 2002) gibi sebeplerden dolayı çentme testleri sırasında bir takım kusurlar meydana gelebilmektedir.

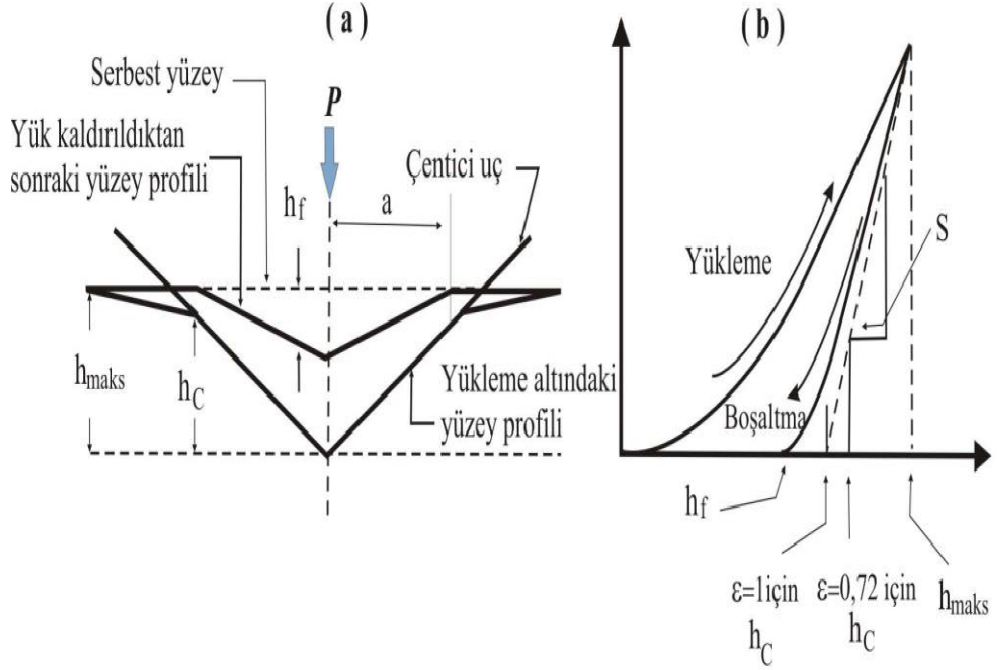
2.7. Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Teorik Yöntemler

2.7.1. Oliver-Pharr Metodu

Oliver-Pharr 1992 yılında yaptıkları çalışmalarında ekil 2.16.(a)'da yatay kesiti verilen çentici için bazı parametreler kullanılmı lar ve elde ettikleri verileri E itlik (13) ile yorumlamı larıdır.

$$E_r = \frac{\sqrt{f}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (13)$$

E itlik (11)'de verilen $S = \frac{dP}{dh}$, yük- yerde i tirme e risinin bo altma kısmının ba langıcından deneysel olarak ölçülebilmektedir. Burada, E_r , indirgenmi elastite modülü, A_c , elastik kontak ın iz dü üm alanıdır. Ba langıçtaki kontak katlı ı (S) ve kontak alanı (A_c) (optik olarak ölçülen iz dü üm alanına e it oldu u varsayımı ile) belirlenerek indirgenmi modül de eri türetilmi tir (Oliver ve Pharr, 1992).



ekil 2.16. (a) Çenti in yatay kesiti (b) Oliver-Pharr metodunda kullanılan yük-yer de i tirme e risinin ematik gösterimi

Kontak alanı; maksimum yükteki kontak derinli i (h_c) ve çentici geometrisi kullanılarak belirlenebilir. Maksimum yükteki iz dü ü m kontak alanı a a ıdaki E itlik (14) ile ifade edilir.

$$A=F(h_c) \quad (14)$$

Burada F'nin fonksiyon türü analiz yapılmadan önce belirlenmelidir. ekil 2.16. (a)' da yatay kesiti verilen çentici ile malzemeye uygulanan yükün toplam yer de i tirmesi

$$h=h_c+h_s \quad (15)$$

ile ifade etmi lerdir. Burada, h_c ; kontak derinli i, h_s ; kontak çevresindeki yüzeyin yer de i tirmesidir. ekil 2.16. (b)'den görüldü ü gibi maksimum yük P_{maks} , yükteki yer de i tirme h_{maks} ve çentici numuneden kaldırıldıktan sonra numune yüzeyinde olu an izin derinli i de h_p ' dir.

Deneysel kontak derinli i E itlik (16) ile ifade edilir.

$$h_c = h_{maks} - h_s \quad (16)$$

burada, h_{maks} deneysel olarak ölçülebilir. Burada belirleyici olan, kontak çevresindeki yüzeyin yer de i tirmesi h_s 'nin nasıl belirlenece idir. Kontak çevresinde olu an yüzeyin e rili i, çentici geometrisine ba lıdır.

Sneddon (1965) tarafından konik çentici için, kontak dı ındaki yüzey alanını E itlik (17) ile vermi tir.

$$h_s = \frac{(f - 2)}{f} (h - h_p) \quad (17)$$

Sneddon tarafından üretilen bu çözüm, yer de i tirmenin elastik bile imi için uygulandı ında denklemdaki $(h - h_p)$ ifadesi, h yerine kullanılmı tir. Sneddon, konik çentimler için yük-yer de i tirme ili kisini E itlik (18) ile ifade etmi tir.

$$(h - h_p) = 2 \frac{P_{maks}}{S} \quad (18)$$

Burada, S ; katılık sabitidir. Katılık (S), katının deformasyona kar ı direncinin bir ölçüsüdür. E itlik (18) ifadesi, E itlik (17) 'de yerine konulursa maksimum yükteki kontak alanı a a ıdaki E itlik (19) ile ifade edilir.

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{maks}}{S} \quad (19)$$

burada, ε ; konik uç için geometrik bir sabit de eri olup $[2/f (f-2)]$ ya da 0.72'dir. Bu de er E itlik (16)'de yerine yazılırsa kontak derinli i E itlik (20) ile ifade edilir.

$$h_c = h_{maks} - \varepsilon \frac{P_{maks}}{S} \quad (20)$$

Oliver-Pharr metodu ile elastiklik modülü hesaplanaca ı gibi sertlik de eri de hesaplanabilir. Buna göre sertlik, malzemelerin belirli bir yük altında dayanabilece i basınç olarak ifade edilir. Bu tanıma göre sertlik de eri, E itlik (21) ile hesaplanabilir.

$$H = \frac{P_{maks}}{A} \quad (21)$$

burada A , $A = F(A_c)$ ile tanımlanan maksimum yükteki iz dü üm alanıdır.

2.7.2. Meyer's Kanunu

Meyer's kanunu, h_c girme derinli i ve çentme test yükü P_{maks} arasındaki ifadeyi belirleyen basit bir deneysel ifadedir. P_{maks} ve h_c arasındaki ili ki E itlik (22) ile ifade edilmektedir (Tabor, 1951).

$$P_{maks} = C h_c^n \quad (22)$$

E itlik (22) ifadesinde C; bir sabit, n ise Meyer's indisidir. Malzemeler genel olarak $n < 2$ ise Çentik Boyut Etkisi (ÇBE), $n > 2$ ise Ters Çentik Boyut Etkisi (TÇBE) davranı ı görülmektedir. E er $n = 2$ ise Meyer's kanunu E itlik (23) ile verilen Kick yasasına dönü ür.

$$P_{maks} = C h_c^2 \quad (23)$$

2.7.3. Hays-Kendal Yakla ımı

Bu yakla ıma göre numune üzerinde kalıcı bir deformasyon olu abilmesi için minimum bir yük de erinin (W) olması gerekti i ileri sürülmü tür (Hays ve Kendall., 1973).

Uygulanan yük direnci a amaz ise numune üzerinde kalıcı bir deformasyon meydana gelmeyece ini, sadece elastik deformasyon olu aca ını ileri sürmü lerdir. Bu yakla ıma göre, numune üzerinde olu acak kalıcı deformasyona sebep olacak etkin yük de erini E itlik (24) ile ifade etmi lerdir.

$$P_{etkin} = P_{maks} - W = C_1 h_c^2 \quad (24)$$

E itlik (24)' de ifade edilen C_1 ; yüke ba lı bir sabit, W ise kalıcı deformasyon için gerekli olan minimum yük de eridir. Kontak derinli i (h_c) ve uygulanan maksimum yük (P_{maks}) kullanılarak elde edilen sertlik de eri;

($H=0.0408 \frac{P_{maks}}{h_c^2}$), E itlik (24)' de P_{maks} yerine P_{etkin} de eri yerine konulursa, E itlik

(25)' den görüldü ü gibi yükten ba ımsız sertlik de eri elde edilir.

$$H_{HK}=0.0408 \frac{(P_{maks} - W)}{h_c^2} = 0.0408 C_1 \quad (25)$$

2.7.4. Elastik / Plastik Deformasyon Modeli

Çentme testlerinde olu an çenti in boyutu, çentici kaldırıldıktan sonra ölçülür. Elastik geri kazanım, batıcı uç numune yüzeyinden kaldırıldıktan sonra kalan çentik izi etrafında ortaya çıkar. Bu durumda olu an izin boyutu belirli bir dereceye kadar ölçülür. (Tarkanian ve ark., 1973), yaptıkları çalı mada bu etkileri dikkate alarak yükten ba ımsız sertlik de erinin elde edilmesi için ölçülen çentik boyutuna yeni bir terimin eklenmesini önermi lerdir.

$$H_{EP}=k \frac{P_{maks}}{(h_c + h_0)^2} \quad (26)$$

E itlik (26)' da verilen h_0 ; elastik geri kazanımdan dolayı h_c ' ye eklenen düzeltme terimi, k ; çentici geometrisine ba lı bir sabittir. Mikrosertlik de erlerini inceleyebilmek için E itlik (26) ile verilen parametreler E itlik (27) ekinde düzenlenebilir.

$$P_{maks}^{\frac{1}{2}} = t^{\frac{1}{2}} h_c + t^{\frac{1}{2}} h_0 \quad (27)$$

E itlik (27) ile verilen $\chi = \frac{H_{EP}}{k}$ ile ifade edilir ve k ; (Berkovich uç için $1/24.5=0.0408$) yükten ba ımsız sertlikle ilgili bir sabittir (Peng ve ark., 2004). E itlik (27) ile verilen t ve h_0 'de erlerini, $P_{maks}^{\frac{1}{2}} - h_c$ ' ye göre grafi i çizilerek elde edilebilir.

2.7.5. Orantılı Numune Direnci (OND) Modeli

Bu model, Hays-Kendall yaklaşımının geliştirilmiş versiyonudur. Li ve Brant (1993), tarafından ortaya konulmuştur. Bu modele göre çentik derinliğinin doğrusal olarak artı gösterdiği ve numune direncinin sabit olması kabul edilir.

$$W = a_1 h_c \quad (28)$$

Buna göre çentme yükü ile girme derinliği arasında;

$$P_{etkin} = P_{maks} - W = P_{maks} - a_1 h_c = a_2 h_c^2 \quad (29)$$

ilişkisi vardır. Etkilik (29) ile verilen a_1 ve a_2 parametreleri, Li ve Brandt'e göre malzemenin elastik ve plastik özellikleri ile ilgili sabittir. a_2 derinliği, yükten bağımsız çentik derinliğinin ölçüsüdür. Mikroçentme deneyinde Berkovich çentici ile yapılan deney için H_{PSR} derinliği direkt olarak a_2 'den elde edilebilir.

$$H_{OND} = \frac{P_{etkin}}{24.5 h_c^2} = \frac{P_{maks} - a_1 h_c}{24.5 h_c^2} = \frac{a_2}{24.5} \quad (30)$$

Etkilik (29), a_1 ve a_2 parametreleri (31) şeklinde yeniden düzenlenebilir.

$$\frac{P_{maks}}{h_c} = a_1 + a_2 h_c \quad (31)$$

Buradaki a_1 ve a_2 parametreleri, P_{maks}/h_c - h_c göre grafiği çizilerek elde edilebilir. Çentik Boyut Etkisi (ÇBE) deneylerinde, OND modelinin uygulanabilirliği;

$$(H_{OND})_1 = \left(\frac{P_{maks} - a_1 h_c}{24.5 h_c^2} \right) \text{ ve } (H_{OND})_2 = a_2 / 24.5 \text{ Etkiliklerinden elde edilen } H_{PSR}$$

derinlikleri karşılaştırılabilir.

2.7.6. Geliştirilmiş Orantılı Numune Direnci (GOND) Modeli

Çentik boyut etkisi (ÇBE) davranışlarının açıklanması için önerilen bu model PSR modelinin geliştirilmiş ekli Gong ve ark., (1999) yılında Etkilik (32) ile ifade edilmiştir.

$$P_{maks} = a_0 + a_1 h_c + a_2 h_c^2 \quad (32)$$

Etkilik (32) ile verilen, a_0 ; yüzey etkilerinin neden olduğu artık zor ile ilgili sabit, a_1 ve a_2 parametreleri, (Bkz. Bölüm 2.7.5.) GOND modelinde açıklanan aynı fiziksel anlamı taşıyan parametrelerdir. GOND modelinde yükten bağımsız sertlik değerini hesaplamak için iki yol vardır.

$$(H)_{GOND 1} = (P_{maks} - a_0 - a_1 h_c) / (24.5 h_c^2)$$

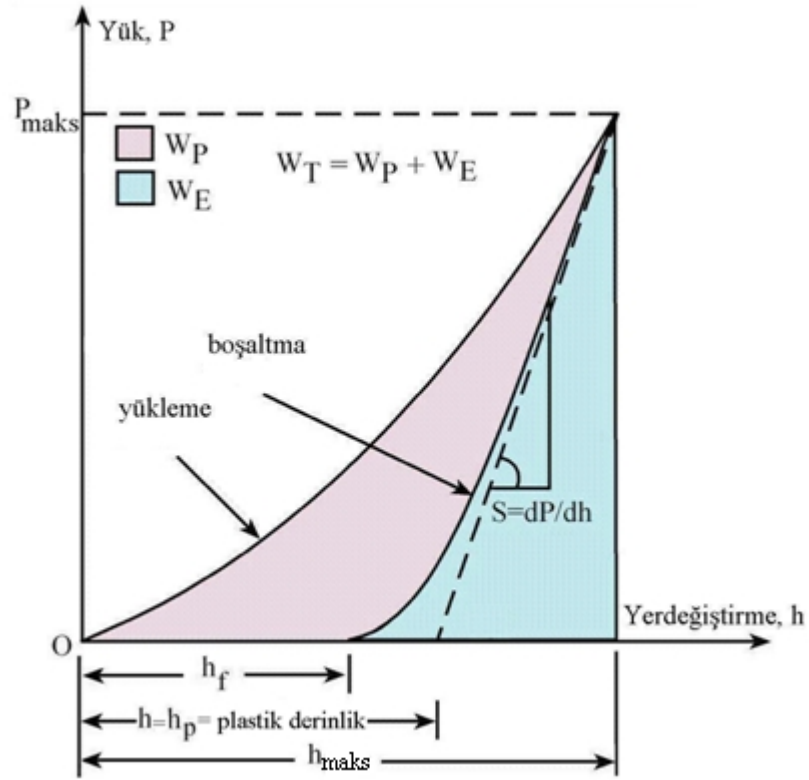
$$(H)_{GOND 2} = a_2 / 24.5 \quad (33)$$

Meyer kanunundaki modellerde, sertliğin yüke bağımlı kısmından, yükten bağımsız kısmı ayrılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle, her bir modelde numunelerin sertliğini tanımlayan sabitlerin bulunması amaçtır. Ayrıca, farklı kristallerin ÇBE davranışını açıklamak için yapılan çalışmalar, bu modellerden herhangi birinin en iyi olarak kabul edilemeyeceğini göstermiştir (Sangwal ve ark., 2003).

