

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOGİRİNİM YÖNTEMİ İLE MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Dursun EKMEKÇİ

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOGİRİNİM YÖNTEMİ İLE MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Mak. Yük. Müh. Dursun EKMEKÇİ

ORCID : - - -

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ömer Necati CORA
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yönlendirmesindeki katkılarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. Ömer Necati CORA'ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarına katkılarından dolayı tez izleme komitesinde yer alan ve tez süresi boyunca tavsiye ve yönlendirmelerini esirgemeyen değerli Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ ve Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK hocalarıma, deneysel ve sayısal çalışmalarda yardımları için Arş. Gör. Doğan ACAR'a, Öğr. Gör. Altuğ UŞUN'a, Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri ve İmal Usulleri Laboratuvarı'nda araştırma görevlilerine teşekkür ederim. Doktora tezimin 218M913 sayılı 1002 Hızlı Destek projesi kapsamında maddi olarak TÜBİTAK tarafından desteklendiği için teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca desteklerini benden esirgemeyen başta eşim, annem ve babam olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Dursun EKMEKCİ

Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “NANOĞİRİNİM YÖNTEMİ İLE MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ömer Necati CORA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/03/2023

Dursun EKMEKCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Tez Çalışması Kapsamında Kullanılan Yöntemler	8
1.3.1. Nanogirininim.....	8
1.3.2. Nanogirininim ile Artık Gerilmenin Belirlenmesi.....	11
1.3.3. XRD-Artık Gerilme	13
1.3.4. Nanogirininimin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi	14
1.3.5. Üç Nokta Eğilme Testinin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi	16
1.3.6. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi	17
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
2.1. Bakır Tozlarında Mikroginininim	20
2.2. Zırh Çeliklerinde Nanogirininim	21

2.3.	Otomotiv Çeliklerinde Nanogirininim.....	24
2.4.	Doktora Tezi Kapsamında Gerçekleştirilen Analizler.....	26
2.4.1.	Zırh ve Otomotiv Çeliği Numunelerinin Hazırlanışı.....	27
2.4.2.	Zırh Çeliklerine Uygulanan Darbe Testleri	27
2.4.3.	Mikrosertlik Testleri	28
2.4.4.	Üç Nokta Eğilme Testi	29
2.4.5.	Nanogirininim.....	29
2.4.6.	Tarama Elektron Mikroskobu.....	31
2.4.7.	XRD ile Artık Gerilme Testi	32
3.	BULGULAR VE İRDELEME	34
3.1.	Bakır Tozları Üzerine Yapılan Mikrogirininin Analizi.....	34
3.2.	Zırh Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler	38
3.2.1.	ANOVA ve t-test Analizleri	39
3.2.2.	Zırh Çeliklerinin AKM Analizleri	41
3.2.3.	Zırh Çeliklerinin Yer Değiştirme Kontrollü Nanogirininin Analizleri	44
3.2.4.	Zırh Çeliklerinin Darbe Testi ve Mikro-Vickers Sertlik Analizleri	46
3.2.5.	Micro-Vickers ve Nanogirininin Sertliklerinin Karşılaştırması	50
3.2.6.	Zırh Çeliklerinin XRD ve Nanogirininin Esaslı Artık Gerilme Analizleri	51
3.2.7.	Zırh Çeliklerinin Kuvvet Kontrollü Nanogirininin Analizleri	56
3.3.	Otomotiv Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler.....	58
3.3.1.	DP 800 Çeliği Üzerinde Gerçekleştirilen Mikrogirininimler	58
3.3.1.1.	Tekrarlı (Cyclic) Girininim	62
3.3.1.2.	Konvansiyonel (Conventional) Girininim	63
3.3.1.3.	Kademeli (Multi-step) Girininim.....	65

3.3.1.4. Girinim Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	66
3.3.1.5. DP 800 Çeliği Numunesinde Yığılma Etkisi.....	68
3.3.2. DP 1000 ve DP 1200 Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Nanogirininimler	70
3.3.2.1. Çift Fazlı Çeliklerinin AKM Analizi.....	72
3.3.2.2. DP 1000 ve DP 1200 Çelikleri Üzerinde Nanogirinin Analizi	76
3.3.2.3. Çift Fazlı Çeliklerinin Eğilme Testi ve Mikro-Vickers Sertlik Sonuçları.....	79
3.3.2.4. Çift Fazlı Çeliklerinin XRD ve Nanogirinin Artık Gerilme Analizleri.....	80
3.3.2.5. DP 1000 ve DP 1200 Çeliklerinin Nanogirinin Karşılaştırılması	84
3.4. Çeliklerde Sonlu Eleman Analizleri	87
3.4.1. Eğilme Testinde Artık Gerilmenin Sayısal Analizi.....	87
3.4.2. DP 800 Çeliğinde Girininin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi	89
3.4.3. Tersine Sonlu Elemanlar ile Gerilme-Şekil Değişim Eğrisinin Eldesi	91
3.5. Çeliklerin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması	99
3.5.1. Zırh Çeliklerinin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması	99
3.5.2. Çift Fazlı Otomotiv Çeliklerinin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması	102
4. SONUÇLAR.....	107
5. ÖNERİLER	107
6. KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

NANOĞİRİNİM YÖNTEMİ İLE MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Dursun EKMEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2023, 137 Sayfa

Bu çalışmada, otomotivde kullanılan yüksek mukavemetli çift fazlı çelikler ile zırh çeliklerinin mikro/nano mekanik özellikleri nanogirininim yöntemi ile araştırılmış ve konvansiyonel yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, küresel bakır tozlarının kalıp içerisinde sıkıştırılması ve sonrasında sinterlenmesiyle mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir.

Balistik testlere tâbi tutulmuş zırh çelikleri ile üç noktalı eğilme testi uygulanmış otomotiv çeliklerine nanogirininim, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Nanogirininim ölçümleri, üçgen piramit (Berkovich) uç ile gerçekleştirilmiştir. Nanogirininim ölçümlerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerlerinin yanı sıra, kuvvet-yer değiştirme eğrileri ampirik bağıntılar ile artık gerilmeleri hesaplamak için kullanılmıştır. Nanogirininim ölçümlerinden elde edilen değerlerin, XRD - $\sin^2\psi$ yönteminden elde edilen artık gerilme ölçümleri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Söz konusu malzemeler üzerinde ayrıca içyapı analizleri optik, taramalı elektron, atomik kuvvet mikroskop (AKM) gerçekleştirilmiştir. Doktora tezinde üç nokta eğilme testi ve balistik testler sonrası deforme olmamış - deforme olmuş bölgelerin mekanik özelliklerinin dağılımını değerlendirmek için nanogirininim, XRD, artık gerilmenin faydalı yöntemler olduğunu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanogirininim, Artık Gerilme, Çift Fazlı Çelikleri, Zırh Çelikleri

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS WITH NANOINDENTATION METHOD

Dursun EKMEKÇİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2023, 137 Pages

In this study, micro/nano mechanical properties of high-strength dual-phase steels used in automotive and armor steels were investigated by nanoindentation method and compared with the results obtained from conventional methods. In addition, the changes in mechanical properties of spherical copper powders by sintering after compression were investigated.

Nanoindentation and X-ray diffraction (XRD) analyzes were performed on armor steels subjected to ballistic tests and automotive steels subjected to three-point bending test. Nanoindentation measurements were performed with a sharp triangular pyramid (Berkovich) tip. Force-displacement curves were used to calculate residual stresses with empirical relations, as well as the hardness and modulus of elasticity values obtained from nanoindentation measurements. These values were found to be in good agreement with the residual stress measurements obtained from the XRD - $\sin^2\psi$ method. Microstructural analysis optical, scanning electron, atomic force microscope (AFM) were also performed on these materials. In doctoral thesis, it was also demonstrated that nanoindentation, XRD, residual stress are useful methods to evaluate the distribution of mechanical properties of undeformed - deformed regions after three-point bending test and ballistic tests.

Key Words: Nanoindentation, Residual Stress, DP Steels, Armor Steels

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Mikro imalat ürünleri [2].....	1
Şekil 2. Girinim kuvvetinin bir fonksiyonu olarak girinim plastik bölgesi ile mikro yapı arasındaki etkileşimlerin şematik gösterimi [42].	7
Şekil 3. (a) Konik batıcı uç için yükleme - boşaltmada numune yüzey geometrisi ve batıcı ucun şeması, (b) Geri yüklemeyi takiben elastik-plastik yükleme için yer değiştirmeye karşılık yükleme eğrisi [55].....	9
Şekil 4. Enine kesit görünümünden çökme ve yığılmanın şematik gösterimi.....	11
Şekil 5. Nanogirinim ile artık gerilmelerin elde edilmesi [61].....	12
Şekil 6. $\sin^2\psi$ yöntemi ile XRD-artık gerilmelerin belirlenmesi [65].....	13
Şekil 7. Berkovich batıcı ucunun eşdeğer konik uç ile değiştirilmesi [67].	15
Şekil 8. İki boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde sınır koşullarının gösterimi.....	16
Şekil 9. Üç boyutlu üç-nokta eğilme testinin sonlu eleman modelinin gösterimi.....	17
Şekil 10. (a) Sinterlenmiş bakır tozlarının fotoğrafı; (b) sıkıştırılmış tozların TEM görüntüsü (üst görünüm); (c) sıkıştırılmış tozların boyutları (ön görünüm)	21
Şekil 11. (a) Zırh çeliklerine uygulanan balistik testlerin gerçekleştirildiği düzenek, (b) 7.62 top tipi merminin ve su jeti ile çıkarılan test numunelerinin zırh plakası üzerindeki yerleri.....	23
Şekil 12. Zırh plakalarından çıkarılan (a) Charpy V-çentik darbe, (b) nanogirinim ve (c) çekme testi numunelerinin boyutları	24
Şekil 13. (a) DP çelik sac numunesinin boyutları, (b) 3 noktalı eğilme testinden sonra analiz için deforme olmamış ve deforme olmuş bölgelerinden numunelerin çıkarıldığı yerler	25
Şekil 14. Numunelerin su jeti tezgahında eldesi (SDT Su Jeti, Ankara).....	27
Şekil 15. V-çentik darbe test cihazı (KTÜ Makine Müh. Bölümü)	28
Şekil 16. Mikro Vickers sertlik ölçümleri için Struers Duramin sertlik cihazı (KTÜ Makine Müh. Bölümü)	28
Şekil 17. Çift fazlı otomotiv çeliği numunelerine uygulanan 3-nokta eğilme testi.....	29

Şekil 18. Tez kapsamında kullanılan TI 950 TriboIndenter nanogirinin cihazı (Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi – MARGEM).....	30
Şekil 19. Numune yüzeylerinin incelenmesinde kullanılan tipik bir tarama elektron mikroskobu (Erzurum Teknik Üniversitesi – YUTAM).....	32
Şekil 20. Artık gerilme ölçümünde kullanılan XRD cihazı (Erzurum Teknik Üniversitesi – YUTAM).....	33
Şekil 21. (a) Sıkıştırılmış bakır tozlarının üst kısmından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve (b) girinim alanının optik mikroskop görüntüsü	35
Şekil 22. Cu taban malzeme (plaka), alt ve üst tabakalar için 50 mN girinim kuvveti ile elde edilen (a) sertlik ve (b) elastisite modülü değerleri	36
Şekil 23. Cu taban malzeme, alt ve üst tabakalar için h_f/h_{max} değerleri	37
Şekil 24. (a) Ramor 550 ve (b) Armox Advance numunelerinin TEM görüntüleri	38
Şekil 25. Ramor 500 numunesine uygulanan nanogirinin ölçümünden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri	39
Şekil 26. Zırh çeliği numunelerine uygulanan 5x5 matris şeklindeki girinimlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve atomik kuvvet mikroskop ölçümlerinin alındığı bölge.....	41
Şekil 27. (a) Ramor 500 ve (b) Armox Advance numuneleri üzerinde nanogirinin uygulandıktan sonra elden edilen atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri	42
Şekil 28. Zırh çelikleri için artık girinim derinliğinin (h_f) maksimum girinim derinliğine (h_{max}) oranı.....	44
Şekil 29. (a) Ramor 500; (b) Ramor 550; (c) Armox Advance numunelerine 50 nm maksimum yer değiştirme kontrollü nanogirinin ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri	45
Şekil 30. Charpy V-çentik darbe testine tabi tutulan Ramor 500 numunesinin kırılma yüzey görüntüleri.....	46
Şekil 31. Çentik darbe testine maruz bırakılan Ramor 500 numunelerinin zırh çeliği plakası üzerinden çıkarıldığı konumlar	47
Şekil 32. Zırh çeliği numunelerinin deforme olmamış ve deforme olmuş koşullarda Micro-Vickers sertlik değerleri	48
Şekil 33. Ramor 500 için (a) Vickers sertlik ölçümü (2.94 N), (b) Vickers sertlik ölçümü (490 mN) ve (c) Nanogirinin (10 mN, Berkovich uç ile) elde edilen girinim görüntüleri.....	49

Şekil 34. Deforme olmamış Ramor 500 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	52
Şekil 35. Deforme olmuş Ramor 500 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	52
Şekil 36. Deforme olmuş Ramor 550 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	53
Şekil 37. Deforme olmuş Armox Advance numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	53
Şekil 38. (a) Ramor 500, (b) Ramor 550 ve (c) Armox Advance numunelerinden elde edilen nanogirinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri	55
Şekil 39. Ramor 500 numunesine 10 mN maksimum kuvvet kontrollü nanogirinin ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri	57
Şekil 40. Armox Advance numunesine 10 mN maksimum kuvvet kontrollü nanogirinin ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri	58
Şekil 41. (a) DP 800 çeliğinin mikroyapısı; (b) martenzit hacim oranı hesaplaması için görüntünün siyah-beyaz görüntüye dönüştürülmesi.....	60
Şekil 42. (a) 50 mN kuvvette uygulanan nanogirinin; (b) 100 mN kuvvette uygulanan nanogirinin.....	61
Şekil 43. (a) 300 mN tekrarlı girinin kuvvet - yer değiştirme grafiği; (b) elastisite modülünün ve farklı ölçümlerde sertliğin değişimi.....	62
Şekil 44. (a) 50 mN kuvvette konvansiyonel girinin dağlanmış yüzey görüntüsü; (b) 100 mN kuvvette konvansiyonel girinin dağlanmış yüzey görüntüsü, F (Ferrit) M (Martenzit).....	63
Şekil 45. (a) Konvansiyonel girinin için farklı maksimum kuvvetlerde nanogirinin kuvveti - yer değiştirme ile değişimi; (b) DP 800'de uygulanan ölçüm kuvvetine göre elastisite modülü ve sertliğin değişimi	64
Şekil 46. (a) Kademeli girinin için kuvvet – yer değiştirme eğrisi; (b) DP 800'de uygulanan ölçüm kuvvetine göre elastisite modülü ve sertliğin değişimi.....	66
Şekil 47. DP 800 çeliğinde üç farklı girinin (konvansiyonel, kademeli ve 300 mN tekrarlı) için sertlik ve elastisite modülü arasındaki ilişki.....	67
Şekil 48. DP 800 çeliğinin (a) iki farklı ölçüm (konvansiyonel, kademeli) ve (b) 300 mN tekrarlı girinimlerde yığılma etkisi	69
Şekil 49. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin TEM görüntüleri	70

Şekil 50. DP 1000 numunesine uygulanan nanogirinin ölçümünden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri	72
Şekil 51. Otomotiv çelik numunelerinde nanogirinin yapılan bölge üzerinden AKM analizlerinin gerçekleştirildiği bölge (3x3 ölçüm alanı).....	72
Şekil 52. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin AKM görüntüleri	74
Şekil 53. Nanogirinin yer değiştirmelerinde DP 1000 ve DP 1200 elde edilen yığılma etkisi	76
Şekil 54. Maksimum yer değiştirme kontrolü ile (a) DP 1000 numunesine 50 nm ve 200 nm, (b) DP 1200 numunesine 50 nm ve 200 nm nanogirinin elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri.....	78
Şekil 55. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin eğme yükü – uzama (numune düşey yer değiştirmesi) değişimi	79
Şekil 56. Deforme olmamış DP 1000 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	81
Şekil 57. Deforme olmuş DP 1000 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	81
Şekil 58. Deforme olmamış DP 1200 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	82
Şekil 59. Deforme olmuş DP 1200 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü	82
Şekil 60. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin artık gerilmelerin nanogirinin belirlenmesinde kullanılan kuvvet-yer değiştirme eğrileri	83
Şekil 61. Üç farklı nanogirinin derinliğinde elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri (a) DP 1000, (b) DP 1200.....	84
Şekil 62. DP 1000 numunesinin 50 nm yer değiştirmede sertlik ve elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması	85
Şekil 63. DP 1200 numunesinin 50 nm yer değiştirmede elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri.....	86
Şekil 64. DP 1000 numunesinin (a) eğme yükü – uzama grafiği ve (b) 3-nokta eğilme testinin yer değiştirme sayısal analizi.....	88
Şekil 65. DP 1000 eğilme test numunesinin sonlu eleman esaslı artık gerilme analizi	89

Şekil 66. (a) 50, 100, 150 mN ve (b) 200, 250, 300 mN kuvvette elde edilen $P - \delta$ konvansiyonel girinim ve sayısal analizlerden elde edilen eğriler	90
Şekil 67. DP 800 numunesi için maksimum derinliğe ulaşıldıktan sonra girinimin olduğu bölgede von Mises eşdeğer gerilmesinin değişimi	91
Şekil 68. DP 800 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri	93
Şekil 69. DP 1000 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri ...	94
Şekil 70. DP 1200 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri ...	95
Şekil 71. DP 800 için (a) deneysel nanogirinim kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması	96
Şekil 72. DP 1000 için (a) deneysel nanogirinim kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması	97
Şekil 73. DP 1200 için (a) deneysel nanogirinim kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması	98
Şekil 74. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 çelikleri için nanogirinim ölçümünün sonlu elemanlar analizinden elde edilen eşdeğer von Mises gerilme değişimi	99
Şekil 75. (a) Zırh çeliğinde girinim aralığının TEM görüntüsü, (b) deforme olmamış ve (c) deforme olmuş Ramor 500 numunesinin sertlik haritaları	100
Şekil 76. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Ramor 500 numunesinin elastisite modülü haritaları	101
Şekil 77. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Armox Advance numunesinin sertlik haritaları	101
Şekil 78. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Armox Advance numunesinin elastisite modülü haritaları	102
Şekil 79. (a) DP çeliğinde girinim aralığının TEM görüntüsü, (b) deforme olmamış ve (c) deforme olmuş DP 1000 numunesinin sertlik haritaları	103
Şekil 80. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1000 numunesinin elastisite modülü haritaları	104
Şekil 81. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1200 numunesinin sertlik haritaları	104

Şekil 82. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1200 numunesinin elastisite modülü haritaları	105
---	-----



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Zırh çeliklerinin kimyasal özellikleri [72-74].	22
Tablo 2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [72-74].	22
Tablo 3. Otomotiv çeliklerin kimyasal bileşimleri [77-79].	26
Tablo 4. Otomotiv çeliklerin mekanik özellikleri [77-79].	26
Tablo 5. Tez kapsamında numunelerin test edildiği yerler	26
Tablo 6. Nanogirininim ölçüm şartları	31
Tablo 7. Malzeme grupları arasında bağımlı t-testi.	40
Tablo 8. Malzeme grupları arasında bağımsız t-testi	40
Tablo 9. Zırh çeliği numunelerin pürüzlülük değerleri	42
Tablo 10. Zırh çelikleri üzerinde gerçekleştirilen nanogirininimlerin AKM görüntüleri alınanları için sertlik ve elastisite modülü değerleri	43
Tablo 11. Zırh çeliği numunelerinin darbe testlerinden elde edilen darbe enerjileri ve kırılma tokluğu.	48
Tablo 12. Mikro-Vickers sertliği ve nanogirininim sertliğinin karşılaştırması	50
Tablo 13. Zırh çelik numunelerinin artık gerilme değerleri	54
Tablo 14. Literatürde DP çeliklerinin ferrit ve martenzit fazlarının sertliği	71
Tablo 15. Otomotiv çelik numunelerin pürüzlülük değerleri	73
Tablo 16. Otomotiv çeliklerinde AKM görüntüleri verilen nanogirininimlerin sertlik ve elastisite modülü değerleri	75
Tablo 17. Otomotiv çeliği numunelerinden elde edilen mikro-Vickers ortalama sertlik değerleri	80
Tablo 18. Otomotiv çeliği numuneleri üzerinde elde edilen artık gerilme değerlerinin karşılaştırması	83
Tablo 19. DP 1000 ve DP 1200 çeliklerinin 50 nm derinliğinde elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması	87

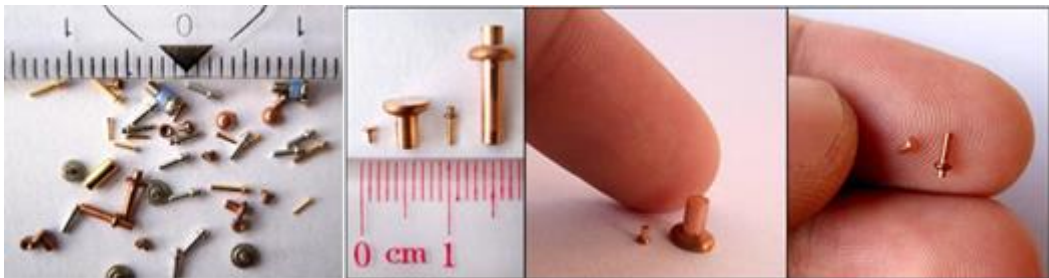
Tablo 20. DP 1000 numunesinden elde edilen artık gerilme karşılaştırılması.....	89
Tablo 21. Ters sonlu eleman optimizasyonlarından elde edilen çeliklerin malzeme parametreleri.....	98



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mikro boyutlu parçaların mekanik özellikleri, makro boyutlu parçalara uygulanan mekanik testler ve analitik bağıntılar ile doğrudan belirlenmesi çok zor veya belirlenemez. Şekil 1’de mikro boyutta imal edilmiş parçalara dair örnekler verilmiştir. Vollertsen ve Hu [1] yaptıkları çalışmada, makro boyutlu malzemelerde ihmal edilebilir faktörlerden olan boyut etkisi (size effect)’nin mikroimalat ürünlerinde ihmal edilemeyeceğini, malzeme davranışını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Boyut etkisi nedeniyle konvansiyonel test numunesi boyutuna getirilmesi mümkün olmayan mikro/nano boyuttaki malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için konvansiyonel mekanik testlere alternatif ve numune hazırlamaya minimum gereksinim duyan nanogirinin yönteminin kullanılabilirliği malzemeler üzerinde incelenmiştir. Ayrıca, mikroyapıda malzemelerin farklı fazlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile mikro/nano boyutta mekanik özelliklerin bilinmesine katkı sağlamıştır. Fazların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için nanogirinin ölçümleri ve sonlu eleman analizi (SEA) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen nanogirinin ölçümleri ile malzemelerin sertlik ve elastisite modülü değerleri doğrudan elde edilmiş; bunun yanı sıra literatürde verilen bazı denklemler ile kırılma tokluğu ve artık gerilme değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. Mikro imalat ürünleri [2].

Mikro üretim havacılık, telekomünikasyon, savunma, enerji ve sağlık hizmetleri endüstrileri için kritik olarak görülmektedir. Mikro imalat konseptini geliştiren teknoloji, Avrupa'da ilk olarak mikro yapılar veya mikro sistemler teknolojisi olarak kabul edildi. Bu

arada, küçük boyutlu parça ve ürünlerin üretimine uygun mikro fabrika, küçük masaüstü boyutlu üretim sistemleri kavramı ortaya atılmış ve ilk kez 1980'lerde Japon bilim adamları tarafından gerçekleştirilmiştir [3]. Malzeme, elektronik ve imalat sektörlerindeki gelişmeler ile mikro ürünlerde sürekli olarak pazarın arttığı kabul edilmektedir. Bu sektörlerde mikro ürünler basınç sensörleri, mikroakışkan cipler, jiroskoplar, ivmeölçerler, mikrofonlar, akış sensörleri, parmak izi sensörleri, ilaç dağıtım sistemleri, cip soğutucusu, sıvı lensler, mikro spektrometreler, mikro pompalar, mikro motor ve kimyasal analiz sistemleri gibi yerlerde kullanılmaktadır [4]. Sağlık alanında mikro ürünler pazarının önemli ölçüde büyümesi bekleniyor. Cep telefonları ve tabletler için mikro ürünlerin pazar büyüklüğü 2018 yılında 6,4 milyar dolara ulaşmıştır [5]. Mikro sistem teknolojisi bileşenlerinden oluşan kalp pilleri, dünya çapında 50 milyar dolarlık tıbbi cihaz pazarında kullanılmaktadır [6, 7]. Önümüzdeki yıllarda, mikro ve nano teknolojilerin mevcut pazardaki hemen hemen her ürünü değiştirmesi sonucunda 2,6 trilyon dolarlık küresel pazara dönüşmesi bekleniyor [8].

Tez kapsamında üç farklı çelik grubu incelenmiştir. Bunlar; otomotivde kullanılan yüksek mukavemetli çelikler (DP 800, DP 1000, DP 1200), balistik koruma amaçlı kullanılan zırh çelikleri (Ramor 500, Ramor 550, Armox Advance) ve sıkıştırılmış saf bakır (Cu) tozlarıdır. Bu malzemelerden hazırlanan numuneler üzerinde deformasyon öncesi deformasyon sonrası ölçümler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yüksek mukavemetli çelikler için üç nokta eğilme testi, zırh çelikleri için ise balistik testler yapılmıştır. Deformasyon öncesi ve sonrasında numunelerin mikromekanik karakterizasyonuna yönelik olarak nanogirininim, X ışını kırınımı-artık gerilme, mikrosertlik, taramalı elektron mikroskobu (TEM) ve çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen mikro-mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Ayrıca, nanogirininim ve artık gerilme ölçümleriyle elde edilen veriler sayısal analizler ile doğrulanmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

Bu tezde, nanogirininim ölçümleri ile malzemelerin sertlik ve elastisite modülü gibi değerleri doğrudan elde edilmiş; bunun yanı sıra literatürde verilen bazı eşitliklerle de kırılma tokluğu ve artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. Nanogirininimin sonlu eleman

modeli oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde, en yakın çalışmalar ve çalışmamızın bu yayınlardan farkı aşağıda özetlenmiştir:

Gözenekli bakır ve bakır tozları artan yüzey alanı ile, yüksek ısı transfer oranına ve bakırın yüksek ısı iletkenliğine sahip oldukları için ısı eşanjörlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Mikro ölçeğe sahip gözenekli ve modüle edilmiş yüzeylerin düz yüzeylere göre ısı transfer verimini %300 arttırdığı literatürde gösterilmiştir [9, 10]. Ayrıca, saf bakır gibi ince filmlerin genellikle döküm malzemelerine kıyasla, farklı mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu bildirilmektedir. Sonuç olarak, bu etkileşimlerin mikro/nano boyutta ölçülmesi kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, bu tür filmlerin ve mikron altı ölçeğe sahip malzemelerin mekanik özelliklerini geleneksel test yöntemleri ile değerlendirmek mümkün değildir. Bunun için nanogirininim, ultra ince filmlerin elastisite modülü ve sertlik gibi mekanik özelliklerini elde etmek için kullanışlı bir yöntemdir [11-14]. Xue vd. [15] sertlik değerinin arttıkça akma dayanımının arttığını ve saf bakır levhanın sertliğinin 65-105 H_v (0,64-1,03 GPa) civarında olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada ise mikro alaşımlı bakır ve saf bakır tozları ortalama 30 µm partikül boyutunda inert gaz atomizasyonu ile toz halinde hazırlanmıştır. Bu tozların mekanik özelliklerini belirlemek için girininim ve çekme testleri kullanılmıştır. Maksimum girininim derinliğinde ise sertlik ve elastisite modülü için sırasıyla 2.2 ± 0.5 ve 136.5 ± 12.4 GPa olarak elde etmişlerdir [16]. Kucharski vd. [17] Oliver – Pharr yöntemini kullanarak (001), (011) ve (111) farklı yönlerde sahip tek kristalli bakır numuneleri için sertlik değerlerini ölçmüşlerdir. En yüksek girininim kuvvetinde, sertlik ve elastisite modülü değerlerini sırasıyla 0.775 GPa ve 110 GPa olarak rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada, mikro/nano gözenekli bakır sinterlenmiş mikro gözenekli Cu-Mn alaşımının kimyasal olarak dağıtılmasıyla elde etmişlerdir. Mikro gözenek ve nano gözenek boyutlarını sırasıyla $2,44 \pm 0,48$ µm ve 69 ± 16 nm olarak belirlemişlerdir. Nanogirininimde sertlik ve elastisite modülünü sırasıyla $8,25 \pm 1,63$ GPa ve 282 ± 65 GPa olarak elde etmişlerdir [18].

Dünya çapında hem sivil hem de askeri araçlarda araçlarda kullanılan koruyucu malzemeler, ilgili tehditlerin en aza indirilmesinde veya önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Böylece zırh çelikleri gibi malzemeler istenilen korumanın sağlanmasında büyük önem arz etmektedir. Zırh malzemeleri arasında, farklı seviyelerdeki tehditleri önlemek için yüksek mukavemetli balistik çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Ayrıca bu çelikler yüksek mukavemet, sertlik ve tokluk, mükemmel balistik performans,

ısıtılma işlemi kolaylığı ve kaynaklanabilirlik kombinasyonu sunarlar [20]. Alaşımlı çelik ailesinden olan zırh çelikleri su verme ısıtılma işlemi sonrası tavlama nedeniyle malzemenin iç yapıları temperlenmiş martenzitten oluşur [21]. Nanogirininim, haddelenmiş homojen zırh çeliği plakalarının balistik olarak etkilerini ve mikroyapısal ayrıntılarını gözlemlemek için kullanıldı. Nanogirininim ölçümü, malzemenin sertlik ve elastisite modülünü belirlemek amacıyla kullanılırken; son dönemlerde artık gerilmelerin elde edilebileceği gösterilmiştir. Artık gerilme belirleme tekniklerini, tahribatlı ve tahribatsız teknikler olarak kategorize etmişlerdir. Tahribatsız teknikleri kullanırken, artık gerilme değerini dolaylı olarak çıkarmışlardır. Mekanik tahribatsız bir teknik olan girininim ve X-ışını kırınımı, artık gerilme tahmini için uygun ve hızlı bir yöntem olduğunu göstermişlerdir [22]. Bu yöntemi, sünek [23, 24] ile kırılğan malzemelere [25] uygulamışlardır. Artık gerilme-girininim uygulaması sünek malzemelerde yığılma/çökme davranışının direncine göre doğrudan belirlenir. Bununla birlikte, kırılğan malzemelerde ise girininim ucuna ve kullanılan malzemeye bağlı olarak çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklardan, seramiklerin ve camların kırılma tokluğunu ölçmek için sıklıkla kullanmışlardır [26]. Başka çalışmada, AISI M2 çelik numunelerinin yüzeyinde oluşan borid tabakasının akma gerilimini ve elastisite modülünü elde etmek için Berkovich batıcı uç ile 50 mN'lik kuvvet ile nanogirininim kullanmışlardır. Borid tabakası üzerinde oluşan artık gerilmeler, XRD tekniği kullanılarak tahmin edilmiştir. Artık gerilmelerin ve elastisite modülünün kohezyon/yapışma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmıştır [27]. Literatürde Armox 500T numunesine çekme, darbe testi, mikro-Vickers, nanogirininim, XRD, TEM-EDS ve korozyon testlerini uygulamışlardır. Testler sonucunda, daha yüksek girininim sertliği ve daha düşük elastisite modülü değerlerine ulaşmışlardır. Bunun martenzit ve karbür çökeltilmesinin homojen dağılımından kaynaklandığını belirtmişlerdir [28]. Al_2O_3 zırh seramik malzemesinin performansını iyileştirmek için geleneksel girininim yöntemiyle sertlik, yüzey topografyası ve artık gerilmeleri araştırdılar. Al_2O_3 seramik zırh malzemesinin lazer şokuyla gravürlenmesini (LSP) incelemişlerdir. Yüzey sertliğinde %10 artış olduğunu göstermişlerdir. X-ışını kırınım yöntemiyle artık gerilme, LSP işleminden sonra -64 MPa gerilme gösterirken, işlenmemiş yüzey gerilmesini +219 MPa olarak belirtmişlerdir [29]. Ferrit ve beyritin mekanik özelliklerini değerlendirmek için mikro test teknikleri kullanmıştır. Elastisite modülünü, akma mukavemetini, sertliğini ve deformasyon sertleşme üssünü değerlendirmek için nanogirininim ölçümü uygulamıştır. Ferrit ve üst

beyninin farklı mikro yapılarına rağmen çok benzer mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [30]. Literatürde, çok çeşitli mikro yapılara sahip karmaşık alaşımların performansı araştırılmış ve balistik olarak etkileri değerlendirilmiştir. Balistik davranış performansının mikroyapısal özelliklerini gözlemlemek için haddelenmiş homojen zırh çeliği plakalarında nano girinim uygulanmıştır. Daha sert ikincil fazın mukavemeti arttırmasına rağmen, plaka boyunca çatlakların malzemenin balistik performansını büyük ölçüde azalttığını göstermişler [31]. Boyut etkisinden dolayı klasik test numunesi boyutuna getirilemeyen mikro/nano boyutlu parça ve malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. Bu amaçla nanogirinim ölçümü ile malzemelerin sertlik ve elastisite modülü değerleri doğrudan elde edilmiştir. Ayrıca literatürde verilen bazı denklemler ile kırılma tokluğu ve artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yazarlar daha önceki çalışmalarında Al_2O_3 seramik, Armox 500 T ve diğer bazı balistik malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır.

Otomotiv endüstrisinde daha hafif ve daha güçlü araçlar arayışında on yıllardır durmaksızın çalışılmaktadır. Ayrıca, otomotiv endüstrisi için yakıt verimliliği, egzoz emisyonlarının azaltılması ve güvenlik önemli konular arasındadır [32]. İleri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), mukavemetlerini korurken ağırlığı azaltabildikleri ve yakıt verimliliğini arttırabildikleri için otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, araçlarda büyük önem taşıyan güvenlik faktörünün iyileştirilmesi için mekanik özellikleri yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorunları azaltmak için hafif Al ve Mg alaşımları ile birlikte ileri yüksek mukavemetli çelikler ilk seçenekler arasındadır [33]. Fakat, bu alaşımların kolay şekillendirilebilirliği ve çeliğe göre nispeten yüksek maliyet oranları kullanımlarını sınırlar. Bu nedenle, özellikle otomobil endüstrisinde AHSS'den giderek daha fazla yararlanılmaktadır. Geleneksel çeliklerle aynı yoğunluğa sahip olsalar bile, kullanım kolaylığı, daha yüksek akma mukavemeti ve daha ince kalınlıkların (örneğin, otomobil gövdesinin ana parçaları) kullanımına izin verdiğinden, ağırlıkta önemli azalma sağlar. Özellikle 1100 MPa'lık AHSS parçaları araçta %50–55 hafiflik sağlayabilir [34]. Bu nedenle AHSS, en çok kullanılan beyaz gövde (BIW) malzemeleri arasındadır. Örneğin, 2021 Chevrolet Trailblazer'da AHSS/UHSS kullanımı bir önceki modele kıyasla %23'ten %42'ye yükselmiştir [35]. AHSS varyantları arasında, çift fazlı (DP) çelikler iyi sertleşme özelliklerinden dolayı A, B ve C sütunları, tavan rayları, külbütörler, koltuk rayları ve çerçeveleri, ön yan elemanlar, tavan yayları, tampon

takviyeleri vb. kritik uygulamalarda tercih edilir. Mikro yapısı martenzit (yüksek mukavemet sağlar) ve ferrit matris fazlarından (süneklik sağlar) oluşur. DP çeliklerinin çekme mukavemeti 500 ile 1200 MPa arasında değişir. Mukavemet seviyesi mikro yapıdaki martenzit miktarına bağlıdır ve genellikle %5-20 [36] aralığında olmakla birlikte %86'ya kadar çıkabilir [37]. İleri yüksek mukavemetli çelikler mikro alaşımlı, merdaneli şekillendirme, martenzitik, karmaşık fazlı, beynitik ve DP çelikler dahil olmak üzere en az altı farklı grupta kategorize edilebilir. DP çelikleri, yumuşak ferrit bir matris ve adalar şeklinde sert martenzitten oluşur. Bu çeliklerdeki martenzit hacmi %20'nin üzerindedir. Sert ve yumuşak faz kombinasyonu, ileri bir mukavemet-süneklik dengesi sağlar. DP çeliklerinin mekanik özellikleri, bileşenlerinin hacmine, mikroyapısal bileşenlerin dağılımına ve özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, otomotivde dış gövde panellerinde ve yapısal elemanlarda (tamponlar, B sütunları, yan darbe kirişleri vb.) çok kullanılmaktadır. DP çelikleri otomobil gövdesinin ana parçalarının şekillendirilebilirliği için büyük önem taşıyan yüksek sertleştirme ve yorulma etkisine sahiptir [38, 39]. Literatürde, DP 1180'de ferrit ve martenzitin gerilme-birim şekil değiştirme davranışını çıkarmak için nanogirinin kuvvet - yer değiştirme eğrileri ile tersine sonlu elemanlar analizini birleştirdiler. Ferrit, martenzit ve DP1180'in akma dayanımlarını sırasıyla 370, 948 ve 836 MPa olarak belirlenirken karşılık gelen pekleşme üsleri (n) 0.175, 0.025 ve 0.11 olarak bulmuşlardır. Girinim yönteminden elde edilen mekanik özellikler, DP1180'in deneysel olarak ölçülen makro akma gerilmesi (922 MPa) ve sertleşme üssü (0.11) ile iyi bir uyum sergilediğini göstermişlerdir [40]. Ferrit-martenzit DP çelikleri gibi kompozit yapılarda heterojen mikro yapıdaki plastik bölgeyi doğrudan ölçmek ve nanogirinin tepkilerini simüle etmek için sonlu elemanlar modellemesini kullanmışlardır. Model ile fazların ve iki fazlı kompozit yapının sertlik eğilimini doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir [41]. Başka bir çalışmada, dövme ve tavlama işlemini 0.7 - 4 μm farklı tane boyutlarına sahip DP çeliklerine uygulamıştır. Şekil 2'de hem ferrit hem martenzit fazları için 0.25 - 15 mN arasında girinim kuvvetlerine göre plastik deformasyonun tek bir kristal içinde lokalize olduğu bir bölgeden (1), mikro yapının genel temsili bir hacmini kapsadığı bir bölgeye (4) geçilmiştir [42].

derinliğinde ferrit için 3.5-4.5 GPa ve martenzit için 6.5-9.5 GPa sertlik değerlerini belirtmişlerdir. Rodriguez vd. [53], farklı yer değiştirmelerde (50–3000 nm) nanogirininimleri yaparak farklı ferritik, perlitik ve martenzitik çelikler üzerinde girinim boyut etkisini inceledi. Genel olarak, girinim derinliği 1 μm 'nin altına düştüğünde nanosertlik değerinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Girinim derinliği 1500 nm'den 50 nm'ye düştüğünde ferritik çeliğin sertliği yaklaşık 1.85 GPa'dan 3.3 GPa'ya yükseldiğini belirtmişlerdir. Basantia vd. [54], ferrit-martenzit, ferrit-beynit ve ferrit-perlit çeliklerinde farklı fazların nanosertliği üzerinde çeşitli mikroyapısal parametreleri araştırdı. Çift fazlı çeliklerinin makro, mikro, nano sertlik değerlerini ve çekme özelliklerini belirlemişlerdir. Mikroyapılarında fazların nanosertliğini tahmin etmek için mikroyapısal parametreler dahil edilerek sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Borid tabakasının akma gerilimi ve elastisite modülü gibi mekanik parametreler, girinim tekniği kullanılarak hesaplamıştır. Borid tabakası üzerinde oluşan artık gerilmeler XRD tekniği kullanılarak tahmin etmiştir. Ayrıca, çeşitli DP çeliklerinde farklı mikroyapısal parametrelerin nanosertlik üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA ve t-test istatistik analizleri yapmıştır.

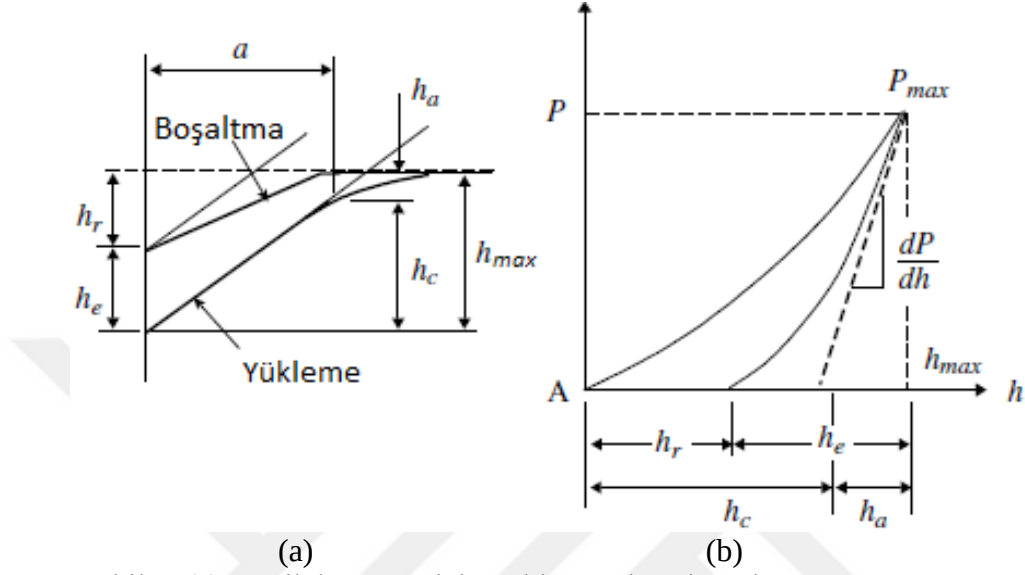
Boyut etkisinden dolayı geleneksel test numunesi boyutu ile ölçülemeyen mikro/nano boyutlu parça ve malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. Yapılan literatür taramasında, tezde kullanılması planlanan zırh çelikler (Ramor 500, Ramor 550, Armox Advance), otomotiv çelikleri (DP 800, DP 1000 ve DP 1200) ve sıkıştırılmış sinterli bakır tozlarının üzerinde deformasyonun (sertlik, elastisite modülü, artık gerilme ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri) etkisini, bazı tamamlayıcı tekniklerle birlikte nanogirininim yoluyla ayrıntılı olarak araştırmanın uygulanmadığı görülmüştür. Öte yandan, tezde mikromekanik karakterizasyona yönelik olarak nanogirininim ölçümü, sonlu eleman analizi ve mikroyapı sertlik haritalama gibi çeşitli yöntemler bir bütünlük içerisinde kullanılmıştır.

1.3. Tez Çalışması Kapsamında Kullanılan Yöntemler

1.3.1. Nanogirininim

Nanogirininim ölçümleri, ASTM E2546 ve ISO 14577 ile standardize edilmiştir. Şekil 3'te nanogirininimde elde edilen bir kuvvet - yer değiştirme eğrisi verilmektedir. Geri

yükleme (boşaltma) durumunda eğrinin eğimi $S = dP/dh$ ile gösterilir ve temas direngenliği (contact stiffness) olarak tanımlanır. S , indirgenmiş elastisite modülü hesabında kullanılır.



Şekil 3. (a) Konik batıcı uç için yüklem - boşaltmada numune yüzey geometrisi ve batıcı ucun şeması, (b) Geri yüklemeyi takiben elastik-plastik yüklem için yer değiştirmeye karşılık yüklem eğrisi [55].

Kuvvet - yer değiştirme eğrisinin geri yüklem kısmı, analizde test edilen malzemenin elastisite modülü ve sertliğinin hesabı için kullanılmaktadır [56]. Şekil 3'te verilen parametrelerin açıklaması aşağıda verilmiştir:

h_{max} : Maksimum kuvvette malzemede meydana gelen maksimum batma derinliği;

h_r : Kuvvet tamamen boşatıldıktan sonra malzeme yüzeyinde kalan plastik batma derinliği;

h_a : Yüklemenin kaldırılması (unloading) esnasında temas sınırı dışında kalan yığılma (pile-up) veya çökme (sink-in) bölgelerindeki yer değiştirme miktarı;

h_e : Yüklemenin kaldırılması sırasındaki elastik yer değiştirme;

h_c : Batıcı ucun girinim yaptığı temas yer değiştirmedir.

