



**T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERYUM KATKILANAN ZE41 Mg-Ce ALAŞIMLARININ ÜRETİLMESİ,  
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Faris Haluk ERTSAK**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
EYLÜL-2015**



T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERYUM KATKILANAN ZE41 Mg-Ce ALAŞIMLARININ ÜRETİLMESİ,  
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Faris Haluk ERTSAK**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

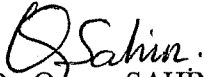
**HATAY  
EYLÜL-2015**

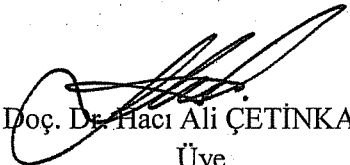
T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

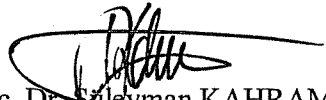
**SERYUM KATKILANAN ZE41 Mg-Ce ALAŞIMLARININ ÜRETİLMESİ,  
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**FARİS HALUK ERTSAK**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doç. Dr. Osman ŞAHİN** danışmanlığında hazırlanan bu tez **18/09/2015** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Osman ŞAHİN  
Başkan

  
Doç. Dr. Hacı Ali ÇETİNKARA  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr. Süleyman KAHRAMAN  
Üye

**Kod No:**

**Prof. Dr. Okan ŞENER**  
**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma MKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.  
Proje No: 10741

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**18.09.2015**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Faris Haluk ERTSAK**

## ÖZET

### SERYUM KATKILANAN ZE41 Mg-Ce ALAŞIMLARININ ÜRETİLMESİ, KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.

ZE41 magnezyum alaşımları; zayıf korozyon direncine sahip olsalar da mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle askeri, uzay, savunma sanayii ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bu çalışmada korozyon ve mekanik özelliklerine etkisini inceleme amacıyla ZE41 alaşımı ve ağırlıkça %0.3, %0.6 ve %0.9 oranında seryum (Ce) katkılı ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile üretildi. Alaşımlar, katkı oranlarına bağlı olarak mikro/nano sertlik ve korozyon deneyleri için uygun boyutlarda preslendi. Bu alaşımların hazırlanmasından sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı yöntemi (XRD), mikro ve nanoçentik testleri alaşımların mekanik özelliklerini incelemek için kullanıldı. Mikrosertlik testi yük aralığı 0.245 ile 9.8 N arasında değişen yük aralığında Vickers ve Knoop uçları kullanılarak yapıldı.

Hem Vickers hemde Knoop uçları için, alaşımların sertlikleri belirgin şekilde yüke bağımlılık gösterdi (ters çentik boyutu etkisi (TÇBE), ve çentik boyutu etkisi (ÇBE)). Mikrosertlik deneyi sonuçları Meyer Kanunu, Orantılı Numune Direnci Modeli, Düzeltilmiş Orantılı Numune Direnci Modeli, Hays-Kendall modeller kullanılarak analiz edildi. Bu çalışmada, yükten bağımsız sertliğin hesaplamasında en iyi modelin Hays-Kendall Modeli olarak bulundu. Statik sertlik deneylerinden ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait elastik modül değerleri sırasıyla 84.832, 49.178, 45.735 ve 44.096 GPa'dır. Sonuç olarak; Seryum katkısının artmasıyla elastik modül değerlerinin azaldığı gözlemlendi.

Bu alaşımların nanosertlik deneyleri 1000 ile 10000  $\mu\text{N}$  artan yük aralığında ölçüldü. Nanosertlik testleri Triboindenter (Hysitron TI-950) cihazı ile Berkovich uç kullanılarak gerçekleştirildi. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin analizi literatürde en yaygın olarak kullanılan Oliver-Pharr Metodu ile yapıldı. Mikrosertlik testlerine benzer şekilde, Nanosertlik deney sonuçları da, Meyer Kanunu, Orantılı Numune Direnci Modeli, Düzeltilmiş Orantılı Numune Direnci Modeli, Hays-Kendall. modelleri kullanılarak analiz edildi. Sonuç olarak, bu çalışmada nanosertlik değerleri sırasıyla ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 için 0.906, 0.840, 0.802, 1,546 GPa olarak elde edildi. Nanosertlik deneylerinden ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait elastik modül değerleri sırasıyla 51.192, 47.736, 39.541 ve 36.286 GPa'dır. Sonuç olarak, mikrosertlik sonuçlarına benzer olarak, seryum katkısının artmasıyla elastik modül değerlerinin azaldığı gözlemlendi.

Polarizasyon testleri % 3,5'lik NaCl çözeltisinde yapıldı. Polarizasyon tarama hızı  $1 \text{ mVs}^{-1}$  olarak seçildi ve potansiyel aralığı -500 ile +250 mV aralığında belirlendi. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için korozyon potansiyeli, korozyon akımı ve lineer polarizasyon direnci Tafel Metodu ile belirlendi. Artan seryum oranı ile korozyon akımının azalarak korozyon direncinin arttığı gözlemlendi.

2015, 91 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** ZE41 magnezyum alaşımları, mikro/nano sertlik, korozyon, çentik boyutu etkisi, ters çentik boyutu etkisi

## ABSTRACT

### PRODUCTION of ZE41 MAGNESIUM ALLOYS HAVING CERIUM ADDITIVE, DETERMINATION OF CORROSION AND MECHANICAL PROPERTIES

Magnesium alloy ZE41, used extensively in the military, aerospace, defence, and car industry, because of their excellent mechanical properties albeit poor corrosion resistance. In this study, ZE41 and alloys having different Cerium amount (mass %0.3, %0.6 and %0.9 Ce) to investigate the corrosion and mechanical properties that produced by Mechanical Alloying (MA) method under argon atmosphere. The alloys were pressed in appropriate dimension for micro/nano and corrosion experiments. After preparation of these alloys, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction method (XRD), micro and nanohardness test were used to examine the mechanical properties of the alloys. Microhardness test were carried out using Vickers and Knoop indenter that the loads ranging 0.245 to 9.8N. Both Vickers and Knoop indenters were used, hardness of the alloys exhibit significant load-dependence (i.e reverse indentation size effect, (RISE), and indentation size effect, (ISE)). The experimental microhardness results were analyzed by Meyer's law, Proportional Specimen Resistance model, Modified Proportional Specimen Resistance Model, and Hays-Kendall model. The best model for the load-independent microhardness calculation in our case was found to be Hays-Kendall Model. The elastic modulus values obtained from static hardness experiments of ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 and ZE41Ce3 alloys were found 84.832, 49.178, 45.735 ve 44.096 GPa respectively. Consequently, the values of elastic modulus decreases with increasing cerium contribution.

The nanohardness of these alloys were measured in the peak load range from 1000 to 10000  $\mu\text{N}$ . The nanoindentation test were conducted with a Berkovich indenter using a fully calibrated Triboindenter (Hysitron TI-950) equipment. The most common Oliver-Pharr Method used the analysis of load-displacement curves. Same as the microhardness, nanohardness results were analyzed by Meyer's law, Proportional Specimen Resistance Model, Modified Proportional Specimen Resistance Model, Hays-Kendall model. As a results, in the present study the corresponding nanohardness values were 0.906, 0.840, 0.802, 1.546 GPa for ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 and ZE41Ce3, respectively. The elastic modulus values obtained from nanohardness experiments of ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 and ZE41Ce3 magnesium alloys were found 51.192, 47.736, 39.541 and 36.286 GPa respectively. Consequently, same as the microhardness results, the elastic modulus values decreases with increasing cerium contribution.

The polarization tests were carried out at NaCl solution (mass % 0.09). The potential scan rate chosen was  $1 \text{ mVs}^{-1}$  and the potential range were identified from -500 to +250 mV. Corrosion potential, corrosion current and linear polarization resistance of ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 and ZE41Ce3 were determined by the Tafel Method. The results showed that corrosion resistance increases and corrosion current decreases with increasing Ce ratio.

2015, 91sayfa

**Key Words:** ZE41 magnesium alloys, micro/nano hardness, corrosion, indentation size effect, reverse indentation size effect

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle desteklerini ve katkılarını esirgemeyen, bilimsel çalışmanın yöntem ve ilkelerini öğreten değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman ŞAHİN'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında değerli görüş, katkı ve fikirlerini esirgemeyen Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerine, tez çalışmalarımın gerek deneysel gerekse teorik kısımlarında benden yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Süleyman UZUNOĞLU, Kadir ÖZTEKİN, Hasan SARIGÜL, Nazan DEMİRYÜREK, araştırma görevlisi Selma ÖZARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın bütün aşamalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli babam Haydar ERTSAK, annem Hamide ERTSAK'a ve Dayım Turhan ATMIŞ'a, kardeşlerim Hakan ERTSAK ve Hakkı ERTSAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, MKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi (Proje No: 10741 ve Proje No: 08F0501) ve Devlet Planlama Teşkilatı (Proje No: 2010K121220) ve TÜBİTAK öncelikli alanlar 1003 kapsamında desteklenen 213M699 nolu projeler kapsamında alınan cihazlardan faydalanılmıştır.

## İÇİNDEKİLER

|                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                   | I    |
| ABSTACT .....                                               | II   |
| TEŞEKKÜR.....                                               | III  |
| İÇİNDEKİLER .....                                           | IV   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                        | V    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                     | VII  |
| SİMGELER KISALTMALAR DİZİNİ.....                            | VIII |
| 1.GİRİŞ .....                                               | 1    |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMLAR .....                                   | 3    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                 | 7    |
| 3.1. Materyal .....                                         | 7    |
| 3.2. Yöntem .....                                           | 8    |
| 3.2.1. ZE41 Alaşımlarının Üretilmesi .....                  | 8    |
| 3.2.2. Alaşımların Karakterizasyon Hazırlığı .....          | 11   |
| 3.2.4. Alaşımların Korozyon Analizi .....                   | 16   |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....                    | 17   |
| 4.1. Statik Sertlik Deneyleri .....                         | 25   |
| 4.1.1. Vickers Sertlik Analizi .....                        | 26   |
| 4.1.2. Knoop Sertlik Analizi .....                          | 36   |
| 4.2. Dinamik Sertlik Deneyleri .....                        | 45   |
| 4.2.1. Meyer Kanunu'na Göre Analiz .....                    | 70   |
| 4.2.2. Hays-Kendall Yaklaşımına Göre Analiz.....            | 71   |
| 4.2.3. PSR Modeli'ne Göre Analiz .....                      | 73   |
| 4.2.4. Geliştirilmiş PSR (MPSR) Modeli'ne Göre Analiz ..... | 75   |
| 4.3. Korozyon Analizleri.....                               | 79   |
| 4.3.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Testleri .....         | 79   |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....                                   | 82   |
| KAYNAKLAR .....                                             | 84   |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                              | 91   |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Innovative Technology IL-2GB Marka Globox .....                               | 8  |
| Şekil 3.2. (a); Hassas terazi (b); Çelik hazne .....                                     | 9  |
| Şekil 3.3. Gezegensel Öğütücü .....                                                      | 9  |
| Şekil 3.4. (a); Elek (b); Oval Cam Hazne (c) Quartz Pota.....                            | 10 |
| Şekil 3.5. Atmosfer Kontrollü Fırın .....                                                | 10 |
| Şekil 3.6. (a); Press (b); Kalıp .....                                                   | 11 |
| Şekil 3.7. (a) Kalıplama Cihazı (b); Parlatma Cihazı.....                                | 12 |
| Şekil 3.8. Numunelerin Kalıplama İşleminden Önceki Görüntüleri.....                      | 12 |
| Şekil 3.9. (a); Kalıplama işlemi Sırasında (b); Kalıp İşlemi Sonrasında Numune .....     | 13 |
| Şekil 3.10. Mikro Sertlik Cihazı .....                                                   | 14 |
| Şekil 3.11. Ters Metal Mikroskobu ve Görüntü analiz programı .....                       | 14 |
| Şekil 3.12. Sertlik deneyleri için kullanılan TI 950 TriboIndenter test cihazı .....     | 15 |
| Şekil 3.13. Dinamik sertlik analizinde yükleme profili .....                             | 15 |
| Şekil 3.14. Berkovich uç'un şematik gösterimi .....                                      | 16 |
| Şekil 3.15. Elektrokimyasal test sistemi .....                                           | 16 |
| Şekil 4.1. Zımparasız ZE41 alaşımları .....                                              | 17 |
| Şekil 4.2. 800 gritlik zımparalı ZE41 alaşımları .....                                   | 18 |
| Şekil 4.3. 2400 gritlik Zımparalı ZE41 alaşımları .....                                  | 18 |
| Şekil 4.4. 4000 gritlik zımparalı ZE41 alaşımları .....                                  | 19 |
| Şekil 4.5. Keçeler Sonrası (a); ZE41, (b); ZE41Ce1, (c); ZE41Ce2, (d); ZE41Ce3.....      | 20 |
| Şekil 4.6. ZE41 alaşımına ait SEM görüntüleri .....                                      | 22 |
| Şekil 4.7. ZE41Ce1 alaşımına ait SEM görüntüleri.....                                    | 22 |
| Şekil 4.8. ZE41Ce2 alaşımına ait SEM görüntüleri .....                                   | 23 |
| Şekil 4.9. ZE41Ce3 alaşımına ait SEM görüntüleri.....                                    | 23 |
| Şekil 4.10. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının XRD desenleri .....          | 24 |
| Şekil 4.11. Mikro sertlik değerlerinin yüke bağlı/bağımsız değişim grafiği.....          | 27 |
| Şekil 4.12. ZE41 (a); 0,49 N'luk iz (b); 0,98 N'luk İz.....                              | 28 |
| Şekil 4.13. ZE41 alaşımlarının Vicker uç için $\ln P_{\max} - \ln d$ .....               | 30 |
| Şekil 4.14. PSR $P_{\max}/d - d$ grafiği.....                                            | 31 |
| Şekil 4.15. Vickers uç için ZE41 alaşımlarının $P_{\max}-d$ .....                        | 33 |
| Şekil 4.16. Vickers uç için ZE41 alaşımlarının $P_{\text{etkin}}-d^2$ .....              | 35 |
| Şekil 4.17. Knoop uç kullanılarak elde edilen mikrosertlik.....                          | 37 |
| Şekil 4.18. Knoop Uç'a ait $\ln P - \ln L$ grafiği .....                                 | 38 |
| Şekil 4.19. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının $(P_{\max}/L)-L$ grafiği ..... | 39 |
| Şekil 4.20. Knoop uç için ZE41 $P_{\max}-L$ grafiği.....                                 | 41 |
| Şekil 4.21. Knoop uç için ZE41 $P_{\text{etkin}}-d^2$ grafiği .....                      | 42 |
| Şekil 4.22. ZE41 alaşımının yük-yerdeğiştirme eğrisi.....                                | 46 |
| Şekil 4.23. ZE41 alaşımına ait nanosertlik-uygulanan yük eğrisi.....                     | 46 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.24. ZE41 alaşımına ait yüzey görüntüleri .....                              | 47 |
| Şekil 4.25. ZE41 alaşımı için Şekil 4.19’da verilen çentiğin 3D görüntüsü.....      | 48 |
| Şekil 4.26. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsü.....  | 48 |
| Şekil 4.27. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsü.....  | 49 |
| Şekil 4.28. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsü.....  | 50 |
| Şekil 4.29. ZE41Ce1 alaşımının yük-yerdeğiştirme eğrisi .....                       | 51 |
| Şekil 4.30. ZE41Ce1 alaşımına ait nanosertlik-uygulanan yük eğrisi .....            | 52 |
| Şekil 4.31. ZE41Ce1 alaşımına ait SPM görüntüsü .....                               | 52 |
| Şekil 4.32. ZE41Ce1 alaşımı için Şekil 4.31’de verilen çentiğin 3D görüntüsü .....  | 53 |
| Şekil 4.33. ZE41Ce1 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 54 |
| Şekil 4.34. ZE41Ce1 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 55 |
| Şekil 4.35. ZE41Ce1 alaşımında oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 56 |
| Şekil 4.36. ZE41Ce2 alaşımının yük-yerdeğiştirme eğrisi .....                       | 57 |
| Şekil 4.37. ZE41Ce2 alaşımına ait nanosertlik-uygulanan yük eğrisi .....            | 57 |
| Şekil 4.38. ZE41Ce2 alaşımına ait SPM görüntüsü .....                               | 58 |
| Şekil 4.39. ZE41Ce2 alaşımı için Şekil 4.38’de verilen çentiğin 3D görüntüsü .....  | 59 |
| Şekil 4.40. ZE41Ce2 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 60 |
| Şekil 4.41. ZE41Ce2 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 60 |
| Şekil 4.42. ZE41Ce2 alaşımında oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 61 |
| Şekil 4.43. ZE41Ce3 alaşımının yük-yerdeğiştirme eğrisi .....                       | 62 |
| Şekil 4.44. ZE41Ce3 alaşımına ait Nanosertlik –Uygulanan Yük Eğrisi .....           | 62 |
| Şekil 4.45. ZE41Ce3 alaşımının ait SPM görüntüsü.....                               | 63 |
| Şekil 4.46; ZE41Ce3 Alaşımı için Şekil 4.45’de verilen çentiğin 3D görüntüsü .....  | 64 |
| Şekil 4.47. ZE41Ce3 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 64 |
| Şekil 4.48. ZE41Ce3 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 65 |
| Şekil 4.49. ZE41Ce3 alaşımında oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsü .. | 66 |
| Şekil 4.50. ZE41 alaşımlarının Uygulanan maksimum yük-yerdeğiştirme eğrileri .....  | 68 |
| Şekil 4.51. Dinamik nanosertliğin uygulanan maksimum yüke bağlı değişimi.....       | 68 |
| Şekil 4.52. ZE41 alaşımlarının $\ln P_{maks} - \ln h_c$ grafiği .....               | 71 |
| Şekil 4.53. ZE41 alaşımlarının $P_{etkin} - h_c^2$ grafiği .....                    | 72 |
| Şekil 4.54. ZE41 alaşımlarının $P_{maks}/h_c - h_c$ grafiği .....                   | 74 |
| Şekil 4.55. ZE41 alaşımlarının $P_{maks} - h_c$ grafiği .....                       | 76 |
| Şekil 4.56. ZE41 alaşımlarının elastik modülü .....                                 | 78 |
| Şekil 4.57. ZE41Ce, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait tafel eğrileri ... | 80 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. ZE41 alaşımı ve katkılarının kütlece % değerleri (gr).....                | 7  |
| Çizelge 4.1. ZE41 mikrozorlanma, dislokasyon yoğunluğu ve kristalit boyutu.....        | 25 |
| Çizelge 4.2. Eşitlik 4.1'e göre hesaplanan InA, A, n, $r^2$ değerleri .....            | 29 |
| Çizelge 4.3. ZE41 alaşımlarının eşitlik 4.3'e göre analizi .....                       | 32 |
| Çizelge 4.4. ZE41 alaşımlarının eşitlik 4.5'e göre analizleri .....                    | 33 |
| Çizelge 4.5. ZE41 alaşımlarının Vickers uç için eşitlik 4.6'ya göre analizleri.....    | 36 |
| Çizelge 4.6. ZE41 alaşımlarının eşitlik 4.1'e göre InA, A, n, $r^2$ değerleri.....     | 38 |
| Çizelge 4.7. ZE41 alaşımlarının eşitlik 4.3'e göre analizi .....                       | 40 |
| Çizelge 4.8. ZE41 alaşımlarının eşitlik 4.5'e göre analizleri .....                    | 41 |
| Çizelge 4.9. ZE41 Alaşımlarının Knoop uç için eşitlik 4.6'ya göre analizleri .....     | 43 |
| Çizelge 4.10. Vickers ve Knoop .Uç Yükten Bağımsız Sertlik Değerleri .....             | 44 |
| Çizelge 4.11. Elastiklik modülü (E) ve Akma mukavemeti (Y) değerleri.....              | 45 |
| Çizelge 4.12. ZE41 alaşımlarının Berkovich uç için analizi.....                        | 73 |
| Çizelge 4.13. ZE41 alaşımlarının Berkovich uç için PSR analizi.....                    | 74 |
| Çizelge 4.14. ZE41 alaşımlarının Berkovich uç için MPSR analizi.....                   | 76 |
| Çizelge 4.15. Farklı yükler altında ZE41 alaşımlarına ait elastik modül değerleri..... | 79 |
| Çizelge 4.16. ZE41 alaşımlarının Tafel Ekspolarasyon korozyon verileri .....           | 80 |

## SİMGELER KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|      |                            |
|------|----------------------------|
| Mg   | : Magnezyum                |
| Zn   | : Çinko                    |
| Ce   | : Seryum                   |
| RE   | : Nadir Toprak Elementleri |
| Si   | : Silisyum                 |
| Fe   | : Demir                    |
| Au   | : Altın                    |
| Ni   | : Nikel                    |
| C    | : Karbon                   |
| Pt   | : Platin                   |
| Ti   | : Titanyum                 |
| Al   | : Alüminyum                |
| V    | : Vanadyum                 |
| Ru   | : Rutenyum                 |
| In   | : İndiyum                  |
| NaCl | : Sodyum Klorür            |

### KISALTMALAR

|             |                                                                                          |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $H$         | : Malzemenin Sertliği                                                                    |
| $H_V$       | : Vickers Sertliği                                                                       |
| $H_K$       | : Knoop Sertliği                                                                         |
| $H_B$       | : Brinnel Sertliği                                                                       |
| $HK$        | : Hays-Kendall                                                                           |
| $H_{HK}$    | : Hays Kendall Modeli için yükten bağımsız sertlik değeri                                |
| PSR         | : Orantılı Numune Direnci                                                                |
| $H_{PSR}$   | : Orantılı Numune Direnci Modeli için yükten bağımsız sertlik değeri                     |
| MPSR        | : Düzeltilmiş Orantılı Numune Direnci                                                    |
| $H_{MPSR}$  | : Düzeltilmiş PSR Modeli'ne göre yükten bağımsız sertlik değeri                          |
| NG          | : Nix-Gao                                                                                |
| $H_{NG}$    | : Nix-Gao Modeli için yükten bağımsız sertlik değeri                                     |
| IIC         | : Çentiğin Sebep Olduğu Çatlama Modeli                                                   |
| $H_{LI}$    | : Yükten bağımsız sertlik bölgesi                                                        |
| OP          | : Oliver Pharr                                                                           |
| $P_{etkin}$ | : Etkin Yük                                                                              |
| $P_{maks}$  | : Uygulanan Maksimum Yük                                                                 |
| $d$         | : Açılan izin Çap ortalaması                                                             |
| $d_0$       | : Kritik Çentik Boyutu                                                                   |
| $P_0$       | : Kritik Test Yüğü                                                                       |
| $n$         | : Meyer İndisi                                                                           |
| $a_0$       | : Yüzey işlemlerinin sebep olduğu artık zor ile ilgili sabit                             |
| $a_1$       | : Numunenin elastik özellikleri ile ilgili sabit                                         |
| $a_2$       | : Numunenin plastik özellikleri ile ilgili sabit ve yükten bağımsız sertliğin bir ölçüsü |

|               |                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| $h$           | : Toplam Yerdeğiştirme                                             |
| $h_{maks}$    | : Maksimum Yükteki Yerdeğiştirme                                   |
| $h_0$         | : Elastik geri kazanımdan dolayı $h_c$ 'ye eklenen düzeltme terimi |
| $H_o$         | : Yükten Bağımsız Sertlik                                          |
| $h^*$         | : Uç'un Şekli ve Malzemeye Bağlı Karakteristik Derinlik            |
| $h_s$         | : Kontak Çevresindeki Yüzeyin Yerdeğiştirmesi                      |
| $h_c$         | : Maksimum Yükteki Kontak Derinliğı                                |
| $h_p$         | : Numune Yüzeyinde Kalan İzin Derinliğı                            |
| $A_c$         | : Kontak Alanı                                                     |
| $E_r$         | : Elastiklik Sabiti                                                |
| $\varepsilon$ | : Konik Uç İçin Geometrik Sabit                                    |
| $W$           | : Kalıcı Deformasyon Oluşturmak İçin Gereken Minimum Yük           |
| $\lambda_1$   | : Test Yüğüne Bağlı Sabit                                          |
| $K_1$         | : Geometrik Dönüşüm Faktörü                                        |
| $K_2$         | : Test Yüğüne Bağlı Sabit                                          |
| $E_{kor}$     | : Denge korozyon potansiyeli                                       |
| $I_{kor}$     | : Korozyon akımı                                                   |
| $I$           | : Ölçülen hücre akımı                                              |
| $R_p$         | : Polarizasyon Direnci                                             |
| $A$           | : Yüzey alanı                                                      |
| $V$           | : Volt                                                             |
| $mA$          | : Miliamper                                                        |
| $g$           | : Gram                                                             |
| $R_a$         | : Ortalama Pürüzlölük Değeri                                       |
| $RMS(R_q)$    | : Karekök Ortalama Pürüzlölük                                      |
| $DDM$         | : Derinlik Duyarlı Mikrosertlik                                    |
| $SEM$         | : Taramalı Elektron Mikroskobu                                     |
| $SPM$         | : Taramalı Uç Mikroskobu                                           |
| $OM$          | : Optik Mikroskop                                                  |
| $\delta P$    | : Yügteki artış                                                    |
| $\delta h$    | : Yerdeğiştirmedeki artış                                          |
| $S$           | : Kontak katılığı                                                  |

## 1. GİRİŞ

Dünya hammadde ve enerji kaynaklarının koruna bilmesi için ağırlıkta meydana getirilebilecek düşüşün yanı sıra geri dönüşe bilirlkte en az ağırlık kadar önemli bir etken haline gelmiştir (Vecchiarelli, 1992). Ancak ileri teknolojinin mevcut sorununun çözülmesi için, yapısal malzemelerin hafif alaşımlarının kullanılması, kütleyi azaltmak ve enerji tasarrufu gereklidir. Sürdürülebilirlik, ekonomik kalkınma ve çevre koruması için zararlı gazların emilimi gerekmektedir. Bu konu araç yapımından makine mühendisliğine, havacılık sektöründen uzay sektörüne kadar oldukça geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır (Kainer ve Kaiser 2003; Kainer, 2000; Mordike ve Kainer, 1998; Avedesian ve Baker, 1999; Friedrich ve Mordike, 2006). Otomotiv sektörü ve bu sektörde bulunan üreticiler yıllardır artan çevresel etki nedeniyle, yakıtın daha ekonomik kullanım talepleri ve düşük emisyon sağlayabilmek amacıyla araç, kütle ve yakıt dengesi arasındaki ekonomiyi incelemiştirler (Vecchiarelli, 1992; Kainer, 2000; Avedesian ve Baker, 1999; Luo, 2004; Kaplan, 2003; Kaplan, 2002). Bununla birlikte günümüzde enerji kaynaklarının ve ekonomik dengenin korunması otomotiv sektörünü yakıt tüketiminde zorunlu olarak kısıtlamalara yönlendirmektedir. Bu amaçla araç lastiklerin yüzeyinde sürtünmenin azaltılması, ağırlıkta azalma, motor ve yakıt verimliliğinin artırılması, araç ön alanının küçültülmesi ve aerodinamik tasarımlar gibi yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır (Ünal, 2008). Örneğin; Japon taşıtlarında bugün Mg çok hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde de otomobil üretiminde magnezyum kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu alandaki gelişmeler Alman otomobilleri içinde geçerlidir. Birçok yapısal uygulamalarda hafif mühendislik malzemelerine olan talep teknoloji ilerledikçe artmaktadır. Bu gelişme gelişmeler ışığında magnezyum alaşımlarının yapısal uygulamalarının gelecekte daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir (Eçayan, 2010). Magnezyumun alaşımlarından biri olan ZE41 diğer alaşımlara göre otomotiv ve havacılık sektöründe ağırlık kazancından ve mukavemetinden dolayı daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Mg alaşımlarının yoğunluğu alüminyum ikide biri ve çeliğin üçte biri kadardır. Buna rağmen magnezyumun korozyon direnci azda olsa alüminyum a göre daha düşüktür (Khalfaoui ve ark., 2010). Magnezyumun, çinko ve Seryum ile beraber kullanılmasının Magnezyumun termal stabilitesini arttırdığı, daha kararlı bileşik oluştuğu ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir (Küyükoğlu, 2010). Bu alaşımların geliştirilmesi

alaşıma RE (rare earth; nadir toprak elementleri) katkılanarak olabileceği bu sayede yüksek sıcaklık dayanımı, yaşlanma dayanımı, mukavemetin iyileşmesi, sürünme dayanımı ve korozyon davranışlarında iyileşme olduğu rapor edilmiştir (Küyüköğlu, 2010). Mekanik özelliklerin geliştirilebilmesi ve korozyon direncinin artırılabilmesi açısından üretilecek alaşım kadar önemli olan ikinci etken ise alaşıma üretme yöntemidir. Alaşımların daha kaliteli ve az hata ile üretilebilmesi için günümüze kadar birçok alaşımlama yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi de MA yöntemidir. Bu yöntem ilk olarak oksit dağılımıyla sertleştirilmiş (ODS) alaşımların üretilmesi için kullanılmış fakat daha sonra Fe, Ni, Al esaslı süper alaşımların üretimi üzerine odaklanılmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından birisi normal ergime yöntemleriyle üretilmeyen alaşımlar bu yöntem ile üretilebilmektedir. Ayrıca günümüzde bu yöntem ile çok ince yapılarda nano boyutlu kristallerde üretilebilmektedir (Yılmaz, 2013). Bundan dolayıdır ki bu çalışmada ZE41 (%4 çinko %1 RE) alaşıma içerisine ağırlıkça belirli oranlarda Seryum (Ce) katkılanarak, mekanik alaşımlama yöntemi ile yeni katkılı ZE41 alaşımları üretilmiştir. Üretilen alaşımların mikro ve nano sertlik karakterizasyonu incelenmiş ve % 0,3'lük NaCl solisyonu içerisinde korozyon direnci gözlemlenmiştir. Bu tezin amacı; ZE41 alaşıma seryum elementi ilavesinin mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini incelemektir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMLAR

Literatürde yapılan çalışmalardan, Song ve Atrens., (1999), Song ve Atrens., (2003), Song ve Atrens., (2007). Magnezyum alaşımları için genellikle kabul edilen korozyon mekanizması % 3 lük NaCl çözeltisi içerisinde yapılan açık devre potansiyeli deneylerinden elde edilmektedir. Alaşımların yüzeyini kaplayan kısmi film ve bu filmde oluşan çatlama ile korozyon meydana gelir. Katodik reaksiyon hidrojen açığa çıkması ile olur, anodik reaksiyondaki ilk adım tek pozitif Magnezyum iyonunun  $Mg^+$ , üretimidir ve hidrojenin açığa çıkması için, bir kısmı su ile kimyasal reaksiyona girer. Böylece hem kimyasal hem de kısmi katodik reaksiyon ile hidrojen üretilmiş olur. Zhao ve ark., (2008); Song ve Atrens, (2003), Inoue ve ark., (2002). Magnezyum üzerindeki film kısmen koruyucudur. Magnezyum saflığı korozyon hızını değiştirir. Ticari saflığı olan magnezyum, saf magnezyuma göre 50 kat daha fazla korozyon hızına sahip olabilir. Bununla birlikte Ambat ve ark.,(2000), AZ91, Altun ve ark., (2004). AZ63'ün korozyon ve elektrokimyasal davranışına *klor iyonu* konsantrasyonu ve pH'ın etkisini incelemişlerdir. Zhang ve ark., (2008), Guo ve ark., (2007), Chang ve ark., (2007), Hamu ve ark., (2007), Neubert ve ark., (2007), Takenaka ve ark., (2007), Chang ve ark., (2007(b)), Yamasaki ve ark., (2007). Fakat şu ana kadar pH değerinin ve klor iyon konsantrasyonunun ne ZE41 nede Mg-Zn ve Mg-RE alaşımlarının korozyon davranışı üzerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu çalışmaların detaylı incelenmesi sonucu ZE41'in korozyon davranışının anlaşılması adına önemli bir araştırma olacaktır.

Nie ve ark., (2004). Nadir toprak elementi olan Erbiyum (Er)'un Al-Mg, Al-Zn-Mg-Cu alaşımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Katkılanan alaşımların yüksek saflık, ince tane boyutu ve yüksek sertliğe sahip olduklarını gözlemişlerdir. Bu nedenle Erbiyum'un etkili bir alaşım elementi olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu ve ark., (2007). AZ91 Magnezyum alaşımının korozyon davranışına Seryum ve Lantan nadir toprak elementlerinin etkisini araştırmışlardır. Alaşımların korozyon davranışlarını %3,5'lük NaCl solüsyonunda -1,5 V ile -1,6 V arasındaki bölgede incelenmiştir. Katkılanan nadir toprak elementlerinin korozyon özelliklerine pozitif katkı yapan en iyi oranının Seryum için %0,92 ve Lantan için %0,66 olduğunu belirtmişlerdir. Nadir toprak elementi katkısının AZ91 alaşımlarının mikroyapısına etkisini SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Dağılım Spektropisi), XRD (X-ışını Kırınım) kullanılarak incelenmiştir. Katkılanan AZ91 Mg alaşımlarında

zayıflamış  $\beta$ -fazı ve  $\alpha$ -fazı gözlemlemişlerdir. Bu fazlar korozyon direncinin iyileşmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir

Gray ve Luan., (2008). AZ serisi alaşımların mikroyapılarının korozyon davranışları üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar vardır. Diğer taraftan farklı magnezyum alaşımlarının mikroyapılarının ve eser miktardaki yapılan katkıların bu alaşımların korozyon davranışlarına etkisi de araştırılmaktadır. Bu alaşımlardan Mg-Zn-RE alaşımları son zamanlarda çalışılanlardan bir tanesidir. Mg-Y-RE-Zr alaşımında Zirkonyum tane inceltici olarak katkılanmakta olup tane merkezleri içerisinde Zirkonyumca zengin bölgelerin meydana gelmesine neden olur. Bu durum tanelerin geri kalan kısmı ile kıyaslandığında daha fazla korozyon direncine neden olur (Chang ve ark., 2008; Hamu ve ark., 2007; Chang ve ark., 2007). Zirkonyum partiküllerinin alaşım içerisinde homojen dağılımı daha kuvvetli bir oksit film tabakası üretildiğini düşündürmekte ve bu durum korozyon direncinin artmasına neden olmaktadır (Hamu ve ark., 2007). Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Mg-RE-Zn-Zr alaşımında Zirkonyumca zengin bölgelerde benzer davranışın sergilendiğini rapor etmişlerdir (Song ve Jhon, 2002). Kaya ve arkadaşları Mg-Y-Zr-RE alaşımı için Song ve arkadaşlarının gözlemlemiş olduğu davranışlara benzer davranışlar bulduklarını ifade etmişlerdir. Şu ana kadar Literatürde yapılan çalışmalarda Zirkonyumun Magnezyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmada faydalı olduğu gözlenmiştir (Kaya ve ark., 2006; Gao ve ark., 2005; Arroyave ve Liu, 2006; Li ve ark., 2007).

Kun ve ark., (2008). Yaptıkları çalışmada AZ31 alaşımına ağırlıkça %0,4, %0,8, %1,2 oranlarında Seryum katkılanmışlardır. AZ31 alaşımına katkılanan Seryum 'un katkılanığında iyi bir tane inceltme etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda Seryumun dağınık formlarda bulunabileceği ve termal olarak kararlı yapıda olabileceğini ifade etmişlerdir.

Neil ve ark., (2009). ZE41 Magnezyum alaşımlarının oldukça mükemmel mekanik özellikleri gösterirken buna paralel olarak neden zayıf korozyon direnci gösterdiğini araştırmışlardır. ZE41 alaşımlarının korozyon mekanizmaları ve Zirkonyumca zengin bölgelerin tane sınırları ile ve Magnezyumca zengin ana fazın etkileşimlerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda bu alaşımların sulu ortamdaki korozyon mekanizmalarının başlangıç aşamasında Zirkonyumca zengin bölgelerin oldukça önemli rol oynadıklarını ifade etmişleridir.

Ding ve ark., (2010). ZE41 alaşımını 320 °C’ de presleme işlemine tabii tutularak mikroyapı ve çekme testi sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Yapılan presleme sonrasında hem tane incelmesi hem de çökeltme gözlemlemişlerdir. Presleme sonrası ortalama tane boyutunda 2µm’lik bir azalma gözlemlemişlerdir. Bu durum alaşımın mukavemeti ve sünekliliği değiştirdiğini ifade etmişlerdir.

Rodrigo ve ark., (2010). ZE41 magnezyum alaşımını Al ve Al-SiC kompozitler ile kaplamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında aşınma deneylerini kullanmışlardır. Kaplama sonrası alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerinde küçük çapta kötüleşme meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Kaplama ile güçlendirilen alaşımların kaplanmayan ZE41 alaşımlarına göre %85 daha iyi aşınma direnci gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Jia ve ark., (2010). AZ31B alaşımına Neodim katkılayarak Neodim’in AZ31B alaşımının mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. alışmalarında alaşımların mikroyapısını optik mikroskop, SEM ve XRD ile incelemiştir. Yaptıkları deneyler sonuçları Neodim ilavesi yapılan alaşımlarının yüksek erime noktası, yüksek termal kararlılık formları ile oldukça dikkat çekici faz ve ince tane boyutlarına sahip olduğunu göstermektedir. Neodim içeren AZ31B alaşımının mekanik özelliklerinin iyileştiği, uzama ve çekme dayanımının AZ31B Magnezyum alaşımı ile karşılaştırıldığında sırası ile % 1.2 Neodim içeren AZ31B magnezyum alaşım için % 25 ve % 6.8 Neodim içeren AZ31B magnezyum alaşım için % 62 arttığını gözlemlemişlerdir.

Zhao ve ark., (2010). Mg-1.5Zn-0.2Zr Magnezyum alaşımında Seryum katkısının mikroyapıdaki değişimi incelenmiştir. Alaşıma ağırlıkça %0, 0.1, 0.3, 0.5 oranında Ce katkılamışlardır. Katkılı alaşımları optik mikroskop, X-ışını kırınım tekniği ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Seryum katkısının Mg<sub>12</sub>Ce fazı formunda oluşum gösterdiğini, tane boyutunun küçüldüğünü, oluşan Mg<sub>12</sub>Ce faz dağılımının git gide dağıldığını gözlemlemişlerdir. 0,3 Ce katkının en iyi tane inceltici etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Nam ve ark., (2014). Mg-5Al alaşımına ağırlıkça %0 dan %4 oranında Zn eklenerek Mg-5Al alaşımının Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve yüzey teknik analizleri ile incelemişlerdir. Zn içeren Mg-5Al alaşımının elektrokimyasal potansiyelinde azalma meydana geldiğini ve korozyon davranışında iyileşme gözlendiğini ifade etmişlerdir. Zn içermeyen, Mg-5Al tabanlı alaşımlarda korozyon

direncinin ve hidrojen gelişim oranlarının daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca Zn ilavesi-Mg, katı çözelti fazında tane boyutunda bir azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Zakiyuddin ve Lee., (2015). Düşük alaşımlı Mg-Ca alaşımının korozyon direncini tipik bir sistem içerisinde gözlemişlerdir. Alaşımları 3 Grupta incelemişlerdir. İkili (Mg-Ca), üçlü (Mg-Ca-Zn ve Mg-Ca-Mn) ve dördüncü (Mg-Zn-Mn-Ca). olarak adlandırmışlardır. Mg-Ca-esaslı alaşımların aşınmasına fizyolojik ortamı simüle ederek, bir potansiyodinamik polarizasyon testi ve biyomedikal uygulamalar için bir hidrojen gelişim ölçüm testini kullanmışlardır. Mg-Ca alaşımına ağırlıkça %0,5 ten %1'e kadar Zn eklenmiştir ve korozyon direncinin daha olumlu bir bölgeye doğru kaydığını ve korozyon akımının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Diğer taraftan, Mn ağırlıkça %0,5 ten %1'e kadar arttırılmış ve korozyon potansiyelinin daha olumlu bir bölgeye doğru kaydığı gözlenmiş ancak korozyon akımı artmıştır. Gözlemlenen mikro arası metalik faz ve çökelti dağılımları üçlü ve dörtlü alaşımlarında önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. Dahası Mn, Mg yüzeyinde bir tabaka oluşturarak Mg'un çevre ile ilişkisini azaltarak yüzeyde pasip bir tabaka meydana getirdiğini belirtmişlerdir

Meza-García ve ark., (2015). Çalışmalarında, çinko, zirkonyum ve seryum ilavelerinin mikroyapı üzerine etkiler ve magnezyumun tekrar kristalleşme gelişimini incelemişlerdir. Ana değişkenler olarak, tane boyutu ve kimyasal bileşim ile haddeme deneylerini kullanmışlardır. Alaşım elementi içeriği ve işlem değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak dinamik yeniden kristalleşme (DRX) sürecinin gelişiminde önemli değişiklikler gözlemlemişlerdir. Zirkonyumun tane irileşmesi meydana getirdiğini ve homojen bir yapı oluşturup magnezyumun yeniden kristallenme gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Zhou ve ark., (2015). Yaptıkları çalışmada, Mg-1Mn-2Zn-xNd alaşımında Nd katkısını ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 olarak değiştirerek bu alaşımların mikromekanik, korozyon ve biyoyumluluk özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmaları sonucu saf Magnezyum ile karşılaştırıldığında Mg-1Mn-2Zn-xNd alaşımının tüm kombinasyonlarının daha iyi süneklilige ve çok daha iyi mekanik mukavemete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Nadir Toprak elementi olan Nd'nin oranının arttıkça doğru orantılı olarak gerilme mukavemetini ve sünekliliğide arttırdığını ifade etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Otomotiv, uzay ve Askeri savunma sanayisinde kullanılmak üzere birçok alaşım üretilmektedir. Üretilen bu alaşımlardan biride ZE41 magnezyum tabanlı alaşımdır. Bu alaşım; Döküm, Hızlı katılaştırma ve Mekanik alaşımlama gibi farklı yöntemler ile üretilmektedir. ZE41 alaşımları genellikle otomotiv sanayisi başta olmak üzere askeri uzay savunma sanayi ve aşırı hareketli parçaların üretiminde korozyon direnci, mekanik dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, ısı stabilizasyonu ve hafifliği nedeniyle kullanılmaktadır. ZE41 Alaşımında kütlece %4 Zn ve %1 RE bulunmakla birlikte kalan % 95 lik kısım Mg'a aittir. Bu tez çalışmasında, ZE41 alaşımına farklı oranlarda % ağırlıkça Ce katkılanmıştır. Katkılama miktarlarına göre alaşımlar Çizelge 3.1'de verilmektedir. Katkılama oranına göre alaşımlar ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 şeklinde kodlanmıştır. Tezin bundan sonraki kısımlarında kolaylık sağlama adına bu kodlamalar kullanılacaktır. Bu aşamadan sonra bu kodlamalar kullanılacaktır.

Çizelge 3. 1. ZE41 alaşımı ve katkılarının kütlece % değerleri (gr)

| <i>İçerik</i>          | <i>ZE41</i> | <i>ZE41Ce1</i> | <i>ZE41Ce2</i> | <i>ZE41Ce3</i> |
|------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Mg</i>              | 3,820       | 3,808          | 3,796          | 3,784          |
| <i>Zn</i>              | 0,160       | 0,160          | 0,160          | 0,160          |
| <i>Ce</i>              | 0,020       | 0,032          | 0,044          | 0,056          |
| <i>Stearik Asit</i>    | 0,080       | 0,080          | 0,080          | 0,080          |
| <i>Bilye-Toz Oranı</i> | 20:1        | 20:1           | 20:1           | 20:1           |

Magnezyum(Mg); ZE41 alaşımında temel olarak kullanılan elementtir ve bu alaşımda mukavemet ve hafiflik magnezyum tarafından sağlanmaktadır.

Çinko(Zn); ZE41 de %4 lük kısmı ihtiva eder ve korozyona karşı dayanıklılık sağlar, ayrıca mukavemete ve mekanik özellikleri iyileştirmede oldukça başarılıdır.