2.7.7. Enerji Yaklaşımı Modeli

Bu model, çentik deneylerinde harcanan enerji ya da çentme sırasında yapılan iş olarak tanımlanır. Enerjiler, yükleme-boşaltma ekseninin integrali alınarak hesaplanır.

Şekil 2.17. 'den görüldüğü gibi yükleme ekseninin altında kalan alan, çentme sırasındaki toplam W_T işi (enerjisi), boşaltma ekseninin altında kalan ise elastik işi (W_E) verir.



ekil 2.17. ematik $P-h$ e risi üzerinde W_T , W_p , W_E enerjilerinin gösterimi

Plastik i i ise E itlik (34) ile ifade edilir.

$$W_P = W_T - W_E \quad (34)$$

Stilwell ve Tabor, (1961) yılında çalı malarında enerji yakla ımıyla ilk kez malzemenin sertlik de erinin hesaplanabilece ini önermi lerdir. Buna göre geleneksel sertlik ifadesindeki yükün, olu an izin iz dü üm alanına oranı, W_P 'nin plastik olarak deforme olmu hacmine (V_P) bölümüne e it oldu unu göstermi lerdir.

$$\frac{Yük, P(N)}{Plastik Alan(m^2)} = \frac{Plastik Enerji, W_P(J)}{Plastik Hacim, V_P(m^3)} \quad (35)$$

W_T , yüklem e risinin integrali alınarak elde edilebilir. Genellikle, keskin bir çentici ile yapılan bir çentme deneyinde elastik-plastik bir malzemenin yüklem e risinin

$P=Ch^2$ denkleminde uyar. Burada C bir sabit, h ise girme derinli idir (Beegan ve ark., 2005).

$$W_T = \int_0^{h_{maks}} P(h)dh = \int_0^{h_{maks}} Ch^2 dh = \frac{P_{maks} h_{maks}}{3} \quad (36)$$

Elastik ve plastik enerjinin toplamı, W_T toplam enerjiye e ittir. Stilwell ve Tabor (1961), h_f/h_{maks} 'ın oranının W_P/W_T 'ye e it oldu unu göstermi lerdir. Bu ili ki E itlik (37) ile ifade edilir.

$$\frac{W_E}{W_T} = 1 - \frac{W_P}{W_T} = 1 - \frac{h_f}{h_{maks}} \quad (37)$$

Tuck ve ark. (2001), yaptıkları çalı mada sertli in enerji yakla ımı ile hesaplanabilece ini göstermi lerdir.

$$H_W = \frac{P_{maks}^3}{9W_P^2} \quad (38)$$

E itlik (38) ile verilen bir sabit olup Berkovich çentici için 0,0408'e, Vickers çentici için 0,0378'e e ittir. Ayrıca indirgenmi elastik modülü hesabı için E itlik (39) öne sürülmü tür (Oliver ve Pharr, 2004; Mukhopadhyay ve ark., 2001).

$$\frac{W_E}{W_T} = 5 \left(\frac{H}{E_r} \right) \quad (39)$$

Hesaplamlarda kontak derinli ine ihtiyaç duyulmaması bu yakla ım için büyük avantaj sa lar. Bu avantaj sayesinde sertlik (H) ve indirgenmi elastite modülü (E_r) hesaplamaları, çentme i lemi sırasında olu an yı ılma ve çökme durumlarından etkilenmez.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Numunelerin Üretilmesi

Numunelerin tamamı amorf B (Bor) tozu, Malik asit ($C_4H_6O_5$) tozu (katı formda) ve tolüen (çözücü olarak kullanılan sıvı) kullanılarak hazırlanmıştır. Başlangıçta B, Malik asit ve tolüeni cam kapta karıştırılmıştır. Tolüenin sıvı formda olması nedeniyle çamurumsu bir görünümü sahip olacaktır. Cam kapları ilk ısıtım için, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki vakumlu etüv fırını altında 3 saat bekletilmiştir. Sonuçta öngörülen uygun miktarda ki Mg tozu (%5 ilave Mg) eklenmiştir. Homojen karışım 1 saat karıştırılmış ve 10 ton basınç altında külçe halinde preslenmiştir.

İkinci ısıtım için numuneler tüp fırına (Ta folyaya sararak) yerleştirilmiştir. $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 2 saat bekletilmiştir. Tüm ısıtım boyunca 12 bar Ar gazı sürekli olarak verilmiştir. Sonraki 1,5 saat öngörülen ve 10 ton basınç altında preslenmiştir. Üçüncü ısıtım için numuneleri Ta folyaya sarılarak $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ de yarım saat bekletilmiştir. Numunelere Malik asit katkısı ağırlıkça % 2, 4, oranında yapılmıştır (Savaşkan ve ark., 2014) bu tez çalışmasında kullanılan numuneler katkısız, %2 ve %4 malik asit katkılı olmak üzere 3 adettir.

3.2. Malzemenin Hazırlanması ve Parlatılması

Numunelere çentme testi yapılmadan önce bir takım ısıtımlardan geçmek zorundadır. Bu ısıtımlar kalıplama ve parlatma ısıtımları olarak iki aşamadan oluşmaktadır.

Kalıplama: Numunelerin çentme ısıtımlarından önce ilk olarak soğuk kalıplama ısıtımlarına tabi tutulurlar. Bu aşamada, 15 birim epoksi ve 2 birim sertleştirici karışım haline getirilerek, karışım 15 dakika boyunca karıştırıldı. Elde edilen bu karışım, önceden kalıp içine konulmuş numunelerin üzerine döküldü ve sertleştirici için yaklaşık 8 saat bekletildi.



ekil 3.1. Kullanılan kalıp malzemeleri ve kalıplanmış numune örneği

Parlatma: Çentme işlemine başlamadan önce numune yüzeylerinin parlatılması büyük bir önem arz etmektedir. Parlatma işleminin yapıldığı birkaç adımdan oluşmaktadır. Parlatma işleminde, numune yüzeyinde oluşan deformasyonu en aza indirebilmek için her adımda bir öncekinde kullanılan ağırdırıcıdan daha ince ağırdırıcı kullanıldı. Parlatma işlemi ekil 3.2’de gösterilen Gripo-2V cihazında yapıldı. İlk olarak numuneler sırasıyla 1000, 1200, 2400 meshlik zımpara kağıtlarına tutuldu. Bu işlemler sırasında, numunenin ısınmasını engellemek için zımpara kağıtlarına sürekli su tatbik edildi. Numuneler zımpara kağıtlarına tabi tutulduktan sonra, parlatma işlemi için suyla süspansiyon halinde bulunan farklı tane boyutlarına sahip elmas tanecikler kullanıldı. Sırasıyla, 3µm ve 1µm boyutlarındaki elmas süspansiyonları farklı çuhaların üzerine uygulandı. Bütün parlatma işlemlerinde çarkın devir hızı 320 devir/dk. olarak ayarlandı. İşlemler sonrasında numune yüzeyinde kalan parçacıkların çizici etkisini engellemek için, numuneler bol suyla yıkandı.



ekil. 3.2. Parlatma cihazı

3. 3. Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerin ncelenmesi

Numunelerin mekanik karakterizasyonu ekil 3.3' de gösterilen nano-çentme (UMT-NH2, Bruker) test cihazı kullanıldı. Çentik testinde Berkovich uç kullanılmı tır. Cihazın yük ve yer de i tirme hassasiyeti sırasıyla $\pm 0,1 \mu\text{N}$ ve $\pm 0,02 \text{ nm}$ ' dir. Analizler yükleme-bo altma (load-unload) modunda yapılmı tır. Yükleme-bo altma analizleri, 100, 200, 300, 400 ve 500 mN'luk yükler, uygulanarak malzemeye ait sertlik (H) ve indirgenmi elastik modülü (E_r) de erleri elde edilmı tır. Elde edilen de erlerin güvenilirli i artırmak için, her bir malzeme için ölçümler 5 defa tekrarlanmı tır. Ayrıca, iç sürtünme ölçümleri 50-500 mN yük aralı nda gerçekleştirildi.



ekil 3.3. Nano-çentik test cihazı (UMT/NH-2, Bruker)

3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Tez kapsamında üretilen numunelerin yapısal özellikleri, mikro yapılarının daha net görülebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Bu mikro yapı analizlerine yönelik incelemeler Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezi laboratuvarında yapılmış olup, SEM foto rafları, QUANTA FEG 450 model Taramalı Elektron Mikroskobuyla 20 kV potansiyeli altında alındı (ekil 3.4).



ekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu

3.5. X-İ ını Kırınım (XRD) Analizi

X-İ ını kırınımı analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Rigaku D/Max-III C difraktometresi (ekil 3.5.) kullanılarak yapıldı. Deneyde CuK ı ını (40 kV, 30 mA) kullanıldı ve ölçümler ölçüm aralı ı 20° 2 80° ve tarama hızı $0.2^{\circ}/\text{dak}$. olacak ekilde seçildi (Sava kan ve ark., 2014).



ekil 3.5. X-İ ını difraktometresi

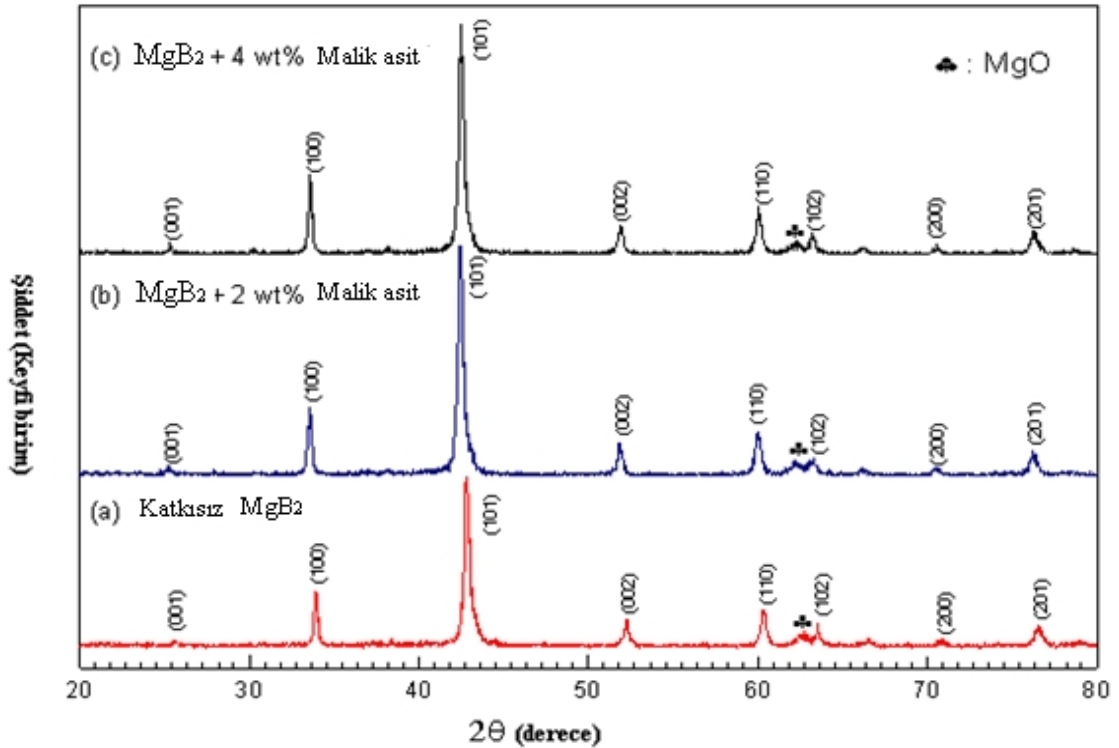
4. BULGULAR ve TARTI MA

Tez kapsamında, farklı miktarlarda (a .% 0, 2, 4) Malik asit içeren MgB₂ süperiletken numuneleri katıhal tepkime metodu ile üretildi. Numunelerin mekaniksel özellikleri Berkovich uçlu ultra dinamik nano çentik test cihazı kullanılarak karakterize edildi. Mekaniksel özelliklerin belirlenebilmesi için numunelere 100, 200, 300, 400, 500 mN'luk yükler uygulayarak yük-yer de i tirme e rileri elde edildi. Mekaniksel özelliklerin (sertlik ve indirgenmi elastisite modülü) belirlenmesi için Oliver-Pharr modeli kullanıldı. Oliver-Pharr modelinden elde edilen sertlik-yük de i imlerinin ÇBE davranı ı gösterdi i gözlemlendi. Malzemelerin gerçek sertli inin belirlenebilmesi amacı ile literatürde hacimsel (bulk) malzemeler için ço unlukla tercih edilen GOND modeli kullanıldı. ç sürtünme davranı ının belirlenmesi için 50-500 mN yük aralı nda 15 tekrarlı çevrim (cycle) testi yapılarak, numunelerin iç sürtünme katsayısı de rleri tespit edildi. Ayrıca, numunelere ait XRD ve SEM analizleri yapıldı. Elde edilen bu sonuçlar mekaniksel özellikler ile kar ıla tırılmalı olarak tartı ıldı.