Nanogirinin ölçümünde, batıcı uç ve numune birbiri ile temas halinde olduğu için temas durumuna özgü indirgenmiş elastisite modülü belirlenmelidir. İndirgenmiş elastisite modülü, denklem 1’de temas direngenliği (S) ve nanogirinin izdüşümü alanından (A) yola çıkılarak hesaplanmaktadır. İndirgenmiş elastisite modülü (E_r) bulunduğundan sonra denklem 1’de yerine konur.

$$S = \frac{dP}{dh}, E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \quad (1)$$

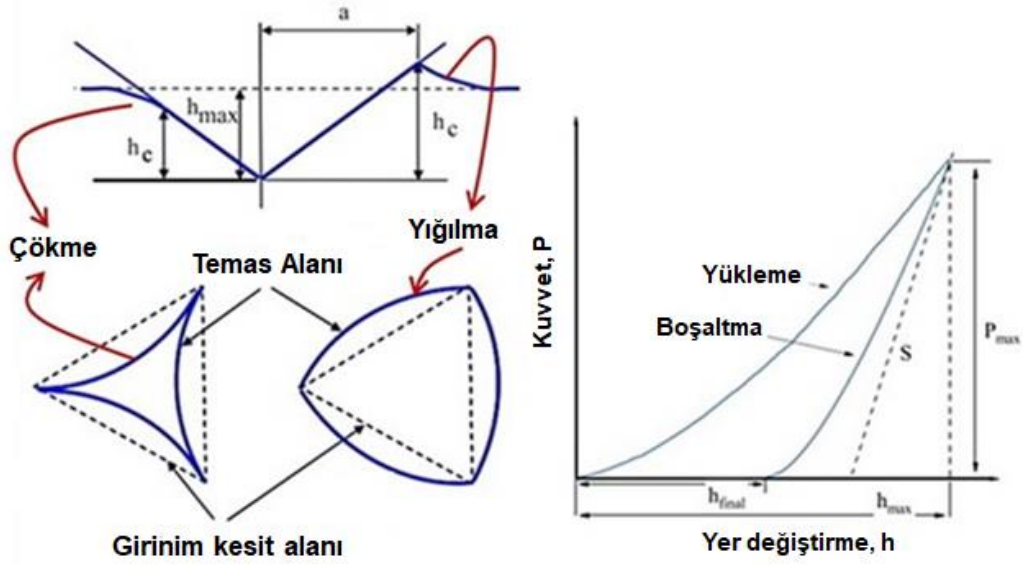
Malzeme ve batıcı ucun poisson oranları, batıcı ucun elastisite modülü bilindiği takdirde, malzemenin elastisite modülü denklem 2 ile hesaplanmaktadır [55, 56]. E_r , indirgenmiş elastisite modülü, $A(h_c)$, h_c derinliğinde batıcı ucun izdüşüm yüzey alanı, ve β geometrik bir sabittir.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v_{batıcı\ uç}^2}{E_{batıcı\ uç}} + \frac{1-v_{malzeme}^2}{E_{malzeme}} \quad (2)$$

$E_{batıcı\ uç}$, $v_{batıcı\ uç}$ elmas batıcı uç malzemesinin elastisite modülü ve Poisson oranıdır ($E_{batıcı\ uç} = 1140$ GPa, $v_{batıcı\ uç} = 0.07$). $E_{malzeme}$, $v_{malzeme}$ test malzemesinin elastisite modülü ve Poisson oranıdır. Öte yandan, malzemenin sertliği aşağıdaki denklem 3 ile hesaplanabilir:

$$H = \frac{P_{max}}{A}, A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \theta, A = 24.56h_c^2 \quad (3)$$

Bu denklemde, P maksimum kuvvet ve A batıcı ucun malzeme üzerinde bıraktığı izdüşüm yüzey alanıdır. Girinim sırasında, Şekil 4’te gösterildiği gibi plastik olarak deforme olmuş malzeme yüzeyi girinim etkisi ile akma eğilimi gösterir ve girinimin merkezinden uzağa itilir. Bu olay "yığılma" olarak bilinir. Çökme sırasında ise yığılmanın tersi olarak, batıcı uç malzeme içine batarken girinimin düz tarafları içe doğru eğilir. Bu iki olgu, hesaplanan temas alanını ve elde edilen mekanik özellikleri etkiler.



Şekil 4. Enine kesit görünümünden çökme ve yığılmanın şematik gösterimi

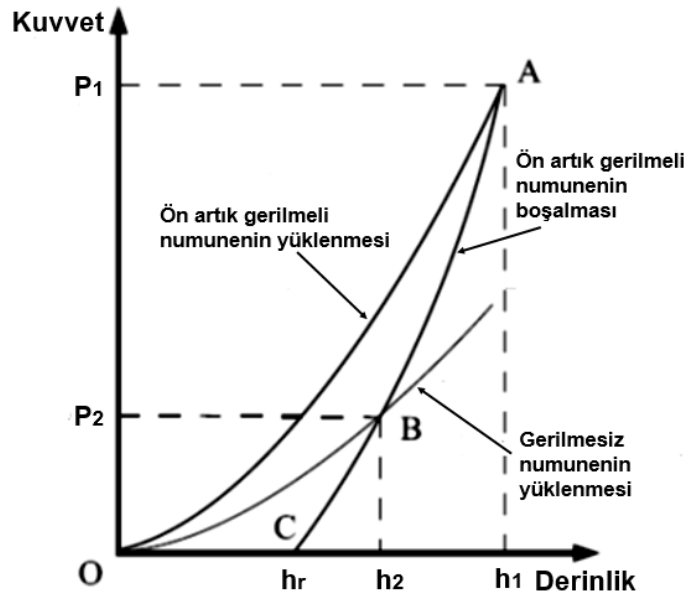
1.3.2. Nanogirinin ile Artık Gerilmenin Belirlenmesi

Artık gerilmeler yorulma, kırılma, korozyon, aşınma ve sürtünme gibi malzemelerin mekanik davranışları üzerinde önemli etkisi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, mühendislik yapılarında veya bileşenlerinde artık gerilmelerin ölçülmesi çok önemlidir [57]. Bugüne kadar delik delme, ultrasonik yöntemler, X-ışını kırınımı ve son zamanlarda girinim gibi artık gerilmeyi ölçmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Nanogirinin basitliği, rahatlığı ve çeşitli ölçeklerde uygulanabilirliği nedeniyle yoğun ilgi görmüştür [58]. Zırh çeliklerinin mekanik özelliklerini elde etmek için, farklı girinim yer değiştirmelerinde (yer değiştirme kontrollü girinim) ve 10 mN maksimum kuvvet koşullarında (kuvvet kontrollü girinim) nanogirininler gerçekleştirildi. Nanogirinin-artık gerilme ölçümleri, sertlik ve elastisite modülü verilerinin elde edildiği kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin analizine dayanır. Üçgen piramit Berkovich batıcı uçlu TI 950 TriboIndenter (Bruker Inc., Billerica, MA, ABD) cihazı kullanılarak numune yüzeylerine 4x4 ve 5x5 girinim matrisleri uygulandı. Artık gerilme ölçümü, girinim kuvvet-yer değiştirme ($P-h$) veri analizi sayesinde, çeki veya bası karakterdeki gerilmeli yüzeylerin temas alanları ile gerilmesiz yüzeylerin girinim temas alanları arasındaki farkın hesaplanmasına dayanır [59]. Bu çalışmada, temas alanları üzerinde ve girinim yer değiştirmelerinde artık gerilmelerinin etkileri araştırılmıştır. Gerilmesiz ve artık gerilmeli (çeki veya bası) malzemede girinim sonucu elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil

5'te şematik olarak gösterilmektedir. Artık gerilmeli bir malzemenin kuvvet - yer değiştirme eğrileri, gerilmesiz malzemenin sağında kalırsa çeki artık gerilmesi ve gerilmesiz malzemenin solunda kalırsa artık gerilme tipinin bası olduğunu göstermektedir. Denklem 4'te, A ve A_0 sırasıyla artık gerilme (σ_r) olan ve olmayan girinim temas alanlarıdır. H malzemenin sertliğidir. $f = \sin \alpha$ denkleminde, α 'nın batıcı ucun girinim açısıyla ilişkili olduğu geometrik bir faktördür. Giannakopoulos vd. Vickers dörtgen piramit girinim için $\alpha = 22^\circ$, Berkovich trigonal piramit girinim için $\alpha = 24,7^\circ$ ve eşdeğer küresel konik girinim için $\alpha = 19,7^\circ$ kullanmışlardır [60]. Başka bir yöntemde, Fe^{2+} iyonları ile paslanmaz çelik plakada artık gerilmeyi ölçmek için nanogirinim yöntemini kullanmışlardır. Nanogirinimden elde edilen P_1 ve P_2 kuvvetleri ile h_r artık yer değiştirme kullanarak aşağıdaki denklem 5 ile artık gerilmeleri hesaplamışlardır [61]. Bu iki yöntemde nanogirinim yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmamızda denklem 5 esas alınarak analizler yapılmıştır.

$$\sigma_{artık\ gerilme} = H(1 - A_0/A)/f \quad (4)$$

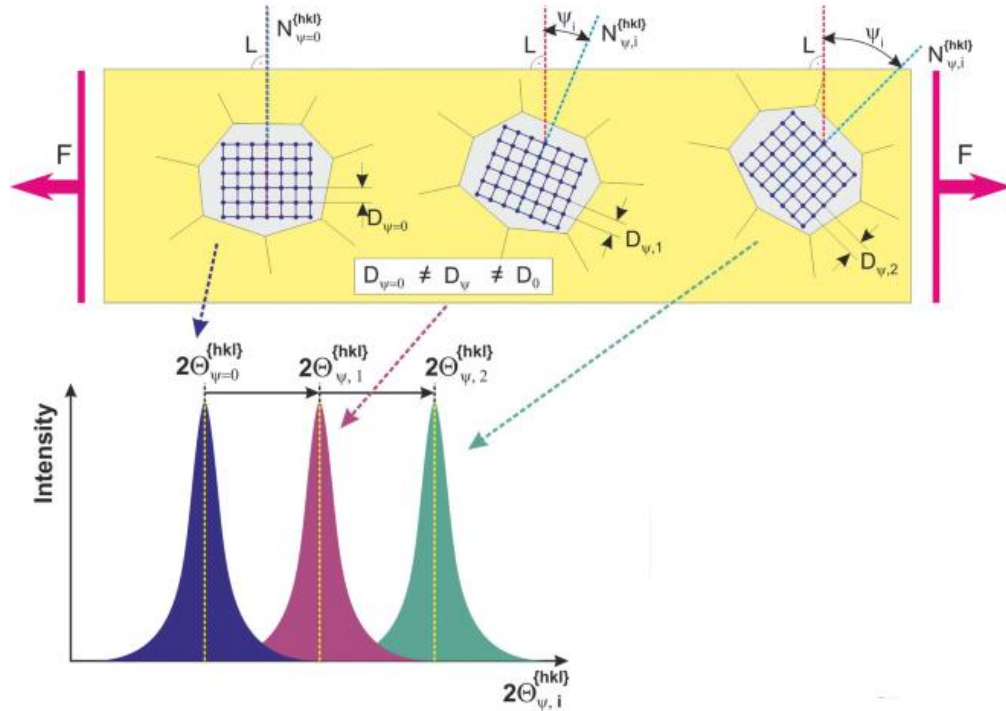
$$\sigma_{artık\ gerilme} = \frac{P_1 - P_2}{2\pi \tan^2 \alpha h_r^2} \quad (5)$$



Şekil 5. Nanogirinim ile artık gerilmelerin elde edilmesi [61].

1.3.3. XRD-Artık Gerilme

XRD analizi Explorer (GNR srl, Novara, İtalya) cihazı, numunelerin deforme olmuş ve deforme olmamış bölgelerinde artık gerilme değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. Yüzeyden yansıyan ışın ve geliş noktasında yüzeyin normali arasında $w=3^\circ$ açısında $\sin^2\psi$ yöntemini literatürde başka araştırmacılar kullanmışlardır [58, 62]. Tezde kullanılan bu cihaz, çok yüksek enerjili X-ışınları sağlamaktadır. Bu ışınlar geleneksel X-ışınlarından daha derinlere nüfuz edebilmektedir [63]. Şekil 6'da, malzemeye gönderilen X-ışınları malzeme içerisindeki kristal düzlemlerden 2θ açısında kırınım göstererek yansıma yapar. Bu sırada malzemeye gelen ışınların yönü değiştirilerek en çok yansımanın olduğu açı bulunur. Bulunan açı ile denklem 6'da Bragg yasası kullanılarak iki atomik düzlem arasındaki mesafe hesaplanır. Malzeme içerisinde artık gerilmeler mevcutsa bu mesafe parçanın ön gerilme olmayan haline göre farklılık gösterir. Bu farklılık kullanılarak parçanın içerisinde kalan artık gerilmeler hesaplanır [64]. Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilmeler veya malzeme içerisinde kalan artık gerilmeler sayesinde artar veya azalır. Mesafenin artması çeki gerilmesini ifade ederken mesafenin azalması ise bası gerilmesinin oluştuğunu gösterir.



Şekil 6. $\sin^2\psi$ yöntemi ile XRD-artık gerilmelerin belirlenmesi [65].

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (6)$$

Burada, n yansıyan ışının sayısı, λ tek renkli ışınım dalga boyu, d paralel düzlemler arası mesafedir. Dalga boyu sabit tutulursa, belirli düzlem üzerindeki atomlar gelen X-ışınlarının belirli bir açıda kırılmasına neden olur. Yansıyan X-ışınları kesişir ve film üzerinde iz bırakır. Film analiz edilerek 2θ açısı hesaplandığında düzlemler arası mesafe belirlenebilir.

Artık gerilme (σ), denklem 7'de verilen eşitliğe bağlı olarak tespit edilir [64].

$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} \times \frac{1}{\sin^2 \psi} \times \frac{(d_\psi - d_0)}{d_0} \quad (7)$$

Burada,

d_ψ ; ψ eğim açısındaki düzlemler arası mesafe,

E ; Elastisite modülü,

ν ; Poisson oranı

1.3.4. Nanogirininin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

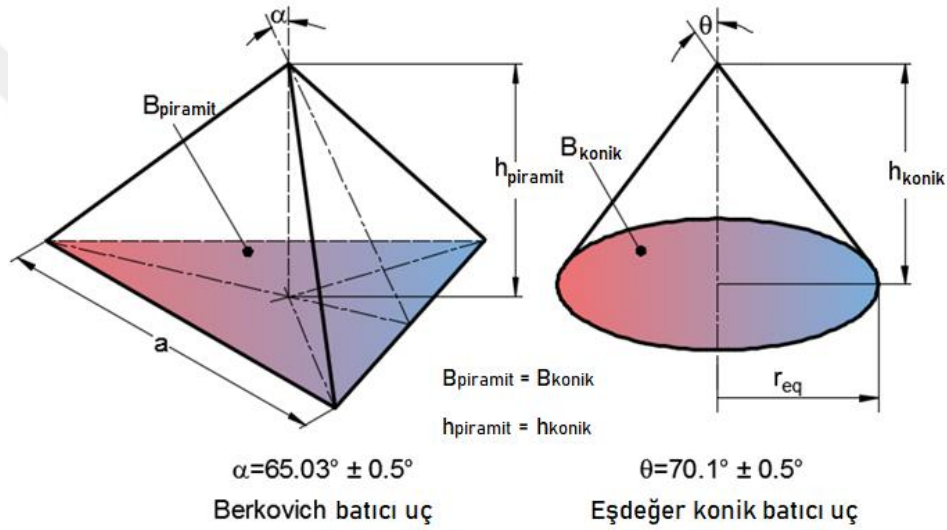
Gerek girinim sırasında malzemenin gerilme-birim şekil değişim eğrisini belirlemek gerekse de kuvvet-yer değiştirme eğrisini doğrulamak için nanogirininin sayısal analizleri yapılmıştır. Nanogirininin ölçümlerinde yaygın olarak üç kenarlı piramit Berkovich uç kullanılmasına rağmen sayısal analizlerde doğruluğu daha önce farklı araştırmacılar tarafından gösterilen konik uç yaklaşımı tercih edilmektedir. Lichinchi vd. [66] piramit şeklinde Berkovich batıcı uçlu 3-D modellemeye karşılık gelen konik batıcı uçlu 2-D modelleme arasındaki farkın ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Analizlerin daha erken sürede tamamlanması nedeniyle araştırma faaliyetlerinde de iki boyutlu eksenel simetrik modeller kullanılmıştır. İki boyutlu eksenel simetrik modeller için girinimde kullanılan Berkovich batıcı ucu, 70.3°'lik yarım tepe açısı ile konik şekle dönüştürülmüştür. Şekil 7'de Berkovich piramit ucunda, ideal keskin geometride olan girinim ucun nano sapmalarını analitik olarak açıklamak için aynı öngörülen alana karşı

girinim derinliğinde, h eşdeğerine sahip bir koni ile değiştirilmiştir [67]. Eşdeğer koninin θ açısı aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır:

$$r_{eq} = \frac{1}{2}(a)\sqrt{\frac{\tan 60^\circ}{\pi}} \quad (8)$$

$$\tan \theta = \frac{r_{eq}}{h} \quad (9)$$

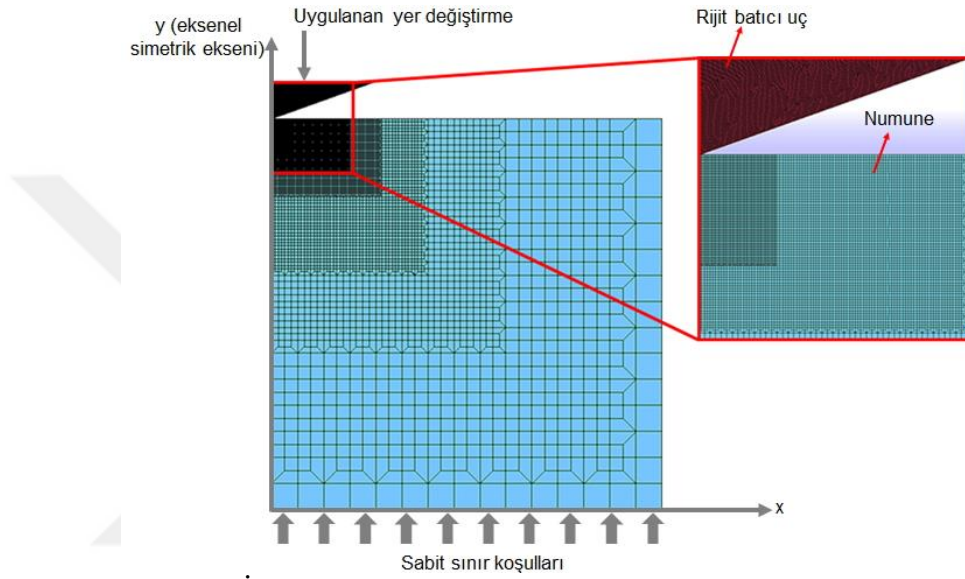
a mm cinsinden ölçülen piramit taban kenar uzunluğunu, r_{eq} eşdeğer girinim konik alanının yarıçapını ve h ise koni yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 7. Berkovich batıcı ucunun eşdeğer konik uç ile değiştirilmesi [67].

Sonlu eleman modelini hassas bir şekilde hazırlamak için sınır koşullarını belirlemek önem taşımaktadır. Bunun için nanogirinimin nasıl yapıldığını incelemek yeterlidir. Şekil 8'de gösterildiği gibi batıcı uç numune yüzeyine doğru harekete geçer ve iki yüzey arasında temas gerçekleşir. Numunenin alt yüzeyi hiçbir şekilde hareket etmez. Nanogirinim çıktısı kuvvet-yer değiştirme eğrisi olarak elde edilmektedir. Bu nedenle batıcı ucun ilerlemesi, maksimum kuvvet veya yer değiştirme değeri ayarlanarak yükleme durumu temsil edilir. Yer değiştirme eksenini x-ekseni olarak tayin edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluştururken numune homojen bir katı olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, malzemenin izotropik olduğu varsayılmış ve malzemenin plastik davranışı von Mises akma kriteri ile tanımlanmıştır. Tam integrasyonlu 11967 dört düğüm (node) noktalı eksenel simetrik

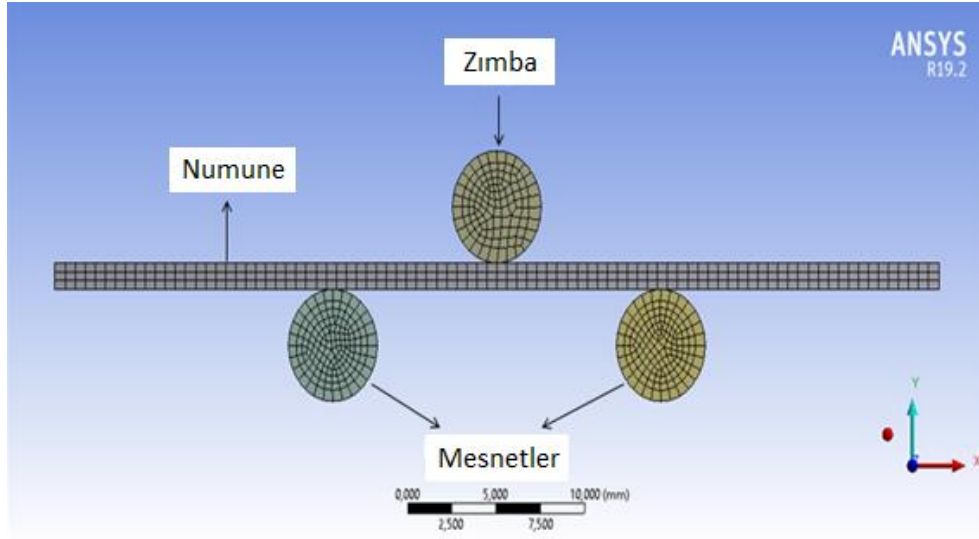
kabuk elemanlar ile ağ örgüsü (mesh) oluşturulmuştur. Ayrıca, tersine sayısal analizi, nanogirinin ölçümü sırasında malzemede meydana gelen gerilme-birim şekil değişim eğrisini belirlemek için uygulanmıştır. Şekil 8’de sonlu elemanlar programı olan Ls-Dyna (LSTC, Livermore, CA, USA)’da oluşturulan iki boyutlu aksel simetrik sonlu eleman modeli, girinimden sonra DP 800, DP 1000 ve DP 1200 çelikleri için gerilme-birim şekil değişim eğrisini elde etmek için kullanılmıştır.



Şekil 8. İki boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde sınır koşullarının gösterimi

1.3.5. Üç Nokta Eğilme Testinin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

Üç-nokta eğilme testi ticari olarak temin edilebilen sonlu eleman paketi ANSYS R19.2 (Şekil 9) ile analiz edildi. Sonlu elemanlar modeli 12294 adet 4 düğümlü elemandan oluşmaktadır. Malzemenin plastik davranışı von Mises akma kriteri ve malzemenin izotropik olduğu varsayıldı. Modelin tüm düğümleri, x ve z eksenleri etrafında dönmeye karşı sabitlenmiştir.



Şekil 9. Üç boyutlu üç-nokta eğilme testinin sonlu eleman modelinin gösterimi

1.3.6. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi

Tersine sonlu elemanlar yöntemi, genellikle gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini tanımlayabilecek bir formül seçimi ile başlamaktadır. Malzemelerin plastik davranışlarını karakterize etmede yaygın olarak kullanılan denklemlerden bazıları denklem 10-13 aşağıda verilmiştir:

$$\text{Holloman denklemi : } \sigma = k\varepsilon^m \quad (10)$$

$$\text{Ludwig denklemi : } \sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^m \quad (11)$$

$$\text{Swift denklemi : } \sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon^m) \quad (12)$$

$$\text{Modifiye Holloman denklemi : } \sigma = E^m \sigma_y^{(1-m)} \varepsilon^m \quad (13)$$

Formüllerdeki σ gerilme, ε birim şekil değiştirmesini, σ_y akma gerilmesini, m pekleşme üstelini, k mukavemet sabitini, σ_0 başlangıç gerilme ve ε_0 başlangıç şekil değiştirme katsayılarıdır. Eşitliklerdeki k , m , σ_y , σ_0 ve ε_0 bilinmeyen katsayıları için bir aralık tahmini yapılır. Sonlu elemanlar sonuçları gerçek nanogirinin kuvvet - yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılır. Deneysel ve sayısal eğriler arasındaki minimum farkı veren σ_y ve m değerleri, malzemenin mekanik davranışı olarak kabul edilmektedir. Bu

yöntem basit ve etkilidir. Yapılan sayısal analizler sonucu optimizasyon şartlarına en uygun modifiye holloman denklemi 13 olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında Ls-OPT ile genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında, konvansiyonel mekanik testlere alternatif olacak, numune hazırlamaya minimum gereksinim duyan nanogirinin yönteminin bir alternatif yöntem olarak kullanılabilirliği ele alınan malzemeler üzerinde incelenmiştir.

Bu tez çalışması üç kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda, ilk olarak saf bakır taban plaka malzeme üzerinde sıkıştırılan ve daha sonra sinterlemeye tabi tutulan küresel bakır tozlarının (25 - 110 μm) mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. İmalat ve proses işlemi sonrasında, sıkıştırılmış bakır tozlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu amaçla farklı kompakt özelliklerde tozlar üzerinde girinimler yapılmış ve sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Ek olarak, girininin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve girinimden elde edilen kuvvet - yer değiştirme verileriyle doğrulanmıştır.

İkinci kısımda ise nanogirine dayalı mekanik özellikleri araştırmak ve üç farklı zırh çeliği Ramor 500, Ramor 550 ve Armox Advance için geleneksel yöntemlerle elde edilen özelliklerle karşılaştırılmıştır. Böylece, mekanik özellikleri belirlemek için alternatif ve kapsamlı bir araç olarak nanogirinin doğrulanması sağlanmıştır. Bu amaçla, balistik olarak test edilen zırh plakalarının farklı (deforme olmamış ve deforme olmuş) bölgelerinden numuneler alınmıştır. Daha sonra, 10 mN maksimum kuvvette ve farklı maksimum girinim derinliklerinde (50–200 nm) nanogirinin ölçümleri gerçekleştirildi. İncelenen malzemelerin sertlik ve elastisite modülü değerlerine ek olarak, literatürde önerilen denklemler aracılığıyla numunelerin artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler XRD - $\sin^2\psi$ yöntemi ile elde edilen nanogirinin - artık gerilme ölçümleri ile karşılaştırıldı. Nanogirinin daha az numune hazırlama prosedürüyle çeşitli mekanik özellikler elde etmek için kullanılabileceği kanıtlanmıştır.

Üçüncü kısımda, ileri yüksek mukavemetli DP 800, DP 1000 ve DP 1200 çeliklerinde deformasyonun (sertlik, elastisite modülü, artık gerilme ve gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri) etkisinin nanogirinin ve bazı tamamlayıcı teknikler kullanılarak detaylı olarak araştırılmasını amaçlanmıştır. Bu amaçla numuneler 3 noktalı eğilme

testlerine tabi tutulmuştur. 3 noktalı eğilme testlerinden önce ve sonra, deformasyonun mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için nanogirinin ölçümü yapıldı. Artık gerilmeleri elde etmek ve mikro yapıyı araştırmak için numune üzerinde XRD ve TEM analizleri yapılmıştır. Bu testlerden elde edilen mikromekanik özellikler deforme olmamış ve deforme olmamış durumlarına göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sayısal analiz sonuçlarının deneysel veriler ile uyumlu olarak elde edilmesi sonucunda oluşturulan sonlu eleman modelleri doğrulanmıştır.



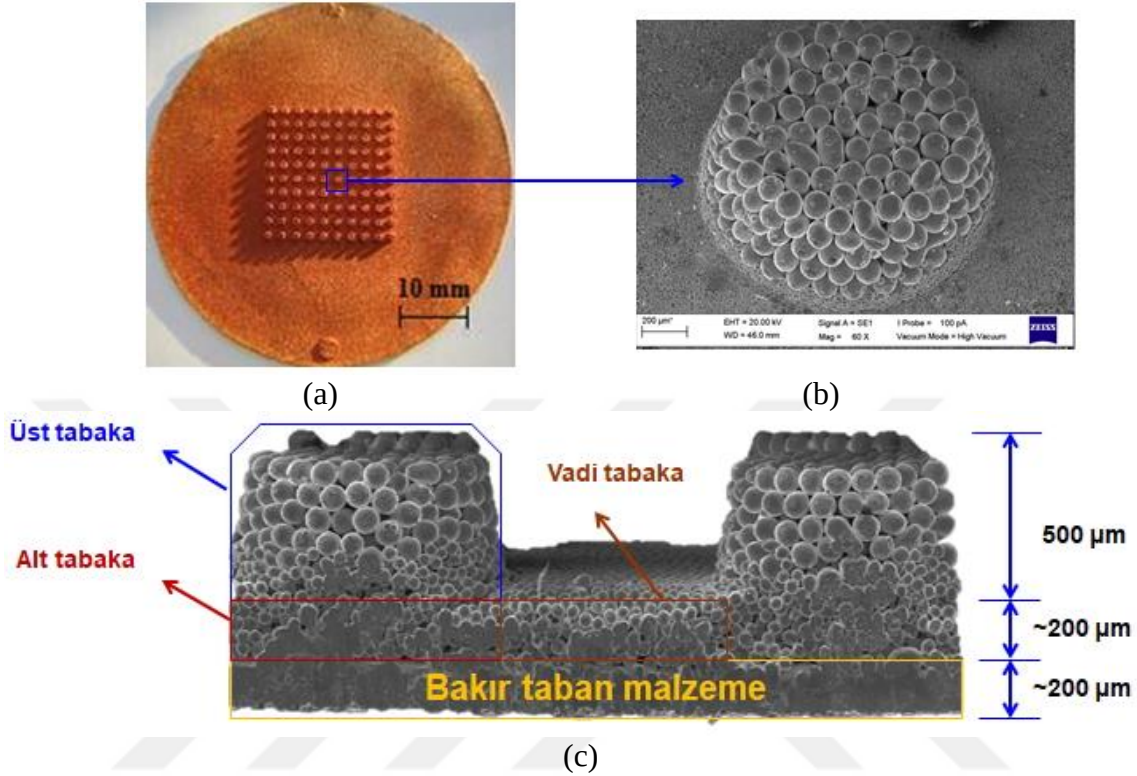
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında bakır tozlarına, farklı deformasyon koşullarında zırh ve otomotiv çeliği numunelerine farklı maksimum kuvvet ve girinim derinliklerinde ölçümler alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Malzemelere yapılan mikro ve nano girinimler deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

2.1. Bakır Tozlarında Mikrogininim

Doktora tezinin ilk aşaması olarak daha önceki çalışmalardan elde kalan saf bakır taban malzeme üzerinde konik şekilde gözenekli sıkıştırılmış Cu tozları üzerinde farklı bölgelerden mikrogininim ölçümü alınmıştır. ISO 14577'e göre sertlik testi aralıkları mikro için 2 N'den az kuvvet ve 0,2 μm 'den fazla girinim derinliği, nano için 0,2 μm 'den az girinim derinliği tanımlanmıştır. Mikrogininim ve nanogirinim arasında ana fark, nanogirinimin lokalize sertliği vermesi, mikrogininim ise geniş alan üzerindeki ortalama sertliği vermesidir. Nanogirinim tane içindeki sertliği verir, mikrogininim farklı tanelerin ortalama değeridir. Elektronik endüstrisinde minyatürleşmeden dolayı sistem sıcaklığının önemli ölçüde yükselmesini önlemek için ısı yayılım oranlarının artırılması gerektiği bildirilmiştir [68]. Saf bakırın piyasada bulunan metaller arasında en yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca yüksek sünekliği, dövülebilirliği, ısı iletkenliği ve korozyona karşı direnci sayesinde elektronik ve telekomünikasyon gibi endüstrilerde öne çıkan malzemedir. En yaygın uygulama yerleri kablolar, devre kartı iletkenleri, ısı eşanjörleri ve tellerdir [69]. Bu nedenle, bakır kullanılarak daha fazla ısı hızlı bir şekilde dağıtılabilir. İşlemcinin daha verimli çalışması ve diğer kritik bileşenlere daha az zarar verme potansiyelinden dolayı süper bilgisayar çiplerinde tercih edilen malzemedir [70]. Şekil 10(a)'da görüldüğü gibi, 55 mm çapında ve 0.2 mm kalınlığında bakır levha üzerinde 100 adet çukur elde edilmiştir. Numuneler daha sonra kontrollü atmosferde 1 saat sinterlemeye tabi tutulmuştur. Şekil 10(b) ve Şekil 10(c)'de gösterildiği gibi, her bir çukur 1 mm taban çapına ve 500 μm yüksekliğe sahiptir. Kontrollü gözeneklilik elde etmek için farklı boyut aralıklarında tozlar kullanılmıştır. Örneğin, vadi ve alt tabaka için nispeten daha küçük boyutlu (0–25, 25–45, 43–65 μm) tozlar

kullanılırken, üst tabakada ise Şekil 10(c)'den görülebileceği gibi 90–106 μm aralığında tozlardan oluşturuldu. Numune imalatının detayları literatürde bulunabilir [71].



Şekil 10. (a) Sinterlenmiş bakır tozlarının fotoğrafı; (b) sıkıştırılmış tozların TEM görüntüsü (üst görünüm); (c) sıkıştırılmış tozların boyutları (ön görünüm)

2.2. Zırh Çeliklerinde Nanogirininim

Zırh çelikleri olarak İsveç merkezli çelik üreticisi SSAB'nin ileri balistik koruma ve emniyet performansı gösteren Ramor ve Armox çelikleri kullanılmıştır. Ramor ve Armox çelikleri, özellikle balistik tehditlere karşı koruyucu malzeme olarak askeri veya sivil araç koruma sistemlerinde ve binaların patlayıcılara karşı korunmasında kullanılmaktadır. Sertlik değerlerinden hareketle isimlendirilmiş bu çelikler arasında Ramor 500, yüksek sertliğe sahip zırh çeliği (high-hardness armour: HHA) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tür çelikler, tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan zırh çelikleridir ve özellikleri ABD askerî standardı MIL-DTL- 46100 ile tanımlanmıştır. Ramor 550 ise ilave-yüksek sertliğe (Extra High-Hardness: EHH) sahip veya çok yüksek sertlikteki (Very High Hardness Armor: VHH) zırh çelikler kategorisinde yer almaktadır. İncelenen zırh çelikleri arasında en yüksek sertliğe sahip olan Armox Advance ise ultra-sert zırh çeliği (Ultra High

Hardness Armor Steel: UHH) kategorisindedir. Zırh çeliklerinin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Zırh çeliklerinin kimyasal özellikleri [72-74].

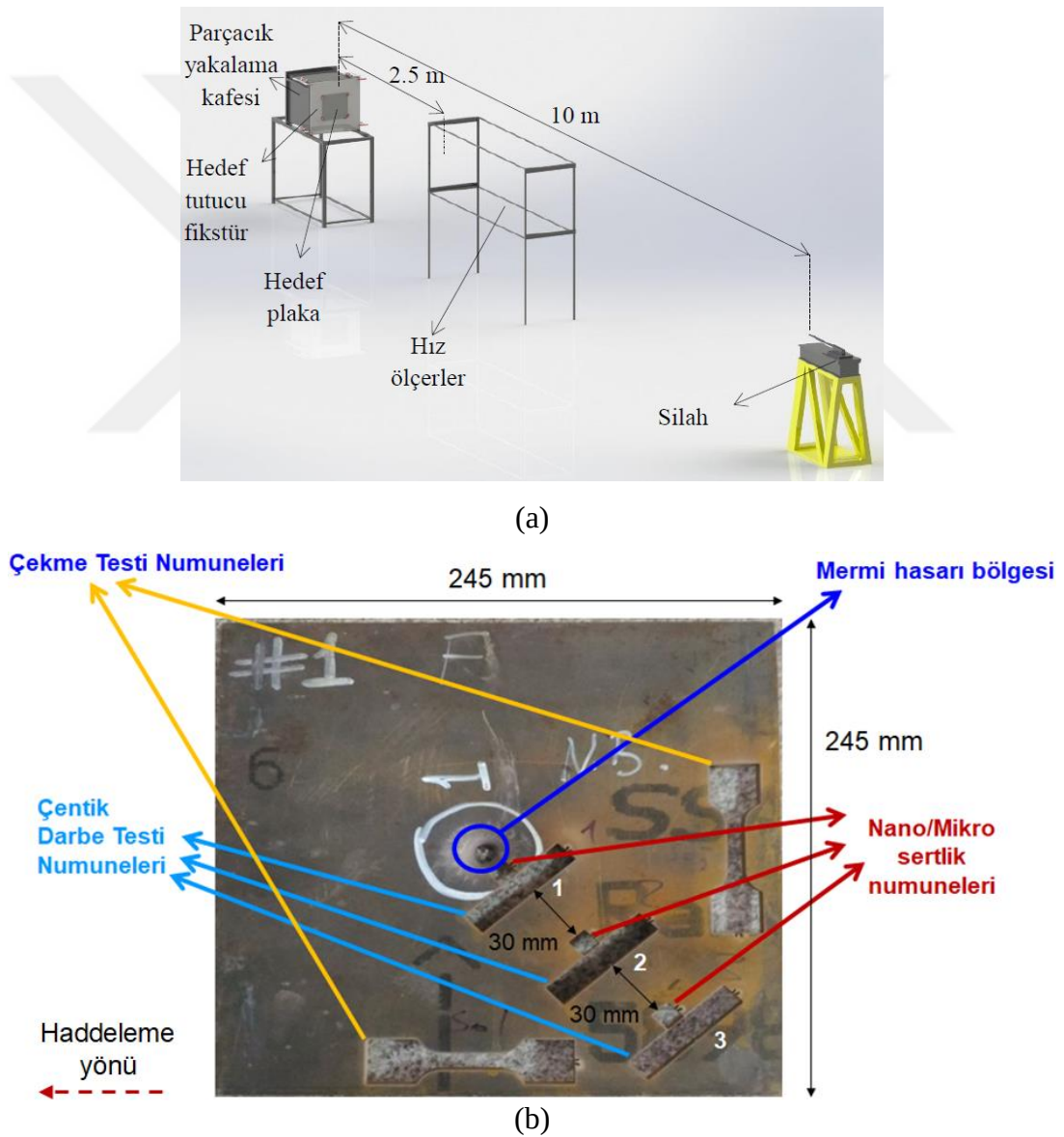
Çelikler	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
Ramor 500	0,35	0,70	1,50	0,015	0,010	1,0	2,0	0,70	0,005
Ramor 550	0,36	0,70	1,50	0,015	0,010	1,50	2,50	0,80	0,005
Armox Advance	0,47	0,70	1,00	0,010	0,003	1,50	3,0	0,70	0,005

Tablo 2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [72-74].

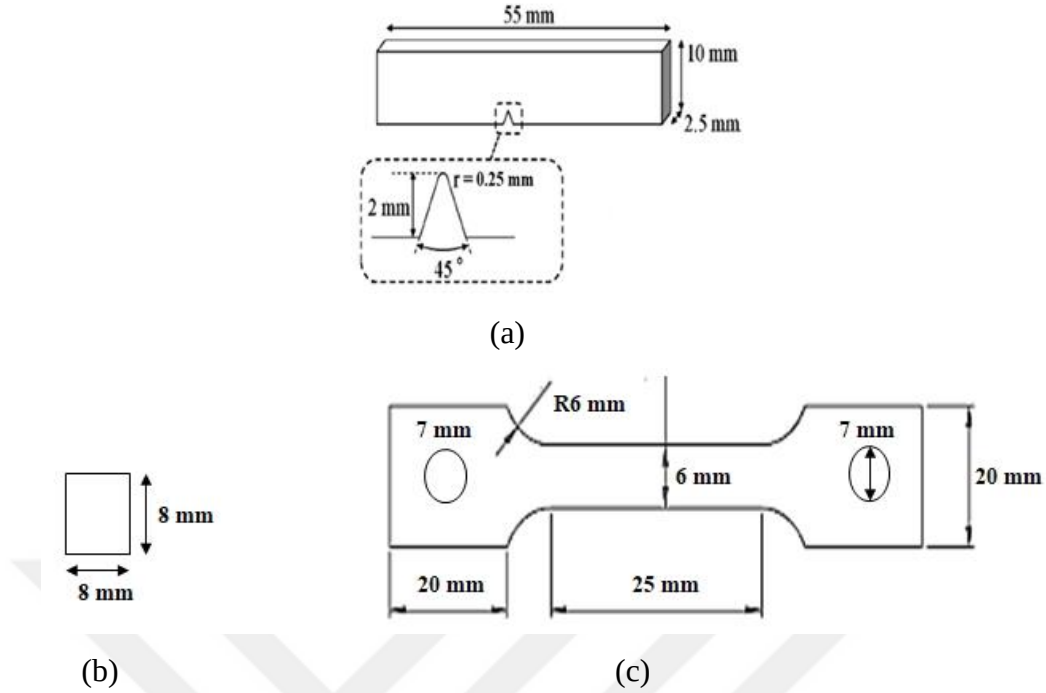
Çelikler	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Ramor 500	1450	1700
Ramor 550	1550	1850
Armox Advance	1600	2250

Şekil 11(a)’da, balistik testlerde kullanılan hedef plaka, hız ölçerler, silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı için Avrupa EN 1522/1523 standardı göz önüne alınmıştır. Testler öncesinde mermi hızı ayarlanarak 7.62 Ball tipi mermi için 820 ± 10 m/s ve 7.62 AP tipi mermi için ise 830 ± 10 m/s hız aralığında çalışılmıştır [75, 76]. Zırh çeliği numunelerine nanogirininim yapılmadan önce numune hazırlama prosedürü uygulanmıştır. İlk olarak, ısı etki oluşturmaması ve iç yapıyı etkilememesi için aşındırıcı su jeti ile kesim yapılmıştır. Bu sayede kesim yapılan bölgelerin mikro/nano mekanik özellikleri muhafaza edilmiştir. Şekil 11(b)’de gösterilen şematiki verilen poligon ortamında atış yapılmış zırh çeliği numuneleri üzerinden (kurşunun plakaya girdiği yerden dışa doğru) üç numune su jeti ile kesilip testler için hazırlanmıştır. Numunelerin mikro/nano boyutta mekanik özelliklerini kıyaslamak için 1 nolu numune, kurşunun plakada en fazla deformasyon etkisine sebep olduğu yerden alınmıştır. 2 ve 3 nolu numuneler ise kurşunun plakaya girdiği yerden dış kenara doğru plakadan su jeti ile kesilmiştir. Bu plakalardan çıkartılan numuneler farklı testler ve ölçümler için bakalite alınmıştır. 320, 600, 1000, 1200, 1500 ve 2000 SiC zımpara kağıtları ile mekanik olarak parlatılmıştır. Daha sonra numune yüzeylerine 1 μ m elmas ve 0,06 alümina süspansiyonlar ile daha hassas parlatma yapılmıştır. Mikroskop analizleri için numunelere Nital (%5 HNO₃ ve %95 Etanol) çözeltisinde 5 sn. dağlama yapılmıştır. Zırh çeliği numunelerine Charpy V-çentik darbe

testi, XRD, nanogirinin ölçümü ve mikroskop analizleri uygulanmıştır. Zırh çelikleri, ASTM E23-16b ve ASTM A370-17a standartlarına göre çentik darbe testi için karakteristik numune uzunluğu, yüksekliği, kalınlığı ve çentik derinliği sırasıyla 55x10x10x2 mm olacak şekilde kesilmiştir. Ayrıca, zırh çeliği plakaları üzerinden çekme testi ve nanogirinin numuneleri de su jeti ile kesim ile elde edilmiştir. Şekil 12’de çeşitli testler için zırh plakasından çıkarılan numunelerinin boyutları gösterilmektedir. Ayrıca, sertlik ve elastisite modülü arasındaki önemli farklılıkları belirlemek için tek yönlü ANOVA ve t-test analizleri yapılmıştır.



Şekil 11. (a) Zırh çeliklerine uygulanan balistik testlerin gerçekleştirildiği düzenek, (b) 7.62 top tipi merminin ve su jeti ile çıkarılan test numunelerinin zırh plakası üzerindeki yerleri

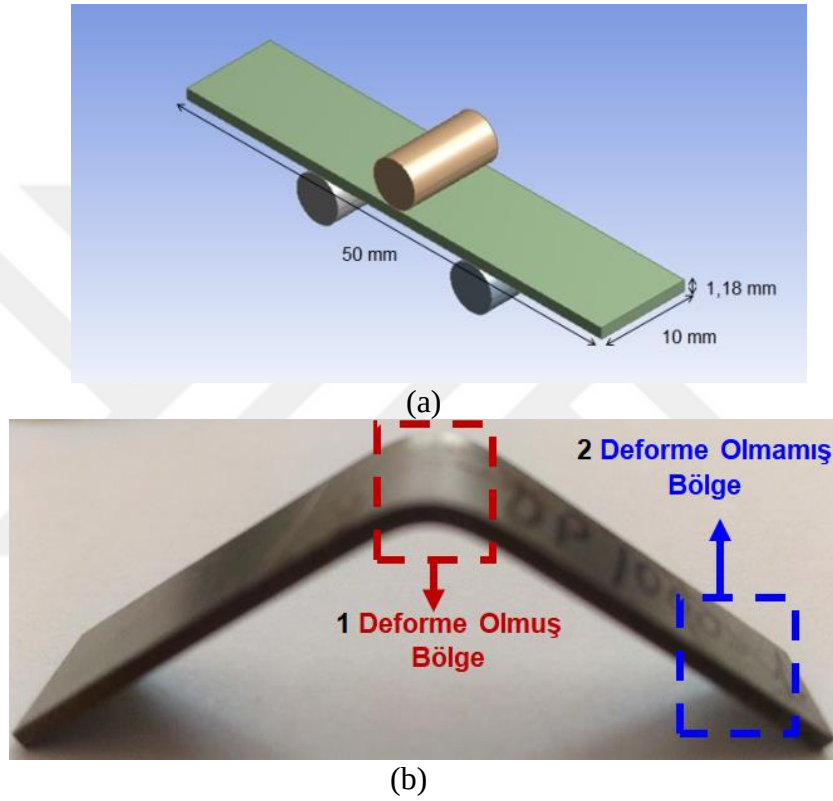


Şekil 12. Zırh plakalarından çıkarılan (a) Charpy V-çentik darbe, (b) nanogirininim ve (c) çekme testi numunelerinin boyutları

2.3. Otomotiv Çeliklerinde Nanogirininim

Bu çalışmada kullanılan DP otomotiv çelik sacları, ultra yüksek mukavemet ve şekillendirilebilirlik performansı gösteren İsveç merkezli çelik üreticisi SSAB tarafından tedarik edildi. Üç nokta eğilme (3 point bending) testine tabi tutulan otomotiv çelik levhaları farklı test ve ölçümlerle incelenmiştir. Saclardan, deformasyon öncesi ve sonrasında hassas şerit testere kesim ile kesim yapılarak nanogirininim ölçümü için numuneler elde edilmiştir. Saclardan çıkartılan numuneler Bölüm 2.2’de belirtilen numune hazırlama işlemleri yapılmıştır. Parlatılan numune yüzeylerinin ortalama pürüzlülük değerleri 0,21 - 0,32 μm arasında elde edilmiştir. Üç nokta eğilme testleri öncesi ve sonrasında, deformasyonun mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için nanogirininim ölçümü yapılmıştır. Malzemelerin sertlik ve elastisite modülü doğrudan nanogirininim ile elde edilmiştir. Ayrıca literatürde önerilen denklemlere dayalı olarak artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. Eğilme testinden elde edilen artık gerilme verileri sayısal olarak incelenmiştir. Nanogirininimden elde edilen veriler, sayısal analizler ile gerilme-birim şekil değişim eğrisi ve sayısal haritalama analizi ile doğrulanmıştır. Şekil 13’te, DP 1000 ve DP 1200 çelik numunelerine uygulanan üç nokta eğilme testi gösterilmektedir. ASTM

D790 standardına göre Instron-3382 (Instron Inc., Norwood, MA, ABD) cihazı kullanılarak 3 noktalı eğilme testleri yapıldı. Dikey yönde zımba hareket hızı 0,05 mm/sn olarak ayarlandı. Test sonrasında numunelerin deforme olmuş 1 nolu bölgesi ile, deformasyondan etkilenmemiş veya minimum düzeyde etkilenen 2 nolu bölgesi üzerinde nanogirininim, artık gerilme (XRD), mickro-Vickers ölçümleri ile optik ve tarama elektron mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. (a) DP çelik sac numunesinin boyutları, (b) 3 noktalı eğilme testinden sonra analiz için deforme olmamış ve deforme olmuş bölgelerinden numunelerin çıkarıldığı yerler

Tez faaliyetleri kapsamında çeşitli mikro, makro test ve ölçümlere tabî tutulan otomotiv çeliklerinin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. İleri yüksek mukavemetli çelikler farklı alt gruplardan oluşur. Tez kapsamında tercih edilen çift fazlı çelikler, otomotiv endüstrisinde çarpma dayanımını artırmaya, ağırlık hafifletmeye olanak sağlaması, düşük maliyetinden dolayı yan darbe kirişleri, tamponlar ve yapısal bileşenler gibi otomotiv uygulamaları için sıklıkla tercih edilen bir malzeme grubudur.