Seryum(Ce); Nadir Toprak Elementlerinden Seryum bu alaşımda % 1 lik kısmı ihtiva eder ve tanecik boyutunu küçültme, yüksek sıcaklıklarda kararlılık, mukavemet, korozyon direnci ve mikro özellikleri iyileştirmeye yönelik katkılanmıştır.

Bu çalışmada ZE41 magnezyum bazlı alaşıma ağırlıkça %0,3, %0,6 ve %0,9 oranında Seryum katkılanarak geliştirilen ZE41 alaşımının mekanik ve korozyon özellikleri incelenecektir.

### 3.2. Yöntem

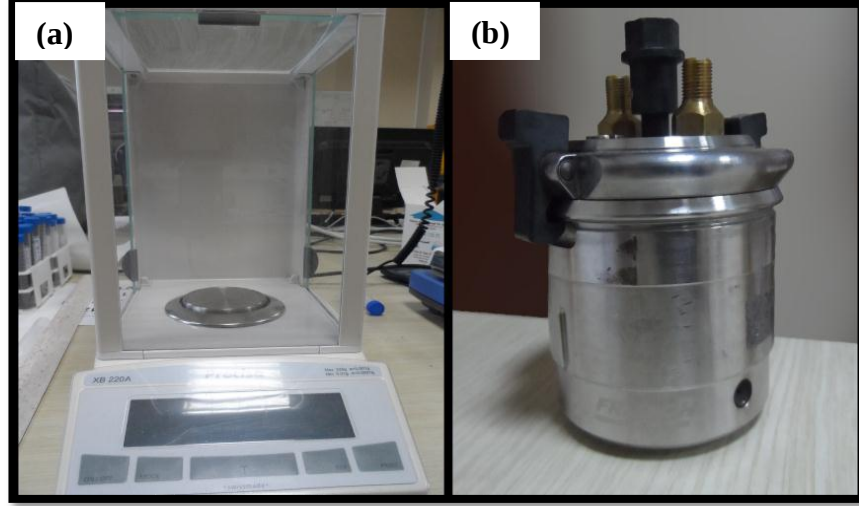
#### 3.2.1. ZE41 Alaşımlarının Üretilmesi

Bu çalışmada mekanik alaşımla işlemi için ilk olarak, Magnezyum (Mg), Çinko (Zn), Seryum (Ce) elementleri ZE41 alaşımını üretmek amacıyla inert bir ortam olan Innovative Technology IL-2GB marka (Şekil 3.1'deki) globox içine alınmıştır.

Bu elementler Precisa XB220a marka (Şekil 3.2 a) hassas terazi ile istenilen oranlarda (Çizge 3.1'deki oranlarda) tartılmıştır. Tartılan elementler FRITSCH marka çelik haznelerin içerisine (Şekil 3.2 b), 1:20 oranında bilye ve ağırlıkça %0,8 oranında stearik asit ile beraber konuldu. Hazneler FRITSCH Pulverisette 7 markalı Gezegensel Öğütücü (Şekil 3.3) içerisine yerleştirildi

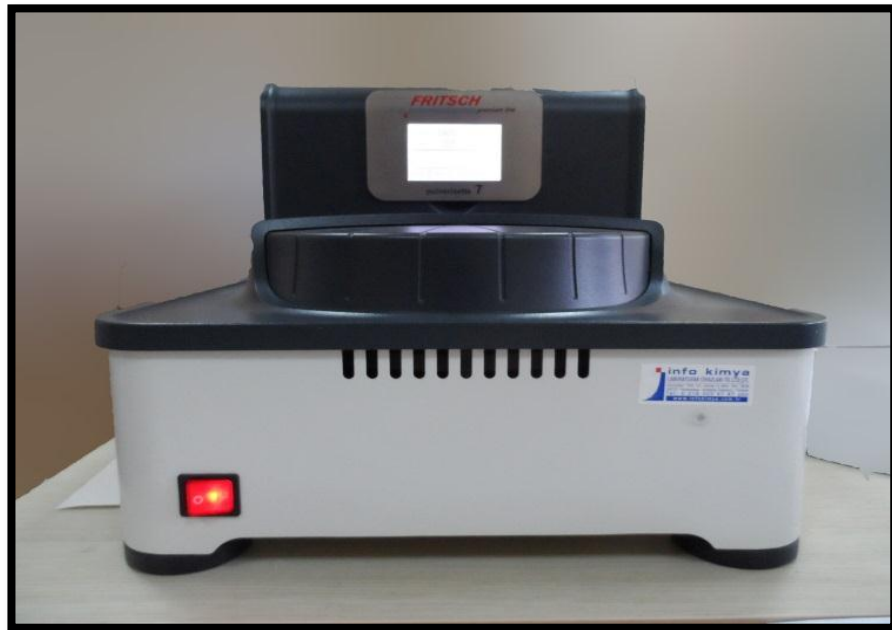


Şekil 3.1. Innovative Technology IL-2GB Marka Globox

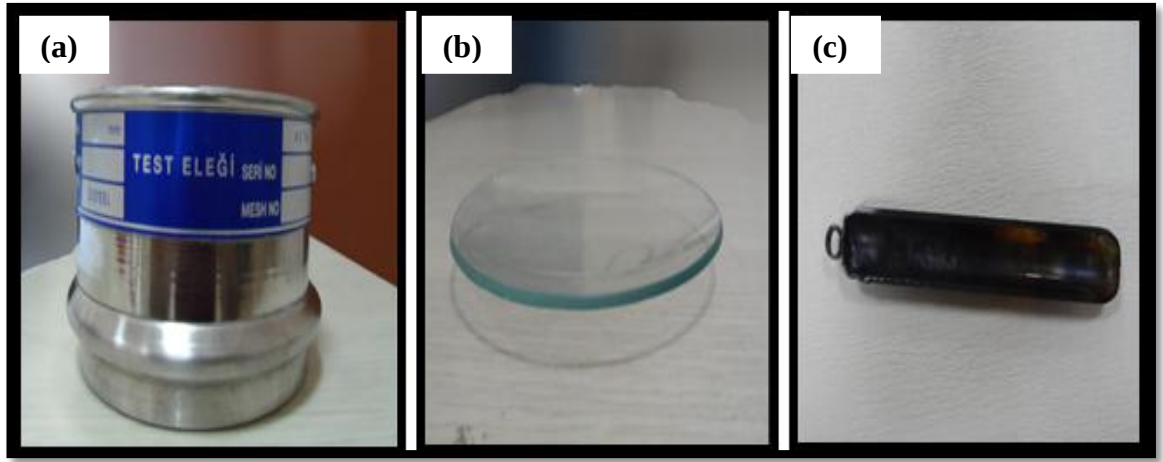


Şekil 3.2. (a); Hassas terazi (b); Çelik hazne

Gezegensel Öğütücü içerisindeki numuneler 600 rpm hız ile önce sağdan sola doğru 6 saat döndürülerek daha sonra 60 dk beklenerek soldan sağa doğru tam homojen dağılım sağlamak için otomatik olarak öğütüldü. Öğütme süresi işlemi sonrası hazneler Globox içerisine alınmıştır. Hazneler içerisinden mekanik alaşımlama ile oluşmuş alaşımlar 1mm'lik elekler (Şekil 3.4 (a)) yardımıyla oval bir cam (Şekil 3.4 (b)) içerisine elendi. Elenen numuneler fırınlama işlemi için quartz potalara (Şekil 3.4 (c)) dolduruldu.



Şekil 3.3. Gezegensel Öğütücü



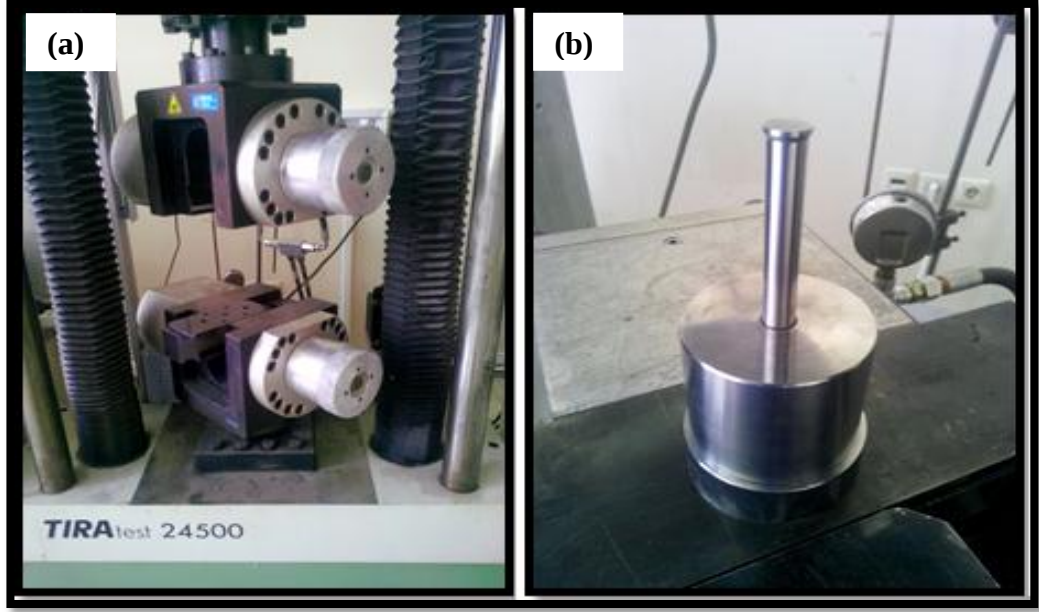
Şekil 3.4. (a); Elek (b); Oval Cam Hazne (c) Quartz Pota

Quartz Potaların içerisindeki alaşımlar Protherm marka atmosfer kontrollü fırın (Şekil 3.5) içerisine konuldu.

Atmosfer kontrollü fırında oksitlenme minimum seviyede tutulmuş oldu. Fırının 60 dakikada 400 C°'ye çıkması ve 400 C° de 60 dakika programlandı. Böylelikle alaşım içerisindeki stearik asidin ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) buharlaşması sağlandı. Fırın içerisinden çıkarılan alaşımlar preslenmek için Globox içerisinde plastik bir tutucuda muhafaza edildi.



Şekil 3.5. Atmosfer Kontrollü Fırın

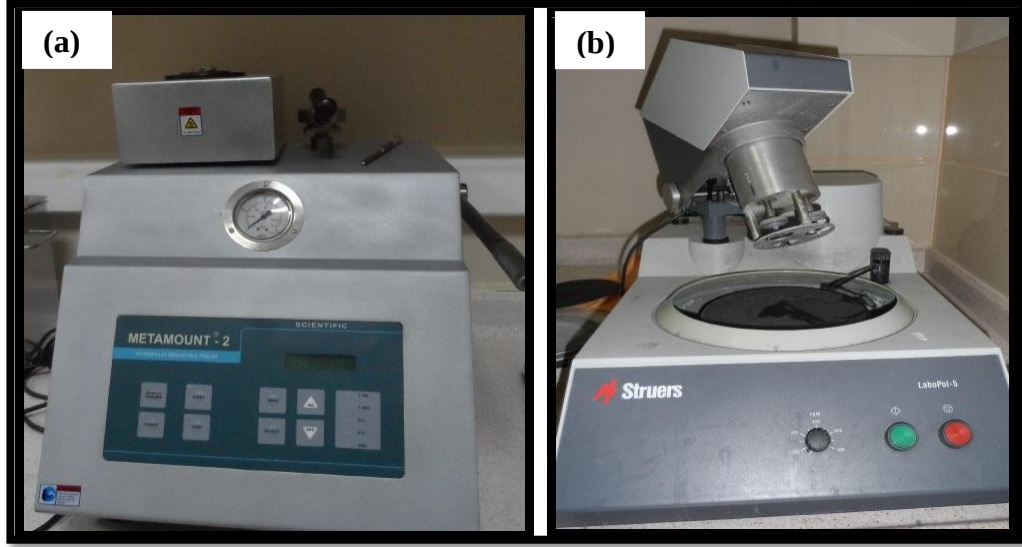


Şekil 3. 6. (a); Press (b); Kalıp

Oluşturulan toz haldeki ZE41 alaşımları TIRA test 24500 (Şekil 3.6(a)) pres cihazında uygun pres kalıplarıyla (Şekil 3.6 (b)) kademeli olarak 1,500 tona çıkartıldı. 60 sn kontrollü olarak bekletildi kademeli olarak 6,500 tona kadar çıkartıldı ve burada 600sn kontrollü olarak yük bekletildikten sonra kalıptan metal bir çubuk ile üzerine hafif bir yük uygulanarak çıkartıldı ve sinterleme işlemine hazır hale getirildi. Çıkartılan kalıplar Protherm PFT 12/50/450 marka atmosfer kontrollü fırın (Şekil 3.5) içerisine tekrar konuldu ve sinterleme işlemine başlandı. Sinterleme sıcaklığı ağırlıkça fazla olan numunenin erime sıcaklığının 0,7 si kadardır. Bu ZE41 alaşımları için ortalama 400 C°'dir. Fırın 150 dakikada 400 C°' te çıkması için ayarlandı bunun nedeni kademeli olarak düzgün bir artış sağlamak ve istenmeyen yapıların oluşmasını engellemektir. Fırın kademeli olarak kontrollü bir şekilde soğuması sağlandı.

### 3.2.2. Alaşımların Karakterizasyon Hazırlığı

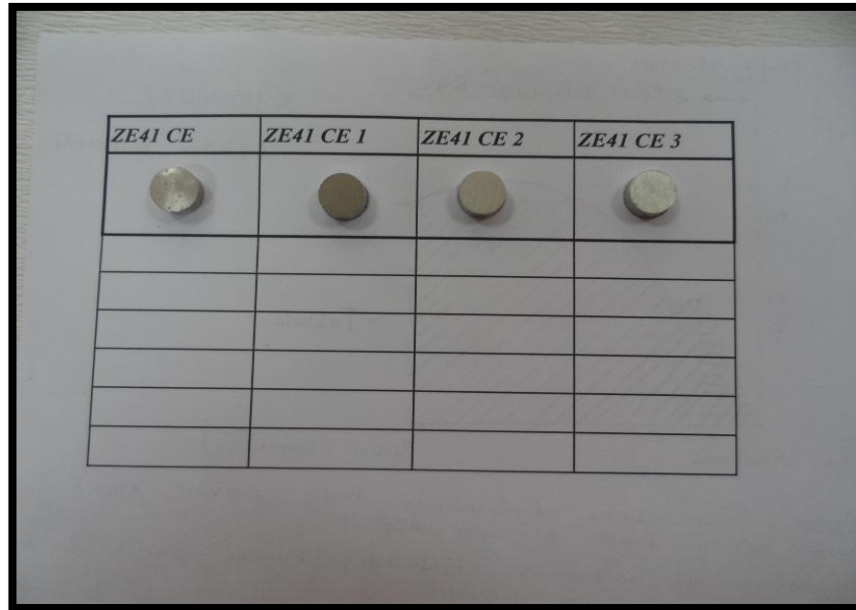
Sinterleme işleminden sonra numunelerin yüzeylerindeki oksit tabakasının ve oluşabilecek yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi gerekir. Bunun için öncelikle numunelerin kalıplama işlemine tabii tutulması gerekir bunun nedeni numunelerin oturtulabileceği düz bir zemin hazırlamaktır böylece karakterizasyon aşamalarından biri olan sertlik aşamasında numune üzerine uygulanan yük kontrollü ve dik olarak numune yüzeyine etki edecektir.



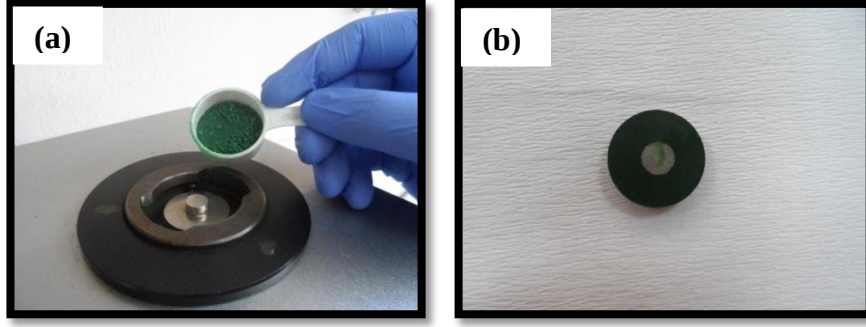
Şekil 3.7. (a) Kalıplama Cihazı (b); Parlatma Cihazı

Bu çalışmadaki kalıplama işlemi Metalografik kalıplama cihazı (Şekil 3.7(a)) ile yapıldı. Kalıplama işleminden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğünü gidermek ve sertlik deneylerinde daha iyi görüntü alabilmek için kalıplı numuneler Struers Labopol marka Yük Kontrollü Hassas Parlatma cihazı (Şekil 3.7(b)) ile parlatıldı.

Parlatmadan önce numunelerin kalıplama işlemi öncesi durumları Şekil 3.8’de, kaplama durumları şekil 3.9 (a)’da ve kalıplama sonrası durumları şekil 3.9 (b)’de görülmektedir.



Şekil 3. 8. Numunelerin Kalıplama İşleminde Önceki Görüntüleri



Şekil 3. 9. (a); Kalıplama işlemi Sırasında (b); Kalıp İşlemi Sonrasında Numune

Numunelerin parlatma aşamaları ve parametreleri uygulanırken uluslararası standartlara bağlı işlemler yapıldı. Parlatma cihazının devri 300 devir/dakika olarak belirlendi. Her kademe için farklı zımparalar kullanıldı kullanılan her zımpara bir önceki zımpara kalınlığından daha düşük tutuldu ayrıca dönen manyetik disk üzeri sürekli ıslak tutularak numune yüzeyinde oluşabilecek deformasyon ve istenmeye çizikler minimuma indirgenmiş oldu. Ayrıca her zımpara aşamasından sonra numune yüzeyleri incelenerek istenilen sonuçların doğrultusunda bir sonraki aşamaya geçildi istenilen yüzeyin elde edilememesi durumunda tekrar zımparalama işlemi en başından tekrarlandı. Normal zımparalama işlemleri tamamlandıktan sonra ve numunenin yüzeyinin istenilen oranda parlaması sağlandıktan sonra sırasıyla 3µm, 1µm, 0,25µm’lik keçeler ve bu keçelere ait özel sıvılar kullanılarak kontrolü olarak yüzeyin parlatılması sağlandı ve en son aşamada koloidal silika kullanılarak yüzeyin çiziklerden arındırılması sağlandı. Burada elde edilen yüzey görüntüleri 4. Bölüm de Araştırma bulguları altında ayrıntılı olarak verilmiştir. Malzeme karakterizasyon hazırlıklarının tamamı, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Mikro/Nano Mekanik Karakterizasyon Laboratuvarı’nda yapıldı.

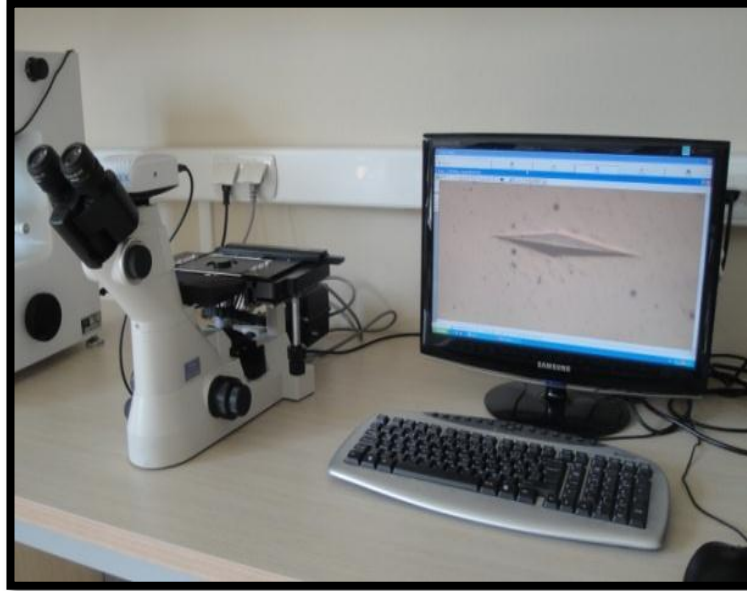
#### 3.2.3.1. Alaşımın Statik Sertlik Analizleri

Bu tez çalışmasında geleneksel sertlik analizleri Future-Tech FM 700 marka mikro sertlik cihazı (Şekil 3.10) ile yapıldı. Geleneksel sertlik ölçüm yöntemi olarak Vickers ve Knoop Sertlik deneylerinden faydalanıldı. Vickers ve Knoop uçları ile numune yüzeyine farklı 8 yük uygulandı. Her bir yük için 15sn’lik temas süreleri belirlendi ve bu sertlik cihazına programlandı. Uygulanan yükler sonucu oluşan izlerin

görüntüleri Nikon MA 100 ters metal mikroskobu (Şekil 3.11) ile görüntülendi. İz boyutu ölçüm işlemleri, Clemex Görüntü analiz programı ile yapıldı.



Şekil 3.10. Mikro Sertlik Cihazı



Şekil 3.11. Ters Metal Mikroskobu ve Görüntü analiz programı

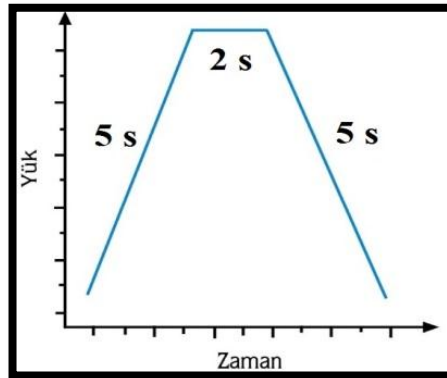
### 3.2.3.2. Numunelerin Dinamik Sertlik Analizleri

Bu çalışmadaki derinlik duyarlı (dinamik) nanosertlik ölçümleri, HYSITRON TI-950 TriboIndenter test cihazı kullanılarak yapıldı (Şekil 3.12). Dinamik analizler, 1000  $\mu\text{N}$ 'dan 10000  $\mu\text{N}$ 'a kadar 1000  $\mu\text{N}$ 'luk artışlarla kademeli yükleme boşaltma (step load-unload) eğrileri ile elde edildi. Bütün ölçümler için maksimum yükteki bekletme süresi 2 sn olarak seçildi. Yükleme ve boşaltma hızları da bütün ölçümler için aynı olarak ayarlandı (Şekil 3.13).

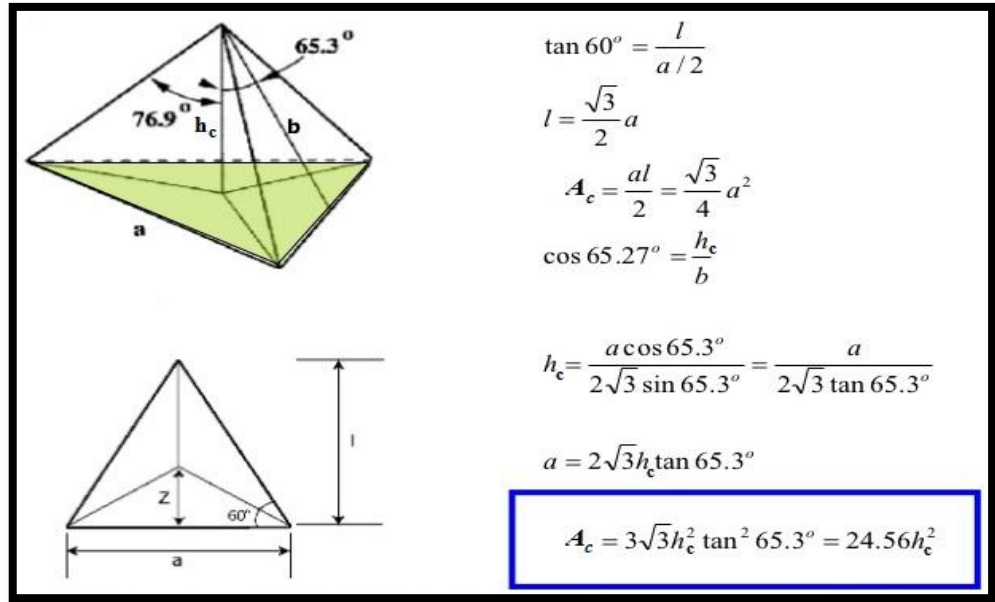
Dinamik sertlik deneylerinde Berkovich uç kullanıldı. Bu uç'un şematik gösterimi şekil 3.14'de verilmektedir. Uç'a ait kontak (temas) alanı  $A_c$ ;  $24,56h_c^2$  dir (Oliver ve Pharr, 2004)



Şekil 3.12. Sertlik deneyleri için kullanılan TI 950 TriboIndenter test cihazının genel görünümü



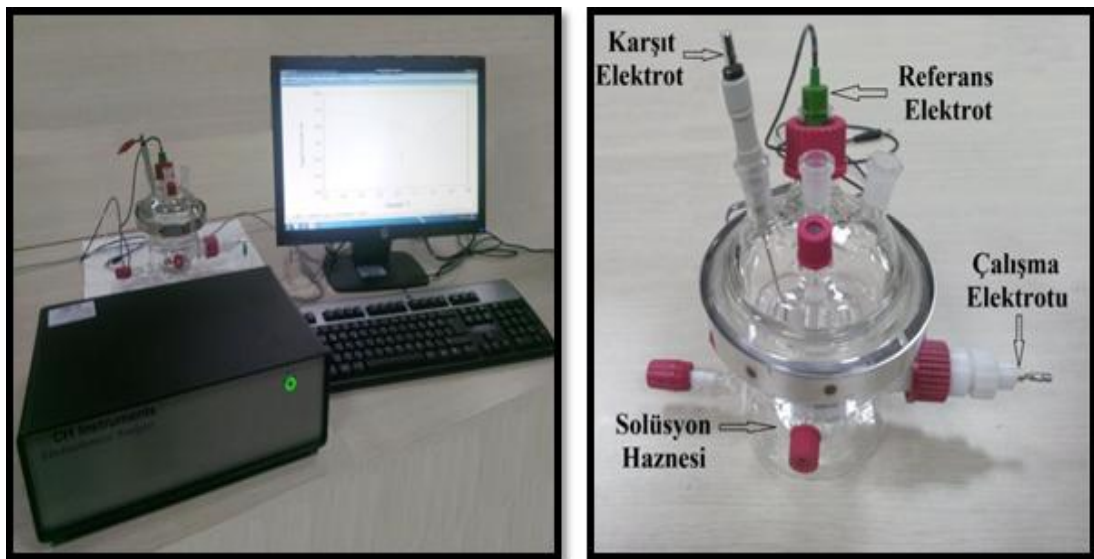
Şekil 3.13. Dinamik sertlik analizinde yükleme profili



Şekil 3.14. Berkovich uç'un şematik gösterimi

#### 3.2.4. Alaşımın Korozyon Analizi

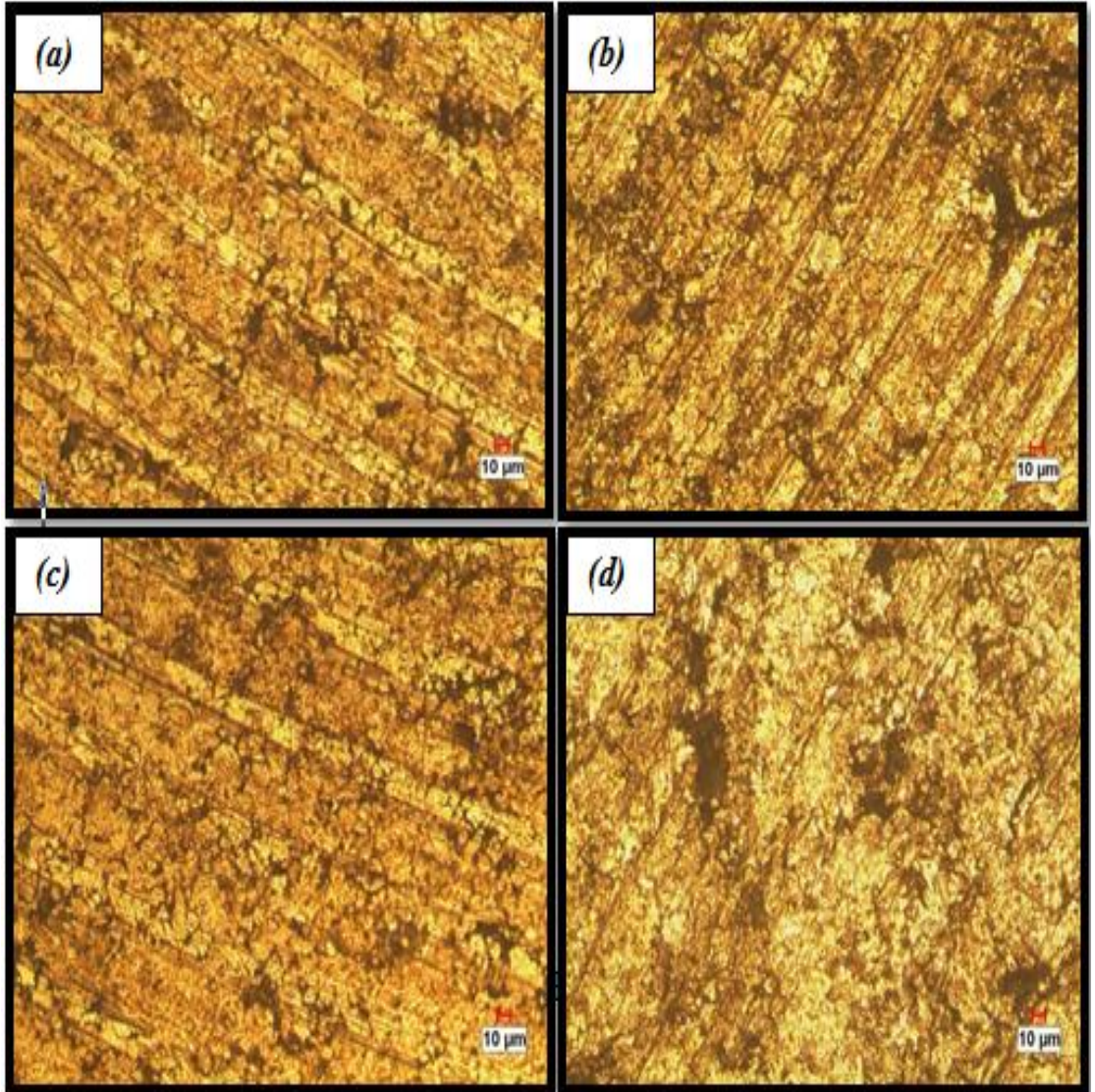
Numunelerin korozyon deneyleri Şekil 3.15'te gösterilen CH Instruments firmasının "Electrochemical Analyzer" markalı 602E modeli "potansiyostat/galvanostat" cihazı kullanılarak yapıldı. Deneylerin tamamında özellikle yüksek çözelti direncine sahip hücreler için kullanılan standart 3 elektrotlu sistem kullanıldı. Sistemde, çalışma elektrotu (ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3), karşıt elektrot (platin tel) ve referans elektrot (doygun kalomel elektrot (SCE)) kullanıldı.



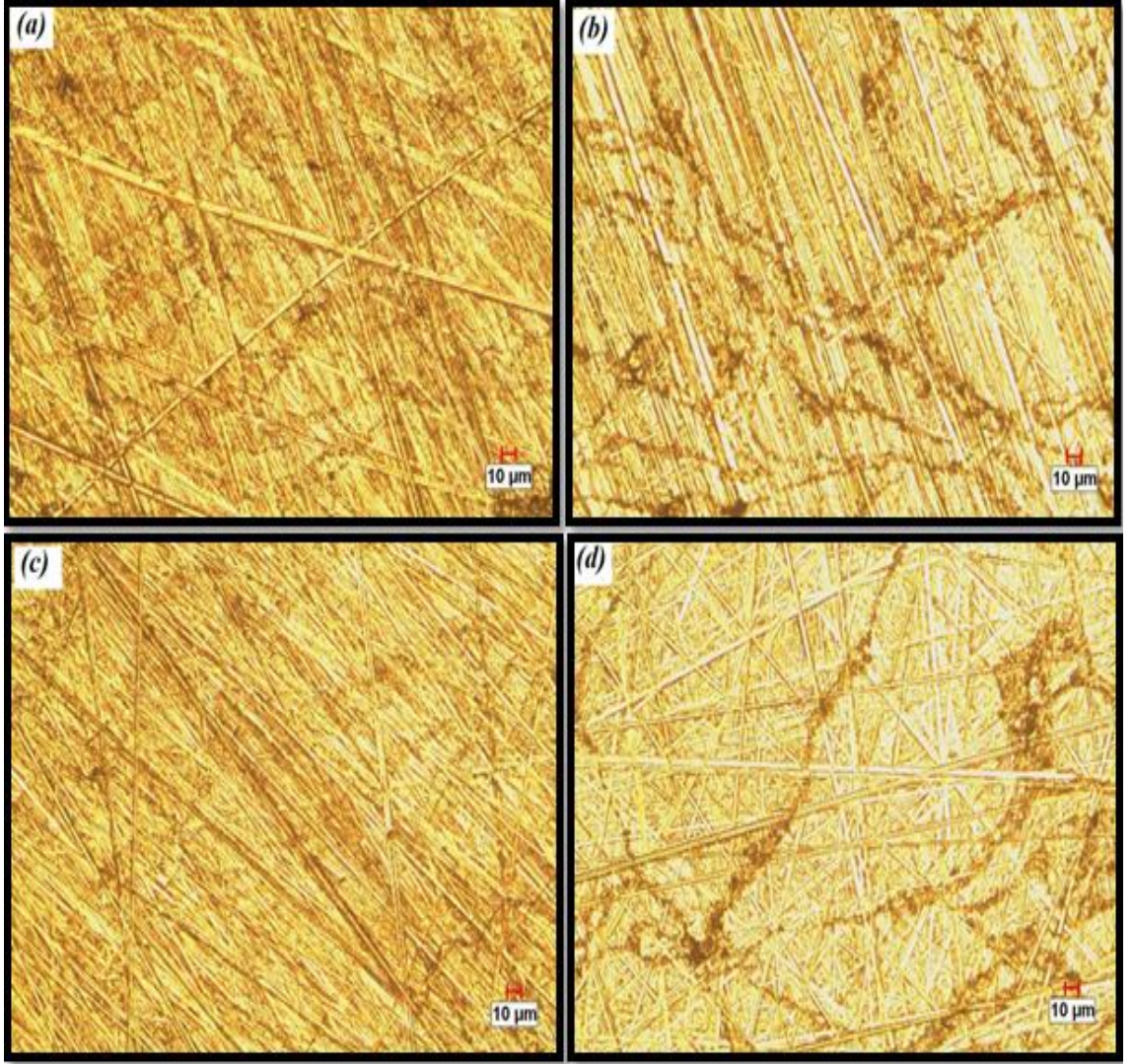
Şekil 3.15. Elektrokimyasal test sistemi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Alaşımların mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve mekanik karakterizasyon için hazırlıkları Bölüm 3.2 de Yöntem başlığı altında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde anlatılan ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 kodlu alaşımların yüzey hazırlık işlemlerinin, parlatma öncesi alaşımların optik görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Herhangi bir mekanik parlatma işlemine tabi tutulmadan önceki numunelerin yüzeyindeki korozif atıklar, kirlilikler ve çatlaklar Bu şekillerden açıkça görülmektedir. Yüzey parlatma işlemleri için kullanılan 800 gritlik zımparalama işlemi sonrasında optik görüntüler Şekil 4.2’de verilmektedir



Şekil 4.1. Zımparasız (a); ZE41 (b); ZE41Ce1 (c); ZE41Ce2 (d); ZE41Ce3

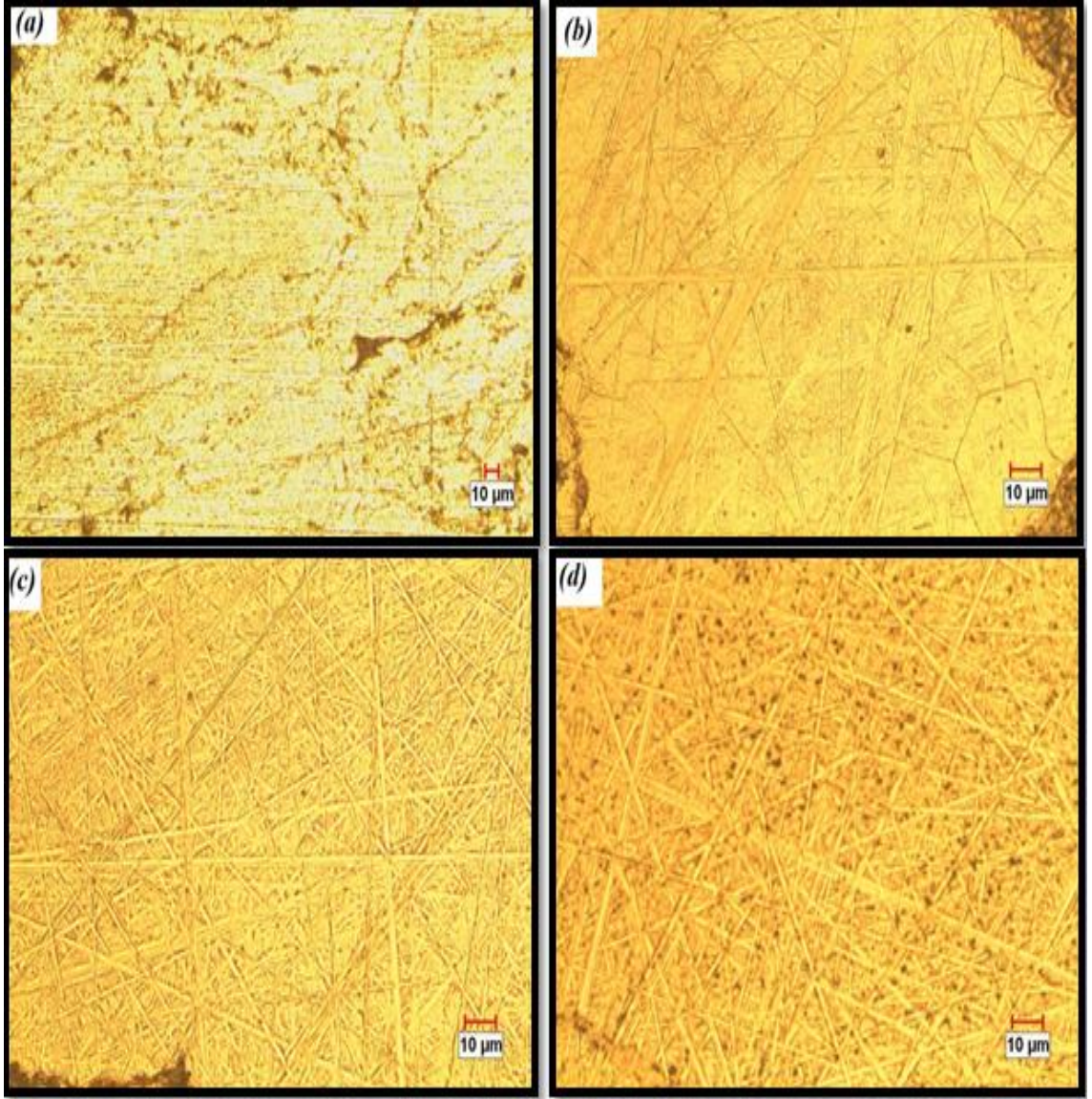


Şekil 4. 2. 800 gritlik zımpara (a); ZE41, (b); ZE41Ce1, (c); ZE41Ce2, (d); ZE41Ce3

800 gritlik zımparalama işleminden sonra numune yüzeyindeki koroziyon atıkları, kirliliklerin ve çatlakların Şekil 4.1'deki duruma göre iyileşmiş olduğu açıkça Şekil 4.2'de görülmektedir.

Yüzey parlatma işlemleri için yapılan 2400 gritlik Zımparalama işlemleri sonrasındaki optik görüntüleri Şekil 4.3'de verilmektedir.

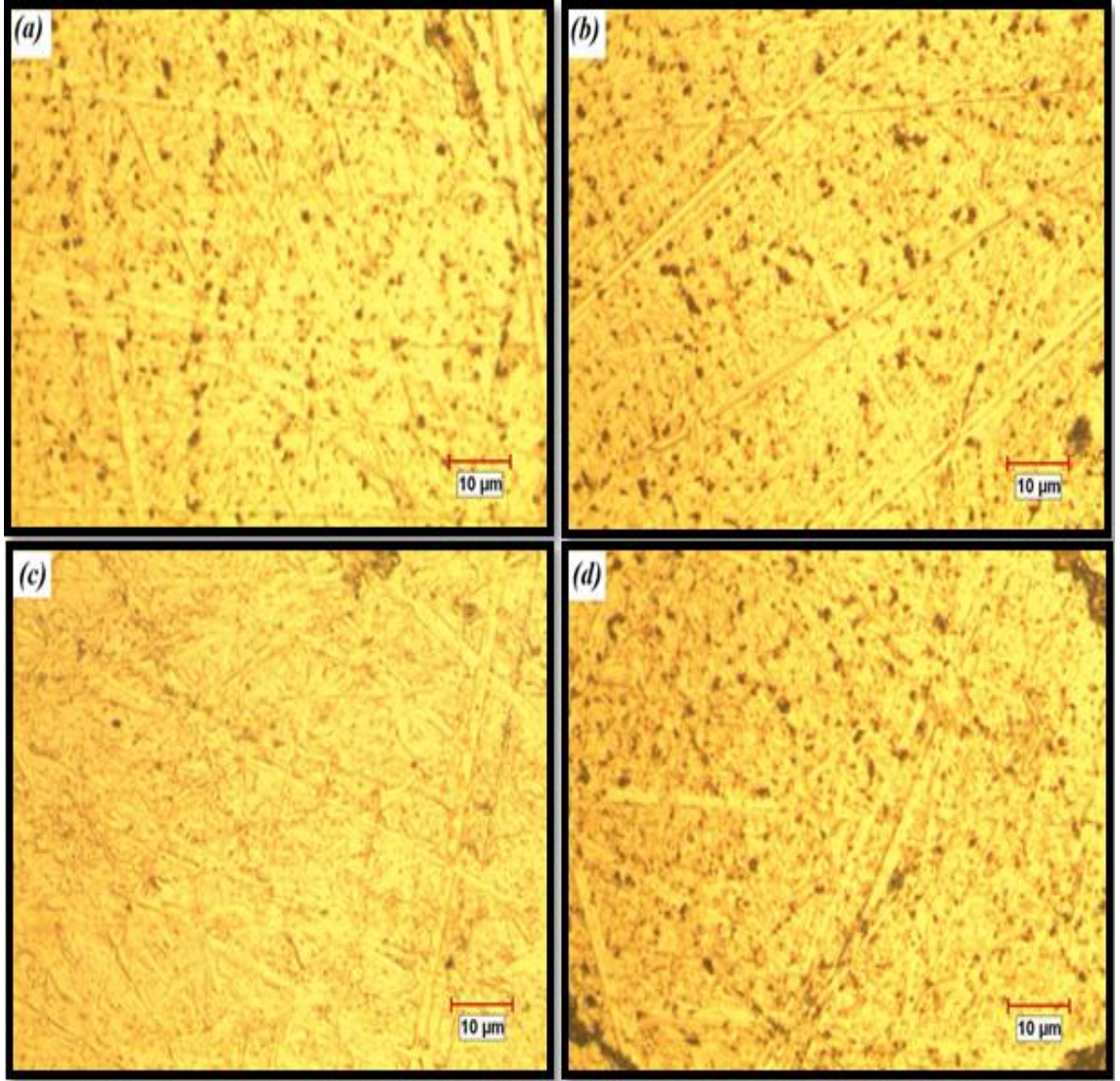
2400 gritlik zımparalama işlemine tabii tutulan numunelerin bu işlemten sonra tanecik sınırları Şekil 4.3'de görülmektedir aynı zamanda Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 deki koroziyon atıklarının ve çatlakların daha iyi bir şekilde düzeldiği ve yüzeyin neredeyse hatasız bir biçim aldığı Şekil 4.3'de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3. 2400 gritlik Zımpara Sonrası (a); ZE41, (b); ZE41Ce1, (c); ZE41Ce2, (d); ZE41Ce3

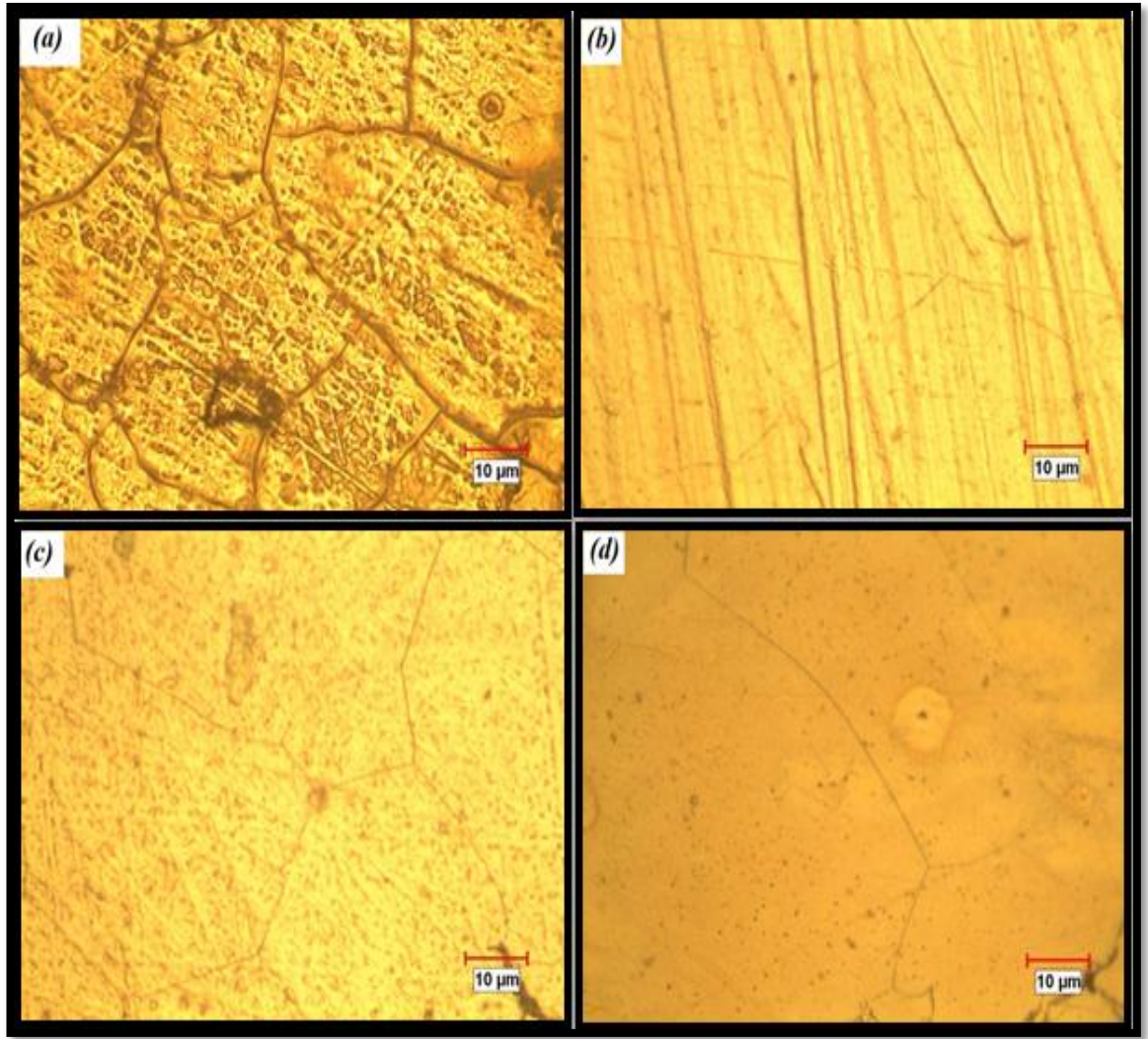
Yüzey parlatma işlemleri için yapılan 4000 gritlik zımparalama işlemleri sonrasındaki optik görüntüleri Şekil 4.4’de verilmektedir.