4.1. X-ı ını Kırınımı (XRD) Analizleri

Katkısız MgB₂ ile a .%2 ve %4 Malik Asit (C₄H₆O₅) katkılı MgB₂ numunelerinin X-ı ınları kırınımı desenleri ekil 4.1'de gösterilmektedir. ekil 4.1'den görüldü ü üzere, 2 =62.2° ki küçük pik haricinde, di er piklerinin tamamı P6/mmm uzay grubuna ait hegzagonal MgB₂'ye aittir. MgO safsızlık fazı bütün numunelerde görülmektedir (Singh ve ark., 2014). ekil 4.1'den hesaplanan örgü parametreleri, c/a oranları, hücre hacimleri ve yarı maksimumdaki tam geni lik (FWHM) de rleri Çizelge 4.1.'de listelenmektedir. Çizelge 4.1.'den görüldü ü üzere malik asit oranıyla birlikte a ve c parametreleri azalmaktadır. c/a oranındaki de i me ise oldukça küçüktür. Literatürde, örgü parametrelerinde görülen bu azalma C atomlarının B bölgelerine yerle mesiyle açıklanmaktadır. Bunun ise ısıl i lem esnasında C₄H₆O₅'in bozunmasıyla ortaya çıkan C atomlarının MgB₂ örgüsüne yerle mesiyle gerçekleşti i ortaya konulmu tur (Kim ve ark., 2007; Hossain ve ark.,2007; Vajpayee ve ark., 2009; Maeda ve ark., 2011; Sava kan ve ark., 2014). Ayrıca, karbonun atom çapının borunkinden küçük olması sebebiyle, C atomunu B bölgesine yerle ti inde "a" örgü parametresinde

do al olarak bir azalma gözlenir (Qin ve ark., 2015). C' nun B ile yer de i tirmesi FWHM de erlerinden de anla ılabilmektedir (Çizelge 4.1.) Malik asit katkılı numunelerin FWHM de erleri katkısız numuneninkine göre bir miktar artmaktadır. Katkısız numunede 59,88'de görülen (110) pikinin, a .%4 malik asit katkılı numunede daha yüksek 60,04°' ye kayması, a-örgü parametresindeki azalmayı desteklemektedir (Sava kan ve ark., 2014).



4.1. Katkısız ve Malik asit katkılı numunelerine ait X-ı ınları kırınım desenleri

Çizelge 4.1. Katkısız ve Malik Asit katkılı MgB₂ tabletlerinin örgü parametreleri, örgü parametrelerinin oranları, hücre hacimleri ve yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) de erleri

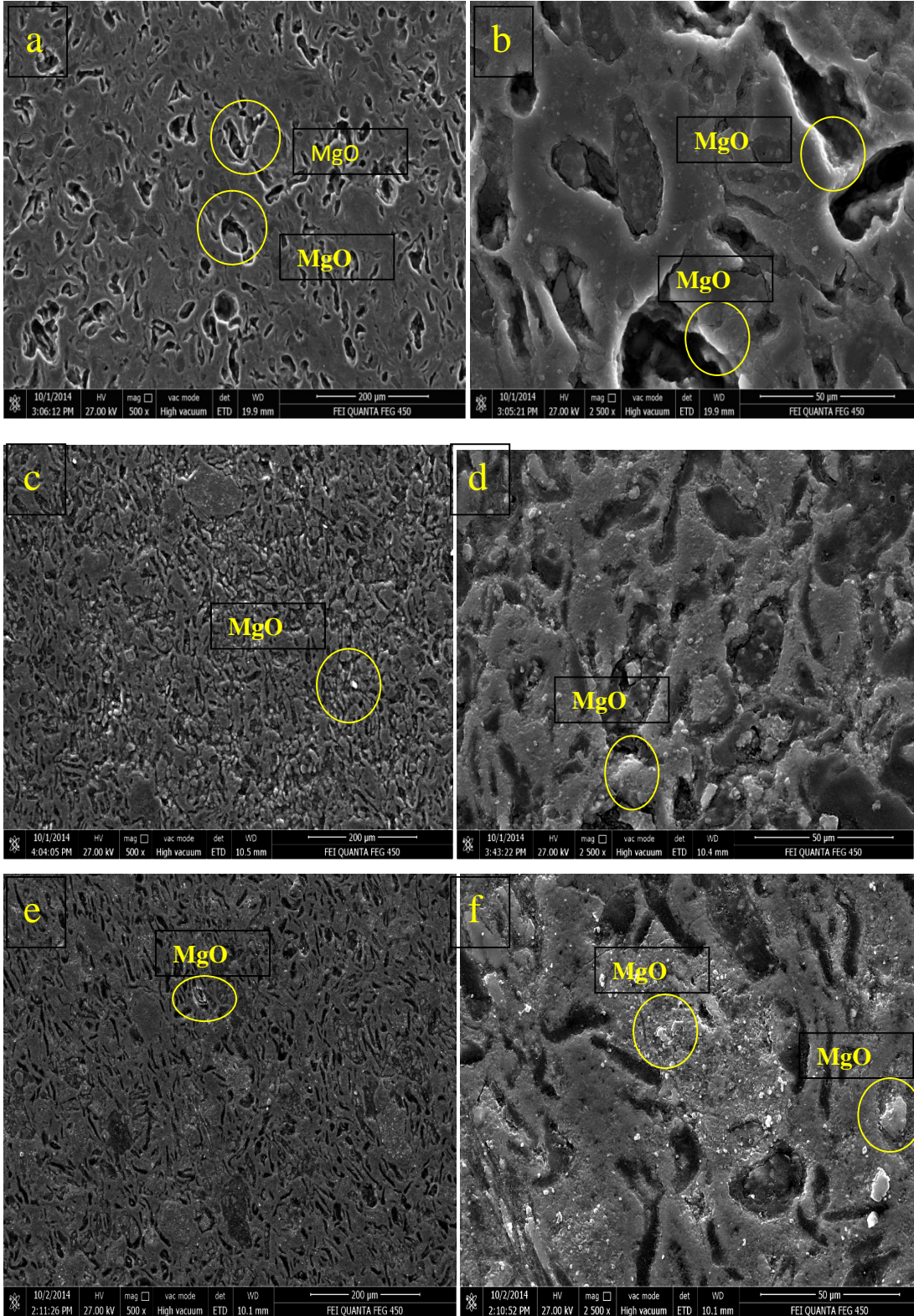
Malik asit (C ₄ H ₆ O ₅) katkısı (a . %)	Kafes parametreleri		c/a	Hücre hacimleri (Å) ³	FWHM (°)		
	a (Å)	c (Å)			(002)	(110)	(100)
0	3.0876	3.5320	1.1439	29.16	0.286	0.295	0.222
2	3.0807	3.5256	1.1444	28.98	0.320	0.382	0.271
4	3.0801	3.5206	1.1430	28.92	0.312	0.375	0.242

4.2. SEM Analizi

ekil 4.2.' de numunelere ait dü ük (500X) ve yüksek büyütmelelerde (2500X) alınan SEM görüntüleri verilmektedir. Katkısız numunenin büyük taneli bir mikro yapıya sahip oldu u görülmektedir (ekil 4.2a,b). ekil 4.2 c,d'de gösterilen a .%2 Malik asit katkılı numunede ise tane boyutunun büyük oranda azaldı ı görülmektedir. Malik asit katkısı a .%4'e çıktığı nda tane boyutunun (ekil 4.2 e,f), Katkısız numune ile a .%2 katkılı numune arasında oldu u saptanmıştır. Söz konusu sonuçlar Debye-Scherrer formülü (E itlik 40) ile uyum içerisindeydir.

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta} \quad (40)$$

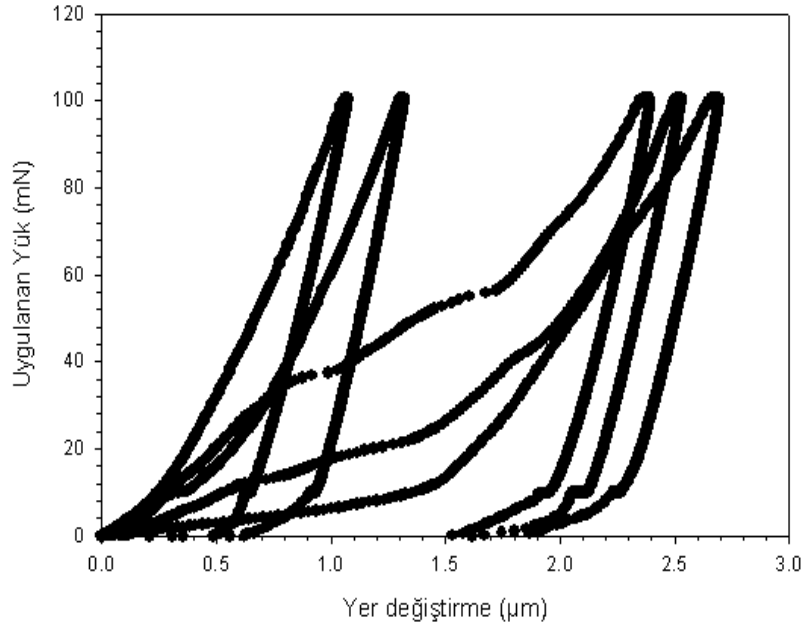
Burada, B; yarı maksimumdaki tam genişlik, t; tane boyutu, λ ; gelen ışığın dalga boyudur. Bu denkleme göre yorum yapıldığında x-ışınları sonuçları ile SEM sonuçları uyum içerisindeydir. X-ışınları sonuçları incelendiğinde %2 ve %4 Malik asit katkılı numunelerdeki yarı maksimumdaki tam genişliğin arttığı görülmüştür. Buna göre de kristalin tane boyutu Katkısız numuneye göre azalacağı beklentisi SEM analizleri ve Debye-Scherrer formülü ile de desteklenmektedir. Katkısız, %2 ve %4 Malik asit katkılı numune yüzeylerinde görülen beyaz noktaların, XRD kırınım desenlerinde tespit edilen MgO fazına ait olduğunu düşünmekteyiz. Ayrıca, numunelerin mikro yapılarında görülen boşlukların malik asit katkılı numunelerde büyük oranda azaldığı görülmektedir.



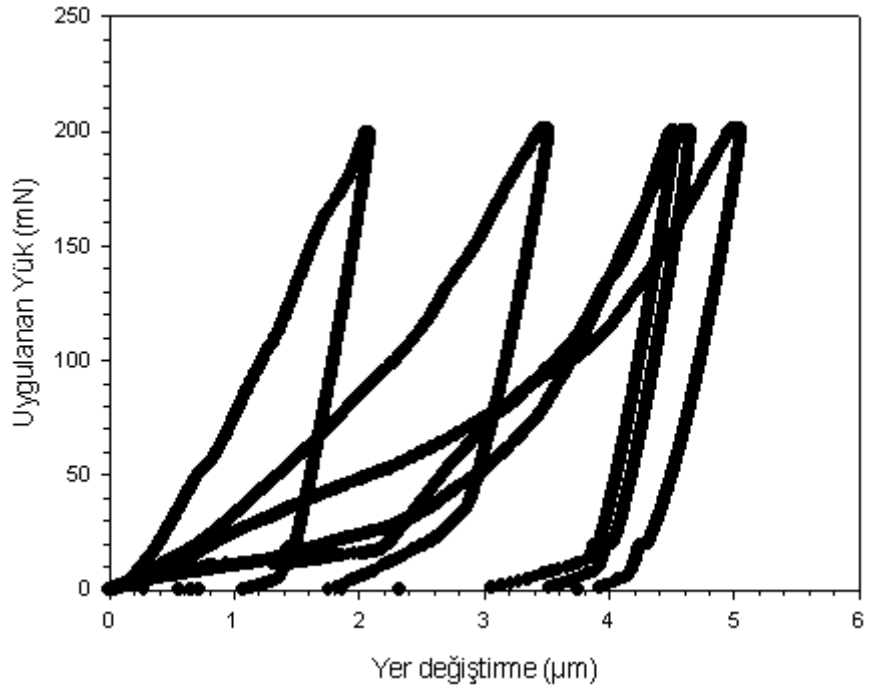
ekil 4.2. Katkısız (a,b), %2 Malik asit katkılı (c,d), %4 Malik asit katkılı (e,f) MgB₂ numunelerine ait düşük (500X) ve yüksek büyütmelerde (2500X) alınan SEM görüntüleri

4.3. Mekanik Karakterizasyon (Nanoçentme Analizi)

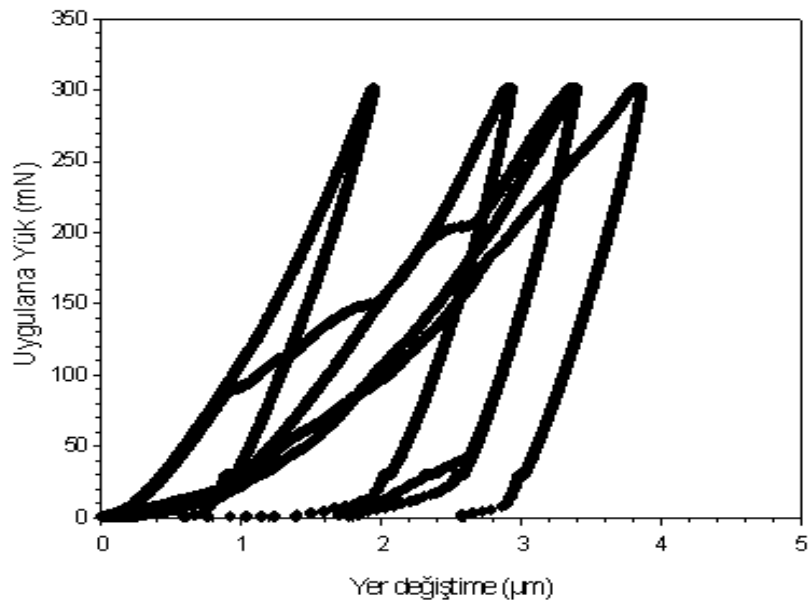
ekil 4.3-4.17.'de her bir numune için farklı maksimum yüklerdeki (100, 200, 300, 400 ve 500 mN) yük-yer de i tirme e rileri gösterilmektedir. Numunelerin farklı bölgelerinden elde edilen yük-yer de i tirme e rileri incelendi inde hepsinin benzer bir davranı (elasto-plastik) sergiledi i görülmektedir. Bunun yanında bazı ölçümlerde malzemelerde ortaya çıkan mikro çatlakların sebep oldu u süreksizliklerde gözlenmi tir.