Tablo 3. Otomotiv çeliklerin kimyasal bileşimleri [77-79].

Çelikler	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%
Docol DP 800	0,12	0,2	1,5	0,015	0,002	0,04	0,015
Docol DP 1000	0,15	0,5	1,5	0,015	0,002	0,04	0,015
Docol DP 1200	0,17	0,5	1,6	0,015	0,002	0,04	0,015

Tablo 4. Otomotiv çeliklerin mekanik özellikleri [77-79].

Çelikler	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Docol DP 800	500-650	800-900
Docol DP 1000	700-950	1000-1200
Docol DP 1200	950-1150	1200-1400

2.4. Doktora Tezi Kapsamında Gerçekleştirilen Analizler

Tablo 5'te tez süresince kullanılan numunelere yurt içinde farklı merkezlerde yapılan testler verilmiştir. Tüm testler oda sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Tez kapsamında numunelerin test edildiği yerler

Numuneler	Ölçüm Alınan Laboratuvar ve Araştırma Merkezleri
Zırh Çelikleri (Ramor 500, Ramor 550, Armox Advance)	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü Laboratuvarı <i>Mikrogirininim</i>
	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (MARGEM) <i>Nanogirininim, AKM</i>
	Erzincan Binali YILDIRIM Üniversitesi Merkez Laboratuvarı (EÜTAM) <i>Mikrogirininim, TEM</i>
	KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları <i>Darbe testi, Mikrosertlik, Eğilme testi, Numune hazırlama</i>
Otomotiv Çelikleri (DP 800, DP 1000, DP 1200)	Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YÜTAM) <i>XRD-Artık gerilme, TEM</i>
	İSTE Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İSTE-BTM) <i>EDS, TEM</i>
	ODTÜ Merkezi Laboratuvar (MERLAB) <i>Mikrogirininim, TEM</i>

2.4.1. Zırh ve Otomotiv Çeliği Numunelerinin Hazırlanışı

Zırh ve otomotiv çeliği numuneleri üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmeden önce numune hazırlama prosedürü uygulanmıştır. Şekil 14'te ilk önce ısı etki oluşturmaması için aşındırıcı su jeti ile kesim yapılmıştır. Bu sayede kesim yapılan bölgelerin mikro/nano mekanik özellikleri muhafaza edilmiştir.



Şekil 14. Numunelerin su jeti tezgahında eldesi (SDT Su Jeti, Ankara)

2.4.2. Zırh Çeliklerine Uygulanan Darbe Testleri

Metallerin özellikle gevrek kırılmaya elverişli şartlardaki mekanik özellikleri hakkında bir fikir elde etmek amacıyla çentik darbe testleri uygulanır. Bu kapsamda, boyutları darbe testine uygun olduğu için sadece zırh çelik numuneleri üzerinde Charpy V-çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 15'te KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ve zırh çeliği numunelerinin test edildiği darbe test cihazını gösterilmektedir. İncelenen malzemelerin darbe enerjisi ve kırılma tokluğu değerlerini elde etmek için Charpy V-çentik darbe testleri yapılmıştır. Literatürde, darbe enerjisinden kırılma tokluğunu hesaplamışlardır [80]. Denklem 14'te darbe enerjisinin düzlem gerilme statik kırılma tokluğuna (K_{IC}) dönüşümü (K_{IC} için $\text{MPa}\sqrt{m}$, for σ_y için MPa, ve E_{CVN} için J birimleri kullanılarak) gösterilmiştir.

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 0.64 \left(\frac{E_{CVN}}{\sigma_y}\right) - 0.0064 \quad (14)$$



Şekil 15. V-çentik darbe test cihazı (KTÜ Makine Müh. Bölümü)

2.4.3. Mikrosertlik Testleri

Sertlik, malzemenin plastik deformasyona (batma veya çizilmeye) karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Nanogirinin elde edilen sertlik değerlerinin yanısıra, farklı bir karşılaştırmaya olanak sağlaması nedeniyle, incelenen numuneler üzerinde Şekil 16'da verilen Duramin-4 (Struers, Cleveland, OH, USA) mikro Vickers cihazı ile sertlik ölçümleri alınmıştır. Bu sertlik ölçümünde, ucun batırılması ile oluşan izin derinliği ya da büyüklüğü (genişliği) ölçülerek malzemelerin sertlik değerleri hesaplanır. Buna göre malzeme ne kadar yumuşak ise oluşan izin derinliği ya da genişliği o kadar büyük, sertlik değeri de o oranda düşük olur.



Şekil 16. Mikro Vickers sertlik ölçümleri için Struers Duramin sertlik cihazı (KTÜ Makine Müh. Bölümü)

2.4.4. Üç Nokta Eğilme Testi

İki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğilme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir. Şekil 17’de eğilme testi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Zırh çeliği numuneleri üzerinde balistik testler ile deformasyon etkisi oluşturulduğundan, tez kapsamında sadece yüksek mukavemetli otomotiv çeliklerine 3-nokta eğilme testi uygulanmıştır.

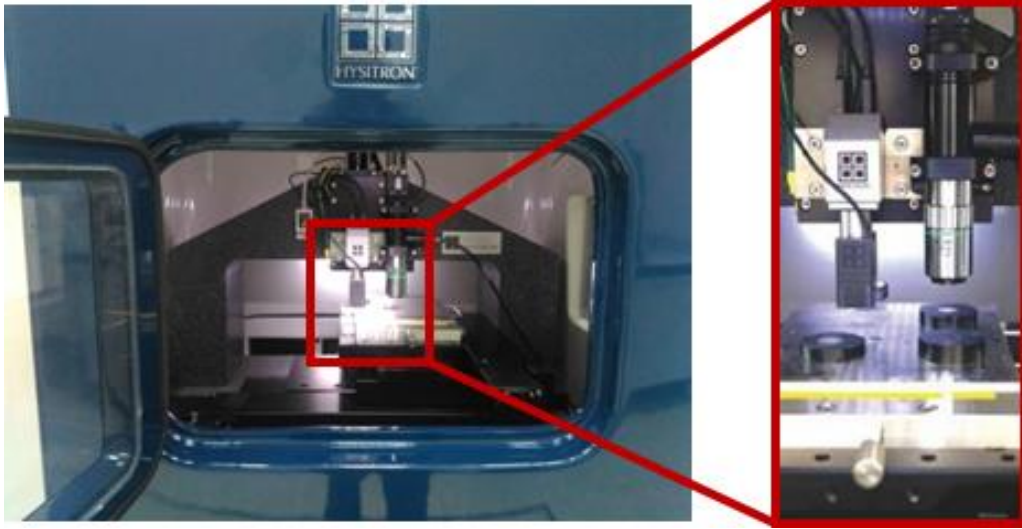


Şekil 17. Çift fazlı otomotiv çeliği numunelerine uygulanan 3-nokta eğilme testi

2.4.5. Nanogirininim

Nanogirininim, araştırmacıların farklı şekil ve boyutlarda malzemelerin elastisite modülü ve sertliği gibi mekanik özelliklerini ölçmelerini sağlayan göreceli olarak yeni bir ölçüm yöntemidir. En önemlisi, bu teknik herhangi bir numune hazırlamasına ihtiyaç duymaz. Sert süper alaşımlardan yumuşak biyomalzemelere kadar çeşitli malzemelerin özelliklerini saniyeler içinde ölçebilir. Numunelerin hazırlanmasından nihai sonuçlara kadar günler süren normal tek eksenli çekme ve kesme testi yöntemlerine göre nanogirininim yöntemi önemli bir avantaj sunmaktadır. Malzemelerin mekanik özelliklerini mikron altı seviyede ölçmek için yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Nanogirininim ölçümü, literatürde ilk olarak Doerner [81] tarafından önerilmiş ancak

özellikle Oliver'ın [82] çalışmalarının ardından yaygınlık kazanmıştır. Çok farklı malzemelerin (yumuşak, sert, gevrek, sünek, metal, seramik, polimer, cam, canlı hücre dokuları vb.) ve bu malzemelerden oluşturulan ince filmlerin mekanik özelliklerini (sertlik, elastisite modülü, kuvvet - yer değiştirme vb.) doğrudan belirlemekte kullanılır. Şekil 18'de, girinimlerde kullanılan TI 950 TriboIndenter nanogirininim cihazı gösterilmektedir. Yöntemin esası, numuneye uygun bir batıcı uç (Berkovich, küp köşe ve Vickers vb.) ile numune yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen bir maksimum değere kadar kuvvet uygulanması ve bu maksimum kuvvet değerine ulaştıktan sonra tekrar kademeli olarak kuvvetin kaldırılması esasına dayanır. Girinim ucunun numuneye nüfuz etme derinliği, kuvvetin bir fonksiyonu olarak ölçülür. Yükleme ve geri yükleme sonucunda elde edilen kuvvet (mN) – yer değiştirme (nm) eğrileri analiz edilerek numunenin sertlik ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri belirlenir. Literatürde önerilen bazı denklemler ile malzemelerin kırılma tokluğu, gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi, artık gerilme vb. mekanik özelliklerinin eldesinde de uygulanmaktadır. Nanogirininim cihazlarında – şayet mevcut ise – numunelerin AKM görüntüleri ile elde edilebilmektedir.



Şekil 18. Tez kapsamında kullanılan TI 950 TriboIndenter nanogirininim cihazı (Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi – MARGEM)

Nanogirininim, nanometrenin onda birinden daha az bir yer değiştirme ve mikro-Newton'dan daha az bir kuvvet çözünürlüğüne sahiptir. Penetrasyon derinliği, genellikle endüktif veya kapasitif bir yer değiştirme sensörü kullanılarak ölçülür. Kuvvet;

piezoelektrik elemanın genişlemesi, manyetik alandaki bobinin hareketi veya elektrostatik kuvvet oluşumu ile uygulanabilir. Piezoelektrik ile 1 nanometre altı konumlandırma hassasiyeti sağlayabildiği bilinmektedir. Bu özelliklerinden dolayı piezoelektrik birçok nanogirininim cihazında kullanılmaktadır. Tablo 6’da tez kapsamında zırh ve otomotiv çeliği numunelerine uygulanmış nanogirininim ölçüm şartları gösterilmektedir. Nanogirininim ölçümleri hem kuvvet hem de yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. Nanogirininim ölçüm şartları

Numune	Ölçüm Adedi (Matris)	İki ölçüm arası mesafe (μ)	Kuvvet (mN)	Yer Değiştirme (nm)
Ramor 500	4x4	4, 15	10	50, 100
Ramor 550	4x4	15		50, 150
Armox Advance	4x4	4, 15	10	50
DP 800	3x3	15	50,100	
DP 1000	3x3, 4x4	5, 15	50	50, 200
DP 1200	3x3, 4x4, 5x5	5, 15	50	50, 200

2.4.6. Tarama Elektron Mikroskobu

Tez çalışmalarında çelik numunelerin mikroyapılarının incelenmesi amacıyla tarama elektron mikroskobu FEI-Quanta 250 TEM (Hillsboro, OR, USA)_kullanılmıştır. Şekil 19’da verilen taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar, numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. TEM’de görüntü oluşturmak için elektron demeti tarafından uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan faydalanılır. Numunenin farklı bölgelerinden kopan ikincil elektronların sayısında değişim öncelikle demetin yüzeyle buluşma açısına, yani yüzeyin topografisine bağlıdır. İkincil elektronların yanında geri saçılan elektronlar, karakteristik X-ışınları ile sinyaller elde edilerek uygun topografi ve kompozisyon analizleri yapılır. Tez faaliyetleri kapsamında, çelik numunelerin içyapıları ve nanogirininim ölçümlerinde numune üzerinde oluşturulan girininimlerin incelenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 19. Numune yüzeylerinin incelenmesinde kullanılan tipik bir tarama elektron mikroskobu (Erzurum Teknik Üniversitesi – YUTAM)

2.4.7. XRD ile Artık Gerilme Testi

Artık gerilmeler, dış yükleme kuvvetleri kaldırıldıktan sonra malzemede mevcut olan iç gerilmelerdir. Makine ile işleme, döküm, alaşımlama, su verme, kesme ve aletle işleme gibi imalat işlemlerinin tümü artık gerilmeye sebep olabilir. Artık gerilme ölçümleri özellikle kalite kontrol amaçları için yararlıdır. Artık gerilme dağılımının belirlenmesi önemlidir, çünkü yüksek artık gerilme bir bileşenin erken hasarına yol açabilir. Malzemelerin ön gerilmeler, ısı etkileri veya deformasyona uğramaları sonucunda iç yapıda oluşan artık gerilmeleri belirlemek amacıyla X-ışınları kırınımı yöntemi kullanılır. Bu yöntemde yüksek çözünürlüklü difraktometre sistemi, 0.00001° 'lik açısal hassasiyete ulaşılmasını sağlayan, optik kodlayıcılar tarafından kontrol edilen yüksek verimli, doğrudan tahrikli tork motorlar kullanılmaktadır. Şekil 20'de tez faaliyetleri sırasında ölçüm alınan XRD cihazı gösterilmiştir. X-ışın difraktometresi ile, hizalamayı gerektirmeyen modüler yapısı sayesinde, toz ve ince filmler için iç yapı, faz, kristal yönelimi ve artık gerilme analizleri yapılabilmektedir. XRD ile artık gerilme ölçümünde elektro-parlatma ile malzeme çıkarma ile gerilme durumunu değişmemesi, büyük bileşenlerden mumune alınmasına gerek kalmadan tahribatsız yüzey ölçümü ve nötron ile karşılaştırıldığında daha düşük maliyet gibi faydaları sıralanabilir.



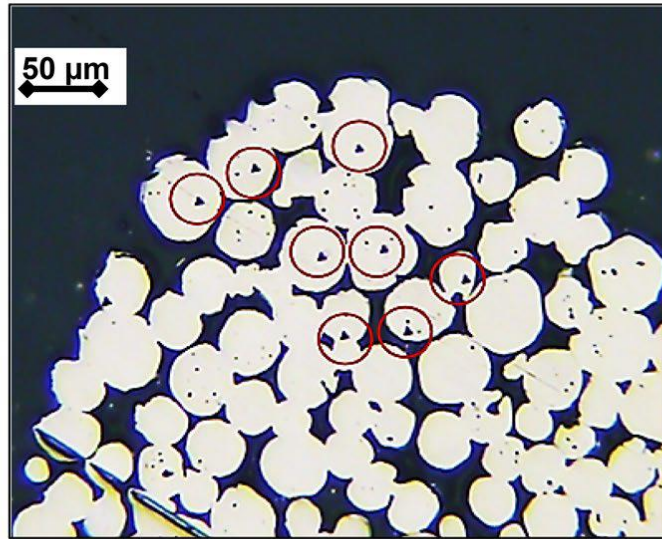
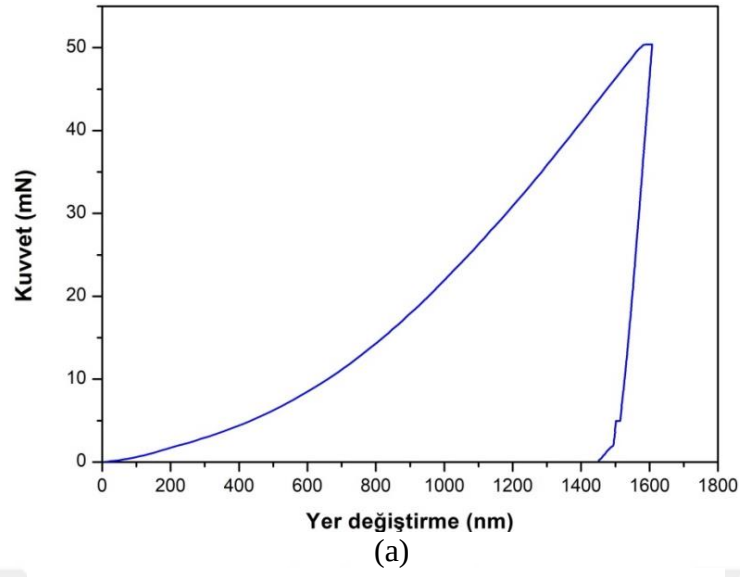
Şekil 20. Artık gerilme ölçümünde kullanılan XRD cihazı
(Erzurum Teknik Üniversitesi – YUTAM)

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Bakır Tozları Üzerine Yapılan Mikroginimin Analizi

Değişen miktarda gözenekli yüzey yapısına sahip alt tabaka ve üst tabaka sıkıştırılmış tozlar ve saf bakır plaka malzemesi üzerinde ayrı ayrı mikroginimler gerçekleştirilmiştir. Farklı kuvvetler ile mikroginimler gerçekleştirilmiş ve sonuçların tekrarlanabilirliği dikkate alınarak 50 mN maksimum girinim kuvveti oda sıcaklığında tatbik edilmiştir. Daha küçük girinim kuvvetleri ile yetersiz deformasyona (bozulmuş kristal kafes) ve/veya tane sınırı tepkisine neden olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, dislokasyon ve mikroyapısal davranış oluşturmak için yüksek girinim kuvvetleri kullanılmalıdır. Bu amaçla seçilen kuvvet, literatürde bildirilen kuvvetler ile uyumlu olduğu görülmüştür. [83-87]. Sertlik ve elastisite modülü verilerinin değişiminin önemini ortaya çıkarmak için istatistiksel analizler yapılmıştır. Sertlik ve elastisite modülü arasında önemli farklılıkları belirlemek için $p < 0.05$ olan tek yönlü ANOVA testleri uygulandı. Bakır tozları üzerinde gerçekleştirilen mikroginim ölçümlerinin sonuçları; *Ekmekci vd., Microindentation on the Porous Copper Surface Modulations, Applied Physics A, 123 (2017) 3655047* makalesi olarak yayınlanmıştır.

Sertlik ve elastisite modülü değerlerini ölçmek için en az dokuz girinim gerçekleştirilmiştir. Şekil 21’de üst tabaka sıkıştırılmış tozlarda 50 mN maksimum girinim kuvveti ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği gösterilmektedir. Eğri, saf bakır numunesinin girinim sırasında elastoplastik deformasyon davranış sergilediğini gösterir. Uygulanan maksimum kuvvet, 0.1 mN/s’lik yükleme hızı ile 50 mN idi. Sıkıştırılmış Cu tozlarının farklı özelliklerinde benzer girinim kuvvet - yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

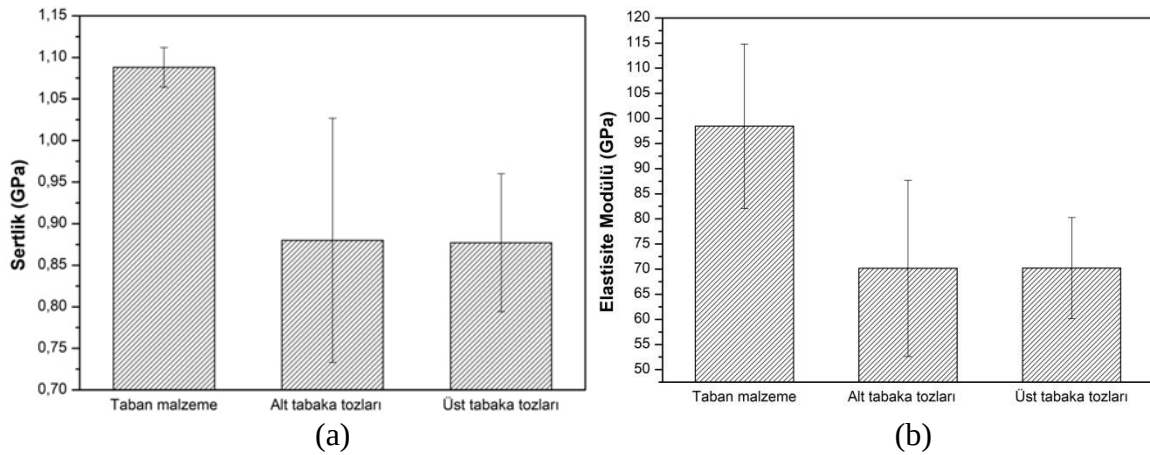


(b)

Şekil 21. (a) Sıkıştırılmış bakır tozlarının üst kısmından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve (b) girinim alanının optik mikroskop görüntüsü

Sıkıştırılmış Cu tozlarının farklı tabakalarından elde edilen sertlik değerleri Şekil 22(a)'da karşılaştırılmıştır. Cu levha (taban malzeme) ve tozlar (sıkıştırmanın alt ve üst tabakası) için sertlik değerleri 0.87-1.12 GPa aralığında kaydedilmiştir. Kompaktların alt ve üst tabaka (0.87-0.88 GPa) arasında sertlik değerlerinde önemli ölçüde küçük farklılıklar gözlemlendi. Taban malzeme için ortalama sertlik değeri ise 1.06 GPa olarak ölçülmüştür. Sıkıştırılmış numuneden elde edilen elastisite modülü değerleri Şekil 22(b)'de verilmiştir. Sıkıştırılmış tozların hem alt hem de üst tabakalar için elastisite modülü

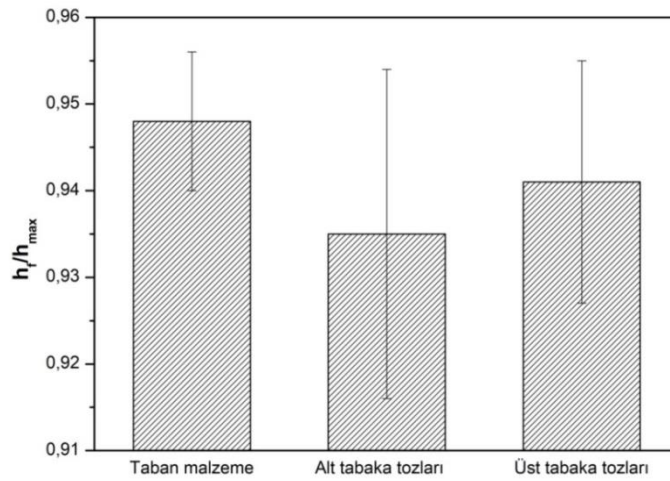
değerleri 70 GPa olarak kaydedildi. Bakır taban malzemesi için ortalama elastisite modülü 100 GPa'dır. Tozlar için elde edilen değerlerde nispeten daha yüksek varyasyon gözlemlendi. Sıkıştırma sırasında saf bakırın düzgün olmayan plastik deformasyonundan dolayı tozlardan elde edilen elastisite modülü değerlerinde dağınık veriler olarak saptanmıştır. Elastisite modülü değerleri arasındaki olası farklılıkları ortaya çıkarmak için tek yönlü ANOVA testi yapılmıştır. Elastisite modülü değerlerindeki değişikliklerin önemsiz olduğu bulunmuştur. Sıkıştırılmış parçanın alt - üst tabakalarında Cu tozları ve taban malzeme için elastisite modülü değerleri 70-114 GPa aralığında kaydedildi. Her bir sertlik ve elastisite modülü değeri, aynı koşullar altında gerçekleştirilen en az dokuz girinimin ortalaması olarak rapor edildi. Sıkıştırılmış parçanın farklı bölgelerine ait sertlik ve elastisite modülü değerleri arasında olası farklılıkları ortaya çıkarmak için tek yönlü ANOVA testi uygulanmıştır. Sertlik ve elastisite modülü değerlerinde farklılıkların önemsiz olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 22. Cu taban malzeme (plaka), alt ve üst tabakalar için 50 mN girinim kuvveti ile elde edilen (a) sertlik ve (b) elastisite modülü değerleri

Bir malzemenin deformasyon sertleşme özellikleri, girinim ucunun altındaki deformasyon davranışını belirler. Yığılma ve çökme, nanogirinimde temas alanını ve sonuçları önemli ölçüde etkileyen iki yaygın kriterdir. Yığılmada temas alanı etrafında malzeme yukarı yönde deforme olma eğilimindeyken, çökmede ise aşağı yönde deforme olur. Tavlanmış sünek metal malzeme için yığılma daha fazla görülmüştür. Gevrek sertleştirilmiş metalik camlar için çökme daha belirgin olduğu bildirilmiştir [51, 88, 89]. Moharrami ve Bull [11] artan girinim kuvveti ile yığılma etkisinin arttığı sertlik değerleri

için %35 ve elastisite modülü için %15 gerçek değerlerden sapabileceğini bildirmiştir. Yığılma veya çökmenin meydana gelip gelmediğini araştırmak için en yaygın yol h_f/h_{max} oranını kontrol etmektir. Burada, h_f son girinim derinliği ve h_{max} maksimum girinim derinliğidir. Bu oran 0 ile 1 arasında değerler alabilir. Alt sınır (0) tam elastik durumu, üst sınır değeri (1) ise rijit-plastik davranışa karşılık gelir. Bu oran, nanogirinin geri yükleme eğrisinden kolaylıkla elde edilebilir. Oliver ve Pharr, h_f/h_{max} oranı 0.7'den büyük olduğunda, yığılma etkisinin yaşanmasının muhtemel olduğunu belirtmişlerdir [56]. Şekil 23'te taban malzeme, alt ve üst tabakalar için elde edilen h_f/h_{max} değerlerini gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, oran 0,90-0,97 aralığında (0,7'den büyük) elde edilmiştir. Deformasyon sertleşme özelliğine sahip bakır tozları sıkıştırıldıktan sonra sinterlemeye tabi tutulduklarından yığılma yaşanmadı.



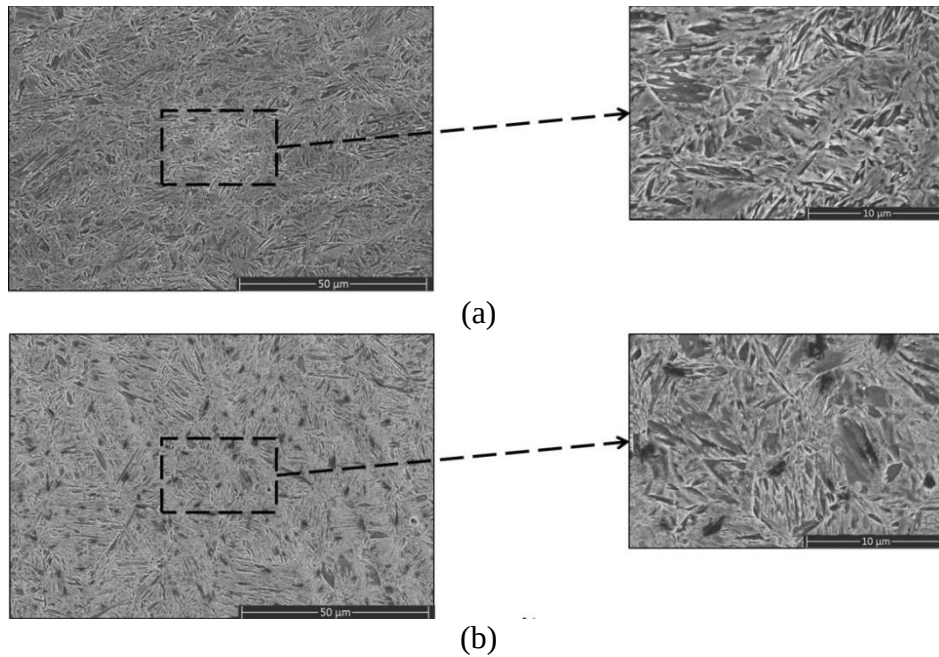
Şekil 23. Cu taban malzeme, alt ve üst tabakalar için h_f/h_{max} değerleri

Bu çalışmada, sıkıştırılmış ve sinterlenmiş küresel bakır tozlarının mekanik özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Mikrogirininler, sıkıştırılmış bakır tozlarında taban malzeme, alt ve üst tabakalar olmak üzere üç farklı bölgede gerçekleştirilmiştir. Bakır taban malzeme üzerindeki mikrogirininler, maksimum 50 mN girinim kuvveti ile gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülü değerleri 78–111 GPa aralığında, sertlik değerleri ise 1.06–1.12 GPa aralığında kaydedilmiştir. Sıkıştırılmış tozların alt ve üst tabakalarında aynı 50 mN girinim yüklemede sırasıyla sertlik 0.88 GPa ve elastisite modülü 70.1 GPa değerleri bulunmuştur. Her durumda, malzemenin elastisite modülü artan sertlikle artmıştır. Cu taban malzemesinin elastisite modülü, alt ve üst tabakalar için biraz daha

yüksek olduğu bulundu. Sonuçlardaki olası farklılıkları kontrol etmek için tek yönlü ANOVA analizleri ($p \leq 0.05$ için) yapıldı, ancak hem sertlik hem de elastisite modülü değerlerinde girinim kuvveti (50 mN) ile meydana gelen değişiklikler için önemsiz olduğu ortaya çıktı. Sonlu elemanlar girinim modeli oluşturulmuş ve analizlerde giriş olarak girinimin yer değiştirme kullanılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonundan elde edilen kuvvet - yer değiştirme eğrilerinin, girinim ölçümünden elde edilen verileri çok iyi yakınsadığı bulunmuştur.

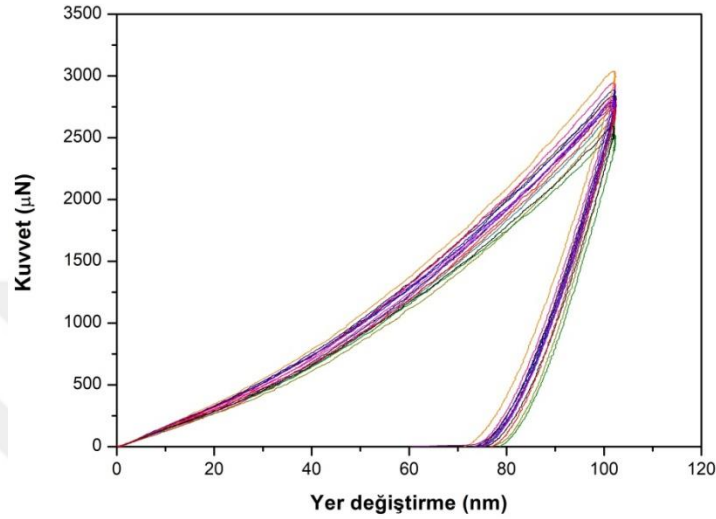
3.2. Zırh Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler

Şekil 24'te Ramor 550 ve Armox Advance numunelerine dağlama sonrası taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen içyapı görüntüleri verilmiştir. İç yapıda yoğun olarak iğne formunda temperlenmiş martenzit ile yoğun bir şekilde tane sınırları olduğu gözlenmiştir. Bu gözlemler, literatürde Armox 500T zırh çeliği için literatürde verilen mikroyapı görüntüleri ile uyum içindedir [90, 91]. Bu çalışmanın sonuçları Journal of Testing and Evaluation dergisinde yayınlanmıştır (*Ekmekci ve Cora, Comparison of Mechanical Properties Obtained for Armor Steels: Conventional Methods vs. Nanoindentation, Journal of Testing and Evaluation, 51,4 2023*).



Şekil 24. (a) Ramor 550 ve (b) Armox Advance numunelerinin TEM görüntüleri

Şekil 25'te Ramor 500 numunesi üzerinde yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen nanogirinin ölçümünden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi maksimum girinim kuvveti 2,5 - 3 mN arasında değişirken maksimum artık yer değiştirme 75 - 80 nm arasında elde edilmiştir.



Şekil 25. Ramor 500 numunesine uygulanan nanogirinin ölçümünden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri

3.2.1. ANOVA ve t-test Analizleri

Varyans analizi (ANOVA) ve t-test, gruplar arasında ortalamaların karşılaştırılması için hipotezin test edilmesinde kullanılan istatistiksel yöntemlerdir. ANOVA üç veya daha fazla grup arasındaki ortalamaları karşılaştırmak için kullanılırken, t-testi iki grup arasındaki ortalamaları karşılaştırmak için kullanılır. ANOVA ve t-test'te anlamlı bir p değeri, en az bir çift grup arasında ortalama farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını gösterir [92]. Zırh çeliklerinde sertlik ve elastisite modülü sonuçlarının hassasiyetini ortaya çıkarmak için istatistiksel analizler yapılmıştır. Deformasyonun etkisini ortaya çıkarmak için bağımlı t-testi ve farklı malzemeler arasındaki olası farklılıkları ortaya çıkarmak için %95 güven aralığı ile bağımsız t-testi tercih edildi. Tablo 7 bağımlı t-testi sonuçlarını özetlemektedir. Ramor 500 için hem sertlik hem de elastisite modülü değerlerindeki değişiklikler önemli ölçüde farklı bulunurken, Ramor 550 için varyasyonlar önemsiz bulunmuştur. Öte yandan, deformasyon uygulanan Armox Advance için mekanik özellik farklılıklarının önemsiz olduğu bulunmuştur. Araştırılan malzemeler

arasındaki mekanik özelliklerdeki farklılıkları analiz etmek için, Tablo 8'de verildiği gibi bağımsız t-testi sonuçlarında, iki malzemenin herhangi bir kombinasyonu için hem sertlik hem de elastisite modülü değerlerinin önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür.

Tablo 7. Malzeme grupları arasında bağımlı t-testi

Karşılaştırılan Gruplar	Sertlik (GPa)		Elastisite Modülü (GPa)	
	Ortalama±SS	p-değeri	Ortalama±SS	p-değeri
Ramor 500 Deforme olmuş vs. Ramor 500 Deforme olmamış	7,79±0,75	0,002	231,8±8,86	0,003
Ramor 550 Deforme olmuş vs. Ramor 550 Deforme olmamış	7,52±0,53	0,200	223,2±6,94	0,250
Armox Advance Deforme olmuş vs. Armox Advance Deforme olmamış	9,42±0,42	0,052	220,3±4,56	0,054
	9,16±0,44		223,4±5,94	

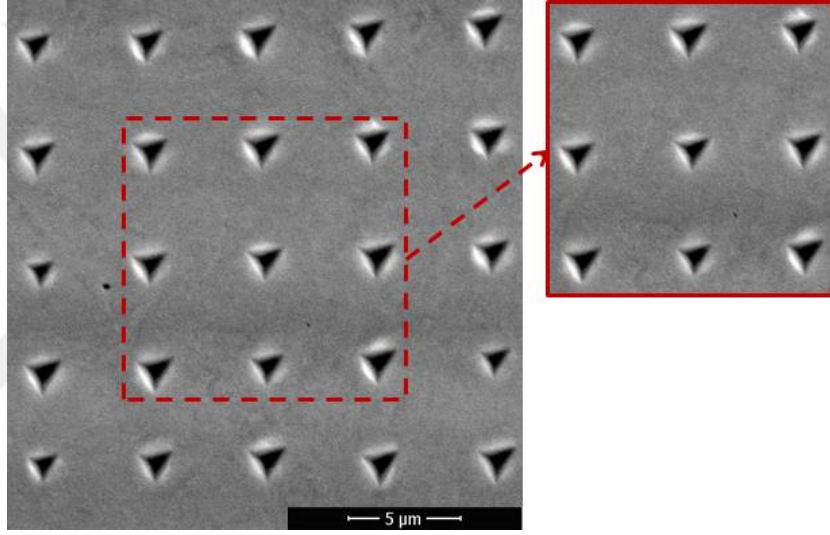
Tablo 8. Malzeme grupları arasında bağımsız t-testi

Karşılaştırılan Gruplar	Sertlik (GPa)		Elastisite Modülü (GPa)	
	Ortalama±SS	p-değeri	Ortalama±SS	p-değeri
Ramor 500 Deforme olmuş vs. Ramor 550 Deforme olmuş	8,60±0,47	0,000	246,26 ± 4,52	0,017
Ramor 500 Deforme olmamış vs. Ramor 550 Deforme olmamış	8,18±0,34	0,000	211,03 ± 5,52	0,000
Armox Advance Deforme olmuş vs. Ramor 500 Deforme olmuş	9,95±0,33	0,000	195,41 ± 2,80	0,000
Armox Advance Deforme olmamış vs. Ramor 500 Deforme olmamış	9,67±0,37	0,000	232,58 ± 4,50	0,000
Armox Advance Deforme olmuş vs. Ramor 550 Deforme olmuş	9,95±0,33	0,000	195,41 ± 2,80	0,000
Armox Advance Deforme olmamış vs. Ramor 550 Deforme olmamış	9,67±0,37	0,000	232,58 ± 4,50	0,000
Ramor 500 Deforme olmuş vs. Ramor 550 Deforme olmamış	8,60±0,47		246,26 ± 4,52	
Ramor 500 Deforme olmamış vs. Ramor 550 Deforme olmuş	8,18±0,34		211,03 ± 5,52	
Ramor 500 Deforme olmuş vs. Armox Advance Deforme olmuş	8,60±0,47		246,26 ± 4,52	
Ramor 500 Deforme olmamış vs. Armox Advance Deforme olmuş	8,18±0,34		211,03 ± 5,52	
Ramor 500 Deforme olmuş vs. Armox Advance Deforme olmamış	8,60±0,47		246,26 ± 4,52	
Ramor 500 Deforme olmamış vs. Armox Advance Deforme olmamış	8,18±0,34		211,03 ± 5,52	

SS: Standard sapma

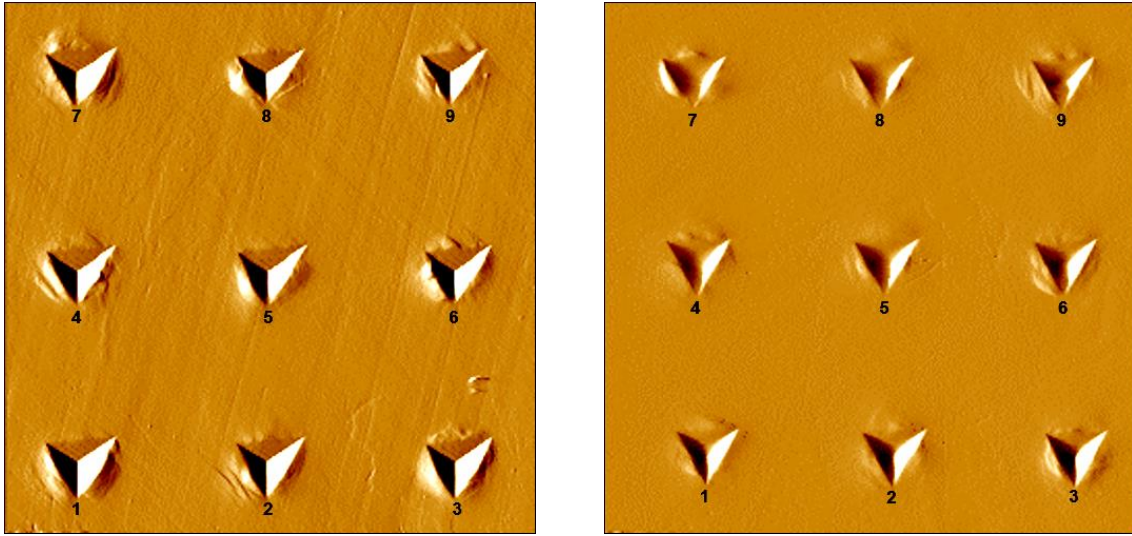
3.2.2. Zırh Çeliklerinin AKM Analizleri

Nanogirinin uygulanan bazı numuneler üzerinde atomik kuvvet mikroskobu (atomic force microscope) ile ölçümler alınmıştır. Numunelerin girininim izlerinin görüntüleri nanogirinin cihazında atomik kuvvet mikroskobu ile elde edildi. Yüzey pürüzlülüğünü ve yığılma etkilerini gözlemlemek için AKM görüntüsü incelenmiştir. Şekil 26’da, Ramor 500, Ramor 550 ve Armox Advance zırh çeliği numuneleri üzerinde 5x5 matris şeklinde nanogirinin yapılan alanın ortasından 3x3 matrislik kısmına ait TEM görüntüleri verilmiştir. AKM analizleri 3x3 matris girininimler üzerinde yapıldı ($\sim 100 \mu\text{m}^2$ ’lik alan).



Şekil 26. Zırh çeliği numunelerine uygulanan 5x5 matris şeklindeki girininimlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve atomik kuvvet mikroskop ölçümlerinin alındığı bölge

Şekil 27’de Ramor 500 ve Armox Advance numunelerine ait parlatılmış yüzeylerin 220 nm derinliğe kadar girininim izlerinin AKM görüntüleri verilmiştir. Numuneler üzerinde 5x5 ölçüm alınmış olsa da AKM cihazının bir defada tarayabileceği alan kısıtı nedeniyle, 3x3 ölçüm matrisi gösterilmiştir. Tablo 9’da ise yine aynı analizden elde edilen zırh çeliği numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde $0.11-0.18 \mu\text{m}$ aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen pürüzlülük değerleri, mikroyapıdan ziyade uygulanan parlatma işlemine bağlı olduğu kanaati oluşmuştur.



(a)

(b)

Şekil 27. (a) Ramor 500 ve (b) Armox Advance numuneleri üzerinde nanogirininim uygulandıktan sonra elden edilen atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri

Tablo 9. Zırh çeliği numunelerin pürüzlülük değerleri

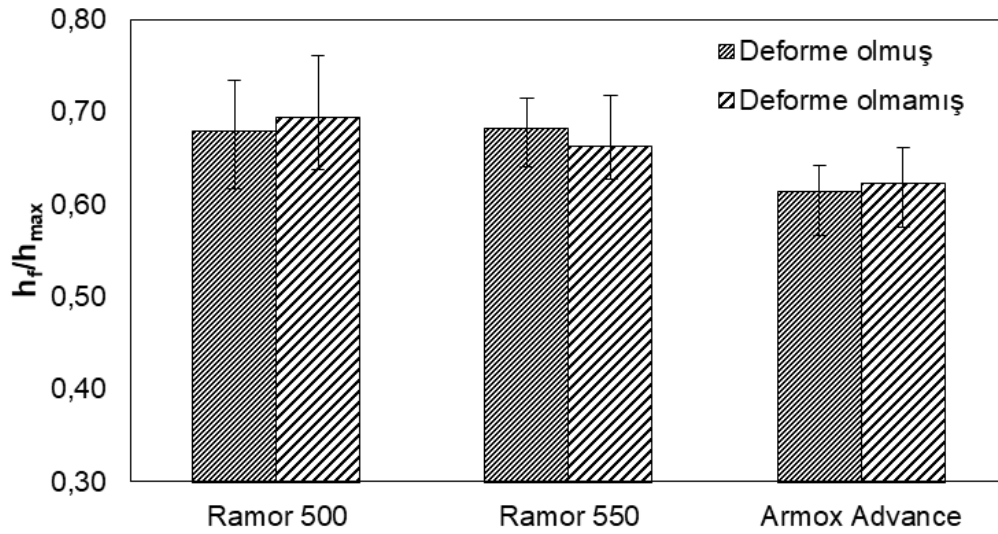
Numune	Pürüzlülük Değeri (R_a) (μm)
Ramor 500 Deforme olmamış	0,15
Ramor 500 Deforme olmuş	0,18
Ramor 550 Deforme olmamış	0,14
Ramor 550 Deforme olmuş	0,16
Armox Advance Deforme olmamış	0,13
Armox Advance Deforme olmuş	0,11

Tablo 10’da ise Ramor 500 ve Armox Advance zırh çeliklerine ait nanogirinin ölçümlerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülleri listelenmiştir. AKM görüntüleri incelendiğinde, farklı derecelerde yığılma veya çökme etkilerinin olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak bu durum ölçüm çözünürlüğü ile ilgilidir. Literatürde, malzeme içerisindeki tane yönelimlerinin sözkonusu yığılma davranışını etkilediği ifade edilmektedir [93, 94].

