

PE MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI

EMİRHAN ARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ŞENOL MERT**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PE MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA
KAYNAĞI

Emirhan Arslan tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Ö. Üyesi Şenol MERT

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU

Kocaeli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 01/07/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallar ve etik ilkelere uygun biçimde elde edilip sunulduğunu, herhangi bir şekilde başka bir kaynaktan doğrudan alıntı yapılmadığını ve intihal içermediğini beyan ederim.

1 Temmuz 2025

Emirhan Arslan



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT ve Öğr. Gör. Dr. Sevdâ Mert'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Takım Tezgahları ve Laboratuvar imkanlarından yararlanmama olanak sağlayan değerli yöneticim Barış Yeşiltaş'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

1 Temmuz 2025

Emirhan ARSLAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR.....	xiii
SİMGELER.....	xiv
ÖZET.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
2.1. PLASTİK MALZEMELER	5
2.2. PLASTİK MALZEMELERİN YAPISAL VE THERMAL İŞLEM ÖZELLİKLERİ.....	6
2.2.1. Yapısal Özellikler.....	6
2.2.2. Thermal İşlem Özellikleri	6
2.2.3. Polietilen (PE) Malzeme Bilgisi.....	7
2.3. PLASTİK MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ.....	8
2.3.1. Plastik Kaynak Yöntemleri	8
2.3.2. Yapıştırma Yöntemleri.....	9
2.3.3. Mekanik Bağlantılar	9
2.3.4. Plastik Birleştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	10
2.3.5. Birleştirme Parametrelerinin Önemi	10
2.4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ	10
2.4.1. Yöntemin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi	10
2.4.2. SKNK Yönteminin Uygulanışı	11
2.4.3. SKNK Yönteminin Başarısını Etkileyen Parametreler	14
2.4.4. SKNK Yöntemi İle İlgili Çalışmalar.....	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI (SKNK) İÇİN KULLANILAN MALZEME	19
3.2. KULLANILAN KAYNAK TAKIMI	20
3.2.1. Takım Malzemesi.....	20
3.2.2. Takım Geometrisi.....	21
3.3. KAYNAĞIN UYGULANIŞI.....	24
3.4. KAYNAK MUKAVEMETİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ.....	30

3.4.1. Farklı Takım, Bekleme Süresi, Devir Sayısı Parametrelerinin İncelenmesi	30
3.5. KAYNAK MUKAVEMETİNİ BELİRLEMEK AMACIYLA UYGULANAN TEST YÖNTEMİ.....	32
3.5.1. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) Numunelerine Uygulanan Çekme Deneyi.....	32
3.5.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) Numunelerine Uygulanan Makroskobik ve Mikroskobik İncelemeler.....	33
3.5.3. Kaynak Bölgelerinin Tespit Edilmesi İçin Enine Kesit İncelemesi.....	35
4. DENEYSEL SONUÇLAR	36
4.1. BELİRLENEN PARAMETRELER ALTINDA ÜRETİLEN SKNK NUMUNELERİNE UYGULANAN ÇEKME DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	36
4.1.1. Birinci Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi.....	36
4.1.2. İkinci Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi.....	50
4.1.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi.....	64
4.1.4. Çekme Deneyi Sonuçlarına Göre Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi ve Optimum Kaynak Parametresine Sahip Numune ile Asıl Numunenin Çekme Kuvveti Değerlerinin Kıyaslanması	78
4.2. SKNK NUMUNELERİNİN ÇEKME DENEYİ SONRASINDA MEYDANA GELEN KOPMA BÖLGELERİNİN OPTİK MİKROSKOP YARDIMI İLE İNCELENMESİ.....	79
4.2.1. Birinci Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi	79
4.2.2. İkinci Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi	82
4.2.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi	84
4.3. KAYNAKLI NUMUNELERİN ENİNE KESİTLERİNİN OPTİK MİKROSKOP İLE ANALİZİ VE KAYNAK BÖLGESİ TESPİTİ.....	87
4.3.1. Birinci Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi	87
4.3.2. İkinci Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi	89
4.3.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi	91

4.4. FARKLI DEVİR SAYILARINDA ELDE EDİLEN ÇEKME KUVVETİ SONUÇLARININ KIYASLANMASI.....	93
5. SONUÇLAR.....	95
6. KAYNAKÇA.....	99



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin üç adımı.....	3
Şekil 2.1. SKNK yönteminin prensibi	12
Şekil 2.2. Birleştirme takımı.....	13
Şekil 2.3. SKNK işlemi sürecinde oluşan sıcaklığın gösterimi	13
Şekil 2.4. Farklı takım omuzları ve uç profilleri örnekleri	14
Şekil 2.5. Kaynak bölgesinin oluşumu	14
Şekil 2.6. Bindirme bağlantısı.....	17
Şekil 2.7. Kaynaklarda kullanılan SKNK takımı.....	17
Şekil 2.8. Çekme kuvvetinin karıştırma süresi ile değişimi	18
Şekil 3.1. SKNK yöntemi için uygulanan bindirme pozisyonu.....	20
Şekil 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı....	22
Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı....	22
Şekil 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı....	23
Şekil 3.5. Kaynak takımının torna tezgahında imalatı.....	23
Şekil 3.6. SKNK Bindirme Birleştirme kaynağı bağlama aparatı.....	24
Şekil 3.7. Deneysel çalışmada kullanılan CNC freze tezgahı.....	25
Şekil 3.8. SKNK bağlantısı için bindirme şekli.....	26
Şekil 3.9. Kaynak aparatının CNC tezgahında imalatı.....	27
Şekil 3.10. SKNK'nın uygulanışı sırasından bir görüntü.....	27
Şekil 3.11. G ve M kodlarının oluşturulması için yararlanılan EdgeCam programından bir görüntü.....	28
Şekil 3.12. Kaynak işleminden sonra takım ucuna yapışan plastik malzeme.....	29
Şekil 3.13. Kaynak işleminden sonra takım ucuna yapışan plastik malzeme.....	29
Şekil 3.14. Bilgisayar kontrollü elektromekanik çekme testi cihazı.....	33
Şekil 3.15. Kesit görüntüleri için oluşturulan numuneler.....	35
Şekil 4.1. Birinci kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri	38
Şekil 4.2. Birinci kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.....	38
Şekil 4.3. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	39
Şekil 4.4. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	40
Şekil 4.5. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	40
Şekil 4.6. 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	41
Şekil 4.7. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	41
Şekil 4.8. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	42

Şekil 4.9. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	42
Şekil 4.10. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	43
Şekil 4.11. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.....	43
Şekil 4.12. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen A4 kaynak numunesi.....	45
Şekil 4.13. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen B4 kaynak numunesi.....	45
Şekil 4.14. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen C3 kaynak numunesi.....	45
Şekil 4.15. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.....	46
Şekil 4.16. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.....	47
Şekil 4.17. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.....	47
Şekil 4.18. Birinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.....	49
Şekil 4.19. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).	49
Şekil 4.20. İkinci kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri.....	52
Şekil 4.21. İkinci kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.....	52
Şekil 4.22. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	53
Şekil 4.23. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	54
Şekil 4.24. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.....	54
Şekil 4.25. 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	55
Şekil 4.26. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	56
Şekil 4.27. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	56
Şekil 4.28. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	57
Şekil 4.29. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	57

Şekil 4.30. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	58
Şekil 4.31. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen D4 kaynak numunesi.	59
Şekil 4.32. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen E3 kaynak numunesi.	59
Şekil 4.33. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen F4 kaynak numunesi.	60
Şekil 4.34. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.	61
Şekil 4.35. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.	61
Şekil 4.36. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.	62
Şekil 4.37. İkinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.	63
Şekil 4.38. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).	64
Şekil 4.39. Üçüncü kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.	66
Şekil 4.40. Üçüncü kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri.	67
Şekil 4.41. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.	68
Şekil 4.42. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.	68
Şekil 4.43. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.	69
Şekil 4.44. 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	70
Şekil 4.45. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	70
Şekil 4.46. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	71
Şekil 4.47. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	71
Şekil 4.48. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	72
Şekil 4.49. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.	72
Şekil 4.50. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen G4 kaynak numunesi.	73
Şekil 4.51. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen H4 kaynak numunesi.	74

Şekil 4.52. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen K4 kaynak numunesi.....	74
Şekil 4.53. 700 d/d, 1400 d/d, 2100 d/d kaynak takımı devir sayıları, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.....	75
Şekil 4.54. Üçüncü kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.	77
Şekil 4.55. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).	77
Şekil 4.56. a) Asıl numune b) Herhangi bir kaynaklı numune c) Asıl numunenin çekme deneyi sonrası görünümü.	79
Şekil 4.57. B4 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	80
Şekil 4.58. A5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	80
Şekil 4.59. B1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	81
Şekil 4.60. C5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	81
Şekil 4.61. D3 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	82
Şekil 4.62. E1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	83
Şekil 4.63. F1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.	83
Şekil 4.64. H5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	85
Şekil 4.65. H2 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	85
Şekil 4.66. K5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.....	86
Şekil 4.67. A5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 2354 N).....	88
Şekil 4.68. B1 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1250 N).....	88
Şekil 4.69. F5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 2049 N).....	90
Şekil 4.70. E1 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1060 N).....	90
Şekil 4.71. H2 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1606 N).....	92
Şekil 4.72. K5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1139 N).....	92
Şekil 4.73. Birinci takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.....	93
Şekil 4.74. İkinci takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.....	94
Şekil 4.75. Üçüncü takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.....	94

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Literatürde kullanılan SKNK takımlarının oranları	21
Çizelge 3.2. Tasarlanan kaynak takımlarının boyutları ve ilgili oranları.....	21
Çizelge 3.3. Birinci takım, ikinci takım ve üçüncü takım ile yapılan deneysel çalışmada bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler.	31
Çizelge 3.4. Birinci SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.	34
Çizelge 3.5. İkinci SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.	34
Çizelge 3.6. Üçüncü SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.	35
Çizelge 4.1. Takım 1 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.....	37
Çizelge 4.2. Takım 2 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.	
Çizelge 4.3 Takım 3 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme sürelerinde elde edilen çekme kuvveti.....	65
Çizelge 4.4 Takım 3 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme sürelerinde elde edilen çekme kuvveti.....	66

KISALTMALAR

CNC	Computer Numerical Control
DNK	Direnç Nokta Kaynağı
PA	Poliamid
PA 6	Poliamid 6
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı



SİMGELER

°C	Celsius (Santigrat Derece)
J	Joule
K	Kelvin
MPa	Megapaskal
N	Newton
sn	Saniye



ÖZET

PE MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI

Emirhan Arslan

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT

Temmuz 2025, 103 sayfa

Plastik malzemelerin birleştirme ve kaynak teknolojilerindeki gelişmeler, hem sanayi uygulamaları hem de akademik araştırmalar açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ve ondan türetilen Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemleri, harici ısıtıcı veya yapıştırıcı gerektirmeden, tüketilmeyen döner takımlar aracılığıyla kaynak yapma olanağı sunmalarıyla öne çıkmaktadır. Hafif yapıların ön plana çıktığı günümüz endüstrisinde, metal yerine polimer kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, polietilen (PE) gibi termoplastik malzemeler SKNK yöntemiyle başarılı şekilde birleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında, 4 mm kalınlığında PE levhalar üzerinde farklı takım geometrileri ve işlem parametreleri ile deneyler gerçekleştirilmiş; optimum karıştırma süresi belirlenmiştir. Çekme testleri sonucunda, birinci kaynak takımıyla elde edilen 2412 N'lik çekme kuvveti, asıl numunenin 2650 N'lik değeriyle karşılaştırıldığında %91 oranına ulaşmıştır. İkinci kaynak takımı 2176 N ile %82,12, üçüncü takım ise 2356 N ile %88,9 oranında başarı sağlamıştır. Bu veriler, takım geometrisi, dönme hızı, dalma derinliği ve karıştırma süresi gibi parametrelerin kaynak performansı üzerindeki etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca, çeşitli araştırmalar da bu parametrelerin bağlantı kalitesine doğrudan etki ettiğini göstermekte; optimum kombinasyonun seçimiyle güçlü ve homojen kaynak bağlantılarının elde edilebildiği belirtilmektedir. Çalışmada kırılma yüzeyleri, kopma bölgeleri ve enine kesitler optik mikroskop ile incelenerek kaynak yapısının detaylı analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, SKNK yönteminin polimer malzemelerde güvenilir ve yüksek performanslı kaynaklar üretmede etkin bir yöntem olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekme Testi, Parametre, Polietilen, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı, Takım.

ABSTRACT

FRICION STIR SPOT WELDING OF PE MATERIAL

Emirhan Arslan

Düzce University

Graduate School, Department of Manufacturing Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Şenol Mert

July 2025, 103 pages

Developments in the joining and welding technologies of plastic materials hold great significance for both industrial applications and academic research. In particular, Friction Stir Welding (FSW) and its derivative method, Friction Stir Spot Welding (FSSW), have come to the forefront due to their ability to perform welding without the need for external heating or adhesives, using non-consumable rotating tools. In today's industry, where lightweight structures are increasingly prioritized, the use of polymers instead of metals has become widespread, and thermoplastic materials such as polyethylene (PE) can be successfully joined using the FSSW method. In this thesis study, experiments were conducted on 4 mm thick PE sheets using various tool geometries and process parameters, and the optimum stirring time was determined. According to the results of the tensile tests, the first tool achieved a maximum tensile strength of 2412 N, corresponding to 91% of the reference specimen's 2650 N value. The second tool achieved 2176 N (82.12%), while the third reached 2356 N (88.9%). These findings clearly demonstrate the influence of tool geometry, rotational speed, plunge depth, and stirring time on weld performance. Furthermore, previous studies have also shown that these parameters directly affect joint quality, and that selecting the optimum combination allows for the formation of strong and homogeneous welds. In this study, fracture surfaces, failure zones, and cross-sections were examined in detail using an optical microscope, providing an in-depth analysis of the weld structure. As a result, it has once again been confirmed that the FSSW method is an effective, reliable, and high-performance technique for joining polymer materials.

Keywords: Tensile Test, Parameter, Polyethylene, Friction Stir Spot Welding, Tool.

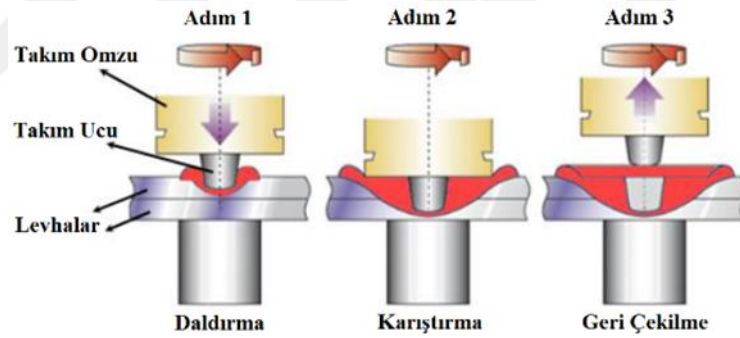
1. GİRİŞ

Son yıllarda, hafif yapılar hem ekonomik hem de ekolojik nedenlerle tercih edilmektedir ve sıklıkla birçok endüstri kolu için önemli bir yenilik öncüsü olarak tanımlanmaktadır [1], [2], [3]. Özellikle araçlarda ve uçaklarda, ağırlık azaltmaya yönelik olarak, metal yapıları polimerlerle değiştirmek yaygın bir yaklaşımdır [4], [5], [6]. Büyüyen çevresel sorunlar nedeniyle sürdürülebilir hafif yapılara büyük bir talep duyulmaktadır [7], [8], [9]. Önemli çözümlerden biri de, geri dönüştürülmüş hurda/atık termoplastik malzemelerle yeni yapılar geliştirmektir [10], [11], [12]. Termoplastik kompozit malzemelere yönelik araştırma ve uygulama ilgisi, havacılık endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli son teknoloji alanlarında son zamanlarda artan bir eğilim göstermektedir [13], [14], [15]. Bu malzemelere doğru kademeli geçişin ana nedenleri arasında, yeniden şekillendirilebilir yapıları nedeniyle, geri dönüşüm potansiyelleri, termoset muadillerine göre daha yüksek kırılma dayanımları ve üretim sürecindeki esneklikleri yer almaktadır [16], [17], [18]. Polimer, Yunanca kökenli bir kelimedir ve poli (çok), mer (tekrar birimi) anlamına gelir. Kelimenin kökeninden, polimerlerin birçok merin tekrarıyla oluşan yapılar olduğu anlamı çıkarılabilir. Merler kovalent bağlarla bağlanır ve polimeri oluşturan ham madde, polimerlerin tekrarının temel birimi olan monomerdir [19], [20]. Polimer, onu oluşturan monomer türüne, polimerik zincir başına ortalama monomer sayısına ve mevcut kovalent bağ türüne göre çok farklı özelliklere sahip olabilir. Örneğin polimerler, aşınma ve korozyona karşı iyi direnç, düşük yoğunluk, düşük maliyet, kolay montaj, dayanıklılık ve makul mekanik direnç, karmaşık şekillerde üretim gibi birçok avantaj sunar [1], [2], [3]. Plastik malzemelerin laboratuvar koşullarında istenen özelliklere sahip olacak şekilde geliştirilmesi, bu malzemelerin gelecekte mühendislik alanında öncü malzemeler arasında yer almasını mümkün kılmıştır [4], [5], [6]. Plastik malzemeler, metalik muadillerine göre mekanik dayanım bakımından zayıf olsa da; cam, karbon, talk, fiber gibi takviyelerle fiziksel ve mekanik performansları önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir [7], [8], [9]. İlk polimer olarak kabul edilen selüloit, 1868 yılında J. Hyatt tarafından keşfedilmiştir [10], [11]. Isı etkisiyle eriyip yeniden şekillendirilebilen termoplastikler, zincirlerindeki çapraz bağ eksikliği nedeniyle belirli çözücülerde kolayca çözünürler [12], [13].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), perçinli montajların ve direnç nokta kaynağının yerini alabilecek, geleneksel sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) çok önemli bir türevidir [1]. Bu teknik, geleneksel kaynak işlemlerine kıyasla, yüksek kaliteli bağlantılar sağlar [2]. SKNK, titanyum, alüminyum, magnezyum gibi çeşitli metal türlerini birleştirmek için kullanılan yeni bir teknolojidir [3]. Ayrıca, geleneksel kaynak işlemiyle kaynaklanması zor olan polimer malzemelerin kaynaklanmasında da kullanılır [4]. Çeşitli endüstriyel uygulamalarda, yüksek yoğunluklu polietilen en çok kullanılan malzemelerden biri haline gelmiştir [5]. Plastik malzemelerin birleştirme ve kaynak tekniklerindeki gelişme ve modernizasyon, bilimsel araştırma ve endüstri alanında büyük bir ilgi görmüştür [6]. Sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı, günümüzde herhangi bir yapıştırıcı veya harici ısıtıcıya ihtiyaç duyulmaması ve tüketilemeyen aletlerin kullanılması nedeniyle diğer birleştirme tekniklerine göre önemli bir avantaj elde etmiştir [7]. Otomotiv alanında büyük ilgi gören sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), sürtünme karıştırma kaynağından (SKK) türemiştir [8], [9]. 1993 yılında Mazda tarafından geliştirilen SKNK yöntemi, ergime süreci olmadan bindirme bağlantısı gerçekleştiren, tamamen yeni bir katı faz kaynak yöntemidir [10], [11], [12]. Otomotiv endüstrisinde, alüminyum sacların direnç nokta kaynağıyla birleştirilmesinde oluşan hataları gidermek için geliştirilen SKNK yöntemi, alüminyum [13], magnezyum [14] ve çelik levhalarda etkin şekilde uygulanmaktadır [15]. Araştırmalar, SKNK'nın çeşitli yüksek performanslı çelik türlerinde, özellikle yüksek, ileri yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerde başarıyla uygulandığını ortaya koymaktadır [16]. Plastik malzemeler üzerinde SKNK yöntemiyle gerçekleştirilen ön çalışmalar, bu tekniğin polimer bazlı malzemelere uygulanabilirliğini doğrulamıştır [17], [18]. Daha sonra, farklı polimer malzemelerin SKNK yöntemiyle birleştirilip, en uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesine yönelik çeşitli araştırmalar yürütülmüştür [19], [20]. Metallerin yanı sıra plastik malzemelerde de kullanılabilen SKNK yöntemi, bu yönüyle kayda değer bir üstünlük sağlamıştır [21], [22], [23]. SKNK, bindirme bağlantılarında güçlü ve kalıcı birleştirmeler yapma kapasitesiyle önemli bir potansiyele sahiptir [24]. Otomotiv sektöründe, bir aracın üretimi sırasında binlerce bileşen kullanılır ve yüzlerce çeşitli işlem uygulanır [25]. Bu süreçlerin en kritiklerinden biri, aracın kalitesini yaklaşık %40 oranında belirleyen ve gövde yapımını şekillendiren kaynak işlemleridir [26]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), temelini sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yönteminden alan yeni bir kaynak tekniğidir [27]. SKNK yöntemi, ilk olarak Mazda

tarafından; önce RX-7 spor modeli, ardından RX-8 spor modeli otomobillerin üretiminde uygulanmıştır [28].

SKNK yöntemi, sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) nokta kaynak uygulaması olarak geliştirilmiş bir çeşididir [29]. SKNK yöntemi, klasik ergime bazlı kaynak yöntemlerine kıyasla, ana metalin erimeden birleştirilmesini sağlaması bakımından büyük bir avantaja sahiptir [30]. Bu yeni kaynak yöntemi, otomotiv, havacılık ve diğer sektörlerde uygulanabilmesi için yoğun çalışmalarla geliştirilmektedir [31], [32]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, çevreye duyarlı ve yüksek performanslı bir katı hal kaynak yöntemi olarak kabul görmektedir [33]. Son dönemde geliştirilen kaynak teknikleri, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan direnç nokta kaynağı gibi yöntemlerin yerine geçme potansiyeli taşımaktadır [9]. Bu bağlamda, direnç nokta kaynağının alternatifi olarak SKNK sıklıkla belirtilmektedir [34]. SKNK yöntemi, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takım ile, daldırma, karıştırma ve geri çekilme olmak üzere üç kademede uygulanmaktadır [12], [13], [26], [28], [35], [36], [37], [38]. Bu üç aşama adım adım sırasıyla Şekil 1.1’de gösterilmiştir [39].



Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin üç adımı [39].

Yapılan bu kapsamlı deneysel çalışmada, polietilen (PE) esaslı numunelerin kaynaklı olarak birleştirilmesi amacıyla sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak noktalarının oluşturulabilmesi adına, bu çalışmanın özel gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş özel bir kaynak takımı kullanılmıştır. Aynı zamanda, numunelerin tezgah tablası üzerine sağlam ve sabit bir şekilde bağlanabilmesi için yine bu çalışmaya özgü olarak geliştirilmiş bir bağlama aparatı tasarlanıp, üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, her biri farklı geometrik ve mekanik özelliklere sahip olan üç ayrı kaynak takımı ile numuneler üzerinde kaynak işlemleri uygulanmıştır. Bu takımlar aracılığıyla elde edilen kaynaklı bağlantılar, daha sonra çekme testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan bu çekme testleri neticesinde, elde edilen

her bir kaynaklı birleştirmenin çekme kuvveti değerleri detaylı şekilde analiz edilerek kaydedilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışma sürecinde farklı devir sayıları ve karıştırma süreleri denenmiş; bu parametreler sabit tutulan dalma derinliği ve ilerleme hızı koşulları altında test edilmiştir. Bu kapsamda, kaynaklı birleştirmelerin mekanik dayanımlarını en üst seviyeye taşıyan, yani çekme kuvvetini maksimize eden ideal karıştırma süresi tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin PE malzemeler üzerindeki etkinliğini ve uygun parametrelerin belirlenmesinin önemini açıkça ortaya koymuştur.



2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. PLASTİK MALZEMELER

“Plastik” terimi, kökenini Eski Yunanca’daki plastikos kelimesinden alır ve şekil verilebilen maddeleri ifade eder. Günümüzde ise plastikler, yüksek molekül ağırlıklı sentetik polimerlerden oluşan, genellikle hafif, dayanıklı ve çeşitli fiziksel özellikler sergileyen mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadır [29], [32]. İlk polimer malzeme olarak kabul edilen selüloit, 1868 yılında keşfedilmiş ve bu alandaki gelişmeler 20. yüzyılda fenol-formaldehit reçineleri gibi sentetik plastiklerle hız kazanmıştır [29]. Plastikler, kimyasal yapıları ve fiziksel özelliklerine göre genel olarak iki ana gruba ayrılır: termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayabilen ve soğuduklarında tekrar sertleşebilen malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde birçok kez eritilip şekillendirilebilirler. Nylon (poliamid), polipropilen ve polietilen bu gruba örnek verilebilir [29], [32], [40]. Buna karşılık, termoset plastikler ısı etkisiyle kimyasal reaksiyona girerek kalıcı olarak sertleşirler ve bu işlem sonrasında tekrar yumuşatılarak şekillendirilemezler. Epoksi ve fenolik reçineler yaygın termoset plastiklerdendir [32]. Polimerler yapısal olarak homopolimerler, kopolimerler ve karışım polimerleri olarak da sınıflandırılabilir. Homopolimerler, tek bir monomer biriminin tekrarından oluşur; kopolimerler ise farklı monomerlerin belirli oranlarda zincir üzerinde dizilmesiyle oluşur. Karışım polimerleri ise birden çok polimerin fiziksel olarak karışımıdır ve bu yapı farklı özelliklerin bir arada bulunmasını sağlar [29], [32]. Saf plastiklerin özellikleri çoğu zaman yeterli olmadığından, katkı maddeleri ile performansları geliştirilir. Cam elyafı, karbon fiberler, talk ve çeşitli organik katkıları plastiklerin mekanik dayanımını, ısı direncini ve işlenebilirliğini artırır. Ayrıca UV stabilizatörleri gibi maddeler, malzemelerin çevresel koşullara karşı dayanıklılığını yükseltir [29], [40], [41]. Günümüzde plastikler; hafiflikleri, yüksek korozyon direnci ve üretim kolaylığı sayesinde otomotiv, beyaz eşya, ambalaj, inşaat ve elektronik gibi birçok sektörde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Mühendislik plastiklerinin kullanımı giderek artmakta, böylece ürünlerin performansı ve ekonomikliği olumlu yönde etkilenmektedir [29], [32], [42].