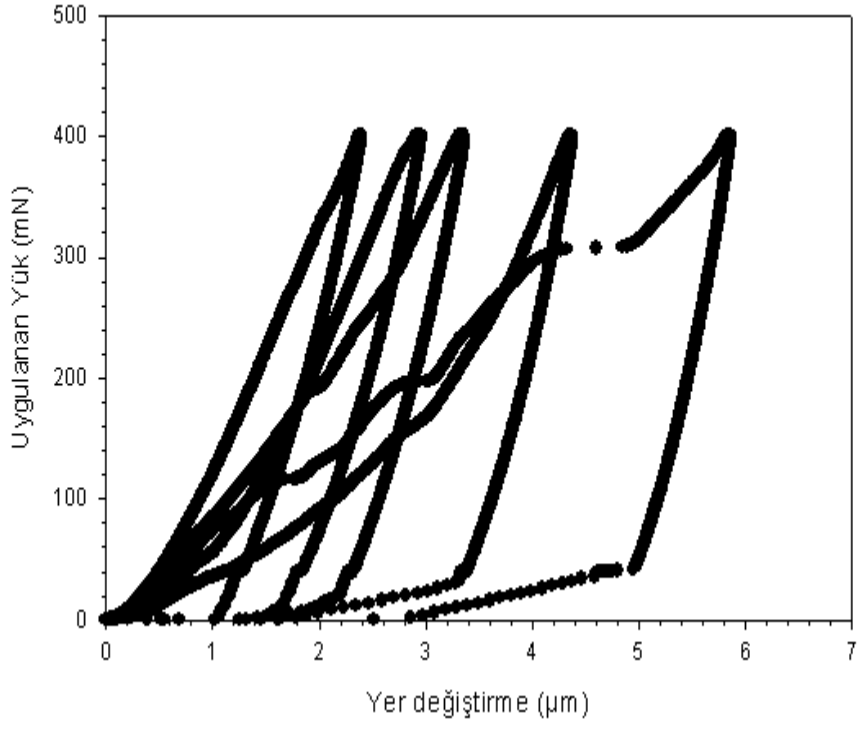
ekil 4.3. Katkısız MgB₂ numunesinin 100 mN yük-yerde i tirme e risi



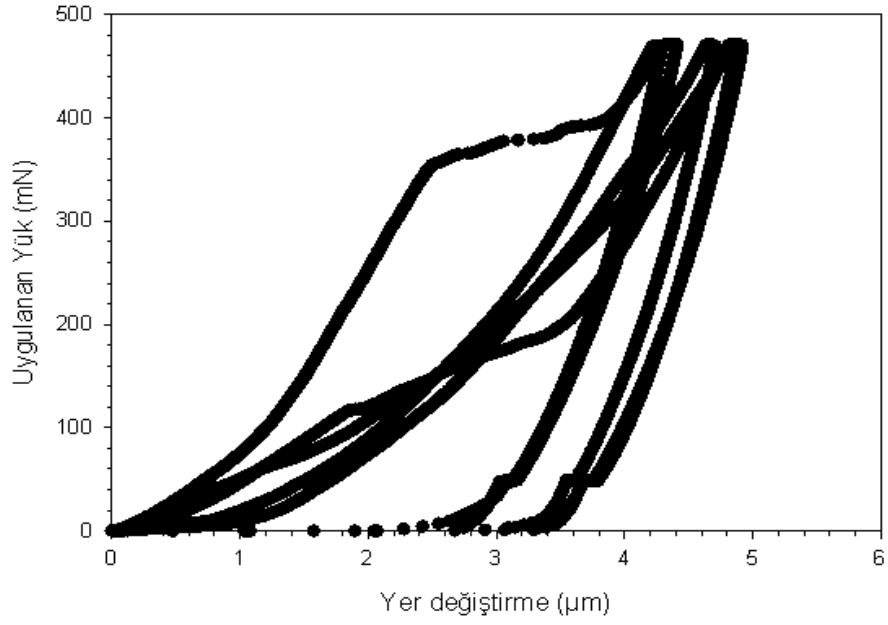
ekil 4.4. Katkırsız MgB₂ numunesinin 200 mN yük-erde i tirme e risi



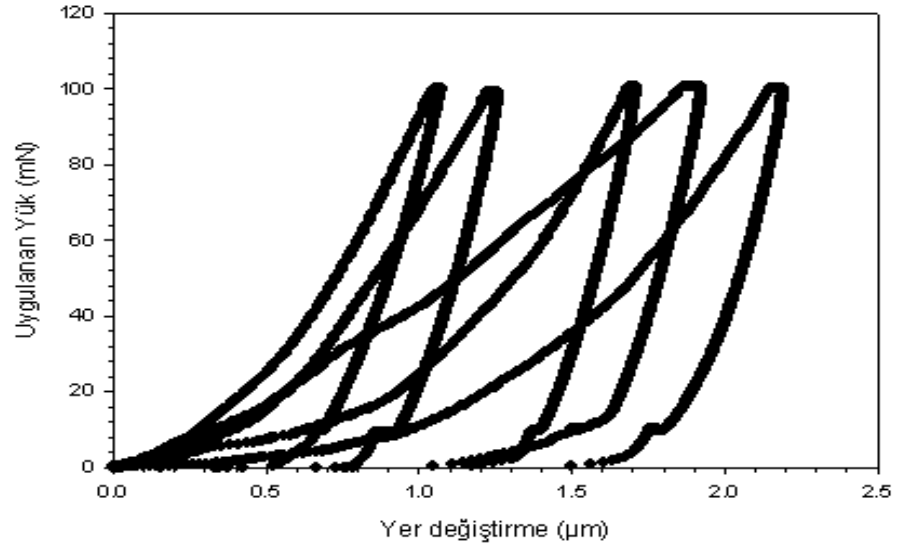
ekil 4.5. Katkırsız MgB₂ numunesinin 300 mN yük-erde i tirme e risi



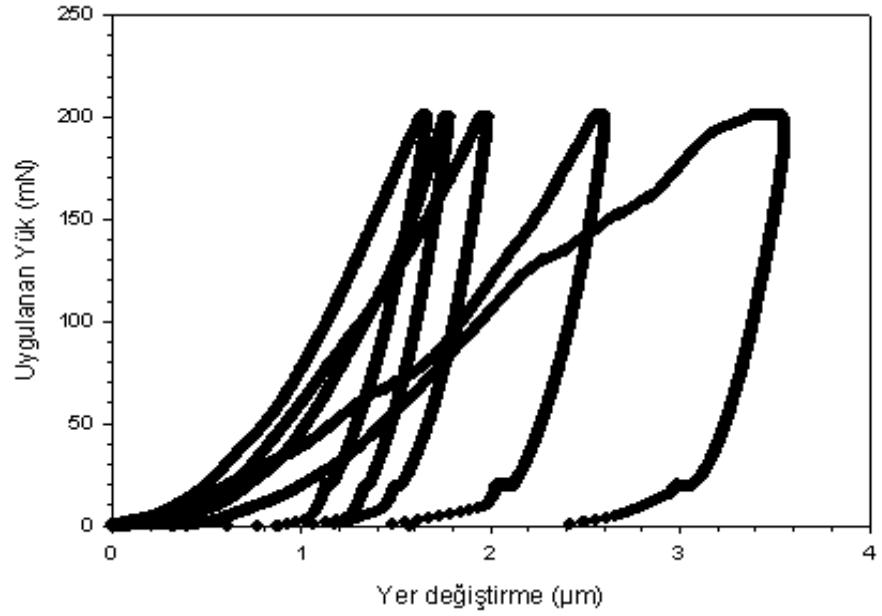
ekil 4.6. Katkırsız MgB₂ numunesinin 400 mN yük-erde i tirme e risi



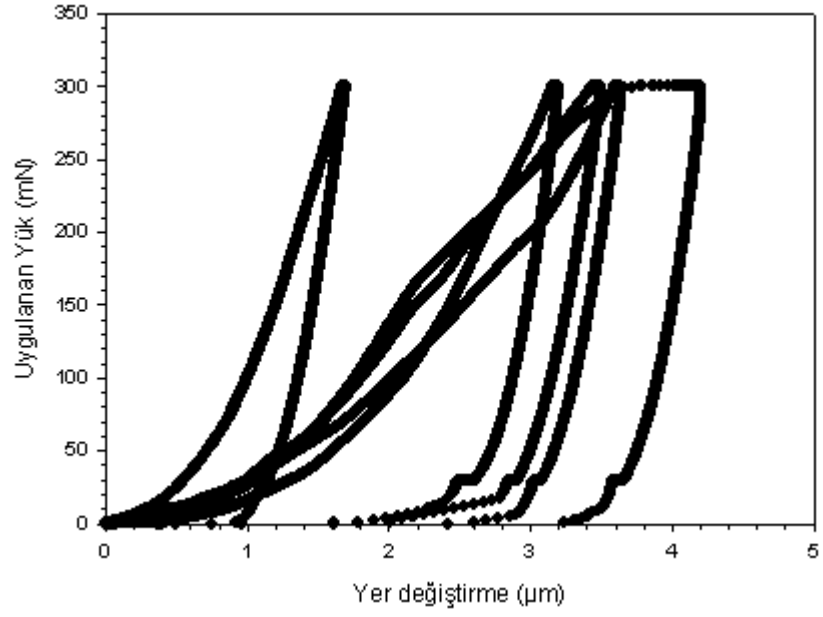
ekil 4.7. Katkırsız MgB₂ numunesinin 500 mN yük-erde i tirme e risi



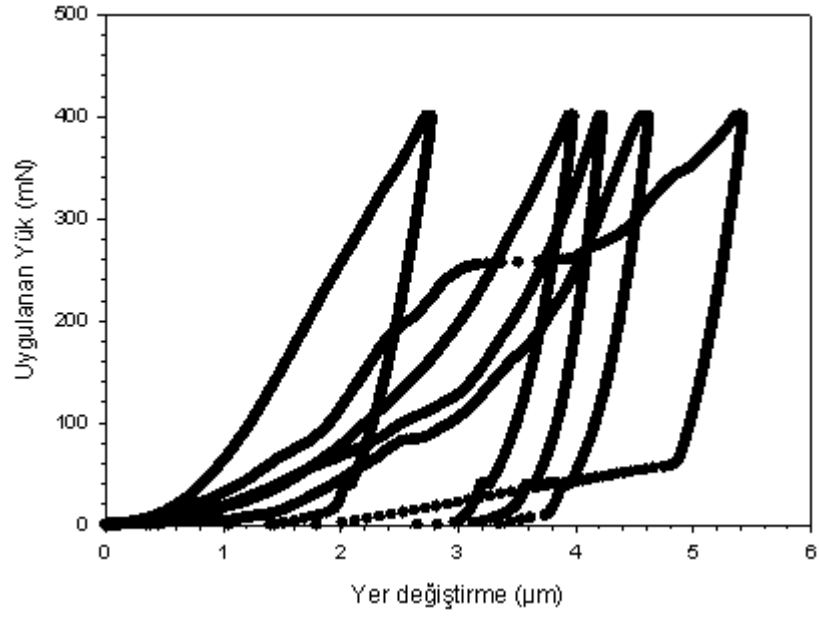
ekil 4.8. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 100 mN yük-yerde i tirme e risi



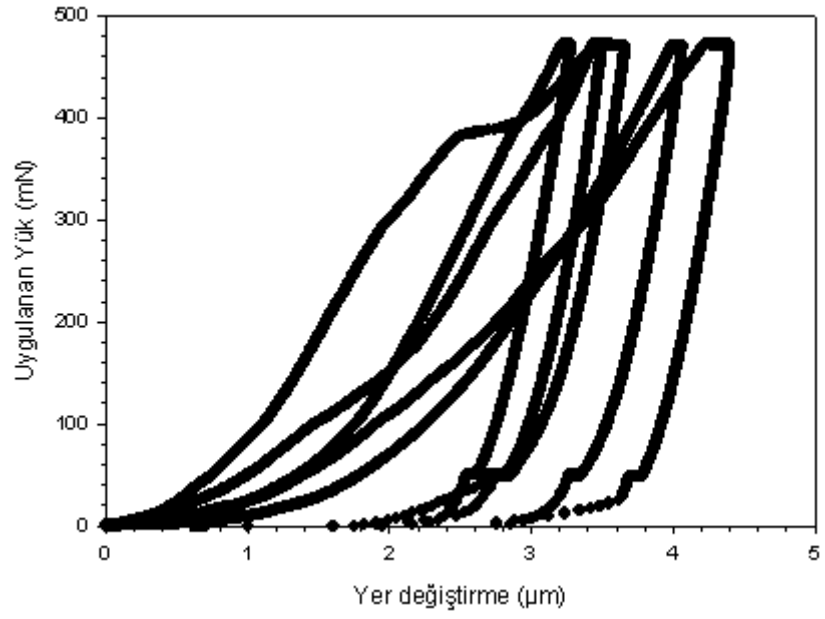
ekil 4.9. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 200 mN yük-yerde i tirme e risi



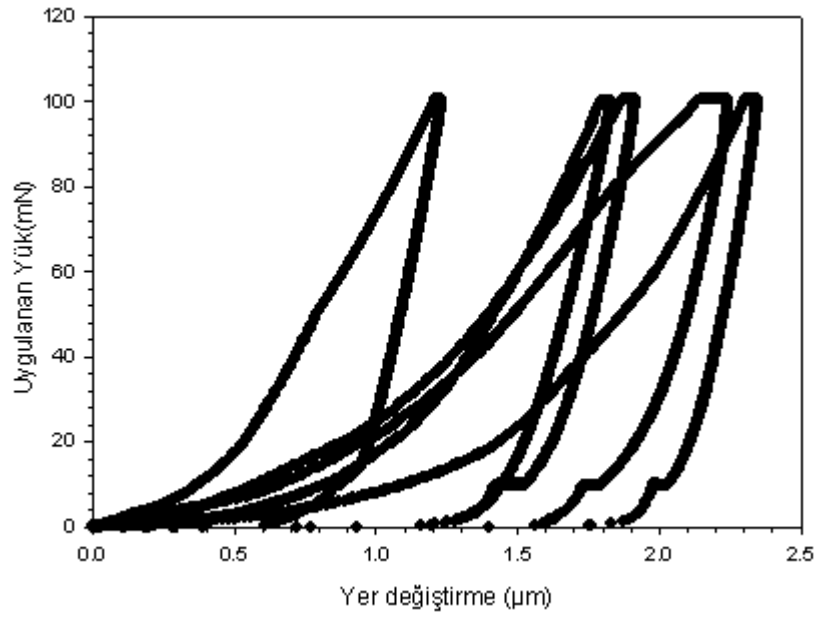
ekil 4.10. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 300 mN yük-yerde i tirme e risi



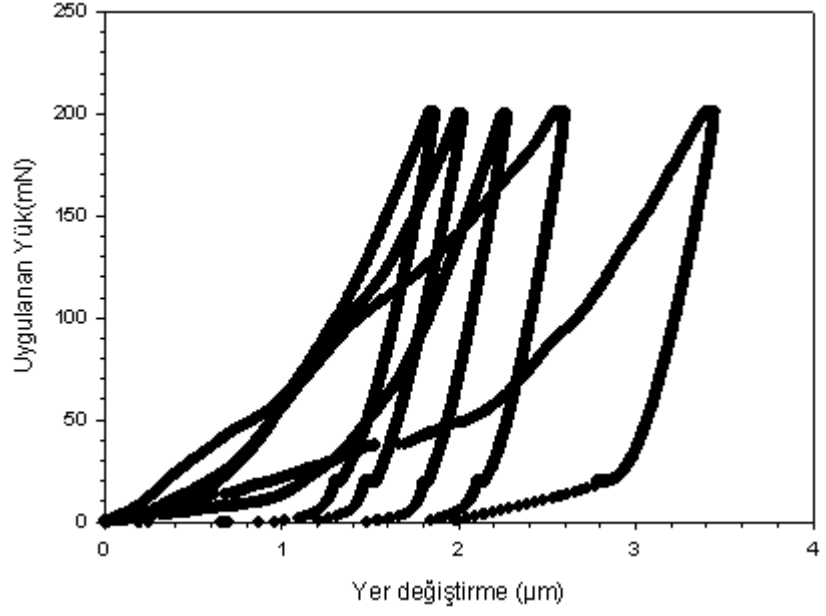
ekil 4.11. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 400 mN yük-yerde i tirme e risi