Tablo 10. Zırh çelikleri üzerinde gerçekleştirilen nanogirininin AKM görüntüleri alınanları için sertlik ve elastisite modülü değerleri

Numune	Ölçüm No	Sertlik (GPa)	E (GPa)
Ramor 500	1	8,4	248,2
	2	8,8	249,7
	3	8,8	281,5
	4	9,1	256,5
	5	8,5	248,3
	6	9,2	244,9
	7	8,1	242,9
	8	9,1	243,6
	9	9,2	253,0
Ortalama		8,8	252,1
Armox Advance	1	10,1	230,9
	2	9,6	233,3
	3	9,7	231,7
	4	9,6	233,7
	5	9,7	234,8
	6	9,6	222,6
	7	9,7	232,3
	8	10,0	235,1
	9	9,6	238,7
Ortalama		9,7	232,6

Armox Advance numunesi, Ramor 500 numunesine göre daha yüksek ortalama sertlik değerine sahipken, Ramor 500 numunesinin elastisite modülü açısından daha yüksek ortalama değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her iki numunede sertlik değerlerinin dar bir aralıkta olduğu görülmüştür. Bunun nedeni zırh çeliklerinin, çift fazlı otomotiv çeliklerine göre göreceli olarak daha homojen bir iç yapıya sahip olmalarıdır. h_f/h_{max} değerleri (h_f son girinim derinliği ve h_{max} maksimum girinim derinliği) yığılma olası varlığını ortaya çıkarmak için hesaplanır. h_f/h_{max} 1'e yakınsa, yığılma büyüktür ve deformasyon sertleşmesi küçüktür. $h_f/h_{max} < 0,7$ ise, malzemenin deformasyon sertleşmesi olup olmadığına bakılmaksızın hiç veya çok az yığılma gözlemlendiği belirtilmiştir [56]. Şekil 28'de Ramor 500, Ramor 550 ve Armox Advance çelikleri için 50 nm'de h_f/h_{max} değerlerini göstermektedir. Tüm malzemeler için h_f/h_{max} ortalama değerleri 0,70'ten az bulunmuştur. Dolayısıyla yığılmanın önemli düzeyde olmadığı ve elde edilen nanogirininin ölçümlerinin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

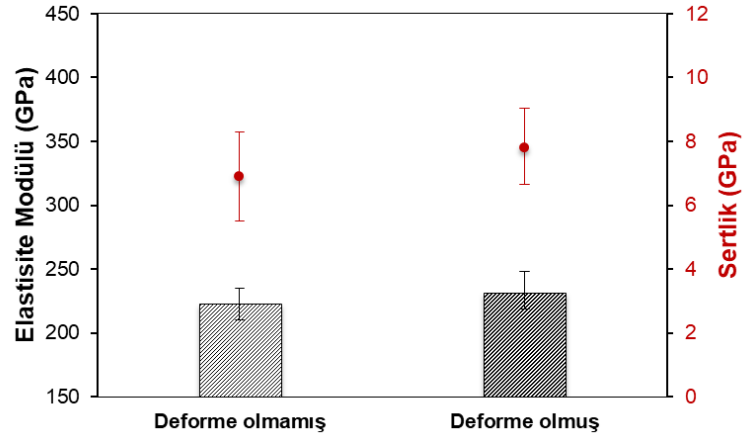


Şekil 28. Zırh çelikleri için artık girinim derinliğinin (h_f) maksimum girinim derinliğine (h_{max}) oranı

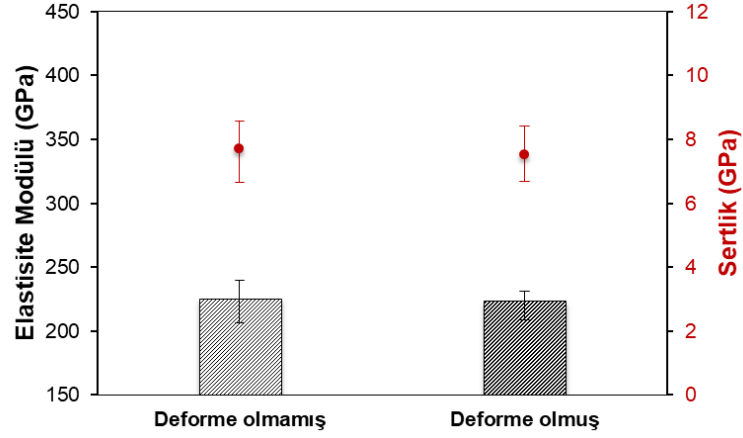
3.2.3. Zırh Çeliklerinin Yer Değiştirme Kontrollü Nanogirinin Analizleri

Balistik testlere maruz bırakılan zırh çeliklerinin deformasyon öncesi ve sonrası mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için nanogirinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 29’da Ramor 500, Ramor 550 ve Armox Advance numunelerine 50 nm yer değiştirme uygulanan nanogirininlerden elde edilen sertlik ve elastisite modülleri gösterilmektedir. Deforme olmamış ve deforme olmuş durumlar için ortalama sertlik değerleri sırasıyla Ramor 500 için 6,9 GPa ve 7,8 GPa, Ramor 550 için 7,7 GPa ve 7,5 GPa, Armox Advance için 9,1 GPa ve 9,4 GPa olarak kaydedildi. Ramor 550 malzemesinin deforme olmuş halde sertlik değerlerinde az bir düşüş gözlenmiştir. Bir diğer önemli nokta ise Armox Advance malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha yüksek sertliğe sahip olmasıdır. Nitekim Armox Advance tane boyutu küçültülmüş ve su verilmiş bir çelik olup, üretici tarafından SSAB zırh çeliği plakalarının en tok olanı olarak tanımlanmıştır [74]. Öte yandan, deforme olmamış ve deforme olmuş durumdaki ortalama elastisite modülü değerleri sırasıyla, Ramor 500 için 223 GPa ve 232 GPa, Ramor 550 için 225 GPa ve 223 GPa ve Armox Advance malzemeleri için 223 GPa ve 220 GPa olarak kaydedildi. Deforme olmuş Ramor 500 numunesinin elastisite modülünde, deforme olmamış duruma göre hafif bir artış tespit edilirken, diğer malzemeler için belirgin bir fark görülmedi. Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin sertlik değerlerinin 5,5 - 9 GPa

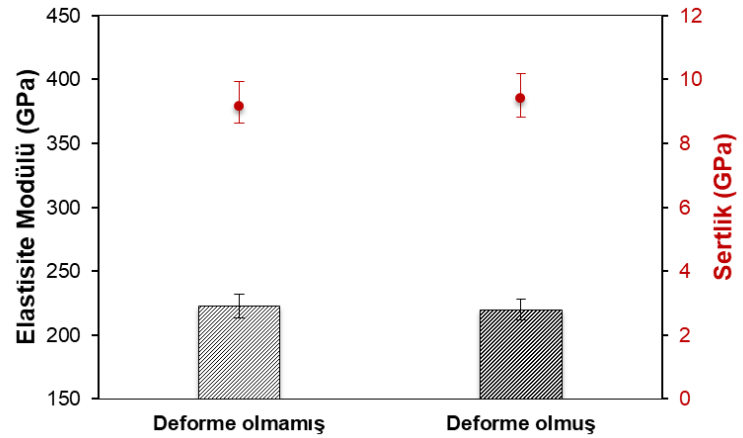
aralığında olduğu, Armox Advance numunelerinin ise 50 nm girinim derinliğinde 8,6 - 10,2 GPa aralığında sertlik değerleri elde edildiği kaydedildi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 29. (a) Ramor 500; (b) Ramor 550; (c) Armox Advance numunelerine 50 nm maksimum yer değiştirme kontrollü nanogirininim ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri

3.2.4. Zırh Çeliklerinin Darbe Testi ve Mikro-Vickers Sertlik Analizleri

Zırh numunelerinin gevrek kırılmaya uygun koşullarda mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmek ve dinamik gerilme altında kırılma için gereken enerji miktarını (darbe direnci) belirlemek amacıyla Charpy V-Çentik testi yapılmıştır. Literatürde balistik zırh çeliklerine uygulanmış darbe testleri mevcuttur [95, 96]. Şekil 30'da Ramor 500 numuneleri üzerinde 3 farklı noktadan alınan numuneler üzerinde Charpy V-çentik darbe testi sonuçlarından elde edilen numune kırılma yüzeylerini göstermektedir.



Şekil 30. Charpy V-çentik darbe testine tabi tutulan Ramor 500 numunesinin kırılma yüzey görüntüleri

Şekil 31'de ise Ramor 500 plakasından 3 farklı noktadan alınan numuneler üzerinde, Charpy V-çentik darbe testi sonuçlarından elde edilen tokluk değerleri gösterilmektedir. Gerek merminin girinim yaptığı noktaya eş uzaklıktaki numunelerde (1-4, 2-5, 3-6 nolu numuneler) gerekse de girinim bölgesinden farklı uzaklıktaki numuneler için elde edilen tokluk değerlerinin birbirinden belirgin farklılık göstermediği tespit edilmiştir.



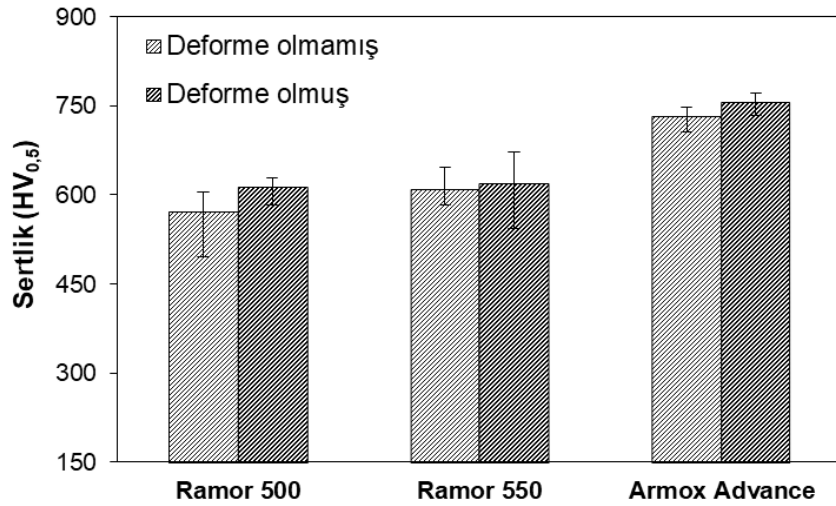
Şekil 31. Çentik darbe testine maruz bırakılan Ramor 500 numunelerinin zırh çeliği plakası üzerinden çıkarıldığı konumlar

Tablo 11’de verilen sonuçlar incelendiğinde, darbe enerjileri ve kırılma tokluğu verileri kurşunun plakaya girdiği yerden plakanın dışına doğru belirgin bir artma veya azalma eğilimi göstermemiştir. Bu tablonun incelenmesinden de görülebileceği gibi, merminin girinim yaptığı bölgeden dışarıya doğru gidildikçe tokluk değeri Ramor 500 için 29 J’den 34 J’e çıkarken, Ramor 550’de 39 J’den 37 J’e düşmüştür. Gerek farklı zamanlarda alınan ölçümlerin karşılaştırılmasında gerekse de aynı numune üzerinde alınan ölçümler arasında bir eğilim gözlenememiştir. Kırılma tokluğu, Ramor 500 ve Armox Advance zırh çeliği numunelerinde kurşunun plakaya girdiği yerden uzaklaştıkça (1 noktasından 3 noktasına doğru) artış göstermiştir. Ramor 550 çeliğinde ise diğer iki zırh çeliğinde elde edilen sonuçlara göre tersi bir durum gözlenmiştir. Kısıtlı sayıdaki ölçüm sonucuyla bunun nedeni tam olarak açıklanamamakla birlikte, Ramor 550 için elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin diğer malzemelere kıyasla dar bir aralıkta olduğu (150 ± 3 MPa $\sqrt{m}$) olduğu görülmektedir.

Tablo 11. Zırh çeliği numunelerinin darbe testlerinden elde edilen darbe enerjileri ve kırılma tokluğu

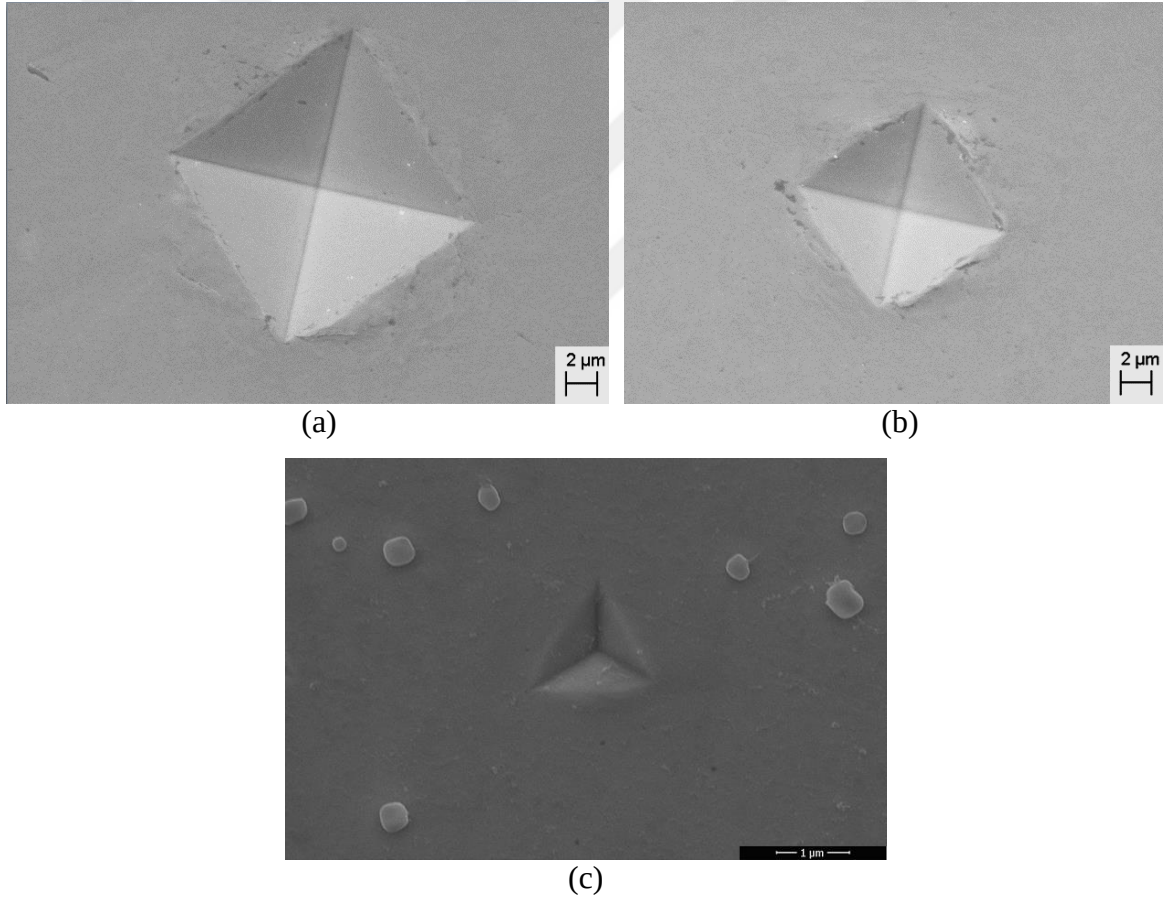
Çelikler	Darbe Enerjisi (J)	Kırılma Tokluğu ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
Ramor 500 Deforme olmamış	34	135
Ramor 500 Deforme olmuş	29	116
Ramor 550 Deforme olmamış	37	146
Ramor 550 Deforme olmuş	39	153
Armox Advance Deforme olmamış	32	128
Armox Advance Deforme olmuş	27	109

Kırılma tokluğunun eldesine yönelik Mikro-Vickers ölçümleri sırasında elde edilen sertlik değerleri Şekil 32’de verilmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde 4,91 N kuvvet 10 sn süresince uygulanmış ve en az 10 ölçümün ortalaması olarak rapor edilmiştir. Değerler incelendiğinde, mikro sertlik ölçüm sonuçlarının tüm malzemeler için kurşunun plakaya girdiği yerden uzaklaşıldıkça azaldığını göstermiştir. Bu durum, kurşunun plakaya girdiği en yakın yerde (1 nolu bölge) deformasyonun ve artık gerilmenin daha uzaktaki bir bölgeye kıyasla (3 nolu bölge) daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Şekil 32’de nispeten yüksek deforme olmuş bölgelerde elde edilen sertlik değerlerinin, az deforme olmuş bölgelerde elde edilen sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 32. Zırh çeliği numunelerinin deforme olmamış ve deforme olmuş koşullarda Micro-Vickers sertlik değerleri

Kırılma tokluğunun nanogirinin yöntemiyle elde edilmesine yönelik yapılan çalışmalarda ise sonuç elde edilememiştir. Bunun en önemli sebebi nanogirininler vasıtasıyla numuneler üzerinde çatlak oluşturulamamıştır. Nanogirinin ile kırılma tokluğu eldesine yönelik eşitlikler çatlak boyunu içerdiğinden bu hesaplamalar gerçekleştirilememiştir. Alternatif olarak literatürde mikro-Vickers yöntemiyle çatlak oluşturma üzerine de çalışmalara rastlanılmıştır. Ancak bu yöntemle de çatlak oluşumu elde edilememiştir. Şekil 33'te Ramor 500 numunesi üzerinde gerçekleştirilen mikro-Vickers ve Berkovich ucuyla gerçekleştirilen nanogirininlerin mikroskop görüntülerini göstermektedir. Farklı kuvvet değerleri denenmiş olsa da, numuneler üzerinde çatlak oluşturulamamıştır.



Şekil 33. Ramor 500 için (a) Vickers sertlik ölçümü (2.94 N), (b) Vickers sertlik ölçümü (490 mN) ve (c) Nanogirinin (10 mN, Berkovich uç ile) elde edilen girinin görüntüleri

3.2.5. Micro-Vickers ve Nanogirinin Sertliklerinin Karşılaştırması

Literatürde, nanogirinin sertliği ve mikro sertliği, malzemelere için geniş bir yük aralığında (0,1–19600 mN) ölçmüşlerdir. Bakır, paslanmaz çelik ve nikel-titanyum alaşımının nanogirinin sertliği açıkça girinin boyut etkisi gösterdiğini ve derinlik arttıkça sertliğin azaldığını bulmuşlardır. Sertliği ölçülen malzemelerde nanogirinin sertliği, mikro sertlikten yaklaşık olarak %10-30 daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Bunun ana nedeni, artık alan (A_r) yerine maksimum kuvvette oluşan temas alanı (A_c) kullanılarak nanogirinin analizinin yapılması ile açıklanabilir. Temas alanı (A_c) her zaman artık alandan (A_r) daha küçük olduğu ve girinin esnasında ne kadar yoğun bir şekilde yığılma (veya çökme), nanogirinin sertliği ile mikro sertlik arasındaki farkın o kadar büyük olduğunu göstermişlerdir [97].

Tablo 12. Mikro-Vickers sertliği ve nanogirinin sertliğinin karşılaştırması

Numuneler	Ortalama	Hata Payı %
Ramor 500 Deforme olmamış		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	571,2	8,3
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	6044,8	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	6546,3	
Ramor 500 Deforme olmuş		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	613,0	7,6
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	6486,2	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	6977,2	
Ramor 550 Deforme olmamış		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	609,6	10,4
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	6450,9	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	7119,6	
Ramor 550 Deforme olmuş		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	619,0	0,6
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	6549,7	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	6592,0	
Armox Advance Deforme olmamış		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	732,0	13,7
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	7745,9	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	8804,8	
Armox Advance Deforme olmuş		
Vickers Sertlik HV _{0.5}	755,9	12,6
Dönüştürülmüş Sertlik Değeri (MPa)	7998,6	
Nanogirinin Sertlik (MPa)	9007,3	

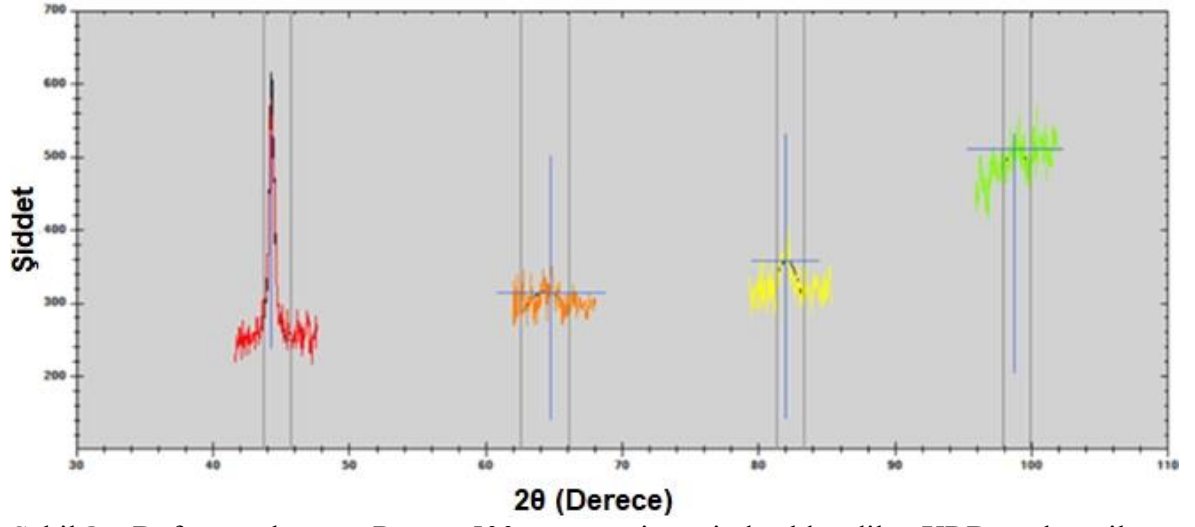
İncelenen zırh çeliklerinde dönüştürülmüş Vickers sertliği ile nanogirininim sertliği arasındaki fark Tablo 12'de gösterilmektedir. Mikro-Vickers ve girininim sertlik ölçümlerinde, elastik-plastik girinimi anlamak için yer değiştirme ve temas alanı önemli parametrelerdir. ISO 14577'ye göre, girininim sertliği (H_{IT}), uygun bir ölçekleme işlevi kullanılarak mikro-Vickers sertliği (HV) ile ilişkilendirilebilir. H_{IT} , aşağıdaki denklem 15 ile HV ile ilişkilidir.

$$HV = \frac{A_P}{g_n \times A_S} H_{IT} = 0.0945 H_{IT} \quad (15)$$

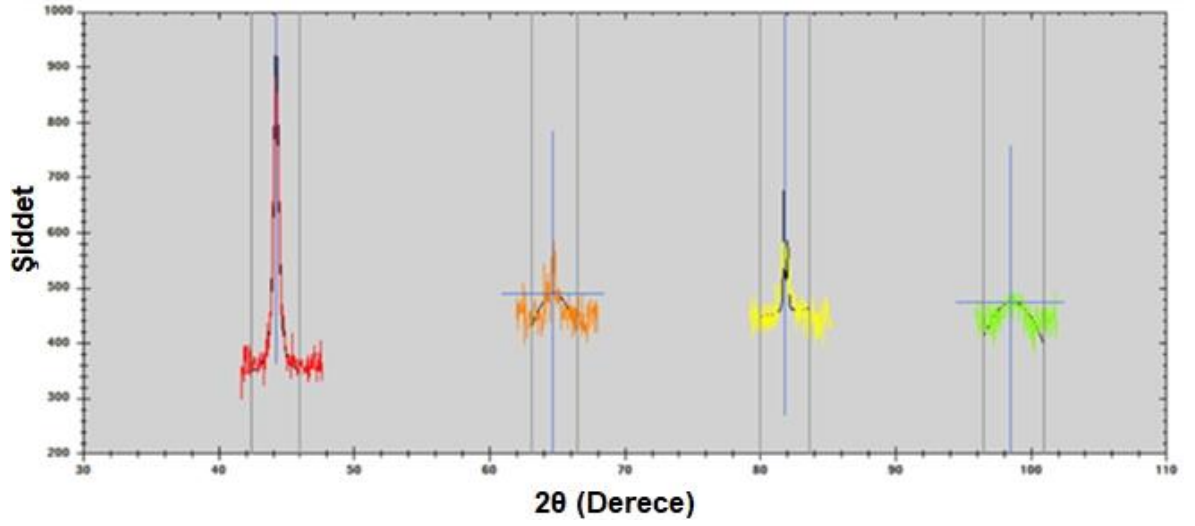
Burada, A_P , A_S ve g_n , sırasıyla girininimin öngörülen temas alanı, girininimin yüzey alanı ve yerçekimi ivmesidir.

3.2.6. Zırh Çeliklerinin XRD ve Nanogirininim Esaslı Artık Gerilme Analizleri

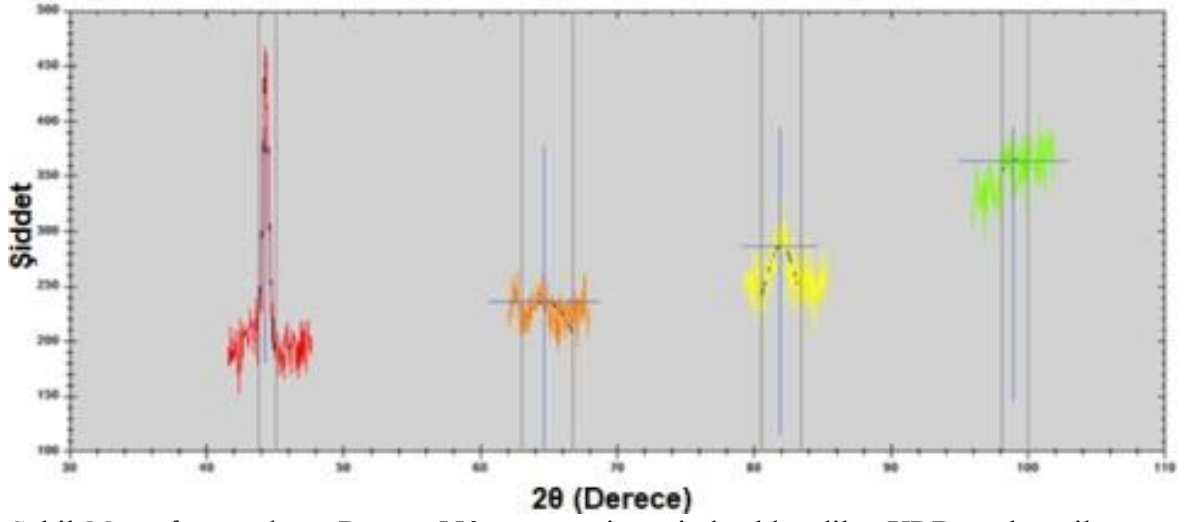
XRD yöntemi artık gerilmelerin elde edilmesinde doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Artık gerilme ölçümleri $\omega=3^\circ$ 'de (x-ışınlarının geliş açısı) gerçekleştirilmiştir. Şekil 34 - Şekil 37'de Ramor 500, Ramor 550 ve Armox Advance zırh çeliklerinin deforme olmamış (veya göreceli olarak az deforme olmuş) ve deforme olmuş bölgelerin XRD-artık gerilme ölçümleri gösterilmektedir. XRD ölçümleri Armox Advance numunesi için yüzeyden yaklaşık 1,13 μm ; Ramor 500 ve Ramor 550 numuneleri için 0,205 μm yer değiştirmede elde edilmiştir. Deforme olmuş Armox Advance numunesinin XRD-artık gerilimi -1547 MPa olarak bulundu. Deforme olmamış ve deforme olmuş Ramor 500 numunesinin XRD-artık gerilmeleri sırasıyla -1047 MPa ve -1165 MPa olarak bulunmuştur. Deforme olmuş Armox Advance numunesinin XRD-artık gerilimi -1028 MPa olarak bulundu. XRD-artık gerilme ölçümlerinin tamamında gerilme değerleri negatif (bası etkisi) olarak elde edilmiştir. Şekil 37'de deforme olmuş Armox Advance numunesinin 2θ aralıklarındaki tepeleri $2\theta_{110} = 52^\circ$, $2\theta_{200} = 77^\circ$ ve $2\theta_{211} = 99^\circ$ açılarında elde edilmiştir. Şekil 34 - Şekil 36'da deforme olmamış ve deforme olmuş Ramor 500, deforme olmuş Ramor 550 numunelerinin 2θ aralıklarındaki tepeleri $2\theta_{110} = 45^\circ$, $2\theta_{200} = 65^\circ$, $2\theta_{211} = 82^\circ$ ve $2\theta_{220} = 99^\circ$ açılarında elde edilmiştir.



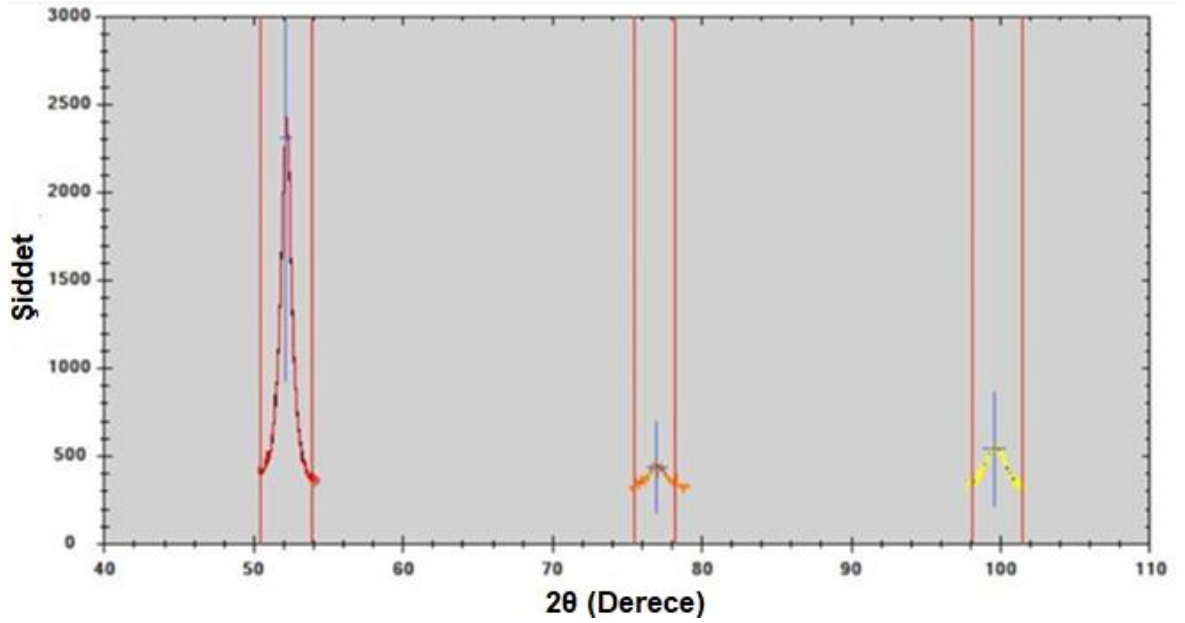
Şekil 34. Deforme olmamış Ramor 500 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



Şekil 35. Deforme olmuş Ramor 500 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



Şekil 36. Deforme olmuş Ramor 550 numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



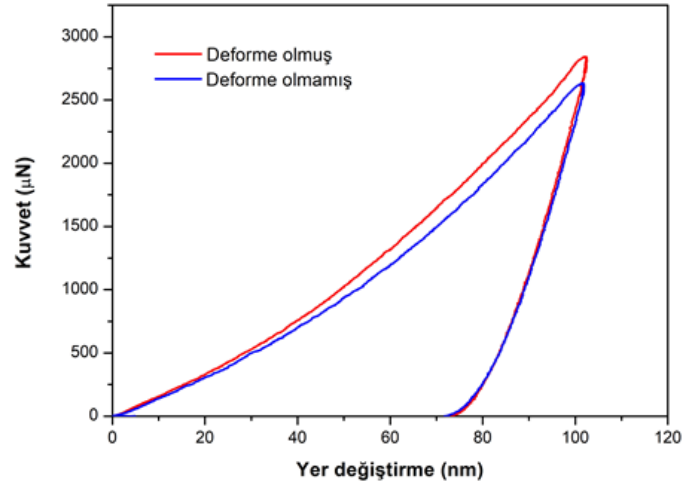
Şekil 37. Deforme olmuş Armox Advance numunesi üzerinde elde edilen XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü

Deforme olmamış ve deforme olmuş zırh çelik numuneleri üzerinde artık gerilme değerlerinin belirlenmesi için denklem 5'te gerekli olan P_1 , P_2 ve h_r değerleri Şekil 38'den elde edilmiştir. Tablo 13'te zırh çeliği numunelerinin nanogirininim ölçümlerinden ve denklem 5'in kullanılmasından hareketle hesaplanan artık gerilme değerleri verilmiştir. Deforme olmuş zırh çeliğin numunelerinde merminin girinim yaptığı noktanın hemen yanındaki bölgede elde edilen artık gerilme değeri göreceli olarak uzak bir noktadan alınan

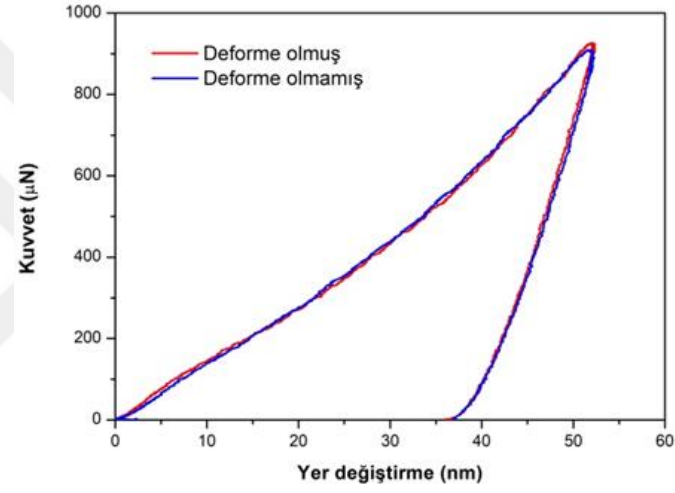
ölçümlerde (Şekil 11’de 1 ve 3 numara olarak gösterilen bölgeler) belirgin bir fark tespit edilememiştir. Bu hususun, ilgili zırh çeliği plakalarının haddeleme yöntemi ile üretimleri esnasında maruz kaldıkları bası kuvveti etkisiyle oluşan ön gerilmenin baskın etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 13’te gösterilen değerler incelendiğinde nanogirininim yardımıyla zırh çeliği numuneleri üzerinde elde edilen gerilmelerin XRD yöntemi ile elde edilen değerlerle uyum içinde olduğu, en büyük farkın %11 ile Armox Advance numunesi için elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle nanogirininim esaslı artık gerilme ölçümünün güvenilir bir şekilde zırh çeliği numuneleri için kullanılabileceği anlaşılmıştır. Nanogirininim ile yapılan ölçümlerde, XRD yöntemine göre çok farklı noktalarda ölçüm alınabilmesi ve sonuçların daha hızlı olarak elde edilebilmesi gibi avantajlar bulunmaktadır. Sonuçlardan hareketle, nanogirininim esaslı artık gerilme ölçümünün güvenilir bir şekilde zırh çeliği numuneleri için kullanılabileceği anlaşıldı. Nanogirininim ile yapılan ölçümlerde, XRD yöntemine göre çok farklı noktalarda ölçüm alınabilmesi ve sonuçların daha hızlı olarak elde edilebilmesi gibi avantajlar bulunmaktadır. Literatürde önerildiği gibi, XRD tabanlı artık gerilme ile nanogirininim tabanlı artık gerilme ölçümlerinin karşılaştırılması amaçlandı. Her bir nanogirininim kuvvet-yer değiştirme eğrisinden, literatürde önerilen denklemlerle artık bir gerilim değeri hesaplandı. Nanogirininime dayalı artık gerilim hesaplamasının kullanılabileceği sonucuna varıldı. Nanogirininim ile elde edilen artık gerilme değerlerinin, XRD ile elde edilen değerlerle oldukça uyumlu olduğu bulundu.

Tablo 13. Zırh çelik numunelerinin artık gerilme değerleri

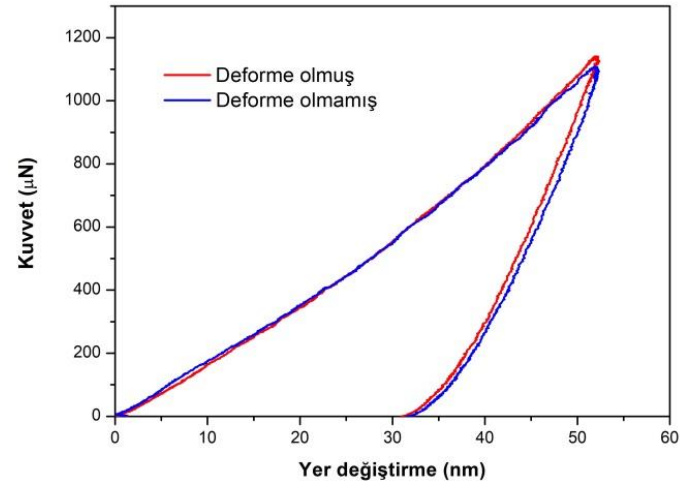
Çelikler	XRD-Artık Gerilme (MPa)	Nanogirininim-Artık Gerilme (MPa)	Fark (%)
Ramor 500	-1047	-1116	7
Ramor 550	-1028	-1084	5
Armox Advance	-1547	-1376	11



(a)



(b)



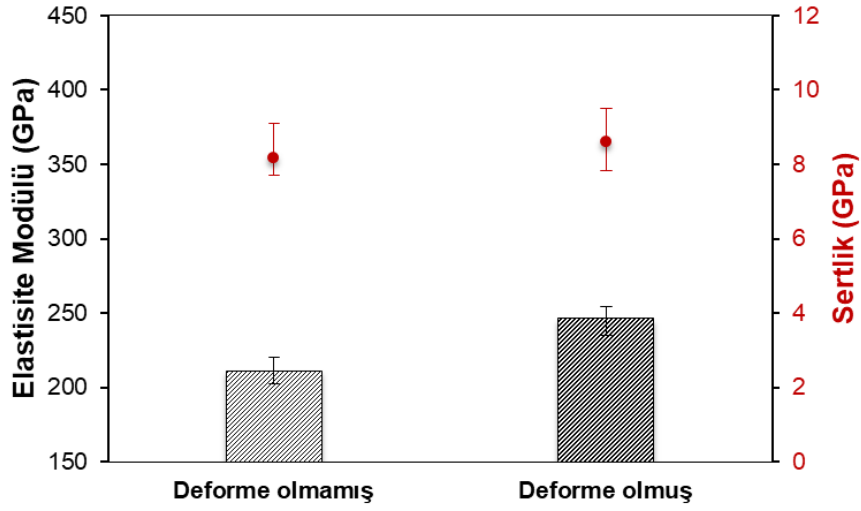
(c)

şekil 38. (a) Ramor 500, (b) Ramor 550 ve (c) Armoş Advance numunelerinden elde edilen nanogirinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Üretim sırasında meydana gelen bu ön gerilme etkisi, balistik testin oluşturduğu artık gerilme etkisine göre çok daha büyüktür. Zîra, bu çeliklerde ince tane yapısı ve homojen mekanik özellikler elde edebilmek için hadde altında yüksek oranda kesit değişimi ve deformasyon sözkonusudur. Bu durum, ilgili numuneler üzerinde elde edilen ve Şekil 38’de verilen nanogirinin kuvveti – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Bu eğriler, çok sayıdaki nanogirinin kuvvet eğrisinin arasından seçilen eğrilerdir. Ancak bu seçim sırasında önemli bir husus olarak, daha fazla deformasyona maruz kalan noktada maksimum kuvvet değerinin, daha az deforme olduğu bilinen noktaya göre fazla olması gerekmektedir. Aksi durumdaki ölçümler, nanogirinin ile artık gerilme hesabında dikkate alınmamıştır.

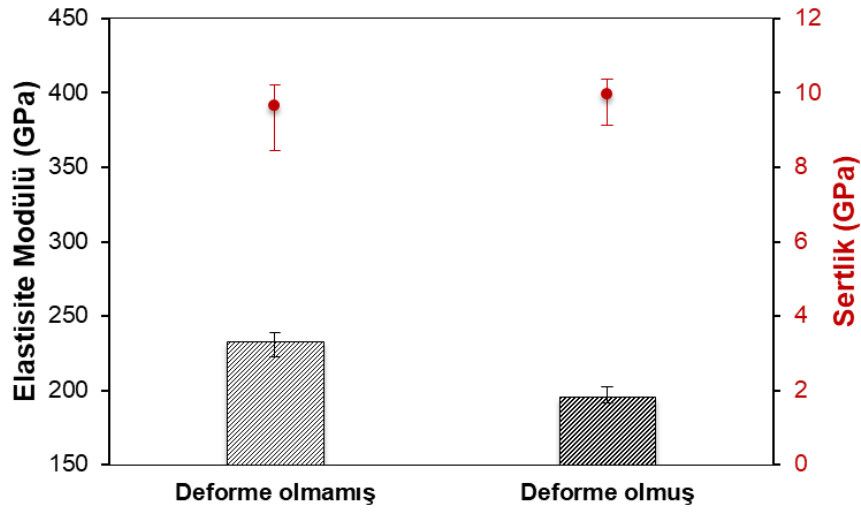
3.2.7. Zırh Çeliklerinin Kuvvet Kontrollü Nanogirinin Analizleri

Zırh çelikleri üzerinde gerçekleştirilen nanogirinin ölçümlerinde girinin boyut etkisinin incelenmesi amacıyla farklı bir maksimum yükleme (10 mN) değeri kullanılmasına karar verilmiştir. İncelenen zırh çeliği numunelerinden bir diğeri olan Ramor 500 numunesi üzerinde aynı maksimum kuvvet değerinde ölçümler alınmıştır. Şekil 39’da, deforme olmamış ve deforme olmuş Ramor 500 numunesinin 10 mN kuvvette sırasıyla sertlik ve elastisite modülü değerleri verilmektedir. Ramor 500 için deforme olmamış ve deforme olmamış halde elde edilen ortalama sertlik değerleri 8,2 GPa olarak elde edildi. Deformasyon ile birlikte ortalama sertlik değeri 8,6 GPa'a yükseldi. Elde edilen sertlik değerlerinin otomotiv çeliklerine göre göreceli olarak daha dar bir aralıkta ve yüksek olmasının zırh çeliklerinin çoğunlukla temperlenmiş martenzit mikroyapıya sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 39. Ramor 500 numunesine 10 mN maksimum kuvvet kontrollü nanogirinin ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri

Şekil 40'da, deforme olmamış ve deforme olmuş Armox Advance numunesinin 10 mN kuvvette sertlik ve elastisite modüllerinin değerleri histogramlar yardımıyla karşılaştırılmıştır. Armox Advance numunesinin maksimum 218 nm derinliğe karşılık gelen 10 mN kuvvette sertlik ve elastisite modülü değerleri karşılaştırılması gösterilmektedir. Armox Advance örneğinde de benzer bir model gözlemlendi. Deformasyon ile birlikte ortalama sertlik değerleri 9,7 GPa'dan 10 GPa'ya çıkmıştır. Deforme olmamış ve deforme olmuş bölgeler için sertlik değerlerinde dikkate değer bir farklılık gözlenmemekle birlikte, deforme olmuş numunelerin sertlik değerlerinin ortalamasının deforme olmamış olanlara göre az da olsa yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, elastisite modülü değerlerinde belirli bir eğilim gözlenmemiştir. Literatürde, balistik olarak test edilen $Al_{0.7}CoCrFeNi$ ve $Al_{0.3}CoCrFeNi$ numunelerine nanogirinin sertlik ölçümleri, oda sıcaklığında ve 1 N maksimum kuvvette Berkovich uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri 4,6 - 6,3 GPa arasında bulunmuştur. Deforme olmuş bölgede, deforme olmamış bölgeye göre sertlik değerinde çok fazla değişiklik olmadığı belirtilmiştir [31].



Şekil 40. Armox Advance numunesine 10 mN maksimum kuvvet kontrollü nanogirinin ile elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerleri

Ramor 500 ve Armox Advance numunelerine maksimum 10 mN girinim kuvveti ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları irdelendiğinde, her iki numunenin de sertliği deforme olmuş bölgelerde artış göstermiştir. Bu, malzemenin deformasyon sertleşmesinin doğal bir sonucudur. Ancak, elastisite modülü değerleri için Armox Advance deforme olmuş numunesinde, deforme olmamış numuneye göre belirgin şekilde azalma tespit edilmiştir. Ramor 500 numunesinde ise deformasyona karşılık elastisite modülünde ortalama değerler dikkate alındığında bir artış gözlemlenmiştir. İncelenen iki zırh çeliğinin elastisite modülü değerlerinin değişimindeki bu farklılık mevcut sonuçlarla açıklanamamaktadır ve daha detaylı incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Deformasyon artışı ile malzemede sertlik ve tokluğun artmasına bağlı olarak elastisite modülünde de belli bir düzeyde artış beklenebilir. Ancak, deformasyon öncesi ve sonrasında ölçüm alınan noktaların farklı olması, ölçüm sayısının sınırlı oluşu ($5 \times 5 = 25$ ölçüm) gibi hususların sonuca etki etmesi muhtemeldir.