4000 gritlik zımparalama işleminden sonra numune yüzeyi neredeyse tamamen pürüzsüz hale geldiği ve tanecik sınırları ile mikro yapının Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3’e göre daha belirgin olduğu ve çiziklerin çok daha azami düzeye indirildiği açıkça Şekil 4.4’te açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4. 4000 gritlik zımpara Sonrası (a); ZE41, (b); ZE41Ce1, (c); ZE41Ce2, (d); ZE41Ce3

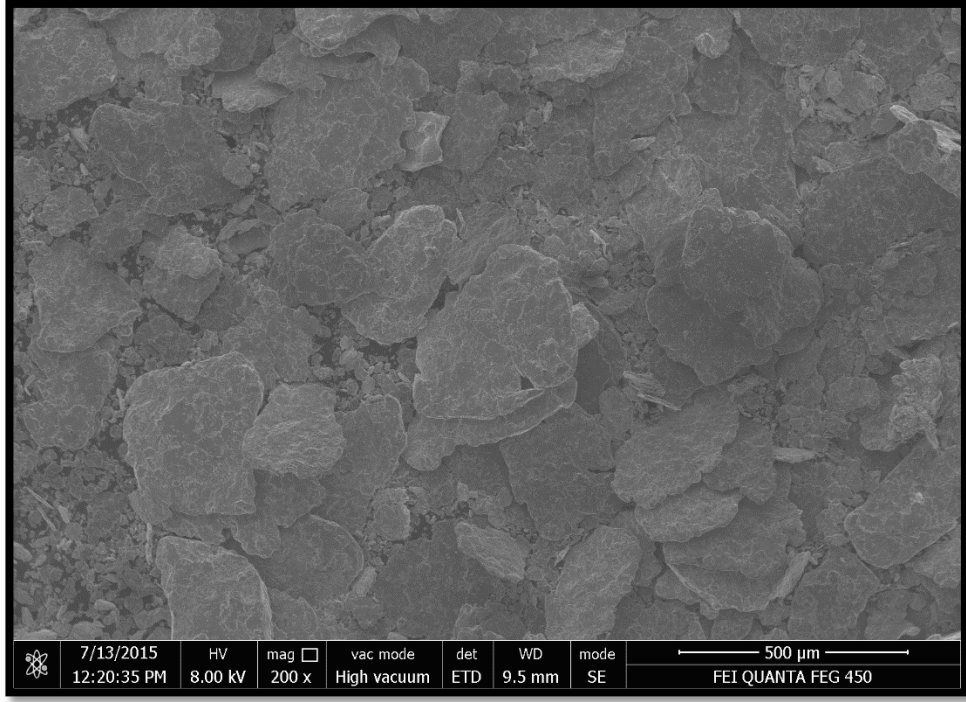
Yüzey parlatma işlemleri için yapılan Keçeleme işlemleri sonrasındaki optik görüntüleri Şekil 4.5’de verilmektedir. Zımpara işlemleri sırası ile 800gritlik, 2400 gritlik, 4000 gritlik ve keçeler olarak yaonılmış olup yüzey yapısı ve dentrik yapı keçelere doğru daha belirgin olduğu şekillerden açıkça görülmektedir. Yüzey yapısının kötü olması yada yüzeyde fazla sayıda çatlak ve defrmasyonların olması mekanik özellikler belirlenirken hatalara yol açmakta ve doğru analizlerin yapılması engellemektedir.



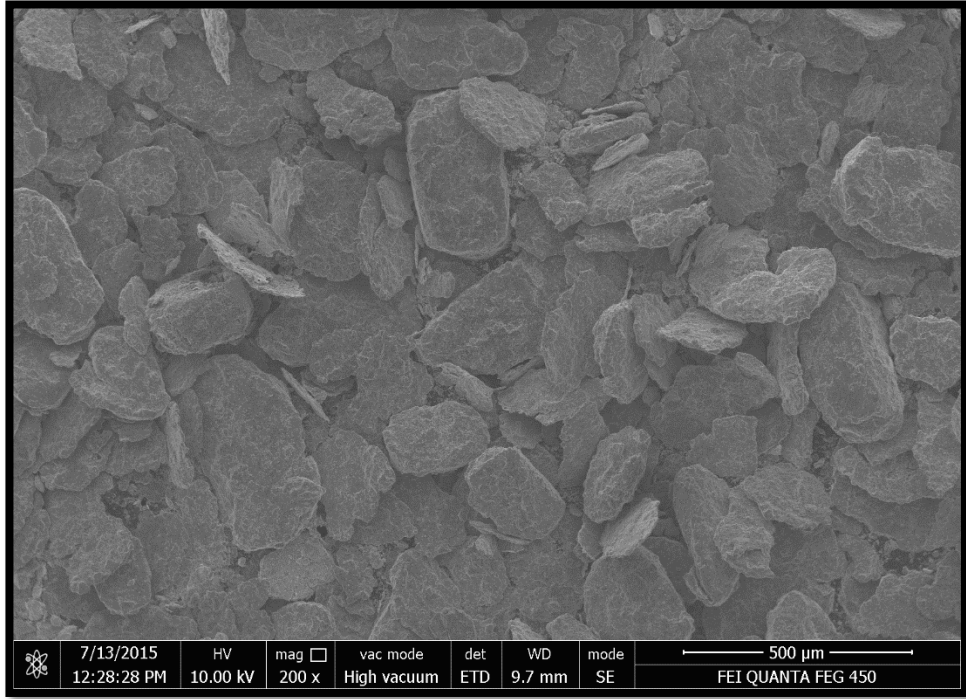
Şekil 4.5. Keçeler Sonrası (a); ZE41, (b); ZE41Ce1, (c); ZE41Ce2, (d); ZE41Ce3

Keçeler sonrasında mekanik alaşımlama ile üretilen ZE41 alaşımlarının dentrik yüzey yapısı yavaşça ortaya çıkmış ve Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4'te elde edilen numune yüzeylerinin görüntüleri ile kıyaslandığında çizikler ve çatlakların kabul edilebilir düzeye indiği açıkça Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu işlemler sonrasında numune yüzeyinin statik ve dinamik sertlik deneyleri için hazır hale getirilmiş olduğu görülmektedir. Bu aşamadan sonra alaşımlar mekanik testlere tabii tutularak alaşımların mekaniksel özellikleri analiz edilecektir. Ayrıca korozyif ortamdaki davranışları da incelenerek alaşımların korozyon dirençleri ve korozyon akımları belirlenecektir.

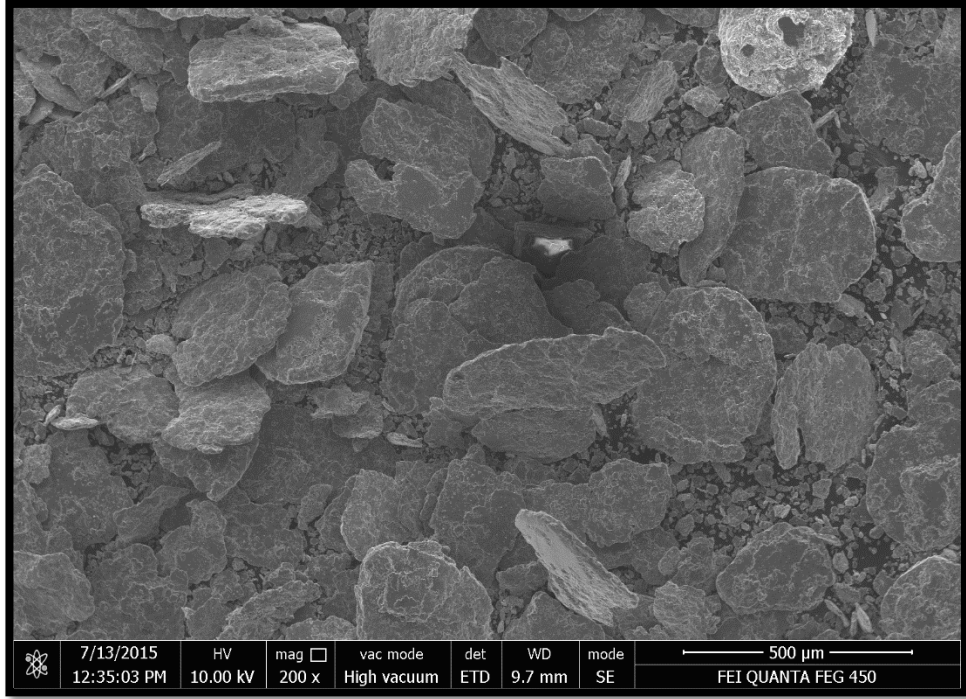
Şekil 4.6-4.9'da sırası ile ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait SEM görüntüleri verilmektedir. SEM görüntülerinin tamamından alaşımların homojen yapıda oldukları görülmektedir.



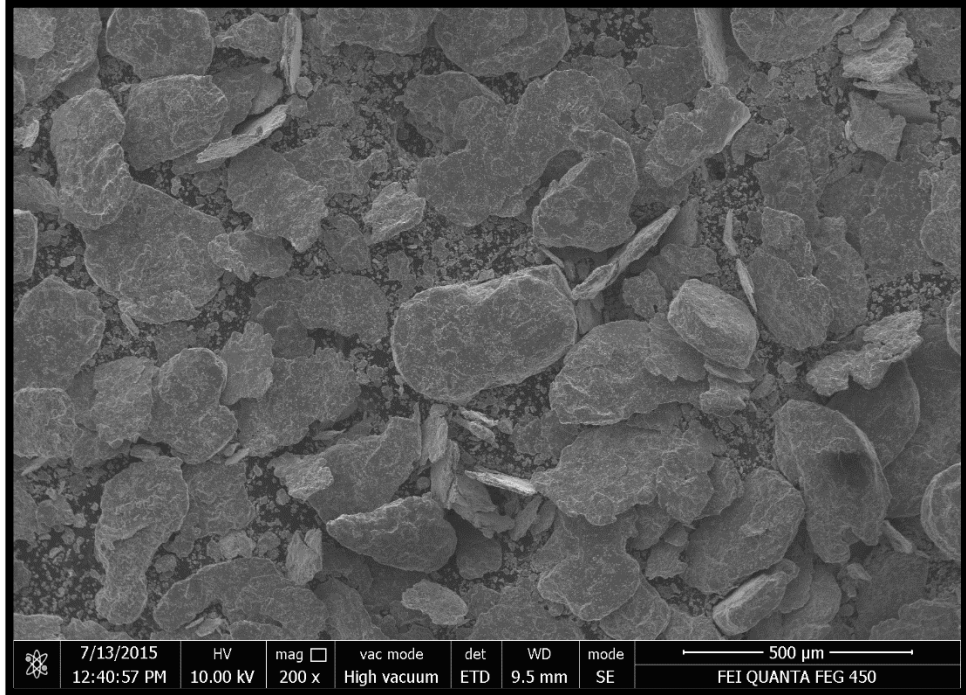
Şekil 4.6. ZE41 alaşımına ait SEM görüntüleri



Şekil 4.7. ZE41Ce1 alaşımına ait SEM görüntüleri

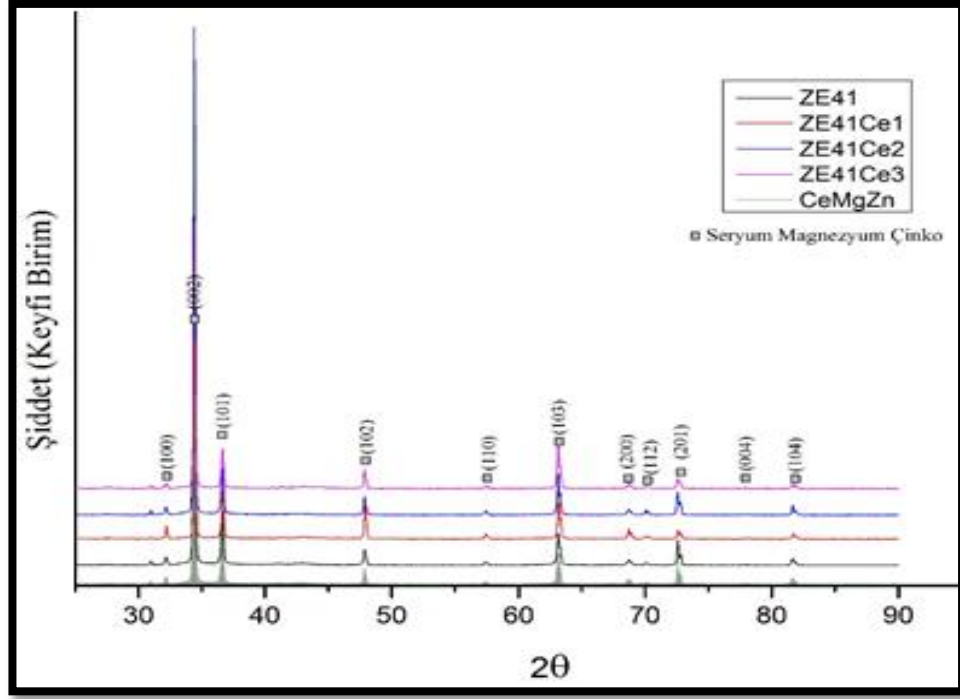


Şekil 4.8. ZE41Ce2 alaşımına ait SEM görüntüleri



Şekil 4.9. ZE41Ce3 alaşımına ait SEM görüntüleri

Alaşımların SEM görüntülerinden her birinin oldukça homojen yapılı oldukları görülmektedir.



Şekil 4. 10. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının XRD desenleri

Şekil 4.10'daki ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait XRD grafiğinde (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) ve (104) tepe düzlemleri gözlenmiştir. Bu değerler ile International Centre for Diffraction Data (ICDD)'nin 00-035-0821 kart numaralı Mg, 01-078-7023 kart numaralı Zn, 01-071-4167 kart numaralı Ce ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.10'da verilen XRD grafiğinde artan Ce katkısı ile alaşımların kristali boyutu artarken dislokasyon yoğunluğu azalmaktadır (Çizelge 4.1.) Bu durum alaşımların mikroyapılarındaki değişimi oldukça açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Numunelerin kristalit boyutu ( $D$ ),  $\left( D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \right)$  Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak

hesaplanır. Burada  $\lambda$  kullanılan X-ışınının dalgaboyu,  $\beta$  pikin yarı maksimum genişliği (FWHM) radyan cinsinden değeri ve  $\theta$  ise değerlendirilen pikin Bragg yansıma açısıdır (Kahraman ve ark., 2012). Kristalit boyutu ile sertlik parametrelerinin ters orantılı olduğu göz önüne alınırsa, deneyler sonucunda elde edilen sertlik değerleriyle hesaplanan kristalit boyutları arasındaki uyum Vickers, Knoop ve Berkovich sertlik deneylerinde gözlenmektedir.

Çizelge 4.1. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 malzemelerinin hesaplanan FWHM, mikrozorlanma ( $\varepsilon$ ), dislokasyon yoğunluğu ( $\rho$ ) ve kristalit boyutu ( $D$ )

| Numune Kodu    | FWHM  | $\varepsilon$        | $\rho$<br>( $\text{cm}^{-2} \times 10^{14}$ ) | $D$ (nm) |
|----------------|-------|----------------------|-----------------------------------------------|----------|
| <b>ZE41</b>    | 0,176 | $6,7 \times 10^{-4}$ | 9,15                                          | 57,06    |
| <b>ZE41Ce1</b> | 0,151 | $5,7 \times 10^{-4}$ | 6,61                                          | 66,46    |
| <b>ZE41Ce2</b> | 0,136 | $5,2 \times 10^{-4}$ | 5,45                                          | 72,51    |
| <b>ZE41Ce3</b> | 0,130 | $4,9 \times 10^{-4}$ | 4,82                                          | 75,16    |

Dislokasyon yoğunluğu önemli bir parametre olup malzemeye uygulanan zora bağlı olarak değişir (Şahin ve Uçar, 2006). Bir malzeme plastik olarak deforme olduğu zaman dislokasyon yoğunluğu artar.

Bu durum malzemelerde işlem sertleşmesine neden olur (Graça ve ark., 2008). Dislokasyon yoğunluğu, kristalin birim hacmi başına düşen dislokasyon çizgilerin uzunluğu olarak  $\rho = \frac{15\varepsilon}{aD}$  eşitliğiyle hesaplanabilir. Mikro zorlanma ise  $\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4}$  eşitliğinden elde edilir. Burada  $\beta$  pikin yarı maksimum genişliğinin (FWHM) radyan cinsinden değeri ve  $\theta$  ise değerlendirilen pikin Bragg yansıma açısıdır.  $\varepsilon$ , mikro zorlanma,  $a$  örgü sabiti ve  $D$  ise kristalit boyutudur (Gülen ve ark., 2014).

Dislokasyon yoğunlukları sertlik değerleri ile aynı paralellikte değişim göstermektedir. Dislokasyon yoğunluğu en fazla olan ZE41 numunesi en sert, dislokasyon yoğunluğu en az olan ZE41Ce3 numunesi ise sertliği en az olan numune olarak sıralanmıştır.

Bu çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemiyle ZE41 alaşımlarına farklı oranlarda seryum katkılanarak elde edilen ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinin statik ve dinamik sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler ile elde edilen bulgular, bu bölümde sırası ile, ilk olarak statik sertlik ve dinamik sertlik sonrasında korozyon analizleri şeklinde verilmiştir.

#### 4.1. Statik Sertlik Deneyleri

Bu kısımda statik sertlik analizlerinden Vickers sertlik deneyi ile elde edilen verilerin analizleri yapılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca üretilen numunelerin kendi aralarında Seryum (Ce)

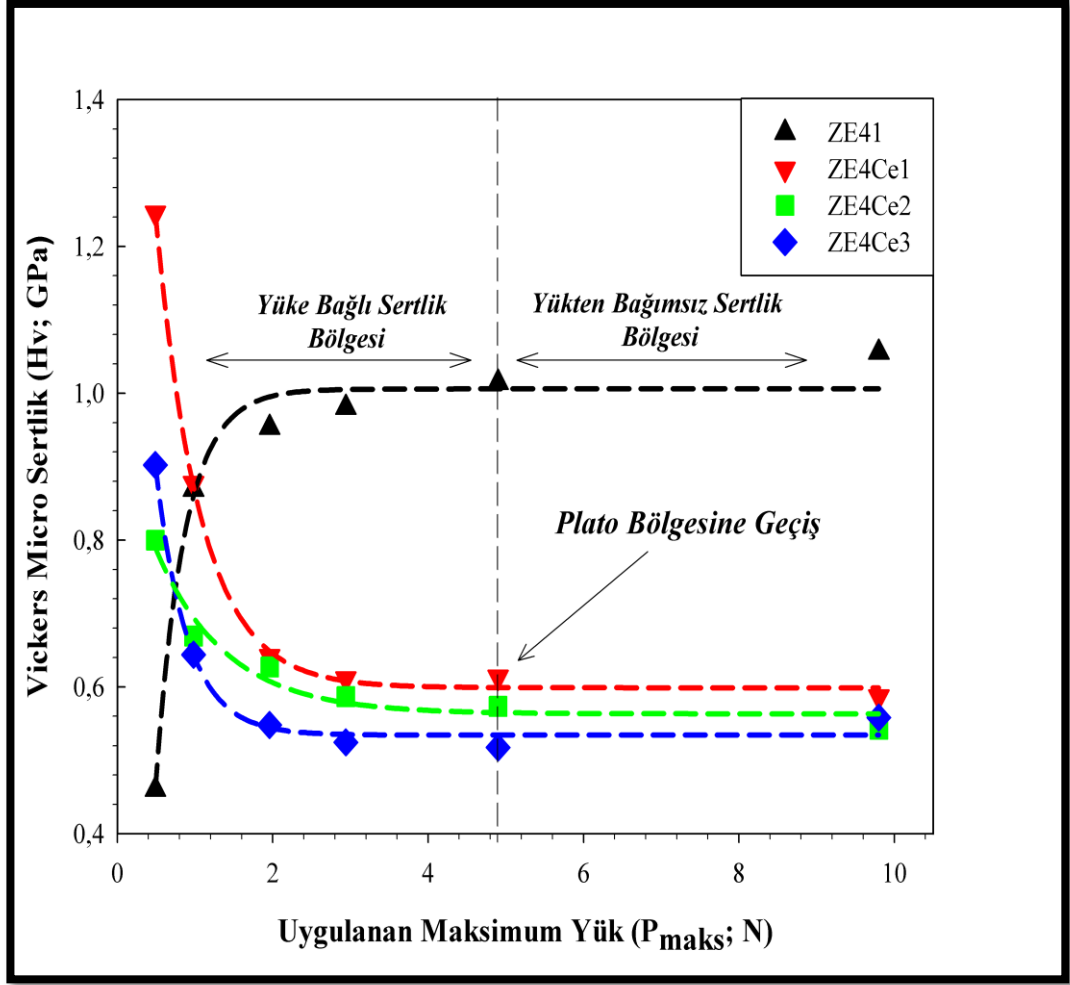
katkısının sertliğe etkisi de incelenerek gerekli yaklaşımlar, analiz sonuçları ve grafikleri verilmiştir.

#### 4.1.1. Vickers Sertlik Analizi

Statik sertlik analizinden Vickers uç kullanılarak ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 kodlu numunelerden elde edilen mikro sertlik değerlerinin yüke bağlı değişim grafiği Şekil 4.11 de gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi Vickers uç ile 6 farklı yük altında (0,49 - 0,98 - 1,96 - 2,94 - 4,9 - 9,8 N) ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerine yük uygulanmıştır. Bu 6 farklı yükün her birinin temas süresi 15sn olarak belirlenmiştir. Uygulana yüklere karşı gösterilen sertlik dirençleri grafik üzerinden incelendiğinde uygulanan yükün artması ile mikro sertliğin giderek azaldığı açıkça görülmektedir. 0,49 N luk yükün minimum sertlik değerine sahip olduğu ve 4,9 N'luk yükün ise maksimum sertliğine sahip olduğu grafik üzerinde görülmektedir. Burada maksimum yük değeri ile ifade edilmek istenen sertliğin, stabil hale gelmesidir. Bu durum, 4,9 N dan sonra başlamıştır bu ise doyum noktası olarak ifade edilebilir. Buradaki davranış literatürde “Çentik Boyut Etkisi” olarak ifade edilmektedir (Şahin ve ark., 2015). ZE41 alaşımında ise yükün artışı ile sertlik artmakta 4,9 N'luk yükten sonra sertlik değeri değişmemektedir.

Şekil 4.11 incelendiğinde 4,9 N'dan sonraki bölgede uygulanan yükün ( $H_{LL}$ ; *Yükten bağımsız bölge*) artık sertlik üzerinde pek bir etkisi olmadığı doyum noktasına ulaştığı ve daha 4,9N'dan daha küçük yük bölgesinde ise ( $H_{LD}$ ; *Yüke bağlı bölge*) yüke bağlı olarak sertliğinde değiştiği gözlenmektedir.

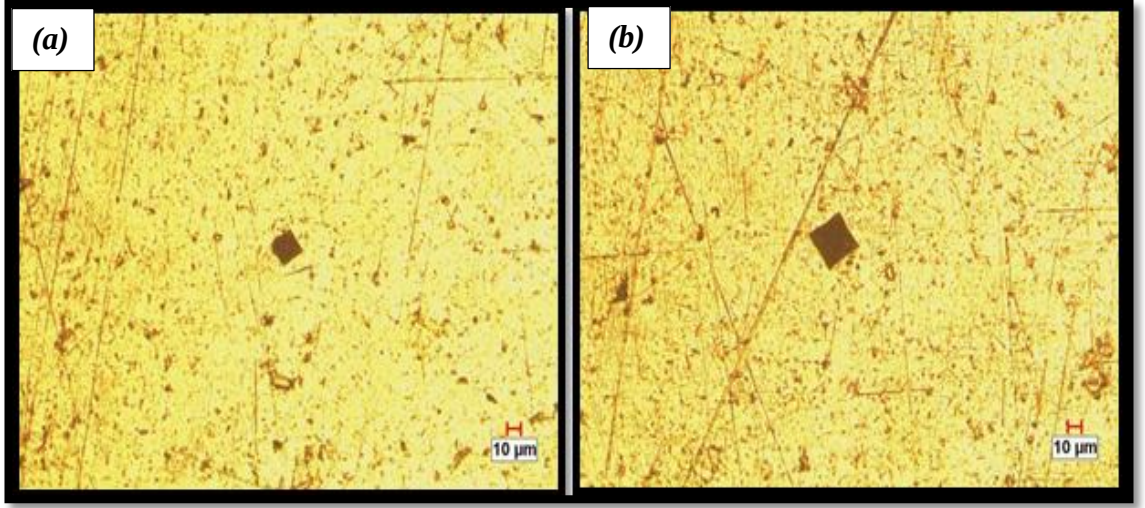
Burada gözlenen sertlik direnci sertliğin uygulandığı bölge olan numune yüzeyinin yapısı göz önüne alınarak açıklanabilmesi mümkündür.  $H_{LD}$  yani uygulanan yükün sertlik üzerinde doyum oluşturmadan önceki bölgede (4,9 N'dan küçük olarak uygulanan yük bölgesinde) Vickers uç yapının sadece yüzey tabakalarına nüfuz etmektedir. Bu tabakaların zor katkılarına bağlı olarak (4,9 N'dan küçük olarak uygulanan yük bölgesinde) sertlik değerinde oldukça hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Numune yüzeyine uygulanan yükün artması ile beraber bu artışla doğru oranda (4,9 N ve 9,8 N) uç numune yüzeyinden daha derinlere nüfuz edebilmektedir ve ucun numune içerisindeki derinliğinin artması sağlanmaktadır.



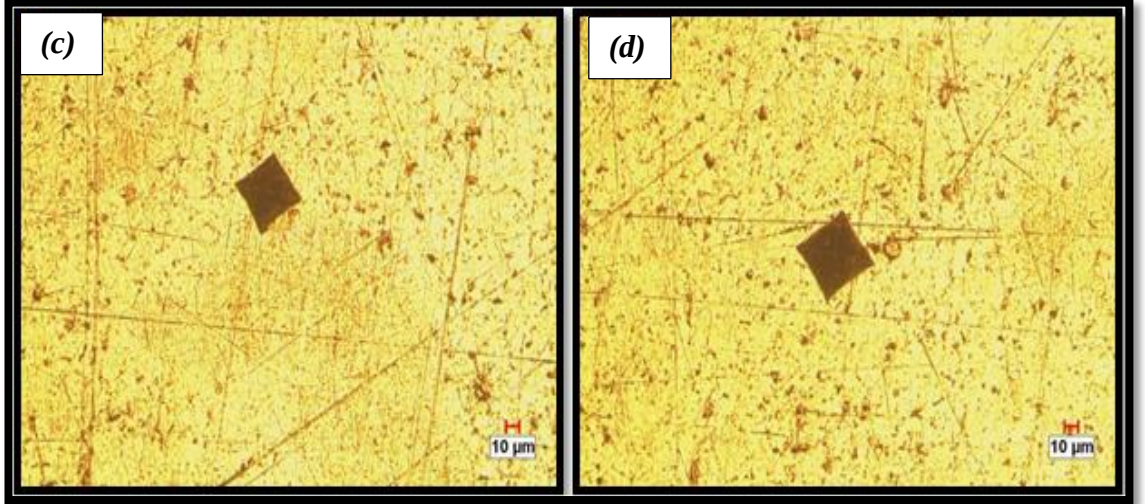
Şekil 4.11. Mikrosertliğin yüke bağlı değişim grafiği

Numunelerin sertlikleri bu nedenden dolayı, numunelerin yüzeyi ve iç tabakaları ile birlikte etkilenmektedir ve bu nedenle sertlik yük arttıkça doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir (Uzunoğlu, 2015).

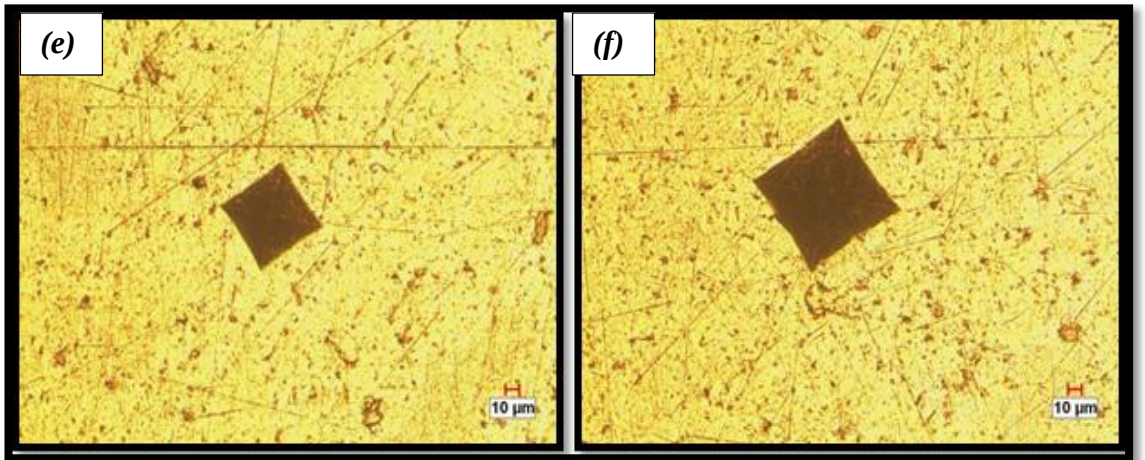
Numunenin iç tabakalarına etki edebilecek büyüklükteki yüklerin iç tabakalara etkisi daha baskın hale gelmekte ve bu nedenle sertlik iç tabakalarda çok büyük değişim göstermemektedir. ÇBE davranışı olarak bilinen bu durum, tek kristaller (Lu ve ark., 2014), biyomalzemeler (Renjo ve ark., 2014), ince filmler (Şahin ve ark., 2015), seramikler (Chakraborty ve ark., 2012; Renjo ve ark., 2014; H.S Güder, 2011) ve birçok alaşımlarda benzerlik arz etmektedir (Li ve Bradt, 1993; Gong ve ark., 2000; Şahin ve ark., 2005; Demirkol, 2010; Lu ve ark., 2014). Vickers uç ile ZE41 numunesinde farklı yükler uygulanarak elde edilen izlerin optik görüntüleri Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4. 12. ZE41 (a); 0,49 N'luk iz (b); 0,98 N'luk İz



ZE41 (c); 1,96 N'luk iz (d); 2,94 N'luk İz



(e); 4,9 N'luk iz (f); 9,8 N'luk İz

Farklı malzemeler de gözlenen ÇBE davranışını açıklamak için, uygulanan test yükü ve çentik yükü boyutu arasındaki ilişki, literatürde farklı modeller kullanılarak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu modellerden geleneksel Meyer kanun, uygulanan test yükü ve oluşan çentik boyutu arasındaki ilişkiyi, aşağıdaki ifade ile vermektedir.

$$P = Ad^n \quad (4. 1)$$

ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 kodlu mekaniksel alaşımlama ile üretilmiş alaşımların çizelge 4.1 de Vickers uç için Eşitlik 4.1 deki formüle göre hesaplanan  $n$  ve  $A$  değerleri ( $r^2$ ;  $n$  ve  $A$  parametleri ile fit edilen eğrinin uyumunu göstermektedir.)

Eşitlik 4.1 de  $d^n$  deki ' $n$ ' Meyer üssü, çentik boyut etkisinin bir ölçüsü,  $A$  ise malzeme sabitidir.  $n < 2$  için normal çentik boyut etkisi,  $n > 2$  olduğunda ters çentik boyut etkisi davranışı gözlenmektedir.  $n = 2$  olması durumunda, sertlik uygulanan yükten bağımsız olmaktadır.

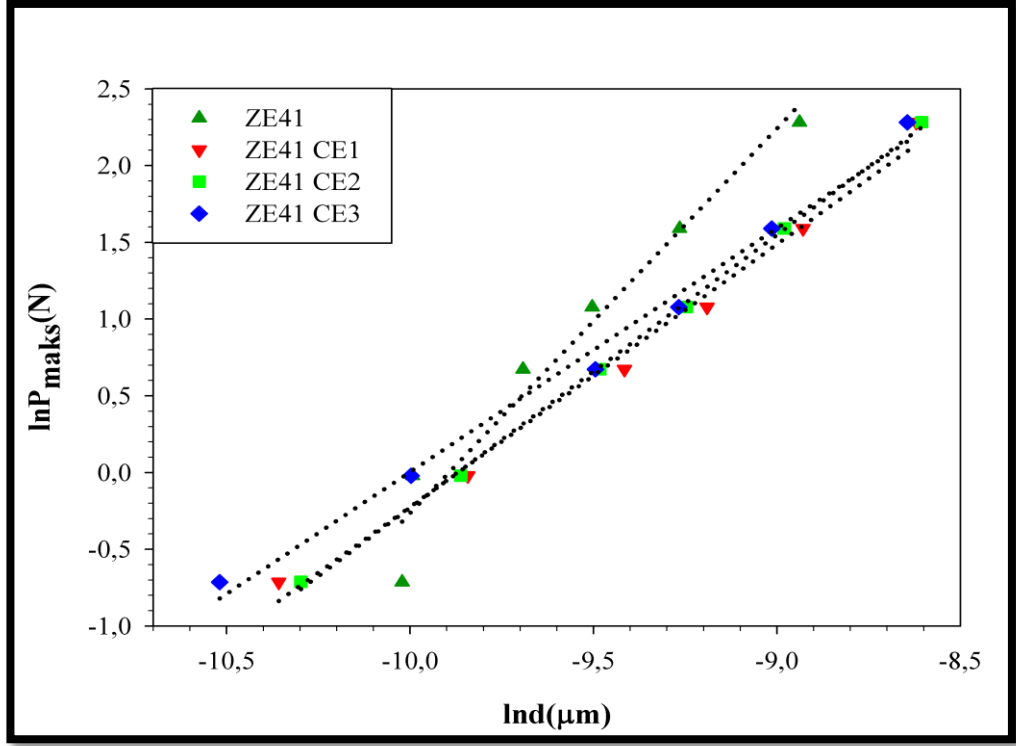
Eşitlikteki  $A$  ve  $n$  değerleri Şekil 4.13'de verilen  $\ln P_{maks} - \ln d$  grafiğinden elde edilmektedir. Bu grafikten elde edilen  $n$  ve  $A$  değerleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Normal çentik boyut etkisinin oluştuğunun gözlemlene bilmesi için yukarıda da belirtildiği gibi  $n < 2$  olmalıdır.  $\ln P_{maks} - \ln d$  grafiğinin fitlenmesi sonucu oluşan eğimden elde edilen  $n$  değerleri bu değerle oldukça uyumludur (Şahin ve ark., 2005; Demirkol, 2010; Terzioğlu ve ark., 2014; Smith ve ark., 2014; Renjo ve ark., 2014). Upit ve Varchenya (1973), ' $n$ ' değerini dislokasyon ilmeklerinin birbiri ve kristal yüzeyi ile etkileşiminin göstergesi olarak önerilmesine rağmen, ' $n$ ' ve  $A$  parametrelerinin fiziksel anlamı halen tam olarak anlaşılamamıştır (Gong ve ark., 2000; Şahin, 2006).

Meyer sertlik analizi test yükü ve çentik boyutu arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır ancak sadece küçük uç yükleri için uygundur.

Çizelge 4. 2. Eşitlik 4.1'e göre hesaplanan  $\ln A$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $r^2$  değerleri

| Numune         | $\ln A$  | $A$                   | $n$  | $r^2$ |
|----------------|----------|-----------------------|------|-------|
| <b>ZE41</b>    | 2,481e+1 | 5,95x10 <sup>10</sup> | 2,50 | 0,956 |
| <b>ZE41Ce1</b> | 1,589e+1 | 0,79x10 <sup>7</sup>  | 1,58 | 0,990 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 1,755e+1 | 4,18x10 <sup>7</sup>  | 1,77 | 0,999 |
| <b>ZE41Ce3</b> | 1,689e+1 | 2,16x10 <sup>7</sup>  | 1,71 | 0,990 |



Şekil 4.13. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Vicker uç için  $\ln P_{\max} - \ln d$  grafiği

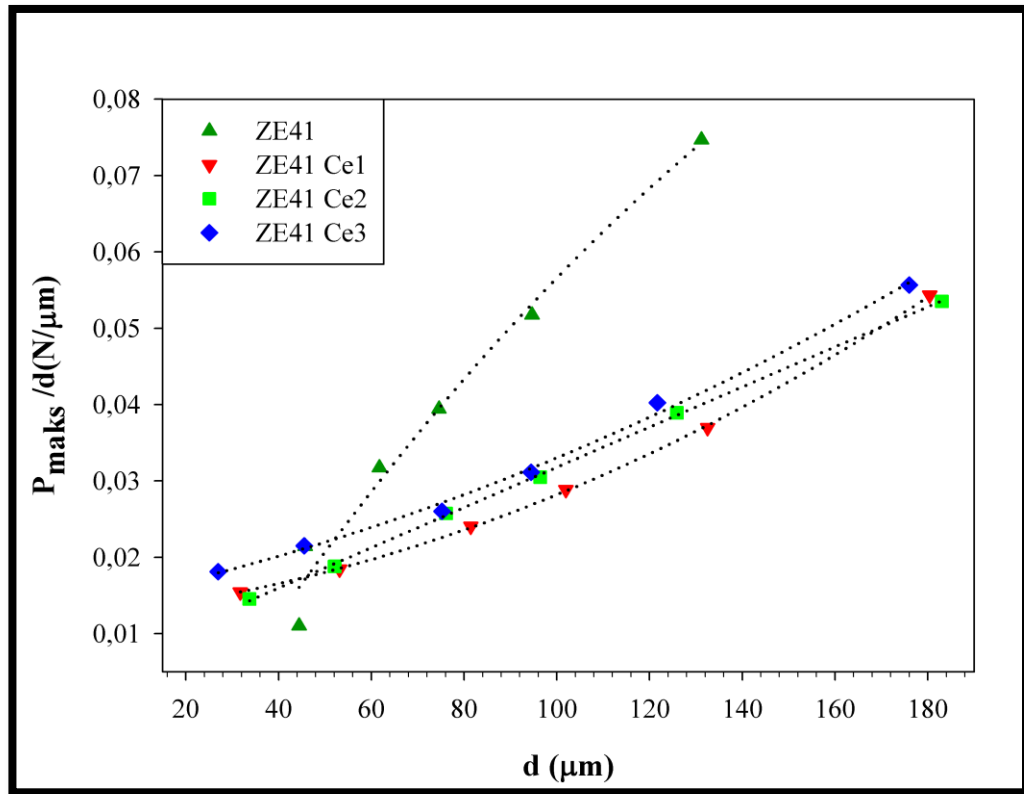
Şekil 4.11'deki mikrosertliğin yüke bağlı değişiminden de görüldüğü üzere numune üzerine uygulanan yük belirli bir kuvvetten sonra doyum noktasına ulaşarak sabit kalmaktadır ve artık yükten bağımsız sertlik olarak ifade edilen bölgeye geçmektedir. Çentik boyutu etkisi için büyük yüklerde gözlenen olay bu nedenle meyer sertlik analizi ile tam olarak izah edilememektedir (Karan ve Gupta., 2005; Demirkol, 2010; Smith ve ark., 2014). Bu nedenle bu davranışları açıklamak ve anlaya bilmek amacıyla farklı metodlara başvurulmuştur.