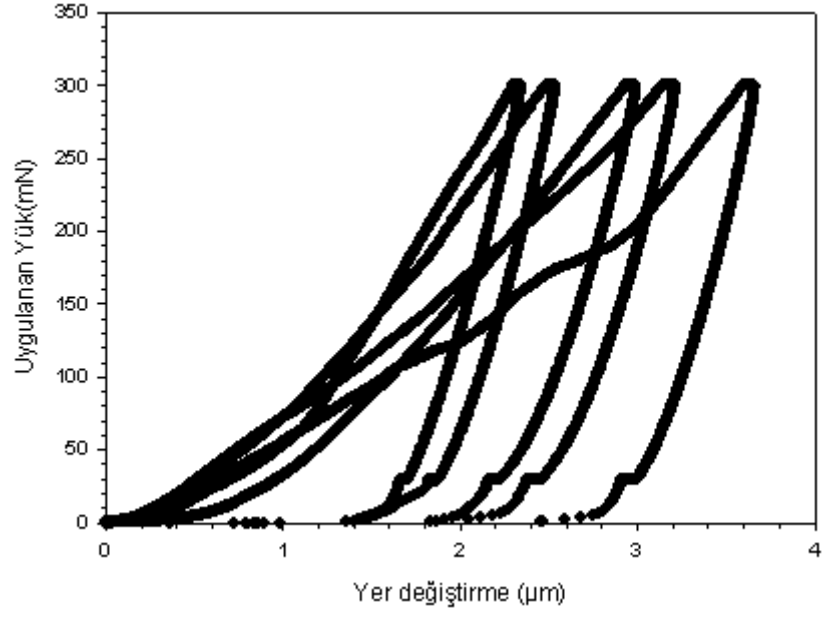
ekil 4.12. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 500 mN yük-yerde i tirme e risi



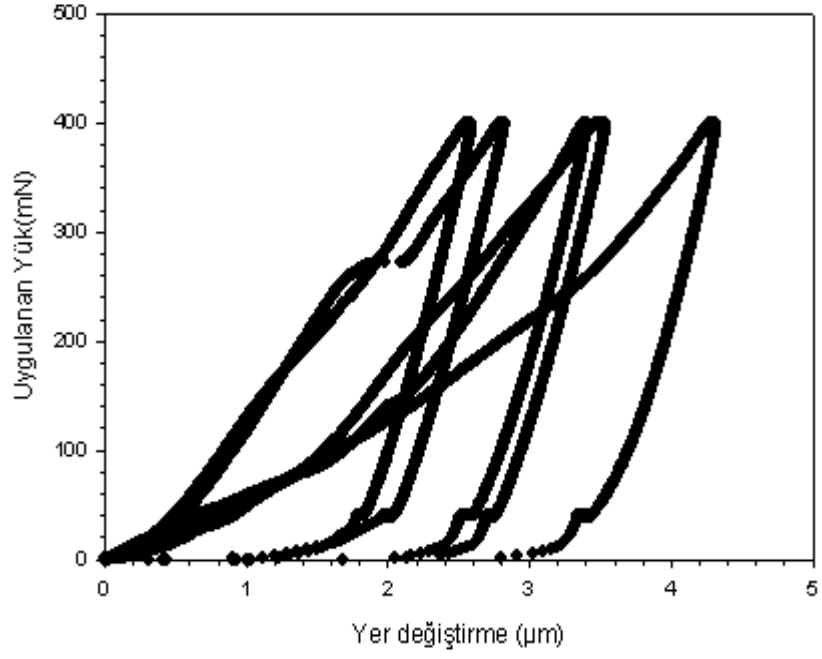
ekil 4.13. %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 100 mN yük-yerde i tirme e risi



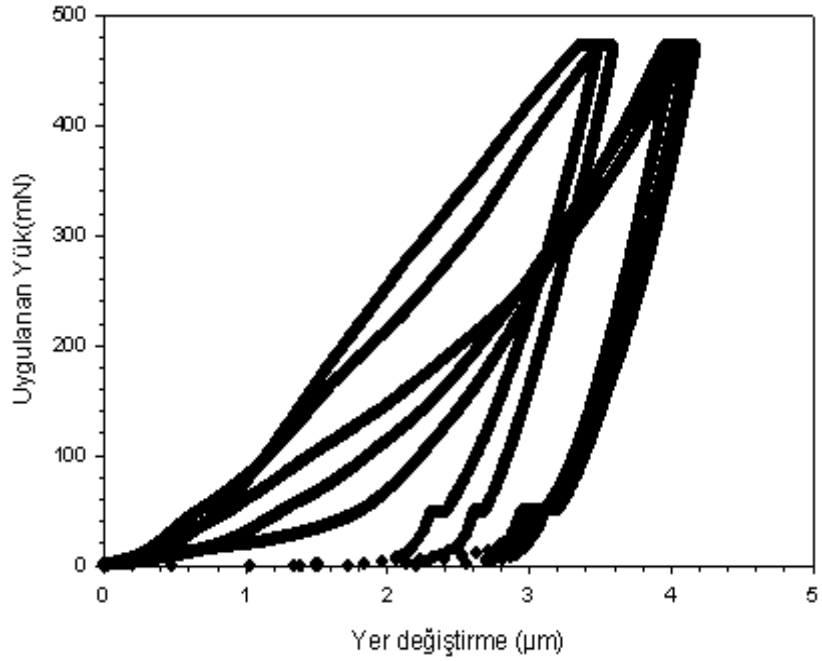
ekil 4.14. %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 200 mN yük-yerde i tirme e risi



ekil 4.15. %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunesinin 300 mN yük-yerde i tirme e risi

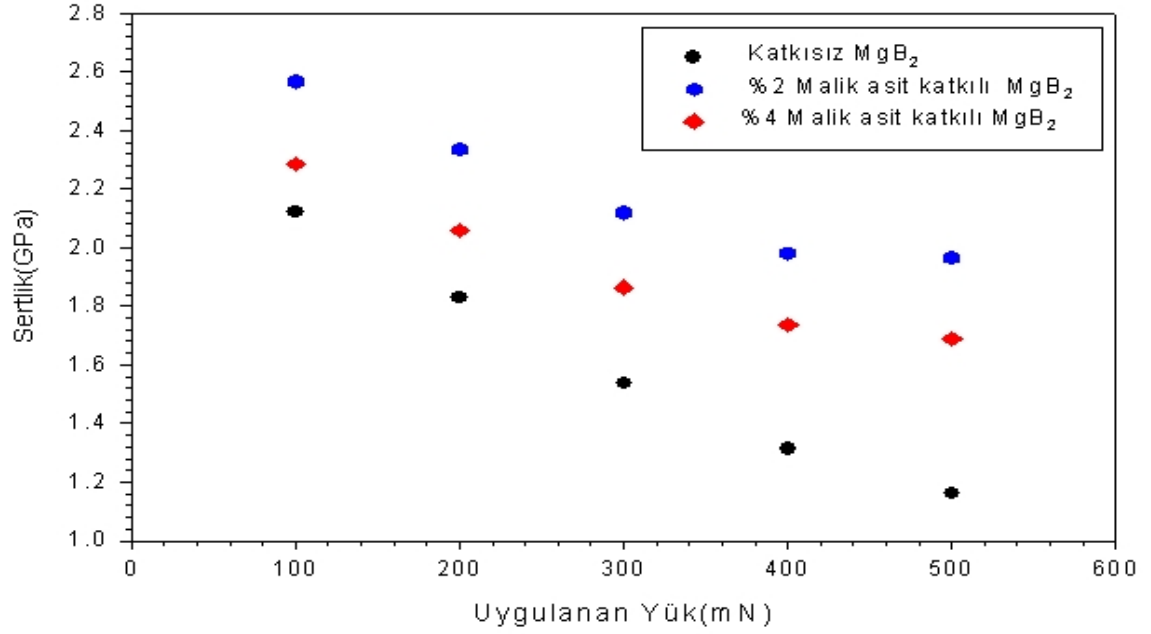


ekil 4.16. %4 Malik asit katkı MgB₂ numunesinin 400 mN yük-yerde i tirme e risi



ekil 4.17. %4 Malik asit katkı MgB₂ numunesinin 500 mN yük-yerde i tirme e risi

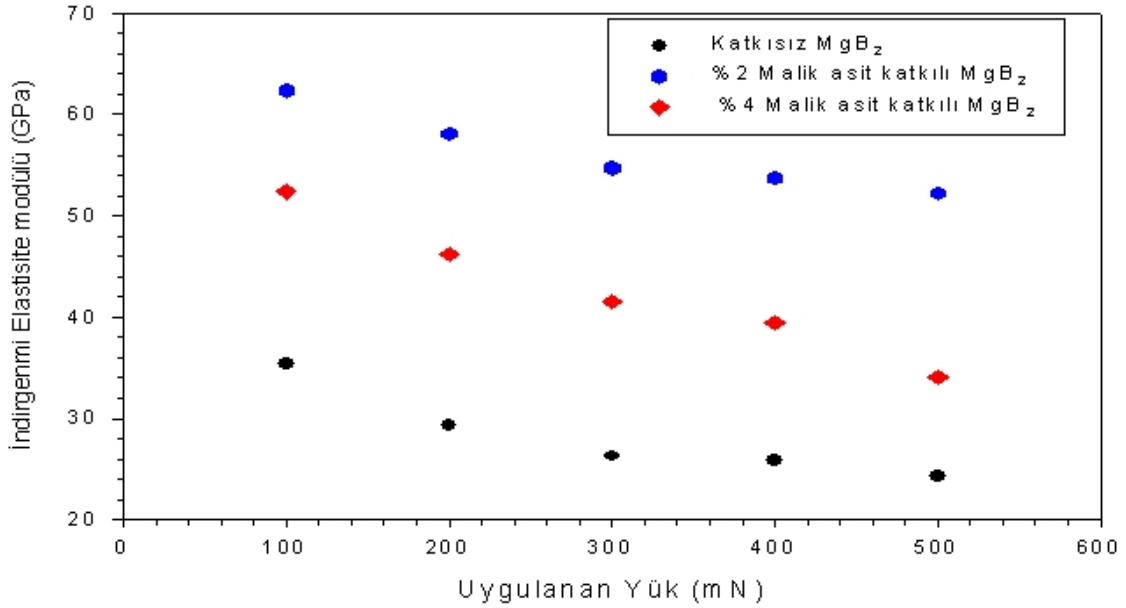
Numunelerin sertlik ve indirgenmi elastisite modülü de erleri, yük-yerde i tirme e rilerinin Oliver-Pharr yakla mıyla analiz edilmesinden hesaplanmı tır. Yapılan hesaplamalar sonucunda sertli in yüke ba lı de i imi ekil 4.18.'de gösterilmektedir.



ekil 4.18. Sertli in yüke ba lı de i imi

ekil 4.18.'den görüldü ü gibi sertlik de erlerinin artan yükle birlikte ekspanansiyel bir biçimde azaldı ı görülmektedir. Bu olay literatürde iyi bilinen çentik boyut etkisi (ÇBE) davranı ı olarak bilinmektedir (Nix ve Gao, 1998; Elmustafa ve Stone, 2002; Kölemen, 2006). Bu davranı biçimi tipi sadece süperiletken malzemelere ait bir davranı de ildir. Aynı zamanda, ala ım, tek kristal ve seramik malzemelerde de gözlenmi tir (Uzun ve ark., 2005; ahin ve ark., 2008, 2008). Numunelere ait sertlik de erlerindeki de i imi etkileyen nedenler; batıcı uçun körlü ü, malzeme yüzeyinde olu an oksitlenmeler, cihazın kalibrasyon yetersizli i, yüzey pürüzlülü ü, parlatma i lemi sırasında uygulanan zorlamalar, malzeme yüzeyinde meydana gelen i lem sertle mesi olarak gösterilmektedir (Uzun ve ark., 2010)

ekil 4.18. ayrıca incelendi inde malik asit katkılı numunelerin, Katkısız MgB₂ numunesinden daha yüksek sertlik de erine sahip oldu u görüldü. ekilden görüldü ü gibi a .%2 katkılı numunenin sertlik de eri, a .%4 katkılı numunenin sertlik de erinden daha yüksek oldu u görülmektedir.



ekil 4.19. indirgenmi Elastisite modülünün yüke ba lı de i imi

Numunelere ait indirgenmi elastisite modülünün yüke ba lı de i imi ise ekil 4.19.' da gösterilmektedir. Sertli in yüke ba lı de i iminden gözlenen eksponansiyel azalma davranı indirgenmi elastisite modülü de erlerinde de gözlenmektedir. Malzemelerin sertlik ve indirgenmi elastisite modülü davranı larındaki de iimin benzer e ilimi göstermesi literatürde var olan çalı malar da gözlenen bir sonuçtur (Kölemen ve ark., 2006; ahin ve ark., 2008).

ekilden görüldü ü gibi uygulanan yük arttıkça, indirgenmi elastisite modülü de erlerinde azalma oldu u görülmektedir. Aynı zamanda, malik asit katkısıyla birlikte indirgenmi elastisite modülü de erlerinde bir artı söz konusudur. Sertlik ve indirgenmi elastisite modülünün yüke ba lı de i iminden (ekil 4.18 ve ekil 4.19), a .%2 katkılı numunenin, a .%4 katkılı numuneye göre daha yüksek sertlik ve indirgenmi elastisite modülü de erlerine sahip oldu u görülmektedir (Çizelge 4.2.).