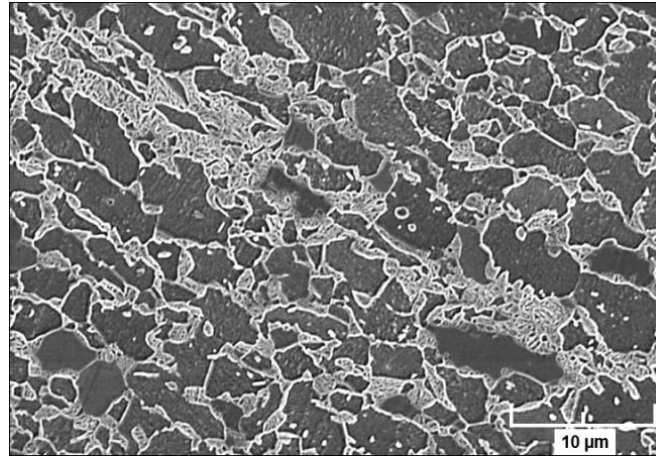
3.3. Otomotiv Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Analizler

3.3.1. DP 800 Çeliği Üzerinde Gerçekleştirilen Mikrogirininimler

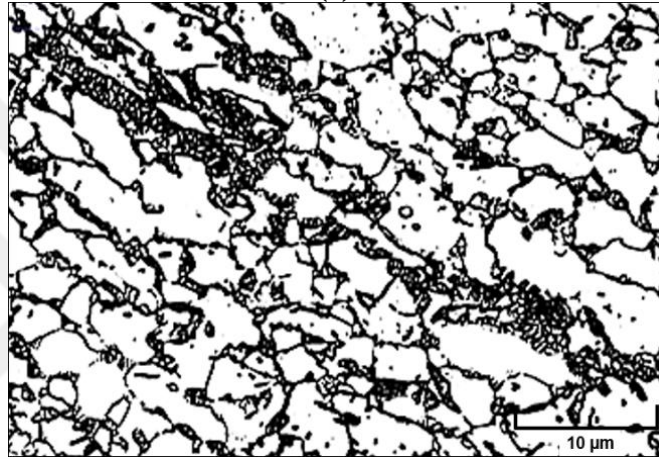
Doktora tezinin ikinci aşaması olarak gerçekleşen bu çalışmada, çift fazlı otomotiv çeliklerinden DP 800 malzemesi üzerinde literatürde olmayacak şekilde kapsamlı bir mikrogirininim ölçümü alınmıştır. Bu çalışmada, farklı mikrogirininim yükleme koşullarında

çift fazlı yüksek mukavemetli çeliğin mekanik özellikleri tekrarlı, konvansiyonel ve kademeli girinim yöntemleriyle incelenmiştir. Sözkonusu çalışmada 50 - 300 mN arasındaki kuvvetler tatbik edilmiş ve girinimin boyut etkisi incelenmiştir. Uygulanan maksimum kuvvet değerine (300 mN) karşılık girinim derinliğinin 2 μm 'ye yaklaşması nedeniyle bu uygulamanın nanogirinimden ziyade mikrogirinim olarak adlandırılmasının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlardan hareketle uygulanan kuvvetlerin özellikle incelenen otomotiv çelikleri gibi çift fazlı numunelerde fazlara ait mekanik özellikleri belirlemek için uygulanması gereken kuvvetlere kıyasla çok büyük olduğu ve elde edilen sonuçların mikroyapı bileşenlerinden ziyade malzemenin mikro/makro seviyedeki davranışını yansıttığı anlaşılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları *Applied Physics A* dergisinde yayınlanmıştır (Ekmekci ve Cora, *Effect of Indentation Loading Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Grade DP 800*, *Applied Physics A*, 126 (2020) 6616017).

Şekil 41'de gösterildiği gibi, çift fazlı DP çeliğinin mikro yapısı daha sert martenzit adaları içeren yumuşak ferrit matris formundadır. Bu çeliklerde yumuşak ferrit fazı yüksek süneklik kazandırır. DP çelikleri deforme olduğunda, martenzit adalarını çevreleyen daha düşük mukavemetli ferrit fazında gerilme yoğunlaşır. Bu deforme olayı, DP çeliklerinde yüksek deformasyon sertleşme oranı oluşturur. Ayrıca, mikroyapıda martenzit hacmi %33 civarında bulunmuştur. Wang vd. [98] DP 800 malzemesinin martenzit hacmini %32 olarak belirlemiştir. Çift fazlı çeliğin mikro yapısı farklı fazlar (yumuşak ferrit ve sert martenzit) içerdiğinden, literatürde önemli ölçüde farklı mekanik özellikler bildirilmiştir. Martenzitin sertliği 10 GPa kadar yüksek olabilirken, ferritin sertliği 3–7 GPa aralığındadır. Literatürde, hem ferrit hem de martenzitin tane boyutları genelde 1-10 μm aralığında olduğu bildirilmiştir [49-52]. Bununla birlikte, DP 800 çeliğine yapılan mikrogirinimlerde tane boyutundan daha büyük girinim boyutları kaydedilmiştir. Bu nedenle, elde edilen değerler bileşenlerden (ferrit veya martenzit) ziyade genel malzeme tepkisini temsil etmektedir.



(a)

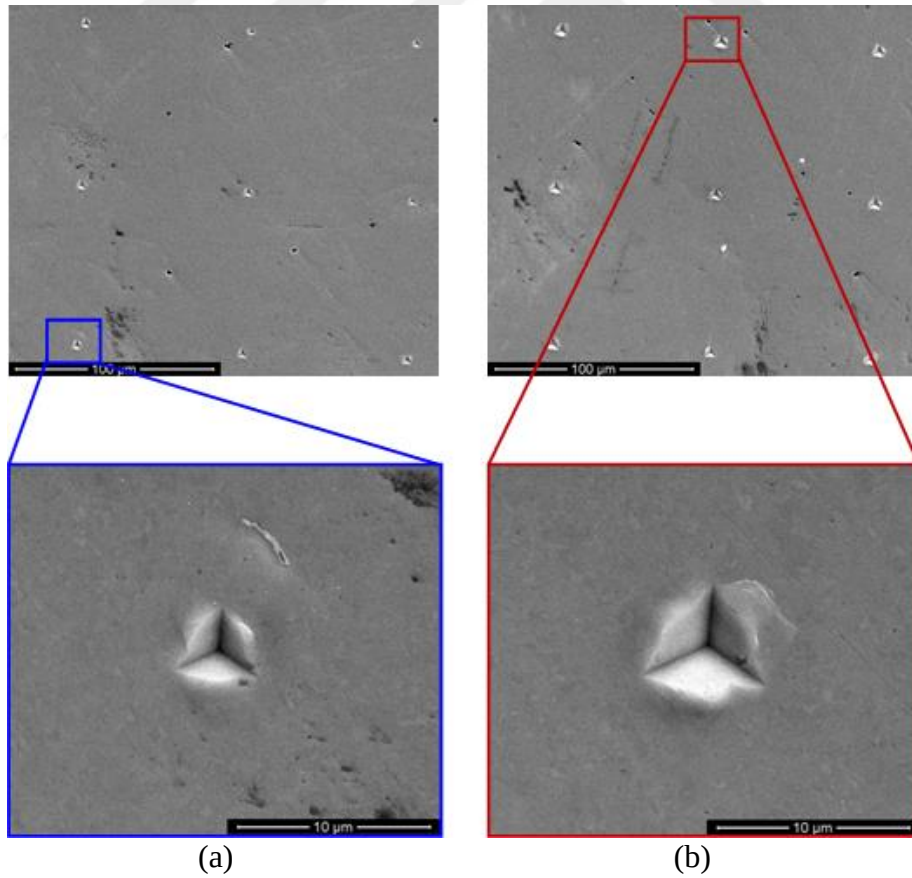


(b)

Şekil 41. (a) DP 800 çeliğinin mikroyapısı; (b) martenzit hacim oranı hesaplaması için görüntünün siyah-beyaz görüntüye dönüştürülmesi

Çift fazlı ileri yüksek mukavemetli DP 800 çeliğinin mikrogirinin ölçümü, TI 950 TriboIndenter kullanılarak yapıldı. Mikrogirinin ölçümlerinde, malzemenin sertliğini ve elastisite modülünü elde etmek için $v_{\text{baticı uç}} = 0.07$ ve $E_{\text{baticı uç}} = 1140$ GPa olan Berkovich baticı ucu kullanıldı. Elastisite modülü hesaplanırken, poisson oranı Oliver – Pharr girinin yönteminde 0.3 olduğu varsayılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında yapıldı. Girinin için üç farklı ölçüm prosedürü (konvansiyonel, tekrarlı, kademeli) uygulanmıştır. Her girinin, 50 mN artışla 0 - 300 mN arasında temas kuvveti seviyesinde gerçekleştirildi. Her girinin sonra, kuvvet tamamen kaldırıldı ve artan kuvvet seviyesinde yeni bir girinin yapıldı. Bu tür girinin "konvansiyonel" olarak adlandırılır ve prosedür, tekrarlanabilirliği için en az 9 farklı konumda gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan, "kademeli" girininde, maksimum girinin kuvvetinin önceden ayarlanmış değerine ulaşıldıktan sonra, girinin

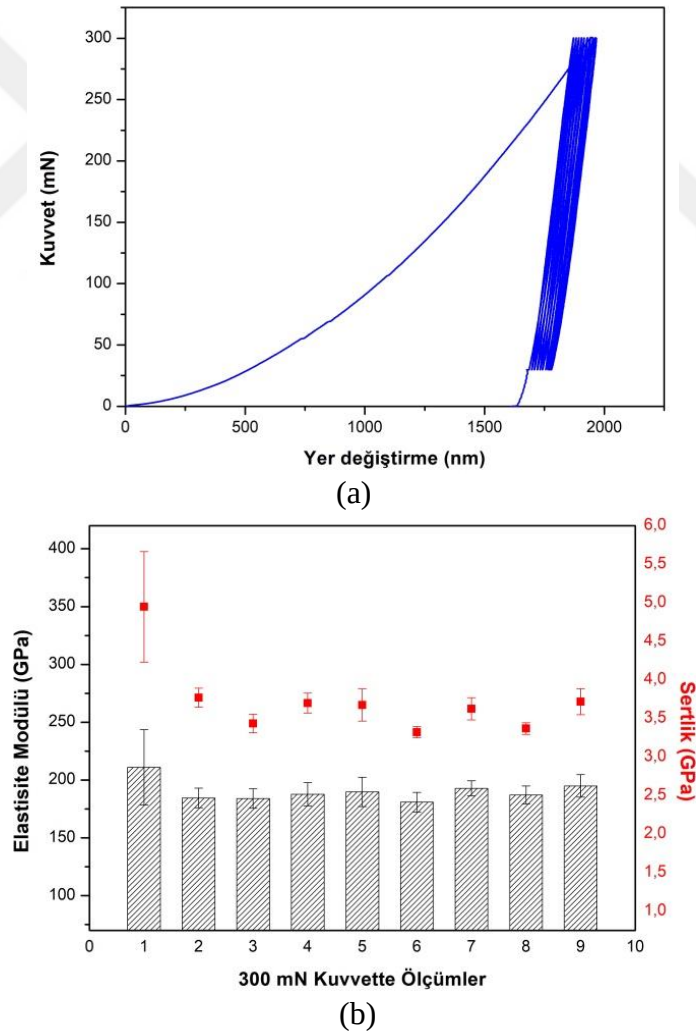
alanından tamamen yukarı hareket ettirilmemiştir. Numune, önceki yükleme döngüsünden daha yüksek kuvvetlere veya yer değiştirmelere yeniden yüklendi. Öte yandan, "tekrarlı" girinimde 300 mN tekrarlanan maksimum kuvveti uygulandı. Girinimler sırasında, yük oranı 0.1 mN/sn olarak ayarlandı. Girinim derinliği (nm) ve kuvvet (mN) PC'ye kaydedildi. Ham veriler daha sonra kuvvet – yer değiştirme ($P - \delta$) grafiklerine dönüştürüldü. Bu grafikler malzemenin sertlik ve elastisite modülünü oluşturmak için kullanıldı. Her ölçüm türünde, olası girinim boyutu etkisini ortaya çıkarmak için malzeme özelliklerinin (elastisite modülü ve sertlik) değişimi analiz edildi. Literatürde, elastisite modülü ve sertlik gibi malzeme özelliklerinin girinim kuvveti ile değişebileceği bildirilmektedir [99, 100]. Bu olay girinim boyutu etkisi olarak adlandırılır. Ayrıca, çalışmada istatistiksel analizler yapıldı. Elde edilen verilerde varyasyonun önemini ortaya çıkarmak için tek yönlü-ANOVA testleri ($p < 0.05$ ile) yapıldı. Şekil 42'de 50 mN ve 100 mN kuvvetlerde elde edilen 3x3 mikrogirinimleri gösterilmektedir.



Şekil 42. (a) 50 mN kuvvette uygulanan nanogirinim; (b) 100 mN kuvvette uygulanan nanogirinim

3.3.1.1. Tekrarlı (Cyclic) Girinim

Mikroginirimde tekrarlı yükleme, 300 mN girinim kuvvetinde belirtilen kuvvetin 9 farklı yerde 11 kez tekrarlanmasıyla gerçekleştirildi. Şekil 43(a), DP 800 için elde edilen kuvvet - yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Döngü 300 mN sabit bir kuvvet altında ilerlerken, girinimin daha dar bir bölgede olduğu görülmüştür. Bu, elastik toparlanmanın (dolayısıyla nihai girinim derinliğinin) tekrarlanan yükleme ile azalmasına bağlanabilir. Şekil 43(b), 300 mN sabit kuvvet ile tekrarlı girinim üzerine elde edilen elastisite modülü ve sertlik değerlerini göstermektedir. Hem elastisite modülü hem de sertlik değerlerinde değişimleri malzeme yüzeyinde farklı yerlerde girinim, farklı bileşenler, tane boyutu ve tane kusurları ile açıklamışlardır [101].

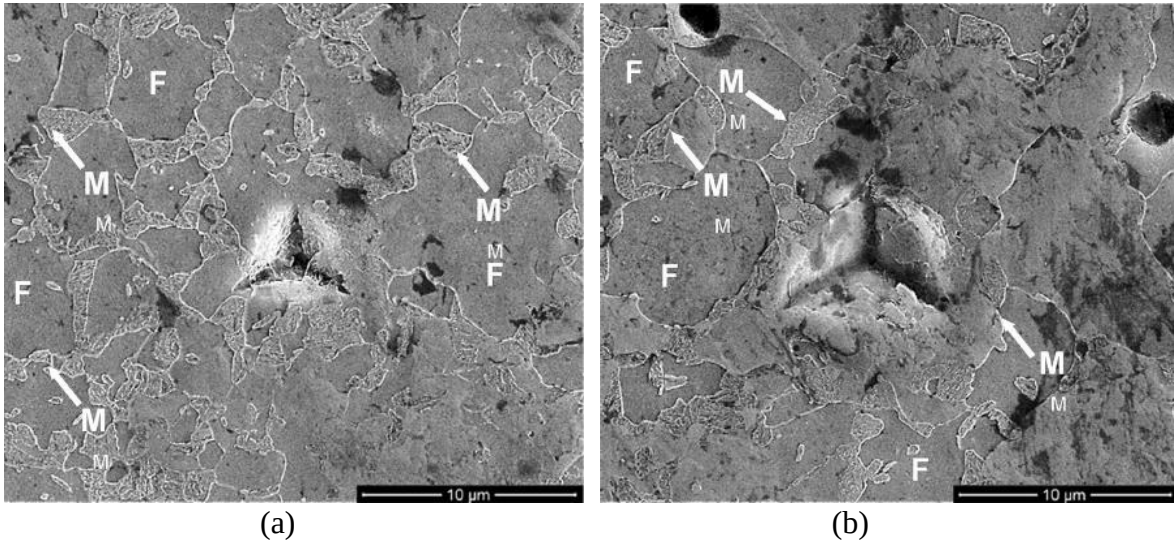


Şekil 43. (a) 300 mN tekrarlı girinim kuvvet - yer değiştirme grafiği; (b) elastisite modülünün ve farklı ölçümlerde sertliğin değişimi

Tekrarlı girinimde ortalama sertlik ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 3,6 GPa ve 188 GPa olarak elde edildi. Ayrıca, araştırmacılar tekrarlı yükleme yöntemini, malzemenin deformasyon mekanizmaları, gerilme altında faz dönüşümü, yorulma ve kırılma tokluğu gibi dinamik deformasyon özelliklerini analiz etmek için kullanmışlardır [102, 103]. Örneğin, Saraswati vd. kalsiyum katkılı altının dislokasyon-mikro yapı etkileşimlerini tekrarlı nanogirininim yoluyla araştırmıştır [103]. Nokta kaynaklı DP 1000-GI çift fazlı yüksek mukavemetli çelik üzerindeki kaynak bölgelerinin çatlak boyutunu ve kırılma tokluğunu araştırmak için tekrarlı nanogirininim yöntemini kullanmıştır [104].

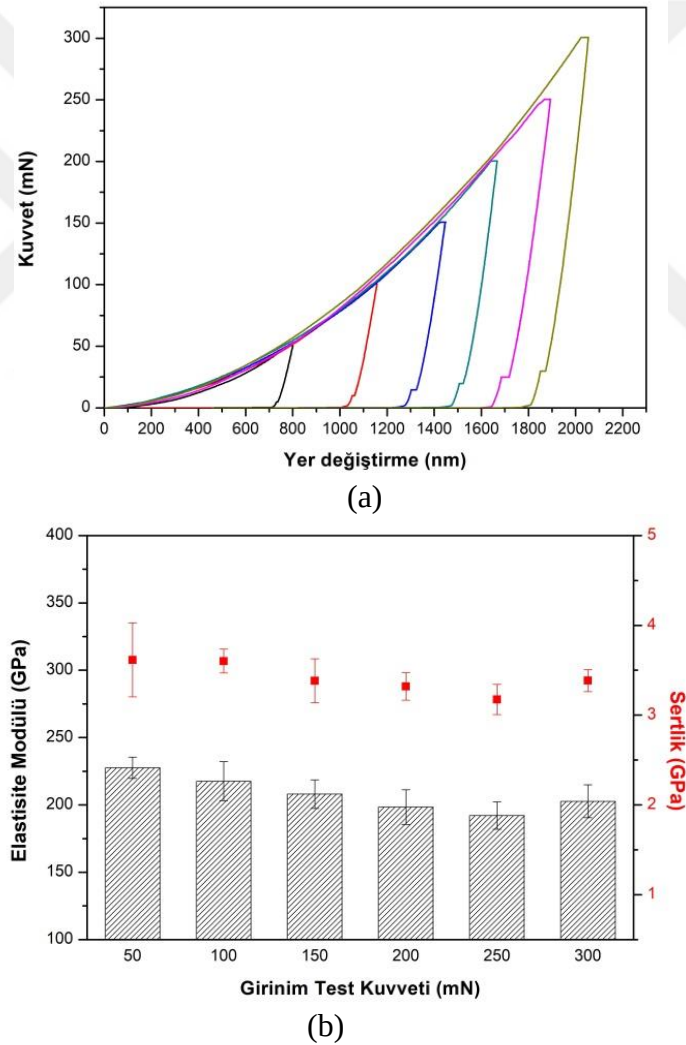
3.3.1.2. Konvansiyonel (Conventional) Girininim

DP 800 çift fazlı çeliğine 50 mN ve 100 mN kuvvetlerde uygulanan ve dağlanmış numune yüzeyinde nanogirininim izleri Şekil 44'te gösterilmektedir. Malzemenin iç yapısında martenzit ve ferrit yapılar gösterilmiştir. Literatürle uyumlu olarak, martenzit faz, ferrit matris içinde adalar şeklinde gözlenmektedir. Tüm girininimlerin, hem martenzit hem de ferrit faz üzerine yerleştiği açıkça görülmüştür. Bu nedenle, elde edilen ölçümler, tek bir faz için olanlardan ziyade genel malzeme tepkisi olarak kabul edilir. Sadece 50 mN kuvvette girininim izinin diğerlerinde daha küçük olmasından dolayı boyut etkisi kısmen görülmektedir.



Şekil 44. (a) 50 mN kuvvette konvansiyonel girininim dağlanmış yüzey görüntüsü; (b) 100 mN kuvvette konvansiyonel girininim dağlanmış yüzey görüntüsü, F (Ferrit) M (Martenzit)

Şekil 45'de farklı kuvvet seviyelerinde (50, 100, 150, 200, 250, 300 mN) konvansiyonel girinim altında DP 800 çift fazlı çeliği için kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Girinim ölçümleri 9 farklı lokasyonda yapıldı. Şekil 45(a)'da, farklı girinim kuvvetleri için kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürde araştırmacılar tarafından farklı malzemeler için benzer gözlemler yapılmıştır [100, 105]. Geri yükleme eğrilerinin sonuna doğru küçük bir çıkıntı, östenitten martenzit faz dönüşümünün meydana geldiğini, bu girinim alanının yakınında hacim artışına ve girinim ucunun geri itilmesine neden olduğunu gösterir. TRIP700 çeliği ve Si için benzer çalışmalar yapılmıştır [106, 107].



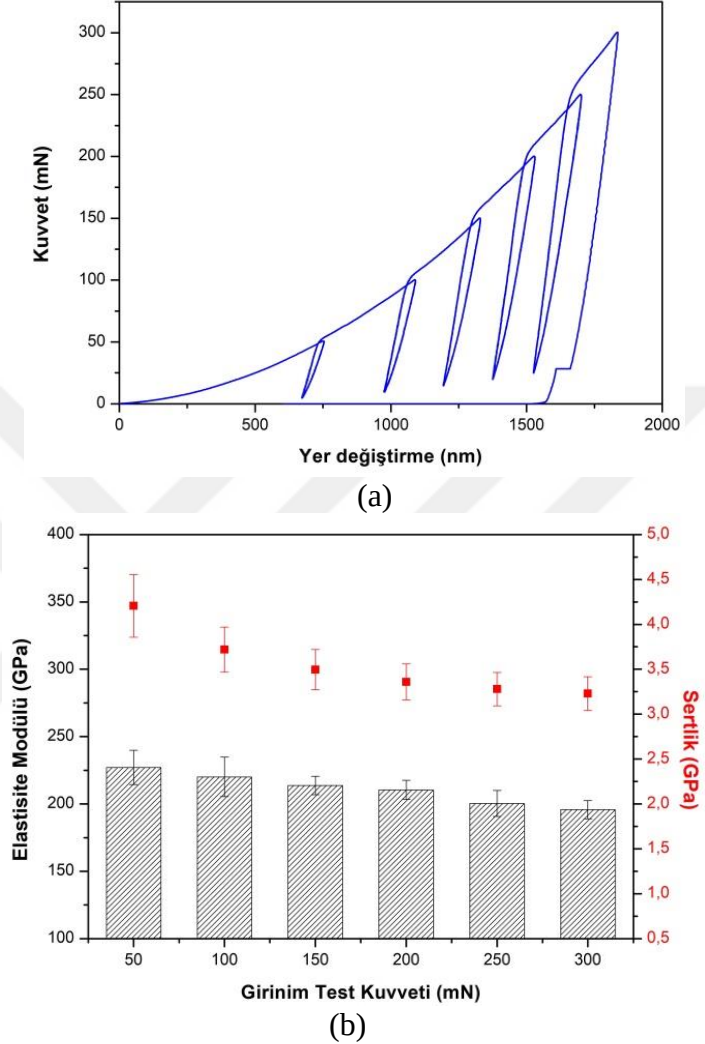
Şekil 45. (a) Konvansiyonel girinim için farklı maksimum kuvvetlerde nanogirinim kuvveti - yer değiştirme ile değişimi; (b) DP 800'de uygulanan ölçüm kuvvetine göre elastisite modülü ve sertliğin değişimi

Bu girinimlerden hesaplanan sertlik ve elastisite modülü değerleri de sırasıyla Şekil 45(b)'de verilmiştir. Sertlik değerleri 3.17 - 3.62 GPa aralığında, elastisite modülü değerleri ise 192 - 227 GPa aralığında bulundu. DP 1000 çeliği için 5000 nm girinim derinliğinde benzer sertlik değerleri bulduklarını bildirmişlerdir [108]. Hem sertlik hem de elastisite modülü verilerinde eğilimin artan girinim kuvveti ile 250 mN kuvvete kadar azaldığı gözlemlendi. Sertlik değerlerindeki değişimin dar bir aralıkta olduğu bulunmuştur. Bu, girinim kuvvet seviyelerinin nispeten yüksek olduğu anlamına gelir. Böylece elde edilen değerler literatürde çift fazlı çelikler için tek tek bileşenlerden ziyade genel sertliğe karşılık gelir. Fazların sertliğini bulmak için 0.25 – 15 mN aralığında maksimum kuvvet uygulanması gerektiği vurgulanmıştır [42].

3.3.1.3. Kademeli (Multi-step) Girinim

Kademeli girinim, numune yüzeyine tek bir girinim yapılarak farklı yer değiştirmelerde mekanik özellikleri belirlemek için kullanılır. Mikroyapısal değişimin ardışık deformasyon üzerindeki etkisini araştırmak için yararlı bir yöntemdir. Literatürde, malzemelerin faz dönüşümünü incelemek için kademeli girinim kullanılmaktadır [42, 100, 109]. Kademeli girinim ile sertlik ve elastisite modülü değerlerini, gevrek ve sünek malzemelerde girinim derinliğinin bir fonksiyonu olarak elde etmişlerdir [110, 111]. Bu çalışmada, 50'den 300 mN kuvvet seviyelerine artan kademeli girinimler gerçekleştirilmiştir. Şekil 46(a) incelendiğinde, yeniden yükleme eğrilerinin eğimi konvansiyonel yükleme eğrilerinden daha yüksek olduğu fark edilmiştir. Bu husus, her yeni yüklemede daha yüksek girinim kuvvetleri uygulandıkça malzemenin sertleşmesi ile açıklanabilir. Şekil 46(b) ise farklı girinim kuvveti seviyelerinde sertlik ve elastisite modülü değişimlerini göstermektedir. Girinim kuvveti arttıkça, hem sertlik hem elastisite modülü değerlerinde azalma ve benzer eğilim görülmüştür. Bu sonuç, girinim derinliği arttığında matrisin (ferrit) yumuşak bir alt tabaka görevi görmesi ve kuvvetin martenzit yerine ağırlıklı olarak ferrit tarafından taşınması gerçeğiyle açıklanabilir [108]. Sertlik değerleri, 200 mN'a kadar artan kuvvette azalır ve daha yüksek kuvvetler için neredeyse sabit kalır. Literatürde girinim boyut etkisi, daha düşük girinim kuvvetlerinde veya daha küçük alana sahip girinim yer değiştirmelerinde olduğunu not etmişlerdir. Literatürle

uyumlu olarak, bu çalışmada ise 50-100 mN aralığında girinim boyut etkisi fark edilebilir niteliktedir. Literatürde de farklı çelikler için benzer sonuçlar bildirilmiştir [53, 112].

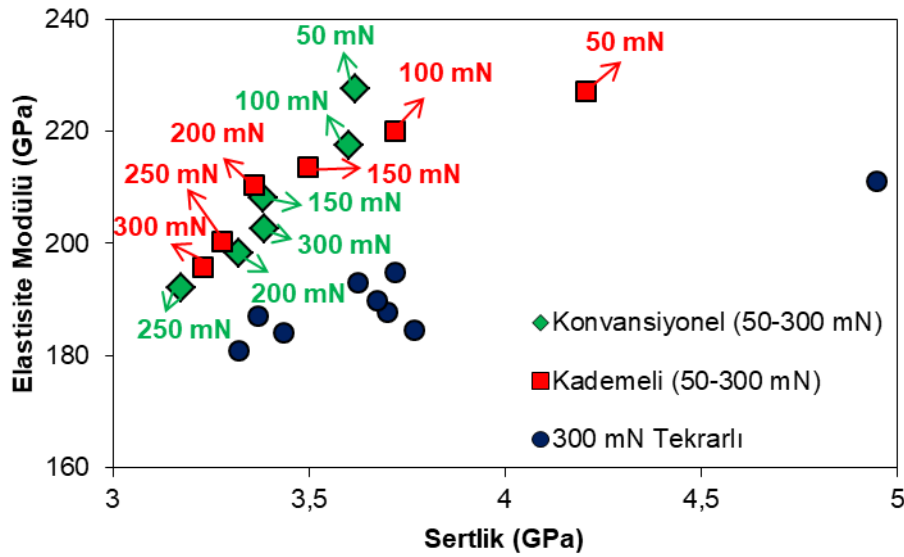


Şekil 46. (a) Kademeli girinim için kuvvet – yer değiştirme eğrisi; (b) DP 800'de uygulanan ölçüm kuvvetine göre elastisite modülü ve sertliğin değişimi

3.3.1.4. Girinim Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Üç farklı ölçüm ile DP 800 çeliğinin sertlik ve elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 47'de gösterilmektedir. Her girinim ölçüm durumunda, DP 800 malzemesinin elastisite modülü, artan sertlik ile arttığı gözlenmiştir. Konvansiyonel ve kademeli girinimler yoluyla elde edilen elastisite modülü verileri oldukça iyi bir uyum içindeydi. Ayrıca, 50 mN'de elde edilen veriler dışında sertlik değerleri için aynı sonuca varılabilir. Literatürde, sertlik

verilerinin ferrit-martenzit fazlarında rapor edilen sertlik aralığında olduğu bildirilmiştir. Ancak girinim ölçümlerinden elde edilen sonuçların dar bir aralıkta olduğu görülmüştür. Bu durum uygulanan kuvvet seviyelerinden kaynaklanmıştır. Literatürde nispeten daha düşük girinim kuvvetleri (10 mN kuvvete kadar) kullanılmıştır. Bu girinim kuvvetlerinin kullanılması ile, farklı fazların (ferrit ve martenzit) sertlik değerlerinin bulunmasına yol açar [113]. Mevcut çalışmada, kullanılan girinim kuvvetlerinden dolayı malzemenin bileşenlerinden ziyade genel bir sertlik değeri bulunmuştur. Bu nedenle, farklı fazların mekanik özelliklerini araştırmak için, girinim alanı (girinim kuvveti seviyesi) fazların tane boyutundan daha küçük seçilmelidir. Ayrıca, DP 800 çeliğinin konvansiyonel girinimde elde edilen elastisite modülü değerleri en yüksek seviyede iken, 300 mN sabit kuvvet seviyesinde tekrarlı girinimde ise sertlik değerleri en düşük seviyede olduğu gözlenmiştir. Tüm sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirildi ve karşılaştırıldı. DP 800 çeliğinin farklı mekanik özelliklere sahip iki fazı olmasına rağmen, en düşük maksimum kuvvet seviyesi (50 mN) bile malzemenin mikro mekanik davranışını anlamak için yeterince yüksekti.



Şekil 47. DP 800 çeliğinde üç farklı girinim (konvansiyonel, kademeli ve 300 mN tekrarlı) için sertlik ve elastisite modülü arasındaki ilişki

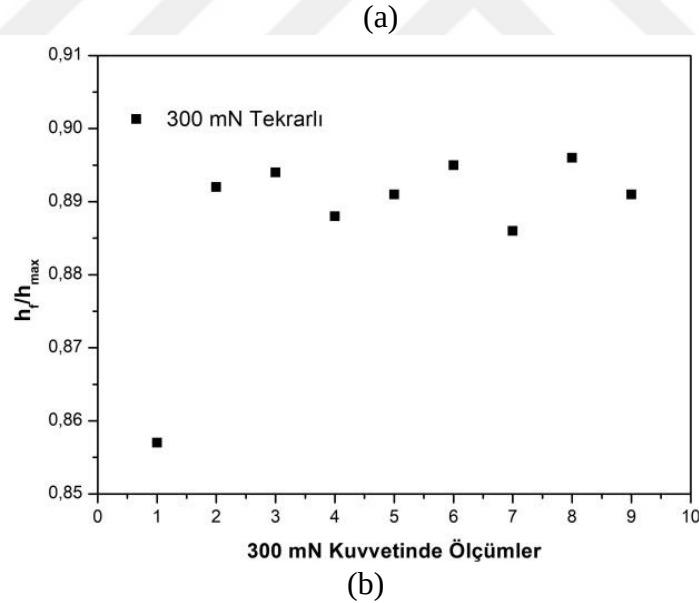
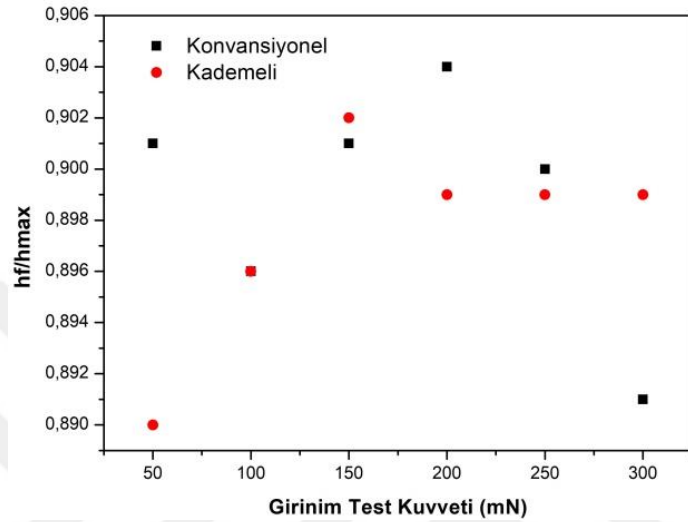
Girinim türü ve kuvvet seviyesinin etkisi, ileri yüksek mukavemetli çelik DP 800 malzemesi için araştırılmıştır. Mikrogirinimde konvansiyonel, tekrarlı ve kademeli olmak üzere üç farklı yükleme koşulu denenmiştir. Konvansiyonel girinimde, 50 - 300 mN arasında altı farklı maksimum girinim kuvveti denendi. Elastisite modülü değerleri 192-

227 GPa aralığında, sertlik değerleri ise 3.17-3.62 GPa aralığında kaydedildi. Bu girinimde daha az dağınık sertlik verileri, seçilen girinim kuvvetlerinin, ferrit ve martenzit gibi çelik fazlarından ziyade genel malzeme özelliğini göstermesinden kaynaklanmaktadır. Tekrarlı girinimler 300 mN seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama sertlik ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 3.57 GPa ve 187.7 GPa olarak elde edilmiştir. Kademeli girinimde ise 50 mN arttırım ile girinim kuvveti seviyesi 50'dan 300 mN'a yükseltilmiştir. Girinim boyut etkisi olarak adlandırılan artan girinim kuvveti ile sertlik ve elastisite modülü değerlerinin azaldığı görülmüştür. Girinim boyut etkisinin daha düşük 50 mN kuvvette daha belirgin olduğu bulunmuştur. Farklı girinim kuvvetlerinin sertlik ve elastisite modülü üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için veriler tek yönlü ANOVA ($p \leq 0.05$) kullanılarak analiz edildi. Hem sertlik hem de elastisite modülü değerlerinde girinim kuvvetleriyle meydana gelen değişikliklerin, kuvvet seviyeleri (50-300 mN) için önemsiz olduğu ortaya çıktı.

3.3.1.5. DP 800 Çeliği Numunesinde Yığılma Etkisi

Girinim sırasında plastik olarak deforme olmuş malzeme, girinim yüzeylerine doğru akma eğilimindedir ve girinimin merkezinden uzağa itilir. Yığılma olarak bilinen bu durum, hesaplanan temas alanını ve elde edilen mekanik özellikleri etkiler. h_f/h_{max} değerleri (h_f son girinim derinliği ve h_{max} maksimum girinim derinliği) hesaplanmıştır. Teorik olarak h_f/h_{max} 0 ile 1 arasında değişmektedir. Değer sıfıra yaklaştıkça, malzeme tam elastik davranış sergilemekte ve dolayısıyla geri yükleme aşamasında tüm deformasyonlar ortadan kalkmaktadır. Öte yandan, elastik toparlanmanın (geri esneme) meydana gelmediği $h_f/h_{max} = 1$ olduğunda malzeme rijit plastik davranış gösterir. $h_f/h_{max} \geq 0,7$ olduğunda yığılmanın bir göstergesi olarak kabul edilirken, h_f/h_{max} oranı 0,7'den küçük olması halinde çökmenin (sink-in) olduğu kabul edilir. Şekil 48'de konvansiyonel, kademeli ve 300 mN tekrarlı girinimler için yüklemenin bir fonksiyonu olarak h_f/h_{max} değerleri gösterilmiştir. Mevcut hesaplamalarda çoğu durumda h_f/h_{max} 0,7'den büyük bulundu. Bununla birlikte, yığılma için farklı kritik değerler bildiren çeşitli çalışmalar vardır. Bolshakov vd. [114] $h_f/h_{max} = 0.951$ olduğunda alüminyum için yığılma etkisi bildirmiştir. Giannakopoulos vd. [60] ise AISI 1070 ultra yüksek mukavemetli çelik için $h_f/h_{max} = 0.875$ değerini yığılma etkisinin başlangıç noktası olarak kabul etmiştir. Qian vd. [97] 2-200 mN kuvvet aralığında bakır ve paslanmaz çelik için $h_f/h_{max} = 0,8$ 'den daha yüksek olarak kaydetmişlerdir. Xu vd.

[115] sadece h_f/h_{max} oranının değil, aynı zamanda malzemenin deformasyon sertleşme üssünün (n) yığılma ve çökme davranışı için önemli bir faktör olduğunu bildirmiştir. $n > 0.3$ olan malzemeler için yığılma meydana gelmediğini, n değeri 0.3'den küçük malzemelerde ise $h_f/h_{max} = 0.12$ 'nin üzerinde yığılmanın olduğunu belirtmişlerdir.



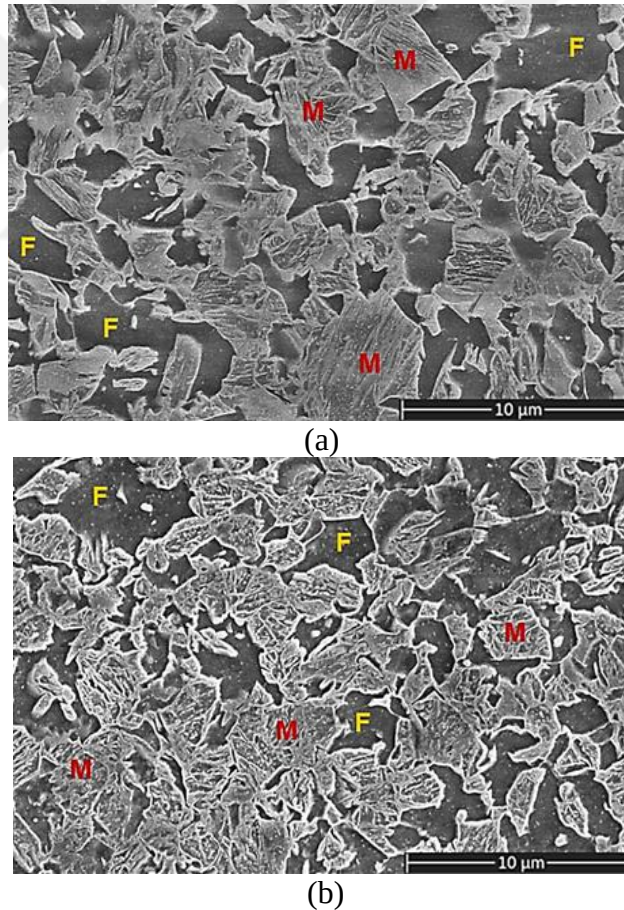
Şekil 48. DP 800 çeliğinin (a) iki farklı ölçüm (konvansiyonel, kademeli) ve (b) 300 mN tekrarlı girinimlerde yığılma etkisi

Yukarıdaki çalışmalardan anlaşılacağı üzere, sadece h_f/h_{max} oranı yığılma etkisini ölçmek için tek kriter olarak kullanılamaz ve bu oran malzemedan malzemeye değişebilir. Gale vd. [116] h_f/h_{max} oranının yığılma veya çökme oluşumunu belirleme açısından faydalı olduğunu, ancak yığılma özelliklerini tam tahmin etmek için doğru olmadığı sonucuna

varmıştır. Benzer şekilde Ekmekci vd. [117] sinterlenmiş bakır toz kompaktları ve bakır levha için h_f/h_{max} değerinin 0.90–0.97 aralığında elde edildiğini ancak deformasyon sertleşmesi ve sinterleme etkisi nedeniyle yığılma gözlemlenmediğini belirtmiştir. Şekil 48’de gösterildiği gibi h_f/h_{max} için ortalama değer 0.897 olarak hesaplandı. DP 800 çeliğinin deformasyon sertleşmesi gösterdiğinden dolayı yığılma önemli düzeyde değildir.

3.3.2. DP 1000 ve DP 1200 Çelikleri Üzerinde Gerçekleştirilen Nanogirininimler

Tez faaliyetlerinde DP 800 malzemesi üzerinde gerçekleştirilen nanogirininimlerden sonra araştırma kapsamında incelenen diğer otomotiv çelikleri üzerinde de benzer protokoller uygulanmıştır. Şekil 49’da DP 1000 ve DP 1200 numunelerine dağlama sonrası tarama elektron mikroskobu ile elde edilen içyapı görüntüleri verilmiştir.



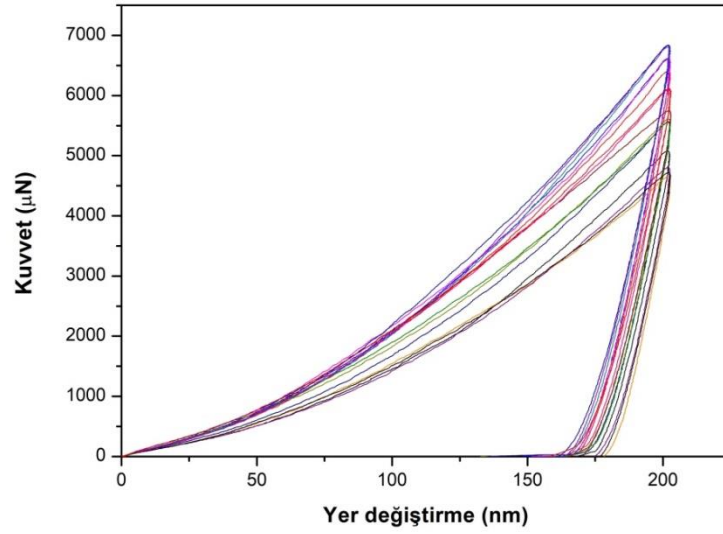
Şekil 49. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin TEM görüntüleri

DP 1000 %40,6 ferrit + %59,4 martenzit ve DP 1200 için %36,6 ferrit + %63,4 martenzit oranına sahip olduğu Image J (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) yazılımıyla belirlenmiştir. DP çeliğinde ferrit-martenzit fazlarının sertliğinin, dislokasyon yoğunluğu ve iç gerilmeler dışında kimyasal bileşim, boyut, morfoloji ve faz dağılımı gibi birçok faktöre bağlı olduğu bildirilmiştir [118]. Tablo 14'te literatür verileri incelendiğinde nispeten düşük sertlik değerlerinin ferrit, yüksek sertlik değerlerinin ise martenzite karşılık geldiği anlaşılmaktadır. DP 1000 çeliğinin mikro yapısı için sertlik değişimi, bu çalışmada yaklaşık ~4 GPa (Ferrit) ve ~9 GPa (Martenzit) arasında elde edildi. DP 1200 mikro yapısı için 4 - 8,5 GPa aralığında sertlik değerleri elde edilmiştir.

Tablo 14. Literatürde DP çeliklerinin ferrit ve martenzit fazlarının sertliği

Literatür	Malzeme	Sertlik (GPa)	
		Ferrit	Martenzit
Taylor vd. [119]	DP 980	2 - 3	5 - 9,5
Rahimi vd. [40]	DP 1180	3,5 - 5,5	6 - 8,5
Zhang vd. [49]	DP 980	4,05	8,43
Hernandez vd. [120]	DP 980	2 - 4	6 - 8
Delince' vd. [42]	DP 1000	2 - 4	4 - 8

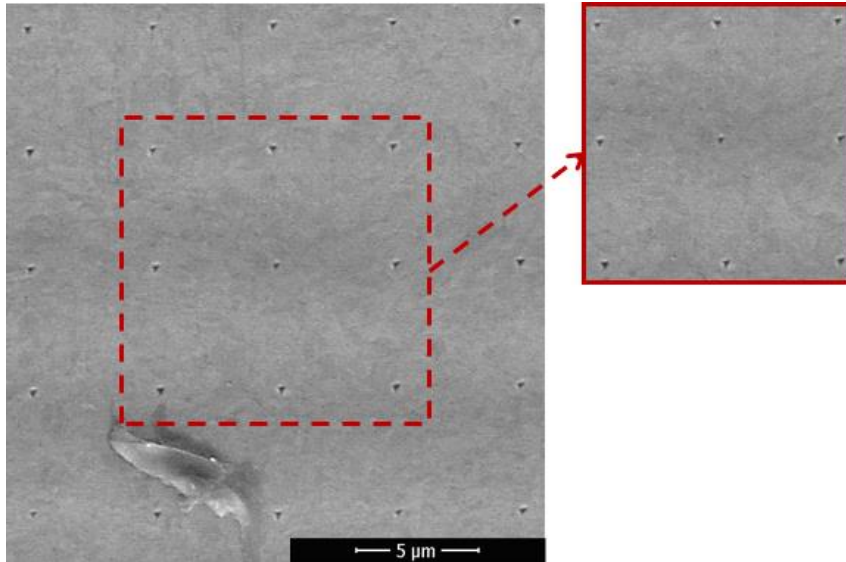
Şekil 50'de DP 1000 numunesi üzerinde yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen nanogirinin ölçümünden elde edilen tipik kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları JOM - The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society dergisinde yayınlanmıştır (*Ekmekci vd., Effect of Plastic Deformation on the Mechanical Properties of Dual-phase Steels Using Conventional vs. Nanoindentation Techniques, JOM - The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, (2023)*).