Literatürde bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de PSR olarak da ifade edilen orantılı numune direnci modelidir. Bu modelin farklı numunelerde mikro sertliğin yüke bağlılığını açıklamak için (Li ve ark., 1994; Pal ve Kar, 2003; Silva ve ark., 2013; Terzioğlu ve ark., 2014; Doğruer ve ark., 2014; Yılmazlar ve ark., 2014; Şahin ve ark., 2015) tarafından belirtilmiştir. Bu modele göre çentik boyut etkisinin yüke bağlı değişimi Eşitlik 4.2'de verilmiştir.

$$P_{maks} = a_1 d + a_2 d^2 = a_1 d + \left( \frac{P_c}{d_0^2} \right) d^2 \quad (4.2)$$

Orantılı numune direnci analiz eşitliği kullanılarak elde edilen  $(P_{maks}/d)$ - $d$  grafiğinden elde edilen  $a_1$  PSR modelinin mikro sertliğe katkısı ve  $a_2$  yükten bağımsız mikro sertliği analiz etmektedir.  $P_c$  kritik test yükü ve  $d_0$  kritik çentik boyutudur. Mikrosertlik, burada ifade edilen kritik yük değerinin üstüne çıkıldığında yükten bağımsız hale gelmektedir. Eşitlikteki  $a_1$  alaşımın elastik ve  $a_2$  alaşımın plastik özellikleri ile ilişkili olduğu (Li ve Bradt, 1993) tarafından vurgulanmıştır. Aynı araştırmacılar tarafından,  $a_1$  sabitinin test numunesinin uç tarafından elastik sıkıştırılmasından ve numune ile uç arasındaki sürtünme direncinden meydana geldiği belirtilmektedir.

Orantılı numune direnci analiz eşitliğine göre çizilen  $(P_{maks}/d)$ - $d$  grafiği teorik olarak doğrusal bir çizgidir (Şekil 4.14'te gösterildiği gibi). Bu grafiğin y eksenini kestiği nokta  $a_1$ , eğim ise  $a_2$  değerine karşılık gelir. PSR modeline göre  $a_2$  değeri, yükten bağımsız sertliğin ölçüsüdür.



Şekil 4. 14. PSR  $P_{maks}/d$  –  $d$  grafiği

Vickers batıcı uç ile yapılan mikrosertlik testlerinde  $H_{PSR}$ , toplam test yükü yerine etkin yük ( $P_{etkin}$ ), kullanılarak Eşitlik 4.3'ün yardımı ile bulunabilir (Gong ve ark., 2000).

$$H_{PSR} = \alpha \frac{P_{etkin}}{d^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - a_1 d}{d^2} \right) = \alpha a_2 \quad (4.3)$$

Burada  $\alpha$ , uç geometrisine bağlıdır ve Vickers uç için 1,8544'tür

Çizelge 4.3'de ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının yükten bağımsız sertlik değerleri verilmiştir.

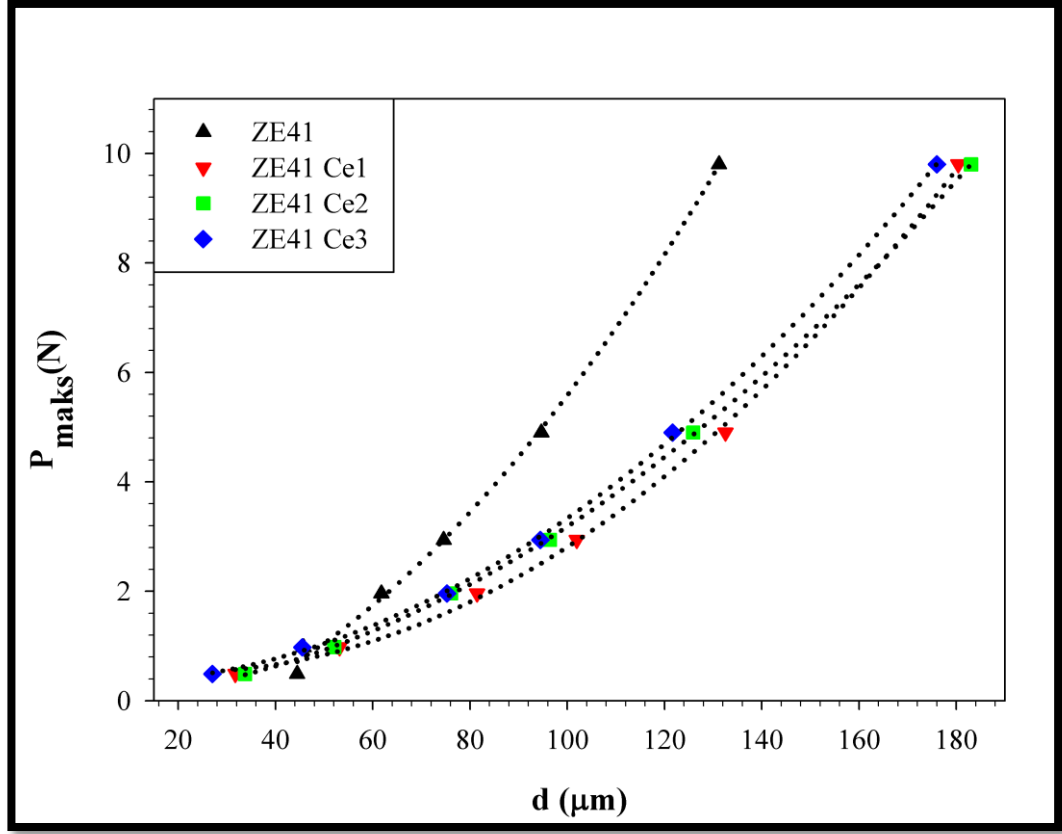
Çizelgede hesaplanan yükten bağımsız sertlik değeri ile ISE grafiğinde elde edilen plato bölgesindeki sertlik değeri bir birine pek yakın değildir. Bu iki değer doğru sertlik analizi için birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu nedenle başka bir modelle farklı bir sertlik analizinin yapılmasını gerektirmektedir.

Yükten bağımsız sertlik analizinin hesaplanmasında faydalanılabilecek diğer bir yöntemse Düzeltilmiş orantılı numune direnci olarak da ifade edilebilen MPSR modelidir. Bu modelde numunenin deney öncesi mekanik karakterizasyona hazırlık kısmında uygulanan mekaniksel işlemlerde dikkate alınarak Eşitlik 4.3 deki matematiksel analiz Gong ve ark. 1999 tarafından ileri sürülmüştür.

$$P_{maks} = a_0 + a_1 d + a_2 d^2 \quad (4.4)$$

Çizelge 4. 3. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Eşitlik 4.3'e göre analizi

| Numune Kodu    | $a_1$<br>(N/ $\mu$ m) | $a_2$<br>(N/ $\mu$ m) <sup>2</sup> | $H_{PSR}$<br>GPa) | $H_{LI}$ Plato Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|----------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------|
| <b>ZE41</b>    | -1,260e-2             | 6,758e-4                           | 1,253             | 1,035                          | 0,975 |
| <b>ZE41Ce1</b> | 5,457e-3              | 2,632e-4                           | 0,488             | 0,600                          | 0,981 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 9,175e-3              | 2,550e-4                           | 0,472             | 0,558                          | 0,999 |
| <b>ZE41Ce3</b> | 4,457e-3              | 2,604e-4                           | 0,428             | 0,538                          | 0,973 |



Şekil 4. 15. Vickers uç için ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 Alaşımlarının  $P_{maks}$ - $d$  grafiğ

Eşitlikte verilen  $a_0$ , mekaniksel işlemlerin neden olduğu artık yüzey zorlarıyla ilgili sabittir.  $a_1$  ve  $a_2$  parametreleri Eşitlik 4.2’de tanımlanan orantılı numune modeli (PSR) ile aynı fiziksel anlamlara sahiptirler. Burada verilen parametreler  $P_{maks}$ - $d$  grafiğinin eğiminden ve eksenin kestiği noktalardan hesaplanabilmektedir bu değerler bize grafiği fit edilen eğriden verilmektedir (Şekil 4.15).

MPSR Modeli için yükten bağımsız sertlik değeri,  $H_{MPSR}$ , etkin yük kullanılarak,

$$H_{MPSR} = \alpha \frac{P_{etkin}}{d^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - a_0 - a_1 d}{d^2} \right) = \alpha a_2 \quad (4.5)$$

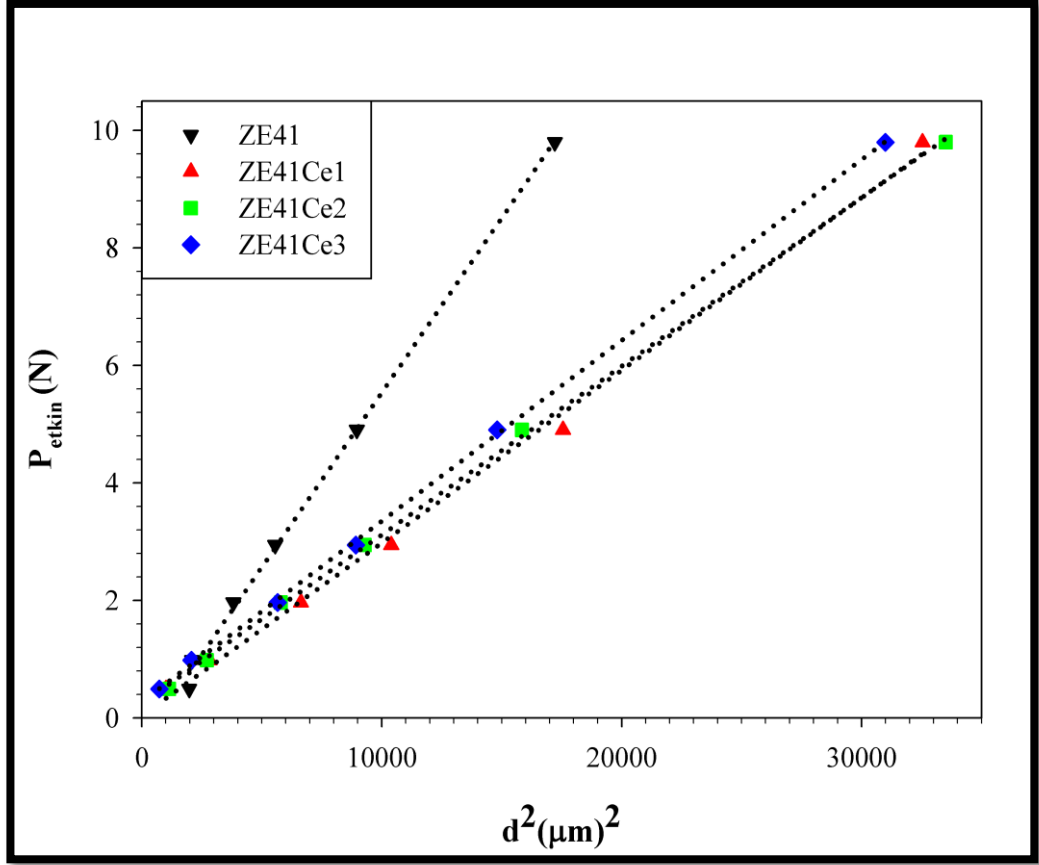
Şeklin de hesaplanabilir. Eşitlikteki;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  parametreleri ve elde edilen  $H_{MPSR}$  değerleri Çizelge 4.4’te verilmektedir.

Çizelge 4. 4. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Eşitlik 4.5'e göre analizleri

| Numune Kodu    | $a_0$<br>(N) | $a_1$<br>(N/ $\mu\text{m}$ ) | $a_2$<br>(N/ $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup> | $H_{MPSR}$<br>(GPa) | $H_{LI}$<br>Plato Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|----------------|--------------|------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------|
| <b>ZE41</b>    | -7,710e-1    | 9,418e-3                     | 5,412e-4                                  | 1,001               | 1,035                             | 0,998 |
| <b>ZE41Ce1</b> | -2,347e-2    | 6,029e-3                     | 2,605e-4                                  | 0,260               | 0,600                             | 0,999 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 3,088e-1     | -9,294e-e                    | 3.120e-4                                  | 0,312               | 0,558                             | 0,999 |
| <b>ZE41Ce3</b> | 6,710e-1     | -1,459e-2                    | 3,597e-4                                  | 0,733               | 0,538                             | 0,999 |

Çizelge 4.4'de görüleceği gibi, elde edilen  $H_{MPSR}$  değerleri ISE grafiğinden elde edilen plato değerlerinden oldukça farklıdır. Bu sebeple MPSR Modeli bu çalışmada üretilen ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinin yükten bağımsız sertlik değerini hesaplamada yeterli değildir. Bu sebeple farklı bir model ile yükten bağımsız sertlik hesabı için irdeleme yapılması gerekmektedir.

Hays ve arkadaşları 1973 yılında çok sayıda malzeme üzerinde yapılan mikrosertlik testlerinde gözlenen ÇBE davranışı için, uygulanan test yükünün belirli bir limit değerinin altında sadece elastik deformasyon, bu değerin üstünde ise plastik deformasyon meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Gane ve arkadaşları ise 1968'de bu durumu farklı malzemelerde uç'un kritik bir yük değerine kadar numuneye girmemesi (bu değerden sonra ise aniden girmesi) şeklinde gözlemlemişlerdir. Ayrıca test yükünün artmasına rağmen kritik yük değerine ulaşmadan çentiğin büyüklüğünün artmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4. 16. Vickers uç için ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının  $P_{aktif}-d^2$  grafiği

Çentiklerin deneysel olarak ölçülen büyüklüklerinin, uygulanan test yükü uygulanan maksimum yük,  $P_{maks}$ , yerine etkin yük ( $P_{aktif}=P_{maks}-W$ ) ile orantılı olduğu Hays ve ark., (1973) tarafından ifade edilmiştir. Bu eşitliğe göre  $P_{aktif}-d^2$  grafiği düz bir çizgi verecektir. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için çizilen  $P_{aktif}-d^2$  grafiği (Şekil 4.16) uyum katsayısının oldukça yüksek ( $r^2>0.999$ ) olduğu görülmektedir.

Vickers uç ile yapılan mikrosertlik deneylerinde toplam test yükü yerine etkin yük ( $P_{aktif}$ ) kullanılarak, yükten bağımsız sertlik,  $H_{HK}$  değeri eşitlik (4.6) kullanılarak bulunabilir (Gong ve ark., 2000).

$$H_{HK} = \alpha \frac{P_{aktif}}{d^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - W}{d^2} \right) = \alpha C_1 \quad (4.6)$$

Çizelge 4.5. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Vickers uç için Eşitlik 4.6'ya göre analizleri

| Numune Kodu    | W<br>(N)  | C <sub>1</sub><br>(N/μm) <sup>2</sup> | H <sub>HK</sub><br>(GPa) | H <sub>LI</sub> Plato Değeri<br>(GPa) | r <sup>2</sup> |
|----------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>ZE41</b>    | -4,123e-1 | 5,944e-4                              | 1,102                    | 1,035                                 | 0,998          |
| <b>ZE41Ce1</b> | 2,710e-1  | 3,077e-4                              | 0,570                    | 0,600                                 | 0,999          |
| <b>ZE41Ce2</b> | 2,448e-1  | 2,970e-4                              | 0,551                    | 0,558                                 | 0,999          |
| <b>ZE41Ce3</b> | 3,544e-1  | 2,940e-4                              | 0,545                    | 0,538                                 | 0,996          |

Eşitlik (4.6)'ya göre,  $P_{etkin}-d^2$  grafiklerinden elde edilen  $r^2$ , W, C ve yükten bağımsız sertlik değerleri ( $H_{LI}$ ) ve Hays-Kendall Modeli kullanılarak hesaplanan sertlik değerleri Çizelge 4.5'de verilmektedir. Hesaplanan sertlik değerinin Şekil 4.14'da elde edilen plato bölgesi sertlik değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

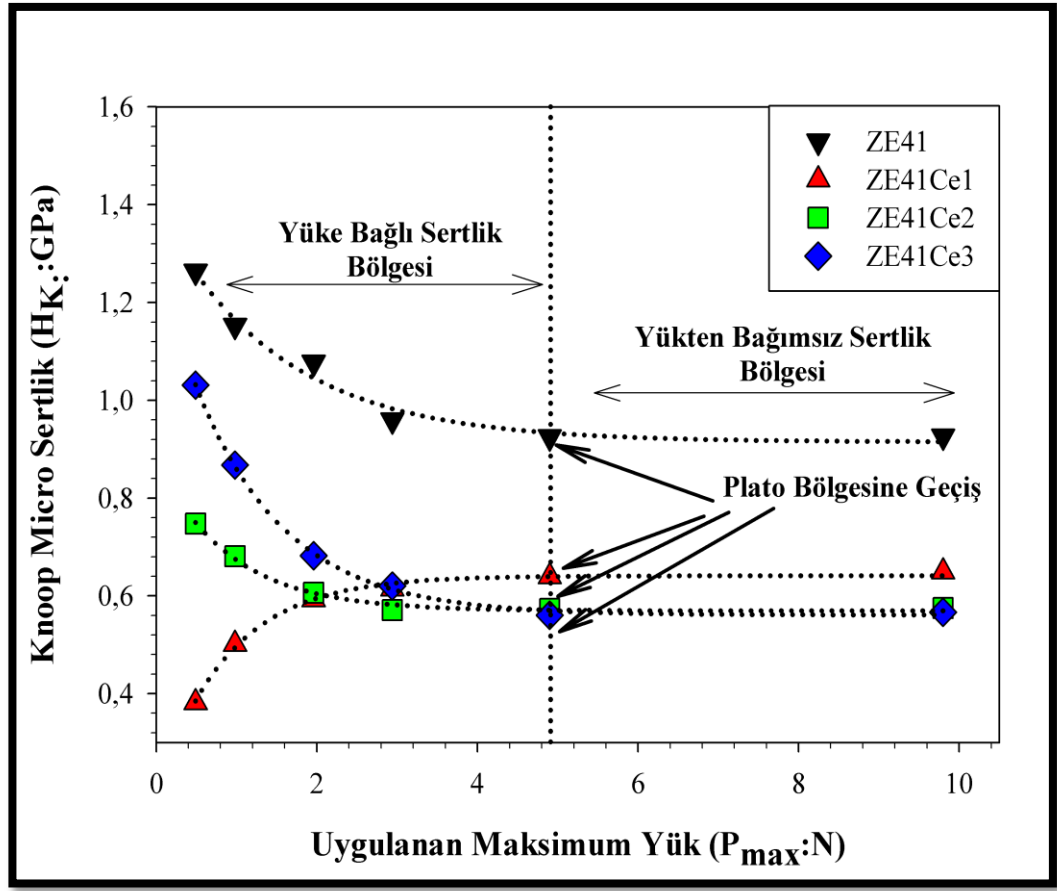
Bu sebeple bu tez çalışmasında üretilen, ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için yükten bağımsız sertlik değerini hesaplamada Hays-Kendall Modeli'nin kullanılabileceği ifade edilebilir.

#### 4.1.2. Knoop Sertlik Analizi

Knoop uç kullanılarak ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerin mikrosertlik değerlerinin yüke bağlı değişimi Şekil 4.17'de verilmektedir.

Mikrosertlik değerleri (0.49, 0.98, 1.96, 2.94, 4.9, 9.8 N) herbir yük için numuneye 15 s'lik süre ile uygulanarak elde edilmiştir. Şekil 4.17'den görüldüğü gibi mikrosertlik değeri 4.9 N'luk yüke kadar azalmakta (ZE41Ce1 için ise artmakta), 4.9 N değerinden sonra sabit kalmaktadır. Knoop uç ile elde edilen bu davranış, Vickers uç ile elde edilen davranışa benzerlik göstermektedir.

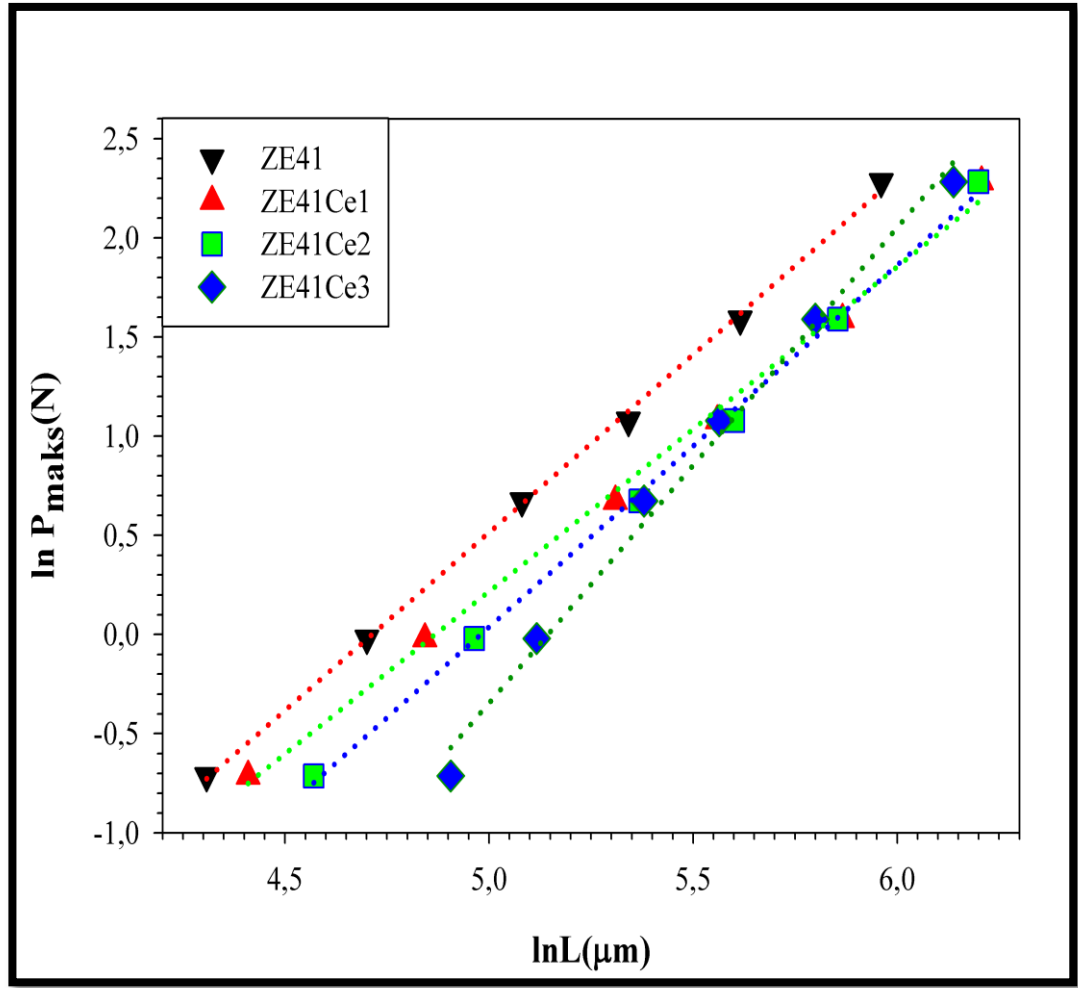
Knoop uç uygulanarak elde edilen çentik boyutu arasındaki ilişki, Eşitlik (4.1)'de verilen Meyer Kanunu ( $P = AL^n$ ) kullanılarak açıklanabilir. Eşitlikte 'n' Meyer indisi (üssü), ÇBE'nin bir ölçüsü, A ise malzeme sabitidir.  $n < 2$  için normal ÇBE,  $n > 2$  olduğunda ters ÇBE davranışı gözlenmektedir.  $n = 2$  olması durumunda, sertlik uygulanan yükten bağımsız olmaktadır.



Şekil 4. 17. Knoop uç kullanılarak elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüke bağlı değişimi

Eşitlikteki  $A$  ve ' $n$ ' değerleri  $\ln P - \ln L$  grafiğinden elde edilmektedir (Şekil 4.18). Bu grafikten elde edilen  $n$  ve  $A$  değerleri Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Şekil 4.17'de gözlenen ÇBE davranışı için ' $n$ ' değerlerinin ikiden küçük çıkması, literatürde verilen sonuçlar ile oldukça uyumludur (Gong ve ark., 1999; Şahin ve ark., 2005; Şahin 2006; Terzioğlu ve ark., 2014; Smith ve ark., 2014; Renjo ve ark., 2014; Şahin ve ark., 2015).



Şekil 4. 18. Knoop Uç'a ait  $\ln P$ - $\ln L$  grafiği

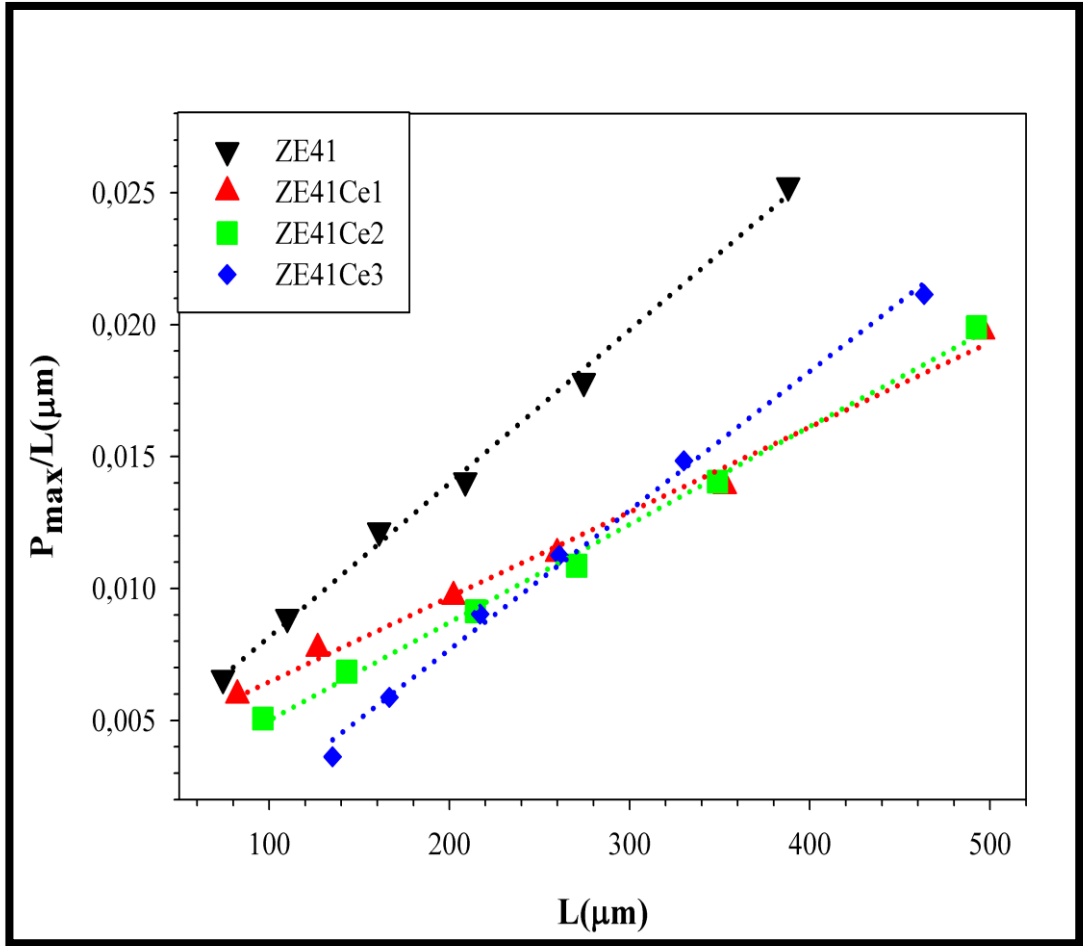
Çizelge 4. 6. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Eşitlik 4.1'e göre  $\ln A$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $r^2$  değerleri

| Numune Kodarı  | $\ln A$ | $A$                    | $N$   | $r^2$ |
|----------------|---------|------------------------|-------|-------|
| <b>ZE41</b>    | -8,453  | $2,132 \times 10^{-4}$ | 1,793 | 0,999 |
| <b>ZE41Ce1</b> | -7,869  | $2,460 \times 10^{-4}$ | 1,637 | 0,997 |
| <b>ZE41Ce2</b> | -9,087  | $1,131 \times 10^{-4}$ | 1,825 | 0,998 |
| <b>ZE41Ce3</b> | -12,33  | $4,417 \times 10^{-6}$ | 2,397 | 0,991 |

Şekil 4.17'den de görüldüğü gibi, ZE41, ZE41Ce2, ZE41Ce3 kodlu numunelerin sertlik değerleri küçük test yüklerinde uygulanan yükün artmasıyla azalış gösterirken ZE41Ce1 kodlu numunede ise RISE gözlenmektedir. Fakat tüm numuneler büyük test yüklerinde doyuma ulaşmıştır. Meyer Kanunu, sadece küçük test yüklerinde uygun sonuçlar vermektedir. ÇBE davranışı için büyük yüklerde gözlediğimiz sapma (Şekil

4.17) Meyer Kanunu ile açıklanamamaktadır (Gong ve ark., 1999; Karan ve Gupta., 2005; Demirkol, 2010; Smith ve ark., 2014). Malzemelerdeki bu davranışı meydana getiren nedenlerin açıklanabilmesi için mevcut bilgiden daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır.

ÇBE davranışının yüke bağlı ve yükten bağımsız (plato bölgesi) mikrosertlik bölgesinin analizi için PSR Modeli'nin uygun olduğu farklı araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Li ve ark., 1994; Şahin ve ark., 2015). PSR Modelinde  $(P_{maks}/L)$ - $L$  grafiğinden (Şekil 4.19) elde edilen  $a_1$ , PSR Modeli'nin mikrosertliğe katkısını,  $a_2$  ise yükten bağımsız mikrosertliği karakterize etmektedir.



Şekil 4. 19. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının  $(P_{maks}/L)$ - $L$  grafiği

Bu model kullanılarak yükten bağımsız sertlik değeri Eşitlik (4.2)'den

$$(H_{PSR} = \alpha \frac{P_{etkin}}{L^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - a_1 L}{L^2} \right) = \alpha a_2)$$
 elde edilen  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $H_{PSR}$  değerleri Çizelge

4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7'den görüldüğü üzere, yükten bağımsız sertlik değeri,  $H_{PSR}$  plato değerlerinden farklılık göstermektedir. Bu sebeple Orantılı Numune Direnci Modeli'nin ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için yükten bağımsız sertlik değerini hesaplamak için uygun bir model değildir.

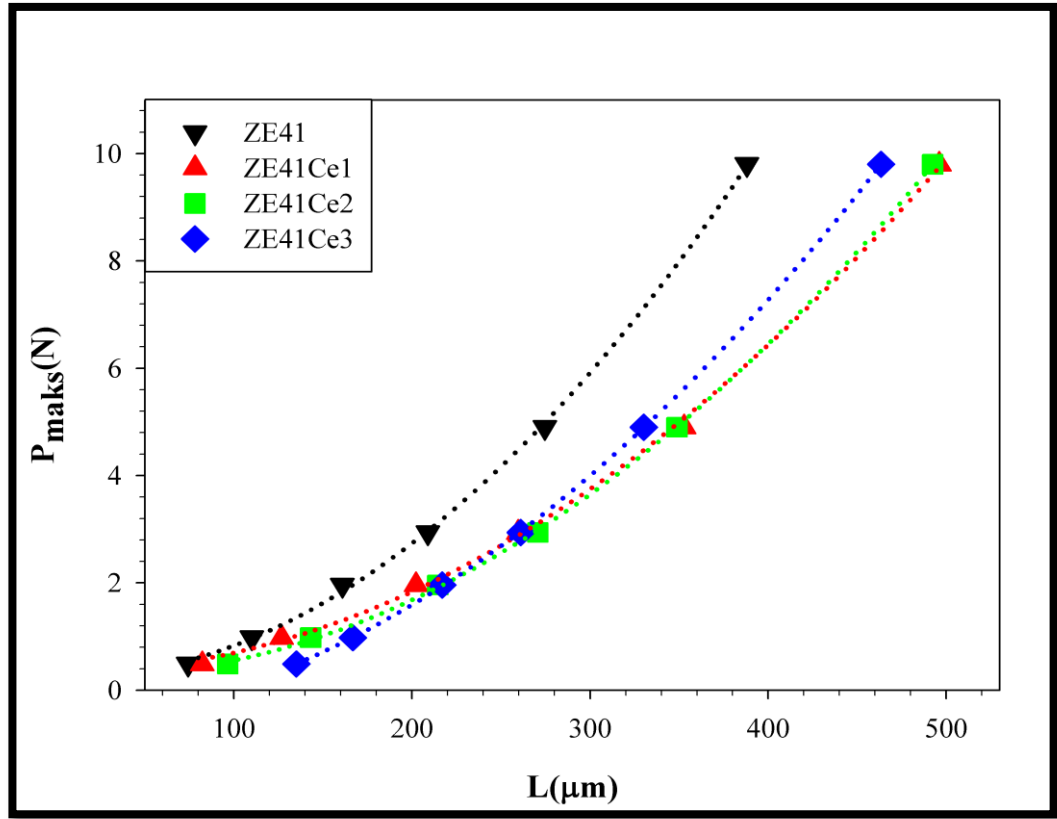
Yükten bağımsız sertlik değerinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer model Düzeltilmiş Orantılı Numune Modeli'dir (Gong ve ark., 1999). Bu model kullanılarak yükten bağımsız sertlik hesabı Eşitlik (4.5)'ten faydalanılarak yapılabilir.

$$(H_{MPSR} = \alpha \frac{P_{etkin}}{L^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - a_0 - a_1 L}{L^2} \right) = \alpha a_2)$$

Bu eşitlikte  $a_0$ , mekaniksel işlemlerin sebep olduğu artık yüzey zorları ile ilgili sabittir.  $a_1$  ve  $a_2$  parametreleri Eşitlik (4.2)'de tanımlanan PSR Modeli ile aynı fiziksel anlama sahiptir. Bu parametreler,  $P_{maks}$ - $L$  deneysel verilerinin grafiğine fit edilen eğriden hesaplanmaktadır. Bu eğriler deneysel verilerle oldukça uyumlu ( $r^2=0.99$ ) olup, Şekil 4.15'de verilmektedir. Bu şekilden hesaplanan fit parametreleri ve yükten bağımsız sertlik değerleri,  $H_{MPSR}$ , Çizelge 4.8'de görülmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere elde edilen yükten bağımsız sertlik değerleri plato bölgesine oldukça yakındır.

Çizelge 4. 7. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Eşitlik 4.2'ye göre analizi

| Numune Kodu    | $a_1$<br>(N/ $\mu$ m) | $a_2$<br>(N/ $\mu$ m) <sup>2</sup> | $H_{PSR}$<br>(GPa) | $H_{LI}$ Plato Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|----------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------|
| <b>ZE41</b>    | 2,349e-3              | 5,818e-5                           | 0,827              | 0,926                          | 0,996 |
| <b>ZE41Ce1</b> | 3,238e-3              | 3,219e-5                           | 0,458              | 0,649                          | 0,991 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 1,291e-3              | 3,712e-5                           | 0,037              | 0,575                          | 0,996 |
| <b>ZE41Ce3</b> | -2,863e-3             | 5,272e-5                           | 0,488              | 0,566                          | 0,995 |



Şekil 4. 20. Knoop uç için ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 Alaşımlarının P<sub>maks</sub>-L grafiği

Düzeltilmiş Orantılı Numune Modeli'nde elde edilen yükten bağımsız sertlik değerleri, Şekil 4.17'den elde edilen plato bölgesine oldukça yakın olmalarına rağmen ZE41Ce3 kodlu numunede, mekaniksel işlemlerin sebep olduğu artık yüzey zorları olan  $a_0$  negatif değere sahiptir. Negatif değer hiçbir fiziksel anlamı olmadığından bu modelin kullanılması uygun değildir.

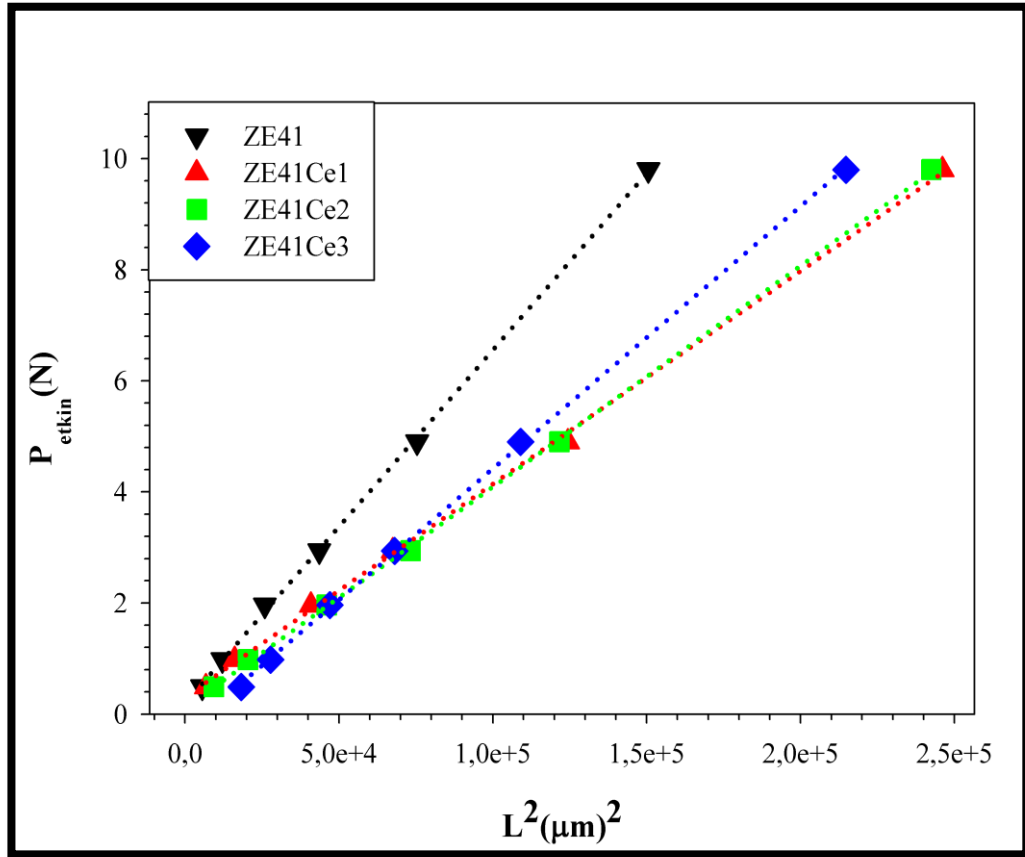
Çizelge 4. 8. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 alaşımlarının Eşitlik 4.4'e göre analizleri

| Numune Kodu    | $a_0$<br>(N) | $a_1$<br>(N/μm) | $a_2$<br>(N/μm) <sup>2</sup> | $H_{MPSR}$<br>(GPa) | $H_{LI}$ Plato Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|----------------|--------------|-----------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------|
| <b>ZE41</b>    | 2,022e-1     | -9,384e-4       | 6,379e-5                     | 0,907               | 0,926                          | 0,999 |
| <b>ZE41Ce1</b> | 3,359e-1     | -2,555e-4       | 3,876e-5                     | 0,551               | 0,649                          | 0,999 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 2,649e-1     | -1,304e-3       | 4,194e-5                     | 0,556               | 0,575                          | 0,999 |
| <b>ZE41Ce3</b> | -6,251e-1    | 2,417e-4        | 4,333e-5                     | 0,616               | 0,566                          | 0,999 |

Yükten bağımsız sertlik değerinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer model Hays-Kendall Modeli'dir. Hays ve arkadaşları 1973 yılında çok sayıda malzeme üzerinde yaptıkları mikrosertlik testlerinde gözledikleri ÇBE davranışı için; uygulanan test yükü belirli bir limit değerinin altında ise sadece elastik deformasyon, bu değer üstünde ise plastik deformasyon meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Hays ve Kendall (1973), uygulanan test yükü  $P_{maks}$  yerine etkin yük ( $P_{etkin}=P_{maks}-W$ ) ifadesini kullanmışlardır. Bu eşitliğe göre  $P_{etkin}-L^2$  grafiği düz bir çizgi verecektir ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için Şekil 4.21'de çizilen  $P_{etkin}-L^2$  grafiğinden elde edilen uyum katsayılarının oldukça yüksek ( $r^2>0.999$ ) olduğu görülmektedir (Çizelge 4.9). Knoop uç ile yapılan mikrosertlik deneylerinde toplam test yükü yerine etkin yük ( $P_{etkin}$ ) kullanılarak, yükten bağımsız sertlik  $H_{HK}$  değeri

$$(H_{HK} = \alpha \frac{P_{etkin}}{L^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - W}{L^2} \right) = \alpha C_1) \text{ kullanılarak elde edilebilir. Eşitliğe göre,}$$

$P_{etkin}-L^2$  grafiklerinden elde edilen  $W$ ,  $C_1$ ,  $r^2$ , yükten bağımsız sertlik değerleri



Şekil 4. 21. Knoop uç için ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 Alaşımlarının  $P_{etkin}-d^2$  grafiği

Çizelge 4. 9. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 Alaşımlarının Knoop uç için Eşitlik 4.6'ya göre analizleri

| Numune Kodu    | W<br>(N)  | C <sub>1</sub><br>(N/μm) <sup>2</sup> | H <sub>HK</sub><br>(GPa) | H <sub>LI</sub> Plato Değeri<br>(GPa) | r <sup>2</sup> |
|----------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>ZE41</b>    | 1,933e-1  | 6,360e-5                              | 0,904                    | 0,926                                 | 0,999          |
| <b>ZE41Ce1</b> | 3,066e-1  | 3,833e-5                              | 0,545                    | 0,649                                 | 0,999          |
| <b>ZE41Ce2</b> | 1,063e-1  | 3,981e-5                              | 0,566                    | 0,575                                 | 0,999          |
| <b>ZE41Ce3</b> | -3,083e-1 | 4,725e-5                              | 0,672                    | 0,566                                 | 0,999          |

(H<sub>LI</sub>) ve Hays-Kendall Modeli ile elde edilen sertlik değerleri (H<sub>HK</sub>) Çizelge 4.9'da verilmektedir

Çizelgeden de görüleceği üzere H<sub>HK</sub> değeri Şekil 4.17'deki plato bölgesine oldukça yakındır. Bu sebeple ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için Knoop uç kullanılarak elde edilen sertlik değerinden, yükten bağımsız sertlik değeri hesaplamada kullanılacak en uygun model Hays-Kendall Modeli'dir.

Vicker ve Knoop çenti uç ile elde edilen sertlik deneylerinin analizleri yapıldı. Her dört alaşım için plato bölgesi değerleri küçük de olsa farklılık göstermektedir. Yapılan analizlerden elde edilen yükten bağımsız sertlik değerleri Çizelge 4.10'da verilmektedir.

Çizelge 4. 10. Vickers ve Knoop Uçları İçin Yükten Bağımsız Sertlik Değerleri

| Numune Kodu    | Vickers ve Knoop<br>uç ile elde edilen   |       |
|----------------|------------------------------------------|-------|
|                | H <sub>LI</sub><br>Plato Değeri<br>(GPa) |       |
| <b>ZE41</b>    | 1,035                                    | 0,926 |
| <b>ZE41Ce1</b> | 0,538                                    | 0,649 |
| <b>ZE41Ce2</b> | 0,558                                    | 0,575 |
| <b>ZE41Ce3</b> | 0,600                                    | 0,566 |

Farklı uçlar ile aynı yüklerde elde edilen sertlik değerlerinin (yükten bağımsız) literatürde de gözlemlenmiştir. Shaw ve ark. (1996), Atkinson ve ark.(1989,1995), Shi ve Atkinson (1990) Knoop ve Vickers uçlar ile elde edilen sertlik değerlerindeki farklılığı numune ve uç arasındaki sürtünme ile açıklamaya çalışmışlardır.

Araştırmalar uç ve numune arasındaki sürtünmenin uç bu uçlar ile elde edilen sertlik değerlerinde de farklılıklar olabileceğini ifade etmişlerdir. Benzer bir durum Güder ve ark. (2011) tarafından Sialon seramiklerinde yapılan deneylerde gözlenmiştir.

Diğer taraftan, bu durumun açıklaması ; Lawn ve Howes (1981), Marshall ve ark. (1982), uç numune yüzeyinden kaldırıldıktan sonra elastik toparlanma meydana geldiği ve uç altındaki plastik ile çevrili deforme olmuş elastik bölge arasındaki uyumsuzluk meydana gelebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte uçların spesifik şekilleri nedeni ile Knoop ve Vickers uç'un meydana getireceği elastik toparlanmasının farklı olacağını ifade edilmiştir (Chicot ve ark., 2007).