2.2. PLASTİK MALZEMELERİN YAPISAL VE TERMAL İŞLEM ÖZELLİKLERİ

2.2.1. Yapısal Özellikler

Plastiklerin temel yapısını oluşturan polimer zincirleri, moleküler dizilimlerine göre farklı fiziksel özellikler sergiler. Bu yapı kristalin veya amorf olabilir. Kristalin yapıdaki polimerlerde moleküller düzenli bir şekilde sıralandığı için bu malzemeler yüksek mukavemet ve şekil kararlılığı gösterir. Buna karşılık amorf yapıdaki plastiklerde moleküler düzensizlik hâkimdir ve bu durum daha düşük yoğunluk ve camsı geçiş sıcaklığı gibi özelliklerle kendini gösterir [29], [32]. Plastikler genellikle termoplastik ve termoset olarak iki grupta sınıflandırılır. Termoplastiklerde moleküller arasında fiziksel bağlar bulunduğundan, bu malzemeler ısıtıldıklarında yumuşar, soğuduklarında tekrar sertleşirler. Bu yapı sayesinde termoplastikler defalarca şekillendirilebilir. Poliamid (PA6), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi plastikler bu sınıfta yer alır [32], [42]. Öte yandan, termoset plastiklerde çapraz kimyasal bağlar yer alır. Bu bağlar, malzeme bir kez şekil aldıktan sonra tekrar işlenmesini engeller. Sertleştikten sonra ısıtıldıklarında yapısal bozulmaya uğrarlar [29], [40]. Yapısal olarak polimerler üç gruba ayrılır: homopolimerler, kopolimerler ve karışım polimerler. Homopolimerler tek bir monomer türünden oluşurken, kopolimerler farklı monomerlerin belirli düzenle birleşmesinden oluşur. Karışım polimerlerde ise birden fazla polimerin fiziksel karışımı söz konusudur. Bu yapılar, malzemenin performansını artırmak ve istenen özellikleri sağlamak için tasarlanır [29], [32]. Katkı maddeleri de yapısal özellikleri etkileyen önemli unsurlardandır. Cam elyafı gibi takviyeler, plastiklerin mukavemetini artırırken; diğer dolgu maddeleri sertlik, darbe dayanımı veya şekil kararlılığı gibi özellikleri geliştirebilir [40], [41].

2.2.2. Termal İşlem Özellikleri

Plastiklerin termal davranışları, polimerin yapısına ve katkı maddelerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Termoplastikler, belirli sıcaklık aralıklarında yumuşayarak şekillendirilebilirken, termosetler ise sertleşme reaksiyonu sonrası bu özelliğini kaybeder. Bu nedenle termosetler yalnızca bir kez şekillendirilebilir [29], [40]. Polimerlerin termal özellikleri üç temel sıcaklık değeriyle tanımlanır: camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) ve bozunma sıcaklığı (T_d). Camsı geçiş sıcaklığı, amorf polimerlerde sert ve gevrek yapıdan esnek ve kauçuksu yapıya geçişi temsil eder. Erime sıcaklığı ise

kristalin bölgelerin çözülmeye başladığı noktadır. Bu sıcaklıklar, plastiklerin işlenmesi, şekillendirilmesi ve kullanım sıcaklıklarının belirlenmesinde önemli rol oynar [29], [32]. Termal özellikler, katkı maddeleriyle de değiştirilebilir. Alev geciktiriciler, stabilizatörler, ısı iletkenliğini artıran metal oksit katkıları veya işleme kolaylığı sağlayan kaydırıcılar, polimerin ısıl performansını artırmakta kullanılır. Böylece hem işleme sıcaklığı optimize edilir hem de ürünün çevresel koşullara dayanıklılığı artırılır [40], [41]. Isıya karşı dayanım, özellikle mühendislik uygulamalarında belirleyici bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda çalışması gereken plastik bileşenlerde, kristal yapısı yüksek ve termal bozunma direnci güçlü malzemeler tercih edilir [32], [42].

2.2.3. Polietilen (PE) Malzeme Bilgisi

Polietilen (PE), en yaygın kullanılan termoplastik polimerlerden biridir ve etilen monomerinin polimerizasyonu ile elde edilir. Basit kimyasal yapısı, düşük maliyeti, iyi kimyasal direnç özellikleri ve kolay işlenebilirliği sayesinde hem sanayide hem de günlük yaşamda oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir [29], [32]. Yapısal olarak polietilen, lineer veya dallanmış zincir yapısına sahip olabilir. Bu yapı, malzemenin yoğunluğunu ve kristallenme oranını doğrudan etkiler. Bu doğrultuda PE, yoğunluklarına göre üç ana tipe ayrılır: düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) [29], [40].

- LDPE, esnek yapısı ve düşük kristallik oranı sayesinde ambalaj filminde yaygın olarak kullanılır.
- HDPE, daha yüksek kristallenme oranına sahip olduğu için sertlik, mukavemet ve kimyasal direnç açısından daha güçlüdür.
- LLDPE ise LDPE'ye kıyasla daha üstün darbe dayanımı sunar ve film uygulamalarında tercih edilir [40].

Polietilenin camsı geçiş sıcaklığı oldukça düşüktür (yaklaşık -125 °C) ve kristallenme derecesine bağlı olarak erime sıcaklığı 105–135 °C arasında değişmektedir. Bu düşük camsı geçiş sıcaklığı PE'yi soğuk ortamlarda bile esnek ve şekil verilebilir hâlde tutar. Yüksek kristallenme oranı ise özellikle HDPE türünde yüksek mekanik dayanım sağlar [32], [42].

PE, kimyasal maddelere karşı oldukça dirençlidir. Asitlere, bazlara ve birçok çözücüye karşı dayanıklıdır; bu özellik onu boru sistemleri, kimyasal tanklar ve koruyucu kaplamalarda uygun hale getirir. Aynı zamanda düşük sürtünme katsayısı ve yüksek

elektrik yalıtkanlığı sayesinde kablo kılıflarında ve izolasyon uygulamalarında da sıkça kullanılır [29], [32].

Polietilenin performansı, çeşitli katkı maddeleri ile geliştirilebilir. Örneğin UV stabilizatörleri, PE'nin güneş ışığına karşı dayanımını artırırken; renk pigmentleri, alev geciktiriciler ve anti-statik katkıları farklı teknik ihtiyaçlara yanıt verir. Ayrıca dolgu maddeleriyle sertlik ve boyutsal kararlılık da optimize edilebilir [40], [41].

Sonuç olarak, polietilenin basit kimyasal yapısı, düşük üretim maliyeti, geniş işlenebilirlik aralığı ve dayanıklı özellikleri sayesinde sanayideki birçok sektörde vazgeçilmez bir malzeme hâline gelmiştir. Ambalaj, boru sistemleri, oyuncaklar, kaplamalar, otomotiv parçaları ve tıp ekipmanları gibi birçok uygulama alanı mevcuttur [29], [32], [42].

2.3. PLASTİK MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Plastik malzemelerin birleştirilmesi, malzemenin termal ve mekanik özellikleri ile işleme koşullarına bağlı olarak çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Polimerlerin yapısal heterojenliği, düşük erime noktaları ve termal duyarlılıkları, geleneksel metal kaynak yöntemlerinin plastiklere doğrudan uygulanmasını sınırlar. Bu nedenle, plastiklerin birleştirilmesinde kaynak, yapıştırma, mekanik bağlantı ve hibrit yöntemler yaygın şekilde tercih edilmektedir [29], [32], [40].

2.3.1. Plastik Kaynak Yöntemleri

Sıcak Plaka Kaynağı: İki plastik parçanın arasına sıcak bir plaka yerleştirilerek ısıtma yapılır. Plaka çıkarıldıktan sonra parçalar yüksek basınçla birleştirilir. Bu yöntem kalın ve büyük parçalar için uygundur, ancak işlem süresi uzun ve enerji tüketimi yüksektir [40], [43].

Ultrasonik Kaynak: Yüksek frekanslı (20–40 kHz) mekanik titreşimler plastik yüzeyde sürtünmeye dönüşür ve lokal ısı oluşur. Bu sayede hızlı ve temiz kaynak yapılır. Özellikle ince parçalar ve hassas uygulamalarda tercih edilir [43], [39].

Titreşim Kaynağı: Parçalar, biri sabit diğeri titreşim hareketi yapan bir sistemde sürtünme yoluyla ısıtılır. Büyük hacimli parçaların kaynaklanmasında kullanılır. Ancak ekipman maliyeti yüksektir [29], [40].

Sıcak Gaz Kaynağı: Isıtılmış hava ile plastik yüzeyler yumuşatılır ve ardından basınç uygulanarak birleştirilir. Karmaşık şekilli parçalar için uygundur, fakat üretim hızı düşüktür [40].

SKNK: Katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan SKNK, dönen bir takım ile sürtünme yoluyla ısı üreterek plastik malzemelerin ergime olmadan birleştirilmesini sağlar. Enerji verimliliği yüksek, çevreci ve dayanıklı kaynaklar üretir. Kaynak kalitesi takım geometrisi, daldırma derinliği, dönme hızı gibi parametrelere bağlıdır [5], [11], [26], [27].

2.3.2. Yapıştırma Yöntemleri

Yapıştırma, farklı türde plastiklerin veya plastik-metal birleşimlerinin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Yüzeylerin temizliği ve uygun yapıştırıcı seçimi başarılı bağ için şarttır. Yapıştırıcılar polimerlerin kimyasal yapısına uygun seçilmezse bağ dayanımı düşer. Ayrıca, yapıştırılmış bağlantılar genellikle kaynaklı bağlantılara göre düşük termal ve mekanik dayanım gösterir [39], [41].

2.3.3. Mekanik Bağlantılar

Plastik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de mekanik bağlantı elemanlarıdır. Bu yöntemde vida, perçin, kelepçe gibi bağlantı elemanları kullanılarak parçaların birbirine tutturulması sağlanır. Mekanik bağlantılar, özellikle montaj ve demontaj kolaylığı sağlaması açısından önemli avantajlar sunar. Bu özellik, servis ve bakım gerektiren ürünlerde veya modüler sistemlerde mekanik bağlantıların tercih edilmesini sağlamaktadır. Vida ve perçin gibi elemanlar sayesinde parçalar gerektiğinde zarar görmeden sökülebilir ve tekrar monte edilebilir. Bu durum, ürünlerin servis ömrü boyunca parça değişimini kolaylaştırmakta ve ekonomik anlamda da önemli faydalar sağlamaktadır [29]. Bununla birlikte, mekanik bağlantıların bazı sınırlamaları da vardır. Özellikle bağlantı noktalarında oluşan gerilim yoğunlaşmaları, plastik malzemelerin dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu durum, malzemedeki çatlak oluşumuna veya zamanla yorulmaya neden olabilir. Gerilim yoğunluğu, özellikle rijit bağlantı noktalarında konsantre hale geldiğinden, bu bölgeler yapının en zayıf halkası haline gelebilir [32].

2.3.4. Plastik Birleştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Plastik malzemelerin bağlanma ve birleştirme yöntemleri çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Plastik malzemelerin bağlanma ve birleştirme yöntemleri.

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları	Uygun Malzeme
Sıcak Plaka Kaynağı	Kalın parçalar için yüksek dayanım	Yavaş, yüksek enerji tüketimi	Termoplastikler
Ultrasonik Kaynak	Hızlı, temiz, hassas	İnce parçalar için daha uygundur	Termoplastikler
Titreşim Kaynağı	Büyük parçalar için uygun	Ekipman maliyeti yüksek	Termoplastikler
Sıcak Gaz Kaynağı	Karmaşık şekillerde kullanılabilir	Düşük üretim hızı	Termoplastikler
SKNK	Ergimesiz, enerji tasarruflu, çevreci	Parametre hassasiyeti	Termoplastikler
Yapıştırma	Farklı malzemeler birleştirilebilir	Düşük termal ve mekanik dayanım	Tüm plastikler
Mekanik Bağlantı	Sökülüp takılabilir, hızlı montaj	Gerilim birikimi, malzeme hasarı riski	Tüm plastikler

2.3.5. Birleştirme Parametrelerinin Önemi

Kaynak ve yapıştırma yöntemlerinde ısı, basınç, zaman gibi parametrelerin optimum değerlerde ayarlanması çok önemlidir. Örneğin, SKNK’de dönen takım hızı, daldırma derinliği ve bekleme süresi kaynak kalitesini doğrudan etkiler. Yetersiz parametre seçimi, zayıf bağlantıya ya da malzeme bozulmasına neden olabilir [11], [26], [27].

2.4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ

2.4.1. Yöntemin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak yöntemi, plastik ve metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan modern ve gelişmiş bir kaynak tekniğidir. Bu yöntem, parçaların erime sıcaklığına ulaşmadan, yani katı haldeyken birbirine bağlanmasını sağlar. Geleneksel kaynak yöntemlerinde malzemenin yüzeylerinde erime ve sonrasında katılaşma sırasında çatlaklar, boşluklar ve diğer kusurlar oluşabilir. Ancak SKNK yöntemi sayesinde bu sorunlar büyük oranda ortadan kaldırılmaktadır [5], [11]. Tekniğin

temeli, 1991 yılında İngiliz araştırmacı Wayne Thomas ve ekibi tarafından metal malzemeler için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemine dayanır. Bu yöntem, özellikle, alüminyum ve benzeri hafif metallerde başarılı sonuçlar vermiştir. Zamanla bu yöntemin prensipleri plastik malzemelere uyarlanarak SKNK geliştirilmiştir. Plastik malzemelerin düşük erime noktaları ve termal hassasiyetleri nedeniyle, bu yöntem plastiklerde tercih edilen bir kaynak yöntemi haline gelmiştir [5], [26]. Teknolojinin gelişimi ve CNC tezgahların yaygınlaşmasıyla birlikte SKNK yöntemi endüstride hızla benimsenmiştir. Parametrelerin hassas kontrolü, kaynak kalitesinin artırılması ve tekrarlanabilirliğin sağlanması mümkün olmuştur. Günümüzde otomotiv, ambalaj ve elektronik gibi pek çok sektörde tercih edilen SKNK, enerji tasarrufu sağlayan ve çevreye duyarlı yapısıyla gelecek vadeden kaynak teknolojileri arasında yer almaktadır [11], [13], [20]. Tekniğin temelinde, dönen bir takımın malzemenin yüzeyine sürtünme yoluyla temas ederek ısı üretmesi ve bu ısıya etkisiyle malzemenin plastikleşerek karışması prensibi yatmaktadır. Bu süreçte malzeme erimez; sadece yumuşar ve viskoz bir kıvama gelir [11], [13]. Böylece yüksek mukavemetli ve homojen kaynak bağlantıları elde edilir. Plastik malzemelerin erime noktalarının düşük ve termal hassasiyetlerinin yüksek olması nedeniyle, bu yöntem plastiklerde özellikle tercih edilmektedir. Günümüzde, otomotiv, ambalaj ve elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bu teknik, enerji tasarrufu ve çevre dostu yapısıyla geleceğin kaynak teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir [5], [26] .

2.4.2. SKNK Yönteminin Uygulanışı

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak yönteminde, dönen bir takım belirli bir eksenel kuvvetle plastik malzemenin yüzeyine bastırılır. Takımın omuz kısmı sürtünme yoluyla yüzeyde ısı oluştururken, uç kısmı malzemenin içinde dönerek plastikleşmeyi sağlar ve karıştırma işlemini gerçekleştirir. Bu işlem sırasında oluşan ısı malzeme yüzeyini erimeden yumuşatır, moleküler hareketliliği artırır ve malzemenin viskoz bir hale gelmesini sağlar. Böylece, karıştırma hareketi ile malzemenin mekanik bağ yapısı güçlendirilir; sonuç olarak kaynak bölgesi hem dayanıklı hem de homojen olur [11], [26].

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak (SKNK) yönteminde işlem üç temel aşamadan oluşur: daldırma, karıştırma ve geri çekilme. (Şekil 2.1)

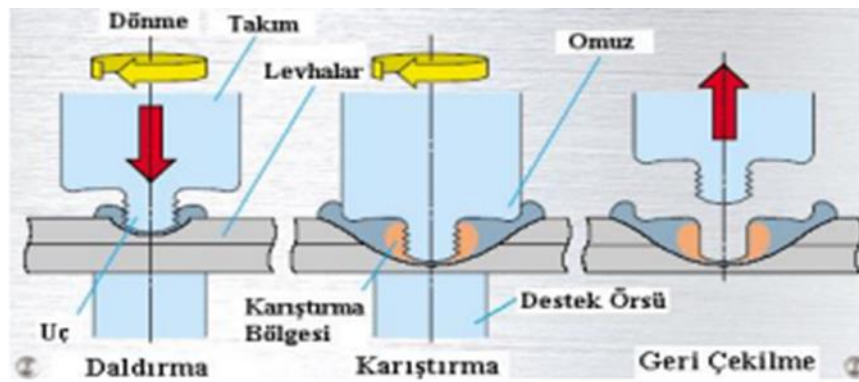
Daldırma aşamasında, dönen kaynak takımı, plastik malzemenin yüzeyine belirli bir eksenel kuvvetle temas eder. Bu temas sırasında takım ile malzeme arasında sürtünme

oluşur ve bu sürtünme yüksek miktarda ısı üretir. Üretilen ısı, malzeme yüzeyinde plastikleşmeye yol açacak düzeyde sıcaklık sağlar ancak malzeme erime noktasına ulaşmaz. Böylece, malzeme yumuşar ve şekil değişikliğine hazır hale gelir. Bu aşama, kaynak işleminin temelini oluşturur ve doğru şekilde kontrol edilmesi kaynak kalitesi açısından kritiktir [11], [26].

Karıştırma aşaması ise takımın belirlenen derinlikte malzeme içinde sabitlenmesiyle başlar. Bu aşamada, takım uç kısmı dönmeye devam eder ve plastikleşmiş malzeme içinde etkili bir karıştırma hareketi oluşturur. Bu karıştırma sayesinde malzemenin moleküler yapısı homojen hale gelir, mekanik bağlar güçlenir ve kaynak bölgesinde yüksek dayanım sağlanır. Karıştırma süresi, malzemenin cinsine ve kalınlığına göre optimize edilmelidir; yetersiz süre zayıf bağlantıya, aşırı süre ise malzeme bozulmasına neden olabilir [26], [27].

Geri çekilme aşamasında ise kaynak takımı yavaşça malzemeden uzaklaştırılır. Takımın geri çekilmesi sırasında, karıştırılmış ve plastikleşmiş malzeme soğumaya başlar. Soğuma süreciyle birlikte malzeme tekrar katılaşır ve sağlam, homojen bir kaynak bölgesi oluşturulur. Geri çekilme işleminin düzgün yapılması, kaynak yüzeyinde deformasyon ve çatlak oluşumunu engeller [11], [27].

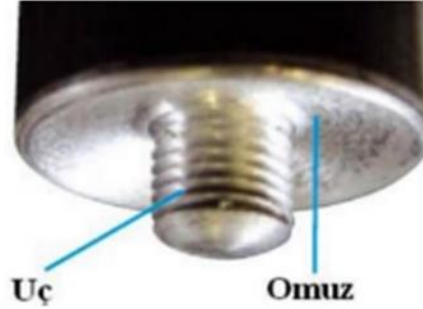
Bu üç aşamanın her biri, SKNK yönteminin başarısı için çok önemlidir ve işlem parametrelerinin dikkatle ayarlanması gerekir. Aksi takdirde kaynak kalitesi düşer ve mekanik özelliklerde olumsuz etkiler ortaya çıkar [26].



Şekil 2.1. SKNK yönteminin prensibi [11].

Takım genellikle omuz ve uç olmak üzere iki kısımdan oluşur (Şekil 2.2). Omuz, yüksek sürtünme ısı üretirken, uç malzeme içinde dönerek karıştırma ve plastik deformasyonu gerçekleştirir. Takım geometrisi, özellikle uç şekli ve boyu, kaynak kalitesini doğrudan

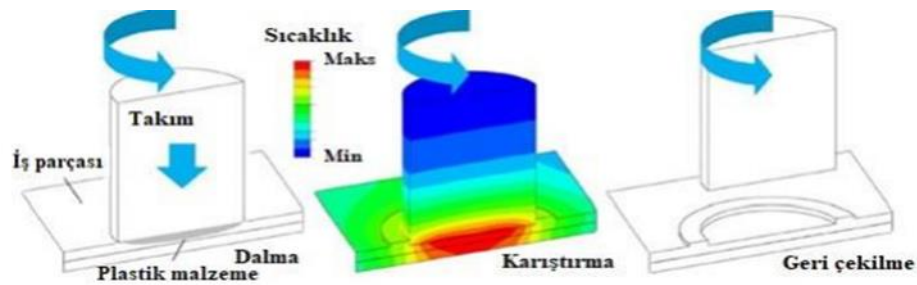
etkiler. Vida dişli, konik ve silindirik uçlar yaygın olarak kullanılır. CNC tezgâhlar SKNK uygulamalarında hassas hareket ve parametre kontrolü sağlar [5], [26], [27].



Şekil 2.2. Birleştirme takımı [1].

Başlıca kaynak parametreleri arasında takım dönme hızı, daldırma derinliği, karıştırma süresi ve uygulanan basınç yer alır. Uygun dönme hızı, yeterli sürtünme ısısı üretilmesini sağlar; düşük hızlarda kaynak kalitesi düşerken, aşırı hızlarda takım aşınması ve malzeme bozulması görülebilir. Daldırma derinliği kaynak bölgesinin hacmini ve dayanımını etkiler. Karıştırma süresi ise malzemenin homojenleşmesi ve bağlantı sağlamlığı için yeterli olmalıdır. Bu parametrelerin optimizasyonu SKNK'nin başarısı için zorunludur [11].

Şekil 2.3'te sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında takım ve iş malzemesinde oluşan sıcaklığın maksimumdan minimuma kadar olan bölgeleri görülmektedir



Şekil 2.3. SKNK işlemi sürecinde oluşan sıcaklığın gösterimi [44].

Şekil 2.4'te farklı takım omuz ve uç profilleri gösterilmiştir. Bu takımlar, SKK yönteminde kullanılan ekipmanlar olup gerektiğinde SKNK yöntemi için de uygundur [1].



Şekil 2.4. Farklı takım omuzları ve uç profilleri örnekleri [1].

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak (SKNK) işleminden sonra kaynak bölgesinin yapısı incelendiğinde, metal malzemelerde ana malzemeden farklılaşan birkaç belirgin alan ortaya çıkar. Bu bölgeler; ısıdan etkilenmiş alan, yumuşamış malzeme bölgesi ve karıştırma bölgesi olarak üçe ayrılır ve bu yapının şematik temsili Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Ayrıca, takımın uç kısmının hemen arkasında bulunan omuz bölgesi, karıştırma işleminin gerçekleştiği malzemede dışa doğru bombeli bir boşluk oluşturur. Bu çıkıntı, kaynak birleşim alanında fincan tabağı şeklinde küçük bir çukur görünümü oluşturur [1].



Şekil 2.5. Kaynak bölgesinin oluşumu [1].

2.4.3. SKNK Yönteminin Başarısını Etkileyen Parametreler

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak (SKNK) yönteminin başarısını doğrudan etkileyen beş temel parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden ilki, takım geometrisidir. Takımın kaynak yapılacak yüzeyle temas eden kesiti, malzeme ile takım arasında sürtünmeyle ısı oluşumunu sağlayan profilin şeklini belirler. Takımın geometrisi, oluşan sürtünme ısısı sayesinde yumuşayan ve yarı akışkan hale gelen malzemenin kaynak bölgesinden dışarı sızmasını engellemeli ve birleştirilen parçalar arasında bu malzemenin etkin şekilde karışmasını sağlamalıdır. Bu aşamada özellikle takımın merkez kısmında

yer alan karıştırıcı pim büyük rol oynar. Pim, karıştırma esnasında yarı akışkan malzemenin mümkün olan en büyük kısmını kaynak havuzuna dahil etmeli ve bu malzemenin düzenli biçimde karışmasını sağlamalıdır. Böylece kaynak bölgesinde homojenlik ve dayanıklılık sağlanır [1], [3], [4], [6], [7], [19], [20].

İkinci önemli parametre, kaynak takımının dönme hızıdır (devir sayısı). SKNK yönteminde, takım ile kaynak yapılacak malzemeler arasında yeterli düzeyde sürtünme oluşması gerekir ki malzemenin yüzeyi yumuşayarak bir kaynak havuzu oluşabilsin. Bu sürtünmenin sağlanabilmesi için takım ile malzeme arasında göreceli bir hareket olması zorunludur. Bu hareket, takımın belirli bir hızda döndürülmesiyle gerçekleşir. Takımın dönme devri arttıkça çevresel hızı da artar ve bu da sürtünme hızının yükselmesine neden olur. Sonuç olarak, daha yüksek dönme hızlarında malzeme daha kısa sürede yumuşar ve kaynak havuzu daha hızlı oluşur. Bu durum, işlem süresini kısaltmakla birlikte, dikkatli kontrol edilmezse malzemenin aşırı ısınmasına veya bozulmasına da yol açabilir [1], [3], [4], [6], [7], [19], [20].