şekil 50. DP 1000 numunesine uygulanan nanogirinin ölçümünden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri

3.3.2.1. Çift Fazlı Çeliklerinin AKM Analizi

şekil 51’de DP 1000 ve DP 1200 otomotiv çeliği numuneleri üzerinde 5x5 matris şeklinde nanogirinin yapılan alanın ortasından 3x3 matrislik kısmın atomik kuvvet mikroskopundan alınan görüntüleri verilmiştir. Tablo 15’te ise yine aynı analizden elde edilen otomotiv çeliği numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



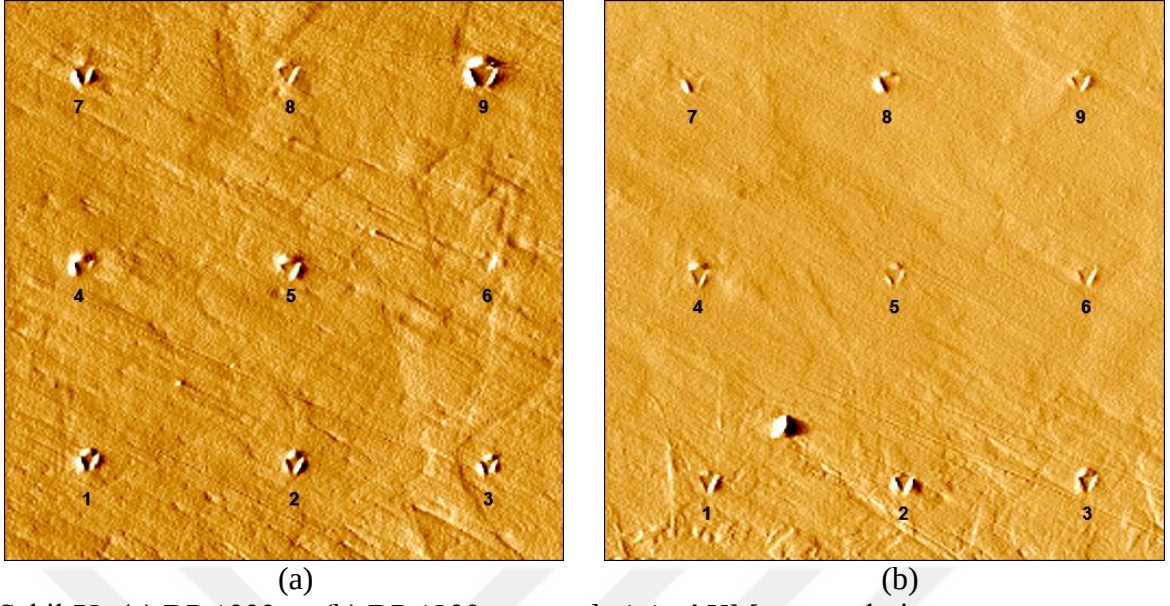
şekil 51. Otomotiv çelik numunelerinde nanogirinin yapılan bölge üzerinden AKM analizlerinin gerçekteştirildiği bölge (3x3 ölçüm alanı)

DP 1200 numunesinin yüzey pürüzlülüğünün DP 1000 numunesinin yüzey pürüzlülüğünden belirgin şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Numune parlatma prosedürleri aynı olsa da DP 1200 numunesinin daha yüksek oranda martenzit içermesi nedeniyle daha sert bir mikroyapıya sahip olmasının bu farklılığa sebep olduğu kanaatine varılmıştır. Parlatılmış numune yüzeylerinin ortalama pürüzlülük değerleri 0,21 - 0,35 μm arasında elde edilmiştir. Literatürde, çift fazlı çelik DP 600 için gaz tungsten ark kaynağı işlemi ileri yüksek mukavemetli çeliklerinin birleştirilmesi için alternatif bir seçenek olarak yapılmıştır. Bu çalışma ile sergilenen mikroyapısal bileşenleri ortaya çıkarmak için yapılır. Atomik kuvvet mikroskobu ile pürüzlülük değerleri 0,15 μm olarak bulunmuştur [121].

Tablo 15. Otomotiv çelik numunelerin pürüzlülük değerleri

Numune	Pürüzlülük Değeri (R_a) (μm)
DP 1000 Deforme olmamış	0,22
DP 1000 Deforme olmuş	0,20
DP 1200 Deforme olmamış	0,32
DP 1200 Deforme olmuş	0,35

Şekil 52’de DP 1000 ve DP 1200 numunelerine ait parlatılmış yüzeylerin 50 nm derinliğe kadar girinim izlerinin 2 boyutlu AKM görüntüleri verilmiştir. Numuneler üzerinde 5x5 ölçüm alınmış olsa da AKM cihazının bir defada tarayabileceği alan kısıtı nedeniyle, 3x3 ölçüm matrisi gösterilmiştir ve bu ölçümler 1’den 9’a kadar numaralanmıştır. Tablo 16’da ise DP 1000 ve DP 1200 çift fazlı çeliklerine ait nanogirinim ölçümlerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülleri listelenmiştir. AKM görüntüleri incelendiğinde farklı derecelerde yığılma veya çökme etkilerinin olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak bu hususun alınan ölçümdeki çözünürlükle de bağlantılı olduğu gözardı edilmemelidir.



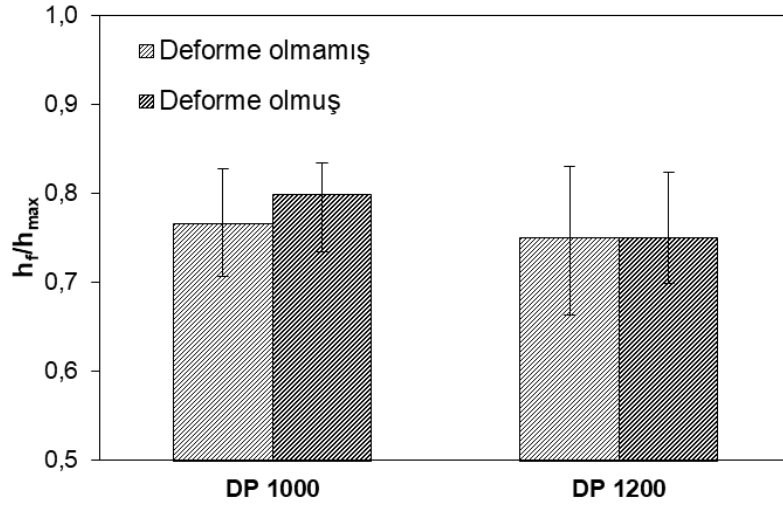
Şekil 52. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin AKM görüntüleri

Tablo 16’da verilen sonuçlar incelendiğinde, DP 1000 numunesine ait ortalama sertlik değerinin beklenenden farklı olarak DP 1200 numunesinin sertlik değerinden belirgin olmasa da yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında DP 1200 numunesinin belirgin şekilde DP 1000 numunesinden daha yüksek bir ortalama elastisite modülüne sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 16. Otomotiv çeliklerinde AKM görüntüleri verilen nanogirininin sertlik ve elastisite modülü değerleri

Numune	Ölçüm No	Sertlik (GPa)	E (GPa)
DP 1000	1	7,4	213,3
	2	7,5	217,5
	3	7,8	223,1
	4	4,9	210,4
	5	4,9	219,3
	6	7,9	201,3
	7	7,5	239,8
	8	5,0	213,9
	9	4,7	211,7
Ortalama		6,4	216,7
DP 1200	1	5,1	231,6
	2	5,1	246,9
	3	6,5	248,4
	4	6,3	233,2
	5	7,2	238,2
	6	7,1	232,1
	7	6,7	240,8
	8	5,4	249,7
	9	6,8	231,2
Ortalama		6,2	239,1

AKM görüntüleri incelendiğinde, farklı derecelerde yığılma veya çökme etkilerinin olabileceği değerlendirildi. Bu etkiler hesaplanan temas alanını, dolayısıyla elde edilen mekanik özellikleri etkiler. h_f/h_{max} 1'e yakınsa yığılma büyüktür ve deformasyon sertleşmesi küçüktür. $h_f/h_{max} < 0.7$ ise, malzemenin deformasyon sertleşmesine veya sertleşmesine bakılmaksızın hiç veya sadece çok küçük yığılma gözlenir [56]. Şekil 53 DP 1000 ve DP 1200 çelikleri için 50 nm girinim derinliğindeki h_f/h_{max} değerlerini göstermektedir. DP 1000 için ortalama h_f/h_{max} değeri 0.78, DP 1200 için 0.75 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle yığılma önemli düzeyde görülmemektedir.



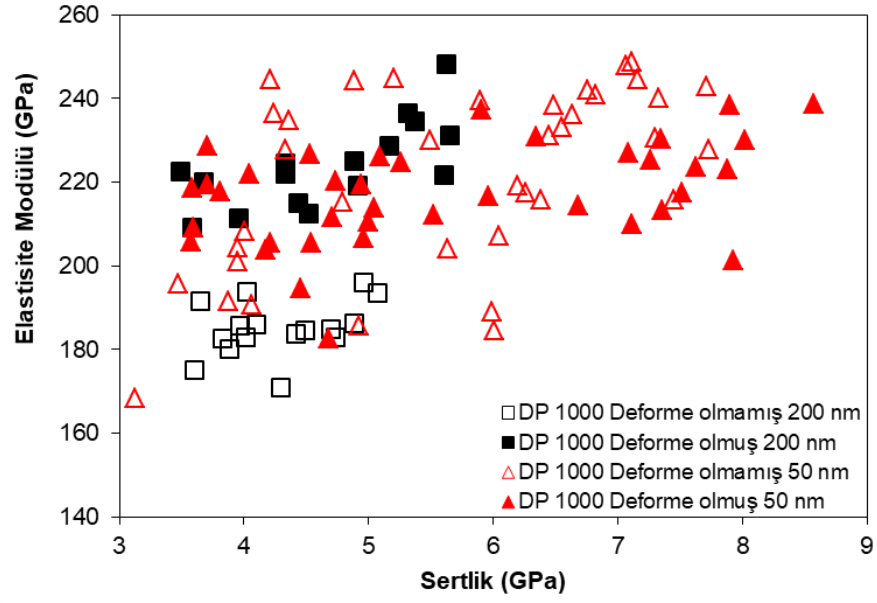
Şekil 53. Nanogirinin yer değiştirmelerinde DP 1000 ve DP 1200 elde edilen yığılma etkisi

3.3.2.2. DP 1000 ve DP 1200 Çelikleri Üzerinde Nanogirinin Analizi

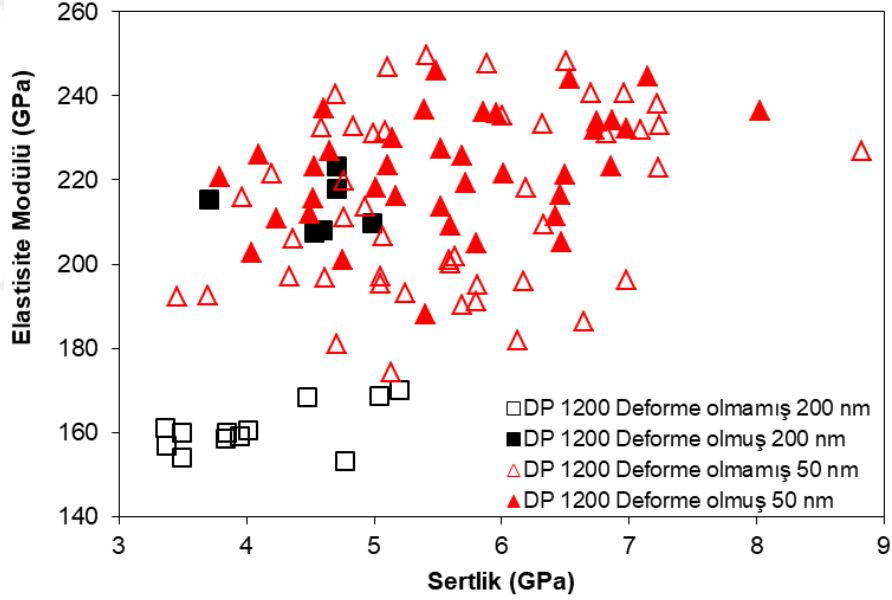
Zırh çeliği numunelerinde balistik test ve mermi girinimi sonucu oluşan deformasyon etkisi incelenirken, otomotiv çelikleri üzerinde deformasyon işlemi 3-nokta eğilme testleri ile sağlanmıştır. Eğilme testlerine maruz bırakılan otomotiv çeliklerinin deformasyon öncesi ve sonrası mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için nanogirine tabi tutulmuştur. Bu nanogirinin literatürdeki veriler dikkate alınarak mikroyapıda fazlara ait özellikleri elde edebilmek amacıyla maksimum yer değiştirme kontrollü ölçümler tatbik edilmiştir. Şekil 54'te, DP 1000 ve DP 1200 numunelerine 50 ve 200 nm maksimum yer değiştirmede ayrı ayrı 5x5 matris şeklinde uygulanan nanogirinden elde edilen sertlik ve elastisite modüllerini gösterilmektedir. Bu iki farklı maksimum yer değiştirmede elde edilen maksimum kuvvet değerleri 50 nm için 0,9 mN ve 200 nm için 7 mN düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu çalışmada ele alınan malzemeler ferrit ve martenzit olmak üzere iki farklı faza sahip olduğundan, bu fazların özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, literatürde açıklanan farklı yöntemler kullanılarak numunelerin yüzeyine nanogirinin yapıldı. Ancak, dağlama sonrası nanogirinin izleri TEM'de tespit edilememiştir. Dağlamanın ise nanogirinin neden olduğu izleri ortadan kaldırdığı düşünülmektedir. Bunu önlemek için dağlama süresi kısa tutulmalı veya girinim derinliği artırılmalıdır. Bununla birlikte, dağlama süresi kısa tutulursa, dağlama mikroyapının fazlarını ayırt etmek için yeterli olmayabilir. Girinim derinliği artırılırsa mikro girinime

geçilerek malzemenin fazlarından ziyade makro yapısı değerlendirilmiş olacaktır. DP 1000 için 50 nm'de ortalama sertlik değerleri, deforme olmamış ve deforme olmuş koşullar için sırasıyla 4,93 GPa ve 4,36 GPa olarak elde edildi. DP 1200 için ise 50 nm'de ortalama sertlik değerleri sırasıyla 5,28 GPa ve 5,39 GPa olarak kaydedildi. 200 nm girinim derinliğindeki sertlik değerleri, DP 1000 için deforme olmamış ve deforme olmuş koşullar için sırasıyla 4,29 GPa ve 4,68 GPa olarak kaydedilmiştir. DP 1200 için aynı girinim derinliğinde (200 nm) ortalama sertlik değerleri deforme olmamış ve deforme olmuş koşullar için sırasıyla 4,07 ve 4,54 GPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan, artan girinim derinliği ile (50 nm'den 200 nm'ye) incelenen malzemelerde sertlik değerinin genel olarak deforme olmuş numunede arttığı, deforme olmamış numunede ise azaldığı not edilebilir. Elastisite modülü açısından, sonuçlar deformasyonun ve girinim derinliğinin artması ile yükselme eğilimindedir. Örneğin, DP 1000 numunesi için 50 nm yer değiştirmede deforme olmamış ve deforme olmuş koşullarda ortalama elastisite modülü değerleri 201 GPa ve 211,9 GPa olarak kaydedilmiştir. Öte yandan, yine DP 1000 numuneleri için 200 nm girinim derinliğinde, deforme olmamış ve deforme olmuş koşullar için sırasıyla ortalama elastisite modülü değerleri 185 GPa ve 223,8 GPa olarak kaydedildi. Nanogirinimin kendisi yüzeyde plastik deformasyona neden olduğu için, deforme olmamış ve deforme olmuş ölçümlerin aynı noktadan elde edilemeyeceğine dikkat edilmelidir.

Her iki malzeme için Şekil 54'te maksimum 50 nm ve 200 nm yer değiştirmede elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sertlik değerlerinin 50 nm'de oldukça fazla dağıldığı 200 nm'de elde edilen sertlik değerlerinde ise nispeten dar varyasyonların gözlemlendiği görülmüştür. Bunun, girinim derinliği ne kadar yüksekse temas alanı o kadar büyük olduğundan, ferrit veya martenzit fazlarından ziyade mikro yapının genel tepkisinden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Örneğin 50 nm ölçümlerinde martenzit fazını gösteren 9 GPa'a kadar sertlik değerleri elde edilirken, 200 nm ölçümlerinde sertlik değerleri her iki malzeme için de 6 GPa'dan küçük değerler bulunmuştur. Elastisite modülü değerleri ile ilgili olarak, 200 nm'de ölçümler dikkate alındığında deformasyonun etkisi görülür. Her iki malzeme için deformasyonla birlikte elastisite modülü değerleri artmıştır. Bununla birlikte, 50 nm'de elde edilen ölçümler için böyle bir eğilim gözlenmedi. Literatürde, çift fazlı çeliklere 40 – 100 nm arasında yer değiştirmelerde yapılan nanogirinim ile elde edilen sertlik değerleri, DP 1000 ve DP 1200 için belirlediğimiz sertlik değerleri ile uyum içindedir [119, 122].



(a)



(b)

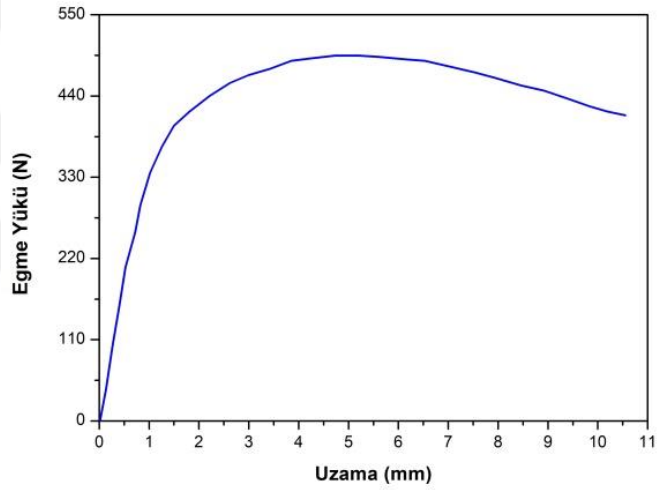
Şekil 54. Maksimum yer değiştirme kontrolü ile (a) DP 1000 numunesine 50 nm ve 200 nm, (b) DP 1200 numunesine 50 nm ve 200 nm nanogirininimlerden elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri

Şekil 54 incelendiğinde, her iki malzeme için 50 nm maksimum yer değiştirmede elde edilen ölçümlerde deforme olmamış ve deforme olmuş numunelerin elastisite modülleri arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Benzer bir husus sertlik değerleri için de geçerlidir. Ortalama sertlik değeri DP 1000 numunesinde deformasyon ile azalma (%13) gösterirken DP 1200 numunesinde az da olsa artış (%1) göstermiştir. Numunelerde 50 nm maksimum yer değiştirmede alınan ölçümlerden farklı olarak, 200 nm girinim

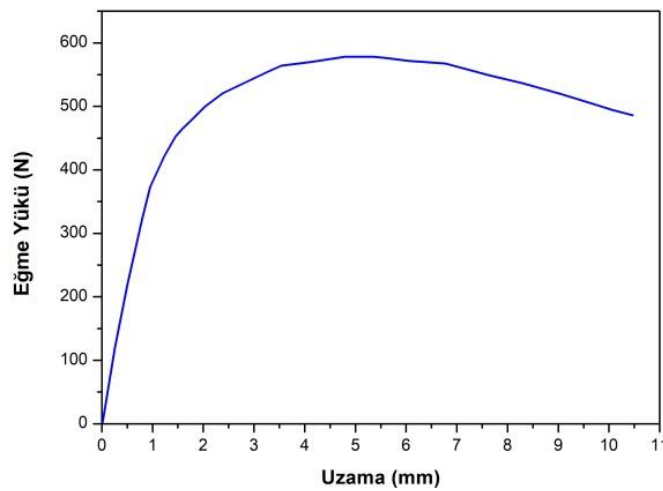
derinliğinde elde edilen ölçümlerde deforme olmuş numunelerin elastisite modüllerinde belirgin bir artış göze çarpmaktadır. Ortalama sertlik değerlerinde az da olsa bir artış (%10) söz konusudur. Girinim derinliği ne olursa olsun, DP 1200 çeliğinin deforme olmuş durumunda hem sertlik hem de elastisite modülünde hafif artışlar tespit edildi.

3.2.2.3. Çift Fazlı Çeliklerinin Eğilme Testi ve Mikro-Vickers Sertlik Sonuçları

Şekil 13'te uygulama prosedürü verilmiş olan 3-nokta eğilme testi, DP 1000 ve DP 1200 otomotiv çeliklerine uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre eğme yükü, beklenildiği gibi DP 1200 çeliğinde daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 55).



(a)



(b)

Şekil 55. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin eğme yükü – uzama (numune düşey yer değiştirmesi) değişimi

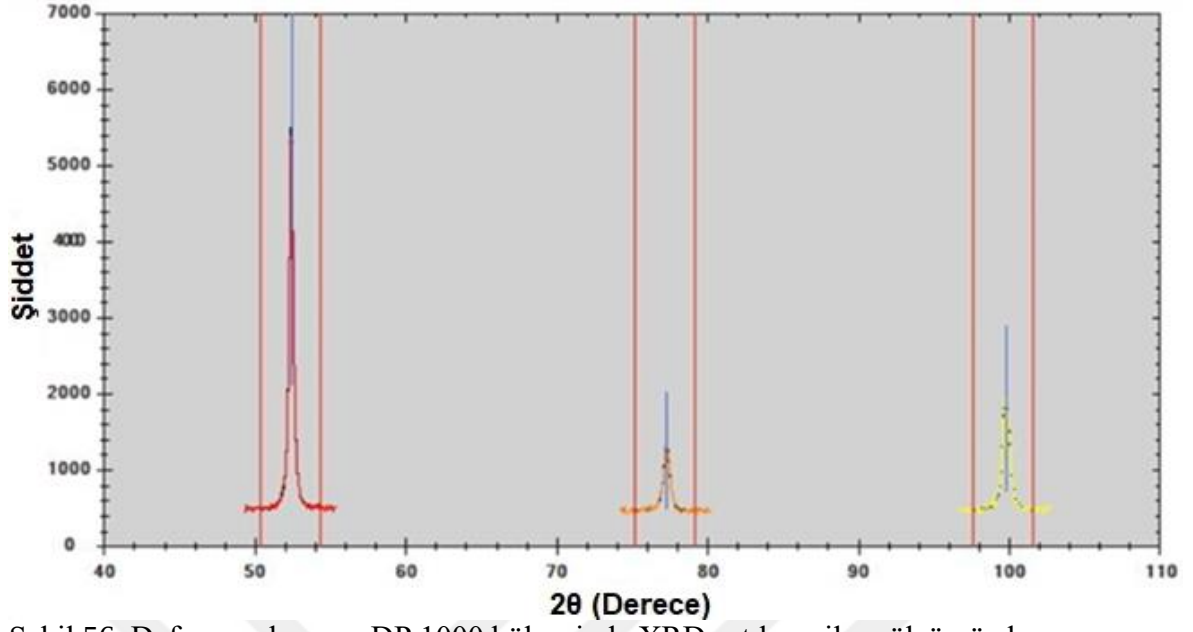
Tablo 17’de verilen otomotiv çeliklerine ait mikro-Vickers sertlik değerlerinde deforme olmuş bölgeden deforme olmamış bölgeye doğru belirgin bir şekilde %10 mertebesinde azalma tespit edilmiştir. Mikro-Vickers sertlik testlerinde 2,94 N kuvvet, 10 sn süresince uygulanmış ve en az 10 ölçümün ortalaması olarak rapor edilmiştir. Deforme olmuş bölgelerde sertlik değeri belirgin şekilde daha yüksektir. Bu durum, malzemedeki deformasyon sertleşmesinin tabii bir sonucudur.

Tablo 17. Otomotiv çeliği numunelerinden elde edilen mikro-Vickers ortalama sertlik değerleri

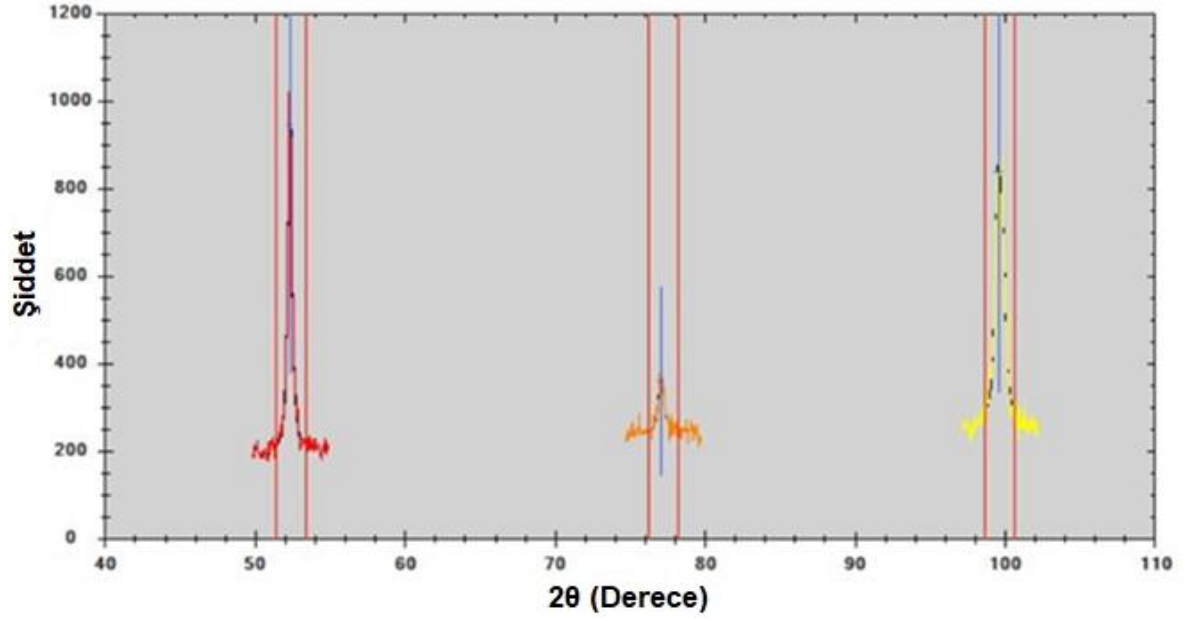
Otomotiv Çelikleri	Sertlik (HV _{0,3})
DP 1000 Deforme olmamış	359
DP 1000 Deforme olmuş	382
DP 1200 Deforme olmamış	364
DP 1200 Deforme olmuş	401

3.3.2.4. Çift Fazlı Çeliklerinin XRD ve Nanogirinin Artık Gerilme Analizleri

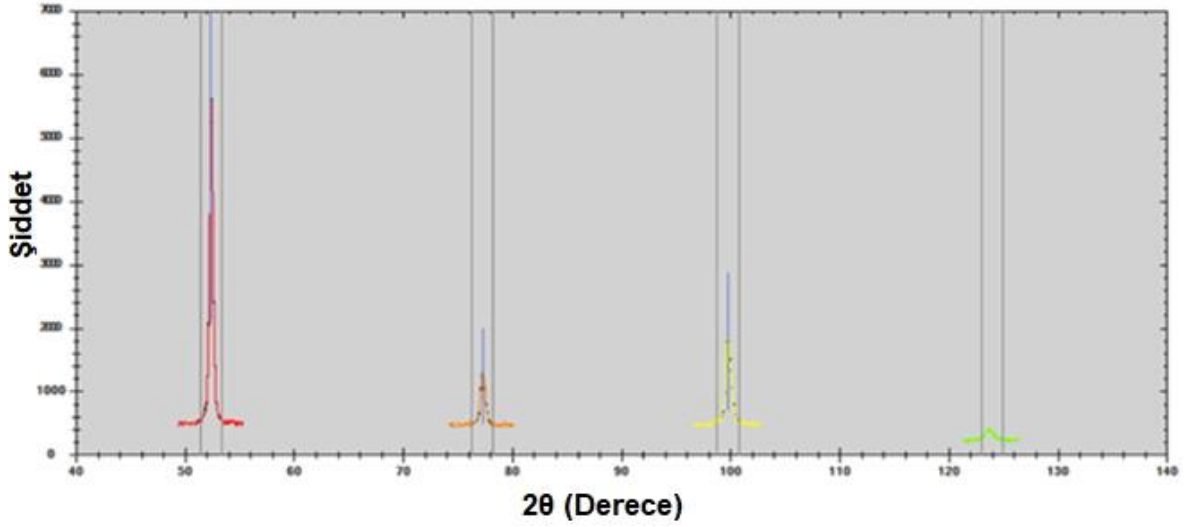
Bu çalışmada, Şekil 56-Şekil 59’da DP 1000 ve DP 1200 otomotiv çeliklerinin deforme olmamış ve deforme olmuş bölgelerin XRD-artık gerilme ölçümleri gösterilmektedir. Her aşamadaki gerilme $2\theta\text{-sin}^2\psi$ yöntemi kullanılarak ölçüldü. XRD-artık gerilme ölçümleri, her iki malzeme için 1,13 μm derinliğinde elde edilmiştir. Şekil 56 ve Şekil 57’de deforme olmamış ve deforme olmuş DP 1000 numunelerinin 2θ aralıklarında pikler $2\theta_{110} = 52^\circ$, $2\theta_{200} = 77^\circ$ ve $2\theta_{211} = 99^\circ$ açılarında elde edilmiştir. Şekil 58 ve Şekil 59’da deforme olmamış ve deforme olmuş DP 1200 numunelerinin 2θ aralıklarında pikler $2\theta_{110} = 52^\circ$, $2\theta_{200} = 77^\circ$, $2\theta_{211} = 99^\circ$ ve $2\theta_{220} = 124^\circ$ açılarında elde edilmiştir. Deforme olmamış ve deforme olmuş DP 1000 numuneleri için XRD’den elde edilen artık gerilme değerleri sırasıyla +12 MPa (çeki) ve -310 MPa olarak bulunmuştur. Öte yandan, DP 1200 numunelerinde deforme olmamış numunelerde -36 MPa ve deforme olmuş numunelerde -794 MPa olarak daha yüksek artık gerilmeler elde edilmiştir. Deforme olmuş numunelerde 3 noktalı eğilme testi sırasındaki deformasyon mekanizmasından dolayı bası gerilmelerine ulaşmıştır. Numuneler, eğilme nedeniyle çekme gerilmesine ve ardından eğilen numunenin dış yüzeyinde bası gerilmesine neden olan geri yaylanmaya (Şekil 65) tabi tutuldu. DP 1000 numunesinde ise deformasyon bası gerilme etkisinin azalmasına neden oldu ve 12 MPa’lık pozitif artık gerilme oluştu.



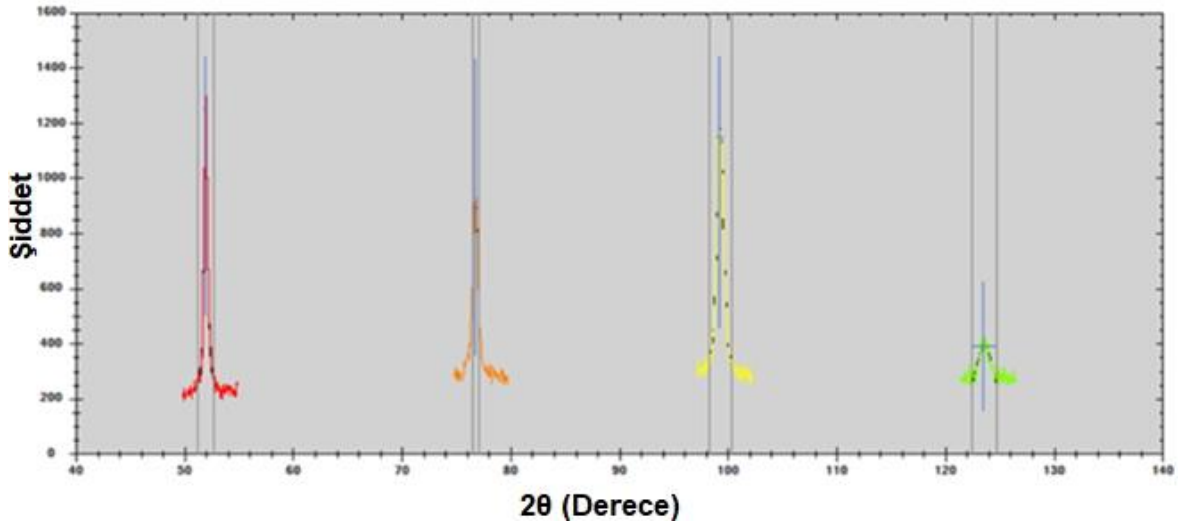
Şekil 56. Deforme olmamış DP 1000 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



Şekil 57. Deforme olmuş DP 1000 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



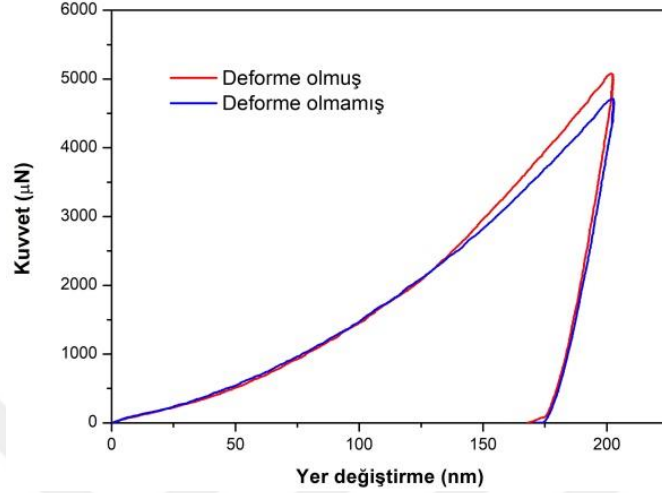
Şekil 58. Deforme olmamış DP 1200 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü



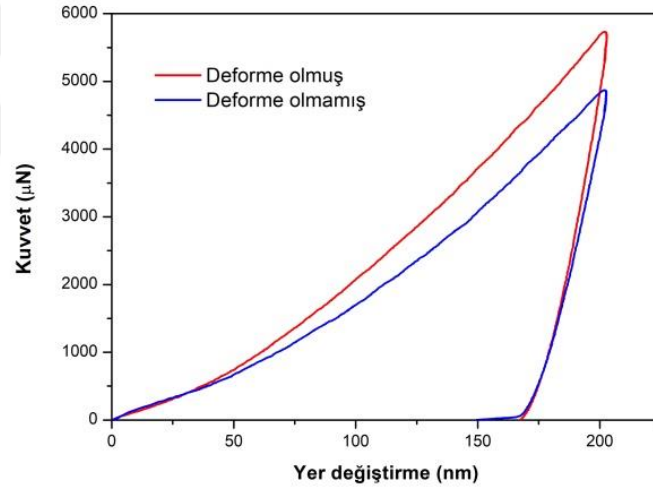
Şekil 59. Deforme olmuş DP 1200 bölgesinde XRD-artık gerilme ölçümü ekran görüntüsü

Deforme olmamış ve olmuş otomotiv çelik numuneleri için denklem 5'te verilen P_1 , P_2 ve h_r değerleri Şekil 60'dan elde edilmiştir. Tablo 18'de çelik numunelerin artık gerilmeleri hesaplanmıştır. DP 1000 ve DP 1200 çeliklerinde XRD ve nanogirininim artık gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Deforme olmuş koşullarında DP 1000 ve DP 1200 malzemeleri için nanogirininimden kaynaklanan artık gerilmeler sırasıyla -398 MPa ve -885 MPa olarak elde edilmiştir. DP 1000 numunesi için her iki ölçüm arasındaki fark %28 olarak gerçekleşirken, DP 1200 numunesi için daha kabul edilebilir bir oranda %11 gerçekleşmiştir. Literatürde [123], XRD ve nanogirininim artık gerilme sonuçları arasındaki

fark, girinim etrafındaki yığılma veya çökme deformasyonundan ve numune yüzeyinin pürüzlülüğünden kaynaklandığı belirtilmiştir.



(a)



(b)

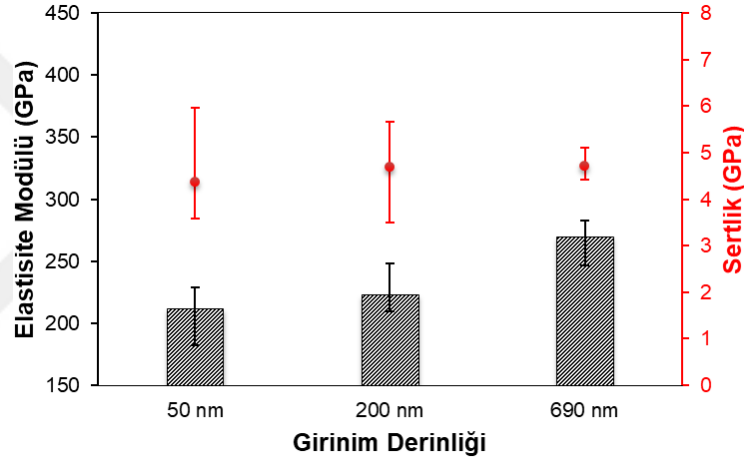
Şekil 60. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 numunelerinin artık gerilmelerin nanogirininimle belirlenmesinde kullanılan kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Tablo 18. Otomotiv çeliği numuneleri üzerinde elde edilen artık gerilme değerlerinin karşılaştırması

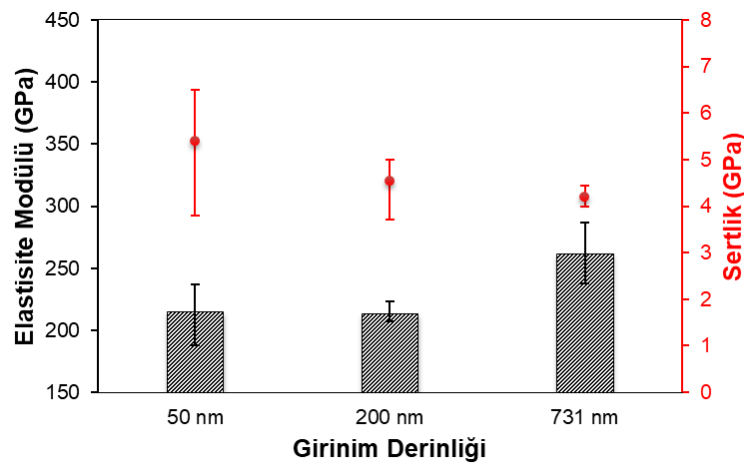
Çelikler	XRD-Artık Gerilme (MPa)	Nanogirininim-Artık Gerilme (MPa)	Fark (%)
DP 1000	-310	-398	28
DP 1200	-794	-885	11

3.3.2.5. DP 1000 ve DP 1200 Çeliklerinin Nanogirinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, DP 1000 ve DP 1200 numuneleri üzerinde yer değiştirme kontrollü (50, 200 nm) ölçümlerin yanısıra 50 mN maksimum kuvvet ile elde edilen ölçümlerin bir karşılaştırması yapılmıştır. Uygulanan 50 mN yükleme, DP 1000 ve DP 1200 numunelerinde sırasıyla 690 nm ve 731 nm derinliğe karşılık gelmektedir. Şekil 61 incelendiğinde, artan girinin derinliğiyle elastisite modülünde belirgin bir artış görülürken sertlik değerlerinde farklı trendler ortaya çıkmıştır. DP 1000 numunelerinin sertlik değerlerinde artan girinin derinliğiyle belirgin bir değişiklik (%5) gerçekleşmemişken; DP 1200 numuneleri için bir azalma (%28) söz konusu olmuştur.



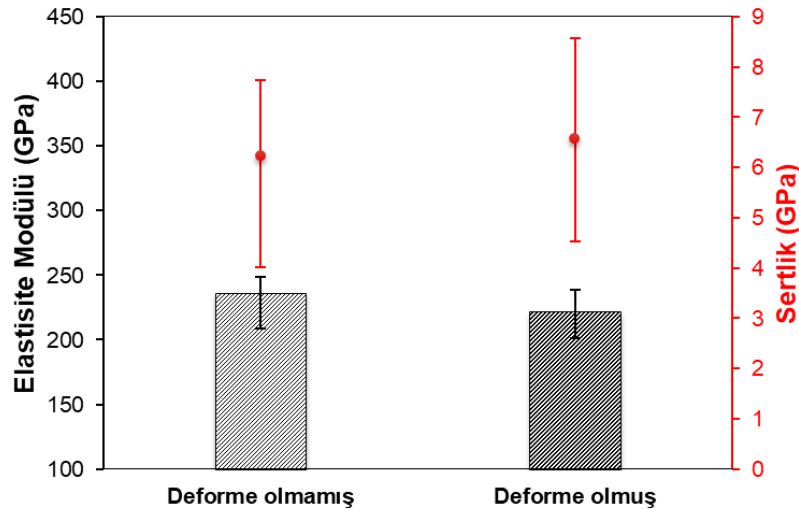
(a)



(b)

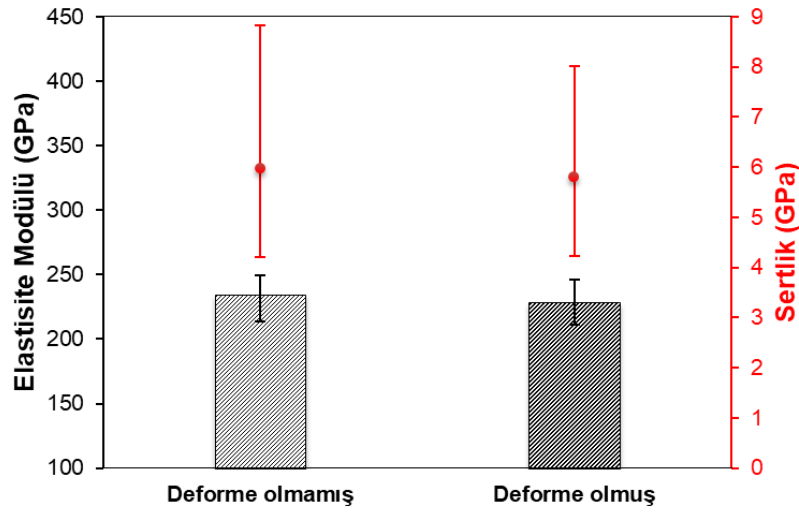
Şekil 61. Üç farklı nanogirinin derinliğinde elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri (a) DP 1000, (b) DP 1200

Şekil 62’de, deforme olmamış ve deforme olmuş DP 1000 numunesinin 50 nm yer değiştirmede sertlik ve elastisite modüllerinin değerleri karşılaştırılmıştır. DP 1000 mikroyapısı için sertlik dağılımı yaklaşık 4 GPa (Ferrit) - 9 GPa (Martenzit) arası dağılımdan oluşmuştur. İki fazın ortalama sertlik değerlerini kullanarak martenzit ve ferrit fazlarını şekilde sertlik değerlerini yaklaşık olarak ayırmak mümkündür. Literatür incelendiğinde, göreceli olarak düşük sertlik değerlerinin ferrit, yüksek sertlik değerlerinin (6.5 - 9 GPa) ise martenzite karşılık geldiği anlaşılmaktadır [52]. Şekil 62 dikkate alındığında, DP 1000’e ait sertlik değerleri deforme olmuş numunelerde azalma (%5) gösterirken elastisite modülünde artış (% 6) görülmüştür.



Şekil 62. DP 1000 numunesinin 50 nm yer değiştirmede sertlik ve elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 63’te, DP 1200 numunesinin 50 nm yer değiştirmede sertlik ve elastisite modülü karşılaştırılması gösterilmektedir. DP 1200 mikroyapısı için sertlik değerleri 4 – 8.5 GPa aralığında elde edilmiştir. Deforme olmuş numunelerde hem sertlik hem elastisite modülü değerlerinde az da olsa artışlar tespit edilmiştir. DP çeliklerinde, ferrit-martenzit fazlarının sertliği literatürde kimyasal bileşimi, dislokasyon yoğunluğu ve iç gerilmeler dışında fazın boyutu, morfolojisi ve dağılımı gibi birçok faktöre bağlı olduğu belirtilmektedir [118]. Bu nedenle sertlik aralığındaki değişiklikler çeşitli nedenlerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 63. DP 1200 numunesinin 50 nm yer değiştirmede elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri

Deformasyonun otomotiv çift fazlı çeliklerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdık. Bilindiği gibi, bu tip çeliklerin mikroyapılarında ferrit ve martenzit olmak üzere iki farklı faz bulunur. Martenzit, ferrit matris içinde dağılmış adacıklar halindedir. Malzemelerde meydana gelen deformasyona öncelikle yumuşak ferrit matris maruz kalır. Deformasyon etkisini ortaya çıkarmak için, deformasyondan önce ve sonra iki malzemede iki farklı maksimum girinim derinliğinde, 50 nm ve 200 nm'de nanogirininimler gerçekleştirildi. Bu çalışma ile deformasyonun etkisiyle mekanik özelliklerin arttığı sonucuna varıldı. Ayrıca daha derin girinimlerde (200 nm) artış oranının daha yüksek olduğu görülmüştür. DP 1200 numunesinin yüzey pürüzlülüğünün DP 1000 numunesinin yüzey pürüzlülüğünden belirgin şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Numune parlatma prosedürleri aynı olsa da DP 1200 numunesinin daha yüksek oranda martenzit içermesi nedeniyle daha sert bir mikroyapıya sahip olmasının bu farklılığa sebep olduğu kanaatine varılmıştır.

Çift fazlı çeliklerde, bileşen fazlar arasında nanogirininim sertliği martenzit fazı için en yüksek, ferrit fazı için en düşüktür. Literatür incelendiğinde [49], denklem 16 ortalama sertlik değerleri ile nanogirininim sertlik değerlerini karşılaştırmak için düşük sertlik (4.05 GPa) ferrite ve yüksek sertlik (8.43 GPa) martenzite karşılık geldiği anlaşılmaktadır. DP çeliğin genel sertliği, bileşen fazın nanogirininim sertliği ve hacim oranı değerleri kullanılarak ortalama sertlik kuralı izlenerek tahmin edilebilir [124, 125]. Ortalama sertlik kuralı şu şekilde ifade edilebilir:

$$H_{ort} = V_f H_f + V_m H_m \quad (16)$$

burada V , hacim oranı olarak tanımlanır ve H , nanogirinin sertliğini belirtir. f ve m harfleri sırasıyla ferrit ve martenzit fazını ifade eder. İki DP çeliğinin deneysel olarak ölçülen nanogirinin sertliği ve tahmini sertlik değerleri Tablo 19'da gösterilmektedir. Tahmini ortalama sertlik, DP çeliğinin türünden bağımsız olarak deneysel nanogirinin sertlik değerine çok yakındı (Fark < %18).