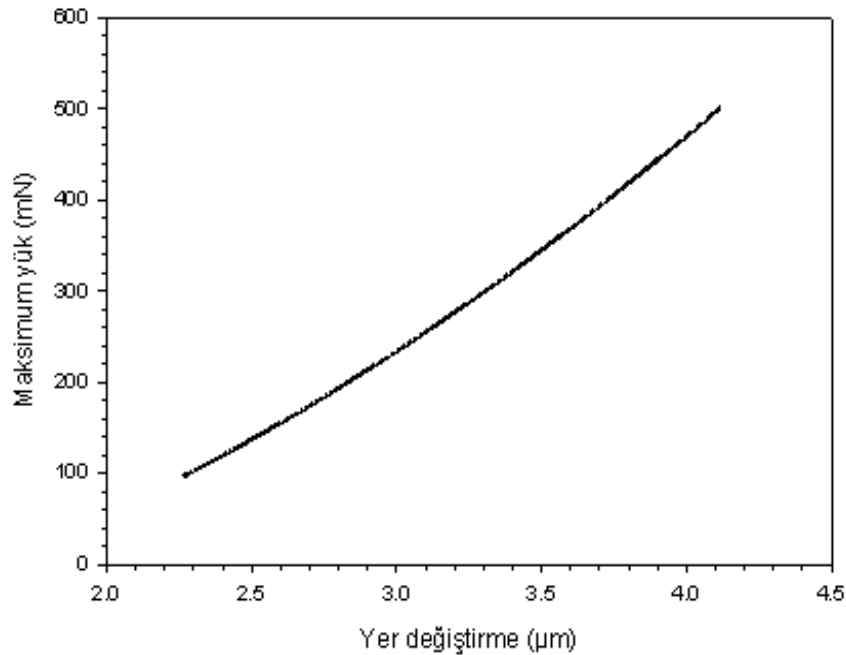
Literatürden bilindiği üzere malzemelerin mekaniksel özellikleri tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. İnce taneli bir yapıya sahip olan malzemenin mukavemeti, kaba taneli bir yapıya sahip olan malzemedən daha yüksek de ere sahiptir. Bu yüksek de ere sebebiyet veren özellik, ince yapılı tanelere sahip olan kristallerin tane sınırlarının fazla olu udur. Bununla beraber malzemelerdeki bu tane sınırları, dislokasyonların hareketini engellemeye çalı an birer bariyer olarak görev yapar. Buna göre, malzemelerde tane sınırının fazla olması, dislokasyon birikmesine neden olacaktır. Dislokasyon birikmesi fazlala tıkça, malzemelerin mukavemetinde artı olması beklenen bir sonuçtur. Dolayısıyla a .%2 Malik asit katkılı numunenin en yüksek sertlik de erinde olması, di er malzemelere göre daha ince taneli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, SEM görüntüleriyle (bkz. ekil 4.2) desteklenmektedir.

Çizelge 4.2. Katkısız ve Malik asit katkılı MgB₂ numunelerine ait sertlik ve elastisite modülü de erleri

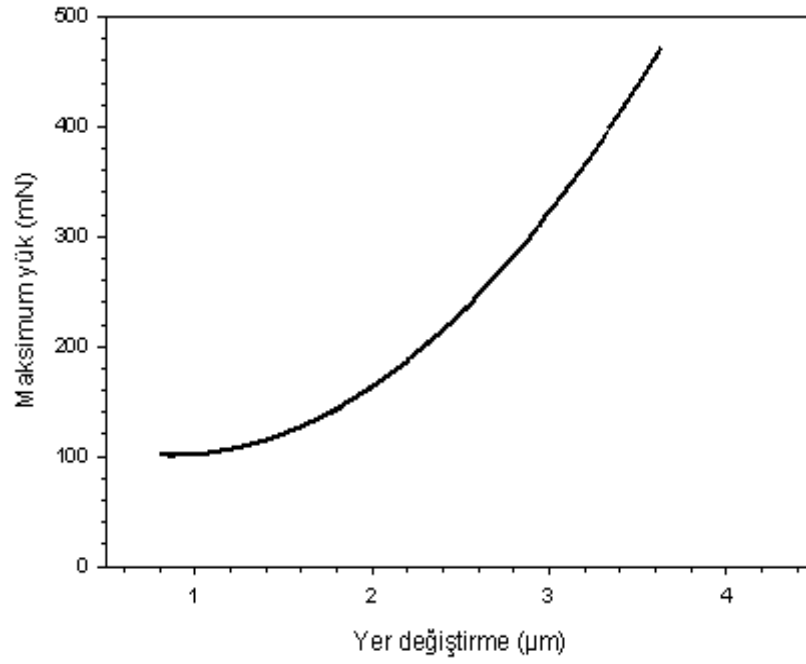
Uygulanan Yük (mN)	Katkısız MgB ₂ numunesinin Sertlik de eri (GPa)	Katkısız MgB ₂ numunesinin ndirgenmi elastisite modülü (GPa)	a .%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin Sertlik de eri (GPa)	a .%2 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin ndirgenmi elastisite modülü (GPa)	a .%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin Sertlik de eri (GPa)	a .%4 Malik asit katkılı MgB ₂ numunesinin ndirgenmi elastisite modülü (GPa)
100	2.1202	35.4016	2.5663	62.3712	2.2862	52.3780
200	1.8266	29.2676	2.3356	58.1090	2.0602	46.2426
300	1.5379	26.2767	2.1196	54.6883	1.8638	41.5471
400	1.3130	25.8998	1.9794	53.7175	1.7368	39.4396
500	1.1621	24.2785	1.9654	52.2241	1.6875	34.1366

ekil 4.18'deki sertlik de erlerindeki gözlenen de i im, üzerinde çalı tı ımız malzemelerin tek bir sertlik (do ru sertlik) de erinin belirlenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmı tır.

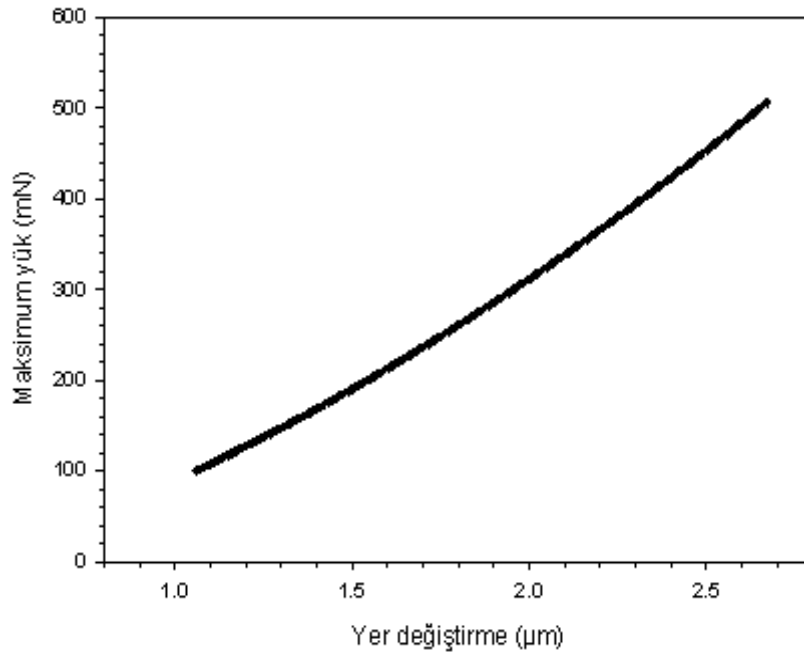
Literatürde, Kölemen ve ark., 2006; Toplu ve ark., 2015; Barakat ve ark., 2015 yaptığı ara tırmalarda seramik malzemelerin bir ço unda da buna benzer davranı gözlemi ve gerçek sertlik de erinin bulunması için GOND modelini uygulamı lardır. ekil 4.20-4.22’ de numunelere ait P-h e rileri gösterilmektedir. GOND modeline göre gerçek sertlik de eri P’nin h_c ’ ye göre grafi i çizilerek elde edilen e rinin fit de eri (a2), kullanılarak E itlik (32) ile hesaplanmı tır. Yapılan hesaplamalardan elde edilen gerçek sertlik de erleri sonuçları % 0, %2 ve %4 Malik asit katkılı malzemeler için sırasıyla 1.15GPa, 1.98GPa ve 1.66GPa eklindedir. Literatürdeki ara tırmalardan sertlik de erlerinin artan yükte beraber azaldı ı ve daha sonra büyük yük de erlerinde ise platoya ula cak ekilde bir davranı sergiledi i bilinmektedir. Bu plato bölgesine kar ılık gelen sertlik de erinin ise gerçek sertlik de eri oldu u (Quinn ve Quinn, 1997; Kölemen ve ark., 2006) ve bunun GOND modelinden elde edilen sertlik de erine kar ılık geldi i belirtilmi tir (Kölemen, 2006;, Kölemen ve ark., 2006). Dolayısıyla çalı mamızda GOND modelinden elde etti imiz 1.15GPa, 1.98GPa ve 1.66GPa sertlik de erlerinin ekil 4.18’ deki plato de erlerine yakın bir de er de oldu u açıkça görülmektedir.



ekil 4.20 Katkısız MgB₂ numunesine ait P-h_c ‘ göre grafi i



ekil 4.21. %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesine ait P-h_c ' göre grafi i



ekil 4.22. %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunesine ait P-h_c ' göre grafi i

Çizelge 4.3’ de numunelerimize ve literatürden alınan farklı MgB₂ numunelere ait sertlik değerleri gösterilmektedir. Çizelge 4.3’ den görüldüğü gibi üzerinde çalıtımlı numunelerin sertlik değerleri, bir çok numuneye kıyasla daha düşük sertlik değerine sahiptir. Bilindiği üzere malzemelerin sertlik değeri yükseldikçe, daha kırılğan bir yapıya sahip olmaktadır. Bu nedenle üzerinde çalıtımlı numunelerin sertlik değerlerinin düşük olması, literatürde üzerinde çalıtıma yapılan diğer numunelere kıyasla daha esnebilir ve bükülebilir bir yapıya sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Bu yüzden üzerinde çalıtımlı malzemelerin uygulama alanında, tel ve erit yapımında daha faydalı olacaktır sonucu açık bir şekilde görülmektedir.

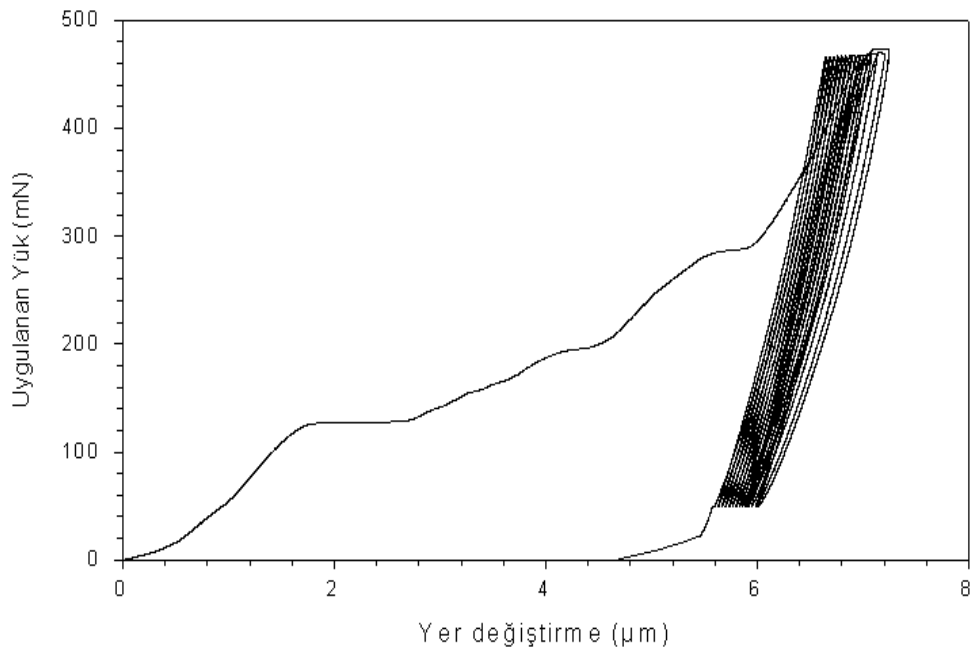
Çizelge 4.3. Literatürden alınmış farklı numunelere ait sertlik ve elastisite modülü değerleri

Malzeme	Literatür	Ölçüm Methodu	Yük Aralığı (mN)	Sertlik (GPa)	Gerçek sertlik değeri (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
MgB ₂	Sunulan çalıtıma	Nanoçentme	100-500	2.12-1.16	1.15	35.40-24.27
~%2 C ₄ H ₆ O ₅ + MgB ₂	Sunulan çalıtıma	Nanoçentme	100-500	2.56-1.96	1.98	62.37-52.22
~%4 C ₄ H ₆ O ₅ + MgB ₂	Sunulan çalıtıma	Nanoçentme	100-500	2.28-1.68	1.66	52.37-34.13
MgB ₂	Uzun ve ark., 2008	Dinamik Ultra Mikro Sertlik	300-1500	_____	1.59	13.27
MgB ₂ ince filmi	Ozmetin ve ark., 2015	Nanoçentme	100-400	_____	11.72	178.13
MgB ₂	Kölemen, 2006	Dinamik Ultra Mikro Sertlik	300-1500	10.29-4.33	_____	_____

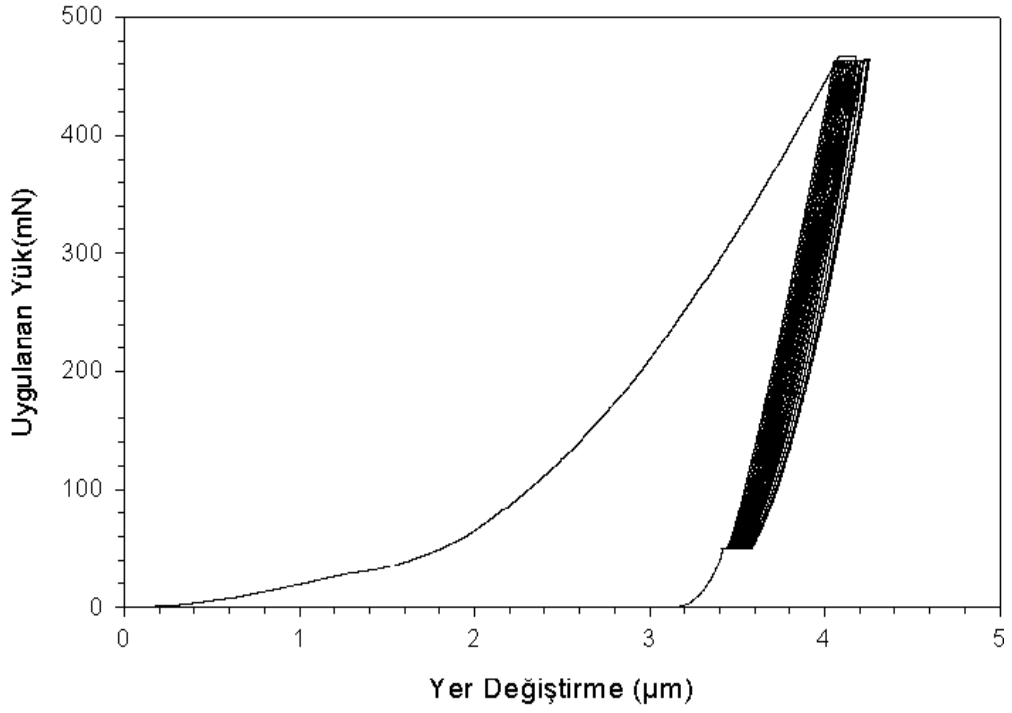
4.4. Çevrim (Cycle) Testi Analizi

Çevrim testinde, batıcı uç belirli bir minimum (50 mN) ve maksimum (500 mN) yük değerlerinde malzeme yüzeyine batırılır ve çıkarılır. Çevrim testi işleminden sonra, her çevrimde kaybolan enerji hesaplanabilmektedir. Her çevrimde kaybolan enerji, malzemenin darbe (damping) sönümlenme özelliği hakkında bilgi verir. Çevrim