Malzemelerin mekanik özelliklerinden sertlik oldukça önemlidir çünkü malzemelerin diğer mekanik özellikleri ile sertlik arasında bir bağlantı vardır. Örneğin hem sertlik testleri hemde çekme testleri malzemelerin plastik akma direncini ölçer ve bu testlerin sonuçları birbiri ile oldukça yakındır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde sertlik testlerinin tercih edilmesinin diğer bir nedeni basit, kolay ve kısmen tahribatsızdır. Malzemelerin elastik modülü ve akma mukavemetlerini sertlik deneylerinden elde edilen yükten bağımsız sertlik değerlerini kullanarak elde edebiliriz.

Malzemelerin Elastik modül ( $E$ ) ve akma mukavemeti ( $Y$ ) Eşitlik (4.7) ve Eşitlik (4.8) kullanılarak hesaplanabilir (Saritekin ve ark., 2014).

$$E = 81.9635H_v \quad (4.7)$$

$$Y \approx \frac{H_v}{3} \quad (4.8)$$

Burada  $H_v$  Vickers uç ile elde edilen  $H_{LI}$  sertlik plato değeridir. Elde edilen elastiklik modül ve akma mukavemeti değerleri Çizelge 4.11'de verilmektedir. Bu bölümde elde edilen Elastik modül değerleri ile nanosertlik yöntemi kullanılarak elde edilen Bölüm 4.2.'deki Elastik modül değerleri karşılaştırılacaktır.

Çizelge 4. 11. Elastiklik modülü (E) ve Akma mukavemeti (Y) değerleri ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için

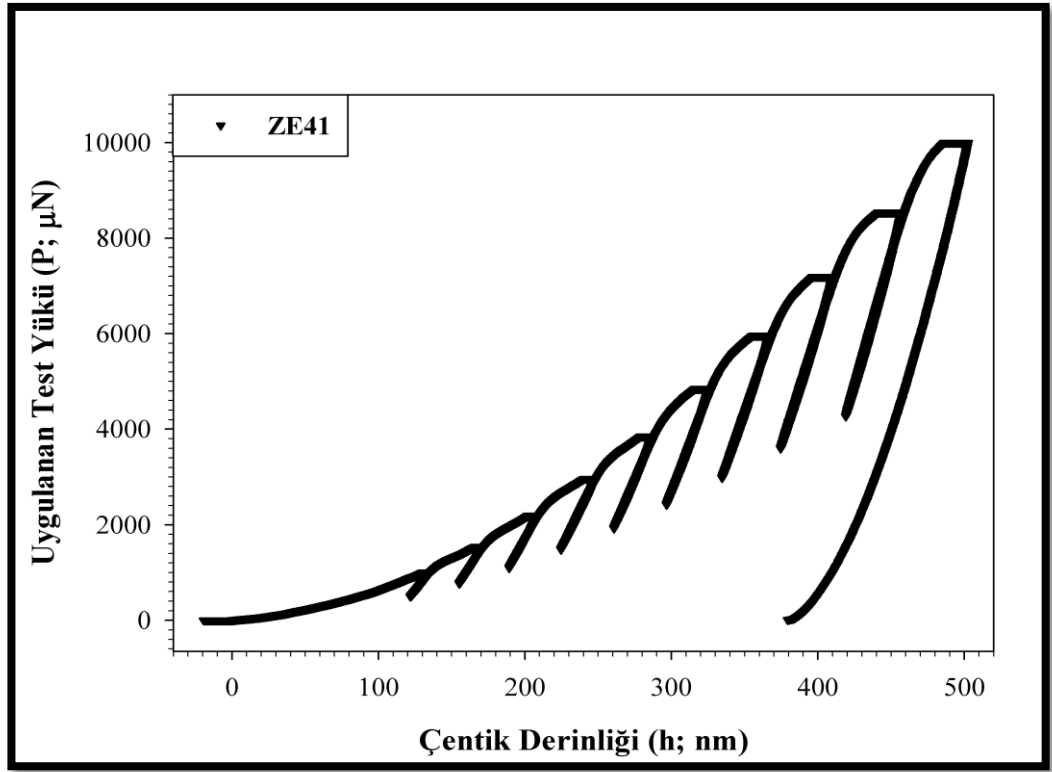
| Numune Kodu | Elastik Modül (GPa) | Akma Mukavemeti (GPa) |
|-------------|---------------------|-----------------------|
| ZE41        | 84,832              | 0,345                 |
| ZE41Ce1     | 49,178              | 0,200                 |
| ZE41Ce2     | 45,735              | 0,186                 |
| ZE41Ce3     | 44,096              | 0,179                 |

#### 4.2. Dinamik Sertlik Deneyleri

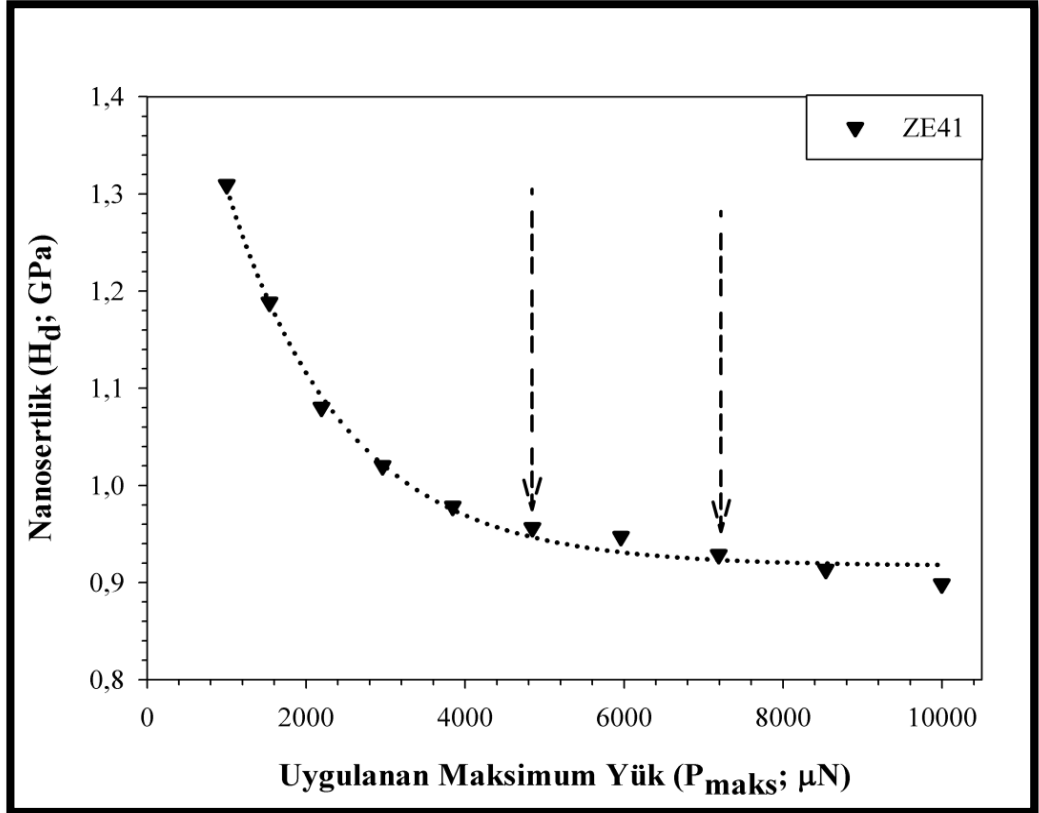
Bu bölümde ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için nano sertlik deneylerinden elde edilen veriler incelenip analizleri yapılacaktır. Bu bölümde her bir numune için ayrı ayrı yük-yerdeğiştirme eğileri, bu eğilerden elde edilen sertliklerin uygulanan yüke bağlı grafikleri çizilecek ve her bir numuneden taramalı uç mikroskobu (SPM) ile elde edilen yüzey topoğrafyası görüntüleri verilecektir.

Şekil 4.22’de ZE41 alaşımına farklı yüklerde uygulanan test yüküne bağlı çentik derinliğinin değişimi görülmektedir. Şekildende görüleceği üzere 1000 ile 10000 $\mu$ N’luk yük-yerdeğiştirme eğrisinin yük kısmı oldukça düzenli bir artış göstermekte ve boşama kısmı ise farklı her bir yük için oldukça düzenli ve paralele şekilde azaldığı görülmektedir. Şekil 4.22’den de açıkça görüldüğü üzere yük miktarı arttıkça buna bağlı olarak çentiğin oluşturduğu derinlikte artmaktadır.

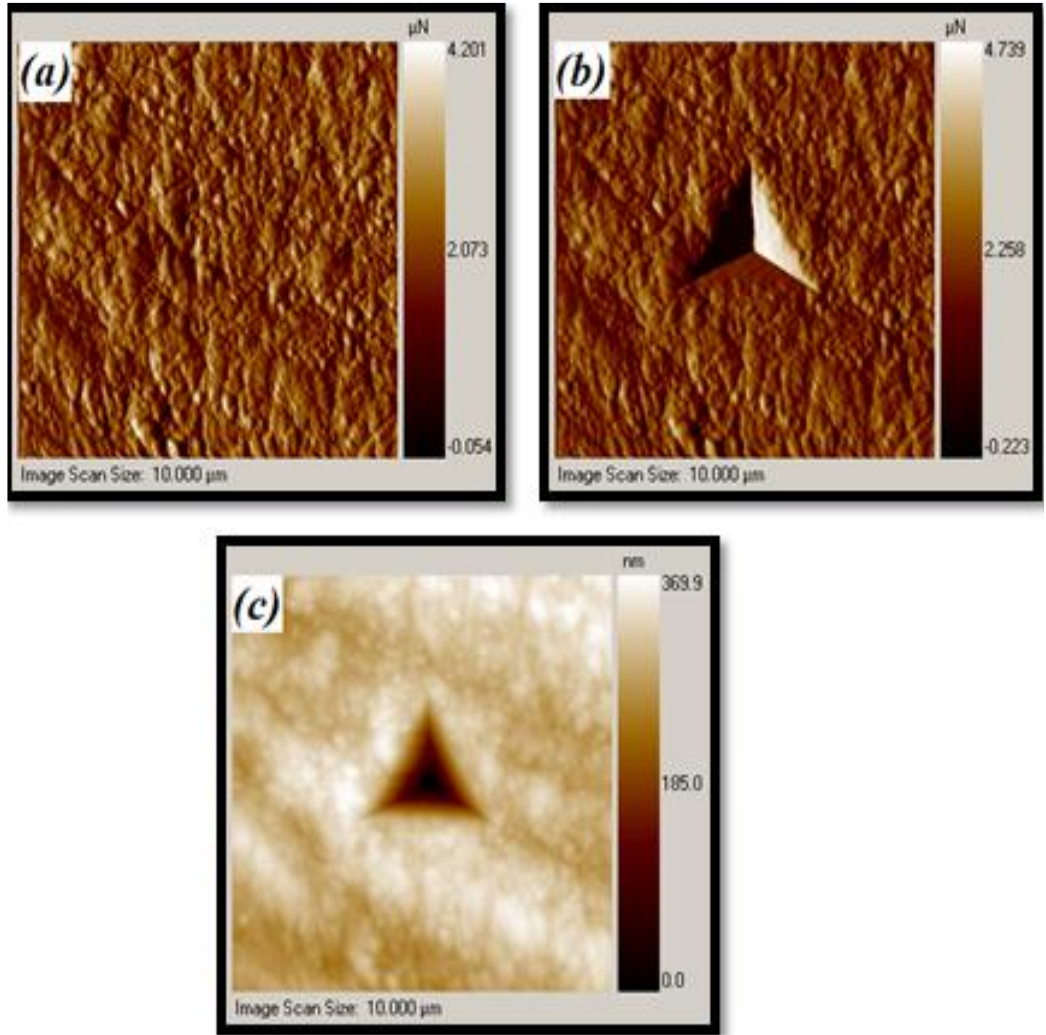
ZE41 alaşımı için kademeli yük-yerdeğiştirme eğrisinden (Şekil 4.22) her bir yük için elde edilen nanosertlik değerlerinin uygulanan yüke bağlı değişimi Şekil 4.23’de verilmektedir. Şekilden açıkça görüleceği üzere, küçük yüklerde nanosertlik değeri küçük olup, yük arttıkça nanosertlik doyuma ulaşmaktadır. Plato bölgesi olarak ifade edilen bu değer yaklaşık 7200 $\mu$ N da ulaştığı görülmektedir. Bu değer Şekil 4.23’de kesikli ok ile belirtilmiştir. Bu doğrudan sonra hemen hemen herhangi bir değişim olmamakta nanosertlik değeri sabit kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda alaşımların karşılaştırmalı analizi yapılmadan önce her bir alaşım üzerinde yapılan nanosertlik deneylerinden elde edilen verilerin analizleri yapılacak, sonrasında alaşımlar birbirleriyle karşılaştırılacaktır.



Şekil 4. 22. ZE41 alaşımasının yük-yerdeğiştirme eğrisi



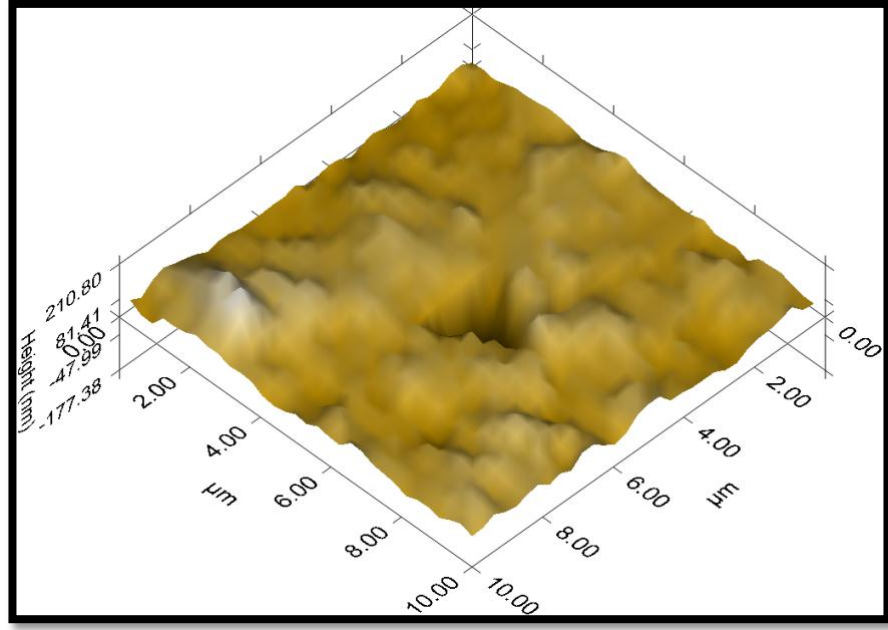
Şekil 4. 23. ZE41 alaşımına ait nanosertlik-uygulanan yük eğrisi



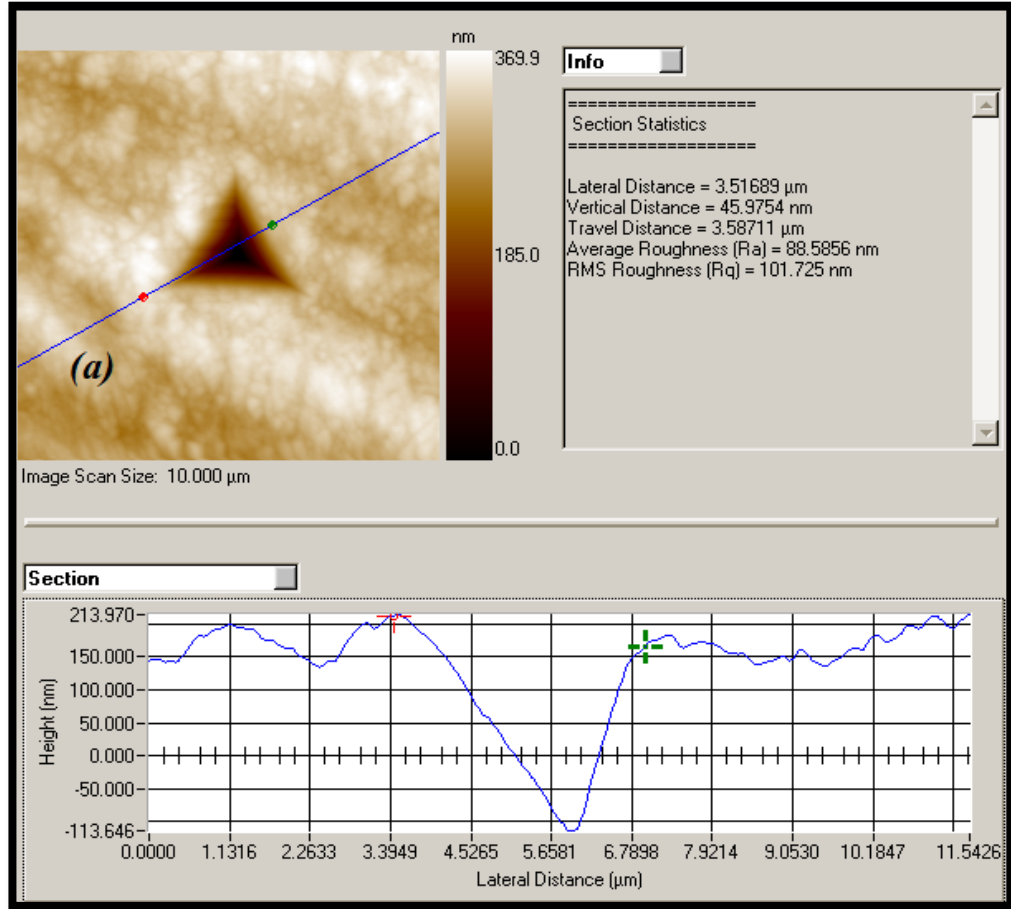
Şekil 4. 24. ZE41 alaşımına ait a) Çentik öncesi yüzey b) Çentik sonrası yüzey c) Çentik sonrası yüzey topoğrafyasının SPM görüntüsü

ZE41 alaşımının çentik atılmadan önce ve çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü Şekil 4.24'te verilmektedir. Şekilden yüzeyin oldukça homojen olduğu ve yüzeyde herhangi bir çatlağın olmadığı açıkça görülmektedir. Şekil 4.24'te tepeden görünümü verilen yüzeyin ve çentiğin ayrıntılı analizi Şekil 4.26- 4.28'da yapılmıştır. Çentik sonrası elde edilen izin üç boyutlu görüntüsü Şekil 4.25'de verilmektedir.

10  $\mu\text{m}$  x 10  $\mu\text{m}$  alanda SPM görüntüsü verilen ZE41 alaşımının yüzeyinde Berkovich iz net bir şekilde görülmektedir, izin yaklaşık boyutu 2  $\mu\text{m}$ 'dir. Alaşımda plastik deformasyon meydana gelmiş ve yüzeyde herhangi bir çatlak görülmemiştir.



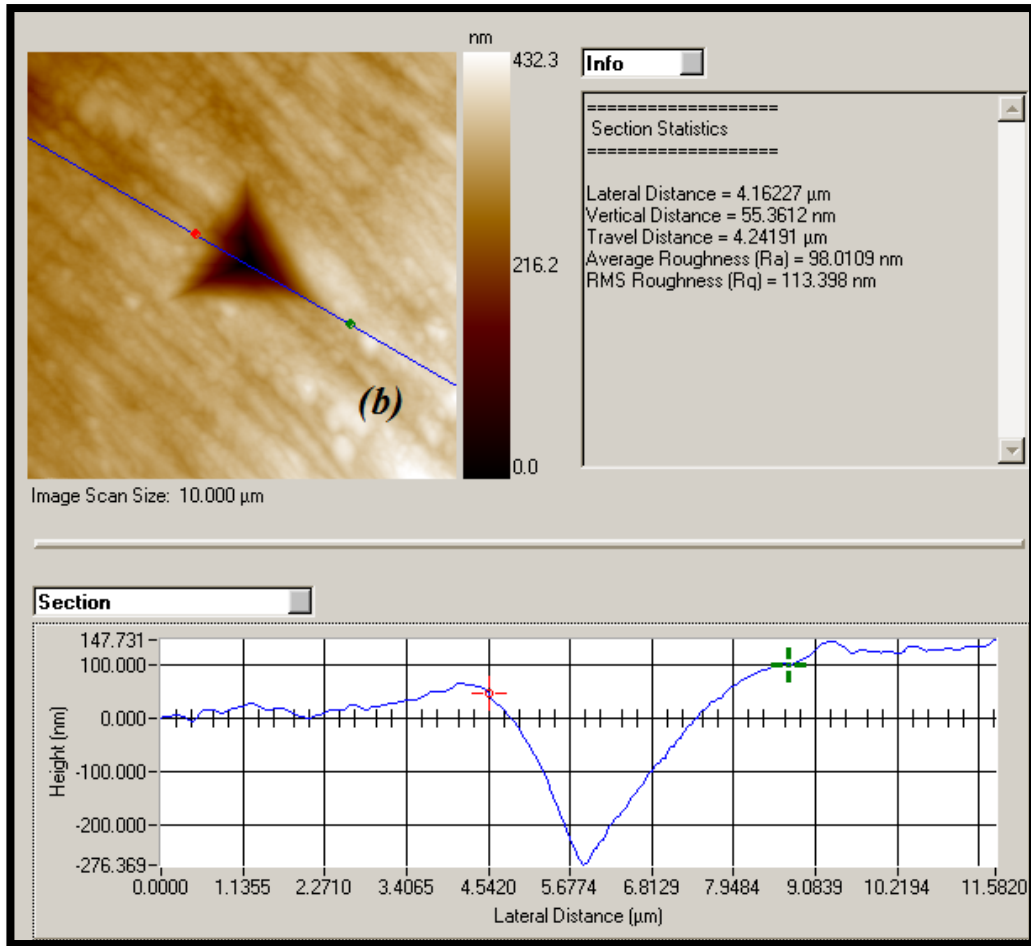
Şekil 4. 25. ZE41 alaşımı için Şekil 4.19’da verilen çentiğin 3D görüntüsü



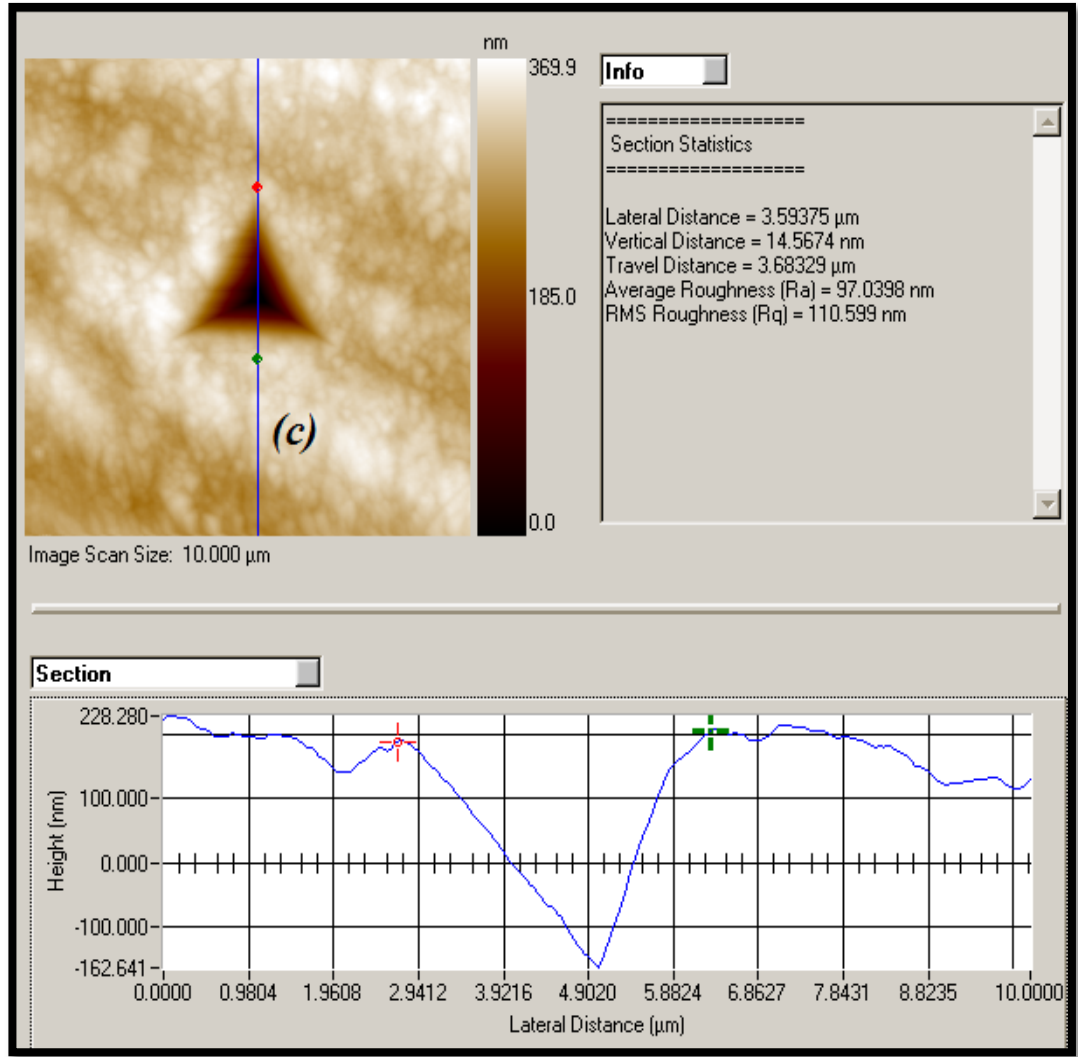
Şekil 4. 26. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

Şekil 4.26’da SPM görüntüsünün üzerinde belirlenen kesimin analizi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Yüzeydeki ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri 88.585nm olup RMS (ortalama karekök) pürüzlülük 101.725 nm’dir. Kesitten ve SPM görüntüsünden açıkça görüleceği üzere yığılma (pile-up) görülmemektedir.

Şekil 4.27’de SPM görüntüsünün üzerinde aynı uç’a ait ikinci kesitin görüntüsü verilmektedir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.28 de aynı uç’a ait iki farklı kesitten alınan yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık aynı değere sahip olmakla birlikte ufak farklılıklar göstermektedir. Bu durumun uygulanan mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

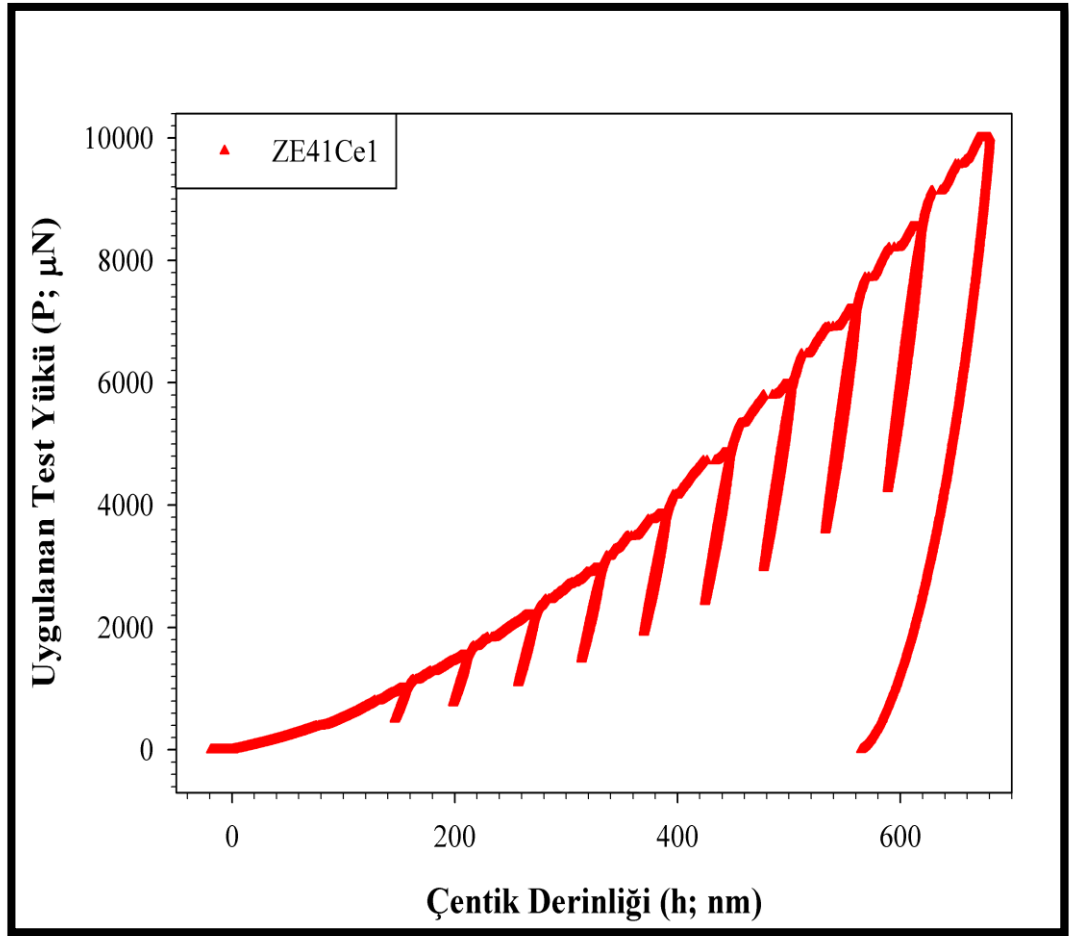


Şekil 4. 27. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi



Şekil 4. 28. ZE41 alaşımında oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

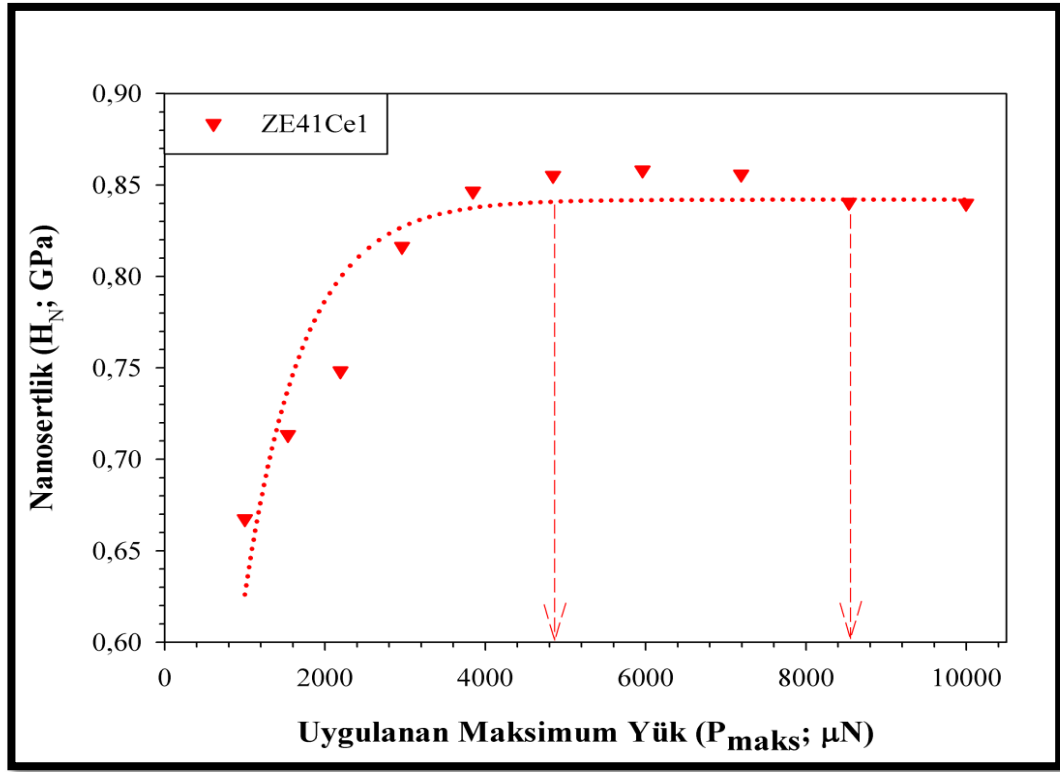
Şekil 4.26'daki uç'a ait üçüncü kesitin SPM görüntüsü Şekil 4.28'de verilmektedir. Bu kesit için ortalama pürüzlülük (Ra) değeri 97.039 nm olup RMS pürüzlülük değeri 110.599 nm'dir. Uç'un genel görüntüsü uç'un izini oldukça belirgin olarak vermektedir. Bu şekilde yığılma hemen hemen görülmemektedir. Öncesinde ifade edildiği üzere pürüzlülük değerleri hemen hemen yakın değerlere sahip olmakla beraber ufak farklılıklarda görülmektedir. Bu durumun uygulanan mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.26'da yığılma davranışı gözlenmezken Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de belirgin bir yığılma gözlenmektedir. Bununla birlikte bu kesitlerde ciddi anlamda pürüzlülük vardır.



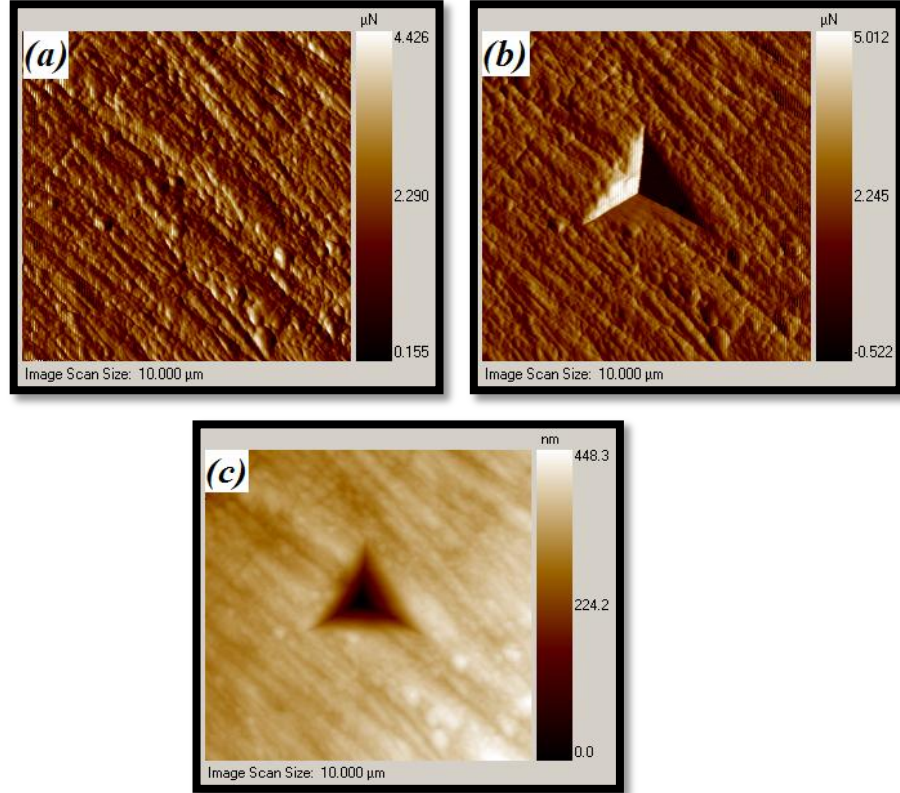
Şekil 4. 29. ZE41Ce1 alaşımlarının yük-yerdeğiştirme eğrisi

ZE41Ce1 alaşımı için 1000 ile 10000  $\mu\text{N}$ 'luk yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.29'da verilmektedir. Bu şekilden elde edilen nanosertlik değerlerinin uygulanan maksimum yüke bağlı değişimleri Şekil 4.30 da verilmektedir. Elde edilen sertlik değerleri küçük yüklerde düşük değerlere sahip iken yük değerinin artması ile birlikte nanosertlik değeri artmaktadır. Bu artış linner olmayıp azalan şekildedir. Yaklaşık 400 $\mu\text{N}$  değerinde nanosertlik doyuma ulaşmakta 8500 ve 1000  $\mu\text{N}$ 'luk yük değerlerinde nanosertlik kısmı azalma gösterebilir bu değişimin oldukça küçük olduğu grafikten görülmektedir.

ZE41Ce1 alaşımının çentik atılmadan önce ve çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü Şekil 4.31'de verilmektedir. Şekil 4.31'den yüzeyin oldukça kararlı ve homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



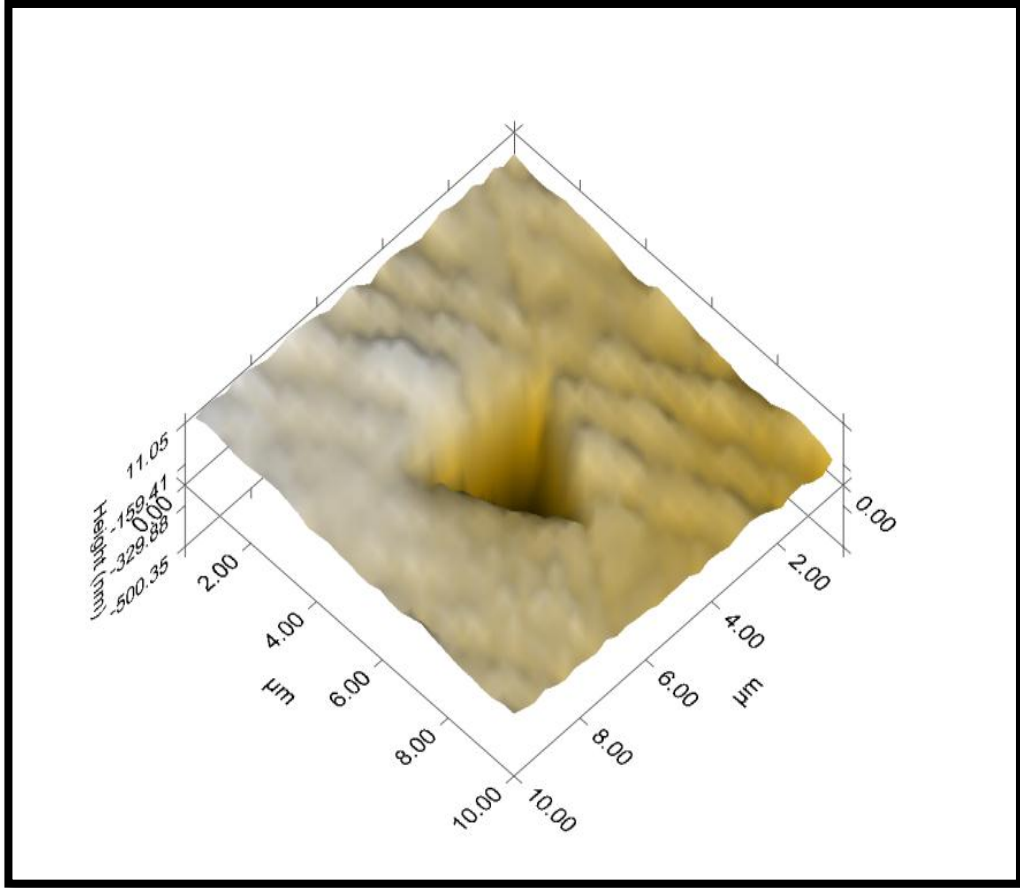
Şekil 4. 30. ZE41Ce1 alaşımına ait nanosertlik yük eğrisi



Şekil 4. 31. ZE41Ce1 alaşımına ait a) Çentik öncesi yüzey b) Çentik sonrası yüzey c) Çentik sonrası yüzey topoğrafyasının SPM görüntüsü

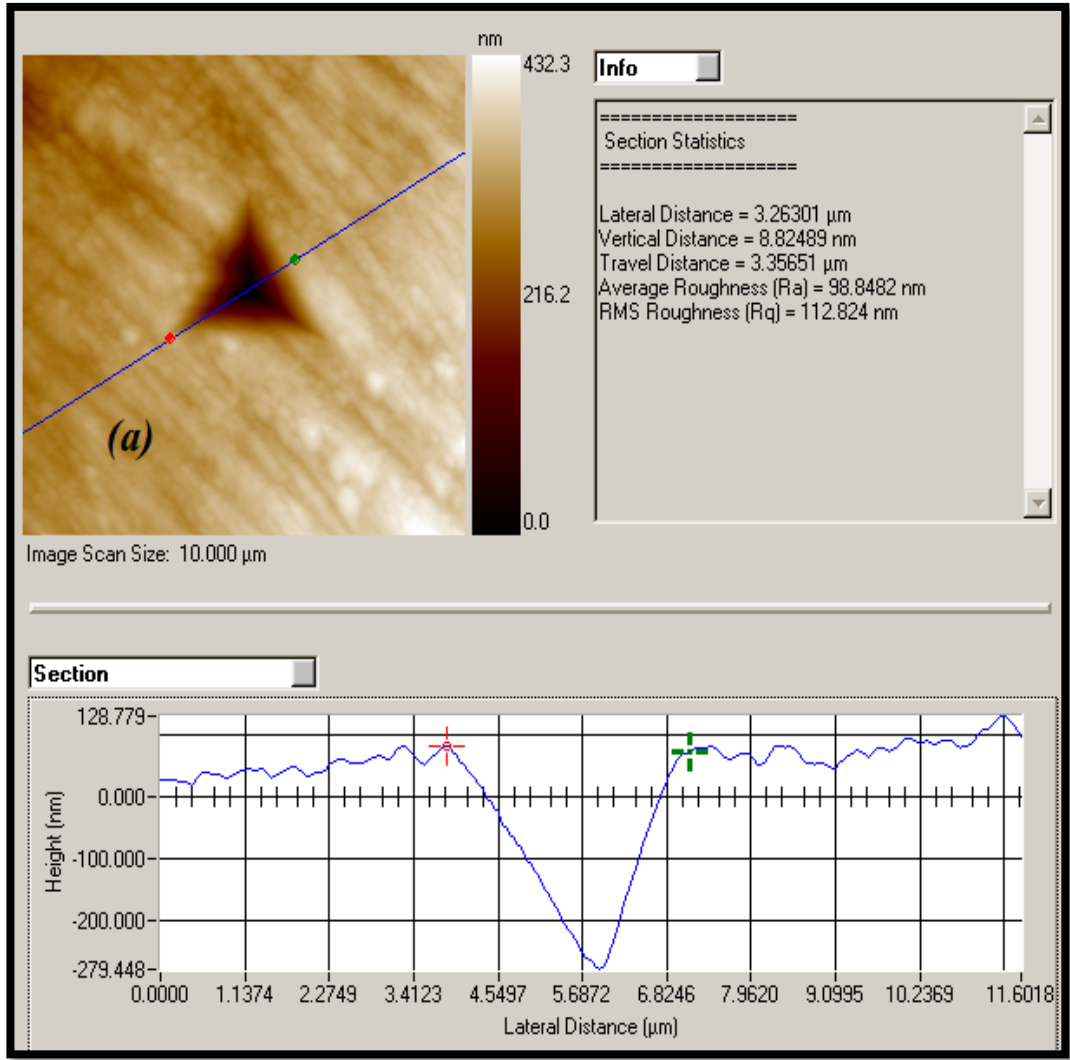
Şekil 4.31 de verilen izin, üç boyutlu görüntüsü Şekil 4.32’de verilmektedir.

Bu şekilden Berkovich uç geometrisinin ZE41Ce1 alaşımında oldukça belirgin olduğu görülmektedir. Uç ile oluşturulan izin her üç kesiti için herhangi bir çatlak gözükmemektedir. Bu izin ker üç kesiti ayrıntılı olarak analiz edilecektir.