Üçüncü parametre olan dalma hızı, SKNK sürecinde kaynak mukavemeti üzerinde diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı etkiye sahip bir değişkendir. Dalma hızı, kaynak takımının malzemenin yüzeyinden kaynak derinliğine ulaşmaya kadar olan ilerleme hızını ifade eder ve genellikle milimetre/dakika (mm/dk) birimiyle ölçülür. Bu hız, takımın malzeme içerisine ne kadar sürede nüfuz edeceğini belirler. Yavaş bir dalma hızı, sürtünme yoluyla daha fazla ısı oluşmasına olanak tanırken, çok yüksek hızlar takımın yeterli ısı üretmeden malzemeye girmesine neden olabilir. Ancak genel olarak, kaynak mukavemetini doğrudan ve yüksek ölçüde etkileyen bir parametre değildir [1], [3], [4], [6], [7], [19], [20].

Bir diğer önemli parametre olan dalma derinliği, dönen kaynak takımının karıştırıcı ucunun malzeme içine ne kadar nüfuz ettiğini ifade eder. Bu mesafe, takımın alt ucu malzeme yüzeyine temas ettikten sonra, dikey doğrultuda gerçekleştirdiği ilerleme boyunca ulaştığı en derin noktayı tanımlar. Genellikle, kaynak işlemi sırasında takımın yalnızca ucu değil, omuz kısmının da malzeme yüzeyinden bir miktar içeri girmesi sağlanır ve bu nokta dalma hareketinin tamamlandığı yerdir. Dalma derinliği, malzemenin tam olarak plastikleşmesini ve kaynak bölgesinde yeterli karışımın oluşmasını sağlamak açısından önemlidir. Yetersiz dalma, kaynak bölgesinde zayıflık oluşturabilirken, fazla dalma ise malzemenin alt katmanlarında deformasyona yol açabilir [1], [3], [4], [6], [7], [19], [20].

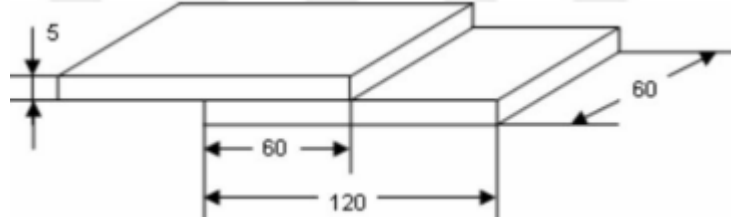
Beşinci temel parametre olan karıştırma süresi, takımın malzeme içine daldırılmasından sonra, belirli bir süre boyunca aynı konumda döndürülerek malzemelerin etkin biçimde karıştırılmasını sağladığı bekleme süresidir. Bu aşamada hem takımın karıştırıcı ucu hem de omuz kısmı yüzeye temas ederek, sürtünme yoluyla ısı üretmeye devam eder. Bu ısı, temas bölgesindeki polipropilen malzemenin sıcaklığını artırır, böylece malzeme yumuşar ve akışkanlık kazanır. Karıştırma süresi boyunca ısı üretimi devam ederken, yumuşamış malzeme karıştırıcı pim tarafından homojen biçimde karıştırılır. Özellikle takım ucunda yer alan helisel (vida benzeri) kanallar, malzeme akışını yönlendirerek kaynak bölgesinin daha düzgün ve sağlam bir şekilde oluşmasını sağlar. Uygun süre belirlenmediğinde, karışımın yetersiz kalması ya da aşırı ısınma nedeniyle malzeme yapısında bozulmalar gözlemlenebilir. Bu nedenle karıştırma süresi, kaynak dayanımı üzerinde doğrudan etkili bir parametredir [1], [3], [4], [6], [7], [19], [20].

2.4.4. SKNK Yöntemi İle İlgili Çalışmalar

Arıcı ve Mert'in yürüttüğü çalışmalarda, polipropilen (PP) malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemiyle birleştirilmesi detaylı biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda PP levhalardan numuneler hazırlanmış ve kaynak işlemi bindirme bağlantı tekniğiyle uygulanmıştır. Kaynak kalitesine ve bağlantı dayanımına etki eden temel değişkenler arasında kaynak takımının geometrisi, dönme hızı, dalma hızı, dalma derinliği ve karıştırma süresi yer almaktadır. Yapılan deneysel analizlerde, özellikle takımın dalma derinliği ile karıştırma süresinin çekme kuvveti üzerindeki etkisi belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda çeşitli parametre kombinasyonları denenmiş ve çekme deneyleriyle en yüksek mukavemet sağlayan optimum koşullar tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynak sonrası oluşan kopma bölgeleri mikroskobik olarak analiz edilerek, malzemenin kırılma davranışına dair önemli veriler elde edilmiştir [1], [5], [17].

Bu çalışmada kullanılmak üzere, polipropilen (PP) levhalardan 5x60x120 mm boyutlarında örnek parçalar hazırlanmıştır. Hazırlanan iki numune, bindirme kaynağı yöntemi esas alınarak freze tezgahına uygun özel bağlama aparatlarıyla sabitlenmiştir. Bağlantı mesafesi 60 mm olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 2.6). SKNK süreci; daldırma, karıştırma ve geri çekilme aşamalarından oluşacak şekilde sırasıyla uygulanmıştır. Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından, kaynak takımı dönme hareketini sürdürerek geri çekilmiş ve numunelerden uzaklaştırılmıştır. Uygulamada

kullanılan kaynak takımı ise, daha önce literatürde bildirilen örnekler baz alınarak belirli oranlar doğrultusunda tasarlanmıştır [1], [5], [17]. İlgili kaynak takımının görseli Şekil 2.7’de sunulmuştur.

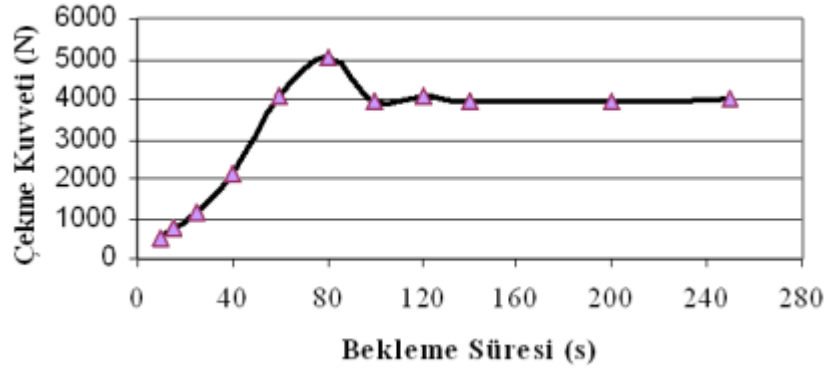


Şekil 2.6. Bindirme bağlantısı [1], [5], [17].

Karıştırma süresinin çekme kuvveti üzerindeki etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 2.8’de sunulmaktadır. Deneysel verilere göre, çekme kuvveti 80 saniyeye kadar artış göstermiş ve bu sürede 5005 N ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu noktadan sonra ise hafif bir düşüş yaşanmış ve değer yaklaşık 4000 N civarında sabitlenmiştir. Karıştırma süresinin uzamasıyla birlikte, sürtünme etkisiyle oluşan ısının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artan ısı, kaynak bölgesindeki malzemenin daha etkin bir şekilde yumuşamasına olanak sağlamış ve böylece bağlantı bölgesinde daha güçlü bir metalürjik yapı oluşmuştur. Bu gelişme, kaynak mukavemetinin artmasında önemli rol oynamıştır [1], [5], [17].



Şekil 2.7. Kaynaklarda kullanılan SKNK takımı [1], [5], [17].



Şekil 2.8. Çekme kuvvetinin karıştırma süresi ile değişimi [1], [5], [17].

Sonuçlar, en yüksek çekme kuvveti değerlerinin 80 saniyelik karıştırma süresi ve malzeme kalınlığının yaklaşık %80 ila %85'ine karşılık gelen dalma derinliklerinde elde edildiğini göstermektedir. Bu iki parametre için ulaşılan değerlerin, deneysel koşullar açısından optimum aralıkta olduğu belirlenmiştir. Karıştırma süresi ve dalma derinliği parametrelerinin her ikisinin de kaynak bölgesinin mekanik dayanımı ile kopma davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleşen kopmalar; pim merkezli, esas malzeme ile kaynak bölgesi sınırında ve omuz etkili olmak üzere üç farklı biçimde gözlemlenmiştir [1], [5], [17].

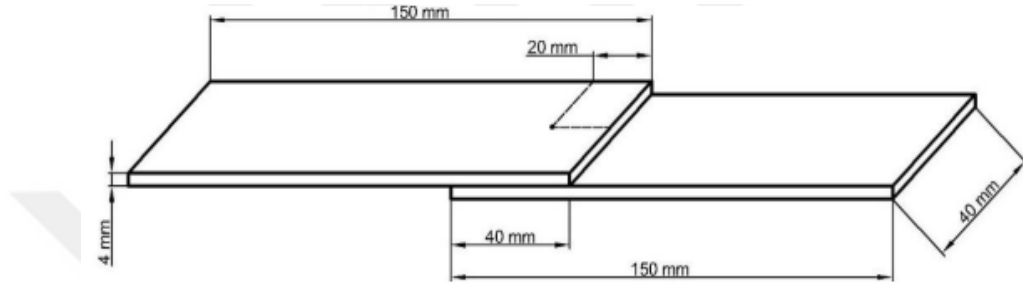
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI (SKNK) İÇİN

KULLANILAN MALZEME

Deneyisel çalışmada kullanılan kaynak bağlantı numuneleri, Kahvecioğlu Plastik firmasından 2000x1000x4 mm boyutlarında ekstrüde edilmiş Polystone G-grau yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) levhalar olarak temin edilmiştir. 150x40x4 mm ölçülerinde ve standartlara uygun olarak, şerit testere tezgahında istenilen geometriye göre kesilerek hazırlanmıştır. Polietilen (PE), termoplastik yapıya sahip olup, dünya çapında en çok tercih edilen plastik çeşitlerinden biridir. Basit kimyasal yapısı ve üstün fiziksel özellikleri sayesinde, birçok endüstriyel ve günlük uygulamada tercih edilir. Polietilen, genellikle yoğunluklarına göre üç ana gruba ayrılır: Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) ve Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen (LLDPE). Kullanılan polietilen malzemenin çalışma sıcaklığı -50 ila +80 °C arasında olup, camı geçiş sıcaklığı yaklaşık -110 °C ve erime sıcaklığı 130–135 °C aralığındadır. Malzemenin yoğunluğu 0,94–0,97 g/cm³, akma gerilmesi 20–30 MPa, elastik modülü 800–1300 MPa, darbe direnci ise oldukça yüksektir ve kırılma olmaksızın darbe absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca malzemenin Shore D ölçeğine göre sertlik değeri 60–70 arasında olup, dielektrik dayanımı 45–50 kV/mm seviyesindedir [45]. Polietilen, kalıplama, ekstrüzyonla çekme, şişirme kalıplama ve film üretimi gibi birçok işlemde kolaylıkla kullanılabilen bir termoplastik malzemedir. Kimyasallara ve neme karşı mükemmel direnç göstermesi, düşük su emme oranı, iyi elektriksel yalıtım özellikleri ve yüksek darbe dayanımı sayesinde birçok endüstriyel ve günlük uygulamada tercih edilmektedir. Ambalaj sektöründe plastik torbalar, streç filmler, şişeler ve gıda ambalajları üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca su ve atık su boruları, gaz taşıma boruları ve drenaj boruları gibi boru ve profil üretiminde; zirai örtüler, sulama boruları ve sera örtüleri gibi tarımsal ürünlerde; plastik kasalar, bidonlar, saklama kutuları, mutfak ve piknik eşyaları gibi ev eşyalarında; kablo kaplamaları ve elektrik izolasyon ürünleri gibi elektrik ve elektronik sektöründe; yakıt tankları, çamurluk astarları ve iç kaplama parçaları gibi otomotiv sanayinde; yer döşemeleri, yalıtım levhaları ve koruyucu yüzey kaplamaları gibi inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Polietilenin düşük yoğunluğu, hafifliği, kimyasal ve mekanik dayanımı, soğuk

ortamlarda dahi darbelere karşı dayanıklı yapısı, iyi elektriksel yalıtım özellikleri ve kolay işlenebilirliği, malzemenin birçok uygulamada vazgeçilmez olmasını sağlamaktadır. Ayrıca geri dönüştürülebilir yapıda olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir avantaj sunmaktadır [46], [47], [48]. Kaynaklanacak numunelere bindirme pozisyonunda, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi uygulanmıştır. SKNK yöntemini uygulamak için numunelerin bindirme pozisyonu Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. SKNK yöntemi için uygulanan bindirme pozisyonu.

3.2. KULLANILAN KAYNAK TAKIMI

3.2.1. Takım Malzemesi

Kaynak işlemlerinde kullanılan takımların malzemesi olarak AISI/SAE 1.4140 kalite ıslah çeliği tercih edilmiştir. Bu tür çelikler, karbon oranı sayesinde sertleştirme işlemlerine oldukça uygun olup, yapılan ıslah işlemi sonrasında yüksek tokluk değerleri sergilerler. Krank milleri, aks milleri, kovanlar, yivli miller gibi yüksek dayanım ve süneklik gerektiren parçaların üretiminde tercih edilmekle birlikte, dişli ve çark gibi hareketli makine elemanlarında da geniş kullanım alanı bulur. 1.4140 çeliğinin kimyasal bileşimi incelendiğinde, krom oranının %0,9–1,2, karbonun %0,38–0,45, manganın %0,5–0,8, silisyumun %0,15–0,4, molibdenin ise %0,15–0,3 aralığında olduğu görülürken, fosfor ve kükürt oranları %0,035’i geçmemektedir. Malzemenin sıcak şekil verme işlemleri 850–1050 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Yumuşak tavlama işlemi için 680–720 °C aralığında bir ısıtma uygulanmakta olup, bu işlem sonrasında malzemenin sertliği yaklaşık 241 HB seviyesine düşmektedir. Normal tavlama işlemi 840–880 °C sıcaklıklarında yapılmaktadır. Sertleştirme aşamasında, eğer su kullanılarak soğutulacaksa malzeme 820–850 °C’ye kadar ısıtılır ve suya daldırılarak 54–56 HRC arasında bir sertlik değeri elde edilir; yağda soğutma tercih edilirse, 830–860 °C’ye kadar

ısıtıldıktan sonra yağ banyosunda soğutularak yine benzer sertlik değerlerine ulaşılır. Sonrasında yapılan meneviş işlemi ise 540–680 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir ve böylece çelik hem yüksek sertliğe hem de gereken tokluk özelliklerine sahip olur [49], [50].

3.2.2. Takım Geometrisi

Yapılan deneysel çalışmalarda, torna tezgahında 4140 çelik malzeme kullanılarak imal edilen 3 adet sürtünme karıştırma nokta kaynak takımı kullanılmıştır. Literatür taraması sonucu incelenen takımların ölçüleri değerlendirilmiş ve bu takımlara ait oranlar dikkate alınarak kullanılacak takımın boyutları belirlenmiştir Çizelge 3.1. [1].

Çizelge 3.1. Literatürde kullanılan SKNK takımlarının oranları [1].

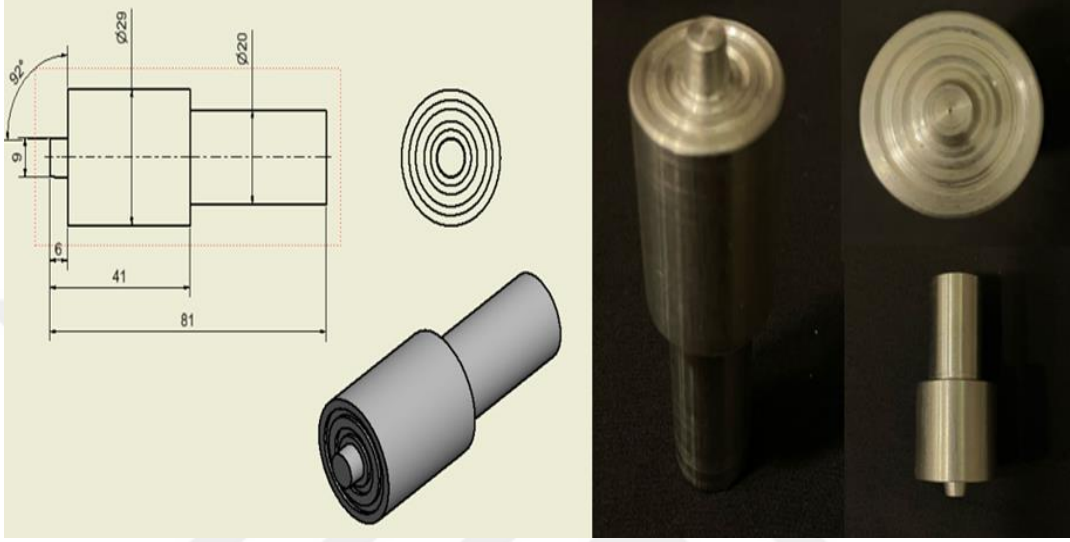
Omuz Çapı / Uç Çapı	2,0 - 3,5 arası değişebiliyor
Uç Çapı / Uç Uzunluğu	1,1 - 2,6 arası değişebiliyor

SKNK bağlantılarının oluşturulması için ideal kaynak takımı geometrisi geliştirilmiş ve takım boyutları ile oranları belirlenmiştir. Çizelge 3.2’de bu boyutlar ve oranlar verilmiştir.

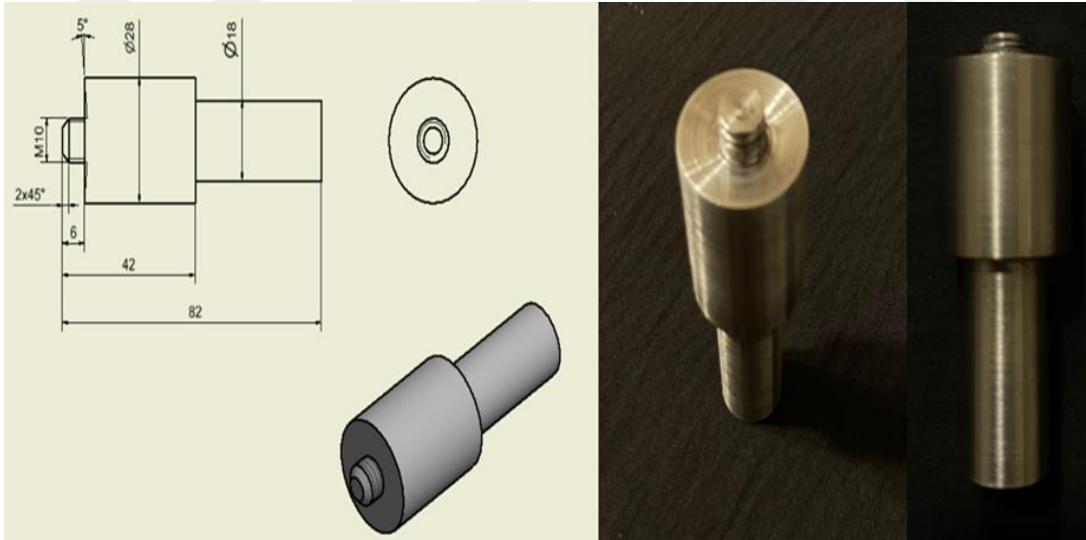
Çizelge 3.2. Tasarlanan kaynak takımlarının boyutları ve ilgili oranları.

	1.TAKIM	2.TAKIM	3.TAKIM
Omuz Çapı	29 mm	28 mm	30 mm
Takım Ucu Çapı (Pim Çapı)	9-11 mm (Konik)	M10 (10 mm)	10-12 mm (Konik)
Uç Uzunluğu (Pim Uzunluğu)	6 mm	6 mm	5,75 mm
Omuz İçi Eğimi	2°	5°	5°
Omuz Çapı / Uç Çapı	3,2-2,6	2,8	3-2,5
Uç Çapı / Uç Uzunluğu	1,5-1,83	1,66	1,73-2,08

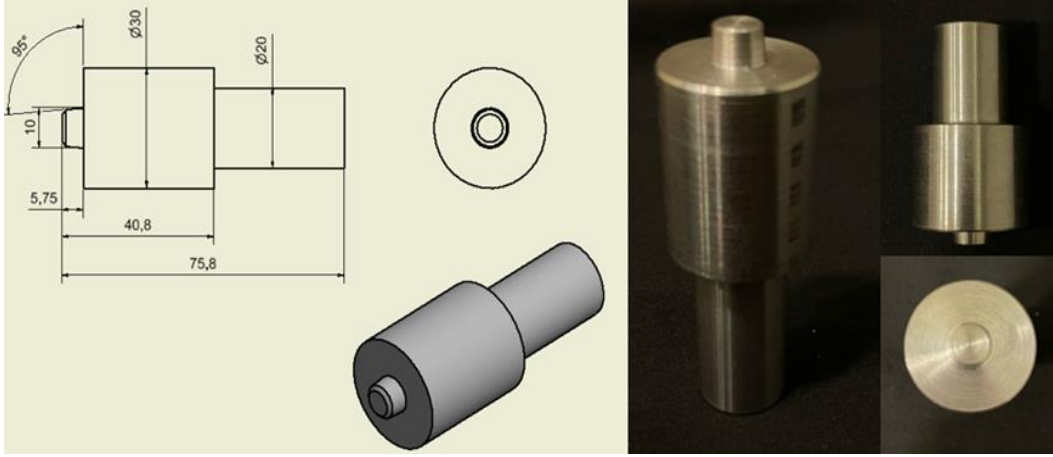
Belirlenen oranlar doğrultusunda, deneysel çalışmalarda kullanılacak kaynak takımlarının teknik resimleri çizilmiş ve 4140 çelik malzeme kullanılarak torna tezgahında işlenip üretilmiştir. Kaynak noktalarının oluşturulmasında kullanılan bu üç takımın fotoğrafları ve ölçüleri sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı.

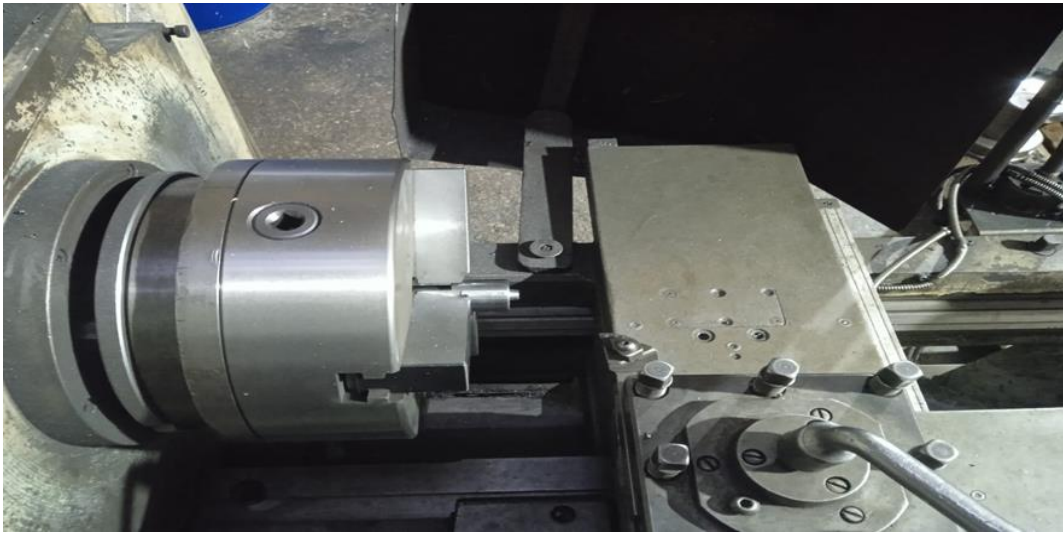


Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı.



Şekil 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımı.