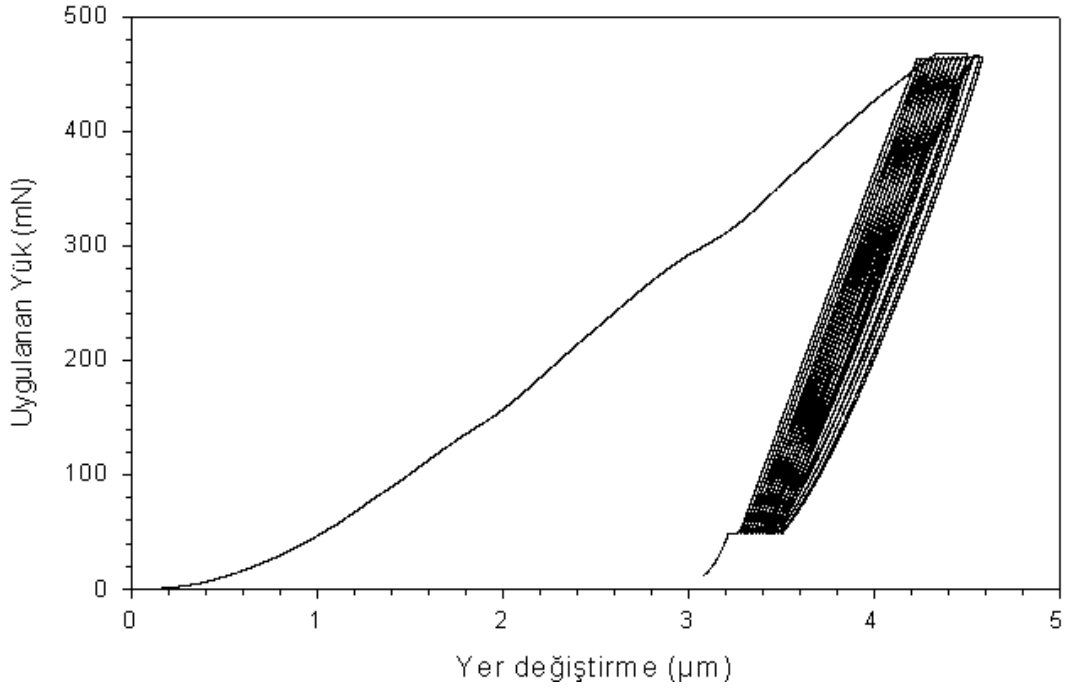
testlerinde darbe sönümlenme özelliğiyle ilgili olan iç sürtünme katsayısı hesaplanabilmektedir (Nagy ve ark., 2004; Uzun ve ark., 2010). Her çevrim ilerimden sonra bir miktar enerji kaybı görülmektedir. Bu enerji kaybının nedeni (bkz. Bölüm 2.5.3.) iç sürtünme (S) de erleriyle ilidir. ekil 4.23., ekil 4.24., ekil 4.25.'de Katkısız, %2 ve %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunelerine ait çevrim testlerinden elde edilen yük-yer de i tirm e rileri verilmektedir.



ekil 4.23. Katkısız MgB₂ numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük-yer de i tirm e rileri

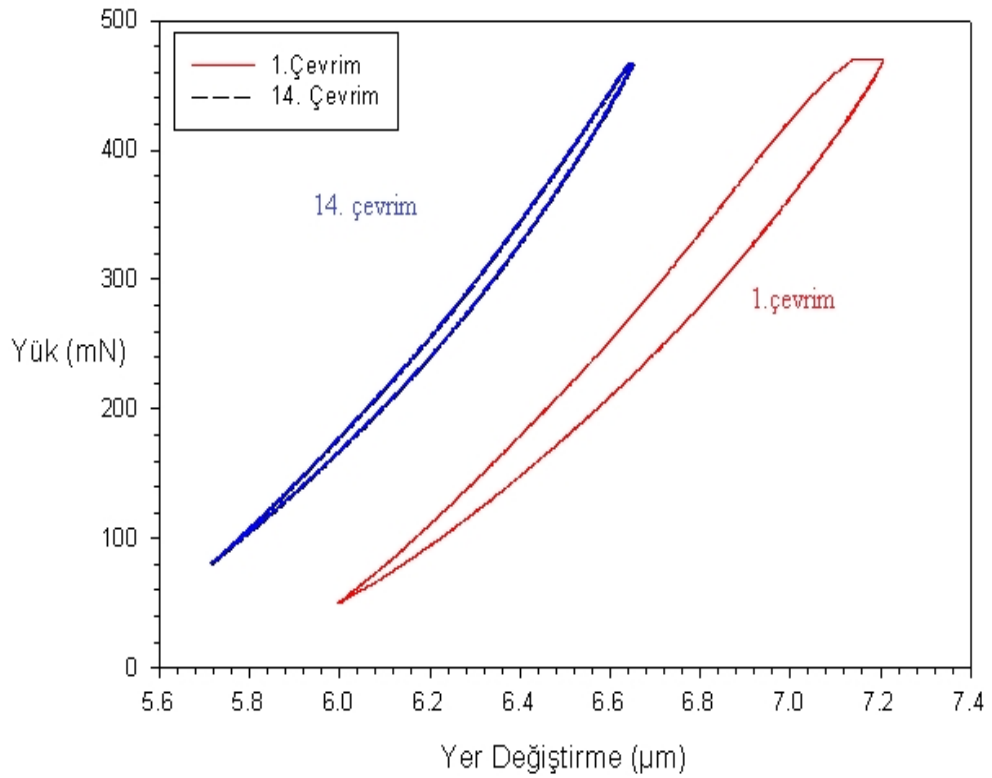


ekil 4.24. %2 Malik asit katkılı MgB_2 numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük- yer de i tirme e risi



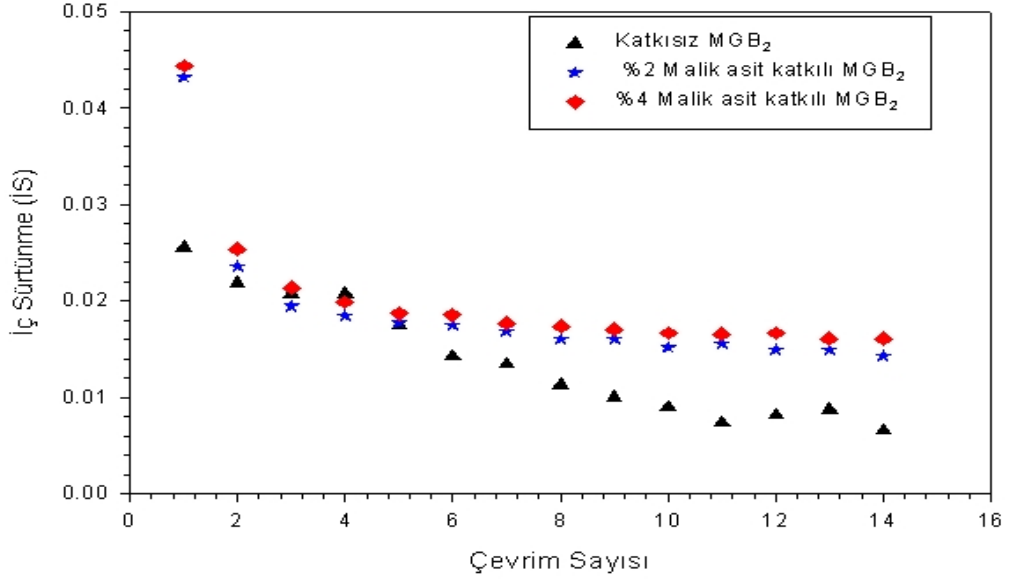
ekil 4.25. %4 Malik asit katkılı MgB_2 numunesine ait çevrim testlerinden elde edilen yük- yer de i tirme e risi

Her çevrimde elde olu an ilmek (loop) alanlarının, çevrim sayısı arttıkça azaldı ı görülmektedir. Olu an ilmek alanları, her çevrimde numune tarafından so urulan enerjiyi göstermektedir. ekil 4.26'de Katkısız MgB₂ numunesine ait 1'inci ve 14'üncü çevrimlerinden olu an ilmek alanları gösterilmektedir. Imek alanlarının giderek azaldı ı, 14'üncü çevrimde doyuma ula tı ı görülmektedir. Bu doyumun nedeni, çevrimden sonra meydana gelen i lem sertle mesinden kaynaklanmaktadır.



ekil 4.26. Katkısız MgB₂ numunesine ait 1'inci ve 14'üncü çevrimlerinden olu an ilmek alanlar

ekil 4.27'de Katkısız MgB₂, %2 ve %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunelerine ait iç sürtünme katsayısı de erleri gösterilmektedir.



ekil 4.27. Katkısız, %2 ve %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunelerine ait iç sürtünme katsayısı değerleri

ekil 4.27’den görüldü ü gibi çevrim sayısı arttıkça numunelere ait iç sürtünme katsayısı değerlerinde bir azalış oldu u ve 6’ncı çevrimden sonra doyuma ulaşarak değeri görüldü. ekil 4.27.’ den görülen iç sürtünme katsayısı sırasıyla, Katkısız MgB₂ için 0.0256-0.0067, %2 Malik asit katkılı numune için 0.0432-0.0143 ve %4 Malik asit katkılı numune için 0.0444-0.0161 değerleri arasında değişmektedir. Malik asit katkısıyla birlikte iç sürtünme katsayısı değerlerinde artış görülmektedir. İç sürtünme katsayısı, darbe sönümlenme karakterinin bir ölçüsü olup, değeri yükseldikçe malzemenin darbe sönümlenme kabiliyetinin daha iyi olması anlamına gelir (Gül, 2015). Buna göre, %4 Malik asit katkılı MgB₂ numunesi, Katkısız MgB₂ ve %2 Malik asit katkılı MgB₂ numunesine göre, yüksek darbe sönümlenme kabiliyetine sahip olduğunu görülmektedir. Çevrim sayısı arttıkça sönümlenme hızı azalır, %4 katkılı numunenin sönümlenme hızı, diğer numunelere oranla daha yüksek değere sahiptir.

5. SONUÇLAR

- Katkısız ve Malik asit katkılı (%2, %4) MgB₂ numunelerinin sertlik ve indirgenmi elastik modülü de erlerinin açık bir ekilde yüke ba lı oldu u gözlenmi tir.
- Artan yükle beraber sertlik ve indirgenmi elastik modülü de erlerinin azaldı ı tespit edilmi tir.
- Sertlik ve indirgenmi elastik modülü de erlerinin yüke ba lı davranı ekilerinin birbirine benzer ekilde olu u sonuçların literatür ile uyum içerisinde oldu unu göstermektedir.
- SEM görüntüleri ve XRD sonuçlarına bakıldı ında mekaniksel özellikler ölçüm sonuçlarıyla uyum içerisinde dir.
- Malik asit katkısıyla birlikte sertlik ve indirgenmi elastik modülü de erlerinin arttı ı gözlenmi tir.
- Katkısız ve Malik asit katkılı (%2, %4) MgB₂ numunelerinin iç sürtünme de erlerinin döngü (cycle) sayısının artmasıyla birlikte azalma gösterdi i gözlenmi tir.
- 6.döngüden sonra Malik asit katkılı MgB₂ numunelerinin iç sürtünme de erlerinin Katkısız numuneye göre daha belirgin bir ekilde arttı ı gözlenmi tir.
- Geli tirilmi Orantılı Numune Dirençi (GOND) modeli ile hesaplama yapılarak elde edilen gerçek sertlik de erlerinin plato bölgesine yakın de erler oldu u tespit edilmi tir.
- Üzerinde çalı tı ımız malik asit katkılı MgB₂ numuneleri literatürde çalı ılan di er MgB₂ numunelerine göre daha dü ük sertlik de erlerine sahiptir.
- Çalı mamızda üretilen malzemelerin sertlik de erlerinin literatürdeki di er malzemelerin sertlik de erlerinden küçük olması, uygulama alanında kullanılan süperiletken tel, erit ve filmlerin yapımında daha kolaylıklar sa layacaktır.

Bu tez çalı masında yapılan katkılara ek olarak de i ik yüzdelerde Malik asit katılarak optimum artların belirlenmesine gidilebilir. Mekaniksel özelliklerin belirlenmesi üzerine yapılan deneysel çalı maların (yükleme-bo altma ve çevrim testi) yanında yükleme-bekleme-bo altma, kademeli-yükleme-bo altma testleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Annet, J.F., 2003. "Superconductivity, Superfluids and Condensates", Oxford University Press University of Bristol, 138p.
- Aymak, E., 2006. MgB₂ Süperiletkeninin Gerçek Sertlik Değerinin Dinami Mikrosertlik Tekniği ile İncelenmesi. (Y.Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü, Tokat
- Armstrong, R.W., Ferrantilous, J.R. ve Thadhami Naresh, N., 2006. Elastic/plastic/crackin indentation behaviour of hard materials. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 24 (1-2), 11-16.
- Ate, H., 2001, "Y0.4V0.6Ba2Cu3O_z süperiletken sisteminin karakterizasyonu", II.Ulusal Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler Sempozyumu, Malatya.
- Aydin H., Cakiroglu O., Nursoy M. ve Terzioğlu, C., 2009. Superconducting Properties of the Bi_{1.8} Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu₃GdxO_y System, Chinese Journal of Physics, vol. 47, 2.
- Baker, S. P. ve Burnham, N., 2000. Measuring Mechanical Properties in the Nanometer Range. In Materials Research Society-Tutorial, Boston
- Bardeen, J., Cooper, L. N ve Schrieffer, J. R., 1957. Theory of Superconductivity, Phys. Rev. ,108, 5,1175-1204.
- Barakat, ME.M., Abou, A.I., Awad, R., Aly, N.S. ve Ibrahim, S., 2015. Mechanical properties Y_{3-x}NdxBa_{5-x}CaxCu₈O₁₈- samples. Journal of Alloys and Compounds, 652, 158-166
- Bednorz, J.G. ve Müller, K.A., 1986, "Possible High-T_c Superconductivity in Ba-La-CuO System", Z. Phys B, 64, 189.
- Beegan, D., Chowdhury, S. ve Laugier, M.T., 2005. Work of indentation methods for determining copper film hardness. Surf. Coat. Technol., 192 (1), 57-63.
- Buckle, H., Westbrook, J.H. ve Conrad (eds.), H., 1973. The Science of Hardness Testing and its Research Application, ASME, Metals Park, OH, pp. 199.
- Bull, S. J., Page, T.F. ve Yoffe, E.H., 1989. Phil. Mag. Lett. 59 281-288.
- Bulychev, S.I., Alekhin, V.P., Shorshorov, M.K.H., Ternovskii, A.P. ve Shnyrev, G.D., 1975. Determination of Young's modulus from the indenter penetration diagram Zavod. Lab, 41 (9), 1137-1140.
- Buzea, C. ve Yamashita, T. 2001. Review of superconducting properties of MgB₂. Superconductors, Science & Technology.
- Chudoba, T. ve Richter, F., 2001. Surf. Coat. Technol. 148 (2-3), 191.
- Doerner, M. F. ve Nix, W. D., 1986. A method for interpreting the data depth-sensing indentation instruments. Journal of Materials Research, 1 (4), 601-609.
- Elmustafa, A. ve A.Stone, D.S., 2002. Indentation size effect in polycrystalline F.C.C. metals, Acta Materialia, Volume 50, Issue 14, 16 August 2002, Pages 3641-3650
- Fischer-Cripps, A.C., 2004. Mater. Sci. Eng. A 385 74.
- Gül, S., 2015. Yüksek Enerjili Bilyeli Ötme Tekniği ile Üretilen Ötektik Üstü AL-Si-Fe Alaşımlarının Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Y.Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü, Tokat.
- Gong, J., Miao, H., Zhao, Z. ve Guan, Z., 2001. Load-dependence of the measured hardness of Ti(C,N)-based cermets. Materials Sci. Eng A. 303,179-186.
- Gong, J., Wu, J.ve Guan, Z., 1999. Examination of the indentation size effect in low load Vickers hardness testing of ceramics. Journal of the European Ceramic Society, 19, 2625-2631.