Şekil 4. 32. ZE41Ce1 alaşımı için Şekil 4.31’de verilen çentiğin 3D görüntüsü

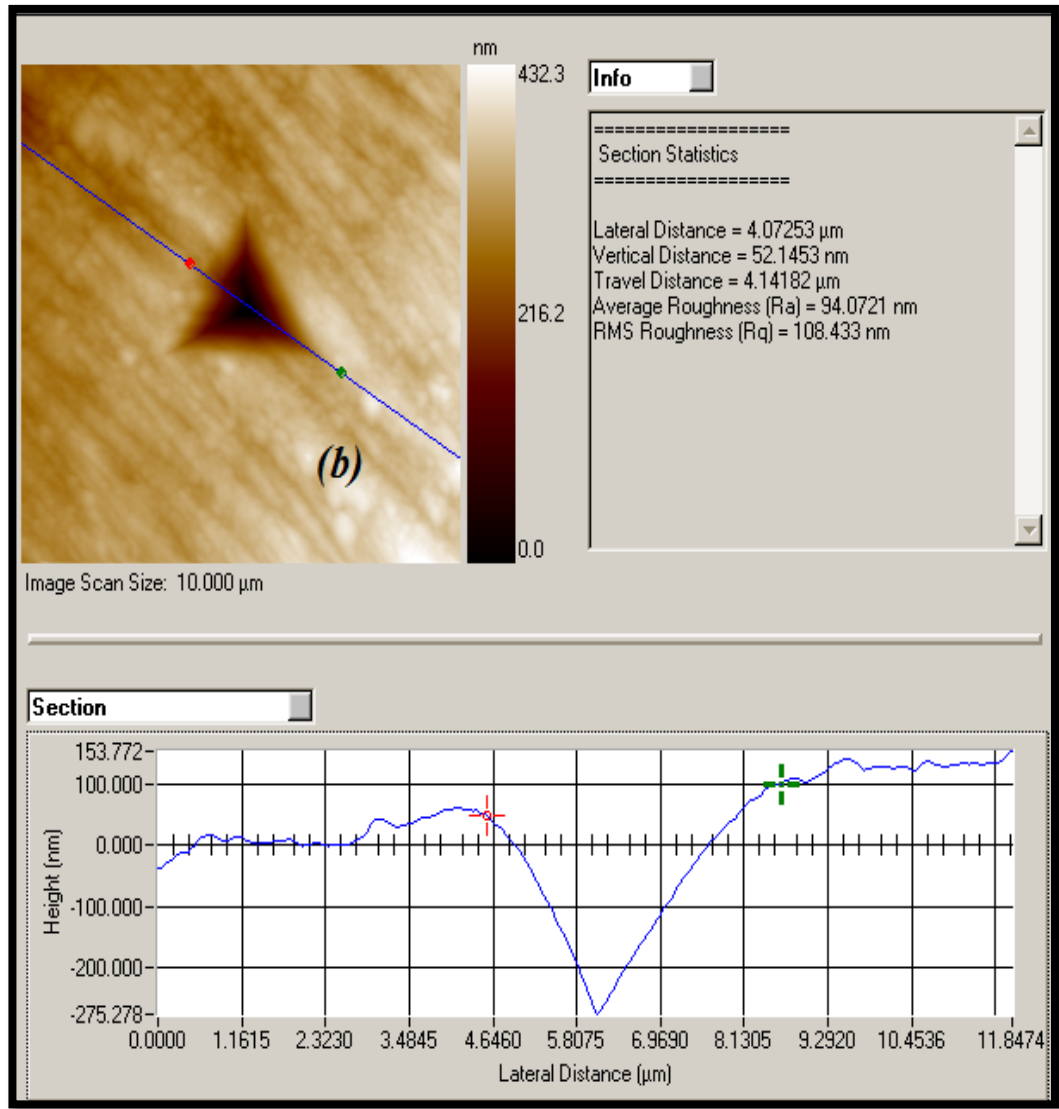
Uç’un oluşturduğu izin SPM görüntüsü ve ayrıntılı analizi Şekil 4.33-4.35’de verilmektedir. Şekil 4.33’de (a) kesiti için uç’un üstten ve yatay görüntüsü verilmektedir, oldukça düzgün bir yüzeye sahip olan alaşımın yatay kesitinde çentiğin şekli oldukça belirgin olarak görülmektedir



Şekil 4. 33. ZE41Ce1 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

Şekil 4.33'deki ZE41Ce1 alaşımının (a) kesitine ait SPM görüntüsünden de görüleceği üzere yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 98.848 nm olup RMS pürüzlülük değeri 112.824 nm'dir.

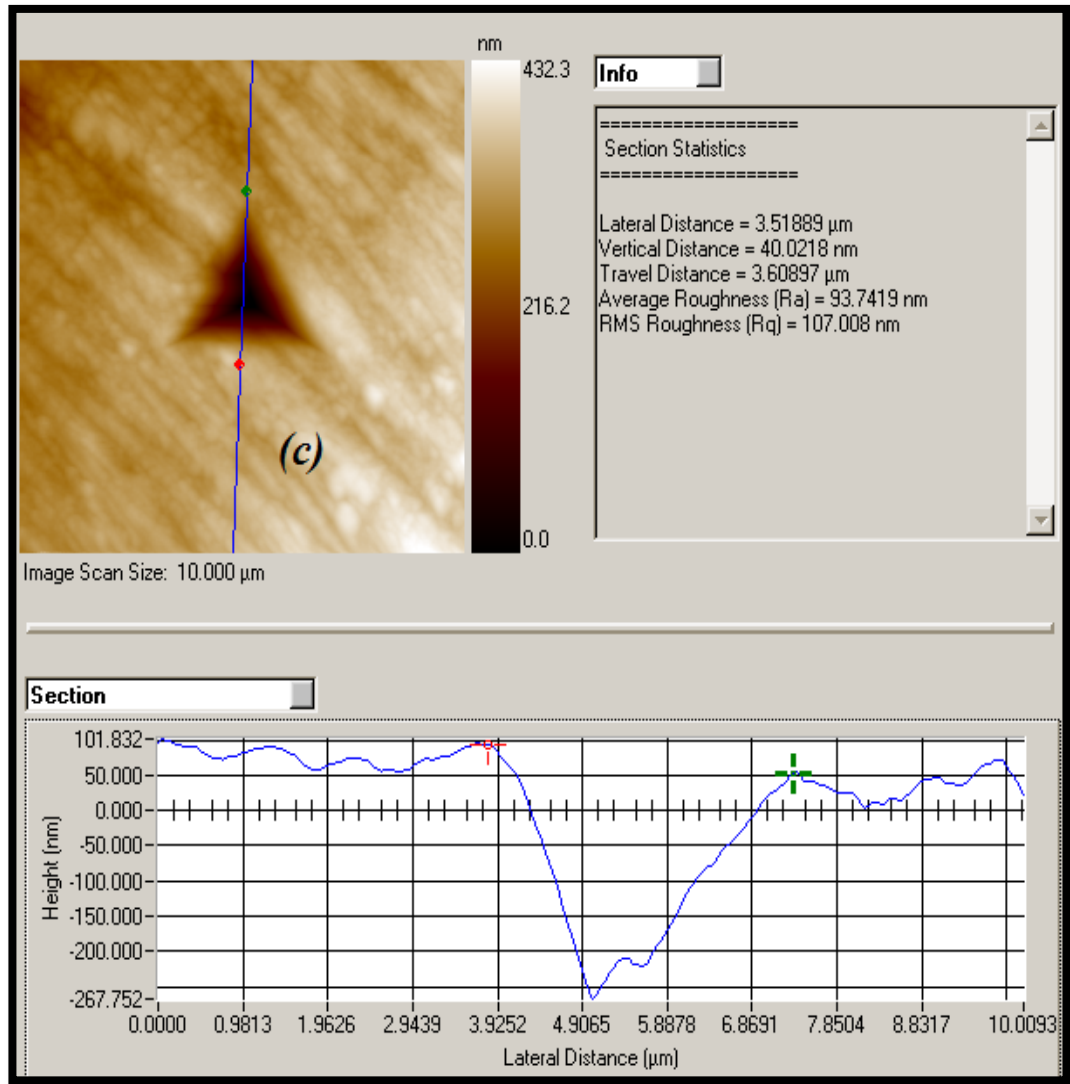
Şekil 4.34'teki ZE41Ce1 alaşımının (b) kesitine ait SPM görüntüsünden de görüleceği üzere yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 94.072 nm olup RMS pürüzlülük değeri 108.433 nm'dir



Şekil 4. 34. ZE41Ce1 alaşımlında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

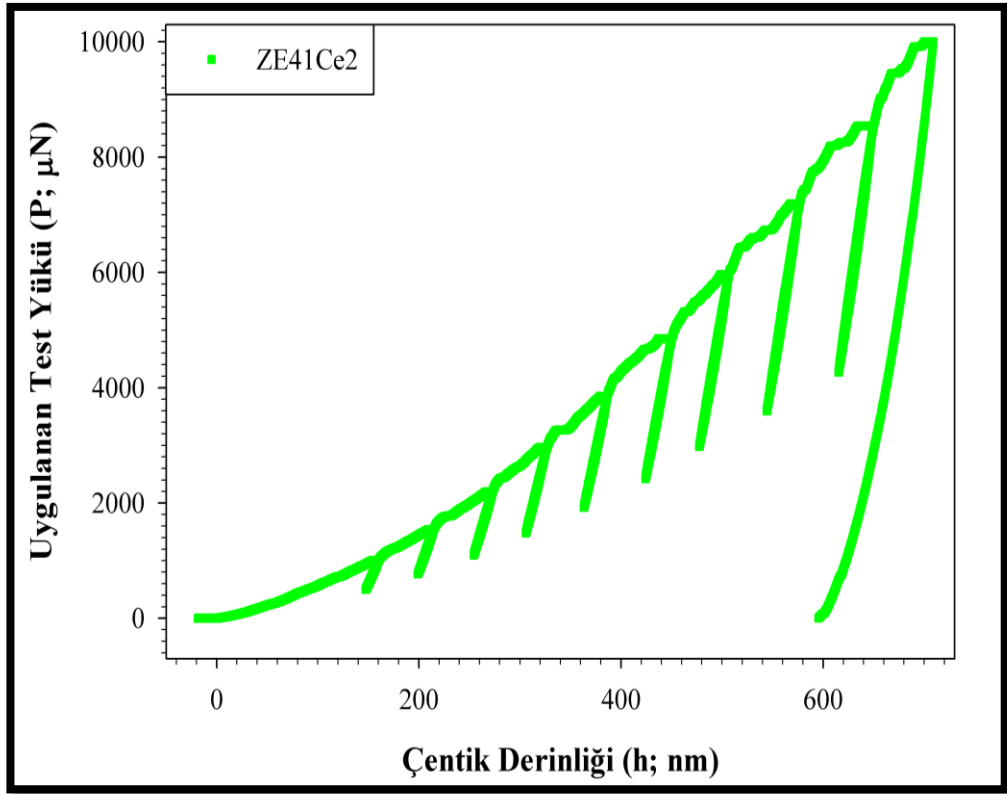
Şekil 4.35’deki ZE41Ce1 alaşımlının (c) kesitine ait SPM görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 93.741 nm olup RMS pürüzlülük değeri 107.008 nm’dir.

Bu uç için her üç kesit kendi arasında kıyaslanacak olursa Şekil 4.35’te verilen (c) kesiti için elde edilen görüntü diğer kesitlere kıyasla en düşük Ra ve RMS değerlerine sahiptir.

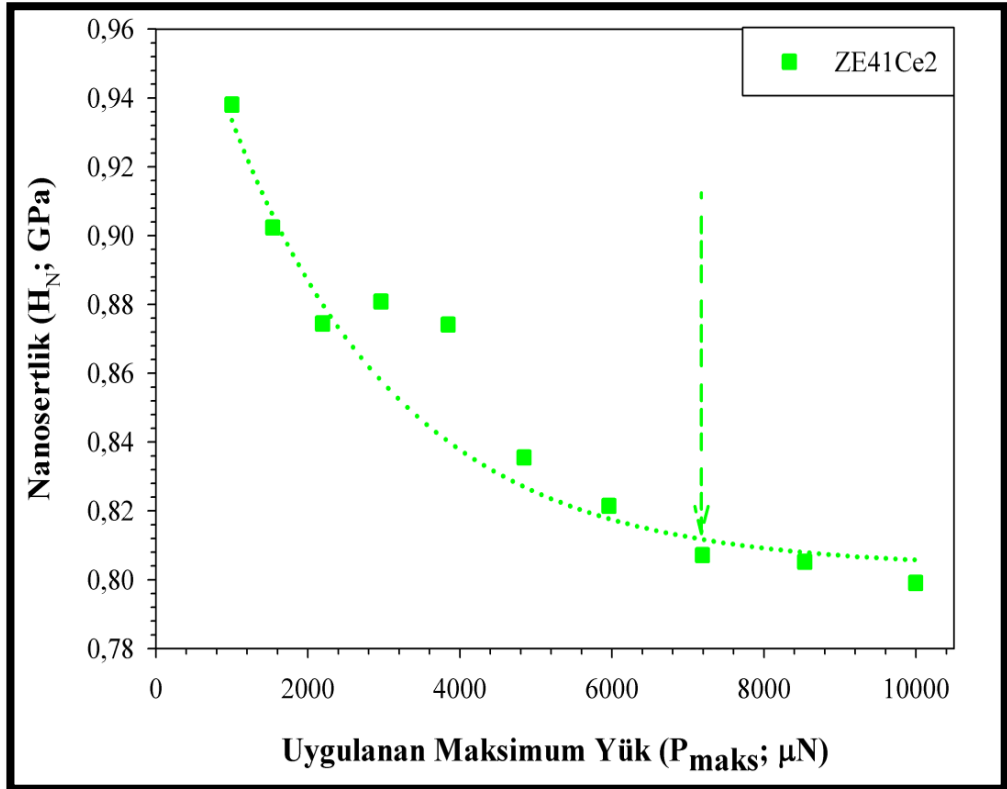


Şekil 4. 35. ZE41Ce1 alaşımda oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

ZE41Ce2 alaşımda uygulanan yüke bağlı olarak uç derinliğindeki değişim Şekil 4.36’da verilmektedir. Uygulanan yük aralığı 1000  $\mu\text{N}$  ile 10000  $\mu\text{N}$  arasındadır. On farklı maksimum yük için elde edilen nanosertlik değerinin uygulanan yüke bağlı değişimi Şekil 4.37’de verilmektedir. Bu şekilden nanosertliğin aertan yük ile azalarak bir platoda sabitlendiği görülmektedir. Literatürde gözlenen ÇBE davranışı ile benzerlik göstermekte olan bir davranış gözlenmektedir.

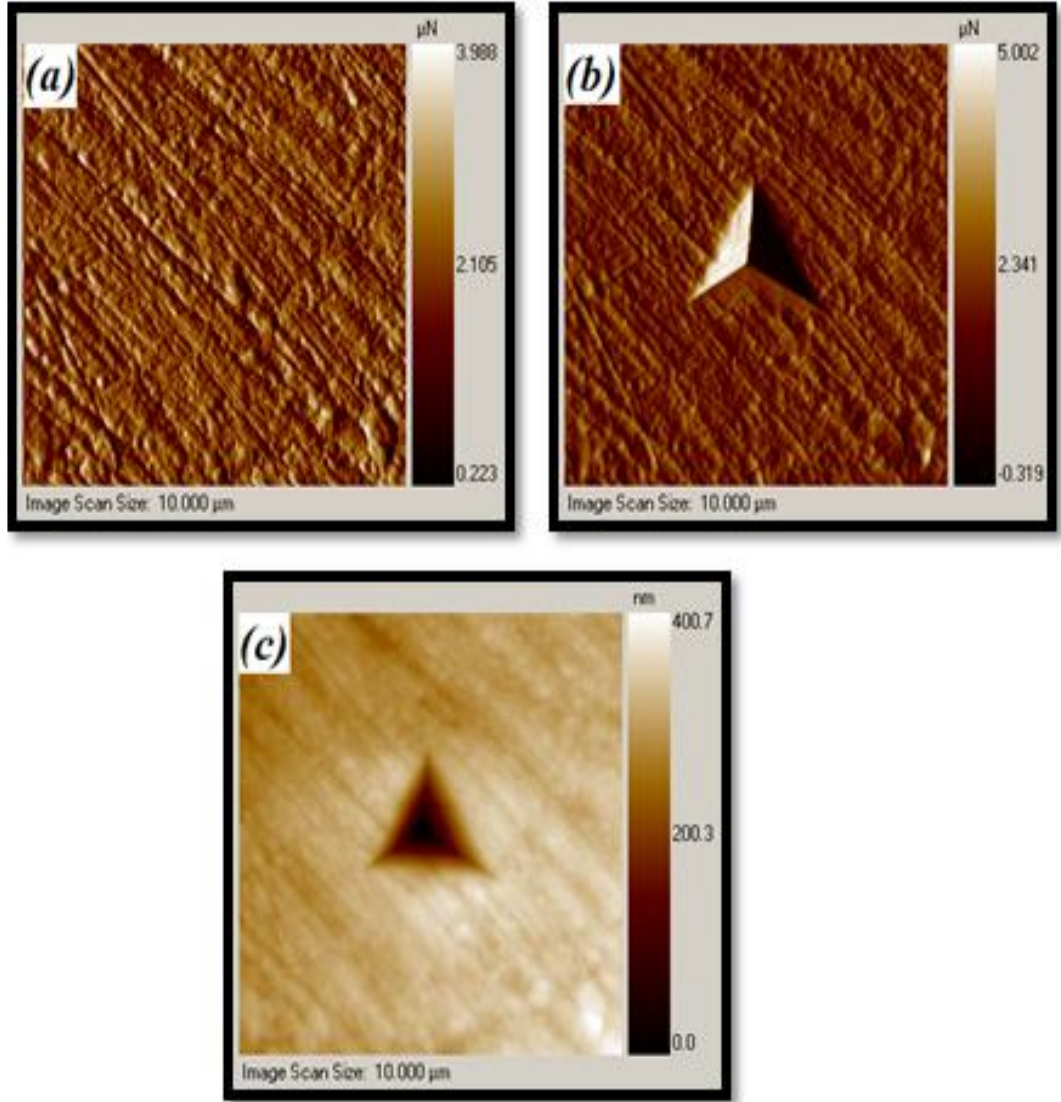


Şekil 4. 36. ZE41Ce2 alaşıminın yük-yerdeğiştirme eğrisi

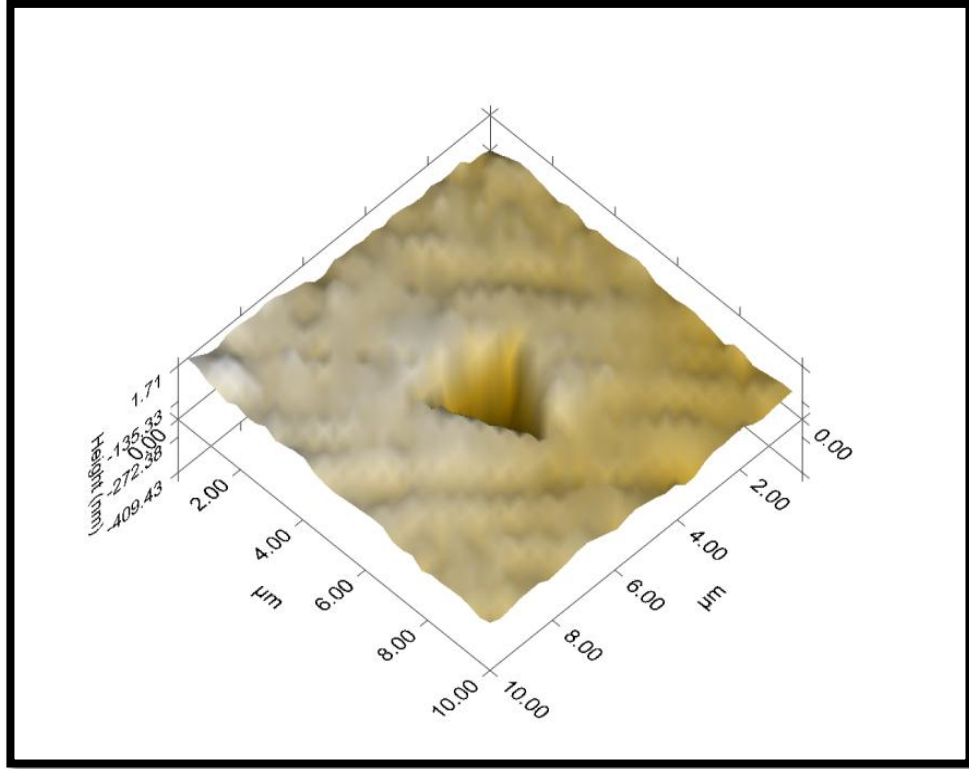


Şekil 4. 37. ZE41Ce2 alaşımına ait nanosertlik yük eğrisi

ZE41Ce2 alaşımının çentik atılmadan önce ve çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü Şekil 4.38’de verilmektedir. Şekil 4.38’den yüzeyin diğerk alaşımlarda olduğu gibi oldukça kararlı ve homojen bir yapıya sahip olup yüzey pürüzlülüğü oldukça düşük ve nano ucun oluşturduğu iz açıkça görülmektedir. Oluşan izin üç boyutlu görüntüsü Şekil 4.39’da verilmektedir.



Şekil 4. 38. ZE41Ce2 alaşımına ait a) entik öncesi yüzey b) entik sonrası yüzey c) entik sonrası yüzey topoğrafyasının SPM görüntüsü



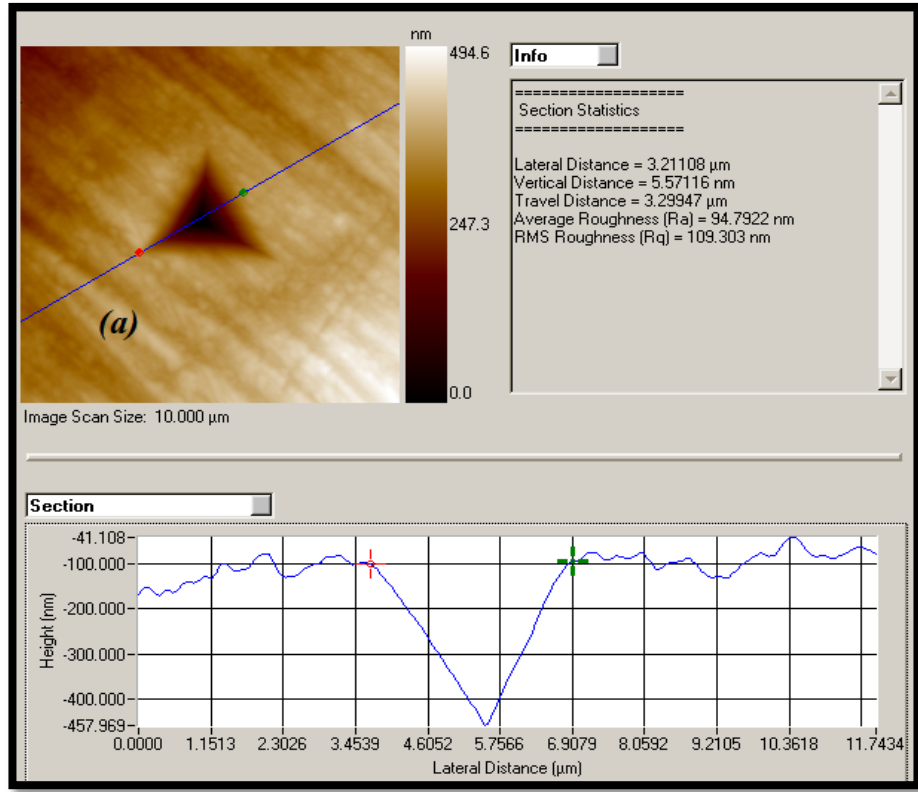
Şekil 4. 39. ZE41Ce2 alaşıımı için Şekil 4.38’de verilen çentiğin 3D görüntüsü

Şekil 4.39 da iz oldukça net olup, etrafta herhangi bir çatlak görülmemektedir. Berkovich uç’un oluşturduğu izin SPM görüntüsü ve ayrıntılı analizi Şekil 4.40-4.42’de verilmektedir.

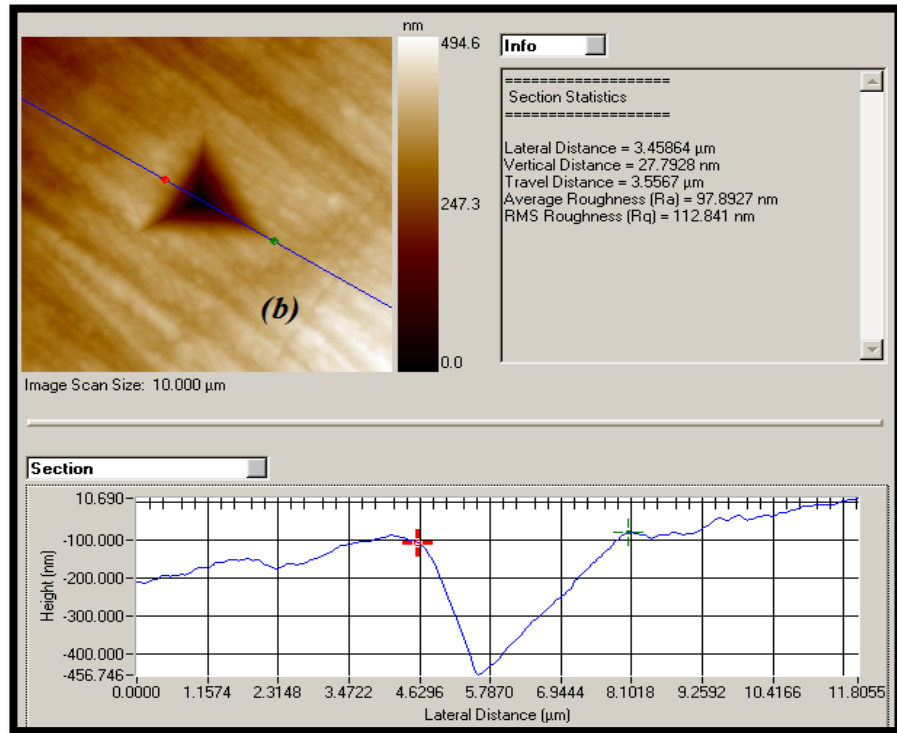
Şekil 4.40’ta verilen ZE41Ce2 alaışımının (a) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 94.792 nm olup RMS pürüzlülük değeri 109.303 nm’dir.

Şekil 4.41’de verilen ZE41Ce2 alaışımının (b) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 97.892 nm olup RMS pürüzlülük değeri 112.841nm’dir.

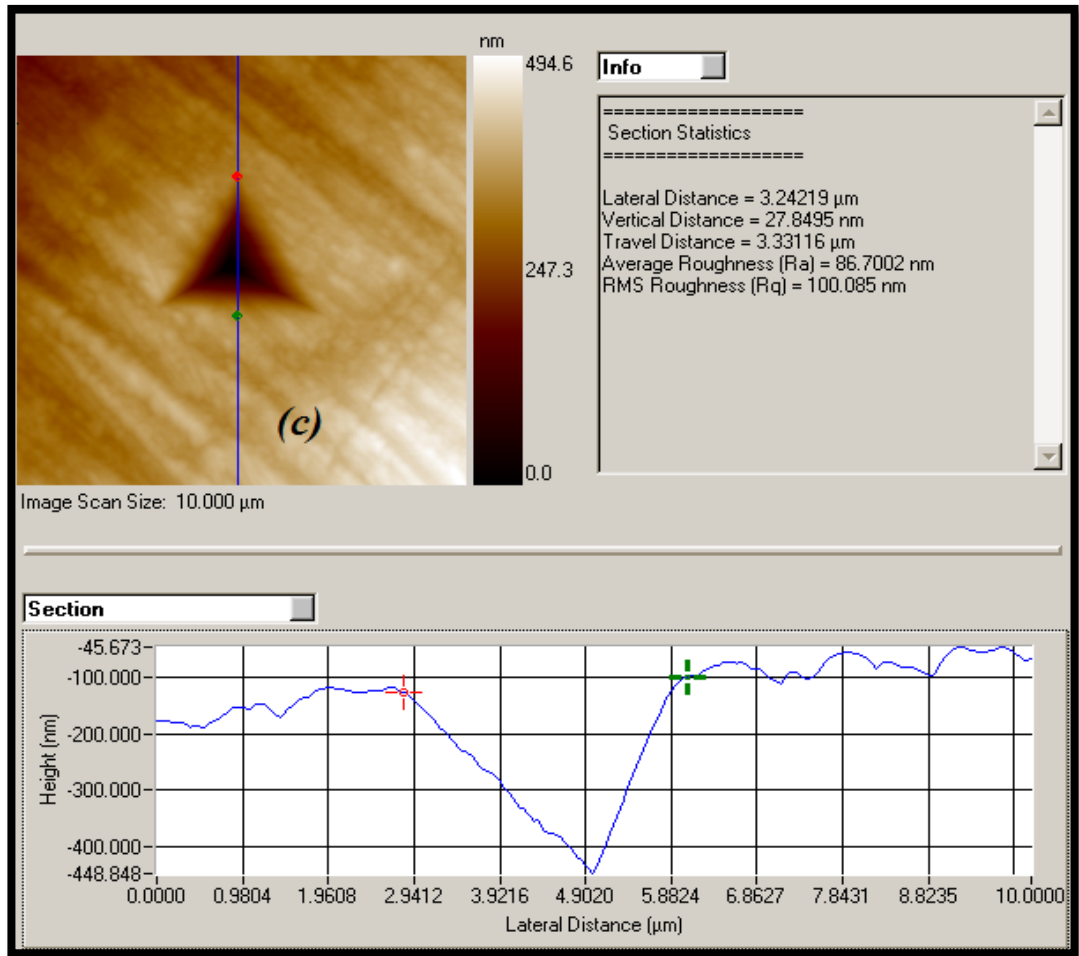
Şekil 4.42’de verilen ZE41Ce2 alaışımının (c) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 86.700 nm olup RMS pürüzlülük değeri 100.085 nm’dir. Her üç kesitinde uç’un doğasını yansıttığı görülmektedir.



Şekil 4. 40. ZE41Ce2 alaşımda oluşturulan çentiğin “a” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

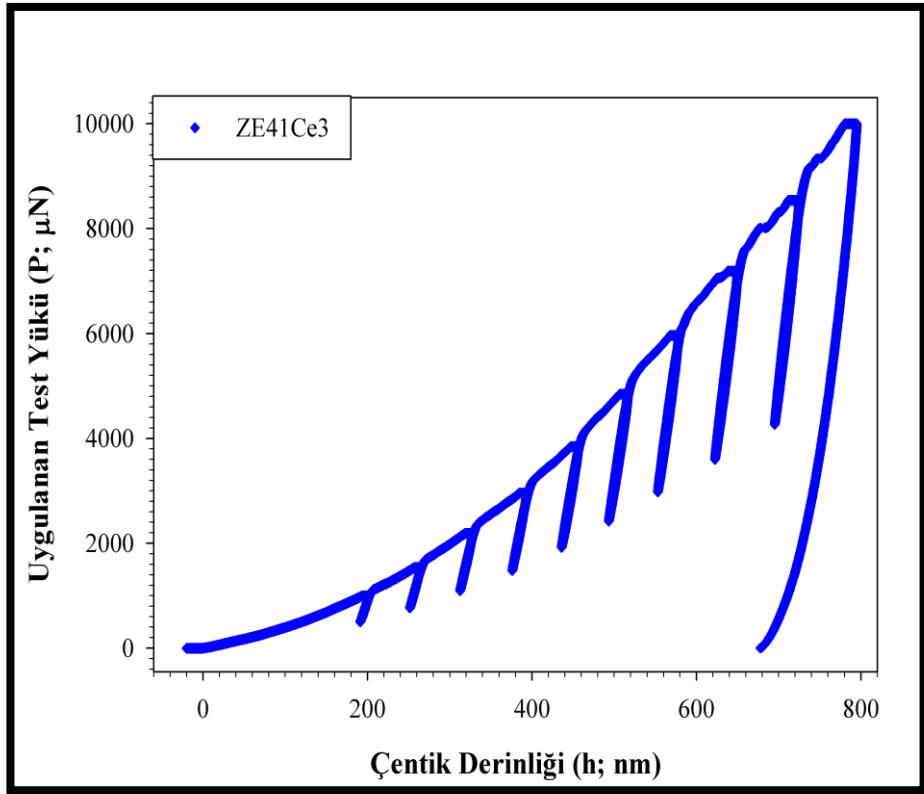


Şekil 4. 41. ZE41Ce2 alaşımda oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsünün analiz

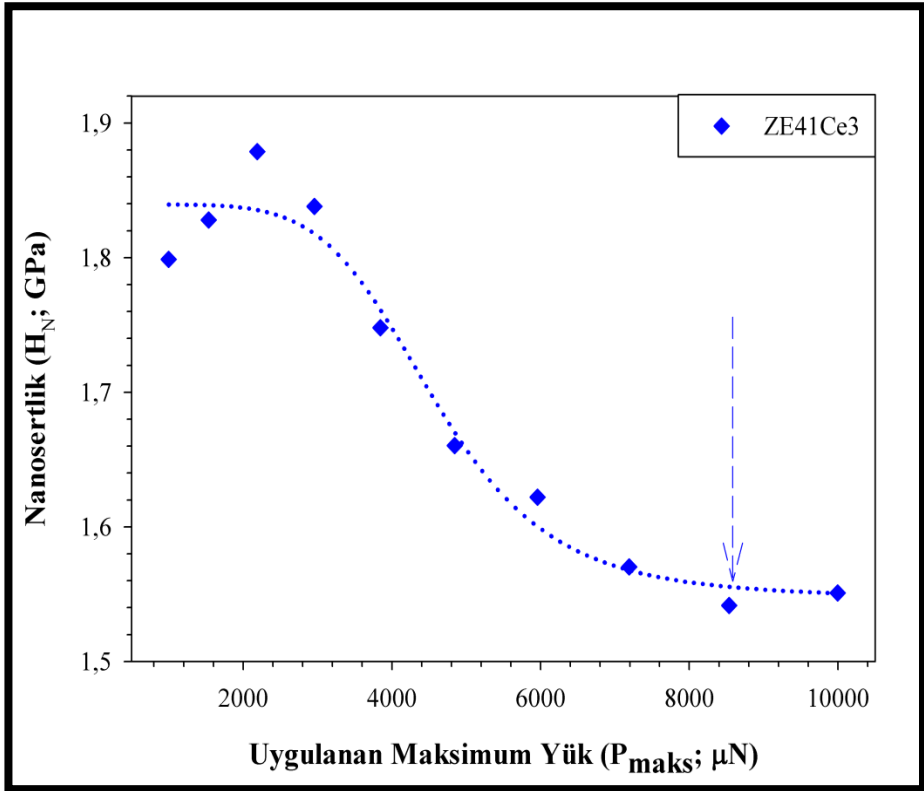


Şekil 4. 42. ZE41Ce2 alaşımda oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

ZE41Ce3 alaşımda uygulanan yüke bağlı çentik derinliği grafiği Şekil 4.43’de görülmektedir. Farklı yüklerin herbiri için yükleme ve boşalma kısımları oldukça düzenli olup boşalma kısımlarındaki değişim hemen hemen paralellik göstermektedir. Bu grafikten elde edilen nanosertlik değerlerinin yüke bağlı değişimleri Şekil 4.44’de görülmektedir. Başlangıç yüklerinde kısmi bir artış sonrasında üssel bir azalma ile yüksek yük değerlerinde nanosertliğin bir platoya yerleşerek değişmediği görülmektedir.

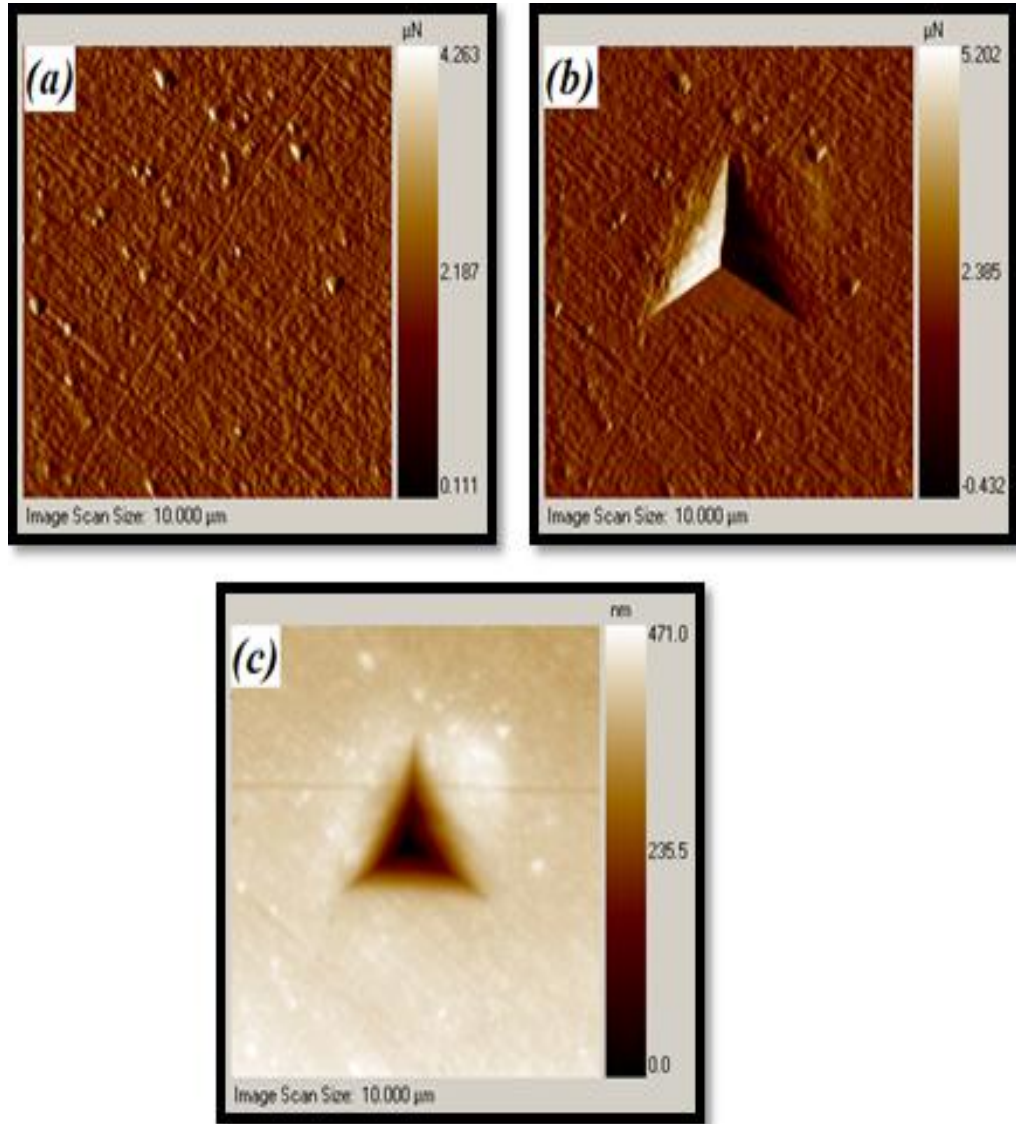


Şekil 4. 43. ZE41Ce3 alaşımının yük-yerdeğiştirme eğrisi

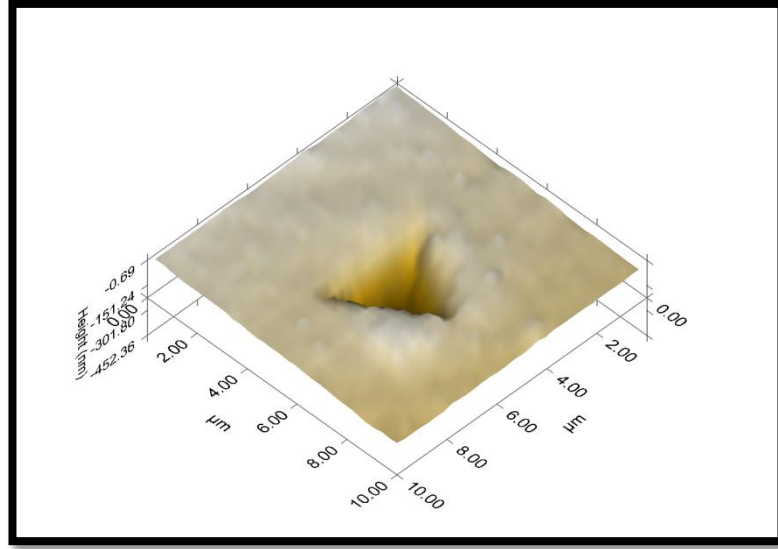


Şekil 4. 44. ZE41Ce3 alaşımına ait Nanosertlik –Uygulanan Yük Eğrisi

ZE41Ce3 alaşımının çentik atılmadan önce ve çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü Şekil 4.45’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi yüzey oldukça kararlı ve homojen bir yapıya sahip olup Berkovich ucun oluşturduğ iz net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.46’da elde edilen izin üç boyutlu görüntüsü verilmiştir. Şekilden, oluşan izin oldukça belirgin olduğ ve etrafında herhangi bir çatlak olmadığı görülmektedir.

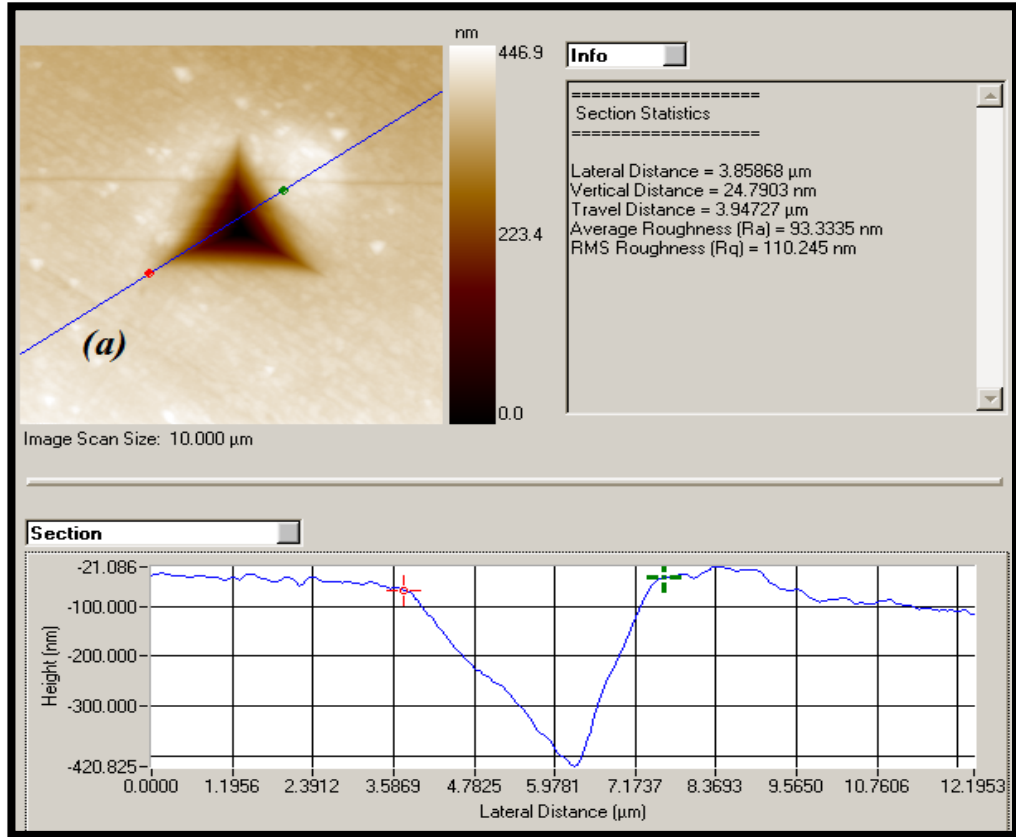


Şekil 4. 45. ZE41Ce3 alaşımının ait a) entik öncesi yüzey b) entik sonrası yüzey c) entik sonrası yüzey topoğrafyasının SPM görüntüsü



Şekil 4. 46. ZE41Ce3 alaşımı için Şekil 4.45’de verilen çentiğin 3D görüntüsü

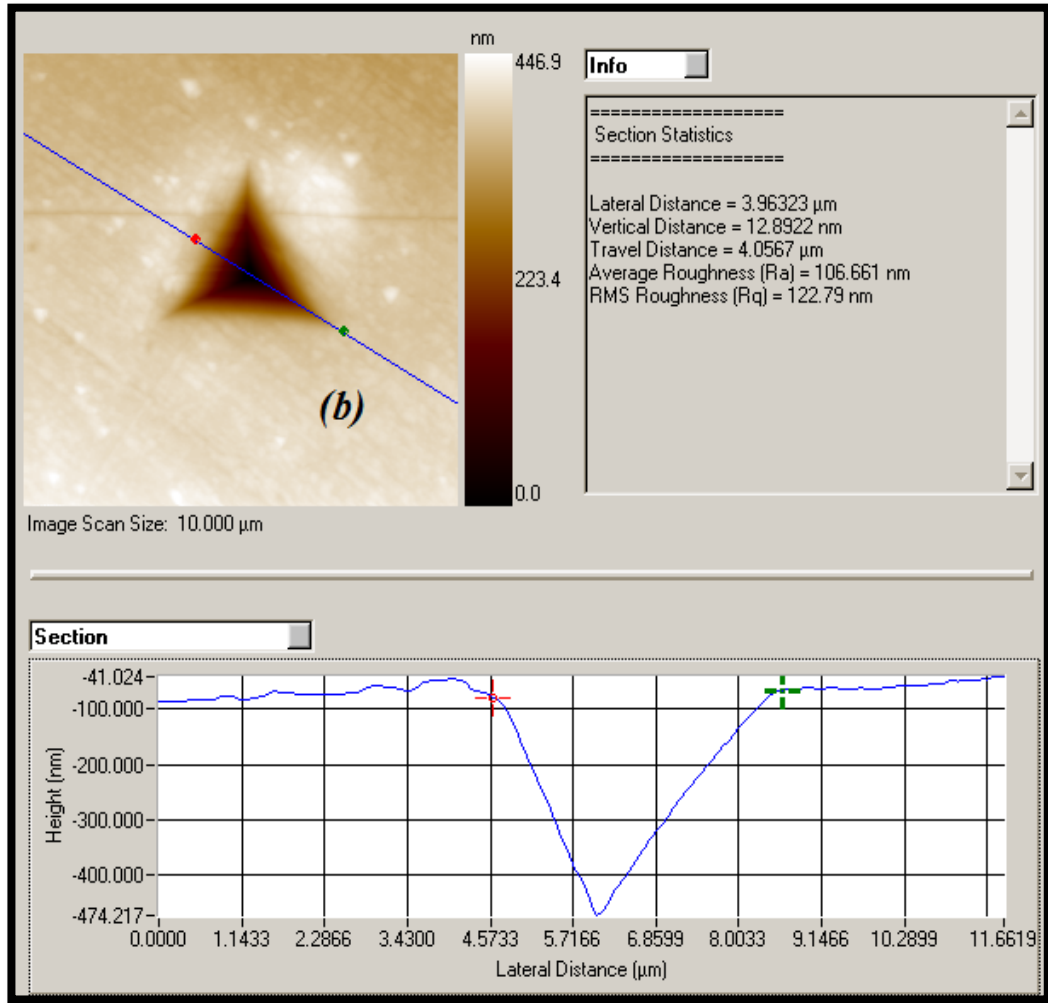
Şekil 4.45’de verilen çentiğin SPM görüntüsü ve ayrıntılı analizi Şekil 4.47-4.49’da verilmektedir. Bu üç şekilde elde edilen izin her bir ayrıntının ayrıntılı analizi yapılmıştır.