Tablo 19. DP 1000 ve DP 1200 çeliklerinin 50 nm derinliğinde elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması

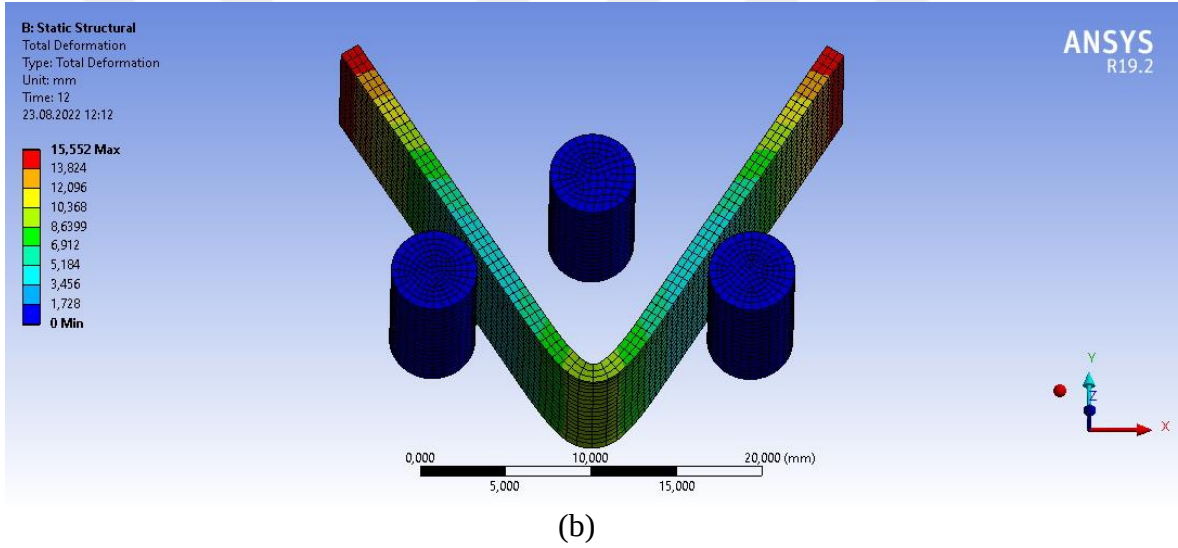
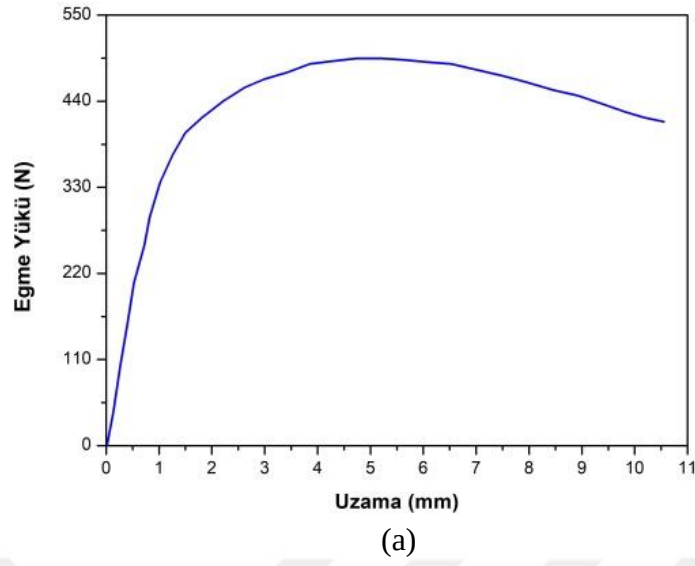
Numuneler	H Ortalama	H Tahmini	Fark %
DP 1000 Deforme olmamış	6,57	6,65	1,18
DP 1000 Deforme olmuş	6,22		6,91
DP 1200 Deforme olmamış	5,80	6,83	17,69
DP 1200 Deforme olmuş	5,97		14,34

3.4. Çeliklerde Sonlu Eleman Analizleri

Tez kapsamında incelenen malzemelere uygulanan deformasyon işlemlerinde oluşan gerilme, birim şekil değişimi, yer değiştirme gibi parametrelerin yanısıra gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin eldesi için sonlu eleman modelleri oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Eğilme Testinde Artık Gerilmenin Sayısal Analizi

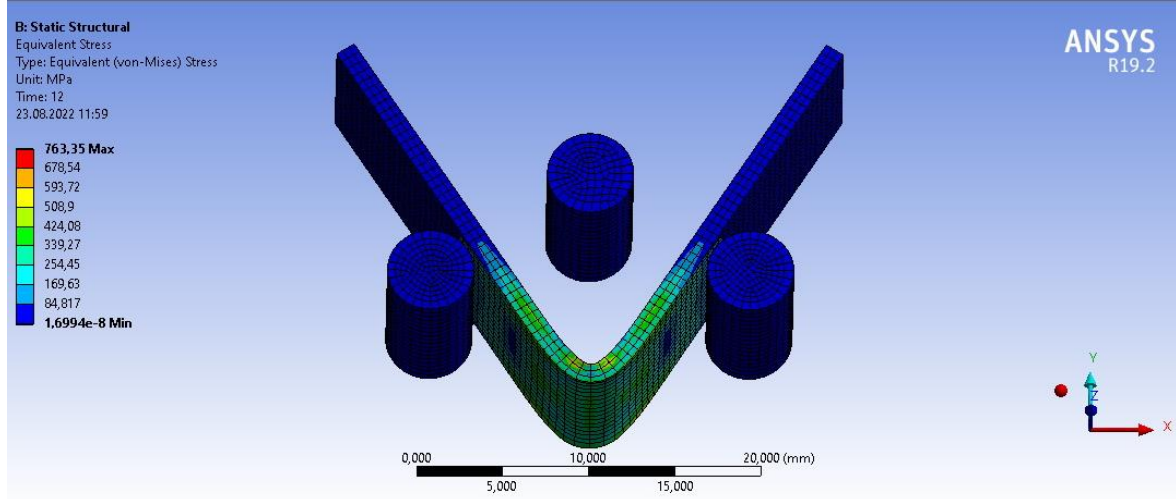
Şekil 64'te DP 1000 otomotiv çeliğine uygulanan 3-nokta eğilme testinin sayısal analiz sonuçları gösterilmektedir. Kullanılan sonlu eleman modelinin ağ örgüsü için, 1 mm boyutlu kare şeklindeki dört düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Modelin tüm düğümleri (node), x ve z eksenleri etrafındaki dönmeye karşı sabitlenmiştir. Şekil 12'de verilen deney düzeneği ve ölçüleri dikkate alınarak modelin orta noktasına -y yönünde yaklaşık 11 mm olacak şekilde yer değiştirme uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modeli, lineer elastik mükemmel plastik malzeme modeli kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 64. DP 1000 numunesinin (a) eğme yükü – uzama grafiği ve (b) 3-nokta eğilme testinin yer değiştirme sayısal analizi

Şekil 65'te DP 1000 numunesi üzerinde gerçekleştirilen 3-nokta eğilme testinin sonlu elemanlar analizi ile artık gerilme değerinin eldesi verilmiştir. Eleman boyutunun 1 mm'den 0,3 mm'ye indiği durumda artık gerilmenin sayısal analiz yöntemiyle eldesinde ıraksama söz konusudur. Beklentilerden farklı olarak XRD yöntemiyle elde edilen sonuçlara en yakın sonuç 0,9 mm eleman boyutuna sahip model ile elde edilmiştir. Tablo 20'de DP 1000 için verilen artık gerilme ölçüm değerleri incelendiğinde nanogirininim-artık gerilme değerinin XRD-artık gerilmeye göre % 28, SEA-artık gerilme değerinin % 9,4 farkla elde edildiği görülmüştür. Zhu vd. [123] XRD ve nanogirininime dayalı artık gerilme

değerleri arasındaki farkın, girinim etrafında 'yığılma' veya 'çökme' deformasyonundan ve numune yüzeyinin pürüzlülüğünden kaynaklanabileceğini kaydetti.



Şekil 65. DP 1000 eğilme test numunesinin sonlu eleman esaslı artık gerilme analizi

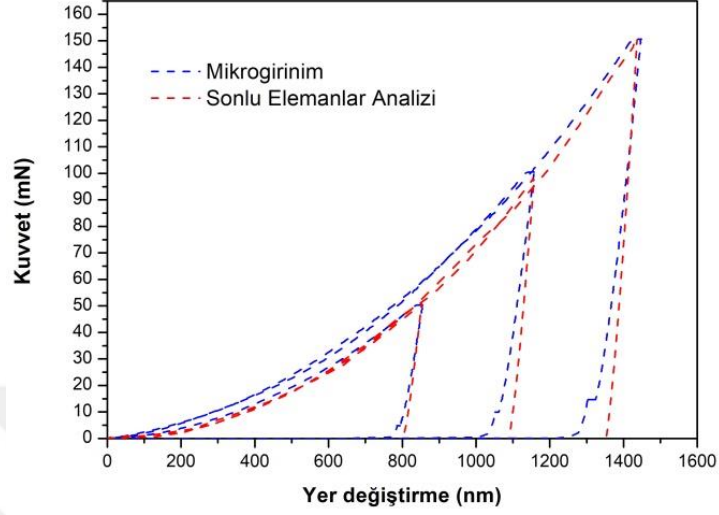
Tablo 20. DP 1000 numunesinden elde edilen artık gerilme karşılaştırılması

Nanogirinim- Artık Gerilme (MPa)	XRD-Artık Gerilme (MPa)	Fark (XRD vs. Nanogirinim) %	SEA-Artık Gerilme (MPa)	Fark (XRD vs. SEA) %
-398,1	-310	28	-339,3	9,4

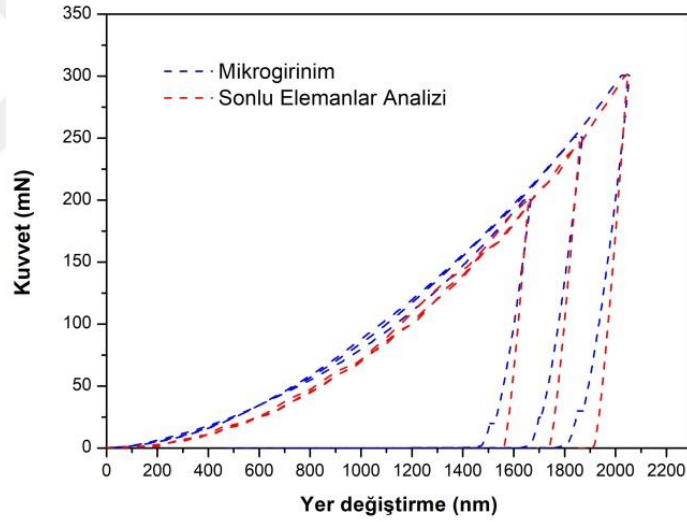
3.4.2. DP 800 Çeliğinde Girinimin Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

Nanogirinimden hareketle malzemelerin akma eğrilerinin (gerilme – birim şekil değişimi diyagramı) eldesine yönelik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Nanogirinimlerden elde edilen yer değiştirme verileri sonlu eleman analizlerinde girdi olarak kullanılmış ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen girinim uç (indenter) üzerindeki kuvvet değerleri, nanogirinimden elde edilen ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelinde, girinim prosedürüne benzer şekilde, girinim ölçümü verilerinden elde edilen önceden belirlenmiş yer değiştirmeye kadar sabit hızla numune yüzeyine (yükleme aşaması) indirilmiştir. Önceden belirlenmiş girinim kuvveti değerine ulaşıldıktan sonra, girinim ucu numune yüzeyinden yukarı doğru hareket ettirildi (geri yüklem aşaması). Sonlu eleman analizlerinin doğrulanması, Şekil 66'da görüldüğü gibi $P - \delta$

verilerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen $P - \delta$ eğrilerinin, girinim ölçümünden elde edilen verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür.



(a)

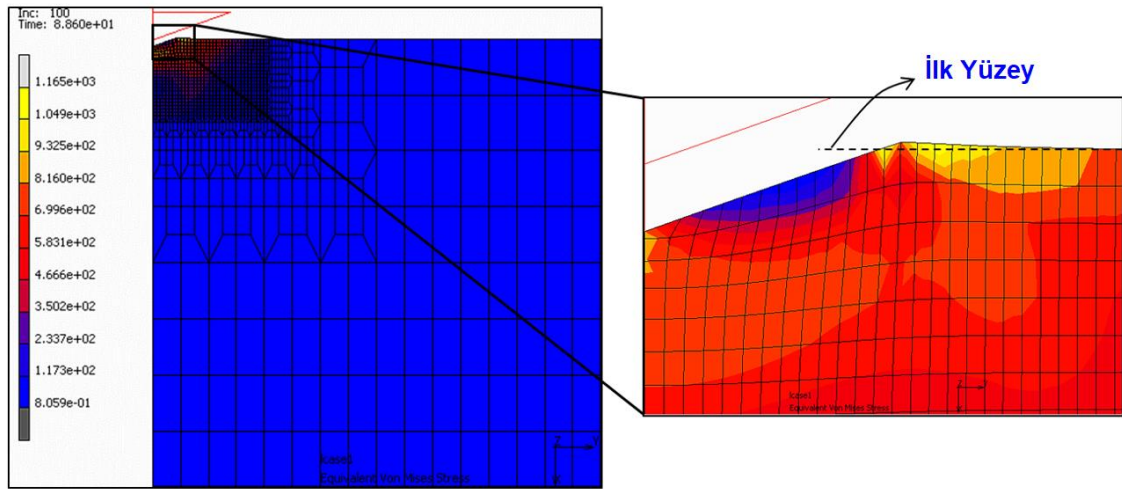


(b)

Şekil 66. (a) 50, 100, 150 mN ve (b) 200, 250, 300 mN kuvvette elde edilen $P - \delta$ konvansiyonel girinim ve sayısal analizlerden elde edilen eğriler

Şekil 67’de, 150 mN girinim kuvvetinin konvansiyonel girinim ile birlikte kullanıldığı sonlu eleman girinim modeli için eşdeğer von Mises gerilme dağılımı ve ağ örgüsü gösterilmektedir. Malzeme davranışı, izotropik deformasyon sertleşmesi yasası ile modellenmiştir. Girinim ucu ve numune yüzeyi arasında temas bölgesi tanımlanmıştır. Girinim ile malzeme arasında temas bölgesi, numune yüzeyi elmasla parlatıldığı için

sürtünmesiz olarak modellenmiştir. Ayrıca literatürde sürtünme etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu bildirilmiştir [126-128]. Model oluştururken doğrusal olmayan yüksek gerilmeli analiz, kapalı (implicit) tip analiz tercih edildi. Girinimin batma bölgesinde temas eden elemanların analizleri sırasında, elemanların önemli ölçüde bozulmamasına ve dörtgen şekilden sapmamaya özen gösterilmiştir. Şekil 67’de yığılma, literatürde ihmal edilebilir bir yığılma artışı olduğunu araştırmacılar göstermiştir [129]. Bu husus, DP 800 çeliğinin deformasyon sertleştirme davranışından kaynaklanmaktadır.



Şekil 67. DP 800 numunesi için maksimum derinliğe ulaşıldıktan sonra girinimin olduğu bölgede von Mises eşdeğer gerilmesinin değişimi

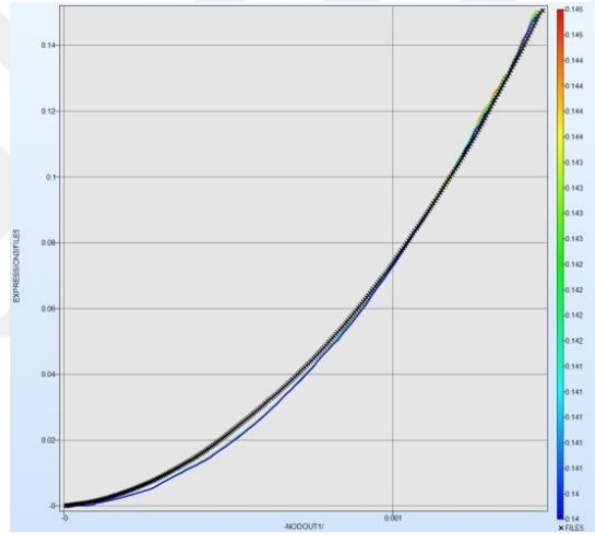
3.4.3. Tersine Sonlu Elemanlar ile Gerilme-Şekil Değişim Eğrisinin Eldesi

Tersine sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak, sertlik ve elastisite modülünün elde edilmesi için, Oliver [82] tarafından ileri sürülmüştür. Sonrasında bu yöntem, mekanik davranışları karakterize etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tahribatsız olması ve küçük alanda uygulanabilmesi sebebiyle standart mekanik testlerin gerçekleştirilemediği durumlarda kullanılabilmesi, bu yöntemin en büyük avantajlarından. Tersine sonlu elemanlar ile gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin elde edilmesi yöntemine literatürde yaygın bir şekilde rastlanılmaktadır. Örneğin; gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini çeşitli yer değiştirmeler ile yapılan nanogirinim ölçümlerinden elde etmişlerdir [130]. Benzer çalışmaları Berkovich batıcı uç yerine küresel uçlar ile gerçekleştirmiştir [131]. Genel olarak tersine sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar modelinde malzemenin mekanik özelliklerinin sistematik olarak deneme yanılma yöntemi

ile değiştirilerek, gerçek nanogirininim veya mikrogirininim eğrilerine yaklaşım yapılması prensibine dayanmaktadır [56, 82]. Bir başka ifade ile bu yöntem, gerçeğe daha yakın mekanik özelliklerin analizde kullanılmasıyla, gerçek ve sayısal nanogirininim eğrileri arasındaki farkın azalacağı prensibine dayanmaktadır. 3 nokta eğilme testi ile deforme olmuş bölgeden alınan DP 1000 ve DP 1200 numunelerinin nanogirininimine tersine sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Ls-OPT yönteminde, literatürdekine benzer şekilde, plastik bölgenin davranışını verebilecek bir eğri kabulü yapılmıştır. Optimizasyonda, bilinmeyen parametre sayısının diğer eşitliklere göre daha az olmasına rağmen, sonuca yakınsaması iyi derecede olan modifiye edilmiş Holloman denklemi 13 kullanılmıştır [131, 132]. Modifiye edilmiş Holloman denkleminde bilinmeyen malzeme sabitleri m ve σ_y değerleri için aralık tahmini yapılmaktadır. Bu denklemden gelen sonuçlar ile malzemenin plastik birim şekil değişimi değeri ε ve gerçek gerilme σ_y değerlerinden oluşturulmaktadır. Çift fazlı çelikler için Şekil 68 - Şekil 70’de Ls-OPT arayüzüne girilen değerler ve elde edilen pekleşme üssü (m) değeri gösterilmektedir.

Type	Name	Starting	Init. Range	Minimum	Maximum
Variable	m	.142		.14	.145
Constant	s	565			
Constant	e	210000			
Constant	e1	0			
Constant	e2	0.003			
Constant	e3	0.008			
Constant	e4	0.01			
Constant	e5	0.03			
Constant	e6	0.05			
Constant	e7	0.07			
Constant	e8	0.077			

(a)

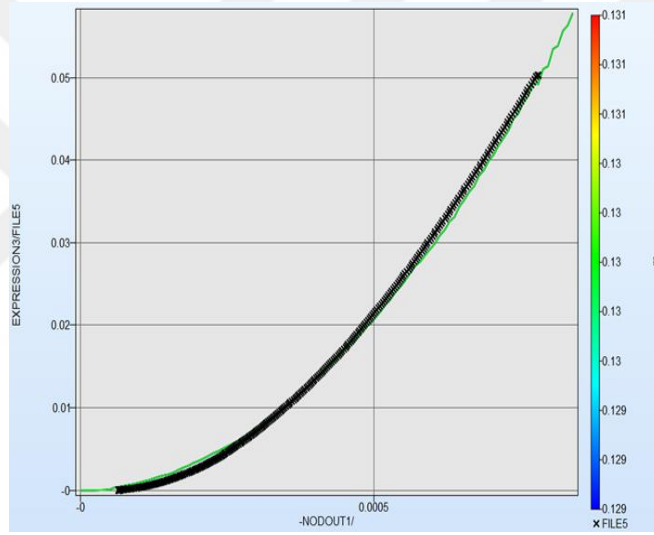


(b)

Şekil 68. DP 800 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri

Type	Name	Starting	Init. Range	Minimum	Maximum
Variable	m	.130		.129	.131
Constant	s	770			
Constant	e	210000			
Constant	e1	0			
Constant	e2	0.0026			
Constant	e3	0.0076			
Constant	e4	0.0109			
Constant	e5	0.0201			
Constant	e6	0.0406			
Constant	e7	0.0631			
Constant	e8	0.0848			

(a)

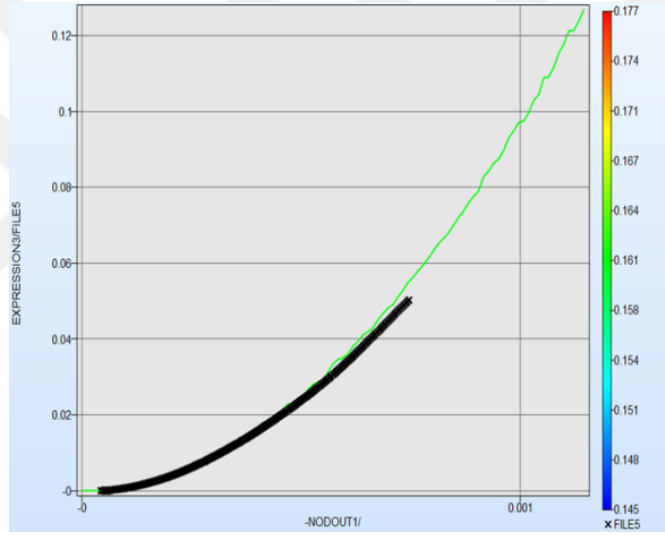


(b)

Şekil 69. DP 1000 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri

Type	Name	Starting	Init. Range	Minimum	Maximum
Variable	m	.16		.159	.161
Constant	s	950			
Constant	e	210000			
Constant	e1	0			
Constant	e2	0.002392			
Constant	e3	0.005015			
Constant	e4	0.010694			
Constant	e5	0.020031			
Constant	e6	0.030926			
Constant	e7	0.041065			
Constant	e8	0.0525			

(a)

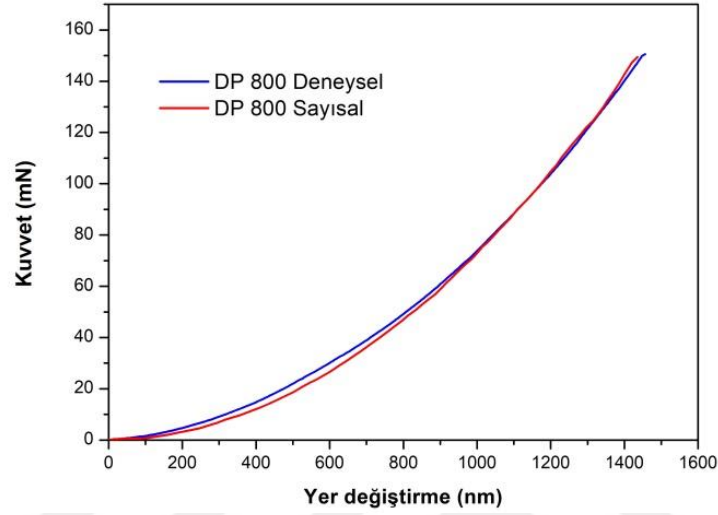


(b)

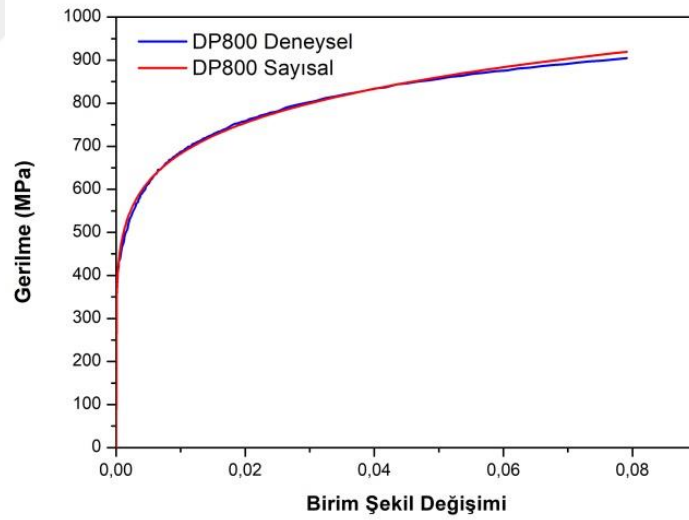
Şekil 70. DP 1200 için (a) Ls-OPT arayüzüne girilen değerler (b) elde edilen m değeri

Şekil 71 - Şekil 73'te çift fazlı çeliklerin nanogirinin ölçümlerinin ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal karşılaştırmaları gösterilmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi, DP 800, DP 1000 ve DP 1200 çelikleri için gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri üretici tarafından verilen akma eğrilerine oldukça yakın olacak şekilde elde edilmiştir. DP 800 numunesi için sonuçlar birebir örtüşürken DP 1000 ve DP 1200 numunelerinin deformasyon sertleşmesi bölgesinde bir miktar ıraksama meydana gelmektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen modelin güvenilirliğini göstermektedir. Nanogirinin ters sonlu eleman analizinden elde edilen malzeme parametreleri Tablo

21'de özetlenmiştir. Bu verilerin, iki fazlı çelikler için bildirilen akma gerilimi ve deformasyon sertleştirme katsayıları ile uyumlu olduğu bulunmuştur [133, 134]. Şekil 74'te, sonlu elemanlar analizinden elde edilen çift fazlı çeliklerin eşdeğer von Mises gerilimlerini göstermektedir.

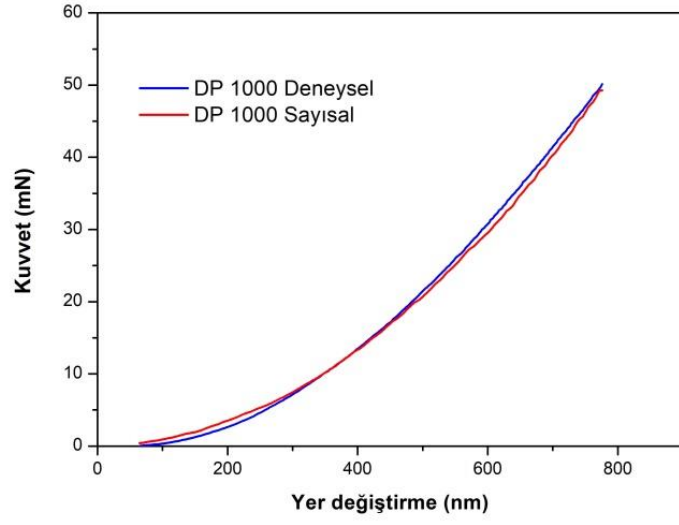


(a)

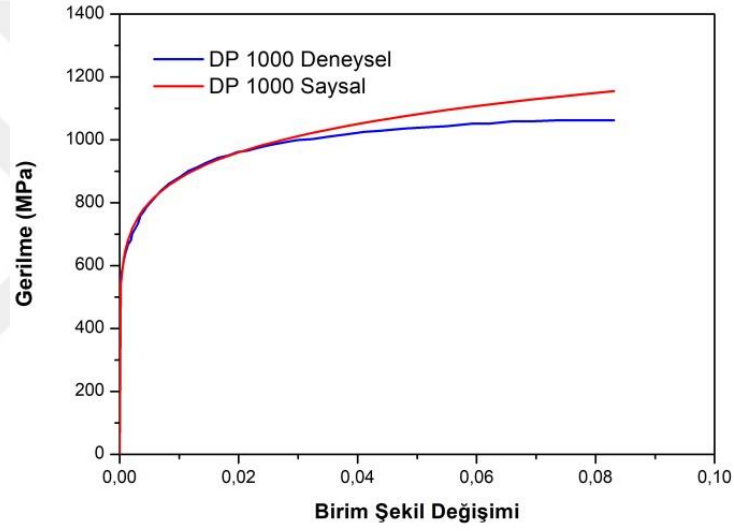


(b)

Şekil 71. DP 800 için (a) deneysel nanogirinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması

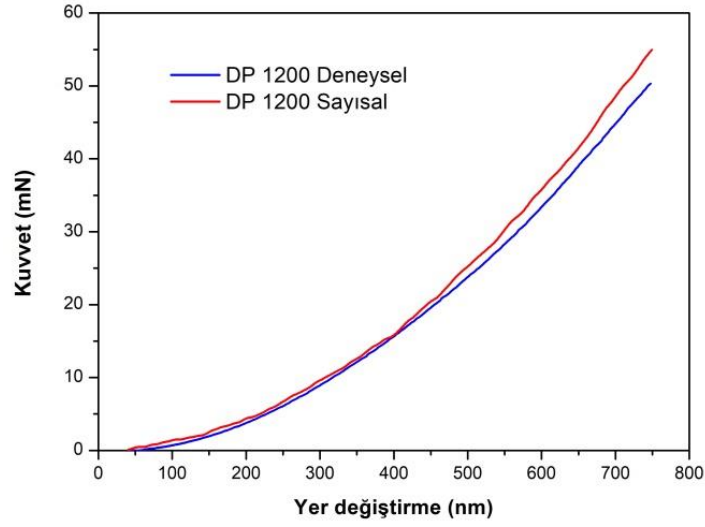


(a)

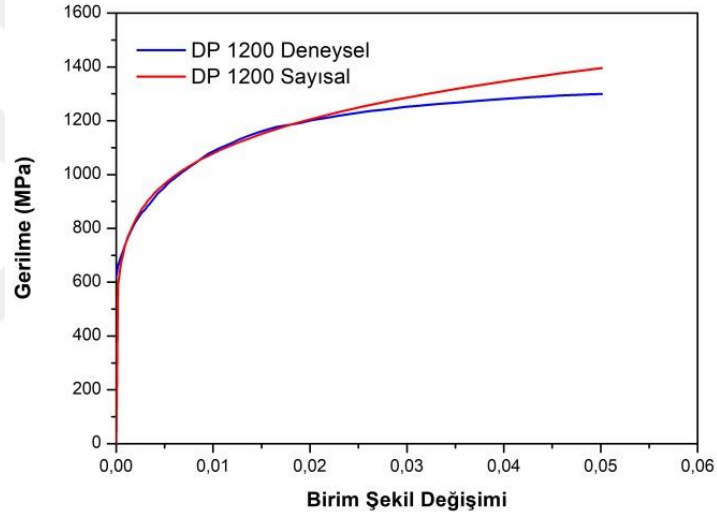


(b)

Şekil 72. DP 1000 için (a) deneySEL nanogirinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneySEL gerilme-birim Şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması



(a)

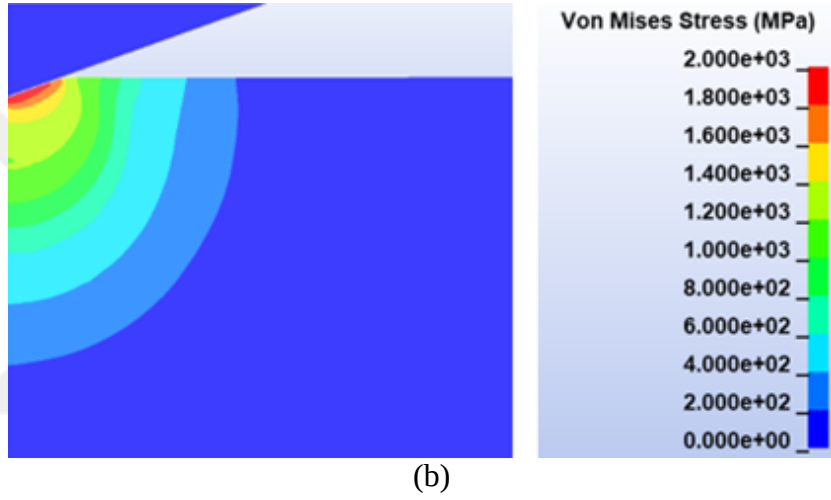
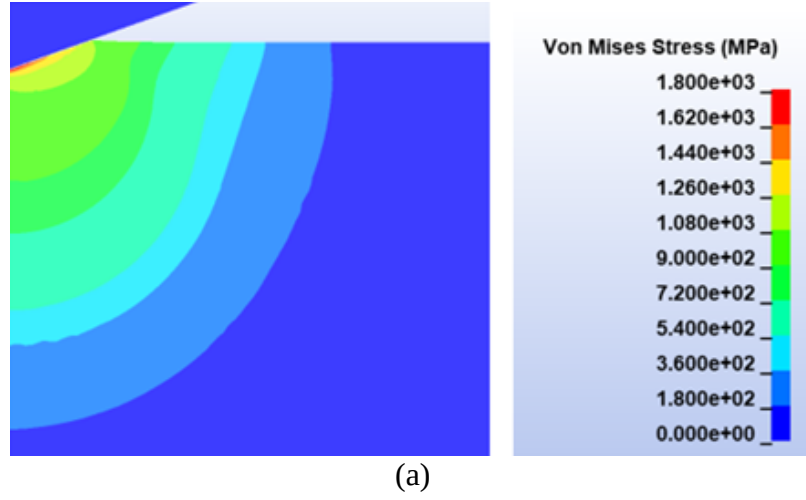


(b)

şekil 73. DP 1200 için (a) deneysel nanogiririm kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin ve (b) deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması

Tablo 21. Ters sonlu eleman optimizasyonlarından elde edilen çeliklerin malzeme parametreleri

Malzeme	Akma Gerilmesi, σ_y (MPa)	Deformasyon Katsayısı, m (Güncel alışma)	Deformasyon Katsayısı, m (Literatür)	Fark %
DP 1000	770	0.13	0.12 [135]	8,3
DP 1200	950	0.16	0.14 [136]	14,3



Şekil 74. (a) DP 1000 ve (b) DP 1200 çelikleri için nanogirinin sonlu elemanlar analizinden elde edilen eşdeğer von Mises gerilme değişimi

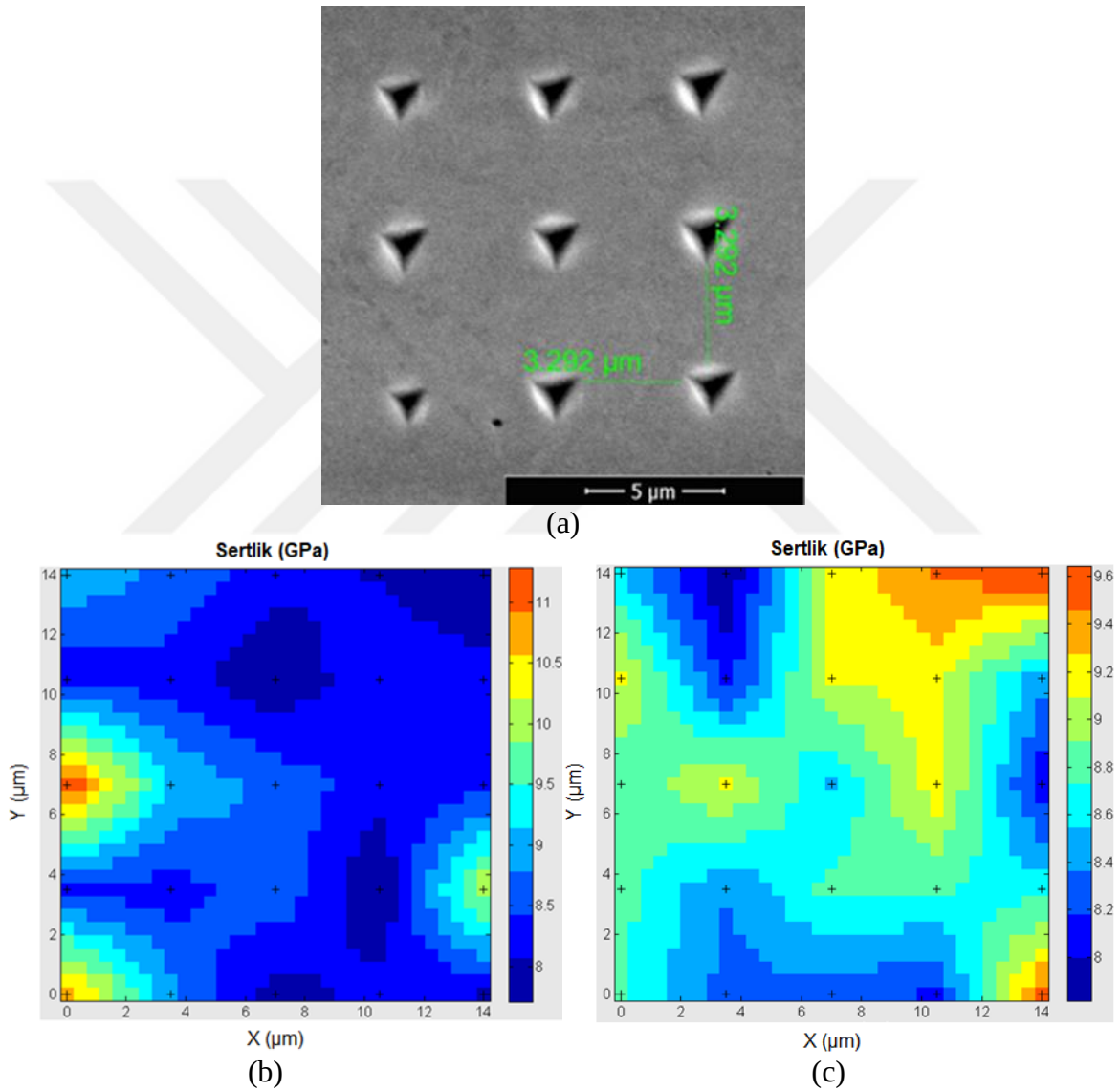
3.5. Çeliklerin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması

Bu çalışmada son dönem nanogirinin çalışmalarında uygulanan ve numune üzerinde alınan çok sayıda ölçümden hareketle sertlik ve elastisite modülü haritalaması gerçekleştirilmiştir.

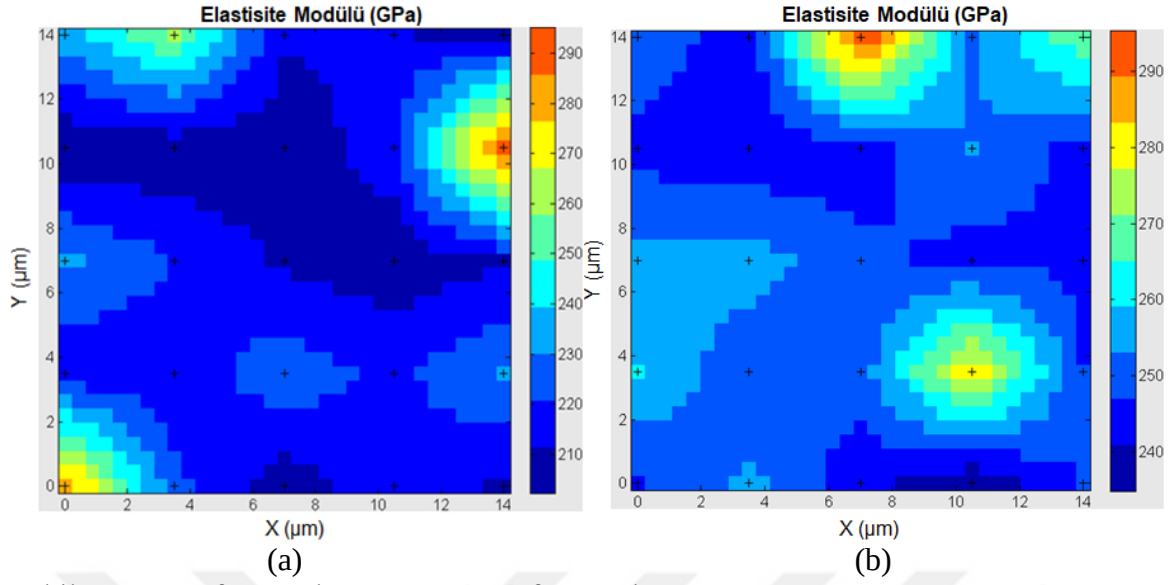
3.5.1. Zırh Çeliklerinin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması

Şekil 75-Şekil 78’de zırh çeliklerin sertlik ve elastisite modülü haritaları, bir Matlab kodu aracılığıyla enterpolasyon yapılarak elde edilmiştir. Nanogirinin ölçümleri, Berkovich uç kullanılarak ve 10 mN maksimum kuvvet kontrollü ölçüm modunda

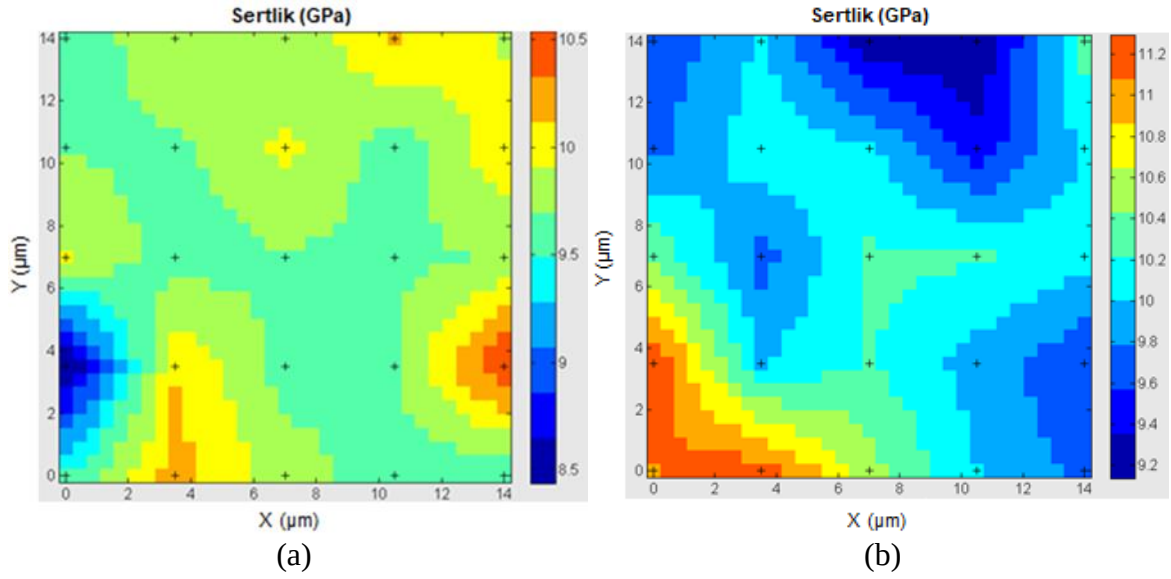
gerçekleştirilmiştir. Her zırh çeliği numunesinde, rastgele seçilen yüzey alanlarında bir adet 5x5 nanogirininim uygulanmış ve nanogirininimler arası mesafe 3,5 μm olarak alınmıştır. Zırh çeliklerinin sertlik ve elastisite modülü haritaları incelendiğinde, genelde deforme olmuş bölgede değerlerin yüksek olduğu gözlenmiştir. Sadece Ramor 500 numunesinin sertlik değeri deforme olmuş bölgede düşük bulunmuştur. Bunun sebebi, yeterli sayıda girininim yapılmamasından kaynaklandığı öngörülmüştür.