- Gong, J., Zhao, Z., Guan, Z., Miao, H. 2000. Load-dependence of Knoop hardness of Al₂O₃-TiC composites. *Journal of the European Ceramic society*, 20, 1895-1900.
- Gong, J., Wang, Q. M., Wu, Y. N., Ke, P. L., Cao, H. T., Sun, C. ve Wen, L. S., 2004. Hot corrosion behavior of AIP NiCoCrAlY(SiB) coatings on nickel base superalloys *Surface and Coatings Technology*, 186, 3, 389-397.
- Hossain, M.S.A., Kim, J. H., Xu, X., Wang, X.L., Rindfleisch, M., Tomic, M., Sumption, M.D., Collings, E.W. ve Dou, S.X., 2007. *Supercond. Sci. Technol.* 20 L51- L54.
- Hays, C. ve Kendall, E.G., 1973. *Metall.* 6 275-282.
- Karaca, I., Uzun, O., Kölemen, U., Yılmaz, F. ve ahin O., 2009. Effects of ZnO addition on mechanical properties of Bi_{1.84}Pb_{0.34}Sr_{1.91}Ca_{2.03}Cu_{3.06}O₁₀ prepared by a wet technique *Journal of Alloys and Compounds*, 476, 1-2, 486-491
- Kim, J.H., Dou, S X., Hossain, M.S.A., Xu, X., Wang., J.L., Shi , Nakane. D.Q.T. ve Kumakura, H., 2007. *Supercond. Sci. Technol.* 20, 715-719.
- King, R.B., 2002. The similarities between magnesium diboride and cuprate superconductors and the role of subvalent Magnesium, *Polyhedron*, 21, 2347-2350.
- Kölemen, U., Çelebi, S., Yoshino, Y. ve Öztürk, A., 2004. Mechanical properties of YBCO and YBCO+ZnO polycrystalline superconductors using Vickers hardness test at cryogenic temperatures. *Pyhsica C*, 406, 20-26.
- Kölemen, U., Uzun, O., Yılmazlar, M., Güçlü N. ve Yanmaz, E., 2006. Hardness and microstructural analysis of Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr₂Ca_{2-x}Sm_xCu₃O_y polycrystalline Superconductors. *Alloys and Compaunds.* 415, 1,2, 300-306
- Kölemen U., 2006. Analysis of ISE in microhardness measurment of bulk MgB₂ superconductor using different models, *Journal of Alloys and Compaunds* 425, 429-435
- Kölemen, U., Uzun, O., Aksan, M.A., Güçlü, N. ve Yakıncı, E., 2006. An analysis of load depth data in depth- sensing microindentation experiments for intermetallic MgB₂, *Journal of Alloys and Compaunds*, 414, 294-299
- Li, H. ve Bradt, R. C., 1993. The microhardness indentation load/size effect in rutile and cassiterite single crystals. *Journal of Materials Science*, 28, 917-926.
- Li, H., Han, Y. H. ve Bradt, R. C., 1994. *Mater. J., Sci.* 29, 5641-5645
- Liu, Y. ve Ngan, A.H.W., 2001. Depth dependence of hardness in copper single crystals measured by nanoindentation. *Scripta Materialia*, 44, 237-241.
- Maeda, M., Kim, J.H., Kumakura, H., Heo, Y.U., Zhao, Y., Nakayama, Y., Rindfleisch, M. ve Dou, S.X., 2011. *ScienceDirect* 64, 1059-1062.
- Mano, J.F., Sencadas, V., Mello Costa, A., Lanceros-Mendez, S., 2004. *Mater. Sci. Eng. A* 370, 336.
- Meissner, W. ve Ochsenfeld, R., 1933. Superconductivity, *Nature*, 132, 931-935.
- Maeda, H., Matsui, Y., Tanaka, Y., Takayama-Muromachi, E., Takekawa, S., ve Horiuchi, S., 1988. "Twins and Intergrowth Defects in High-Tc Bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductor Examined by High-Resolution Electron Microscopy" National Institute for Research in Inorganic Materials, National Research Institute for Metals, Tsukuba Laboratory
- McCann, M.M., 2004. Nanoindentation of Gold Single Crystals, Virginia Polytechnic Institute and State University, Ph. D. Thesis, Virginia.

- Mott, B. W., 1956. Microindentation Hardness Testing. (London, Butterworths Scientific) pp. 101-139.
- Ma, Q., ve Clarke, D.R. Mater, J., 1995. Res. 10, 853-863.
- McElhaney, K.W., Vlassak, J.J. ve Nix, W.D., 1998. Determination of indenter tip geometry and indentation contact area for depth-sensing indentation experiments. J. Mater. Res., 13, 1300–1310..
- Mukhopadhyay, N.K., Weatherly, G.C. ve Embury, J.D., 2001. An analysis of microhardness of single-quasicrystals in the Al–Cu–Co–Si system. Mater. Sci. Eng. A, 315 (1-2), 202-210.
- Nagy, P.M., Juhasz, A., Vörös, Gy., Toth, A. ve Ujvari, T., 2004. Internal friction measurement on polymers by low-frequency cyclic Vickers microindentation test, Materials Science and Engineering A, 387-389, 25-530.
- Nix, W.D. ve Gao,H., 1998. Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46 (3), 411-425.
- Oliver, W. C. ve Pharr, G.M., 2004. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. J. Mater. Res., 19 (1), 3–20
- Oliver, W.C. ve Pharr, G.M., 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res, 7 (6), 1564–1583.
- Onnes, H.K., 1911. Disappearance of The Electrical Resistance of Mercury of Helium Temperature. Akad Van Wetenschappen, Amsterdam, 14, 113.
- Peng, Zhijian., Gong, Jiangong. ve Miao Hezhao., 2004. On the description of indentation size effect in hardness testing for ceramic : Analysis of the nanoindentation data. Journal of the European Ceramics 24, 2193-2201.
- Ren, X. J., Hooper, R. M., Griffiths, C., ve Henshall, J. L., 2002. Indentation-size effect in single-crystal MgO. Philosophical Magazine A, 82 (10), 2113-2120.
- Putilin, S. N., Antipov, E. V., Chmaissem, O.ve Marezio, M., 1993, Nature 362, 226-228p.
- Raman,V. ve Beniche,R.J., 1992. Mater. Res. 7 627.
- Sheng, Z.Z., Hermann, A.M. ve Hermann, Z.Z., 1988. "Superconductivity in the rareearth- free Tl-Ba-Cu-O system above liquid-nitrogen temperature", Nature 332, 6159, 55.
- Savaskan, T., 1999. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya kitabevi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü.
- Savaskan, B., Taylan Koparan, E., Celik, S., Öztürk, K. ve E. Yanmaz., 2014. Physica C 502, 63-69
- Sangwall, K., Surowska B. ve Blaziak P., 2003. Mater. Chem. Phys. 80, 428-437.
- Sargent, P. M., 1986. Use of the indentation Size Effect on Microhardness for Materials Characterization, ASTM STP 889 Philadelphia, PA: American Society for Testing materials, pp. 160-174.
- Singh, D. K., Tiwari, B., Jha, R., Kishan, H. ve Awana V.P.S., 2014. Role of MgO impurity on the superconducting properties of MgB₂. Pyhsica C, 505, 104-108.

- Sneddon, I.N., 1965. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq' problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Science Engineering*, 3, 47-57.
- Stillwell, N.A. ve Tabor, D., 1961. Elastic recovery of conical indentations. *Phys. Proc. Soc.*, 78 (2), 169–179
- ahin, O., 2006. β -Sn Tek Kristallerinin Bazı Mekaniksel Özellikleri ile Kristal Yönelimi Arasındaki İlişki, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- ahin, O., Uzun, O., Kölemen, U., Duzgun, B. ve Ucar, N., 2005. Indentation size effect and microhardness study of β -Sn single crystals, *Chin. Phys. Lett.* 22, 3137-3140.
- ahin, O., Uzun, O., Kölemen, U. ve Uçar, N., 2008. Analysis of ISE in dynamic hardness measurements of β -Sn single crystals using a depth-sensing indentation technique, *Materials Characterization*, 59 (6), 729-736
- ahin, O., Uzun, O., Kölemen, U. ve Uçar, N., 2008. Mechanical characterization of β -Sn single crystals using nanoindentation tests, *Materials Characterization*, 59 (4), 427-434
- ahin, O., Uzun, O., Sapicko-Lizer, M., Göçmez, H. ve Kölemen, U., 2008. Dynamic hardness and elastic modulus calculation of porous SiAlON ceramics using depth-sensing indentation technique, *Journal of the European Ceramic Society* 28 (6), 1235-1242
- Tabor, D., 1951. *The Hardness of Metals*, London: Oxford University Press; 1996, *Philosophical Magazine*. A 74, 1207
- Tabor, D. 1961. Elastic Recovery of conical indentations. *Phys. Proc. Soc.*, 78 (2), 169
- Tarkanian, M.L., Neumann, J.P., ve Raymond, L., 1973. Determination of the temperature dependence of {100} and {112} slip in tungsten from Knoop hardness measurements. In *The Science of Hardness Testing and Its Research Applications*, ed. J. H. Westbrook and H. Conrad. American Society for Metals, Metal Park, OH, pp. 187-198.
- Tate, D.R., 1945. A comparison of microhardness indentation test. *Transaction of American ceramic society. Transactions Of American Society For Metals* 35, 374–375
- Toplu, A., Karaca, . ve Kölemen, U., 2015. Calculation of true hardness value of Zn added BiPbSrCaCuO superconductor by different models *Ceramics International*, 41, 953-96.
- Tuck, J. R., Korsunsky, A. M., Bull, S. J. and Davidson, R. I., 2001. On the application of the work of indentation approach to depth sensing indentation experiments in coated systems. *Surf. Coat. Technol.*, 137, 217–224.
- Uptit, G.P., Varchenya, S.A. ve Westbrook, J.H., 1973. H. Conrad (Eds.), *The Science of Hardness Testing and Its Research Applications*, ASME, Metal Park, OH, pp.135.
- Uzun, O., Güçlü N., Kölemen, U. ve Sahin, O., 2008. “Analysis of data on indentation load against penetration depth for bulk MgB2 crystal using indentation work and Oliver-Pharr approaches “ *Materials Chemistry and Physics*
- Uzun, O., Karaaslan T., Gögebakan, M. ve Keskin M., 2004. Hardness and microstructural characteristics of rapidly solidified Al-8-16 wt.%Si Alloys, *J. Alloys and Compd.* 376, 149-157.

- Uzun, O., Kölemen, U., Çelebi, S. ve Güçlü, N. 2005. Modulus and hardness evaluation of polycrystalline superconductors by dynamic microindentation technique. *Journal of European Ceramic Society*, 25 (6), 969-977.
- Uzun, O., Ba man, N., Alkan, C., Kölemen, U. ve Yılmaz, F., 2010. Depth sensing indentation analysis of electrochemically synthesized polythiophene, *Materials Chemistry and Physics*, 124 (1), 196-202.
- Qin, Fengming., Cai, Qi. ve Chen,Huiqin., 2015. *Journal of Alloys and Compounds*, Partial dissolution of MgO and the effect on critical current density in urea doped MgB₂ bulks, 633 201-206
- Quinn, J.B., ve Quinn, G.D., 1997. Indentation Brittleness of Ceramics: A Fresh Approach, *J.Mater.* 32, 4331-4346.
- Veerender, C., Dumke, V. R. ve Nagabhooshanam, M., 1994. Hardness and Elastic Moduli of Bi_{2-x}PbxCa₂Sr₂Cu₃O_y. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 144, 299-309.
- Vajpayee, A., Awana, V.P.S., Bhalla, G.L., Bhoje, P.A., Nigam, A.K. ve Kishan, H., 2009. *Supercond. Sci. Technol.* 22 015016.
- Wu, M. K. , Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z.J., Wang, Y. Q., Cu, C. W., 1987. Superconducting at 93 K in New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O compound system at Ambient Pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 48, 908.
- Yılmaz, F., 2008. Nanokristal Al-Si-Sb Ala ımlarının Enerji Yakla ımı ile Mikromekanik Karakterizasyonu. (Y.Lisans Tezi), Gaziosmapa a Üniversitesi Fizik Bölümü, Tokat

ÖZGEÇM

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Sadık ERYILMAZ
Doğum Yeri ve Yılı : Altında / 1987
Yabancı Dili : İngilizce
Medeni Hali : Bekar
TC Kimlik No : 42667954890
Telefon : (536) 250 64 87
e-mail : eryilmaz_sadik@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lise	Ankara Mamak Gülveren Lisesi	2005
Lisans	Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü	2012
	Gaziosmanpaşa Üniversitesi Eğitim Fakültesi Pedagojik Formasyon Eğitimi	2012

Katılım Belgesi Sertifikalı Programları:

Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi (21 - 24 Temmuz 2014 / Bodrum)