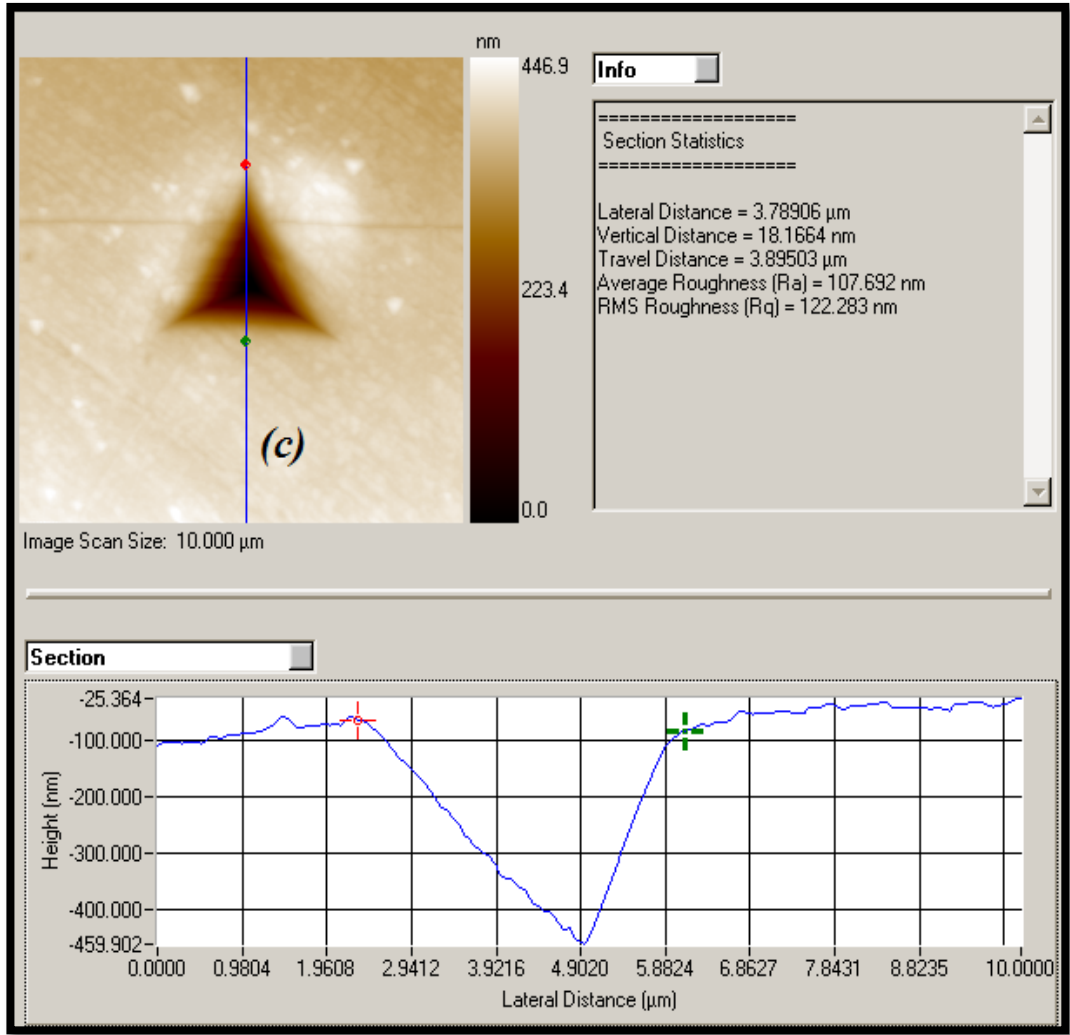
Şekil 4. 47. ZE41Ce3 alaşımında oluşturulan çentiğin “a” ayrıntından SPM görüntüsünün analizi

Şekil 4.47'deki ZE41Ce3 alaşımlarının (a) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 93,333 nm olup RMS pürüzlülük değeri 110.245 nm'dir. Bu kesit için izin yatay görüntüsü oldukça belirgindir.

Şekil 4.48'deki ZE41Ce3 alaşımlarının (b) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 106,661 nm olup RMS pürüzlülük değeri 122,790 nm'dir. İzin (b) kesitinden elde edilen yatay görüntüsü (a) kesitindeki gibi belirgindir.



Şekil 4. 48. ZE41Ce3 alaşımında oluşturulan çentiğin “b” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi



Şekil 4. 49. ZE41Ce3 alaşımda oluşturulan çentiğin “c” ayrıtından SPM görüntüsünün analizi

Şekil 4.49'daki ZE41Ce3 alaşımının (c) kesitine ait SPM görüntüsünden yüzeydeki ortalama pürüzlülük değeri 107,692 nm olup RMS pürüzlülük değeri 122,283 nm'dir. Diğer iki kesit ile benzer olarak bu kesitte iz oldukça belirgindir.

Şu ana kadar her bir alaşım için elde edilen sonuçlar kısaca verildi. Şimdi bu alaşımların analizleri birbirleriyle karşılaştırmalı olarak verilecektir.

ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numuneleri için uygulanan test yükünün iz derinliğine bağlı eğrileri Şekil 4.50'de verilmiştir. Her bir eğri için on farklı yükün numuneye uygulanması ile 10000  $\mu\text{N}$ 'luk maksimum yüke ulaşılmıştır. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinden aynı maksimum yüke karşılık elde edilen iz derinliklerinin değiştiği bu grafikten açıkça görülmektedir. Alaşımdaki Ce miktarının artması ile alaşım içerisindeki uç'un girmiş olduğu derinlik de artmaktadır. Her dört alaşım için

elde edilen P-h eğrilerinin birbirine benzer karakter sergilemeleri alaşımların homojen mikroyapıya sahip olduğunun göstergesidir (Peng ve ark., 2004).

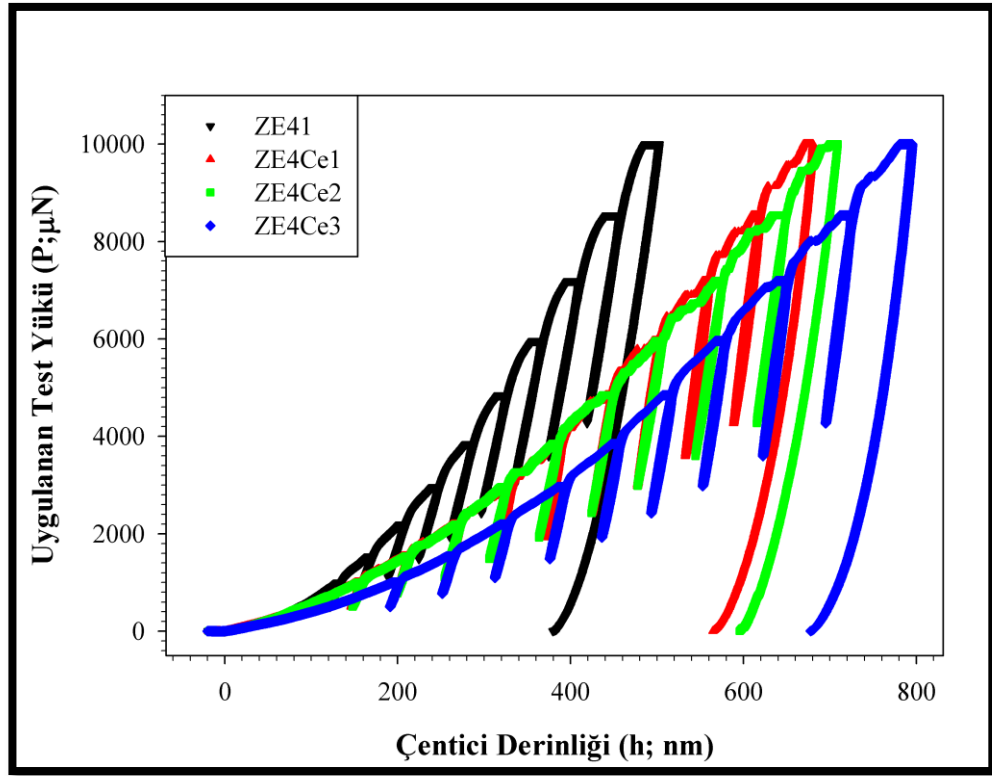
Elde edilen her bir P-h eğrisinde ani yerdeğiştirmeler (düzensizlikler) yoktur. Şekilde her bir maksimum yük için nanosertlik değerleri Eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplandı.

$$(H = 0.0408P_{maks} / h_c^2) \quad (4.9)$$

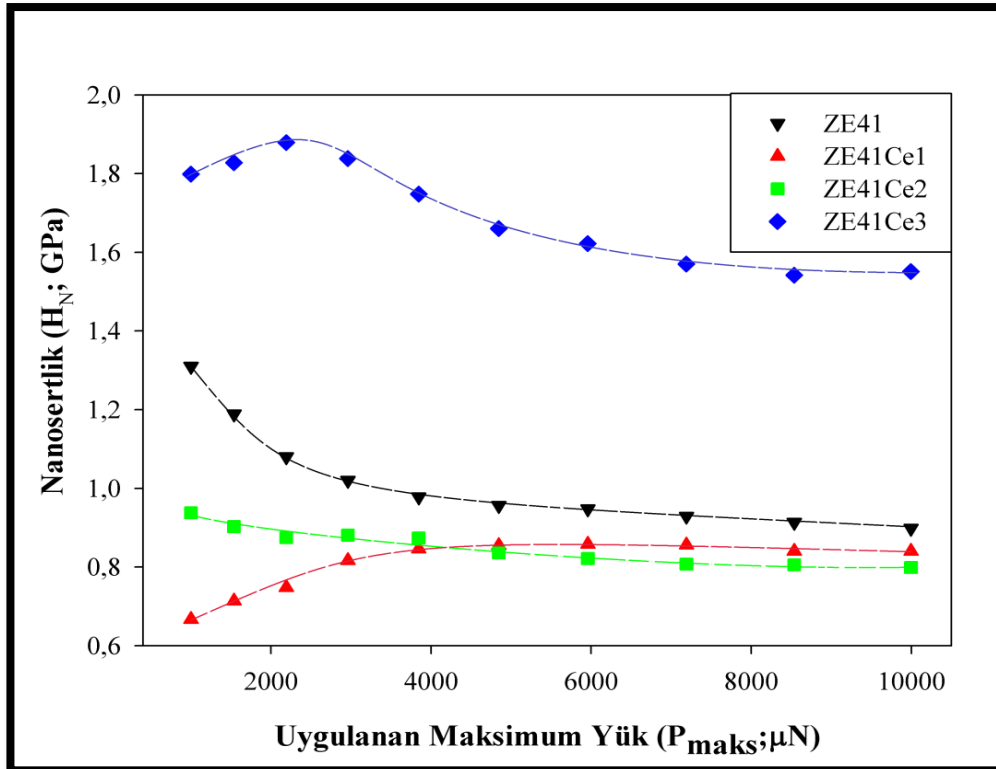
Herbir alaşım için uygulanan yüke karşı elde edilen nanosertlik değerinin değişimi Şekil 4.51’de verilmektedir. Şekil incelendiğinde ZE41Ce1 alaşımı için uygulanan yükün artmasıyla nanosertlik değerlerinin lineer olmayan bir biçimde arttığını, büyük yüklerde doyuma ulaşma eğilimi içinde olduğu görülmektedir. Bu alaşımda 5000  $\mu\text{N}$ ’luk yüke kadar nanosertliğin arttığı, 5000 $\mu\text{N}$  da doyuma ulaşp plato bölgesine geçmekte fakat 7000 $\mu\text{N}$ ’dan sonra azalarak 8500 $\mu\text{N}$  da tekrar plato bölgesine geçerek doyuma ulaşmaktadır. Bu olay genel olarak literatürde iyi bilinen ters ÇBE olarak bilinmektedir (Sangwal, 2000; Güder ve ark., 2011; Doğruer ve ark., 2014).

ZE41, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarında ÇBE gözlenirken, ZE41Ce1 alaşımında ters ÇBE görülmektedir. Her üç alaşım için nanosertlik yaklaşık 6000  $\mu\text{N}$ ’luk maksimum yükte pşatoya ulaşmakta ve bu değerden sonra sabit kalmaktadır.

Bu durum literatürde; tek kristaller (Lu ve ark., 2014), biyomalzemeler (Renjo ve ark., 2014), ince filmler (Şahin ve ark., 2015), seramikler (Chakraborty ve ark., 2012; Renjo ve ark., 2014) ve birçok alaşımlarda benzerlik arz etmektedir (Li ve Bradt, 1993; Gong ve ark., 2000; Şahin ve ark., 2005; Demirkol, 2010; Lu ve ark., 2014), titreşim etkisi ve küçük yüklerde uç körlüğü (Westbrook, 1967, Hanneman ve Westbrook, 1968), kristalde ara yüzeye yakın deforme olmuş bir bölge (Berzina ve Sawintsev, 1965; Sangwal, 1971), küçük yüklerde numunenin ufalanması ile numuneye uygulanan yükteki kayıp (Banerjee ve Feltham, 1974) ve çentme sırasında meydana gelen çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak bu olay halen tam olarak anlaşılamamıştır (Adeva ve ark., 1995; Sangwal, 2000)



Şekil 4. 50. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Uygulanan maksimum yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 4. 51. Nanosertliğin uygulanan maksimum yüke bağlı değişimi

Literatürde yapılan çalışmalarda BaFCl kristalinde 0.08 ile 0.8 N yük aralığında yapılan deneylerde (100) düzleminde ters çentik boyutu etkisi gözlenirken (001) düzleminde çentik boyutu etkisi gözlenmiştir (Guille ve Sieskind, 1991). Sangwal (1989), PbS kristalinde farklı ısıtma işlemi tabi tutarak (100) düzlemi üzerinde 15s'lik süreli 0.2 ile 1.5 N'luk yük aralığında yapmış olduğu sertlik deneylerinde ters ÇBE gözlemlemiştir. Farklı ısıtma işlemi görmüş PbS kristalinde sertlik değeri bir maksimum değere kadar çıkmış, sonrasında sertlik değeri sabit bir değerde kalmıştır. Yükün artması ile sertlik değeri değişmemiştir. BaFCl ve PbS kristalinden gözlenen sertlik değerleri için Sangwal (2000) maksimum sertliğin dislokasyonların çekirdeklenmesi ve hareketi ile ilişkilendirmiş kristal yüzeyinde uç tarafından noktasal kusurların oluşturulduğunu ifade etmiştir. Kristal yüzeyinde çentiğin atıldığı yönelim uç etrafındaki noktasal kusurlar ve dislokasyonların katkısı belirler (Boyarskaya ve ark., 1979).

Pbs kristalinin (100) yüzeyi (Sangwal ve Patel, 1974,1975) ve BaFCl kristalinin (100) çentik etrafında kayma çizgileri gözlenirken, BaFCl'nin (001) yüzeyinde oldukça küçük yüklerde çatlakların meydana geldiği rapor edilmiştir (Guille ve Sieskind, 1991). Literatürde yapılan bu çalışmada BaFCL kristalinin (100) yüzeyi ve Pbs kristalinin (100) yüzeyinde ters ÇBE gözlenirken, BaFCl'nin (001) yüzeyinde normal ÇBE gözlenmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada ki bunların içerisinde cam malzemeleri içerisinde alan gevrek malzemelerde ÇBE (Li ve ark., 1994; Jain ve ark., 1994; Michels ve Frischat, 1982; Arora ve ark., 1984; Rethinam, 1994; Güder, 2011) davranışı gözlenmesine rağmen, plastik deformasyona maruz kalan tek kristal yüzeylerinde ters ÇBE davranışı (Bull ve ark., 1989; Li ve ark., 1994; Arora ve ark., 1984) gözlenmiştir. Bu sebeple ters ÇBE davranışının sadece plastik deformasyon davranışının gözlemlendiği malzemelerde görüldüğü ifade edilebilir (Sangwal, 2000).

Şekil 4.51'de ZE41Ce1 için gözlenen ters ÇBE'nin benzeri literatürde Sialon seramiklerinde (Basu ve ark., 2009; Güder ve ark., 2011), TiCN seramiklerinde (Gong ve ark., 2001), camlarda (Sebastian ve Khadar, 2005) ve tek kristallerde (Sangwal ve Surowska, 2003) gözlenmiştir. Normal çentik boyutunun aksine, ters ÇBE gözlenen malzemelerde, çentiğin olduğu bölgeden uzaklaştıkça, çatlak oluşumu, dislokasyon aktiviteleri ve çentiğin elastik deformasyonu, çentik zorunun rahatlaması gözlemlenir. Bu durum gevrek malzemelerde çentik oluşturma sürecinde çatlak oluşumu şeklinde

ortaya çıkar. Feltham ve Banerjee (1992), ilk olarak bu durumun çentik meydana getirilirken çatlak oluşumu sırasında enerji kaybından kaynaklanabileceğini önermiştir. Çatlak meydana gelirken enerjinin bir kısmı çatlak oluşturmaya ve diğer bir kısmı ise çentiği meydana getirmek için harcanır. Bu sebeple, çentik testlerinde belirgin yüksek sertlik değeri gözlenir. Bu durum Güder ve arkadaşları (2011) tarafından düşük yüklerde dislokasyon plastisitesinin daha fazla deformasyona sebep olmasına ve  $\beta$ -Sialon seramiklerinde sertliğin azalmasına sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

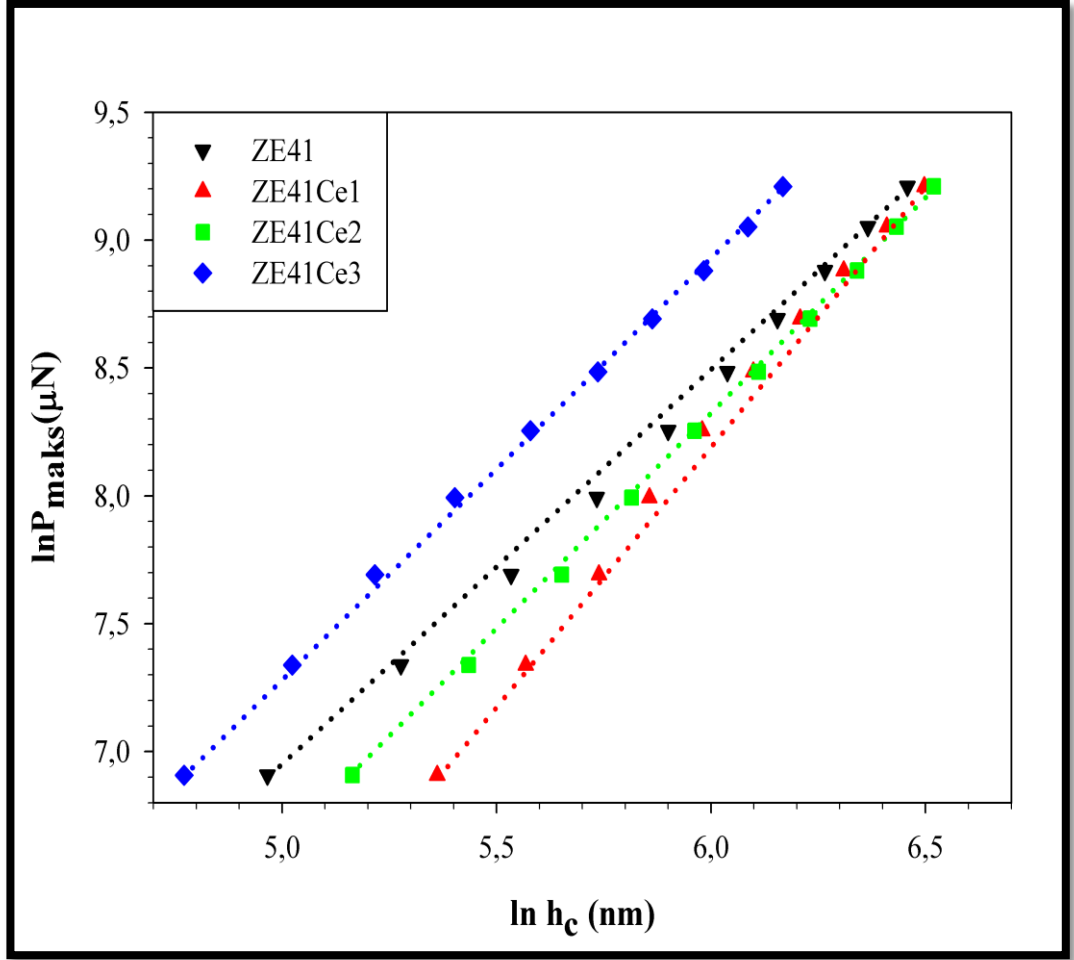
Li ve Bradt (1993), ters çentik boyutunu izah ederken, uygulanan çentik test yükünün toplam numune direnci ile dengelendiğini ve bu direncin dört bileşenden meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bunlar; i) uç/numune arasındaki sürtünme (sürtünme bileşeni) ii) elastik deformasyon iii) plastik deformasyon ve iv) numunede gözlemlenen çatlaklar. Li ve Bradt'e göre çatlaklar ters çentik boyutuna katkı sağlarken, sürtünme ve elastik etki normal ÇBE'ne katkı sağlamaktadır.

Şekil 4.51'de elde edilen nanosertliğin uygulanan yüke bağlı değişimini izah etmede literatürde farklı modeller kullanılarak yapılacaktır.

#### 4.2.1. Meyer Kanunu'na Göre Analiz

Çentik boyutu etkisinin tanımlanmasında kullanılan literatürdeki en yaygın kanun Meyer kanunu'dur. Numuneye uygulanan yük,  $P_{etkin}$  ile uç'un numunedeki girme derinliği  $h_c$  arasındaki ilişki  $P_{maks}=Kh_c^2$  ile verilmektedir. eşitlikte  $n$  ve  $K$  deneysel verilerle fit edilen eğrilerden elde edilmektedir. Eşitlikteki " $n$ " ÇBE davranışının bir ölçüsüdür. Meyer üssü " $n$ " 'in ikiden büyük olması durumunda ters ÇBE, ikiden küçük olması durumunda ÇBE davranışı, ikiye eşit olması durumunda ÇBE davranışı gözlenmez (Kölemen, 2006; Şahin, 2006).

ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımı için elde edilen kontak derinliğinin test yüküne bağlı değişimini veren  $\ln P_{maks}-\ln h_c$  grafiği Şekil 4.52'de verilmektedir. Grafikten elde edilen lineer ilişki nanosertlik verilerini tanımlamada Meyer Kanunu'nun uygun olduğunu göstermektedir. Şekil 4.52'de çizilen grafikten elde edilen " $n$ " değeri; ZE41, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 için 2 den küçük çıkmaktadır. Diğer taraftan ZE41Ce1 için ise  $n>2$  den büyük elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4.51'de elde edilen nanosertlik- yük grafikleri ile uyum göstermektedir.

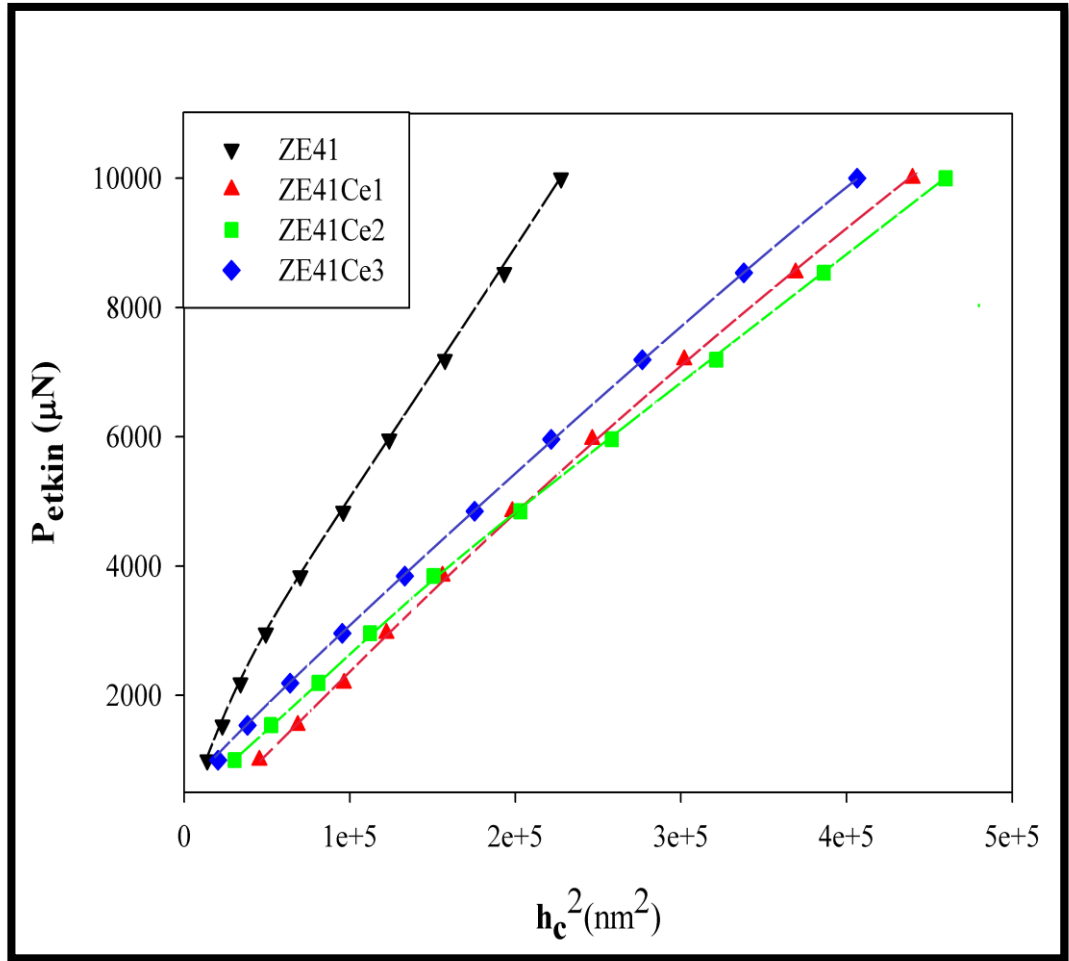


Şekil 4. 52. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının lnPmaks-lnhc grafiği

#### 4.2.2. Hays-Kendall Yaklaşımına Göre Analiz

Hays-Kendall (1973) farklı türden malzemeler üzerinde yapmış oldukları çentik deneylerinde gözlemlemiş oldukları ÇBE davranışını açıklarken; numuneye uygulanan yükün belirli bir limit değeri altında kalması durumunda sadece elastik deformasyonun meydana geldiğini ancak bu limit değerlerinin aşılması durumunda plastik deformasyonun oluşacağını ortaya koymuşlardır.

Hays-Kendall (1973) elde ettikleri izin büyüklüğü ile test yükü arasındaki ilişkiyi etkin yük kavramı ile izah etmişlerdir.  $P_{etkin} = P_{maks} - W$  eşitliğindeki  $W$  ise deformasyon oluşturmak için uygulanması gerekli minimum yüküdür. Bu durum  $P_{etkin} = P_{maks} - W = Kh_c^2$  olarak bildirilmiştir. Eşitlikten etkin yükün çentik derinliğine bağlı değişimi çizildiğinde düz bir çizgi elde edilecektir.



Şekil 4. 53. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Petkin- $h_c^2$  grafiği

Şekil 4.53'te ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için çizilen bu grafiğin korelasyon katsayılarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 4.12).

Hays-Kendall yaklaşımı ile yapılan analiz de elde edilen “W” değerleri (Çizelge 4.12) kabul edilemeyecek kadar büyüktür. Bu ise ÇBE'nin analizinde kullanılan bu yaklaşımın yetersiz kaldığının bir göstergesidir. Benzer bir durum Kölemen (2006), Peng ve ark. (2004) ve Şahin (2006) tarafından da ortaya konulmuştur. Bu sebeple ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının nanosertlik verilerinin analizinde farklı bir model ile analiz yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 4.12. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Berkovich uç için analizi

| Numune Kodu | W<br>( $\mu\text{N}$ ) | K <sub>1</sub><br>( $\mu\text{N}/\text{nm}$ ) <sup>2</sup> | H <sub>HK</sub><br>(GPa) | H <sub>LI</sub> Plato Değeri<br>(GPa) | r <sup>2</sup> |
|-------------|------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|
| ZE41        | 7,545 e+2              | 4,099 e-2                                                  | 0,167                    | 0,906                                 | 0,996          |
| ZE41Ce1     | 9,997 e+1              | 2,303 e-2                                                  | 0,939                    | 0,840                                 | 0,997          |
| ZE41Ce2     | 5,331 e+2              | 2,078 e-2                                                  | 0,848                    | 0,802                                 | 0,998          |
| ZE41Ce3     | 6,894 e+2              | 2,326 e-2                                                  | 0,950                    | 1,546                                 | 0,999          |

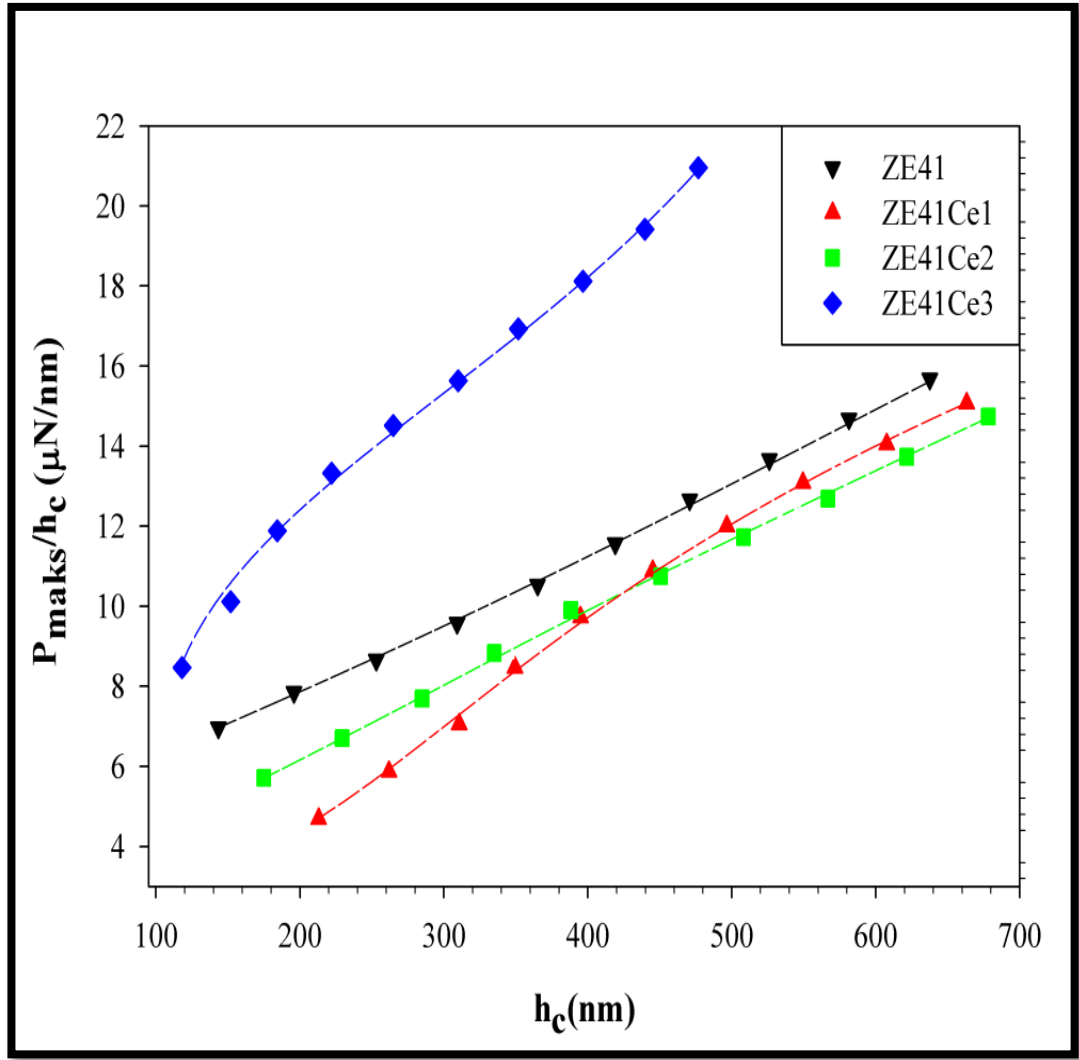
#### 4.2.3. PSR Modeli'ne Göre Analiz

ÇBE davranışını analiz etmek için kullanılacak diğer bir yöntem orantılı numune direnci (PSR) Modelidir. Bu model incelendiğinde Hays-Kendall Modeli'nin düzenlenmiş halinin olduğu görülür. Hays ve Kendall kalıcı deformasyon oluşturmak için malzemenin uyguladığı direncin sabit ( $W=a_1h_c$ ) olduğunu söyler. Ancak PSR Modeli bu direncin çentik buyutu ile orantılı bir şekilde değiştiğini ifade eder (Li ve Bradt, 1993). Li ve Bradt tarafından literatüre kazandırılan PSR Modeli'nin farklı malzemeler üzerinde yapılan sertlik deneyi sonuçlarını açıklamada memnun edici sonuçlar verdiği gözlenmiştir. PSR modeline göre yükten bağımsız sertlik değeri

$$H_{PSR} = \frac{P_{etkin}}{24.5h_c^2} = \frac{P_{maks} - a_1h_c}{24.5h_c^2} = \frac{a_2}{24.5} \quad \text{şeklinde hesaplanmaktadır. Şekil 4.54'de PSR}$$

Modeli'ne göre çizdirilen grafikten elde edilen  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $H_{PSR}$  ve  $r^2$  değerleri Çizelge 4.13'de verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere ZE41Ce1 alaşımı dışında diğer üç alaşımın uyum katsayıları oldukça yüksek ve plato bölgesini aşmamışlardır.

Ancak PSR Modeli'nden elde edilen yükten bağımsız sertlik değerleri (Çizelge 4.2) ve Şekil 4.51'de elde edilen nanosertlik- yük grafiğindeki plato bölgesi değerleri ile uyumsuzluk göstermektedir. Bu sebeple nanoçentik verilerinin analizi için başka bir model kullanılacaktır.



Şekil 4. 54. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının  $P_{maks}/h_c$ - $h_c$  grafiği

Çizelge 4.13. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Berkovich uç için PSR analizi

| Numune Kodu | $a_1$<br>( $\mu N/nm$ ) | $a_2$<br>( $\mu N/nm$ ) <sup>2</sup> | $H_{PSR}$<br>(GPa) | $H_{LI}$ Plato Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|-------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------|
| ZE41        | 4,227 e+0               | 1,783 e-2                            | 0,727              | 0,906                          | 0,997 |
| ZE41Ce1     | 1,386 e-2               | 2,349 e-2                            | 0,958              | 0,840                          | 0,989 |
| ZE41Ce2     | 2,715 e+0               | 1,778 e-2                            | 0,725              | 0,802                          | 0,998 |
| ZE41Ce3     | 5,440 e+0               | 3,257 e-2                            | 1,330              | 1,546                          | 0,998 |

#### 4.2.4. Geliştirilmiş PSR (MPSR) Modeli'ne Göre Analiz

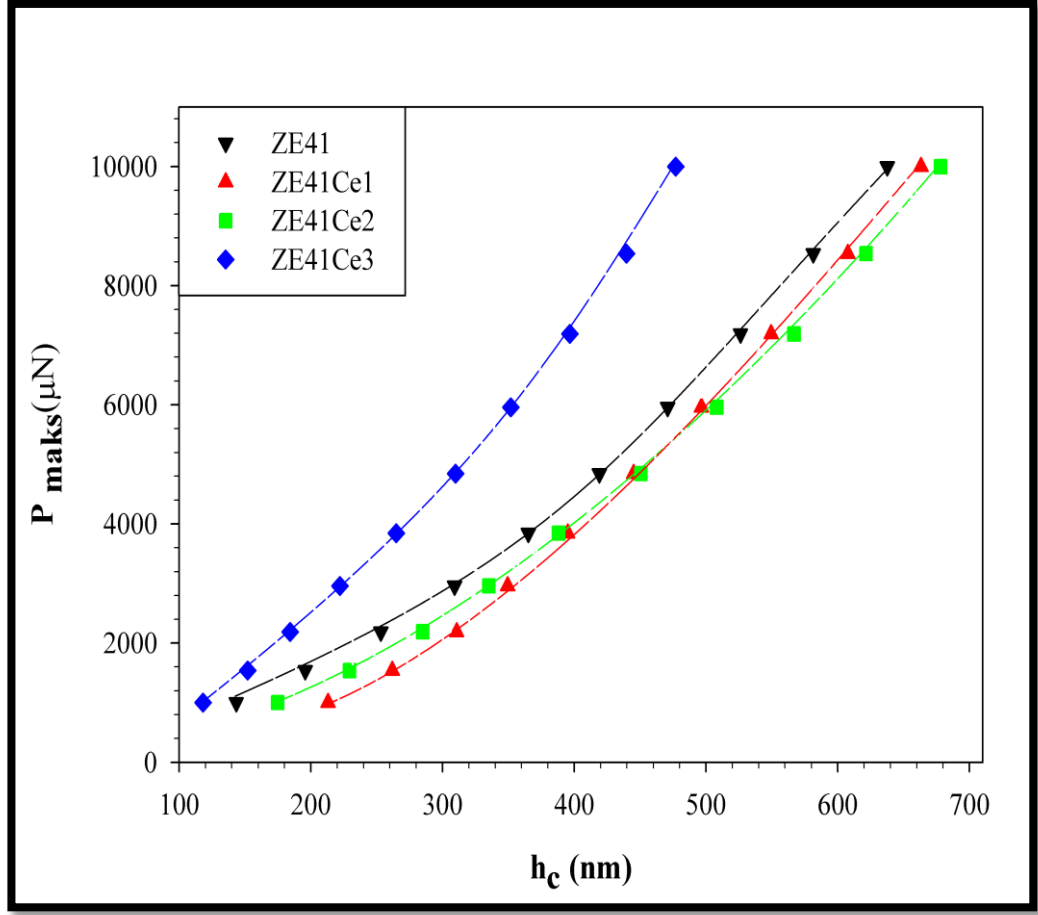
Orantılı Numune Direnci Modeli'nde  $h_c=0$  olduğunda  $W=a_1h_c$  değerinde sıfır olmaktadır. Bu durum kalıcı deformasyon oluşturmak için gerekli olan minimum yükün sıfır olması anlamına gelir. Ancak yapılan çalışmalarda (Gong ve ark., 1999) bu tanımlamanın doğru olmadığı ifade edilmiştir. Çentik deneyleri öncesinde mekanik işlemler ile yüzeyleri parlatılan alaşımların fiziksel modellemesi yapılır iken, serbest bir yay olarak değil, sıkıştırılma işlemine tabi olmuş bir yay olarak düşünülmesi gerekmektedir. Ayrıca PSR Modeli'ndeki  $P_{maks}/h_c$  - $h_c$  grafiğinde lineerlikten muhtemel sapmalar, plastik deformasyon için numune direncinin yanlış tanımlanmasından kaynaklanabilmektedir. Bu durum sonucunda Gong ve arkadaşları (1999), tarafından PSR Modeli'nin düzeltilmiş formu,  $P_{maks} = a_0 + a_1h_c + a_2h_c^2$  MPSR literatüre kazandırılmıştır.

MPSR Modeli'nde verilen eşitlikteki  $a_1$  ve  $a_2$  parametrelerinin fiziksel anlamı PSR Modeli'nde yükten bağımsız sertlik hesabı yapılırken benzer yol takip edilecektir.

$$H_{MPSR} = \alpha \frac{P_{etkin}}{h_c^2} = \alpha \left( \frac{P_{maks} - a_0 - a_1h_c}{h_c^2} \right) = \alpha a_2 \text{ şeklinde yükten bağımsız sertlik değerleri}$$

her bir alaşım için hesaplanabilir. Şekil 4.55'de  $P_{maks}$ - $h_c$  grafiği görülmektedir.

Grafikten elde edilen  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$ ,  $H_{MPSR}$  ve  $r^2$  değerleri Çizelge 4.14'de verilmektedir. MPSR modeli ile elde edilen  $H_{MPSR}$  değerleri, plato sertlik değerlerinden ( $H_{LI}$ ) oldukça düşüktür. Bununla birlikte ( $P_{maks} = a_0 + a_1h_c + a_2h_c^2$ )  $a_0$  parametresi Hays-Kendall Modeli ile ifade edilen  $W$  ile aynı fiziksel anlama sahiptir. MPSR Modeli ile elde edilen  $a_0$  değerleri ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için negatiftir.



Şekil 4. 55. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Pmaks-hc grafiği

Negatif  $a_0$  değerleri fiziksel bir anlama sahip değildir. Literatürde  $a_0$  ile ilgili benzer bir uyumsuzluk Peng (2004) ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur. Bu sebeple MPSR Modeli de her dört alaşım için yükten bağımsız sertlik değerini hesaplamada yetersiz kalmıştır.