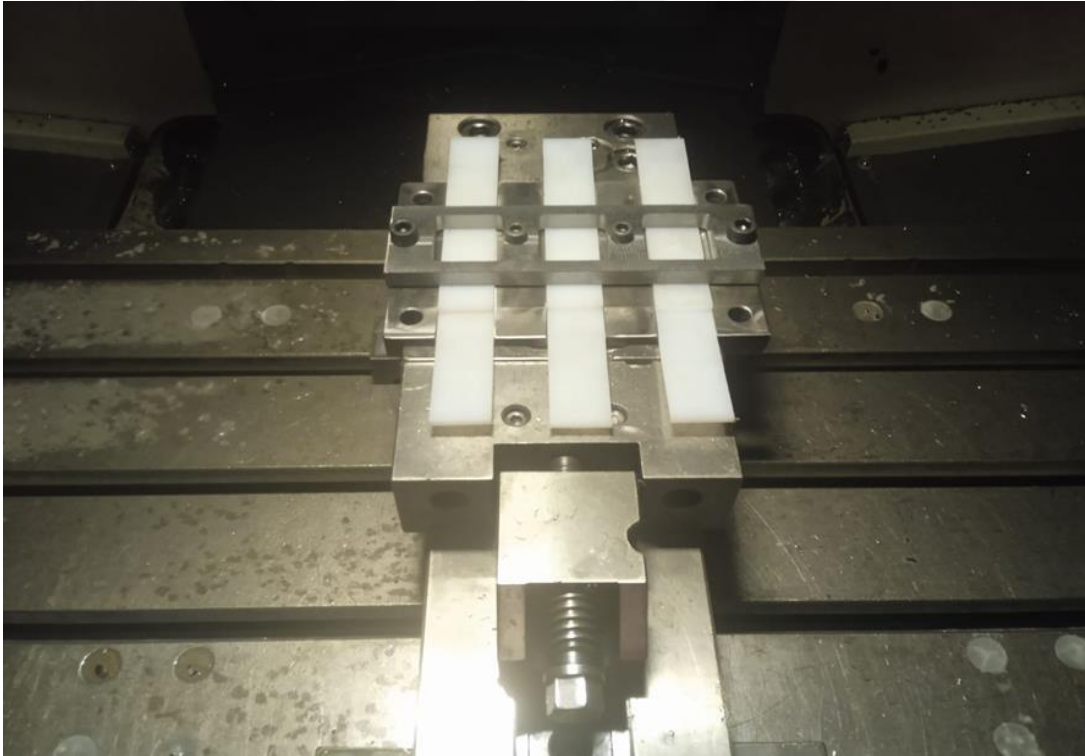
Bu çalışmada kullanılan tüm kaynak takımları, İkitelli Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Yiğit Makine firmasının mevcut atölye olanakları doğrultusunda kurum bünyesinde üretilmiştir. Takımların imalatında, talaşlı imalat yöntemleri tercih edilmiş olup üretim süreci tamamen kontrol altında gerçekleştirilmiştir. Takımların silindirik gövde kısımları, konik uç geometrileri, M10 dişli uçları ve spiral omuz tabanları, ZMM BULGARIA marka universal torna tezgahında işlenmiştir. İmalat sürecinde, geometrik hassasiyetin korunmasına özen gösterilmiş ve her bir takım, kaynak işlemlerinde kullanılmaya uygun boyutsal toleranslar dahilinde hazırlanmıştır. Şekil 3.5'te kaynak takımlarının imalatının gerçekleştiği universal torna yer almaktadır.



Şekil 3.5. Kaynak takımının torna tezgahında imalatı.

3.3. KAYNAĞIN UYGULANIŞI

Bu çalışmada birleştirme yöntemi olarak, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) sürecinde bindirme birleştirme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöneme uygun olarak, kaynak işlemi uygulanacak numuneler belirli bir bindirme oranı ile üst üste yerleştirilmiş ve Şekil 3.6'da gösterildiği üzere, üç farklı numunenin tek bir bağlama operasyonu ile eş zamanlı olarak imal edilmesine olanak tanıyan özel bir bağlama aparatı kullanılmıştır. Bağlama aparatı, kurum atölyesinde bulunan Arion IMM-1100 üç eksenli CNC dik işleme merkezi kullanılarak üretilmiştir. Bu tezgâhın teknik özellikleri arasında; maksimum 10.000 dev/dk devir hızı, 20.000 mm/dk maksimum ilerleme hızı ve 0,005 mm konumlama hassasiyeti yer almakta olup, kontrol ünitesi MITSUBISHI M-80 modelidir. CNC sistemi, ISO G ve M kodları temel alınarak çalıştırılmıştır. SKNK işlemlerinin yürütüldüğü Arion IMM-1100 model CNC dik işleme tezgâhı, Şekil 3.7'te sunulmuştur.



Şekil 3.6. SKNK Bindirme Birleştirme kaynağı bağlama aparatı.

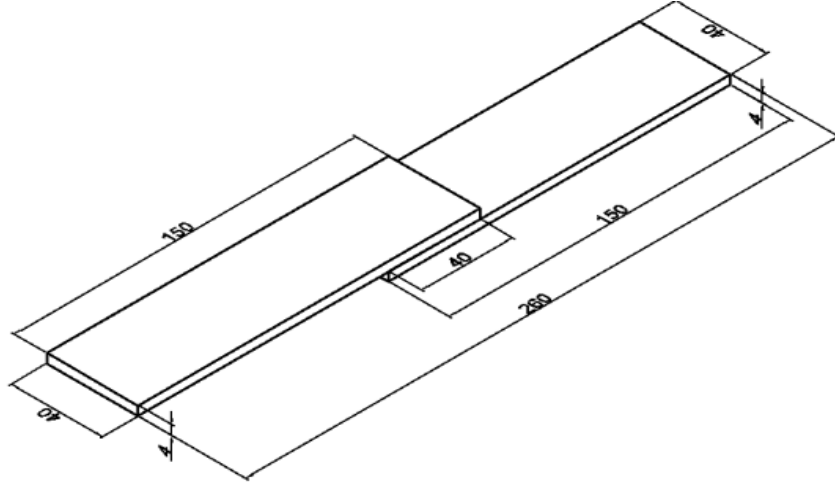
Bindirme tipi birleştirme yöntemiyle gerçekleştirilen Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) işlemlerinde gerekli geometrik hassasiyet, üç eksenli CNC dik işleme tezgahı kullanılarak sağlanmıştır. Kaynaklı bağlantıların oluşturulması sürecinde, işlem alanının görsel olarak izlenebilirliğini artırmak amacıyla aparat tasarımı dikkatli biçimde yapılmıştır. SKNK işlemlerinin hassasiyetle yürütülebilmesi için, kaynak takımlarına

CNC freze tezgahında titizlikle sıfırlama işlemi uygulanmıştır. Önceden belirlenen işlem parametreleri doğrultusunda, kaynak süreci ISO standartlarına uygun şekilde G ve M kodları girilerek otomatik modda gerçekleştirilmiştir. Söz konusu parametreler, tezgâhın kontrol paneline ISO programı formatında yüklenmiş, ardından CNC sistemi üzerinden bu program çalıştırılarak kaynak operasyonu otomatik olarak tamamlanmıştır. Uygulanan bu otomasyon sayesinde, SKNK süreci yüksek tekrarlanabilirlik ve dar toleranslar içinde gerçekleştirilmiştir.



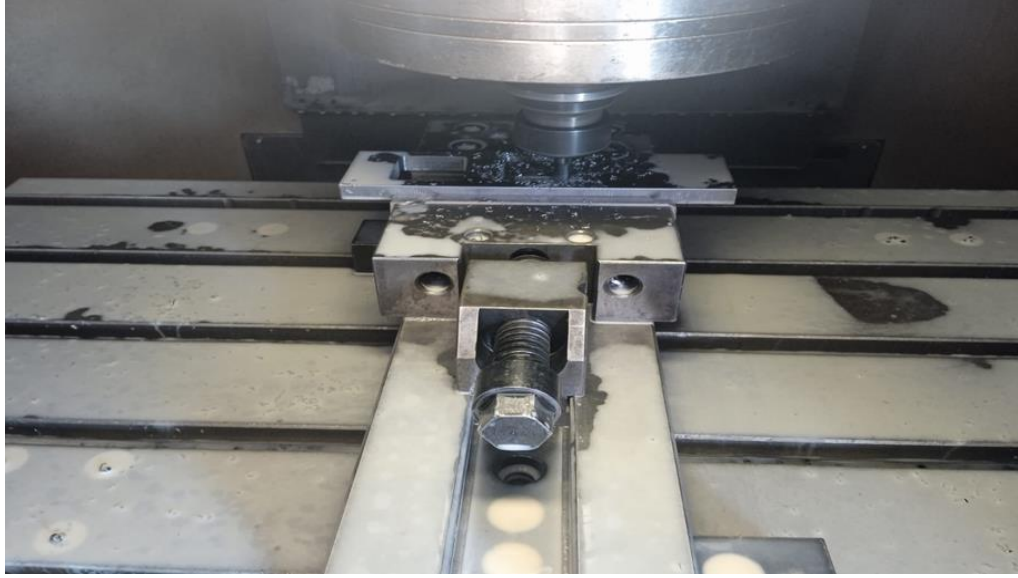
Şekil 3.7. Deneysel çalışmada kullanılan CNC freze tezgahı.

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemiyle birleştirilen parçaların kaynak dayanımını belirlemek amacıyla çekme testine uygun deney numuneleri hazırlanmıştır. Numune geometrisi, TS EN 12814-2 standardına uygun olarak tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, 4 mm kalınlığındaki polietilen levhalar, 150×40 mm boyutlarında olacak şekilde şerit testere tezgâhı kullanılarak kesilmiştir. Kesilen parçalar, bindirme esasına göre üst üste yerleştirilmiş ve CNC dik işleme tezgâhında SKNK işlemi uygulanarak birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. SKNK numunelerinin bağlantı şekli Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



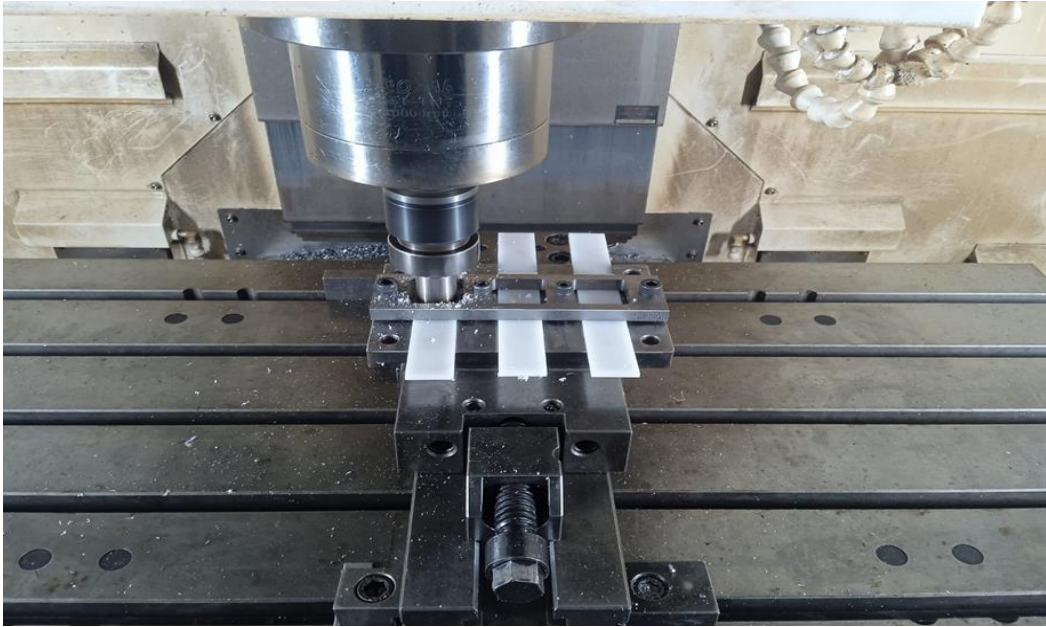
Şekil 3.8. SKNK bağlantısı için bindirme şekli.

Parçaların birleştirilmesinde kullanılan bindirme mesafesi 40 mm olarak belirlenmiştir. Bindirme bağlantısı oluşturulan bölgede, 40x40 mm ölçülerindeki alana, üç farklı kaynak takımı ile SKNK işlemi uygulanmıştır. Birinci kaynak takımı, 29 mm omuz çapı, 9–11 mm arası konik pim çapı, 6 mm pim uzunluğu ve 2° takım omuz içi eğimine sahiptir. İkinci takımda, 28 mm omuz çapı, 10 mm çapında M10 formunda pim ve 6 mm pim uzunluğu bulunurken; üçüncü takımda ise 30 mm omuz çapı, 10–12 mm arasında konik pim çapı ve 5,75 mm uzunluğunda pim kullanılmıştır. Her bir takım ile sırasıyla dalma, karıştırma ve geri çekilme aşamaları uygulanarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak takımı, belirlenen dalma hızında numune üzerine otomatik olarak daldırılmış, hedeflenen derinliğe ulaşıldığında belirli bir süre karıştırma işlemi yapılmış ve ardından takım, aynı hızda ve dönmeye devam eder şekilde geri çekilerek numuneden uzaklaştırılmıştır. İşleme başlamadan önce, takımın çalışma sıcaklığına ulaşmasını sağlamak amacıyla ön ısıtma işlemi yapılmıştır. Bu işlemde takım, ön ısıtma numunesine daldırılmış ve 75 saniye bekletilmiştir. Ardından kaynak takımı, CNC freze tezgâhı üzerinde diğer deney numunelerine sırasıyla otomatik olarak SKNK işlemini gerçekleştirmiştir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra parçalar hemen sökülmemiş, soğuma süreci için bir süre tezgâh üzerinde bekletilmiştir. Kaynak aparatının CNC tezgâhında imalatı sırasında bir görüntü Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Kaynak aparatının CNC tezgahında imalatı.

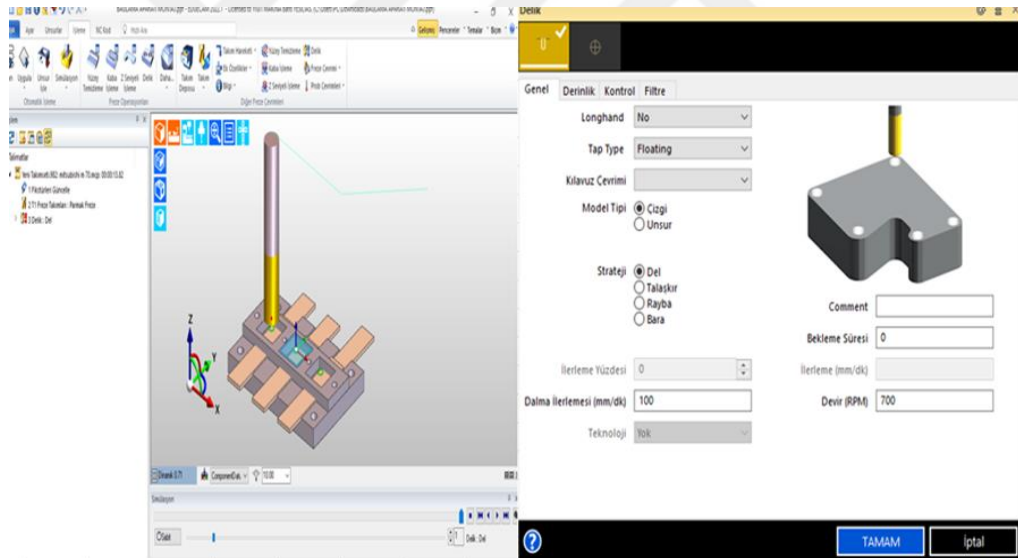
SKNK uygulaması sırasında bir görüntü Şekil 3.10’da görülmektedir. SKNK yöntemi ile oluşturulan kaynak bağlantıları bindirme şeklindedir.



Şekil 3.10. SKNK’nın uygulaması sırasında bir görüntü.

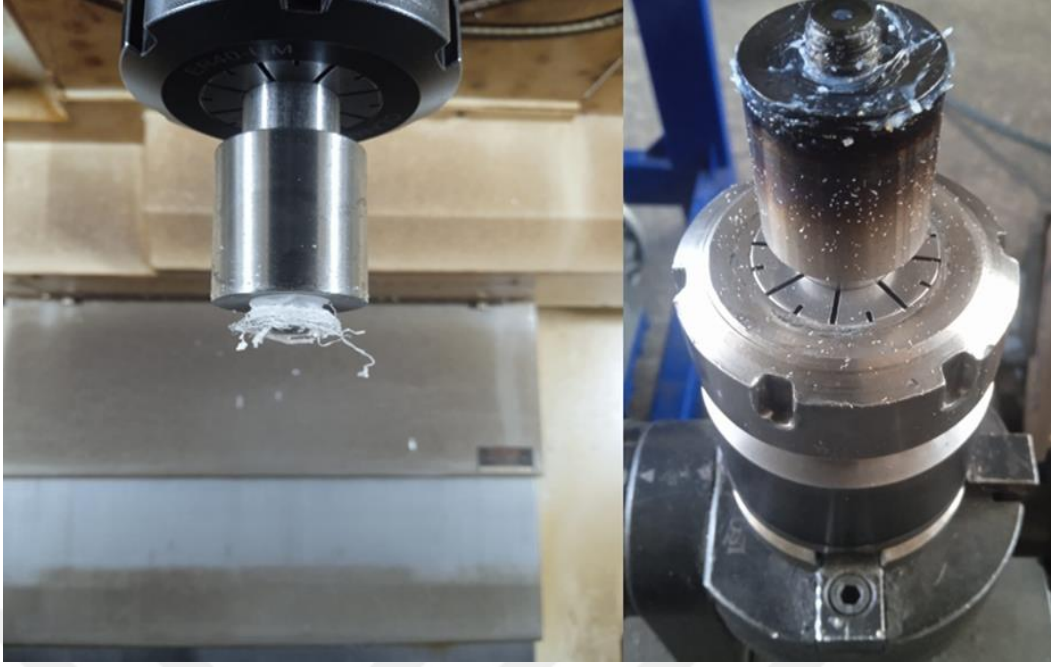
Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yönteminde kaynak dayanımını doğrudan etkileyen beş temel parametre bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; (1) kaynak takımının geometrisi, (2) takımın dönüş hızı (devir sayısı), (3) dalma hızı, (4) dalma derinliği ve (5) karıştırma süresidir. Bu çalışmada, söz konusu parametrelerden özellikle kaynak mukavemetine en fazla etki edenlerin değerlendirilmesi amacıyla üç farklı kaynak takımı

geometrisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, belirlenen parametre kombinasyonları üç eksenli CNC dik işleme tezgâhında, ISO G ve M kod sistemine göre hazırlanan program aracılığıyla otomatik olarak uygulanmıştır. SKNK süreci yüksek tekrarlanabilirlik ve dar toleranslar içinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan G ve M kodları, EdgeCam adlı bilgisayar destekli imalat (CAM) yazılımı aracılığıyla hazırlanmıştır. Şekil 3.11’de yapılan CAM yazılımı işlemi gösterilmektedir. Farklı parametre setleriyle SKNK yöntemiyle üretilen numuneler, daha sonra çekme testine tabi tutulmuş ve her bir numunenin kaynak dayanımı deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, en yüksek çekme dayanımı gösteren numunelere ait parametreler tespit edilerek, optimum kaynak koşulları belirlenmiştir. Ayrıca, kopma bölgeleri optik mikroskop ile detaylı şekilde incelenmiş ve kaynak mukavemetine etki eden mikro yapısal faktörler de analiz edilmiştir. Böylece, SKNK yönteminde hem mekanik hem de yapısal açıdan en uygun kaynak parametreleri ortaya konulmuştur.

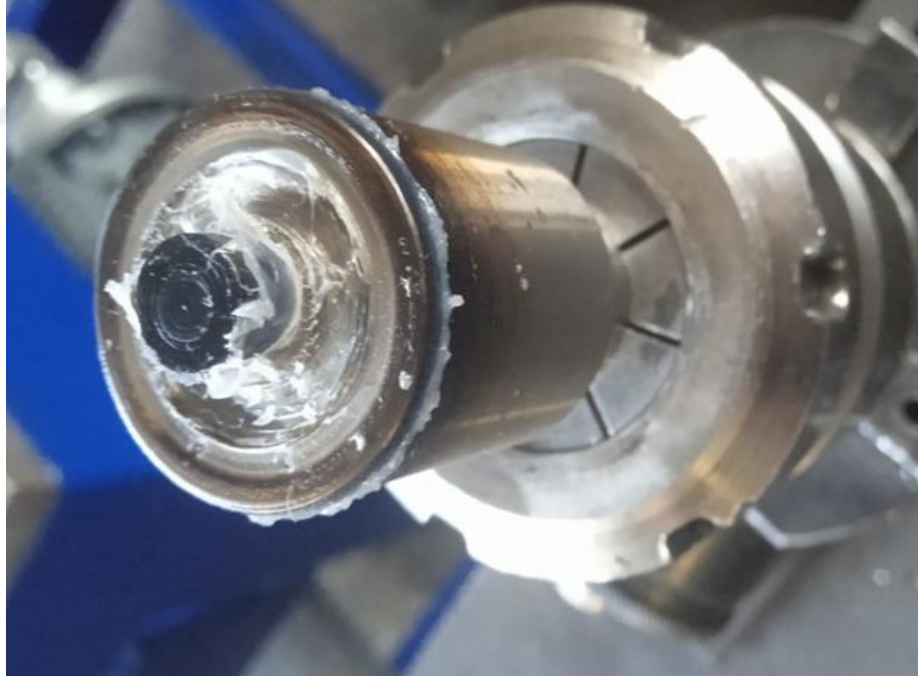


Şekil 3.11. G ve M kodlarının oluşturulması için yararlanılan EdgeCam programından bir görüntü.

Her bir numune için kaynak işleminden sonra kaynak takımı ucuna ve çevresine plastik malzeme yapışmışsa yapışan malzeme kaynak işleminden hemen sonra çıkarılmıştır. İşlem esnasında takıma zarar verilmemesine özen gösterilmiş ve sonraki kaynak işlemi için kaynak takımı hazırlanmıştır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te takım ucuna yapışan plastik malzemenin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.12. Kaynak işleminden sonra takım ucuna yapışan plastik malzeme.



Şekil 3.13. Kaynak işleminden sonra takım ucuna yapışan plastik malzeme.

3.4. KAYNAK MUKAVEMETİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Deneyssel çalışmanın bu bölümünde, farklı takım tasarımı, farklı bekleme süresi, farklı devir sayısı ve farklı dalma derinliği parametreleri incelenmiştir.

3.4.1. Farklı Takım, Bekleme Süresi, Devir Sayısı Parametrelerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, en yüksek çekme dayanımını sağlamak için, Çizelge 3.3'te verilen parametre değerleri arasından kaynak dayanımına en çok etki eden optimum parametreler belirlenmiştir. Birinci kaynak takımı ile yapılan deneyssel çalışmada, belirlenen bir dalma hızı için, farklı bekleme süresi, farklı devir sayısı ve bir dalma derinliği parametrelerinin, kaynak bağlantısının dayanımına etkileri araştırılmıştır. Yapılan ön çalışmalar göz önünde bulundurularak, seçilen 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d olmak üzere üç farklı takım devri için 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 sn aralığında değişen bekleme sürelerinde, 6 mm dalma derinliğinde, 100 mm/dak dalma hızında, kaynak noktaları oluşturulmuştur. Ön ısıtma süresi, 3 farklı takım devri için 75 sn seçilmiş olup, diğer tüm parametreler ön ısıtma numunesi için de aynıdır. İkinci kaynak takımı ile yapılan deneyssel çalışmada ise seçilen 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d olmak üzere üç farklı takım devri için 50, 100, 125, 150, 175, ve 225 sn aralığında değişen bekleme sürelerinde, 6 mm dalma derinliğinde, 100 mm/dak dalma hızında, kaynak noktaları oluşturulmuştur. Üçüncü kaynak takımı ile yapılan deneyssel çalışmada yine 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d olmak üzere üç farklı takım devri için 50, 100, 125, 150, 175, ve 225 sn aralığında değişen bekleme sürelerinde, 6 mm dalma derinliğinde, 100 mm/dak dalma hızında, kaynak noktaları oluşturulmuştur. Deneyssel çalışmada bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler birinci, ikinci ve üçüncü takım için Çizelge 3.3'te verilmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak SKNK işlemi CNC freze tezgahında yapılmıştır. Bu aşamada incelenen kaynak parametreleri, farklı bekleme süreleri ve devir sayılarından oluşmaktadır. Kopma şekilleri analiz edilerek, çekme kuvvetini en yüksek seviyeye çıkaran optimum bekleme süresi ve devir sayısı değerleri belirlenmiştir. Deneyssel çalışmamızda kullanacağımız üç farklı kaynak takımı belirlenmiştir. Her bir kaynak takımı için 18 adet toplam 54 adet kaynak numuneleri oluşturulmuştur.

Çizelge 3.3. Birinci takım, ikinci takım ve üçüncü takım ile yapılan deneysel çalışmada bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler.

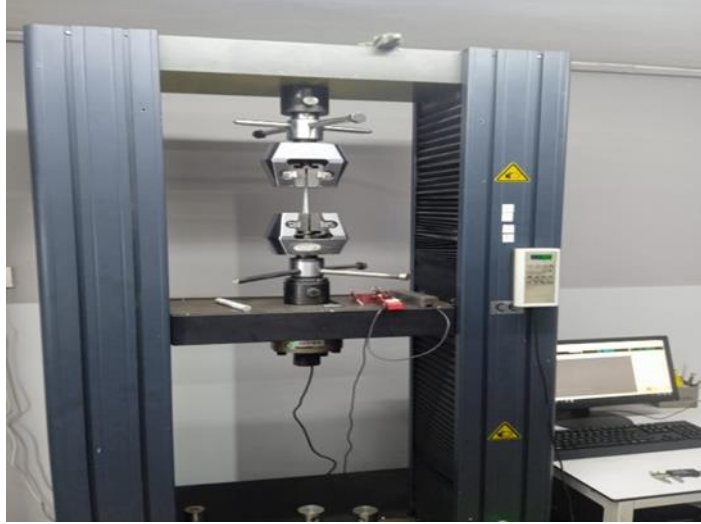
BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)
50	700	6	100
100	700	6	100
125	700	6	100
150	700	6	100
175	700	6	100
225	700	6	100
50	1400	6	100
100	1400	6	100
125	1400	6	100
150	1400	6	100
175	1400	6	100
225	1400	6	100
50	2100	6	100
100	2100	6	100
125	2100	6	100
150	2100	6	100
175	2100	6	100
225	2100	6	100

3.5. KAYNAK MUKAVEMETİNİ BELİRLEMEK AMACIYLA UYGULANAN TEST YÖNTEMİ

Çalışmanın bu bölümünde, farklı takım geometrileri, çeşitli bekleme süreleri ve değişen devir sayıları kullanılarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) ile kaynaklı bağlantılar gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre kombinasyonu için oluşturulan bağlantılar, standartlara uygun mekanik testler ve yapısal kontrollerden geçirilmiş; elde edilen veriler detaylı biçimde analiz edilerek kaynak kalitesine olan etkileri değerlendirilmiştir.