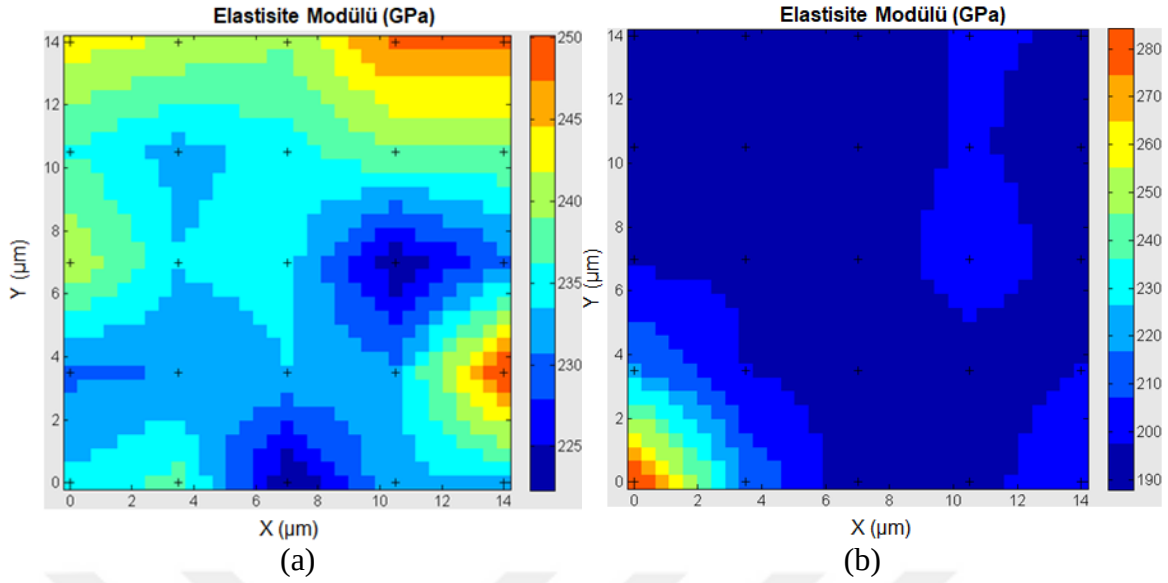
Şekil 75. (a) Zırh çeliğinde girininim aralığının TEM görüntüsü, (b) deforme olmamış ve (c) deforme olmuş Ramor 500 numunesinin sertlik haritaları



Şekil 76. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Ramor 500 numunesinin elastisite modülü haritaları



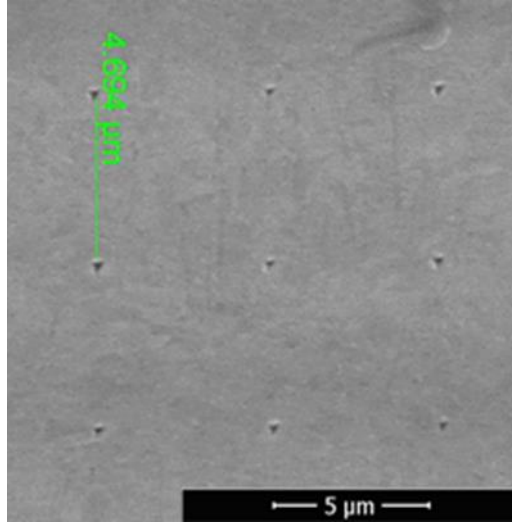
Şekil 77. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Armox Advance numunesinin sertlik haritaları



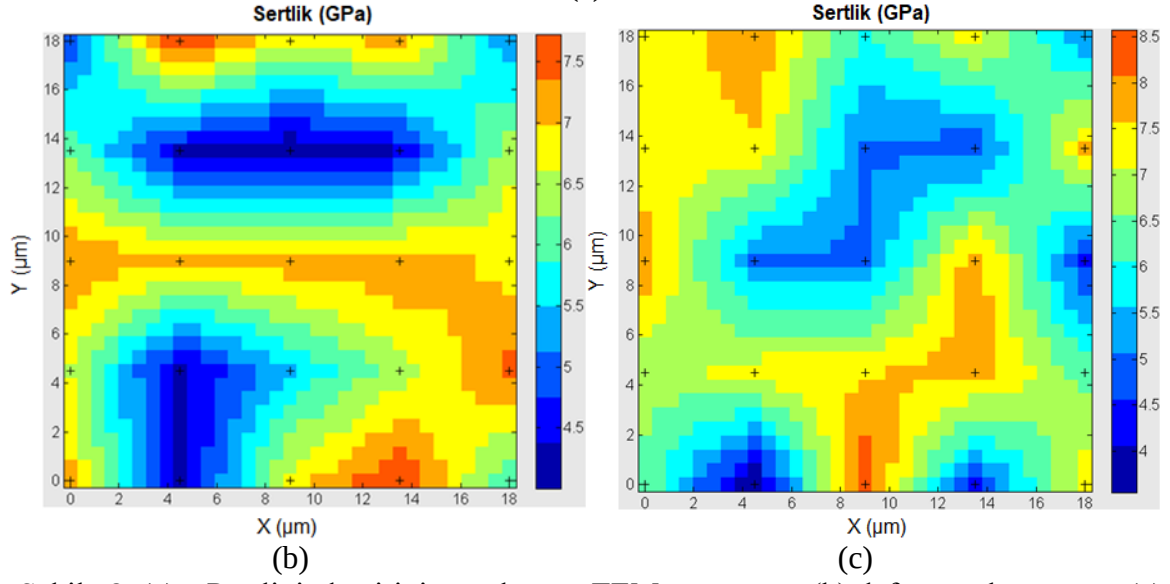
Şekil 78. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş Armox Advance numunesinin elastisite modülü haritaları

3.5.2. Çift Fazlı Otomotiv Çeliklerinin Sertlik ve Elastisite Modülü Haritalaması

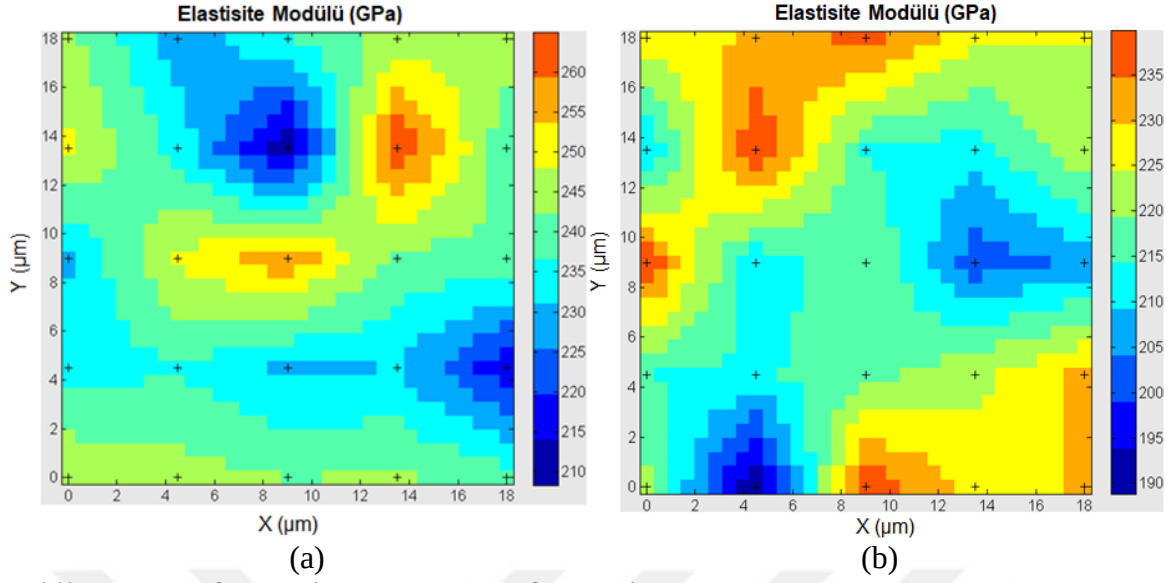
Zırh çeliği numunelerine uygulanan yöntem otomotiv çeliği numunelerine de tatbik edilmiştir. Şekil 79 - Şekil 82'de, çift fazlı otomotiv çeliklerin sertlik ve elastisite modülü haritaları gösterilmiştir. Nanogirinin ölçümleri, Berkovich uç kullanılarak ve 50 nm yer değiştirme kontrol ölçümü modunda gerçekleştirilmiştir. Her çift fazlı otomotiv çeliği numunesinde, rastgele seçilen yüzey alanlarında bir adet 5x5 matrisinde nanogirinin gerçekleştirildi ve nanogirininler arası mesafe 4,5 μm olarak alınmıştır. Çift fazlı çeliklerin sertlik değerlerinin haritalaması Şekil 79 ve Şekil 81'de gösterilmektedir. Harita üzerinde sarı ve kırmızı ile gösterilen ve göreceli olarak yüksek sertliğe sahip olan bölgelerin martenzite karşılık geldiği öngörülmüştür. Şekil 80 ve Şekil 82'de ise aynı numuneler için elastisite modülü haritalaması verilmiştir.



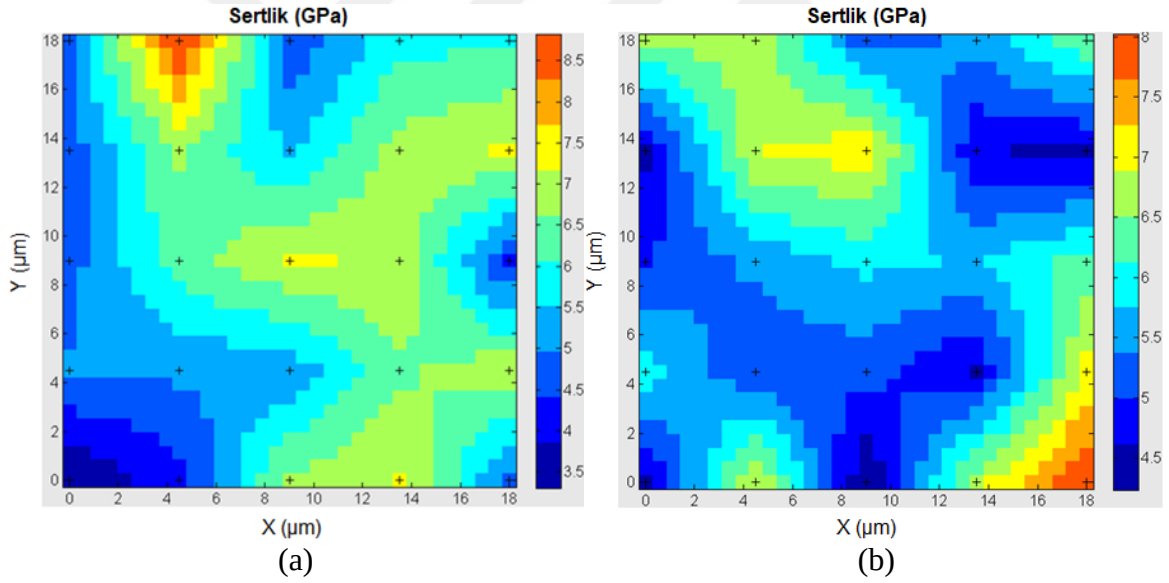
(a)



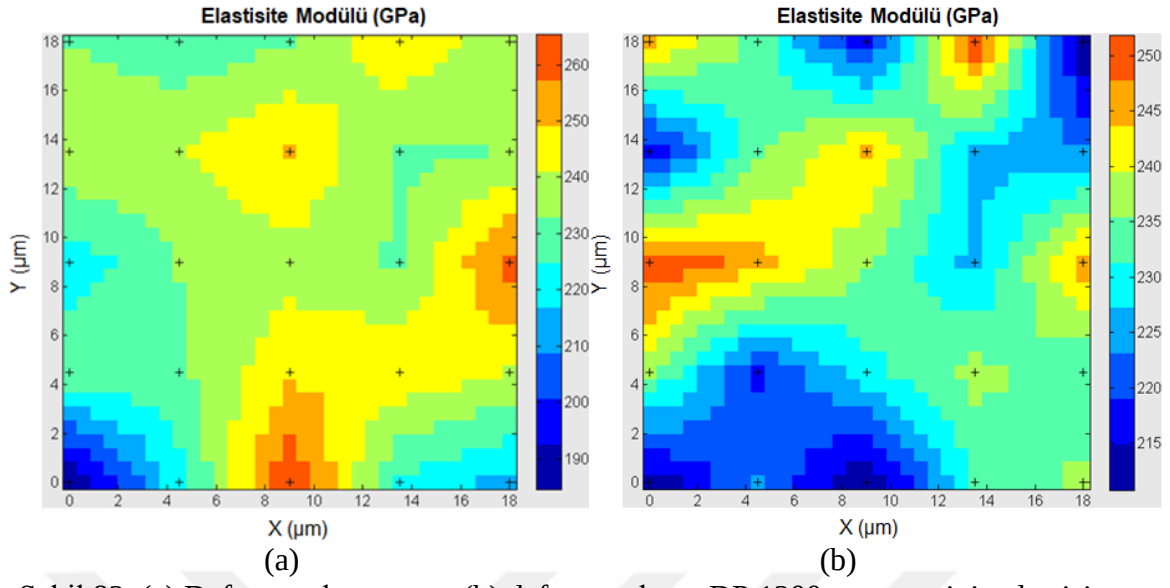
Şekil 79. (a) DP çeliğinde girinim aralığının TEM görüntüsü, (b) deforme olmamış ve (c) deforme olmuş DP 1000 numunesinin sertlik haritaları



Şekil 80. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1000 numunesinin elastisite modülü haritaları



Şekil 81. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1200 numunesinin sertlik haritaları



Şekil 82. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş DP 1200 numunesinin elastisite modülü haritaları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, nanogirinin yöntemi ile malzemelerin sertlik, elastisite modülü ve artık gerilme gibi mekanik özelliklerin eldesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Sıkıştırılmış saf bakır tozlarına, üç farklı zırh ve üç farklı otomotiv çeliklerine nanogirinin ve mikrogirinin uygulanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Bakır tozlarının taban malzeme üzerinde mikrogirininler, 50 mN maksimum girinin kuvveti ile gerçekleştirildi. Elastisite modülü değerleri 78–111 GPa aralığında, sertlik değerleri ise 1.06–1.12 GPa aralığında kaydedildi.
- Bakır tozları için alt, üst ve vadi tabakalarında aynı maksimum kuvvette ortalama sertlik ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 0.88 ve 70.1 GPa olarak bulunmuştur. Tüm durumlarda, malzemenin elastisite modülü artan sertlikle birlikte artmıştır.
- DP 800 çeliği için tekrarlı, konvansiyonel ve kademeli mikrogirininler 50 – 300 mN kuvvetlerinde araştırıldı. Seçilen girinin kuvvetlerinin ferrit ve martenzit gibi fazların sertliğini belirlemekten ziyade genel malzeme sertliği bulunmuştur. Girinin boyutu etkisinin daha düşük 50 mN kuvvette daha belirgin olduğu görülmüştür.
- Nanogirinin yöntemiyle elde edilen artık gerilme değerlerinin, XRD yöntemi ile elde edilen artık gerilme değerlerinden kabul edilebilir bir hata payıyla saptığı gözlenmiştir. Ramor 500 için % 7, Ramor 550 için % 5 ve Armox Advance için % 11 fark belirlenmiştir. Ancak bu farkların girinin yapılan noktaya bağlı olarak değişebilir olması nedeniyle nanogirinin ile artık gerilme ölçümünde dikkatli olunması gerekmektedir. Bu yöntemin tek başına artık gerilme ölçümü için güvenilir olmayabileceği değerlendirilmiştir.
- Dönüştürülen mikro sertlik değerleri ile nanogirinin sertlik değerleri arasında Ramor 500 için % 7,6, Ramor 550 için % 0,6 ve Armox Advance için % 12,6 bulundu.
- DP 1000 ve DP 1200 çeliklerine 0,9 – 10 mN arasındaki kuvvetlerde girininler gerçekleştirilmiştir. 50 – 200 nm girinin derinliğine karşılık gelen bu girininlerde sertlik ve elastisite modülü değerleri incelendiğinde, 50 nm yer değiştirmede boyut etkisinin varlığı daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Nanogirinin - artık gerilme ile XRD - artık gerilme yöntemlerinin sonuçları arasında % 10 - % 28 fark kaydedildi.

- Gerçekleştirilen nanogirinin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin, girinimden elde edilen deneysel verilerle % 95 oranında örtüşmesiyle model doğrulanmıştır.
- DP 1000 ve DP 1200 deneysel gerilme-birim şekil değişim eğrilerinin, deformasyon sertleşme bölgesinin sonuna kadar sayısal analizle elde edilen eğrilerle % 90 uyum içinde olduğu görülmüştür.



5. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal verilere dayanarak, gelecekte yapılacak çalışmalar için bazı öneriler aşağıda verilmiştir:

- Girinim yöntemi esaslı mekanik özellik haritalama için mümkün olan en fazla sayıdaki ve uygun yük değeriyle ölçümlerin alınması, malzemenin iç yapısındaki mekanik özelliklerin daha hassas bir şekilde elde edilmesine olanak sağlayacaktır.
- Başka yüksek mukavemetli çelikler için X ışınları tekniği ile artık gerilme tayini yapılabilir. XRD - artık gerilme ile girinim - artık gerilme tekniklerinin karşılaştırılması sonucu bunların endüstriyel alanda uygulanabilirliği araştırılabilir.
- Girinim tekniği ile artık gerilme ölçümüne yönelik çalışmalar, özellikle yarı iletkenler, kaplamalar ve ince film kaplamalar üzerine genişletilebilir.
- Zırh çeliklerinin nanogirinim ile kırılma tokluklarının elde edilmesinde çatlak oluşturma önemli olduğundan (malzemenin gevrekliğine bağlı) girinim yapan ucun Berkovich yerine küp köşeli (cube-corner) olması durumunda çatlak oluşturulabilir ve kırılma tokluğu belirlenecektir.
- Fazların sertlik değerlerini belirlemek için, nanogirinim ölçümleriyle analiz edilen alanlar daha sonra EBSD ve TEM ile karakterize edilebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Vollertsen, F. ve Hu, Z., Tribological Size Effects in Sheet Metal Forming Measured by A Strip Drawing Test, CIRP Annals, 55,1 (2006) 291-294.
2. Fu, M.W. ve Chan, W.L., A Review on the State-of-the-art Microforming Technologies, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67 (2013) 2411-2437.
3. Qin, Y., Brockett, A., Ma, Y., Razali, A., Zhao, J., Harrison, C., Pan, W., Dai, X. ve Loziak, D., Micro-manufacturing: Research, Technology Outcomes and Development Issues, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 47 (2010) 821-837.
4. NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, Grenoble Cedex, September 2005.
5. MEMS for Cell Phones and Tablets, Market Analysis Report, Yole Développement, Lyon, June 2013.
6. Audet, S., Micro-manufacturing for Medical Devices: A Case Study, 5th International Conference on MicroManufacturing and Multi-Material Micro Manufacture, April 2010, Wisconsin.
7. Ehmann, K.F., Bourell, D., Culpepper, M.L, Hodgson, T.J., Thomas R. Kurfess, T.R., Madou, M., Rajurkar, K., Richard, E. ve DeVor, R.E., Executive Summary Presentation of Panel Report on International Assessment of Research and Development in Micromanufacturing, World Technology Evaluation Center, October 2005, Baltimore, Bildiriler Kitabı, 1-250.
8. MNT Future Vision Newsletter. European Technology Platform for Micro- and Nano Manufacturing, February 2009.
9. Cora, Ö.N., Min, D., Koç, M. ve Kaviany, M., Microscale-modulated Porous Coatings: Fabrication and Pool-boiling Heat Transfer Performance, Journal of Micromechanics and Microengineering, 20,3 (2010) 035020.
10. Min, D.H., Hwang, G.S., Usta, Y., Cora, O.N., Koc, M. ve Kaviany, M., 2-D and 3-D Modulated Porous Coatings for Enhanced Pool Boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52,11-12 (2009) 2607-2613.
11. Moharrami, N. ve Bull, S.J., A Comparison of Nanoindentation Pile-up in Bulk Materials and Thin Films, Thin Solid Films, 572 (2014) 189-199.
12. McElhaney, K.W., Vlassak, J.J. ve Nix, W.D., Determination of Indenter Tip Geometry and Indentation Contact Area for Depth Sensing Indentation Experiments, Journal of Materials Research, 13,5 (1998) 1300-1306.

13. Narayanan, K.R., Subbiah, S. ve Sridhar, I., Indentation Response of Single-crystal Copper Using Rate-independent Crystal Plasticity, Applied Physics A, 105,2 (2011) 453–461.
14. Wang, T.H., Fang, T.H. ve Lin, Y.C., Finite-element Analysis of the Mechanical Behavior of Au/Cu and Cu/Au Multilayers on Silicon Substrate Under Nanoindentation, Applied Physics A, 90,3 (2008) 457–463.
15. Xue, P., Xie, G.M., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. ve Geng, L., Effect of Heat Input Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-stir-welded Pure Copper, Metallurgical and Materials Transactions A, 41,8 (2010) 2010–2021.
16. Kang, N., Coddet, P., Liao, H. ve Coddet, C., Cold Gas Dynamic Spraying of A Novel Micro-alloyed Copper: Microstructure, Mechanical Properties, Journal of Alloys and Compounds, 686 (2016) 399–456.
17. Kucharski, S., Jarzabek, D., Piątkowska, A. ve Woźniacka, S., Decrease of Nano-hardness at Ultra-low Indentation Depths in Copper Single Crystal, Experimental Mechanics, 56,3 (2016) 381–393.
18. Yang, Q., Lei, H., Ma, Y., Sun, S. ve Liang, S., Monolithic Micro/Nanoporous Copper: Preparation, Mechanical and Electrocatalytic Properties, Materials Transactions, 61 (2020) 1045-1048.
19. Edwards, M. ve Mathewson, A., The Ballistic Properties of Tool Steel as A Potential Improvised Armour Plate, International Journal of Impact Engineering, 19 (1997) 297–309.
20. Madhu, V. ve Bhat, T.B., Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles, Defence Science Journal, 61 (2011) 394–402.
21. Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Madhusuhan R.G. ve Sivakumar, K., Effect of Buttering and Hard Facing on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armour Steel Joints, Materials & Design, 32 (2011) 469-479.
22. Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y. ve Olabi, A.G., Methods of Measuring Residual Stresses in Components, Materials & Design, 35 (2012) 572-588.
23. Jang, J.I., Estimation of Residual Stress by Instrumented Indentation: A Review, Journal of Ceramic Processing Research, 10,3 (2009) 391-400.
24. Rickhey, F., Lee, J.H. ve Lee, H., A Contact Size-independent Approach to the Estimation of Biaxial Residual Stresses by Knoop Indentation, Materials & Design, 84 (2015) 300-312.
25. Sebastiani, M., Bemporad, E., Carassiti, F. ve Schwarzer, N., Residual Stress Measurement at the Micrometer Scale: Focused Ion Beam (FIB) Milling and Nanoindentation Testing, Philosophical Magazine, 91,7-9 (2011) 1121-1136.

26. Rickhey, F., Kim, M. ve Lee, H., XFEM Simulation of Radial-median Crack Formation in Brittle Medium Underneath Sharp Indenters, In Proceedings of the KSME 2014 Spring Annual Meeting, May 2014, Korea, Bildiriler Kitabı, 2143-2148.
27. Meneses-Amador, A., Blancas-Pérez, D., Corpus-Mejía, R., Rodríguez-Castro, G.A., Martínez-Trinidad, J. ve Jiménez-Tinoco, L.F., Adhesive and Cohesive Strength in FeB/Fe₂B Systems, Journal of Materials Engineering and Performance, 27 (2018) 2089-2098.
28. Khan, W., Tufail, M. ve Chandio, A.D., Characterization of Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Behavior of Ballistic Steels, Materials, 15 (2022) 2204.
29. Shukla, P., Robertson, S., Wub, H., Telang, A., Kattoura, M., Natha, S., Mannava, S.R., Vasudevan, V.K. ve Lawrence, J., Surface Engineering Alumina Armour Ceramics with Laser Shock Peening, Materials & Design, 134 (2017) 523-538.
30. Costin, W.L., Lavigne, O. ve Kotousov, A., A Study on the Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Acicular Ferrite and Upper Bainite, Materials Science and Engineering: A, 663 (2016) 193-203.
31. Muskeri, S., Jannotti, P.A., Schuster, B.E., Lloyd, J.T. ve Mukherjee, S., Ballistic Impact Response of Complex Concentrated Alloys, International Journal of Impact Engineering, 161 (2022) 104091.
32. Ferro, P. ve Tiziani, A., Metallurgical and Mechanical Characterization of Electron Beam Welded DP600 Steel Joints, Journal of Materials Science, 47 (2012) 199–207.
33. Hu, X., Choi, K.S., Sun, X., Ren, Y. ve Wang, Y., Determining Individual Phase Flow Properties in A Quench and Partitioning Steel with In Situ High-energy X-ray Diffraction and Multiphase Elasto-plastic Self-consistent Method, Metallurgical and Materials Transactions A, 47 (2016) 5733–5749.
34. SSAB Swedish Steel, Tooling Solutions for Advanced High Strength Steel, Uddeholm Tooling, Sweden, 8-9, 2013.
35. https://www.steel.org/gdis-2021-_-track-1_02_kim_chevrolet-trailblazer/ Kim, Y., Great Designs in Steel Seminar. 2 Eylül 2022.
36. Ishikawa, T., 1 - Understanding and Controlling Microstructural Evolution in Metal Forming: An Overview, Microstructure Evolution in Metal Forming Processes (2012) 3-16.
37. Paul, S.K., Stanford, N. ve Hilditch, T., Effect of Martensite Volume Fraction on Low Cycle Fatigue Behaviour of Dual Phase Steels: Experimental and

- Microstructural Investigation, Materials Science and Engineering: A, 638 (2015) 296-304.
38. Abid, N.H., Al-Rub, R.K.A. ve Palazotto, A.N., Micromechanical Finite Element Analysis of the Effects of Martensite Morphology on the Overall Mechanical Behavior of Dual Phase Steel, International Journal of Solids and Structures, 104–105 (2017) 8–24.
 39. Palkowski, H. ve Anke, T., Bake Hardening of Hot Rolled Multiphase Steels Under Biaxial Pre-strained Conditions, Steel Research International, 77 (2006) 675–679.
 40. Rahimi R.M. ve Bahr D.F., Individual Phase Deformation and Flow Correlation to Macroscopic Constitutive Properties of DP1180 Steel, Materials Science and Engineering: A, 756 (2019) 328-335.
 41. Basu, S., Mathews, N.G., Chaudhari, T.S. ve Jaya, B.G., Finite Element Modeling of Indentation Behavior of Dual Phase Steels: Role of Plastic Zone Size in Property Mapping, JOM, 74 (2022) 2245-2260.
 42. Delincé, M., Jacques, P.J. ve Pardoën, T., Separation of Size-dependent Strengthening Contributions in Fine-grained Dual Phase Steels by Nanoindentation, Acta Materialia, 54,12 (2006) 3395-3404.
 43. Khan, M.I., Kuntz, M.L., Biro, E. ve Zhou, Y., Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels, Materials Transactions, 49,7 (2008) 1629–1637.
 44. Hayashi, K., Miyata, K., Katsuki, F., Ishimoto, T. ve Nakano, T., Individual Mechanical Properties of Ferrite and Martensite in Fe-0.16 Mass% C–1.0 Mass% Si-1.5 Mass% Mn Steel, Journal of Alloys and Compounds, 577 (2013) S593–S596.
 45. Zhang, F., Ruimi, A. ve Field, D.P., Phase Identification of Dual Phase (DP980) Steels by Electron Backscatter Diffraction and Nanoindentation Techniques, Microscopy and Microanalysis, 22 (2016) 99–107.
 46. Hernandez, V.H.B., Panda, S.K., Kuntz, M.L. ve Zhou, Y., Nanoindentation and Microstructure Analysis of Resistance Spot Welded Dual Phase Steel, Materials Letters, 64,2 (2010) 207–210.
 47. Cheng, G., Zhang, F., Ruimi, A., Field, D.P. ve Sun, X., Quantifying the Effects of Tempering on Individual Phase Properties of DP980 Steel with Nanoindentation, Materials Science and Engineering: A, 667 (2016) 240–249.
 48. Breuils, J., Pelletier, H., Krier, J. ve Vignal, V., Determination of Elastoplastic Properties of TiO₂ Thin Films Deposited on Dual Phase Stainless Steel Using

- Nanoindentation Tests, Surface & Coatings Technology, 204,12-13 (2010) 2068-2072.
49. Zhang, F., Ruimi, A., Wo, P.C. ve Field, D.P., Morphology and Distribution of Martensite in Dual Phase (DP980) Steel and Its Relation to the Multiscale Mechanical Behavior, Materials Science and Engineering: A, 659 (2016) 93–103.
 50. Diego-Calderón, I., Santofimia, M.J., Molina-Aldareguia, J.M., Monclús, M.A. ve Sabirov, I., Deformation Behavior of a High Strength Multiphase Steel at Macro- and Micro-scales, Materials Science and Engineering: A, 611 (2014) 201–211.
 51. Ghassemi-Armaki, H., Maaß, R., Bhat, S.P., Sriram, S., Greer, J.R. ve Kumar, K.S., Deformation Response of Ferrite and Martensite in a Dual-phase Steel, Acta Materialia, 62 (2014) 197–211.
 52. Taylor, M.D., Choi, K.S., Sun, X., Matlock, D.K., Packard, C.E., Xu, L. ve Barlat, F., Correlations Between Nanoindentation Hardness and Macroscopic Mechanical Properties in DP980 Steels, Materials Science and Engineering: A, 597 (2014) 431–439.
 53. Rodriguez, R. ve Gutierrez, I., Correlation Between Nanoindentation and Tensile Properties: Influence of the Indentation Size Effect, Materials Science and Engineering: A, 361,1-2 (2003) 377-384.
 54. Basantia, S.K., Bhattacharya, A., Khutia, N. ve Das, D., Influence of Microstructural Parameters on Nanohardness of Various Dual-phase Steels: Experiment, FE Simulation and Statistical Analysis, Materials Today Communications, 30 (2022) 103125.
 55. Fischer-Cripps, A.C., Critical Review of Analysis and Interpretation of Nanoindentation Test Data, Surface & Coatings Technology, 200,14-15 (2006) 4153-4165.
 56. Oliver, W.C. ve Pharr, G.M., Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology, Journal of Materials Research, 19,1 (2004) 3-20.
 57. Golovin Y.I, Nanoindentation and Mechanical Properties of Solids in Submicrovolumes, Thin Near-surface Layers, and Films: A Review, Physics of the Solid State, 50 (2008) 2205 – 2236.
 58. Withers, P.J. ve Bhadeshia, H., Residual Stress. Part 1–Measurement Techniques, Materials Science and Technology, 17 (2001) 355-365.
 59. Zhu, L., Xu, B., Wang, H. ve Wang, C., Measurement of Residual Stress in Quenched 1045 Steel by the Nanoindentation Method, Materials Characterization, 61 (2010) 1359-1362.

60. Giannakopoulos, A.E. ve Suresh S., Determination of Elastoplastic Properties by Instrumented Sharp Indentation, Scripta Materialia, 40,10 (1999) 1191-1198.
61. Wang, Q., Ozaki, K., Ishikawa, H., Nakano, S. ve Ogiso, H., Indentation Method to Measure the Residual Stress Induced by Ion Implantation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 242,1-2 (2006) 88-92.
62. Cullity, B.D. ve Stock, S.R., Elements of X-ray Diffraction, Third Edition, Pearson, London, 2014.
63. Çevik, B., Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Özelliklerine Kalıcı Gerilmelerin Etkisinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara , 2009.
64. Yiğit, O., Dilmeç, M. ve Halkacı, H.S., Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması, Mühendis ve Makine, 49 (2008) 44.
65. Spieß, L., Teichert, G., Schwarzer, R., Behnken, H. ve C. Genzel, Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, Moderne Röntgenbeugung, Springer, Wiesbaden, 2019.
66. Lichinchi, M., Lenardi, C., Haupt, J. ve Vitali, R., Simulation of Berkovich Nanoindentation Experiments on Thin Films Using Finite Element Method, Thin Solid Films, 312,1-2 (1998) 240-248.
67. Bouzakis, K.D., Pappa, M., Malinaris, G. ve Michailidis, N., Fast Determination of Parameters Describing Manufacturing Imperfections and Operation Wear of Nanoindenter Tips, Surface & Coatings Technology, 215 (2013) 218-223.
68. Falat, T., Matkowski, P., Płatek, B., Zandén, C., Felba, J., Ye, L.L. ve Liu, J., Investigation on Interaction Between Indium Based Thermal Interface Material and Copper and Silicon Substrates, In Microelectronics Packaging Conference, September 2013, Grenoble, Bildiriler Kitabı, 1–5.
69. German, R.M., Sintering Theory and Practice, Wiley, Hoboken, 1996.
70. www.copper.org/education/c-facts/electronics/print-category.html Copper Development Association Inc. 17 Kasım 2022.
71. Öztürk, B., Cora, Ö.N. ve Koç, M., Effect of Sintering Temperature on the Porosity and Microhardness of the Micro-scale 3-D Porous Gradient Surfaces, In 8th International Conference Multi-Material Micro Manufacture, January 2011, Stuttgart, Bildiriler Kitabı, 176–179.
72. www.ssab.com.tr/products/brands/armox/ramor-500.html SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Ballistic Protection Steels. 05 Ekim 2022.

73. www.ssab.ca/products/brands/armox/ramor-550.html SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Ballistic Protection Steels. 05 Ekim 2022.
74. www.ssab.com.tr/products/brands/armox/armox-advance.html SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Ballistic Protection Steels. 05 Ekim 2022.
75. Bekci, M.L., Ramor 500 ve Ramor 550 Zırh Çeliklerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2019.
76. Bekci, M.L., Canpolat, B.H., Usta, E., Güler, M.S. ve Cora, Ö.N., Ballistic Performances of Ramor 500 and Ramor 550 Armor Steels at Mono and Bilayered Plate Configurations, Engineering Science and Technology, an International Journal, 24,4 (2021) 990-995.
77. www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=c4aa548905e3480686bc1f78a33cfbaa SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Automotive Steels. 05 Ekim 2022.
78. www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=def3d5be3ce1447c8af45a4cafe6ec43&ckck=1 SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Automotive Steels. 05 Ekim 2022.
79. www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=082094564da84b9dbb990ad8817a0989 SSAB (Svenskt Stål AB) Data Sheets for Automotive Steels. 05 Ekim 2022.
80. Barsom, J.M. ve Rolfe, S.T., Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
81. Doerner, M.F. ve Nix, W.D., A Method for Interpreting the Data from Depth-sensing Indentation Instruments, Journal of Materials Research, 1 (1986) 601-609.
82. Oliver, W.C. ve Pharr, G.M., An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments, Journal of Materials Research, 7,6 (1992) 1564-1583.
83. Bigl, S., Schöberl, T., Wurster, S., Cordill, M.J. ve Kiener, D., Correlative Microstructure and Topography Informed Nanoindentation of Copper Films, Surface and Coatings Technology, 308 (2016) 404–413.
84. Vincent, S., Murty, B.S., Kramer, M.J. ve Bhatt, J., Micro and Nano Indentation Studies on Zr60Cu10Al15Ni15 Bulk Metallic Glass, Materials & Design, 65 (2015) 98–103.
85. Bose, B. ve Klassen, R.J., Effect of Copper Addition and Heat Treatment on the Depth Dependence of the Nanoindentation Creep of Aluminum at 300 K, Materials Science and Engineering: A, 500 (2009) 164–169.

86. Galusek, D. ve Riley, F.L., The Influence of Sintering Additives on the Indentation Response of Liquid-phase-sintered Polycrystalline Aluminas, Philosophical Magazine A, 82,10 (2002) 2041–2057.
87. Li, W., Huang, C., Yu, M. ve Liao, H., Investigation on Mechanical Property of Annealed Copper Particles and Cold Sprayed Copper Coating by a Micro-indentation Testing, Materials & Design, 46 (2013) 219–226.
88. Charitidis, C.A., Koumoulos, E.P., Nikolakis, V. ve Dragatogiannis, D.A., Structural and Nanomechanical Properties of a Zeolite Membrane Measured Using Nanoindentation, Thin Solid Films, 526 (2012) 168–175.
89. Kucharski, S. ve Jarzabek, D., Depth Dependence of Nanoindentation Pile-up Patterns in Copper Single Crystals, Metallurgical and Materials Transactions A, 45,11 (2014) 4997–5008.
90. Saxena, A., Kumaraswamy, A., Madhu, V. ve Madhusudhan Reddy, G., Study of Tribological Characteristics of Multi-pass SMAW Armox 500T Steel Joints, Journal of Materials Engineering and Performance, 27 (2018) 4300–4307.
91. Saxena, A., Kumaraswamy, A., Dwivedi, S.P., Srivastava, A.K., Maurya, N.K. ve Pandey, M., Experimental and Numerical Investigation of Quasi-static (10^{-3} s^{-1}) Fracture Behavior of Armor Steel, Arabian Journal for Science and Engineering, 45 (2020) 5623–5629.
92. Mishra, P., Singh, U., Pandey, C.M., Mishra, P. ve Pandey, G., Application of Student's t-test, Analysis of Variance, and Covariance, Annals of Cardiac Anaesthesia, 22 (2019) 407–411.
93. Renner, E., Gaillard, Y., Richard, F., Amiot, F. ve Delobelle, P., Sensitivity of the residual topography to single crystal plasticity parameters in Berkovich nanoindentation on FCC nickel, International Journal of Plasticity, 77 (2016) 118–140.
94. Wang, Y., Raabe, D., Klüber, C. ve Roters, F., Orientation dependence of nanoindentation pile-up patterns and of nanoindentation microtextures in copper single crystals, Acta Materialia, 52,8 (2004) 2229–2238.
95. Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D. ve Nayak, N., Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel, Materials Science and Engineering A, 640 (2015) 200–209.
96. Jena, P.K., Mishra, B., RameshBabu, M., Babu, A., Singh, A.K., SivaKumar, K. ve Balakrishna Bhat, T., Effect of Heat Treatment on Mechanical and Ballistic Properties of a High Strength Armour Steel, International Journal of Impact Engineering, 37 (2010) 242–249.

97. Qian, L., Li, M., Zhou, Z., Yang, H. ve Shi, X., Comparison of Nanoindentation Hardness to Microhardness, Surface and Coatings Technology, 195,2-3 (2005) 264–271.
98. Wang, W. ve Wei, X., The Effect of Martensite Volume and Distribution on Shear Fracture Propagation of 600–1000 MPa Dual Phase Sheet Steels in the Process of Deep Drawing, International Journal of Mechanical Sciences, 67 (2013) 100–107.
99. Chen, X., Ashcroft, I.A., Wildman, R.D. ve Tuck, C.J., A Combined Inverse Finite Element - Elastoplastic Modelling Method to Simulate the Size-effect in Nanoindentation and Characterise Materials from the Nano to Micro-scale, International Journal of Solids and Structures, 104–105 (2017) 25–34.
100. Shuman, D.J., Costa, A.L.M. ve Andrade, M.S., Calculating the Elastic Modulus from Nanoindentation and Microindentation Reload Curves, Materials Characterization, 58,4 (2007) 380–389.
101. Chen, C.J., Yan, K., Qin, L., Zhang, M., Wang, X., Zou, T. ve Hu, Z., Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additively Manufactured AISI H13 Tool Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 26 (2017) 5577–5589.
102. Lashgari, H.R., Cadogan, J.M., Chu, D. ve Li, S., The Effect of Heat Treatment and Cyclic Loading on Nanoindentation Behaviour of FeSiB Amorphous Alloy, Materials & Design, 92 (2016) 919–931.
103. Saraswati, T., Sritharan, T., Mhaisalkar, S., Breach, C.D. ve Wulff, F., Cyclic Loading as an Extended Nanoindentation Technique, Materials Science and Engineering: A, 423, 1-2 (2006) 14–18.
104. Chabok, A., Galinmoghaddam, E., De Hosson, J.T.M. ve Pei, Y.T., Micromechanical Evaluation of DP 1000-GI Dual-phase High-strength Steel Resistance Spot Weld, Journal of Materials Science, 54 (2019) 1703–1715.
105. Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Effect of Indentation Loading Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Grade DP 800, Applied Physics A, 126,11 (2020) 916.
106. Rijkenberg, R.A., Aarnts, M.P., Twisk, F.A., Zuijderwijk, M.J., Knieps, M. ve Pfaff, H., Linking Crystallographic, Chemical and Nano-mechanical Properties of Phase Constituents in DP and TRIP Steels, Materials Science Forum, 638-642 (2010) 3465–3472.
107. Schuh, C.A., Nanoindentation Studies of Materials, Materials Today, 9,5 (2006) 32–40.

108. Ruiz-Andres, M., Conde, A., Damborenea, J. ve Garcia, I., Microstructural and Micromechanical Effects of Cold Roll-forming on High Strength Dual Phase Steels, Materials Research, 18,4 (2015) 843-852.
109. Feng, C. ve Kang, B.S., Young's Modulus Measurement Using A Simplified Transparent Indenter Measurement Technique, Experimental Mechanics, 48 (2008) 9-15.
110. Richter, A., Daghljan, C.P., Ries, R. ve Solozhenko, V.L., Investigation of Novel Superhard Materials by Multi-cycling Nanoindentation, Diamond and Related Materials, 15,11-12 (2006) 2019-2023.
111. Wei, J., McFarlin, B.L. ve Johnson, A.J.W., A Multi-indent Approach to Detect the Surface of Soft Materials During Nanoindentation, Journal of Materials Research, 31 (2016) 2672-2685.
112. Ma, Z.S., Zhou, Y.C., Long, S.G. ve Lu, C., On the Intrinsic Hardness of a Metallic Film/substrate System: Indentation Size and Substrate Effects, International Journal of Plasticity, 34 (2012) 1-11.
113. Mazaheri, Y., Kermanpur, A. ve Najafizadeh, A., Nanoindentation Study of Ferrite-martensite Dual Phase Steels Developed by a New Thermomechanical Processing, Materials Science and Engineering: A, 639 (2015) 8-14.
114. Bolshakov, A. ve Pharr, G.M., Influences of Pile up on the Measurement of Mechanical Properties by Load and Depth Sensing Indentation Techniques, Journal of Materials Research, 13,4 (1998) 1049-1058.
115. Xu, Z.H. ve Rowcliffe, D., Method to Determine the Plastic Properties of Bulk Materials by Nanoindentation, Philosophical Magazine A, 82,10 (2002) 1893-1901.
116. Gale, J.D. ve Achuthan, A., The Effect of Work-hardening and Pile-up on Nanoindentation Measurements, Journal of Materials Science, 49 (2014) 5066-5075.
117. Ekmekci, D., Yılmaz, F., Kölemen, U. ve Cora, Ö.N., Microindentation on the Porous Copper Surface Modulations, Applied Physics A, 123 (2017) 705.
118. Kumar, A., Singh, S.B. ve Ray, K.K., Influence of Bainite/martensite-content on the Tensile Properties of Low Carbon Dual-phase Steels, Materials Science and Engineering A, 474 (2008) 270-282.
119. Taylor, M.D., De Moor, E., Speer, J.G. ve Matlock, D.K., Effects of Constituent Hardness on Formability of Dual Phase Steels, Steel Research International, 92 (2021) 2100281.

120. V.H.B. Hernandez, S.K. Panda, Y. Okita, N.Y. Zhou, A Study on Heat Affected Zone Softening in Resistance Spot Welded Dual Phase Steel by Nanoindentation, Journal of Materials Science, 45 (2010) 1638-1647.
121. Pérez Medina, G.Y., Hurtado Delgado, E., Miranda Pérez A.F. ve Lopez Ferreira, H., Phases Quantification in DP600 Steel Welded by GTAW Process using SEM and Atomic Force Microscopy, Materials Research, 20 (2017) 1161-1165.
122. Chang, Y., Haase, C., Szeliga, D., Madej, L., Hangen, U., Pietrzyk, M. ve Bleck, W., Compositional Heterogeneity in Multiphase Steels: Characterization and Influence on Local Properties, Materials Science and Engineering: A, 827 (2021) 142078.
123. Zhu, L., Xu, B., Wang, H. ve Wang, C., On the Evaluation of Residual Stress and Mechanical Properties of FeCrBSi Coatings by Nanoindentation, Materials Science and Engineering: A, 536 (2012) 98-102.
124. Fereiduni, E. ve Ghasemi Banadkouki, S.S., Reliability/unreliability of Mixture Rule in a Low Alloy Ferrite-martensite Dual Phase Steel, Journal of Alloys and Compounds, 577 (2013) 351–359.
125. Thomas, G. ve Koo, J., Developments in Strong, Ductile Duplex Ferritic-martensitic Steels, The American Institute of Metallurgical Engineers Symposium, February 1979, New Orleans, Bildiriler Kitabı, 183–201.
126. Celentan, D.J., Guelorget, B., François, M., Cruchaga, M.A. ve Slimane A., Numerical Simulation and Experimental Validation of the Microindentation Test Applied to Bulk Elastoplastic Materials, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 20,4 (2012) 045007.
127. Koloor, S.S.R., Karimzadeh, A., Tamin, M.N. ve Shukor, M.H.A., Effects of Sample and Indenter Configurations of Nanoindentation Experiment on the Mechanical Behavior and Properties of Ductile Materials, Metals, 8,6 (2018) 421.
128. Moore, S.W., Manzari, M.T. ve Shen Y.L., Nanoindentation in Elastoplastic Materials: Insights from Numerical Simulations, International Journal of Smart and Nano Materials, 1,2 (2010) 95-114.
129. Bucaille, J.L., Stauss, S., Felder, E. ve Michler, J., Determination of Plastic Properties of Metals by Instrumented Indentation Using Different Sharp Indenters, Acta Materialia, 51,6 (2003) 1663-1678.
130. Bouzakis, K.D. ve Michailidis, N., An Accurate and Fast Approach for Determining Materials Stress-strain Curves by Nanoindentation and Its FEM-based Simulation, Materials Characterization, 56,2 (2006) 147-157.

131. Moussa, C., Bartier, O., Mauvoisin, G., Pilvin, P. ve Delattre, G., Characterization of Homogenous and Plastically Graded Materials with Spherical Indentation and Inverse Analysis, Journal of Materials Research, 27,1 (2012) 20-27.
132. De Bono, D.M., London, T., Baker, M. ve Whiting, M.J., A Robust Inverse Analysis Method to Estimate the Local Tensile Properties of Heterogeneous Materials from Nanoindentation Data, International Journal of Mechanical Sciences, 123 (2017) 162-176.
133. Huang, T.T., Gou, R.B., Dan, W.J. ve Zhang, W.G., Strain-hardening Behaviors of Dual Phase Steels with Microstructure Features, Materials Science and Engineering: A, 672 (2016) 88-97.
134. Gaško, M. ve Rosenberg, G., Correlation Between Hardness and Tensile Properties in Ultra-high Strength Dual Phase Steels – Short Communication, Materials Engineering - Materiálové inžinierstvo, 18 (2011) 155-159.
135. Saai, A., Hopperstad, O.S., Granbom, Y. ve Lademo, O.G., Influence of Volume Fraction and Distribution of Martensite Phase on the Strain Localization in Dual Phase Steels, Procedia Materials Science, 3 (2014) 900-905.
136. Poulin, C.M., Korkolis, Y.P., Kinsey, B.L. ve Knezevic, M., Over Five-times Improved Elongation-to-fracture of Dual-phase 1180 Steel by Continuous-bending-under-tension, Materials & Design, 161 (2019) 95-105.

ÖZGEÇMİŞ

Dursun EKMEKÇİ 2003 yılında Akçakoca Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'ni bitirdi. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve özel sektörde çeşitli kurumlarda çalışmalarına devam etti. Yüksek lisans eğitimini 2012 yılında tamamladı. Nisan 2012'de Gümüşhane Üniversitesi tarafından Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanmış olup, orta derecede İngilizce bilmektedir.

Projelerde Yaptığı Görevler:

Otomotiv ve Zırh Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Nanogirinin Yöntemiyle İncelenmesi, 218M913 - Tübitak 1002, Yürütücü: Ömer Necati CORA, Araştırmacı: Dursun EKMEKÇİ, 01/09/2019 – 01/12/2021 (Tamamlandı).

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Ekmekci, D., Uşun, A. ve Cora, Ö.N., Effect of Plastic Deformation on the Mechanical Properties of Dual-phase Steels Using Conventional vs. Nanoindentation Techniques, JOM- The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), (2023).

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Comparison of Mechanical Properties Obtained for Armor Steels: Conventional Methods vs. Nanoindentation, Journal of Testing and Evaluation, 51,4 (2023).

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Effect of Indentation Loading Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Grade DP 800, Applied Physics A, 126 (2020) 6616017.

Ekmekci, D., Yılmaz, F., Kölemen, U. ve Cora, Ö.N., Microindentation on the Porous Copper Surface Modulations, Applied Physics A, 123 (2017) 3655047.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Balistik Teste Tabi Tutulan Zırh Çeliği Plakalarının Mekanik Özelliklerinin Nanogirinin Yöntemiyle Belirlenmesi, Uluslararası Çevrimiçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Konferansı, Temmuz 2021, Gümüşhane, Bildiriler Kitabı, 239.

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin Nanogirinin Yöntemiyle Belirlenmesi, Uluslararası Çevrimiçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Konferansı, Temmuz 2021, Gümüşhane, Bildiriler Kitabı, 238.

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., İleri Yüksek Mukavemetli DP800 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinde Girinin Yükleme Tiplerinin Etkisi, International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology, Ekim 2017, Bitlis, Bildiriler Kitabı, 372.

Ekmekci, D. ve Cora, Ö.N., Effect of Indentation Force on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steels, 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Ekim 2016, Denizli, Bildiriler Kitabı, 124.

Ekmekci, D., Yılmaz, F., Kölemen, U. ve Cora, Ö.N., Nanoindentation on Cu Powder and Its Finite Element Modeling, 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Ekim 2016, Denizli, Bildiriler Kitabı, 125.