Çizelge 4. 14. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Berkovich uç için MPSR analizi

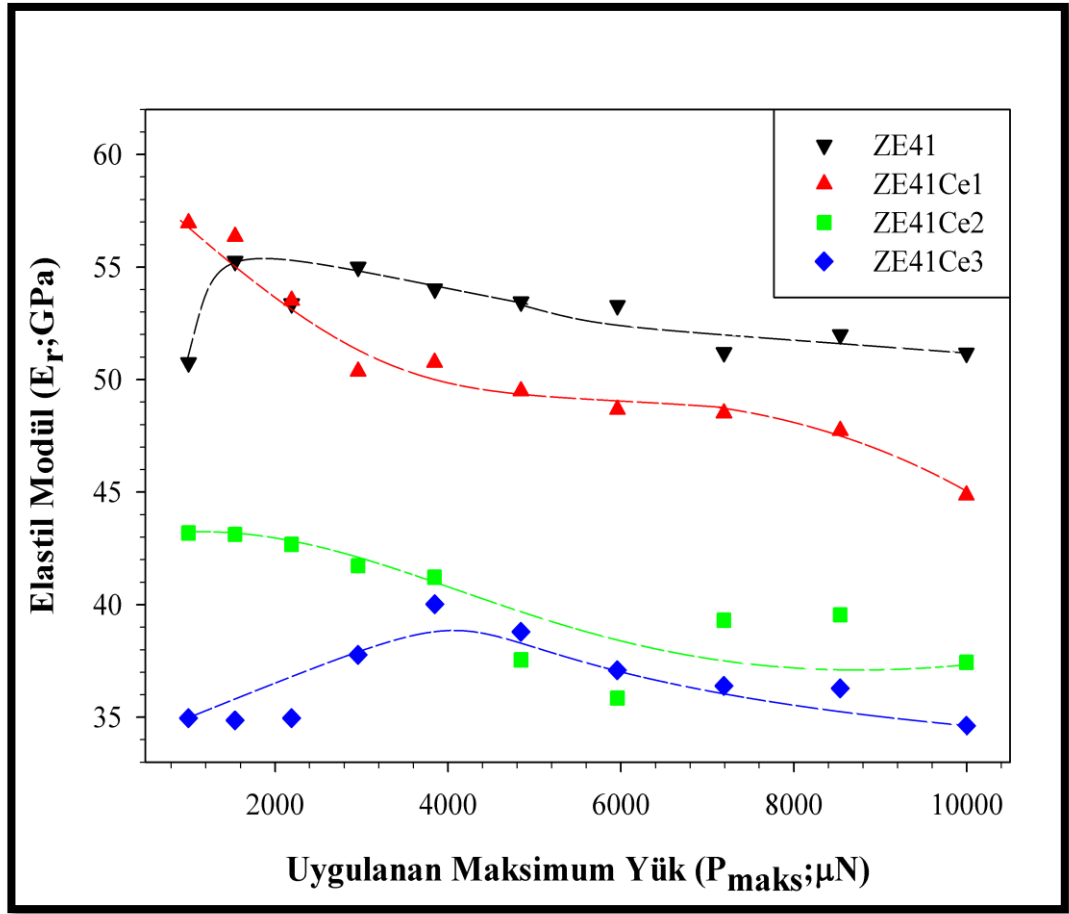
| Numune Kodu    | $a_0$<br>( $\mu\text{N}$ ) | $a_1$<br>( $\mu\text{N}/\text{nm}$ ) | $a_2$<br>( $\mu\text{N}/\text{nm}$ ) <sup>2</sup> | $\text{HM}_{\text{PSR}}$<br>(GPa) | $\text{H}_{\text{LI}}$ Plato<br>Değeri<br>(GPa) | $r^2$ |
|----------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-------|
| <b>ZE41</b>    | 1,623 e+2                  | 3,101 e+0                            | 1,940 e-2                                         | 0,791                             | 0,906                                           | 0,999 |
| <b>ZE41Ce1</b> | -1,223 e+3                 | 6,591 e+0                            | 1,566 e-2                                         | 0,638                             | 0,840                                           | 0,999 |
| <b>ZE41Ce2</b> | -1,332 e+2                 | 3,522 e+0                            | 1,677 e-2                                         | 0,684                             | 0,802                                           | 0,999 |
| <b>ZE41Ce3</b> | -2,814 e+2                 | 7,995 e+0                            | 2,788 e-2                                         | 1,137                             | 1,546                                           | 0,999 |

Sertlik basit bir ifade ile malzemelerin plastik deformasyona veya çentiğe karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bir başka deyişle, malzemedeki yüksek sertlik plastik deformasyona karşı gösterilen yüksek dirençtir. P-h eğrileri malzemenin plastik deformasyon miktarı hakkında bilgi verir. Boşaltma işlemi sonrasındaki son derinlik plastik deformasyonun bir ölçüsüdür. Yüksek dirençli bir malzemeye yük uygulandığında meydana gelen plastik deformasyon sonrası malzemedeki meydana gelen son derinlik küçük olacaktır. Şekil 4.45.'te gösterilen numunelerin son derinlikleri dikkate alındığında ZE41 numunesinin ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinden daha sert olduğu söylenebilir.

Karaca ve arkadaşları (2009) ZnO katkılı BSCCO (BiPbSrCaCuO)'nun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında elde ettikleri sertlik değerleri ile literatür arasında küçük bir fark olduğunu ve bunun hazırlama teknikleri nedeniyle olabileceğini ifade etmişlerdir. Kölemen ve arkadaşları (2006), Sm katkılı BSCCO'nun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada katkılanan BSCCO numunelerinin sertliğinin saf olan numuneden daha büyük sertliğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Bu artışın meydana gelmesi hem kirlilik alanlarındaki dislokasyonların çivilenmesi hem de kristalde kirlilik atomlarının mevcut olması ve aynı zamanda kirlilikleri içeren bağ kuvvetlerinin çeşitliliğine bağlı olabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca mikroyapı incelemesinde yüzeydeki boşlukların büyüklüğünün ve sayısının (tane bağlanabilirliği ile ters orantılı) Zn zenginleştirmesiyle azaldığını ortaya koymuşlardır.

ZE41Ce, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımları için  $E_r$  değerleri  $E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}}$  ile hesaplandı. Elastik modülün yüke bağlı değişimi Şekil 4.56'da verilmektedir.

Elastik modül, bir malzemeye kuvvet uygulandığında, malzemenin elastik olarak deforme olma eğilimi olarak tanımlanabilir. Farklı şekilde ifade etmek gerekirse, temelde malzemedeki atom veya moleküller arasındaki bağ kuvvetleriyle ilişkilidir. Bağlar ne kadar kuvvetli ise, elastik modül değeri de o kadar yüksek olur. Tipik olarak, elastik modül ve süneklik arasındaki ilişki terstir. Süneklikteki azalma çatlaklara sebebiyet verecek böylelikle elastik modül değerinde azalma gözlenecektir.



Şekil 4. 56. ZE41Ce, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının elastik modülünün uygulanan maksimum yüke bağlı değişimi.

Şekil 4.56'dan elde edilen elastik modül değerleri yaklaşık olarak 9000 µN'luk yükten sonra plato bölgesine ulaşmaktadır. Plato bölgesi değerleri bu alaşımların gerçek elastik modül değerleri olarak alınabilir.

Şekil 4. 56'da ZE41 ve ZE41Ce3 alaşımlarının elastik modül değerlerinin küçük yüklerde arttığı sonrasında azalarak platoya ulaştığı gözlenmektedir. ZE41Ce1 ve ZE41Ce2 alaşımlarında ise elastik modül değerlerinin öncelikle azaldığı daha sonra ise platoya ulaştığı görülmektedir. Buradan ZE41 ve ZE41Ce3 alaşımlarında ters ÇBE ve ZE41Ce1 ve ZE41Ce2 alaşımlarında ise ÇBE davranışı gözlenmektedir.

Her dört alaşım için bu değerler Çizelge 4.15'te verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi seryum katkısının artması ile birlikte elastik modül değerleri azalmaktadır. Çizelge 4.15'te statik sertlik değerlerinden elde edilen elastik modül değerleri verilmektedir. Bu değerler dinamik sertlik değerinden elde edilen elastik modül değerleri ile kıyaslandığında ZE41 alaşımı dışındakilerin hemen hemen bir biri

ile yakın olduğu görülmektedir. ZE41 alaşımında yakaşık olarak iki kata ulaşan fark göze çarpmaktadır. Statik sertlik değerlerinde kişisel hatalarında etkili olabileceği düşünüldüğünde bu fark kabul edilebilecek sınırlar içerisinde. Ancak her iki yöntem ile elde edilen değerlerde seryum katkı miktarı arttıkça modül değerleri azalmaktadır. ZE41 alaşımında birim yüzeye yerleşen Ce atomları alaşımda atom/moleküller arası bağları zayıflatmakta böylelikle alaşımların elastik modül değerleri azalmaktadır.

Çizelge 4.15. Farklı yükler altında ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait elastik modül ( $E_r$ ) değerleri

| Numune Kodu | Elastik Modül (GPa) |
|-------------|---------------------|
| ZE41        | 51.192              |
| ZE41Ce1     | 47.736              |
| ZE41Ce2     | 39.541              |
| ZE41Ce3     | 36.286              |

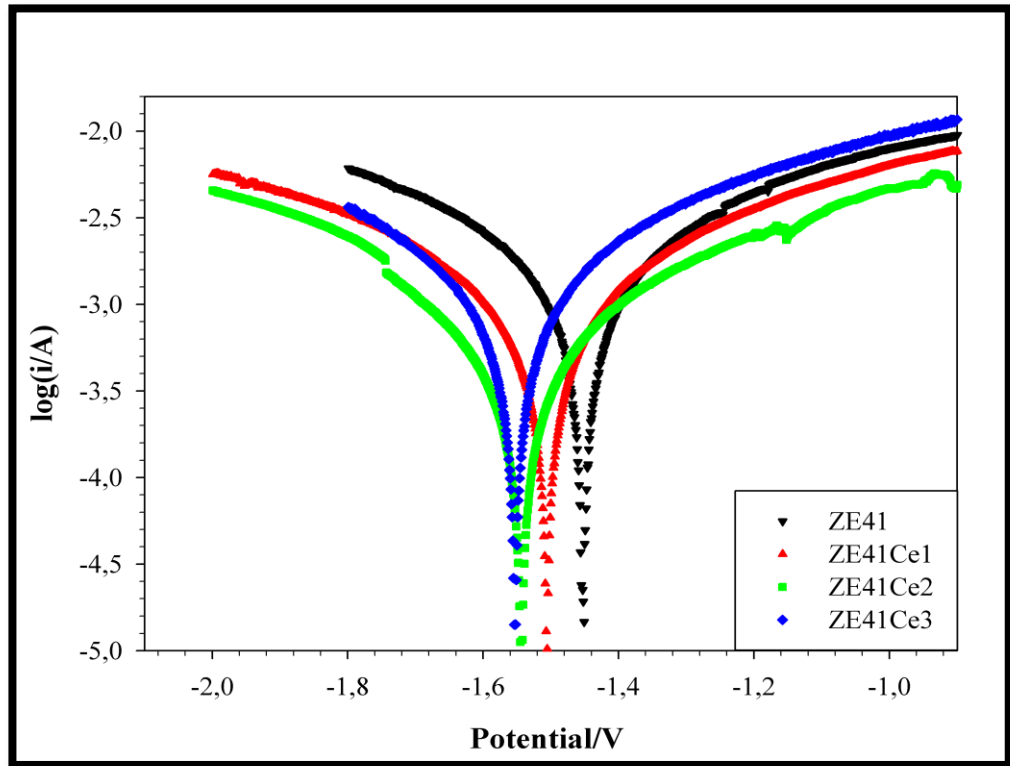
#### 4.3. Korozyon Analizleri

ZE41Ce, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numuneleri için korozyon deneyi ağırlıkça %3,5'lik NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirildi. Çözeltinin %3,5 olması literatür ile uyumludur (Liu, 2009). Açık devre potansiyeli iyonik bir çözeltide anodik ve katodik reaksiyonların bir denge potansiyelidir. Bu iyonik çözelti korozyon özelliği taşıyorsa ölçülen bu açık devre potansiyeli serbest korozyon potansiyeli olarak adlandırılabilir. Numuneler korozyon deneylerine tabii tutulmadan önce stabil bir potansiyel değeri (açık devre potansiyeli) elde etmek için 3000sn boyunca NaCl çözeltisi içerisinde bekletildi. Serbest korozyon potansiyelleri ( $E_{kor}$ ) ölçüldü. Sonrasında potansiyodinamik polarizasyon testi uygulandı.

##### 4.3.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Testleri

Şekil 4.57'de ZE41Ce, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait potansiyodinamik polarizasyon (tafel) eğrileri görülmektedir. Çizelge 4.5'de ise bu eğrilere ait korozyon potansiyeli (denge potansiyeli), lineer polarizasyon dirençleri ve korozyon akımı değerleri görülmektedir. Artan Ce oranlarıyla korozyon potansiyelinin

-1,454 V değerinden -1,507 V değerine kadar indiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda polarizasyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi nadir toprak elementi olan Ce'nin oranının artmasıyla anodik ve katodik reaksiyonun denge potansiyeli olan korozyon potansiyelini daha soy olan tarafa doğru yaklaştırmasıdır. Bir başka ifadeyle daha geç polarize olmasını sağlamasıdır. Bunun paralelinde de korozyon akımı değerinin de artan Ce oranlarıyla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 57. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına ait tafel eğrileri

Çizelge 4.16. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarının Tafel Ekspolarasyon Yöntemiyle elde edilmiş korozyon verileri

| Numune Kodu | Denge Potansiyeli (V) | Lineer Polarizasyon Direnci (MΩ) | Korozyon Akımı (A) |
|-------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|
| ZE41        | -1.554                | 60                               | 7.463 e-4          |
| ZE41Ce1     | -1.545                | 73                               | 6,223 e-4          |
| ZE41Ce2     | -1.539                | 82                               | 5.334 e-4          |
| ZE41Ce3     | -1.511                | 89                               | 4.952 e-4          |

Eğrinin metal çözünmesini temsil eden anodik tarafı incelendiğinde, ZE41Ce3 alaşımı için anodik akım yoğunluğu daha düşükken, ZE41 alaşımı için daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun anlamı aynı potansiyel aralığında ZE41Ce3 alaşımındaki metal çözünmesi daha düşüktür. Bu bilgiler ışığında en iyi korozyon direncini ZE41Ce3 alaşımının gösterdiği söylenebilir. Artan Ce oranlarının korozyon direncini iyileştirdiği görülmektedir.

Pan ve arkadaşları (2015) Magnezyum içerisine Ca ve Zn ilavesinin mikro özelliği iyileştirdiğini ve Ca, Zn elemanların ilavesinin, elektrokimyasal aşınma direncinin arttırılması için uygun olduğunu yaptıkları çalışmada ifade etmişlerdir.

Seetharaman ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmada Mg-Al alaşımına nadir toprak elementlerinden Erbiyum'u katkılayarak mekanik karakterizasyon ve korozyon direncini gözlemlemişlerdir araştırmaları sonucunda korozyon direnci son derece düşük olan Mg-AL alaşımının Erbiyum katkılıandıktan sonra saflığının iyileştiğini ve korozyon direncinde önemli ölçüde artış meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Meng ve arkadaşları (2013) Magnezyum alaşımlarında, nadir toprak (RE) elemanları birinci alaşım elementli olduğunu ve nadir toprak elementlerinin magnezyum içerisindeki safsızlıklar ile tepkimeye girip yabancı maddenin çıkarılması ve korozyon direncinin arttırılmasında büyü etkisi olduğunu, RE elemanlar katıldıkları elementin daha düşük bir elektrot potansiyeline sahip olmasını sağlarlar. Bununda galvanik korozyonun da azaltılmasında önemli bir rol oynayacağını ifade etmişlerdir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ZE41 alışımlı Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretildi. Üretilen alaşımların kristal yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve korozyon'a karşı dirençleri analiz edildi. Yapılan deneyler ve elde edilen verilerin analizi sonucu aşağıdaki ifade edilen öngörüler literatüre sunuldu.

1. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına Vickers uç ile yapılan mikrosertlik deneylerinin sonucunda ZE41 numunesinde Ters ÇBE gözlenirken, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinde ise ÇBE görülmektedir. Bu davranış Meyer, PSR, MPSR, Hays-Kendall modelleri ile analiz edildi. ÇBE davranışını analiz etmede ve yükten bağımsız sertlik değerlerini elde etmede Hays-Kendall modeli diğer modellerden daha başarılı olmuştur. Bu nedenle üretimi yapılan ZE41 alaşımlarının Vickers uç ile sertlik değerini analiz etmekteki en iyi model Hays-Kendall modelidir.
2. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına Knoop uç kullanılarak elde edilen davranış Vickers uç ile elde edilen ÇBE davranışına benzer bir davranış sergilemektedir. Fakat ZE41, ZE41Ce2, ZE41Ce3 numunelerinde ÇBE davranışı gözlenirken ZE41Ce1 numunesinde Ters ÇBE gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı şekilde Meyer, PSR, MPSR, Hays-Kendall modelleri ile analiz edilmiştir. Knoop uç için yükten bağımsız statik sertlik değeri hesabı için en uygun model Hays-Kendall Modeli'dir.
3. ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 alaşımlarına Berkovich uç ile yapılan dinamik nanosertlik deneylerinde, ZE41, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinde ÇBE ve ZE41Ce1 numunesinde ters ÇBE davranışı gözlenmiştir. Bu davranış Meyer, PSR, MPSR ve Hays-Kendall modelleri ile analiz edilmiştir. Ancak bu modeller ile plato değerine yakın değerler elde edilemediği için ters çentik boyutu etkisini açıklamada yetersiz kalmışlardır.
4. Nanosertlik değerleri ile mikrosertlik değerleri farklılık göstermektedir. Bunun nedeni maksimum yükte hesaplanan sertlik değeri, çentik boyutunun direkt ölçülmesi (geleneksel metot) ile hesaplanan sertlik değerinden farklı olabilir.
5. Üretilen numunelerden ZE41 numunesinin kristalit boyutu 57,06 nm, ZE41Ce1 numunesinin kristalit boyutu 66,46 nm, ZE41Ce2 numunesinin kristalit boyutu 72,51 nm ve ZE41Ce3 numunesinin kristalit boyutu 75,16 nm şeklindedir. Ce

katkı miktarı arttıkça kristalit boyutu artmaktadır. Kristalit boyutunun artması ile kristalit sınırları yoğunluğu azalacaktır. Dolayısıyla dislokasyon hareketleri artacağından numune içerisine ucun girmesi kolaylaşarak numunenin sertliği azalmıştır. Bu durum hem statik hem de dinamik sertlik analizlerinde elde edilmiştir.

6. Dislokasyon yoğunluğu Ce katkı miktarıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Sertlik ile karşılaştırıldığında ise bir paralellik söz konusudur. Bir başka deyişle, sert olan bir malzemenin dislokasyon yoğunluğu fazla, daha düşük sertlikte olan bir malzemenin ise dislokasyon yoğunluğu daha düşük olur.
7. Seryum katkısının artması ile alaşımın elastik modül değerleri azalmaktadır. Dinamik nanosertlik deneylerinden ZE41, ZE41Ce1, ZE41Ce2 ve ZE41Ce3 numunelerinin elastik modül değerleri sırası ile 51,192 GPa, 47,736 GPa, 39,541 GPa, 36,286 GPa olarak elde edilmiştir.
8. Alaşımların korozyon deneyleri % 3,5'lik NaCl çözeltisinde yapılmıştır. Seryum katkısının artması ile korozyon denge potansiyeli ve korozyon akımı azalmaktadır. Sonuç olarak Ce katkısının artması ile alaşımların korozyon direnci artmıştır.

Bu tez çalışmasında, Mekanik Alaşımlama yöntemi ile ZE41 alaşımına katkılanan Seryumun hem statik sertlik değerlerini hem de dinamik sertlik değerlerini azalttığı görüldü.

Alaşımlar Mekanik Alaşımlama sırasında soğuk kaynaşma gerçekleşerek oluşmuştur. Bu işlemin devamında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mekanik alaşımlama parametreleri oldukça geniştir bu parametreler değiştirilerek farklı çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Adeva, P., Caruana, G., Ruano, O. A., Torralba, M., 1995. Microstructure and high temperature mechanical properties of tin. **Materials Science and Engineering**, A194, 17–23.
- Aizawa T, Song R., 2006 Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ , **Intermetallics**, 14: 382-391.
- Altun, H. Ve S. Sen., 2004, **Materials and Design** 25: 637.
- Ambat, R. N.N. Aung, W. Zhou., 2000 **Journal of Applied Electrochemistry** 30 865.
- Armstrong, R. W., Jr. Ferranti Louis., ve Thadhani Naresh N., 2006. Elastic/plastic/cracking indentation behavior of hard materials. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, 24 (1-2), 11–16.d
- Arora, S.K., Trivikrama Rao, G.S., Batra, N.M., 1984. Vickers micromechanical indentation of  $\text{BaMoO}_4$  crystals, **Journal of Materials Science**, Volume 19, Issue 1, Pages 297-302.
- Arroyave, R. A. van de Walle, Z.K. Liu., 2006, **Acta Materialia** 54 473– 482.
- Arroyave, R. Z.K. Liu., 2006 Calphad-Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry 30 1–13.
- ASM Specialty Handbook., 1999 “**Magnesium and Magnesium Alloys**”, ASM International Handbook Committee, USA, 180-410 .
- Avedesian M. and H. Baker., 1999. Magnesium and Magnesium Alloys, ASM Specialty Handbook, ASM International, **Materials Park**, OH.
- Avedesian MM, Baker H, 1999. Eds. Magnesium and magnesium alloys. **Materials Park**, OH: ASM International.
- Baker, S. P., ve Burnham, N. 2000. Measuring Mechanical Properties in the Nanometer Range. **In Materials Research Society- Tutorial**, Boston.
- Banerjee, R. K. ve Feltham, P., 1974. Deformation and fracture of germanium single crystals, **J. Mater. Sci.**, 9 (9), 1478-1482.
- Basu, B., Manisha, Mukhopadhyay, N.K., 2009. Understanding the mechanical properties of hot pressed Ba-doped S-Phase  $\text{SiAlON}$  ceramics **J. Eur. Ceram. Soc.**, 29, pp. 801–811.
- Ben-Hamu, G. D. Eliezer, K.S. Shim, S. Cohen., 2007. **Journal of Alloys and Compounds** 431 269.
- Berzina, I.G., ve Savintsev P.A., 1965. Mutual solution of components during contact melting. **Russian Physics Journal**, 8 (1), 55-57.
- Boyarskaya, Y.S., Grabko, D.Z., Purich, E.I., 1979. Anomalies in the Knoop microhardness anisotropy of crystals (Letter), **Journal of Materials Science**, Volume 14, Issue 3, Pages 737-741.
- Bull, S J; Page, T F; Yoffe, E H., 1989. An Explanation of the Indentation Size Effect in Ceramics. **Philos. Mag. Lett.**, 59 (6), 281-288.
- Chang, J.W. X.W. Guo, P.H. Fu, L.M. Peng, W. J. Ding., 2007. “Transactions of Nonferrous” **Metals Society of China** 17 1152–1157.
- Chang, J.W. X. Guo, P. Fu, L. Peng, W. Ding., 2007. “Transactions Nonferrous” **Metallurgical Society China** 17 1152.

- Chang, J.W. X.W. Guo, P.H. Fu, L.M. Peng, W.J. Ding., 2007. **Electrochemical Acta** 52. 31-60.
- Chang, J.W. X.W. Guo, S.M. He, P.H. Fu, L.M. Peng, W.J. Ding., 2008. **Corrosion Science** 50. 166–177.
- Demirkol, İ., 2010. Zirkonyum Seramiklerinin Üretilmesi ve Mekanik Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi. Mustafa Kemal Üniversitesi, **Fen Bilimleri Enstitüsü**, Fizik Anabilim Dalı. Hatay.
- Doğruer, M., Terzioğlu, C., Yıldırım, G., Görür, O., 2014. “Significant Change in Mechanical Properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> Bulk Superconductors Diffused with Sn Nanoparticles”, **J Supercond Nov Magn**, 27, 755-761.
- Erçayan, Y., 2010. “Alaşım elementlerinin magnezyumun mikroyapı ve mekanik Özelliklerine etkilerinin incelenmesi” Celal Bayar Üniversitesi, **Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa
- Feltham, P., ve Banerjee, R. K., 1992. Theory and application microindentation in studies of glide and cracking single crystals of elemental and compound semiconductors. **Mater. Sci.**, 27 (6), 1626-1632.
- Friedrich HE, Mordike BL, 2006. Eds. Magnesium technology. **Springer- Verlag Berlin Heidelberg**
- Friedrich, H.E., Mordike, B.L., 2006. “Magnesium Technology Metallurgy, Design Data, Applications”, **Springer, Germany**, 120-240.
- Gao, H., ve Huang, Y., 2003. Geometrically necessary dislocation and size-dependent plasticity. **Scripta Materialia**, 48, 113–118.
- Gao, X. S.M. Zhu, B.C. Muddle, J.F. Nie., 2005 **Scripta Materialia** 53 1321–1326.
- Gong, J., Miao, H., Zhao, Z., Guan, Z.,. 2001. Load-dependence of the measured hardness of Ti(C,N)-based cermets. **Materials Sci. Eng A.**, 303,179-186.
- Gong, J., Zhao, Z., Guan, Z., Miao, H. 2000. Load-Dependence of Knoop Hardness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -TiC Composites. **Journal of The European Ceramic Society**, 20, 1895-1900.
- Gray, J.E. B. Luan., 2002 **Journal of Alloys and Compounds** 336 88–113.
- Guille,J., Sieskind, M., 1991 Microindentation studies on BaFCl single crystals, **Journal of Materials Science**, Volume 26, Issue 4, pp 899-903.
- Guo, X.W. J.W. Chang, S.M. He, W.J. Ding, X. Wang., 2007. **Electrochemical Acta** 52 2570.
- Güder, H.S., Şahin, E., Şahin, O., Göçmez, H., Duran, C., Çetinkara, H.A., 2011. Vickers And Knopp İndentation Microhardness Study of β-Sialon Ceramic, **Acta Physica Polonica A**, 120, 1026-1032.
- Hays, C., ve Kendall, E. G., 1973. An Analysis of Knoop Microhardness. **Metallography**, 6 (4) 275–282
- Horstemeyer, M. F., Bakes, M. I., ve Plimpton, S. J., 2001. Length scale and time scale effects on the plastic flow of fcc metals. **Acta Materialia**, 49, 4363–4374.
- Inoue, H. K. Sugahara, A. Yamamoto, H. Tsubakino., 2002. **Corrosion Science** 44 603.
- Jain, A., Razdan, A.K., Kotru, P.N., Wanklyn, B.M., 1994. Load and directional effects on microhardness and estimation of toughness and brittleness for flux-grown

- LaBO<sub>3</sub> crystals, **Journal of Materials Science**, Volume 29, Issue 14, Pages 3847-3856.
- Jia Shu-guo, Liu Ping, Dong Q-M, Xia C-Q, Tian B-H, Ren F-Z., 2010. Effect of rare earth neodymium on microstructure and properties of AZ31B magnesium alloy Cailiao Rechuli Xuebao. **Transactions of Metarials and Heat Treatment**, Volume 31, Issue 7, July, Pages 99-103
- Kainer KU, Kaiser F., 2003. Eds. **Magnesium alloys and technology**. Weinheim: Wiley-VCH GmbH
- Kainer KU., 2000. Ed. International Congress “Magnesium Alloys and their Applications”; Sep 26-28; Munich, Germany. **Magnesium alloys and their applications**. Weinheim; Chichester: Wiley-VCH.
- Kainer, K.U., Von Buch, F. ,2003. “The current state of technology and potential for development of magnesium applications”, Proceeding of the 6th **International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications**, Germany, 1-14
- Kaplan H.I., 2002. Ed. “Proceedings of TMS Annual Meeting” **Magnesium technology**; Seattle, Washington, USA, Feb 17-21.
- Kaplan H.I., 2003 Ed. “Proceedings of TMS Annual Meeting” **Magnesium technology**; SanDiego, California, USA, Mar 2-6.
- Karaca, I., Uzun, O., Kölemen, U., Yılmaz, F., Şahin, O., 2009. Effects of ZnO addition on mechanical properties of Bi<sub>1.84</sub>Pb<sub>0.34</sub>Sr<sub>1.91</sub>Ca<sub>2.03</sub>Cu<sub>3.06</sub>O<sub>10</sub> prepared by a wet technique, **Journal of Alloys and Compounds**, Volume 476, Issues 1–2, Pages 486–491.
- Karan, S., Gupta, S.P. Sen., 2005. Vickers microhardness studies on solution-grown single crystals of magnesium sulphate hepta-hydrate. **Materials Science and Engineering A**, 398 (1-2), 198-203.
- Kaya, A. G. Ben-Hamu, D. Eliezer, K.S. Shin, S. Kohen., 2006. **Metal Science and Heat Treatment**. 48 518–523.
- Khalfaoui W, Valerio E, Masse JE, Autric M., 2010 Excimer laser treatment of ZE41 magnesium alloy for corrosion resistance and microhardness improvement. **Optics and Lasers in Engineering**. 48(9):926-31
- Kölemen, U., 2006. Analysis of ISE in microhardness measurements of bulk MgB<sub>2</sub> superconductors using different models, **Journal of Alloys and Compounds**, 425, (1-2), 429-435.
- Küyükoğlu, M., 2010. “Ogزالat, Tungustat, Molibdat Ve Fosfatın Saf Çinkonun Sulu Ortamdaki Korozyonuna Etkisi” Ankara Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi Ankara
- Li, H., Bradt, R. C. 1996. The effect of indentation-induced cracking on the apparent microhardness. **Journal of Materials Science**, 31 (4), 1065-1070.
- Li, H., Bradt, R. C., 1991. Knoop microhardness anisotropy of single-crystal LaB<sub>6</sub> . **Materials Science and Engineering**, A142, 51–61.
- Li, H., Bradt, R.C., 1993. The Microhardness Indentation Load/Size Effect In Rutile And Cassiterite Single Crystals, **Journal of Materials Science**, 28, 917-926.
- Li, Q. Q.D. Wang, Y.X. Wang, X.Q. Zeng, W.J. Ding., 2007. **Journal of Alloys and Compounds** 427 115–123.

- Li. H., Han, Y. H., ve Bradt, R. C., 1994. Knoop microhardness of single crystal sulphur. **Journal of Materials Science**, 29, 5641-5645.
- Liu, W., Cao, F., Zhong, L., Zheng, L., Jia, B., Zhang, Z., & Zhang, J., 2009. Influence of rare earth element Ce and La addition on corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy. **Materials and Corrosion**, 60(10), 795-803. doi: 10.1002/maco.200805179
- Liu, Y., Ngan, A. H. W., 2001. Depth dependence of hardness in copper single crystals measured by nanoindentation. **Scripta Materialia**, 44, 237–241.
- Liu, W. F. Cao, L. Zhong, L. Zheng, B. Jia, Z. Zhang, J. Zhang., 2009. Influence of rare earth element Ce and La addition on corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy. **Materials and corrosion**, 60, No.
- Luo AA., 2004. Ed. Magnesium technology: Proceedings of TMS Annual Meeting; Charlotte, **North Carolina**, USA, Mar 14-18.
- Ma, Q., ve Clarke, D. R., 1995. Size dependent hardness of silver single crystals. **Journal of Materials Research**, 10 (4), 853-863.
- Meng, J. W. Sun, Z. Tian, X. Qiu, D. Zhang., 2013. “Corrosion performance of magnesium (Mg) alloys containing rare-earth (RE) elements”. **A volume in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering** Pages 38–60,
- Meza-García, E., Bohlen, J., Yi, S., Letzig, D., Kräusel, V., Landgrebe, D., & Kainer, K. U. (2015). “Influence of Alloying Elements and Extrusion Process Parameter on the Recrystallization Process of Mg-Zn alloys”. **Materials Today: Proceedings**, 2, S19-S25. doi: 10.1016/j.matpr
- Michels, B.D., Frischat, G.H., 1982. Microhardness of chalcogenide glasses of the system Se-Ge-As, **Journal of Materials Science**, Volume 17, Issue 2, Pages 329-334.
- Mirzadeh H., 2015. Quantification of the strengthening effect of rare earth elements during hot deformation of Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy. **Journal of Materials Research and Technology**.
- Mordike BL, Kainer KU., 1998. Eds. “Magnesium alloys and their applications. Frankfurt”, **Werkstoff-Informationsgesellschaft**.
- Myer Kutz., 2005., “Mechanical Engineers’ Handbook”
- Nam, N. D., Mathesh, M., Le, T. V., & Nguyen, H. T. (2014). “Corrosion behavior of Mg-5Al-xZn alloys in 3.5wt.% NaCl solution”. **Journal of Alloys and Compounds**, 616, 662-668. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.014
- Neil, W.C. M. Forsyth, P.C. Howlett, C.R. Hutchinson, B.R.W. Hinton., 2009. Corrosion of magnesium alloy ZE41., **Corrosion Science** 51 387–394.
- Neubert, V. I. Stulikova, B. Smola, B.L. Mordike, M. Vlach, J. Pelcova., 2007. **Materials Science and Engineering A** 462 (2007) 329.
- Nie, Z.R. J.B. Fu, J.X. Zou, T.N. Jin, J.J. Yang, G.F. Xu, H.Q. Ruan, T.Y. Zuo., 2004. “Advanced Aluminum Alloys Containing Rare-earth Erbium” **Materials forum** volume 28 - published
- Oliver, W.C., Pharr, G.M., 2004. “Measurement Of Hardness And Elastic Modulus By Instrumented Indentation” **Advances In Understanding and refinements to methodology**.

- Pal, T., Kar, T., 2003. Vickers microhardness studies of L-arginine halide mixed crystals. **Materials Science and Engineering A**, 354 (1-2), 331-336.
- Pan, Y., He, S., Wang, D., Huang, D., Zheng, T., Wang, S., Chen, C., 2015. "In vitro degradation and electrochemical corrosion evaluations of microarc oxidized pure Mg, Mg-Ca and Mg-Ca-Zn alloys for biomedical applications". **Mater Sci Eng C Mater Biol Appl**, 47, 85-96.
- Patel VK, Bhole SD, Chen DL, 2013. "Formation of zinc interlayer texture during dissimilar ultrasonic spot welding of magnesium and high strength low alloy steel" **Materials & Design**.45:236-40.
- Peng, Z., Gong, J., Miao, H., 2004. "On The Description of Indentation Size Effect in Hardness Testing for Ceramics", Analysis of The Nanoindentation Data, **Journal of The European Ceramics Society**, 24(8); 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.
- Rethinam J.F., Ramasamy, S., Arivouli, D., and Ramasamy, P., 1994. Microhardness studies on doped and undoped strontium tartrate tetrahydrate crystals, **J. Mater. Sci. Lett**, 13, 263-265.
- Rodrigo P., M. Campo, B. Torres, M.D. Escalera, E. Otero, J. Rams., 2010. "Effect of ECAP on microstructure and mechanical properties of ZE41 magnesium alloy", **Materials Science and Engineering A** 527 3777–3784
- Sangwal, K., 1971. Ph.D. Thesis, Sardar Patel University, **Vallabh Vidyanagar**, India.
- Sangwal, K., 1989. Microhardness of as-grown and annealed lead sulphide crystals. **J. Mater. Sci**, 24 (3), 1128-1132.
- Sangwal, K., 2000. "On The Reverse Indentation Size Effect and Microhardness Measurement of Solids", **Materials Chemistry And Physics**, 63, 145-152.
- Sangwal, K., Patel, A.R., 1974. "Change in dislocation distribution and hardness of galena on air-annealing" **Journal of Physics D: Applied Physics**, Volume 7, Issue 15, Article number 307, Pages 2031-2035.
- Sangwal, K., Surowska, B., 2003. "Study of Indentation Size Effect and Microhardness of SrLaAlO<sub>4</sub> and SrLaGaO<sub>4</sub>" **Single Crystals. Mat. Res. Innovat**, 7(9), 91–104.
- Sangwal, K., Surowska, B., P. B.aziak., 2003. "Relationship between indentation size effect and material properties in the microhardness measurement of some cobalt-based alloys", **Materials Chemistry and Physics**, 80, 428–437.
- Sebastian, S., Khadar, M.A., 2005. "Microhardness indentation size effect studies in  $_{60}\text{B}_2\text{O}_3\text{-(40-x)PbO-xMCl}_2$  and  $_{50}\text{B}_2\text{O}_3\text{-(50-x) PbO-xMCl}_2$  (M = Pb, Cd) glasses", **Journal of Materials Science**, Volume 40, Issue 7, Pages 1655-1659.
- Seetharaman, S., Blawert, C., Ng, B. M., Wong, W. L. E., Goh, C. S., Hort, N., & Gupta, M., 2015. Effect of erbium modification on the microstructure, mechanical and corrosion characteristics of binary Mg–Al alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, 648, 759-770.
- Silva, I.C., Sanchez, E.H., Castro, G.R., Cimenoglu, H., Sanchez, J.L.N., 2013. "A study of indentation for mechanical characterization of the Fe<sub>2</sub>B layer", **Surface & Coating Technology**, 232, 173-181.
- Smith, W. F., 1993. "Corrosion", **Foundations Of Materials Science And Engineering**, McGraw-Hill, New York, A.B.D., 653-708.

- Song, G., Atrens A., 1999. "Corrosion mechanisms of magnesium alloys", **Advanced Engineering Materials**, 1: 11-33.
- Song, G. A., 1999. Atrens, **Advanced Engineering Materials**, 1, 11.
- Song, G. A., 2007. Atrens, **Advanced Engineering Materials**, 9, 177–183.
- Song, G. D., 2002. St John, **Journal of Light Metals** 2, 1–16.
- Song, G., Atrens A., 2003. "Understanding magnesium corrosion", **Advanced Engineering Materials**, 5 (1): 837-858
- Song, G.L. A. Atrens, D.H. StJohn, J. Nairn, Y. Lang., 1997. **Corrosion Science**, 39 855–875.
- Song, G.L. A. Atrens, X. Wu, B. Zhang., 1998. **Corrosion Science**, 40, 1769–1791. 102.
- Song, G.L. Atrens, A. StJohn, D. Wu, X. Nairn, J., 1997. **Corrosion Science**, 39 1981-2004.
- Song, G.L., Atrens, A., 2003. **Advanced Engineering Materials**, 5 837.
- Sundaresan, R., Froes, F.H., 1987. "Mechanical alloying", **Journal of Metals**, 8: 22 27.
- Suryanarayana, C., 2001. "Mechanical alloying and milling", **Progress in Materials Science**, 46: 1-184.
- Suryanarayana, C., 2004. "Mechanical alloying and milling", **Marcel Dekker**, New York, 1-466.
- Suryanarayana, Chen, G-H., Froes, F.H., 1992. "Milling Maps for Phase Identification During Mechanical Alloying", **Scripta Metal Mater.** 26, 1727-1732.
- Şahin, O., Uzun, O., Kölemen, U., Düzgün, B., ve Uçar, N. 2005. "Indentation Size Effect and Microhardness Study of  $\beta$ -Sn Single Crystals", **Chin. Phys. Lett**, 22 (12), 3137-3140.
- Şahin, O., Uzun, O., Kölemen, U., Ve Uçar, N. 2006. "Vickers Microhardness Studies of  $\beta$ -Sn Single Crystals", **Materials Characterization**, 28;194-204.
- Tabor, D., 1961. "Elastic Recovery of conical indentations", **Phys. Proc. Soc.**, 78 (2), 169-179.
- Takenaka, T. Ono, T, Narazaki, Y, Naka, Y, Kawakami, M., 2007. **Electrochemical Acta** 53 117.
- Terzioğlu, C., Yıldırım, G., Doğruer, M., Karaboğa, F., 2014. Formation of Nucleation Centers for Vortices in Bi-2223 Superconducting Core by Dispersed Sn Nanoparticles, **Journal of Alloys and Compounds**, 584, 344-351.
- Upit, G. P., ve Varchenya, S. A., 1973. The size effect in the hardness of single crystals, in J. H. Westbrook ve H. Conrad (eds), The Science of Hardness Testing and Its Research Applications, American Society for Metals, **Metals Park**, OH. 135-144.
- Uzunoğlu, S., 2015. "Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Cocrmo Alaşımlarının Mikro Yapı Ve Korozyon Direncine Pd Katkısının Araştırılması" Mustafa Kemal Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi
- Ünal, M., 2008. Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi. **Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi.
- Vecchiarelli M.A., 1992. "Sand Cast Magnesium Prototypes For Automotive Die Casters", **SAE Technical Report Paper Series**, 920072.

- Wei, A.L. Fu, Z, Zhao, H.F., 2003. **Research Studies On Foundry Equipment**, 1-34
- Yamasaki M., Hayashi, N, Izumi, S, Kawamura, Y., 2007. **Corrosion Science**, 49, 255.
- Yılmaz, T. A., 2013. “Aa 2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretimi Ve Yaşlandırılabilme Özelliklerinin Araştırılması” Gazi Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü**.
- Yılmazlar, M., Terzioğlu, C., Doğruer, M., Karaboğa, F., Soylu, N., Zalaoglu, Y., Yıldırım, G., Öztürk, O., 2014. “Evaluation of Microstructural and Mechanical Properties of Ag-Diffused Bulk MbB<sub>2</sub> Superconductors”, **J Supercond Nov Magn**, 24, 77-82.
- Yu Ku, RUI Shou-tai, SONG Jue-min, LI Wen-xian, GUO Long.,2008. “Effects of grain refinement on mechanical properties and microstructures of AZ31 alloy Trans”, **Nonferrous Met. Soc. China**, 18 s39-s43
- Zakiyuddin, A., Lee, K. 2015. “Effect of a small addition of zinc and manganese to Mg–Ca based alloys on degradation behavior in physiological media”. **Journal of Alloys and Compounds**, 629, 274-283. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.181
- Zhang Z., 2000. “Development of Magnesium-Based Alloys for Elevated Temperature Applications”, Doktora Tezi, **Faculte Des Sciences Et De Genie Universite**, Quebec- Canada, 2-75.
- Zhang, E. He, W, Du, H, Yang, K., 2008. **Materials Science and Engineering A**, 488
- Zhao Kai-yan, PENG Xiao-dong, XIE Wei-dong, WEI Qun-yi, YANG Yan, WEI Guo-bing., 2010. “Effects of Ce on microstructure of semi-continuously cast Mg-1.5Zn-0.2 Zr magnesium alloy ingots Trans”, **Nonferrous Met. Soc. China**, 20 s324-s330
- Zhao, M. C., Liu, M., Song, G. L., Andrej Atrens., 2008. Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41. **Corrosion Science** (Impact Factor: 3.69). 11/2008; 50(11):3168-3178
- Zhao, M. Liu, C. M, Song, G, Atrens, A., 2008. **Corrosion Science**, 50 1939.
- Zhao, M. Liu, C. M, Song, G, Atrens, A., 2008. **Advanced Engineering Materials**, 10 104.
- Zhou T, Xia H, Yang M, Zhou Z, Chen K, Hu J., 2011. et al. “Investigation on microstructure characterizations and phase compositions of rapidly solidification/powder metallurgy Mg–6wt.% Zn–5wt.% Ce–1.5wt.% Ca alloy”, **Journal of Alloys and Compounds**, 509(9):L145-L9.
- Zhou, Y. L., Li, Y., Luo, D. M., Ding, Y., & Hodgson, P. (2015). “Microstructures, mechanical and corrosion properties and biocompatibility of as extruded Mg-Mn-Zn-Nd alloys for biomedical applications”. **Mater Sci Eng C Mater Biol Appl**, 49, 93-100. doi: 10.1016/j.msec.2014.12.057

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yazar, 1989 yılında Adana’da doğdu. İlköğretimini Ganime Erzenci İlköğretim Okulu’nda tamamladı. Ortaöğretimini Cumhuriyet Lisesi’nde tamamladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü’nden 2012 yılında mezun oldu. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimine devam etmektedir.