3.5.1. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) Numunelerine Uygulanan Çekme Deneyi

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemiyle birleştirilen numunelerin kaynak dayanımları, doğrudan mekanik performansla ilişkilendirilebilmesi için çekme testine tabi tutulmuştur. Deneyler, Royal Test Laboratuvar ve Mühendislik Hizmetleri bünyesinde yer alan, yüksek hassasiyete sahip bilgisayar kontrollü elektromekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan testler, TS EN 12814-2 standardı esas alınarak yapılmış ve her bir numunenin kopma anındaki maksimum çekme kuvveti ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen veriler analiz edilerek, uygulanan farklı kaynak parametrelerinin (takım geometrisi, devir sayısı, bekleme süresi gibi) kaynak mukavemetine olan etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Böylece hangi parametre kombinasyonlarının daha güçlü bir bağlantı sağladığı net bir şekilde belirlenmiştir. İlgili test düzeneği ve cihaz ise Şekil 3.14’de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.14. Bilgisayar kontrollü elektromekanik çekme testi cihazı.

3.5.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) Numunelerine Uygulanan Makroskobik ve Mikroskobik İncelemeler

SKNK işlemi sonrasında oluşan kaynak bölgeleri ile çekme testi uygulanan numunelerde meydana gelen kopma alanları hem yüzey görünümü açısından hem de yapısal bütünlük açısından detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler makroskobik ve mikroskobik düzeyde gerçekleştirilmiş; gözle değerlendirme, makro fotoğraf çekimleri ve optik mikroskop analizleri ile kaynak ve kopma bölgelerindeki fiziksel değişimler detaylı şekilde analiz edilmiştir. Makroskobik ve mikroskobik incelemeler, SKNK işlemiyle elde edilen kaynaklı bağlantıların kalitesini değerlendirmek ve optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu incelemeler sayesinde, kaynak parametrelerinin malzeme üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılmakta ve daha sağlam ve güvenilir birleştirmeler elde edilmektedir.

SKNK işlemi uygulanan ve başka herhangi bir deneysel işleme tabi tutulmayan numunelerde, kaynak kalitesinin ön değerlendirmesi amacıyla görsel kontroller gerçekleştirilmiştir. Bu kontroller kapsamında, kaynak bölgesinde çapak, çatlak, gözenek veya herhangi bir yüzey kusurunun olup olmadığı dikkatlice incelenmiştir. Ayrıca, kaynak bölgelerinin fiziksel bütünlüğü ve geometrik formu değerlendirilmiş, kaynak noktalarının netliğini ve işlem sonrası yüzey yapısını gözlemleyebilmek amacıyla her bir numunenin kaynak bölgesi detaylı şekilde fotoğraflanmıştır. Elde edilen görseller üzerinden yapılan incelemelerle, kaynak işleminin yüzey kalitesi ve dışsal yapısal etkileri sistematik bir şekilde analiz edilmiştir.

Çekme deneyi sonrasında numunelerde oluşan kopma bölgeleri hem doğrudan numuneler üzerinden hem de bu bölgelere ait çekilen fotoğraflar yardımıyla detaylı biçimde analiz edilmiştir. Özellikle belirlenen örnekler üzerinde, oluşan kopma yüzeylerinin karakteristik yapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiş ve kaynak bölgesinin iç yapısı değerlendirilmiştir. Bu analizler sayesinde, SKNK işlemi sonrasında kaynak kalitesine etki eden faktörlerin mikroyapısal düzeydeki etkileri ortaya konulmuştur. Farklı takım geometrileri kullanılarak gerçekleştirilen işlemler sonucunda elde edilen numunelere ait uygulama parametreleri, birinci, ikinci ve üçüncü SKNK takımları için olmak üzere sırasıyla Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve 3.6’da detaylı şekilde sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Birinci SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)
175	700	6	100
50	1400	6	100
175	2100	6	100
150	1400	6	100

Çizelge 3.5. İkinci SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.

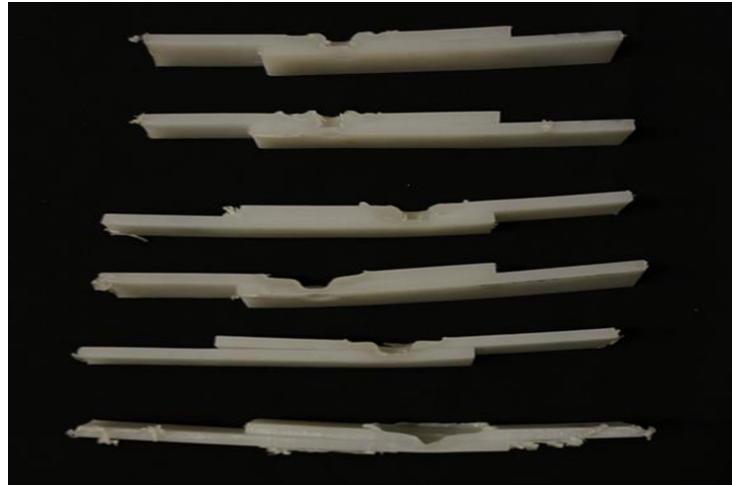
BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)
125	700	6	100
50	1400	6	100
175	2100	6	100

Çizelge 3.6. Üçüncü SKNK takımı için optik mikroskop ile incelenen numunelerin parametreleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)
100	1400	6	100
175	1400	6	100
175	2100	6	100

3.5.3. Kaynak Bölgelerinin Tespit Edilmesi İçin Enine Kesit İncelemesi

Çekme deneyi sonrası elde edilen kopma kesitlerinin optik mikroskop ile incelenmesine ek olarak, kaynak bölgesinin daha belirgin şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla, çekme testine tabi tutulmamış numuneler üzerinde enine kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için önceden belirlenen kaynak parametrelerine göre farklı kaynaklı numuneler imal edilmiştir. Söz konusu numunelerin her biri, CNC işleme merkezinde tam orta noktasına kadar dikkatli bir şekilde işlenmiş ve elde edilen yüzeylere uygun parlatma işlemleri uygulanarak optik mikroskop ile yapılacak incelemelere hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan bu kesitler sayesinde, kaynak bölgesinde kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapı arasındaki sınırların net bir şekilde tespit edilmesi sağlanmış ve bu yapıların ilgili kaynak parametrelerine göre nasıl konumlandığı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu yöntemle, SKNK yöntemiyle oluşturulan kaynaklı bağlantıların iç yapıları daha sağlıklı ve detaylı biçimde analiz edilmiştir. Kesiti elde edilen numuneler Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.15. Kesit görünüşleri için oluşturulan numuneler.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. BELİRLENEN PARAMETRELER ALTINDA ÜRETİLEN SKNK NUMUNELERİNE UYGULANAN ÇEKME DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1.1. Birinci Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

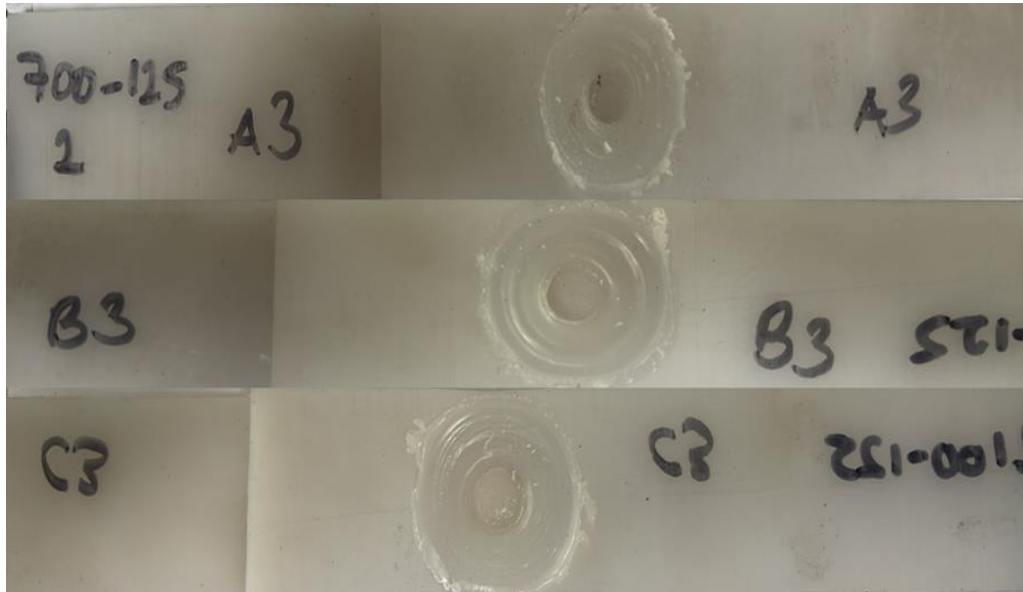
Bu bölümde, birinci kaynak takımı kullanılarak gerçekleştirilen Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) uygulamalarında, bekleme süresi ve devir sayısı gibi işlem parametrelerinin elde edilen çekme kuvveti üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde analiz edilmiştir. Her bir SKNK numunesi için, parametrelerin sistematik takibini kolaylaştırmak amacıyla özel numune kodları oluşturulmuştur. Bu kodlarla birlikte, ilgili bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerine ait veriler ve elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 4.1’de detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, birinci kaynak takımıyla üretilmiş numunelere ait kaynak sonrası görseller Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de yer almaktadır. Çekme testinden önce yapılan görsel kontrollerde, kaynak bölgelerinin düzgün bir şekilde oluştuğu, üst ve alt parçaların kaynak bağlantısına etkin biçimde katıldığı ve birleştirmenin başarılı şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan kaynak takımının, belirlenen işlem parametrelerine ve malzeme türüne uygun biçimde tasarlanmış ve imal edilmiş olduğunu göstermektedir. SKNK işlemi süresince, plastik malzemenin sıcaklık ve mekanik etki ile yumuşayarak takım omuzu çevresinde hareket ettiği ve bu süreçte bir miktar malzemenin kaynak bölgesinden dışarı taşarak kaynak havuzu etrafında birikme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan gözlemlere göre, bazı numunelerde bu taşma minimal seviyede kalmışken, diğerlerinde kaynak çevresinde belirgin bir plastik birikimi oluşmuştur. Bu fazlalıkların, birleştirme bölgesinde mekanik sürekliliği bozarak çekme dayanımını olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. Takım 1 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)	NUMUNE KODU	ÇEKME KUVVETİ (N)
50	700	6	100	A1	257N
100	700	6	100	A2	561N
125	700	6	100	A3	1103N
150	700	6	100	A4	2384N
175	700	6	100	A5	2354N
225	700	6	100	A6	2189N
50	1400	6	100	B1	1250N
100	1400	6	100	B2	2303N
125	1400	6	100	B3	2392N
150	1400	6	100	B4	2412N
175	1400	6	100	B5	2377N
225	1400	6	100	B6	2274N
50	2100	6	100	C1	428N
100	2100	6	100	C2	2253N
125	2100	6	100	C3	2332N
150	2100	6	100	C4	2327N
175	2100	6	100	C5	2135N
225	2100	6	100	C6	1854N

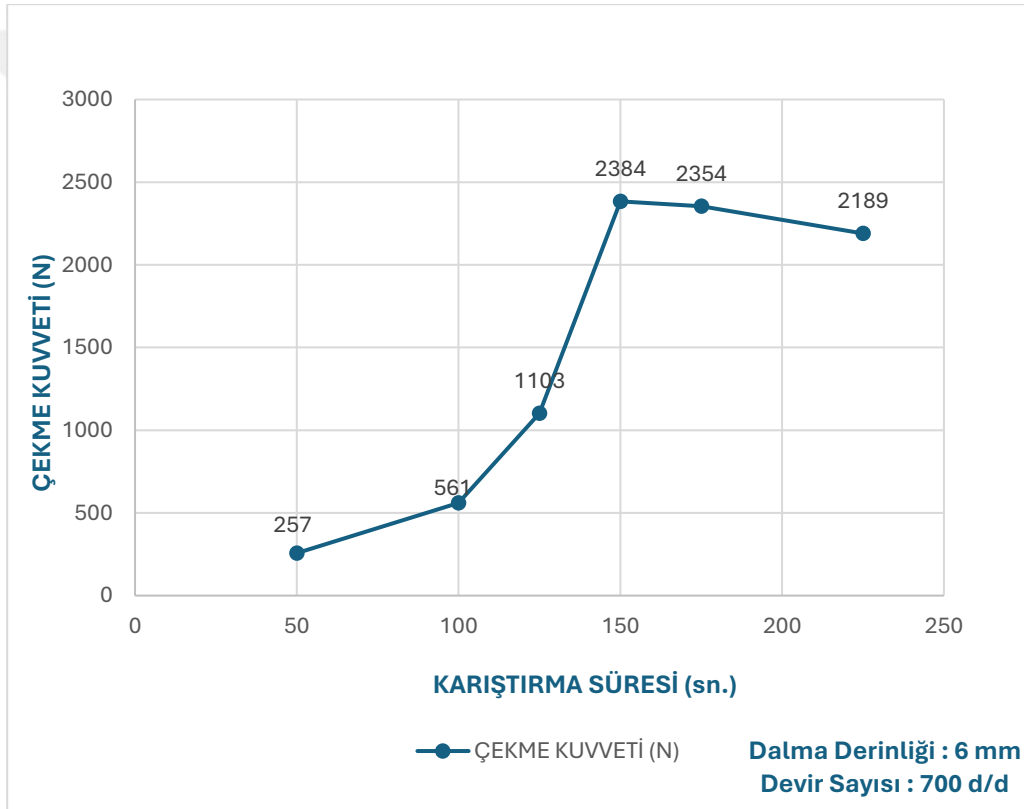


Şekil 4.1. Birinci kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri.

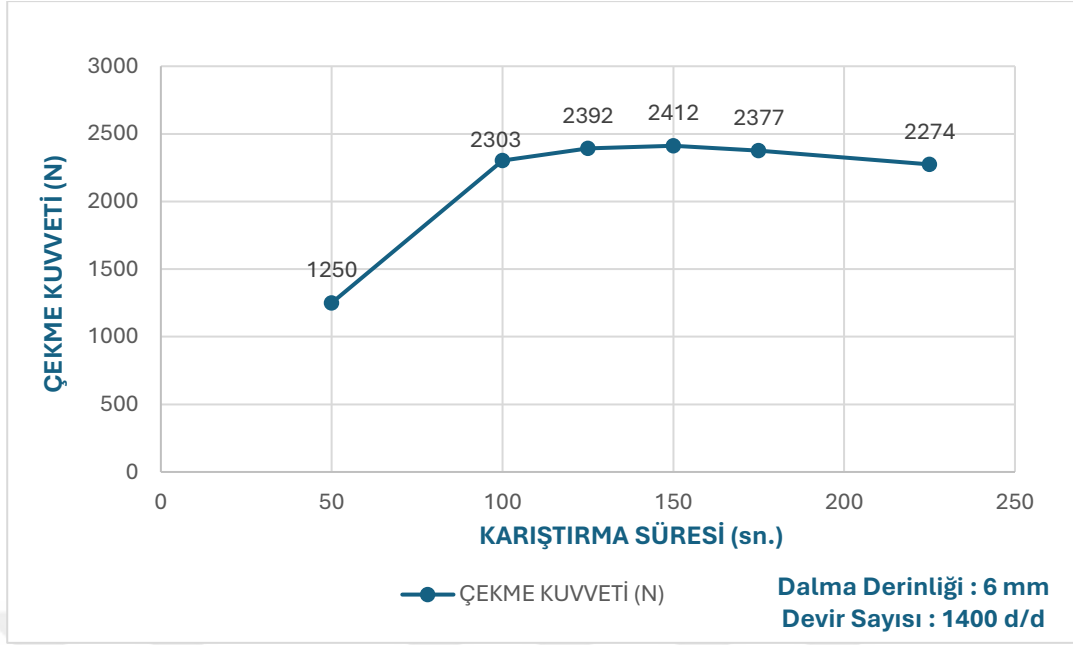


Şekil 4.2. Birinci kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.

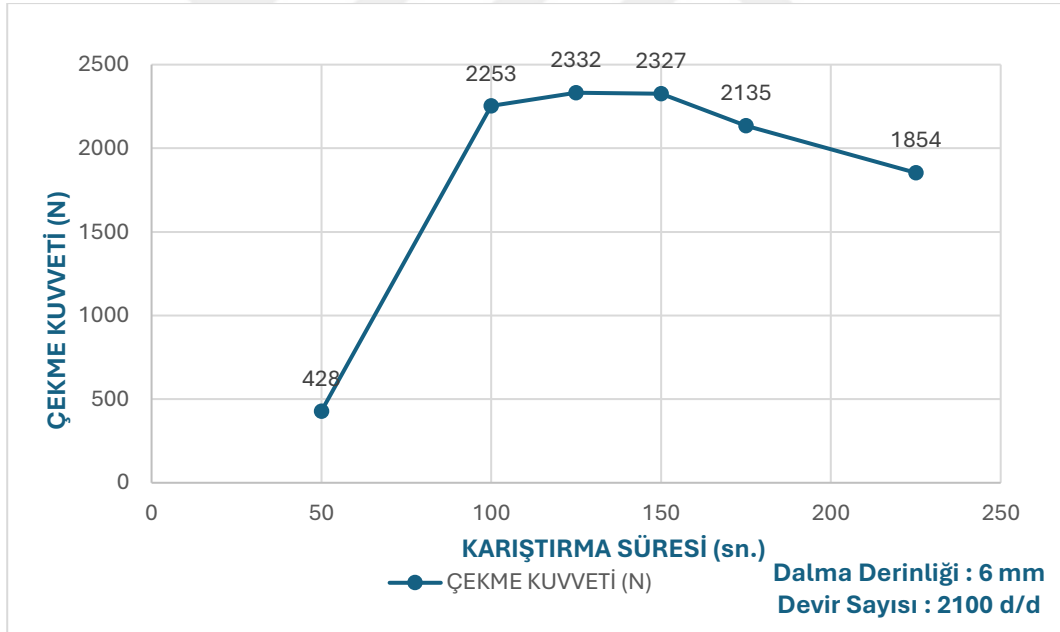
Bu deneysel çalışmada yapılan ön çalışmalardan faydalanılarak, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında karıştırma süresinin (50, 100, 125, 150, 175, 225 saniye) değişiminin çekme kuvvetine olan etkisi incelenmiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5). Karıştırma süresi parametresi arttıkça, çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar düzenli olarak arttığı ve maksimum bir çekme kuvveti değeri yakalandıktan sonra ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Karıştırma süresi parametresini belirli bir değerden sonra daha fazla artırmanın çekme kuvveti değerini daha fazla artırmadığı belirlenmiştir. Böylece, bu çalışma için çekme kuvvetini maksimum yapan optimum karıştırma süresi elde edilmiştir.



Şekil 4.3. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.



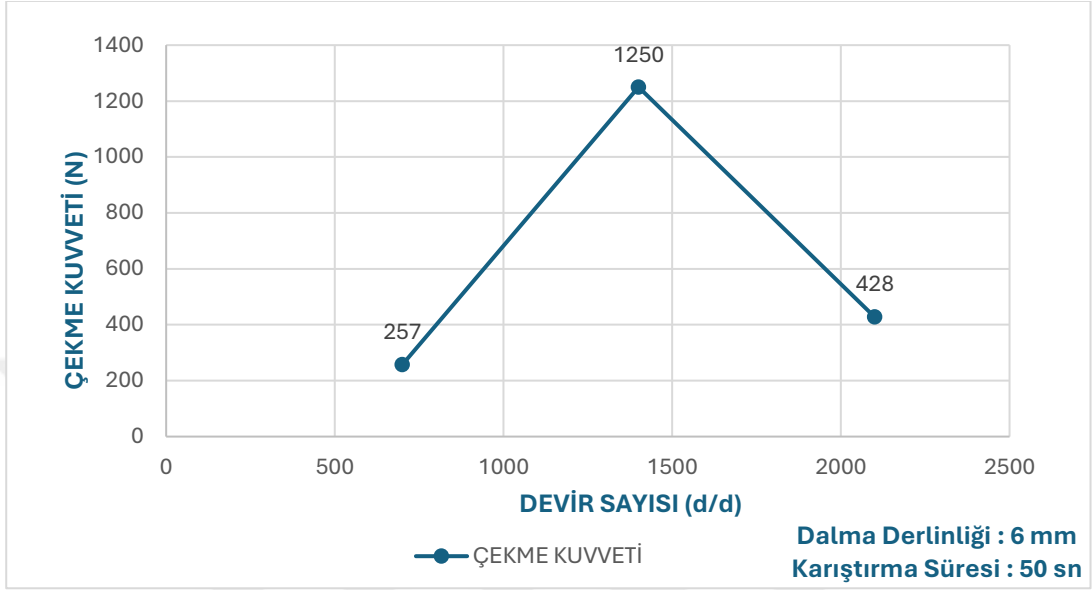
Şekil 4.4. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.



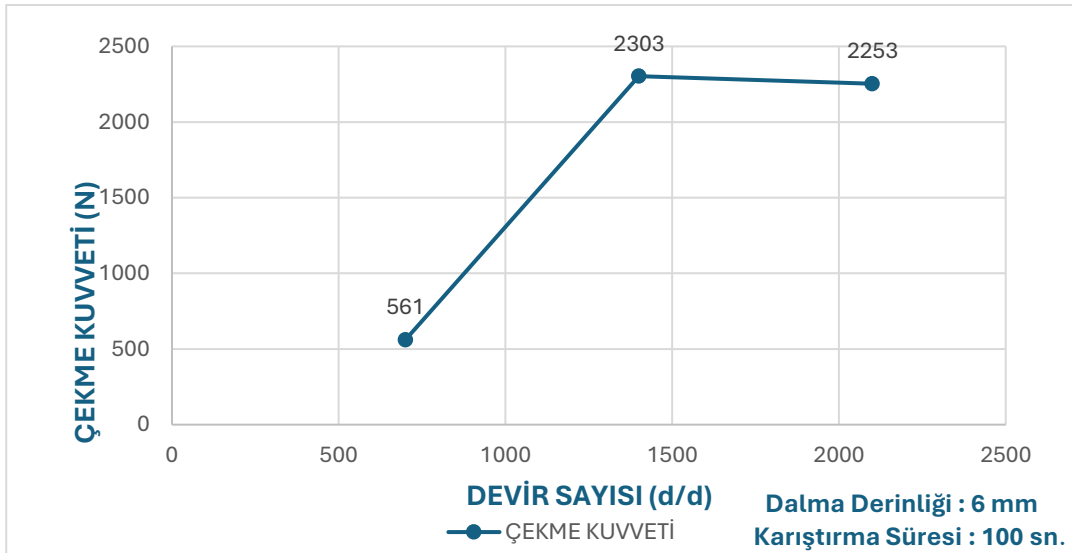
Şekil 4.5. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye sürelerindeki değişimlerde, 700, 1400 ve 2100 d/d için devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi incelendiğinde; çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar düzenli arttığı, sonrasında ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Böylece çekme kuvvetini

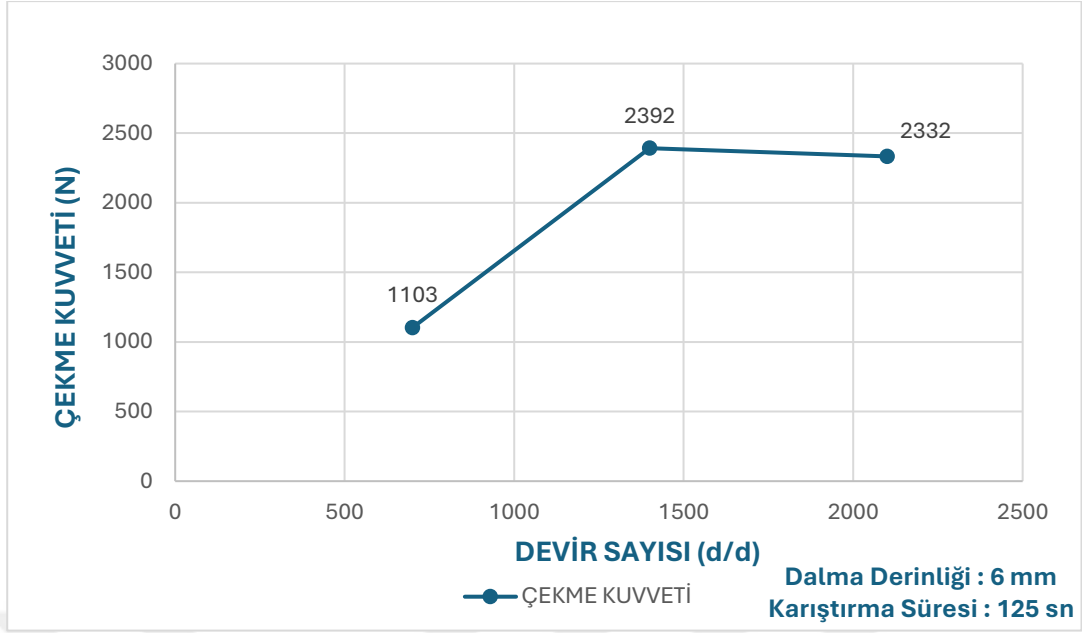
maksimum yapan optimum devir sayısı değeri 1400 d/d olarak elde edilmiştir. Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de 6 mm dalma derinliği için çekme kuvveti üzerine takım devir sayısının etkisini gösteren grafikler görülmektedir.



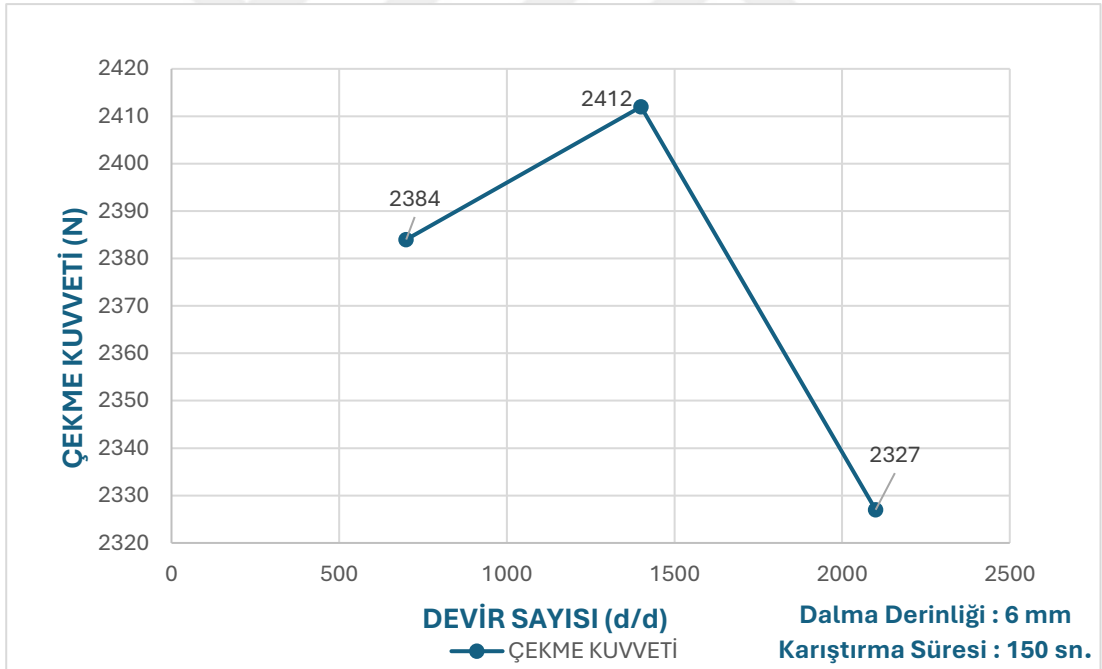
Şekil 4.6. 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



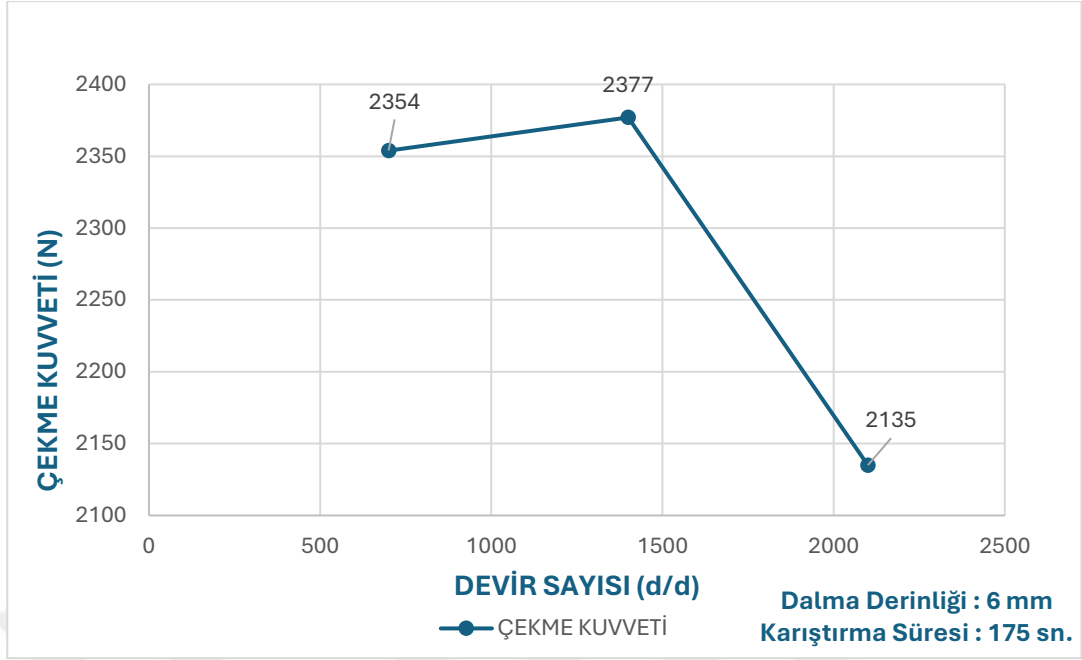
Şekil 4.7. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



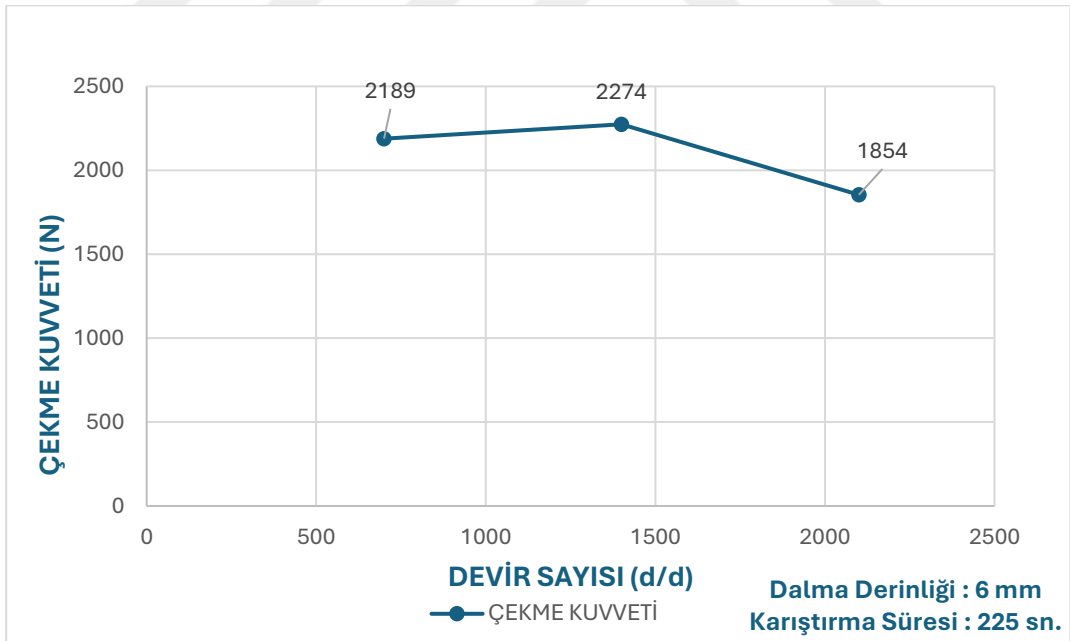
Şekil 4.8. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.9. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.10. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.

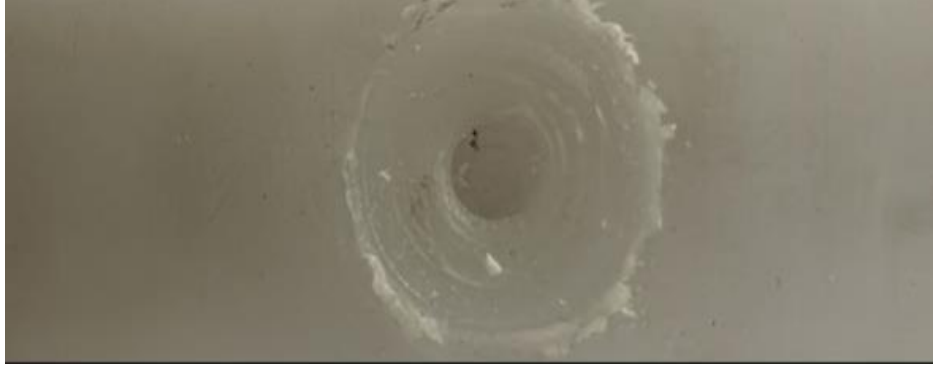


Şekil 4.11. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.

Birinci takım 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetini 2412 N değerle maksimum yapan optimum deney parametreleri, 1400 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi ile B4 numunesidir. 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetinin 257 N değerle minimum olduğu optimum deney parametreleri, 700 d/d devir sayısı ve 50 sn bekleme süresi ile A1 numunesidir.

6 mm dalma derinliğiyle ve farklı devir sayılarında gerçekleştirilen SKNK işlemlerinde, en yüksek çekme kuvveti elde edilen numunelere ait çekme deneyi öncesi görüntüler Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Farklı devir sayılarında uygulanan SKNK işlemleri sonucunda, 700 d/d – 150 sn – 6 mm, 1400 d/d – 150 sn – 6 mm ve 2100 d/d – 125 sn – 6 mm parametrelerine sahip numunelerin kaynak bölgelerinde yapılan makroskobik incelemelerde, karakteristik kaynak izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, plastik malzemenin kaynak işlemi sırasında ısı etkisiyle yumuşayarak kaynak takımı etrafında belirli oranlarda birikme ve sıvanma gösterdiği; bu durumun kullanılan parametrelere bağlı olarak farklılık arz ettiği gözlemlenmiştir.

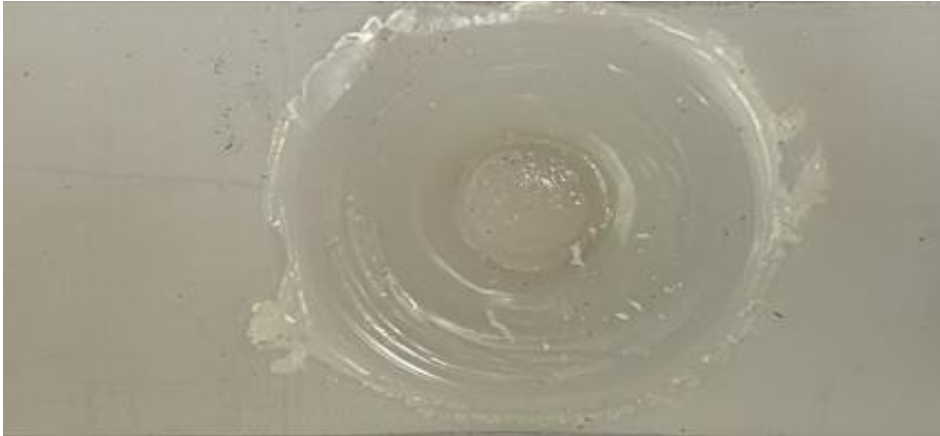
2100 d/d devir sayısı, 125 saniyelik bekleme süresi ve 6 mm dalma derinliği ile gerçekleştirilen SKNK uygulamasında, kaynak bölgesinde plastik malzemenin omuz altından dışa doğru belirgin bir şekilde taşıdığı ve kaynak bölgesi çevresinde malzeme birikimine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu parametrelerde uygulanan işlem sırasında, kaynak havuzunda kalması beklenen ve birleştirmenin dayanımına katkı sağlaması gereken plastik malzemenin daha yüksek oranda dışarı çıkması, kaynak mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. Öte yandan, 700 d/d devir sayısı ile yapılan kaynak uygulamalarında, gerekli sıcaklık seviyelerine ulaşılmasında yetersizlik olduğu ve bu nedenle plastik malzemenin yeterince yumuşamadığı anlaşılmıştır. Yapılan tüm gözlemler, 1400 d/d devir sayısı ile hazırlanan numunelerin çekme dayanımının daha yüksek olduğunu ortaya koyan önemli veriler sağlamaktadır.



Şekil 4.12. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen A4 kaynak numunesi.

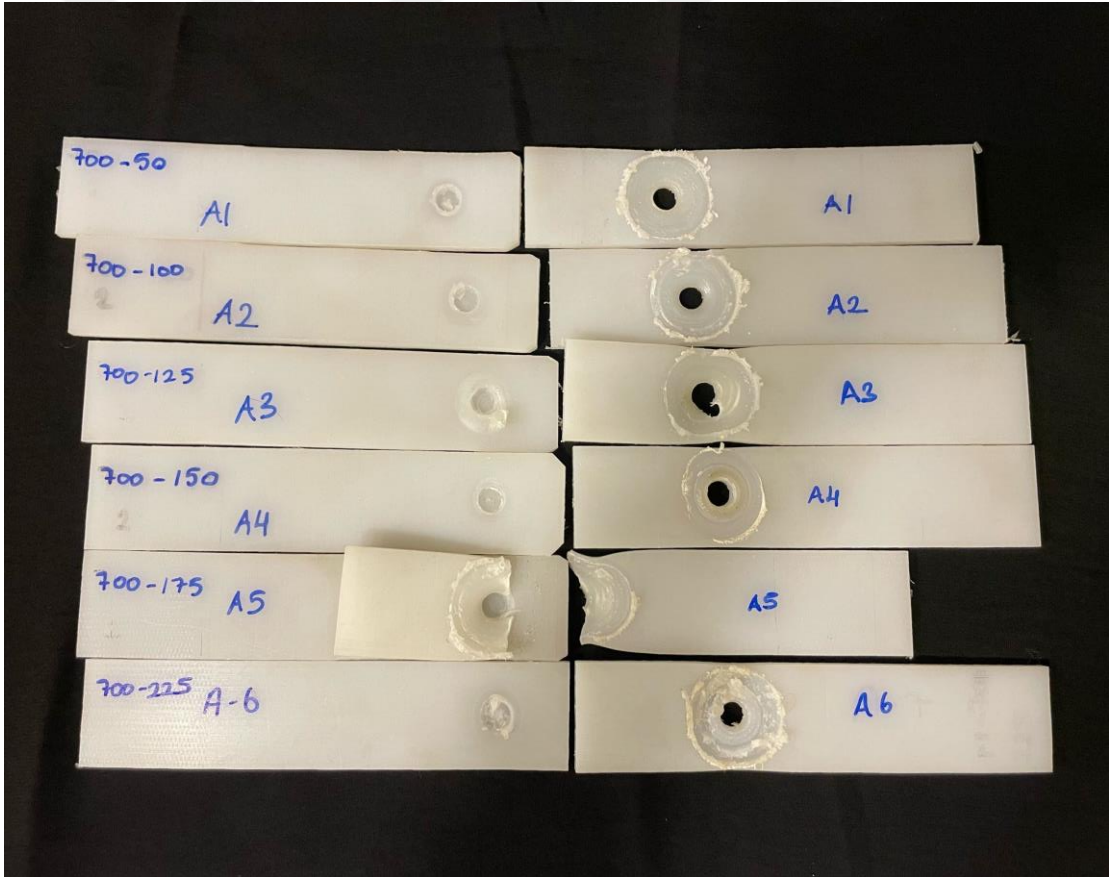


Şekil 4.13. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen B4 kaynak numunesi.

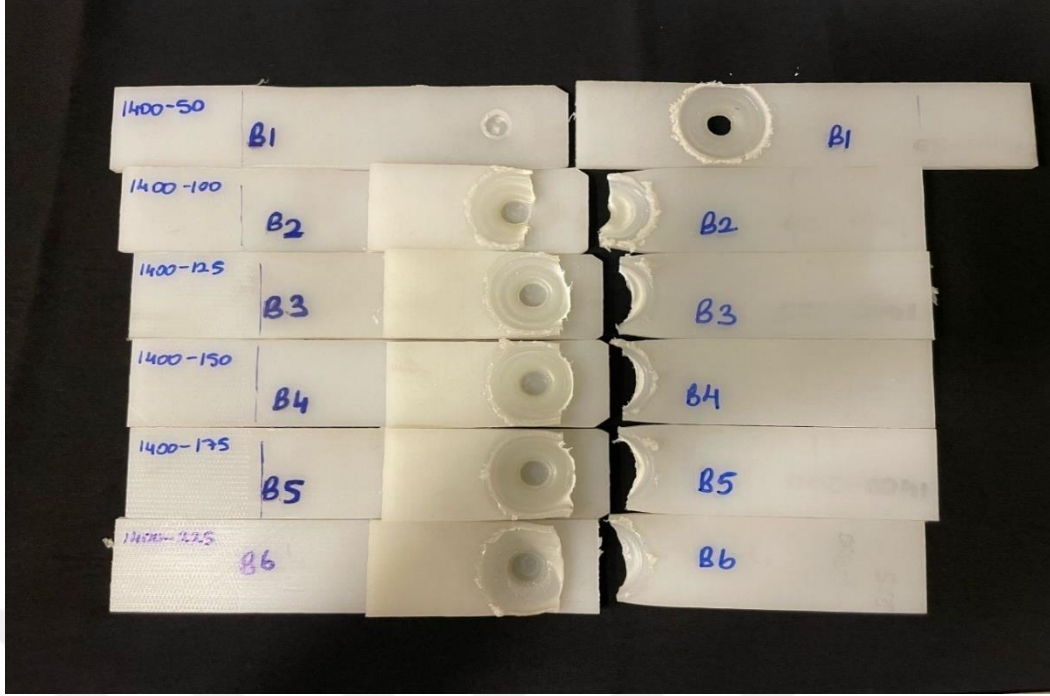


Şekil 4.14. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen C3 kaynak numunesi.

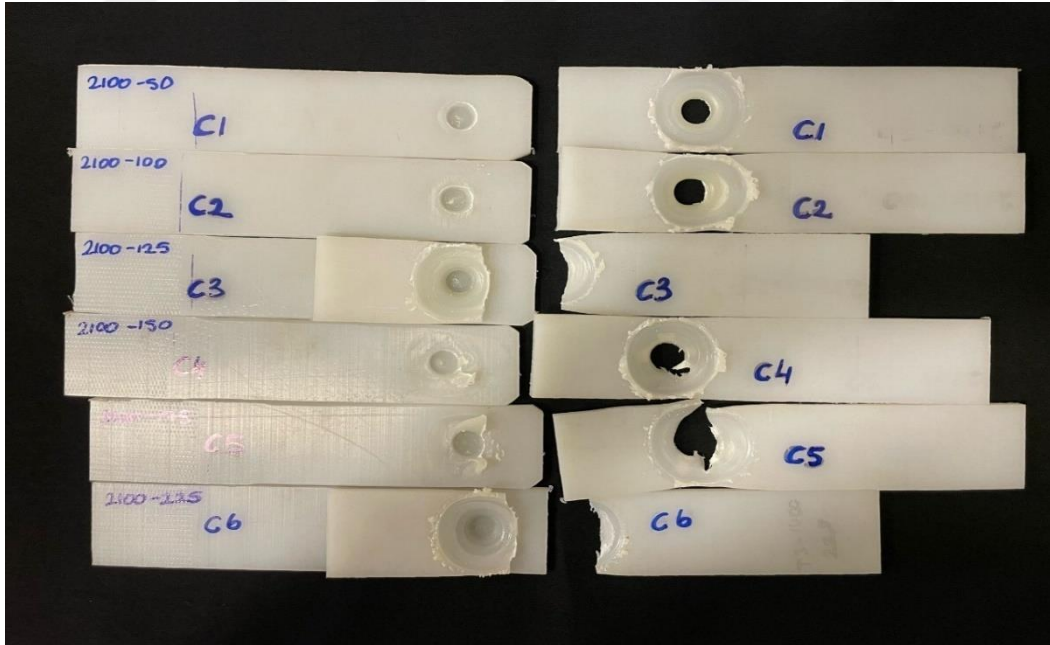
Sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı koşullarında gerçekteştirilen tüm kaynaklı bağlantılara ait çekme testi sonrası elde edilen görseller şekil 4.15, şekil 4.16 ve şekil 4.17’de sunulmaktadır. Bu görseller incelendiğinde, kopma biçimlerinin üç ana grupta toplandığı tespit edilmiştir: pim esaslı, omuz esaslı ve yüzey (ara yüzey) esaslı kopmalar. Çekme deneyi sonuçlarına göre, düşük bekleme süresi, yetersiz dalma derinliği ve düşük takım devir sayısı gibi yetersiz kaynak parametrelerinde, pim bölgesinde oluşan sınırlı kaynak alanı nedeniyle pim esaslı kopmalar meydana gelmiştir. Parametrelerin artmasıyla birlikte takım omzunun kaynak bölgesi oluşumuna etkin şekilde katılması sonucu, kaynak mukavemetinin yükseldiği ve kopmanın omuz bölgesinden gerçekteştiği omuz esaslı kopma tipi gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin omuz çapına yakın, kaynaşmamış bölgeyi de kapsayacak şekilde enine bir çizgi boyunca oluşan ara yüzey esaslı kopmalar da belirlenmiştir.



şekil 4.15. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.

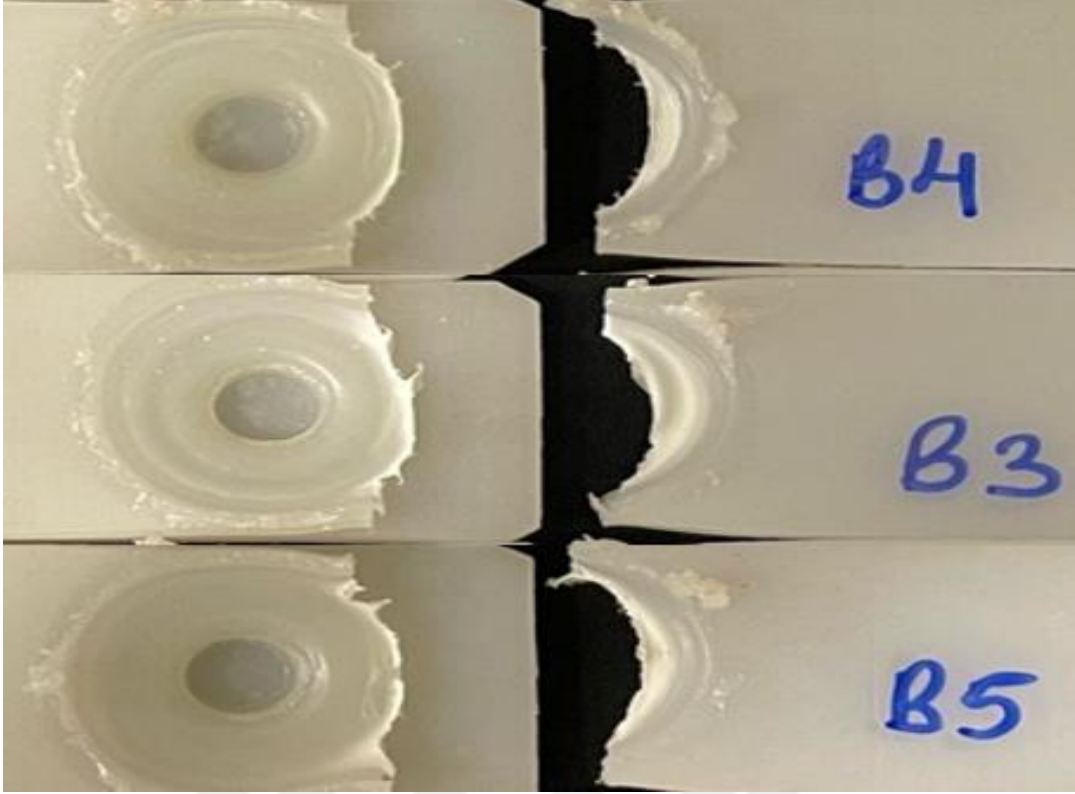


Şekil 4.16. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.

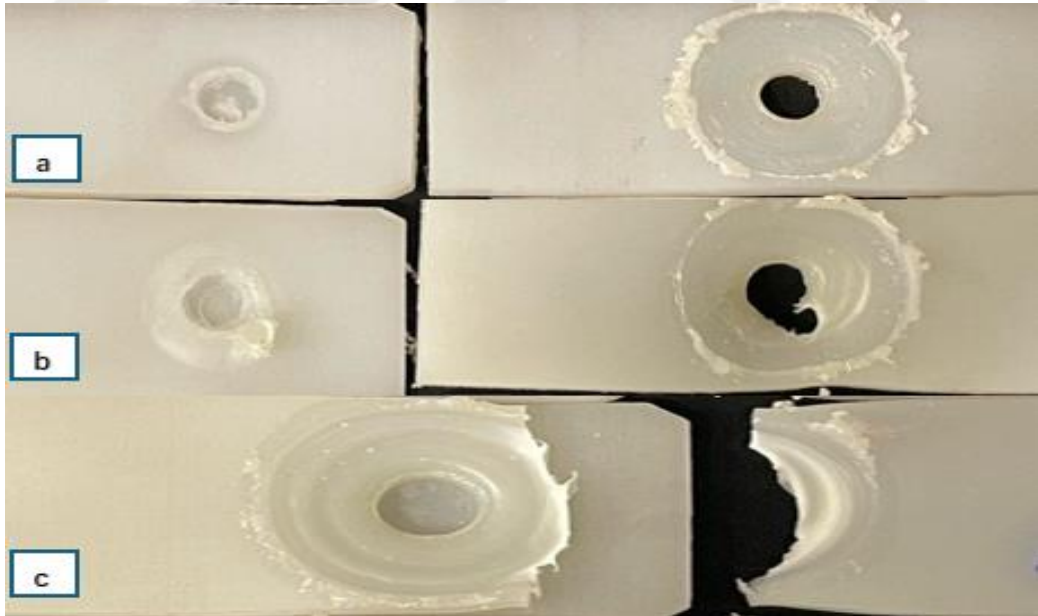


Şekil 4.17. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.

Yapılan deneysel çalışmada, 6 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı ve 700, 1400 ile 2100 d/d devir sayılarında, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye farklı karıştırma sürelerinde yapılan deneylerde, çekme kuvvetini 2412 N değeriyle maksimum yapan optimum devir sayısının 1400 d/d ve karıştırma süresinin 150 saniye olduğu belirlenmiştir. Birinci takım için en yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği sürtünme karıştırma nokta kaynağı numunesi B4 nolu numunedir. Yapılan bu çalışmada, kaynak için malzemede, en uygun yumuşama durumunu sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine 1400 d/d devir sayısında ve 150 sn karıştırma süresinde ulaşıldığı anlaşılmıştır, B4 nolu numunenin kopma bölgeleri incelendiğinde, uzama liflerinden ve kopmanın şeklinden bu durum açıkça görülmektedir. Omuzun altından dışa doğru hafifçe kayan yumuşamış plastik malzeme, kaynak bölgesinin çevresinde az miktarda yükselme yapmaktadır. Kaynak işlemi sırasında, kaynak bölgesinden minimal miktarda malzemenin ayrıldığı tespit edilmiştir. Mukavemet değerlerine katkı sağlaması gereken ve kaynak havuzu içerisinde bulunması gereken malzemenin, dışa kaçışının çok az miktarda olmasının, mukavemet değerini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır, bu çalışmada elde edilen 2412 N'luk maksimum çekme kuvveti değeri bu durumu açıkça desteklemektedir. Özellikle B3, B4 ve B5 nolu numunelerin kopma bölgeleri incelendiğinde, benzer çekme lifleri ve benzer kopma şekillerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu üç numunede, çalışmanın en yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Bu numunelerdeki, oluşan çekme liflerinden ve kopma şekillerinden, elde edilen çekme kuvvetlerinin B3, B4 ve B5 nolu numunelerde daha yüksek çıkmasını destekleyen önemli veriler ve görüntüler elde edilmiştir. Numuneler incelendiğinde de görüleceği üzere, kopmaya daha fazla direnen B4 nolu numunede ise, maksimum çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, 6 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı, 700, 1400, 2100 d/d devir sayısı ve 175, 225 sn karıştırma sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, oluşturulan kaynaklı numunede, kaynak için en uygun yumuşama değerlerini sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine ulaşamadığı anlaşılmıştır. Bu durum çekme kuvveti değerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Çekme kuvvetinin genellikle bu karıştırma sürelerinde optimum sıcaklık değerinden itibaren azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.18'de birinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri gösterilmiştir. Şekil 4.19'da çekme deneyi sonucu oluşan kopma türleri sunulmuştur.



Şekil 4.18. Birinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.



Şekil 4.19. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).

4.1.2. İkinci Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

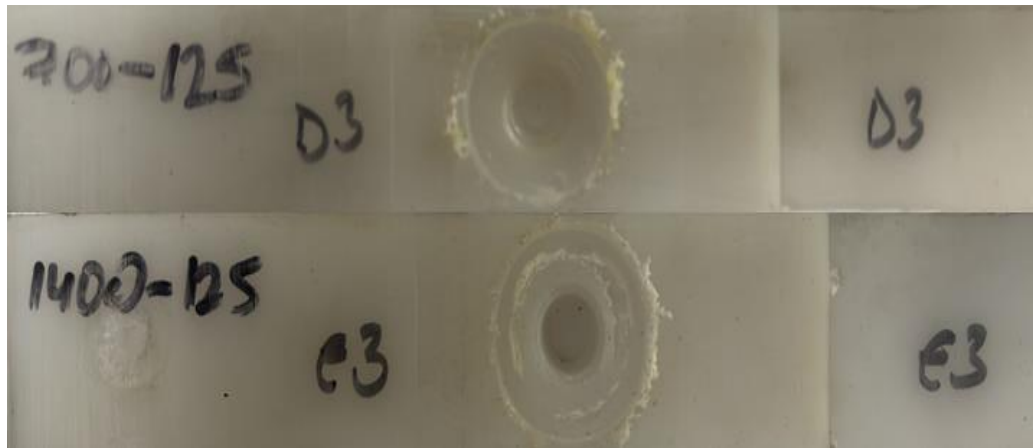
Bu bölümde, birinci kaynak takımında olduğu gibi, ikinci kaynak takımı kullanılarak Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bekleme süresi ve devir sayısı gibi işlem parametrelerinin elde edilen çekme kuvveti üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde analiz edilmiştir. Birinci kaynak takımında olduğu gibi, ikinci kaynak takımında da her bir SKNK numunesi için, parametrelerin sistematik takibini kolaylaştırmak amacıyla özel numune kodları oluşturulmuştur. Bu kodlarla birlikte, ilgili bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerine ait veriler ve elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 4.2’de detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, ikinci kaynak takımıyla üretilmiş numunelere ait kaynak sonrası görseller Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de yer almaktadır. Çekme testinden önce gerçekleştirilen görsel incelemelerde, kaynak bölgelerinin homojen ve düzgün bir şekilde oluştuğu, üst ve alt parçaların birleştirme sürecine etkili biçimde katıldığı ve kaynak bağlantısının başarılı şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan kaynak takımının seçilen işlem parametreleri ve malzeme özellikleriyle uyumlu şekilde tasarlanıp üretildiğini ortaya koymaktadır. SKNK işlemi esnasında, sıcaklık ve mekanik kuvvetlerin etkisiyle yumuşayan polimer malzemenin, kaynak takımı omuzu etrafında akış gösterdiği ve bu süreçte belirli miktarda malzemenin kaynak bölgesinden dışarı çıkarak kaynak havuzu çevresinde birikme eğilimi sergilediği belirlenmiştir. Yapılan gözlemler, bazı numunelerde bu taşmanın oldukça sınırlı olduğunu, bazı örneklerde ise kaynak çevresinde fark edilir düzeyde plastik malzeme birikimine yol açtığını göstermiştir. Bu fazlalıkların, birleşim bölgesindeki yapısal sürekliliği olumsuz etkileyerek çekme dayanımı üzerinde negatif bir etki yarattığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.2. Takım 2 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)	NUMUNE KODU	ÇEKME KUVVETİ (N)
50	700	6	100	D1	182
100	700	6	100	D2	807
125	700	6	100	D3	2111
150	700	6	100	D4	2114
175	700	6	100	D5	1948
225	700	6	100	D6	1752
50	1400	6	100	E1	1060
100	1400	6	100	E2	2071
125	1400	6	100	E3	2176
150	1400	6	100	E4	2145
175	1400	6	100	E5	2094
225	1400	6	100	E6	1963
50	2100	6	100	F1	608
100	2100	6	100	F2	1298
125	2100	6	100	F3	1997
150	2100	6	100	F4	2073
175	2100	6	100	F5	2049
225	2100	6	100	F6	1300

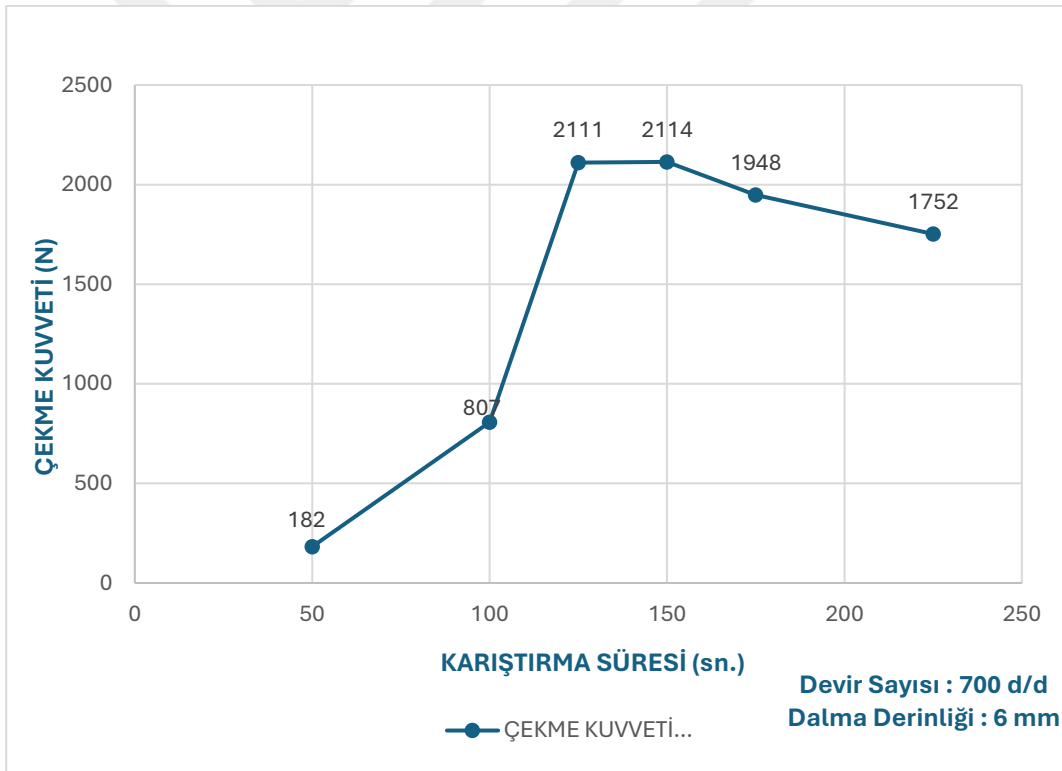


Şekil 4.20. İkinci kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri.

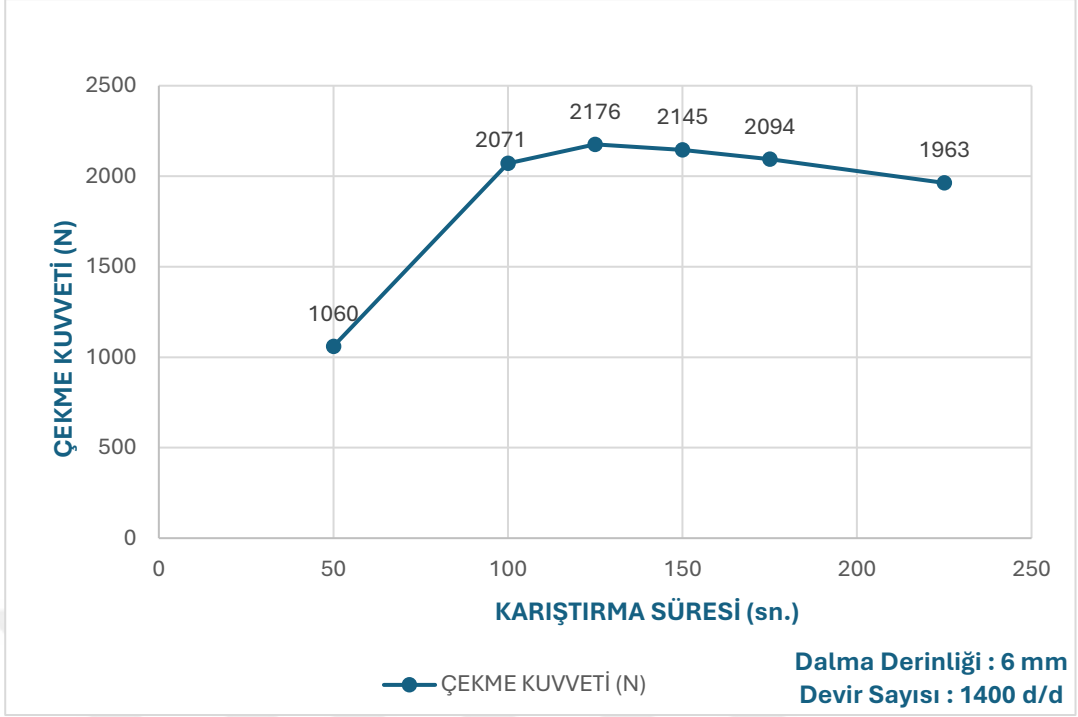


Şekil 4.21. İkinci kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.

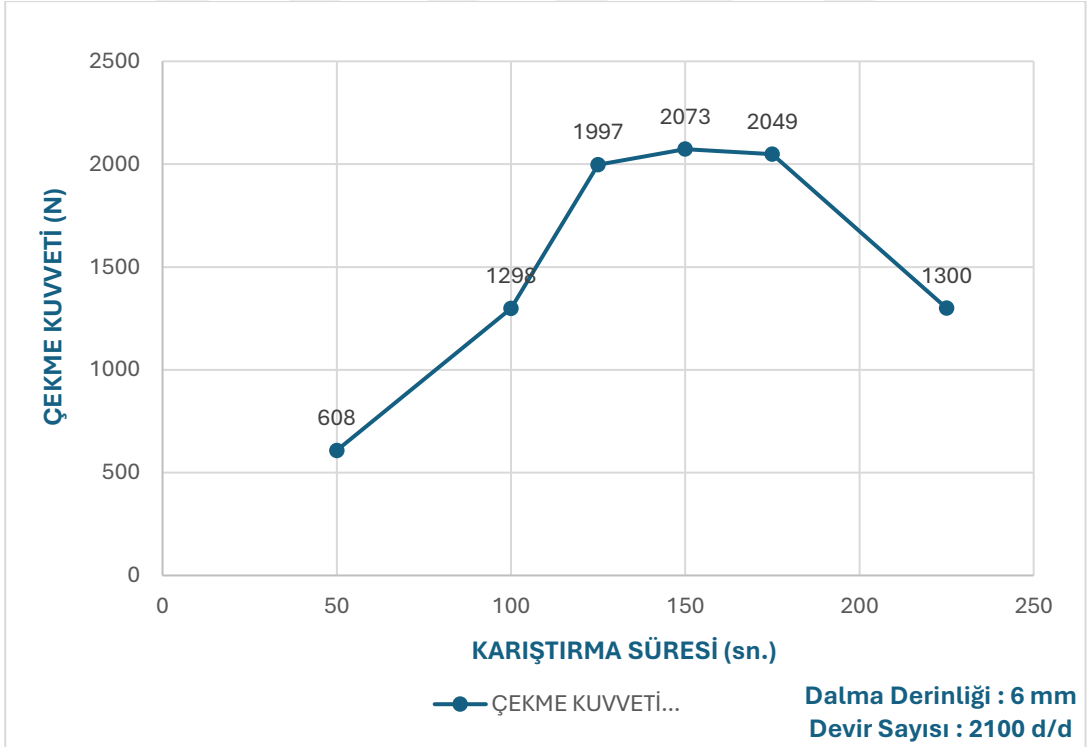
Deneysel çalışmanın ikinci kaynak takımıyla gerçekleştirilen aşamasında, önceden yapılan ön testlerin sonuçları dikkate alınarak, 6 mm sabit dalma derinliği ve 100 mm/dak sabit dalma hızı koşullarında; 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d olmak üzere üç farklı devir sayısında, karıştırma süresi parametresinin (50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye) çekme kuvvetine etkisi araştırılmıştır (Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24). Elde edilen bulgular, karıştırma süresi arttıkça çekme kuvvetinin belirli bir noktaya kadar düzenli bir artış gösterdiğini, ancak maksimum değere ulaşıldıktan sonra düşüş eğilimine geçtiğini ortaya koymuştur. Özellikle 175. saniyeden itibaren çekme kuvvetinde azalma başladığı tespit edilmiştir. Bu durum, karıştırma süresi parametresinin belirli bir eşik değerini ötesinde artırılmasının, mekanik dayanımı daha fazla iyileştirmede göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada çekme dayanımını en yüksek seviyeye ulaştıran optimum karıştırma süresi belirlenmiştir.



Şekil 4.22. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

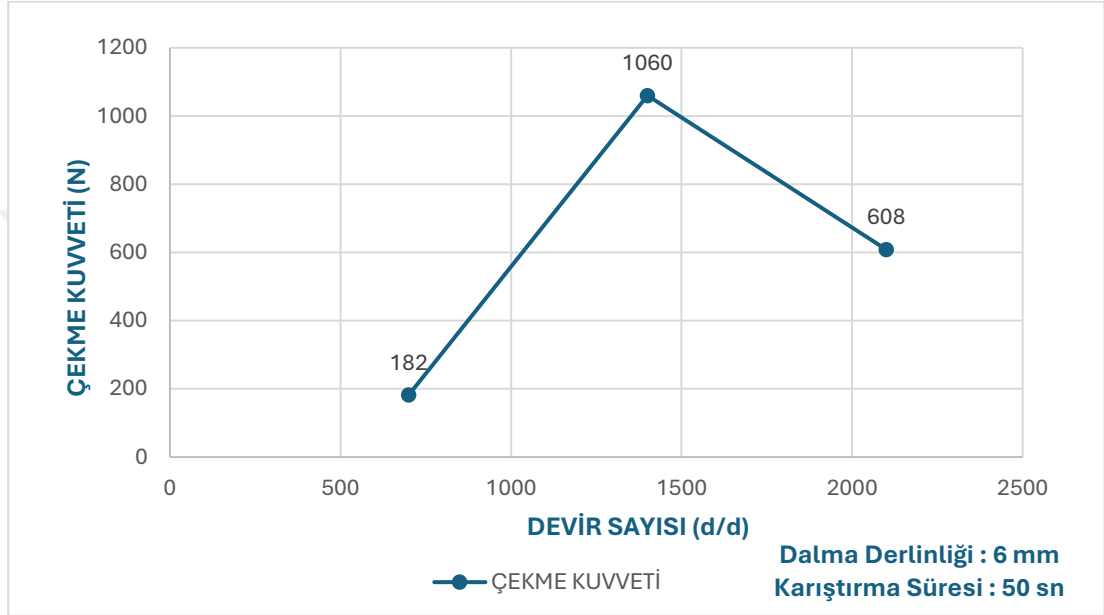


Şekil 4.23. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

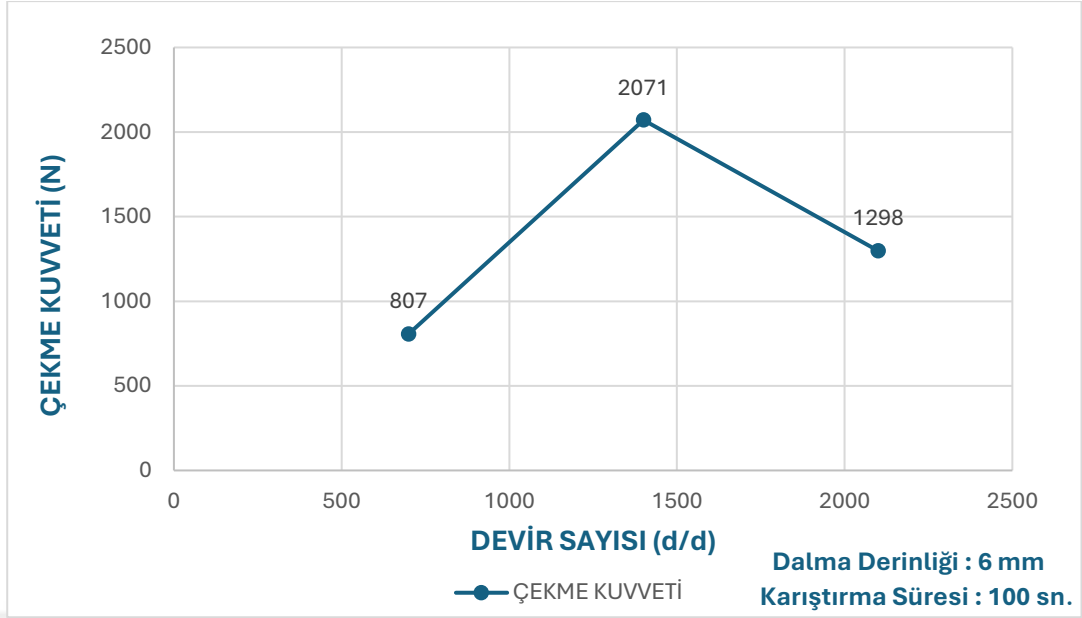


Şekil 4.24. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

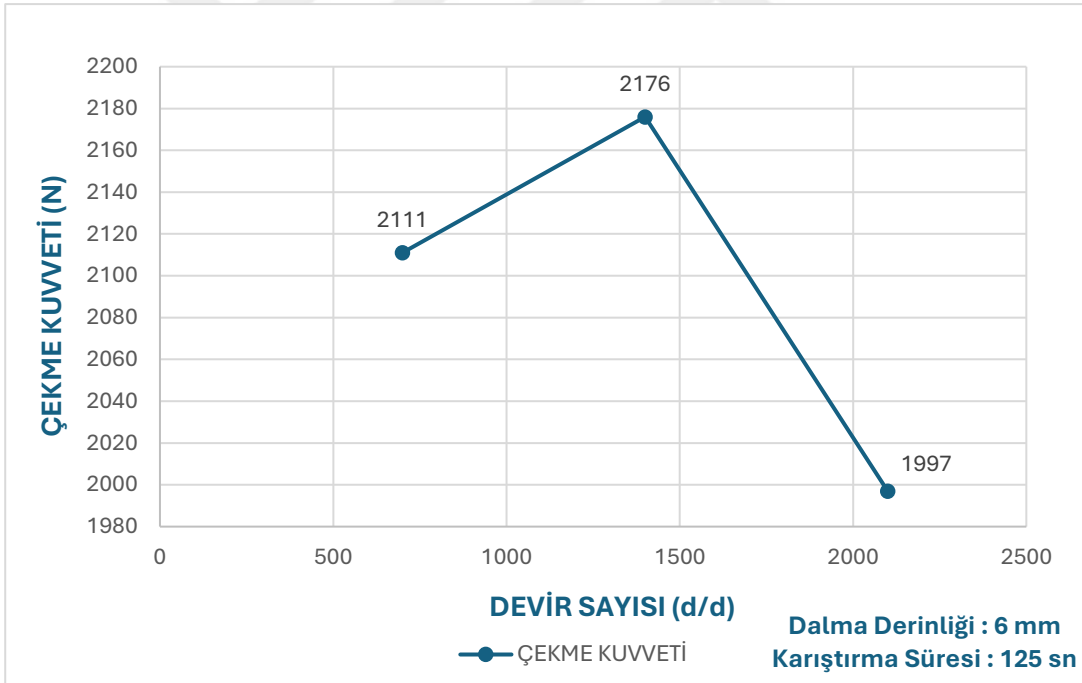
6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye karıştırma sürelerindeki değişimlerde, 700, 1400 ve 2100 d/d için devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi incelendiğinde; çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar düzenli arttığı, sonrasında ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Böylece çekme kuvvetini maksimum yapan optimum devir sayısı değeri 1400 d/d olarak elde edilmiştir. Şekil 25, Şekil 26, Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30’da 6 mm dalma derinliği için çekme kuvveti üzerine takım devir sayısının etkisini gösteren grafikler görölmektedir.



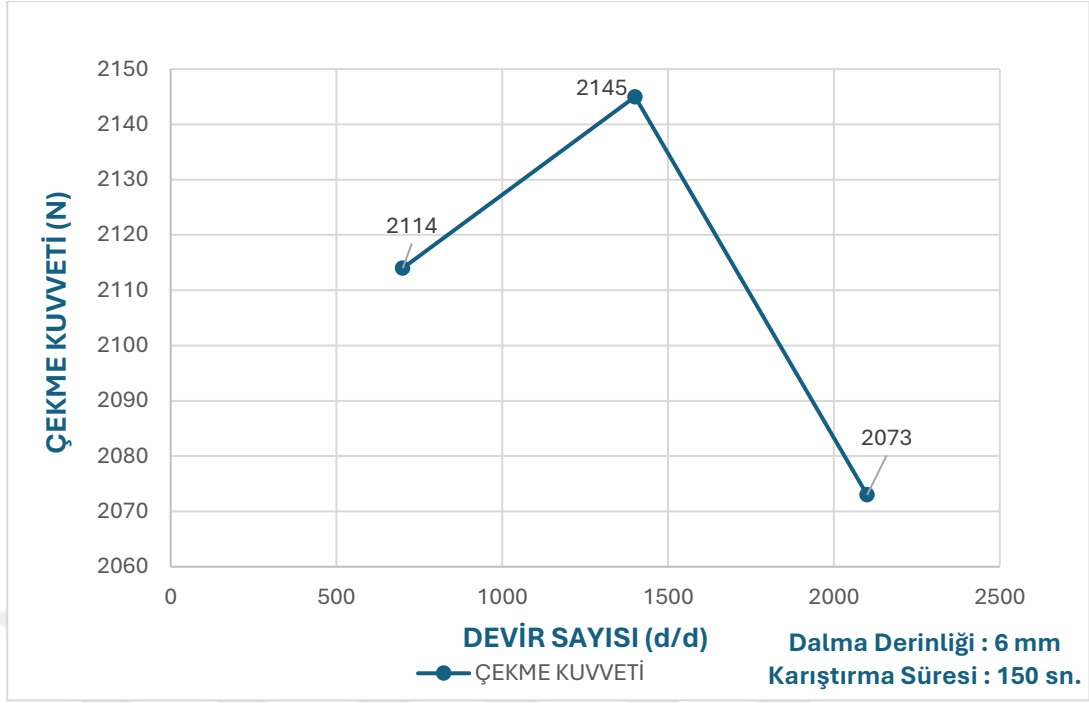
Şekil 4.25. 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



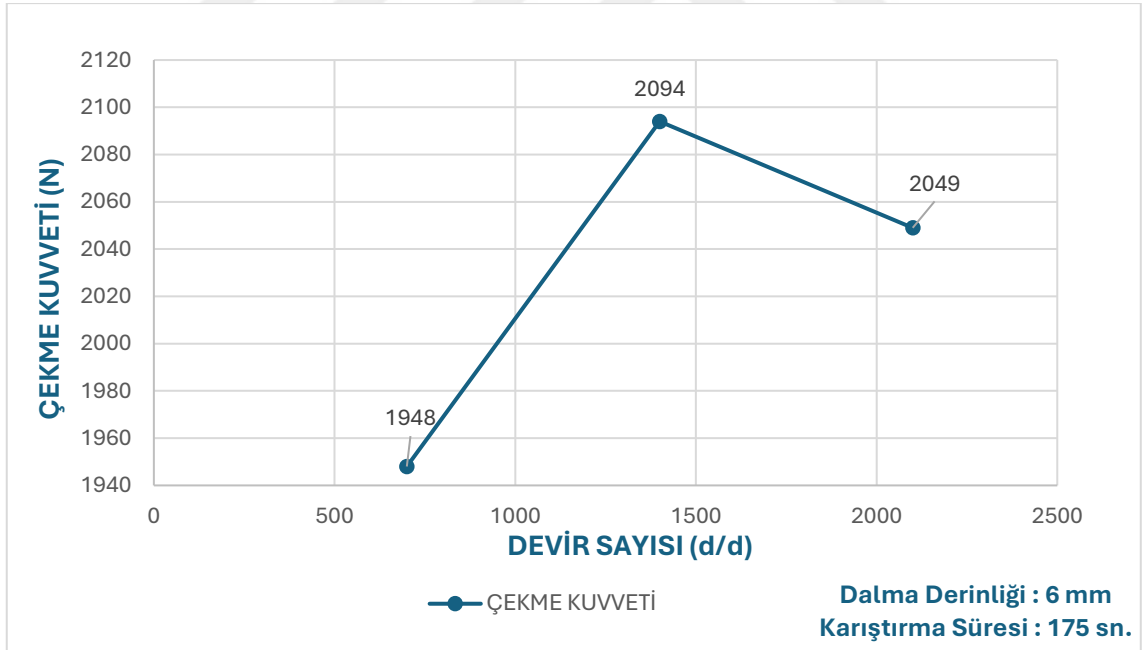
Şekil 4.26. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



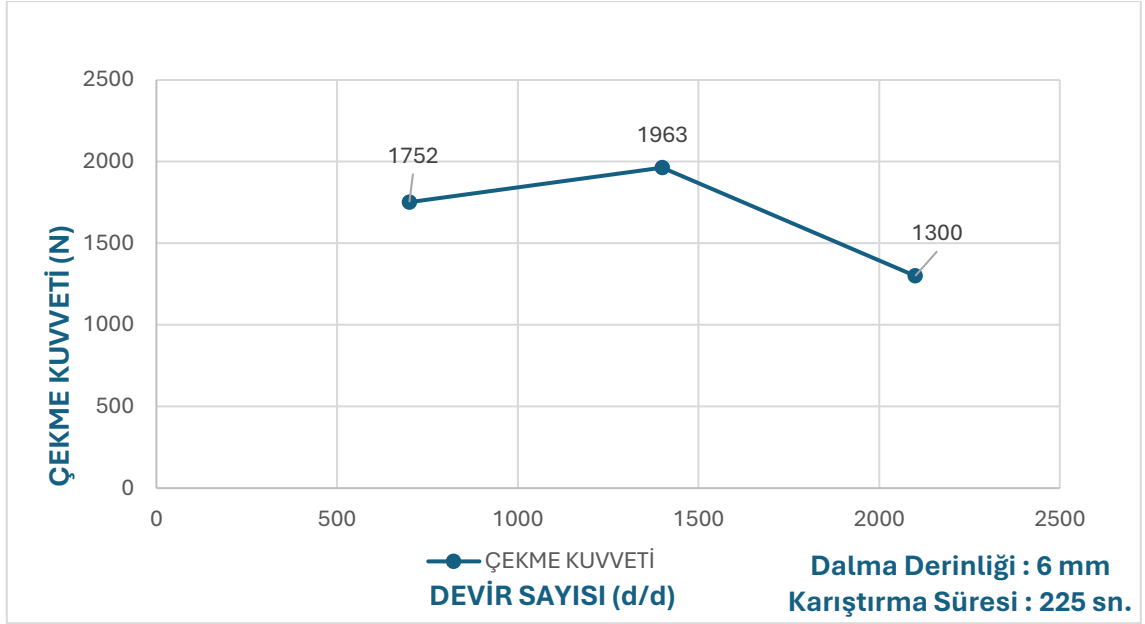
Şekil 4.27. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.28. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.29. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.30. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.

İkinci takım ile 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetini 2176 N değerle maksimum yapan optimum deney parametreleri, 1400 d/d devir sayısı ve 125 sn bekleme süresi ile E3 numunesidir. 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetinin 182 N değerle minimum olduğu optimum deney parametreleri, 700 d/d devir sayısı ve 50 sn bekleme süresi ile D1 numunesidir.

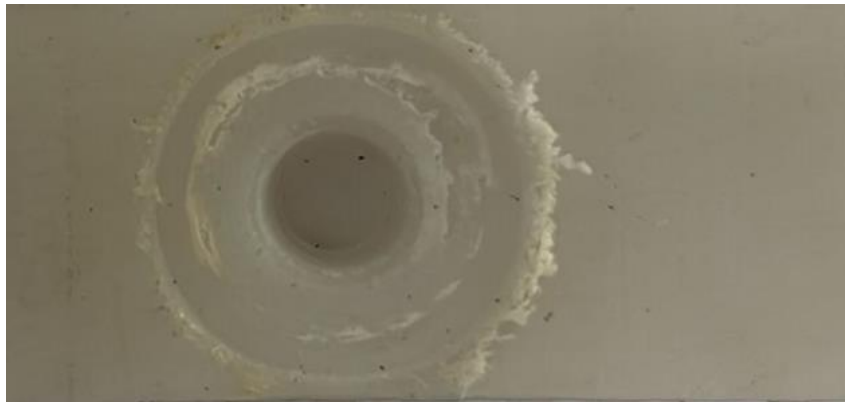
6 mm dalma derinliğiyle ve farklı devir sayılarında gerçekleştirilen SKNK işlemlerinde, en yüksek çekme kuvveti elde edilen numunelere ait çekme deneyi öncesi görüntüler Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’da sunulmuştur. Farklı devir sayılarında uygulanan SKNK işlemleri sonucunda, 700 d/d – 150 sn – 6 mm, 1400 d/d – 125 sn – 6 mm ve 2100 d/d – 150 sn – 6 mm parametrelerine sahip numunelerin kaynak bölgelerinde yapılan makroskobik incelemelerde, karakteristik kaynak izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, plastik malzemenin kaynak işlemi sırasında ısı etkisiyle yumuşayarak kaynak takımını etrafında belirli oranlarda birikme ve sıvanma gösterdiği, bu durumun kullanılan parametrelere bağlı olarak farklılık arz ettiği gözlemlenmiştir.

2100 d/d devir sayısı, 175 saniyelik bekleme süresi ve 6 mm dalma derinliği ile gerçekleştirilen SKNK uygulamasında, kaynak bölgesinde plastik malzemenin omuz

altından dışa doğru belirgin bir şekilde taşıdığı ve kaynak bölgesi çevresinde malzeme birikimine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu parametrelerde uygulanan işlem sırasında, kaynak havuzunda kalması beklenen ve birleştirmenin dayanımına katkı sağlaması gereken plastik malzemenin daha yüksek oranda dışarı çıkması, kaynak mukavemetini olumsuz yönde etkilemiştir. Öte yandan, 700 d/d devir sayısı ile yapılan kaynak uygulamalarında, 50 ve 100. saniyelerde gerekli sıcaklık seviyelerine ulaşılmasında yetersizlik olduğu ve bu nedenle plastik malzemenin yeterince yumuşamadığı anlaşılmıştır. Fakat 1400 d/d devir sayısı için yapılan gözlemler neticesinde, ikinci kaynak takımının optimum sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu gözlemler, 1400 d/d devir sayısı ile elde edilen numunelerde çekme dayanımının daha yüksek çıkmasını destekleyen önemli bulgular sunmaktadır.



Şekil 4.31. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen D4 kaynak numunesi.

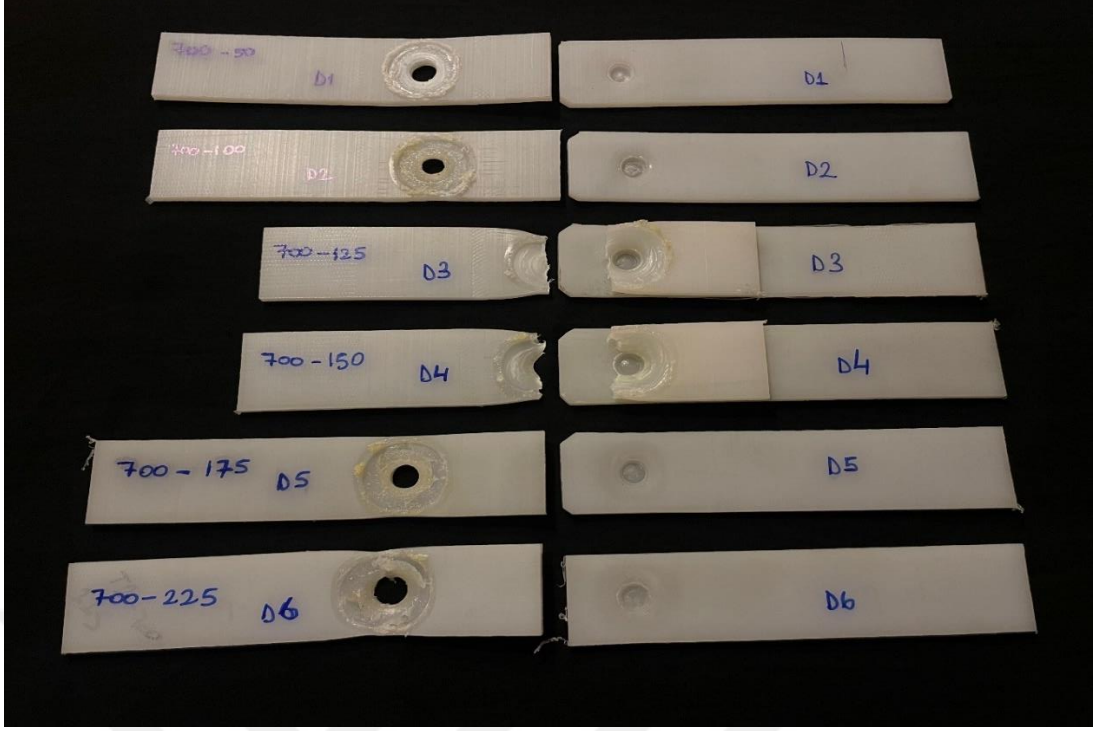


Şekil 4.32. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen E3 kaynak numunesi.



Şekil 4.33. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen F4 kaynak numunesi.

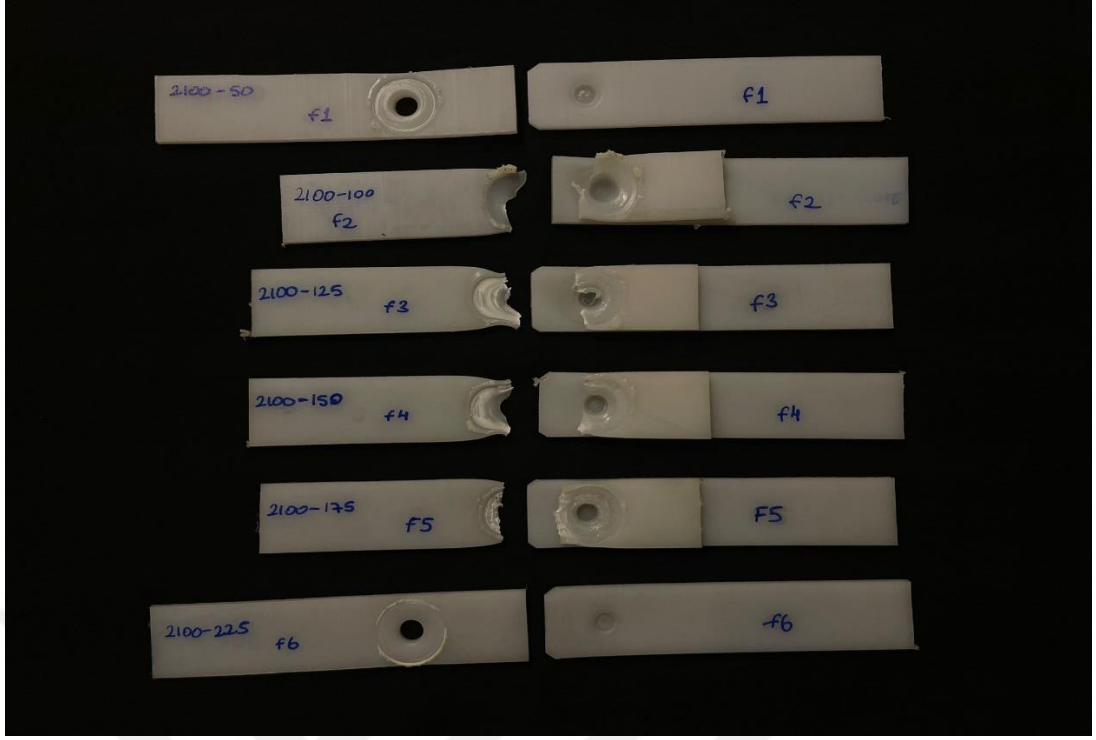
Sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı parametreleri altında gerçekleştirilen tüm SKNK bağlantılarına ait çekme testi sonrasındaki görüntüler, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da yer almaktadır. Söz konusu görsellerin incelenmesi sonucunda, kopma türlerinin üç temel kategoride sınıflandırıldığı belirlenmiştir: pim tabanlı kopmalar, omuz kaynaklı kopmalar ve yüzey (ara yüzey) kaynaklı kopmalar. Elde edilen çekme testi verileri, düşük bekleme süresi, yetersiz dalma derinliği ve düşük devir sayısı gibi uygun olmayan kaynak parametreleri altında, kaynak alanının pim bölgesiyle sınırlı kalmasından dolayı pim merkezli kopmaların meydana geldiğini göstermektedir. Parametrelerin artışıyla birlikte, takım omzunun kaynak bölgesi oluşumuna daha etkin şekilde katkı sağlaması, kaynak mukavemetinin artmasına neden olmuş ve bu durum kopmanın omuz bölgesinden gerçekleşmesiyle sonuçlanmıştır. Bunun yanı sıra, bazı numunelerde omuz çapına yakın bir bölgede, tam olarak kaynaşmamış alanı da içine alan ve enine doğrultuda ilerleyen yüzey kaynaklı kopma tipleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.



Şekil 4.35. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.



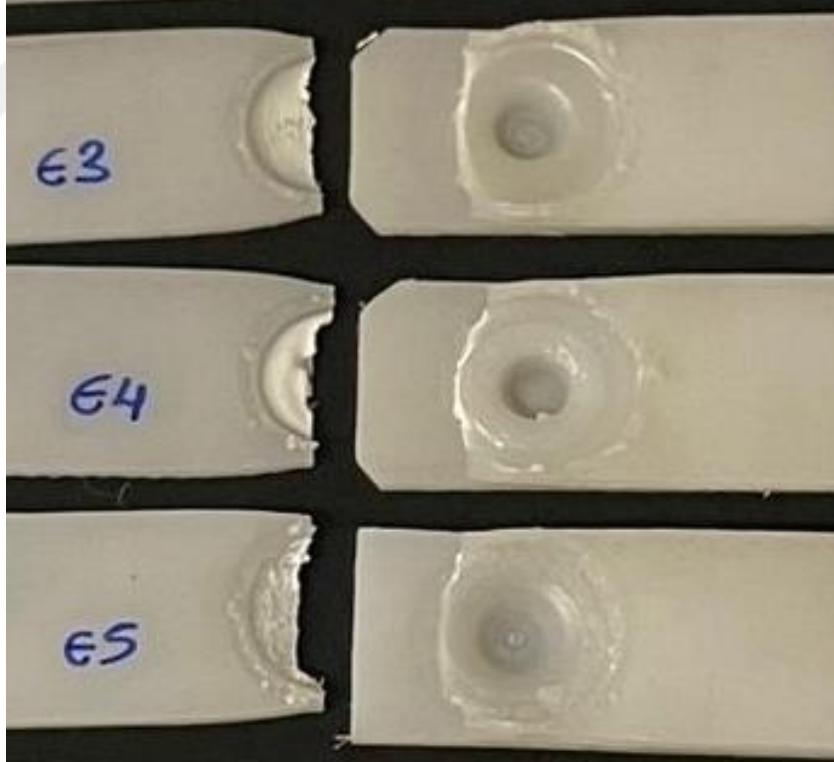
Şekil 4.36. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.

İkinci takım için yapılan deneysel çalışma kapsamında, sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı koşullarında; 700, 1400 ve 2100 d/d devir sayılarında, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye süresince uygulanan farklı karıştırma sürelerinin çekme kuvveti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, maksimum çekme kuvveti olan 2176 N değerine, 1400 d/d devir sayısı ve 125 saniyelik karıştırma süresi parametreleriyle ulaşılmıştır. Bu koşullarda üretilen ve ikinci kaynak takımına ait en yüksek çekme mukavemetini gösteren numune E3 olarak tanımlanmıştır.

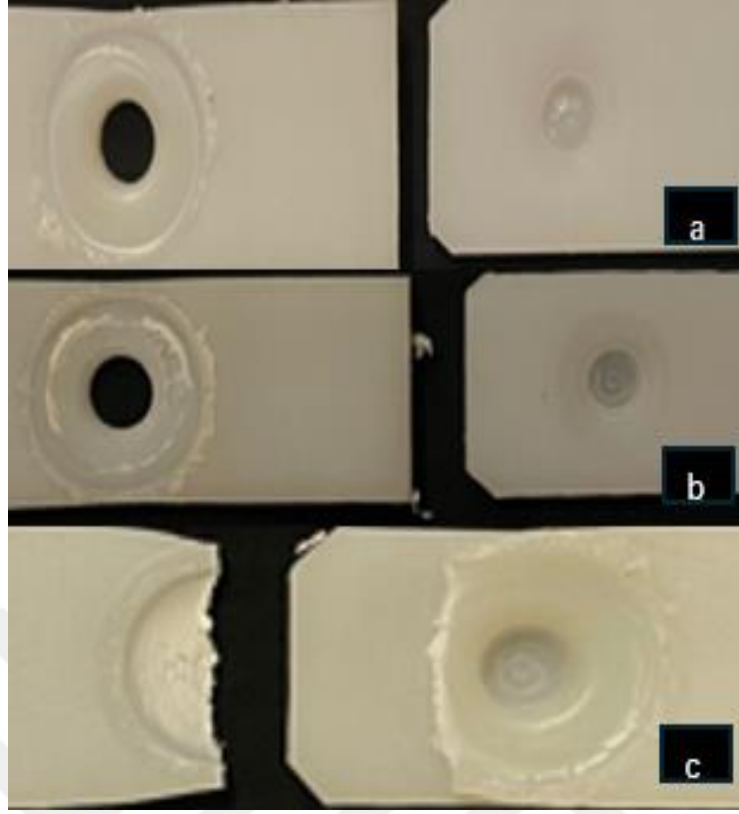
Elde edilen sonuçlar, kaynak işlemi sırasında optimum yumuşama koşullarını sağlayacak sıcaklık seviyesine 1400 d/d devir sayısında ve 125 saniyelik karıştırma süresinde ulaşıldığını göstermektedir. E3 numunesine ait kopma bölgeleri incelendiğinde, oluşan uzama lifleri ve kopma biçimi bu değerlendirmeyi desteklemektedir. Ayrıca kaynak bölgesinde yumuşayan plastik malzemenin, omuz altından dışa doğru çok sınırlı miktarda taşarak kaynak çevresinde yalnızca hafif bir yükselti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinde kalması gereken malzemenin büyük oranda yerinde kalması, mekanik dayanım açısından olumlu katkı sağlamış ve bu durum elde edilen yüksek çekme kuvvetiyle doğrulanmıştır.

Özellikle E3, E4 ve E5 numaralı numunelerde benzer çekme liflerinin ve kopma desenlerinin gözlenmesi, bu numunelerin yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşmasındaki ortak yapısal niteliklere işaret etmektedir. Elde edilen veriler, bu numunelerdeki kaynak kalitesinin ve mekanik bütünlüğün yüksek olduğunu göstermektedir. Kopmaya karşı daha dirençli olan E3 numunesinde, E4 ile benzer performansa rağmen maksimum çekme kuvvetinin elde edildiği tespit edilmiştir.

Öte yandan, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak gerçekleştirilen deneylerde, 175 ve 225 saniyelik karıştırma sürelerinde elde edilen numunelerde, kaynak için gerekli optimum sıcaklık seviyesine ulaşamadığı anlaşılmıştır. Bu durum, kaynak bölgesinin yeterince etkin biçimde oluşmamasına ve dolayısıyla çekme kuvveti değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Genel olarak, karıştırma süresi belirli bir değerin ötesine uzatıldığında, çekme dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir. Şekil 4.37’de ikinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri gösterilmiştir. Şekil 4.38’de çekme deneyi oluşan kopma türleri sunulmuştur.



Şekil 4.37. İkinci kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.



Şekil 4.38. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).

4.1.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Sabit Dalma Derinliğinde Gerçekleştirilen SKNK Uygulamalarında Bekleme Süresi ve Devir Sayısının Çekme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, birinci ve ikinci kaynak takımında olduğu gibi, üçüncü kaynak takımı kullanılarak Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bekleme süresi ve devir sayısı gibi işlem parametrelerinin, elde edilen çekme kuvveti üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde analiz edilmiştir. Birinci ve ikinci kaynak takımlarında olduğu gibi, üçüncü kaynak takımında da her bir SKNK numunesi için parametrelerin sistematik takibini kolaylaştırmak amacıyla özel numune kodları oluşturulmuştur. Bu kodlarla birlikte, ilgili bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerine ait veriler ve elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 4.3 ve 4.4'te detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, üçüncü kaynak takımıyla üretilmiş numunelere ait kaynak sonrası görseller Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Takım 3 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)	NUMUNE KODU	ÇEKME KUVVETİ (N)
50	700	6	100	G1	343N
100	700	6	100	G2	536N
125	700	6	100	G3	624N
150	700	6	100	G4	2156N
175	700	6	100	G5	1923N
225	700	6	100	G6	1878N

Çizelge 4.4. Takım 3 için farklı devir sayısı ve farklı bekleme süreleri elde edilen çekme kuvvetleri.

BEKLEME SÜRESİ (sn)	DEVİR SAYISI (d/d)	DALMA DERİNLİĞİ (mm)	DALMA HIZI (mm/dak)	NUMUNE KODU	ÇEKME KUVVETİ (N)
50	1400	6	100	H1	1541N
100	1400	6	100	H2	1606N
125	1400	6	100	H3	1996N
150	1400	6	100	H4	2356N
175	1400	6	100	H5	2082N
225	1400	6	100	H6	1935N
50	2100	6	100	K1	965N
100	2100	6	100	K2	1310N
125	2100	6	100	K3	1511N
150	2100	6	100	K4	1729N
175	2100	6	100	K5	1139N
225	2100	6	100	K6	830N



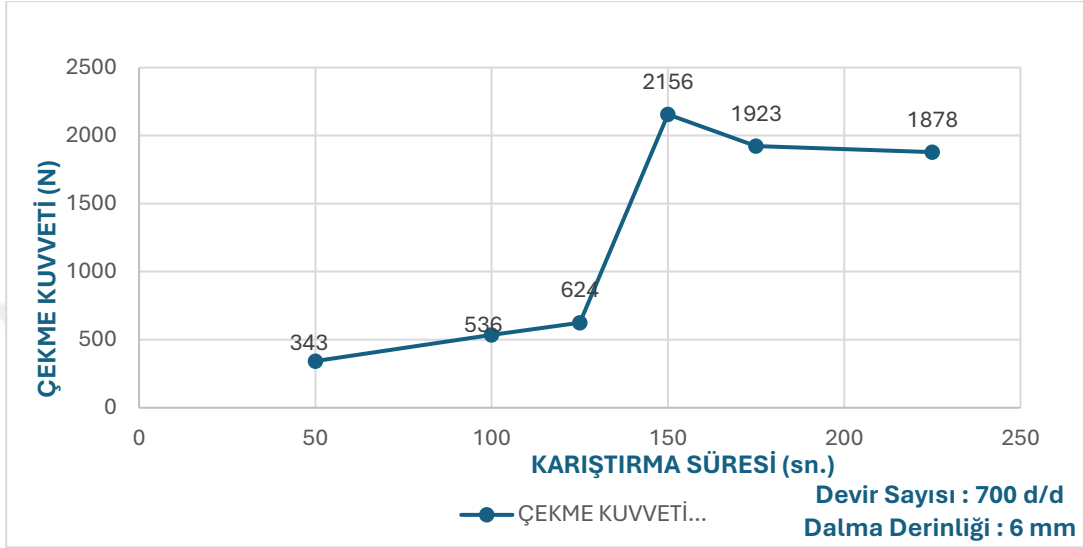
Şekil 4.39. Üçüncü kaynak takımı ile oluşturulan bazı kaynaklı parçaların kaynak sonrası yakın görüntüleri.



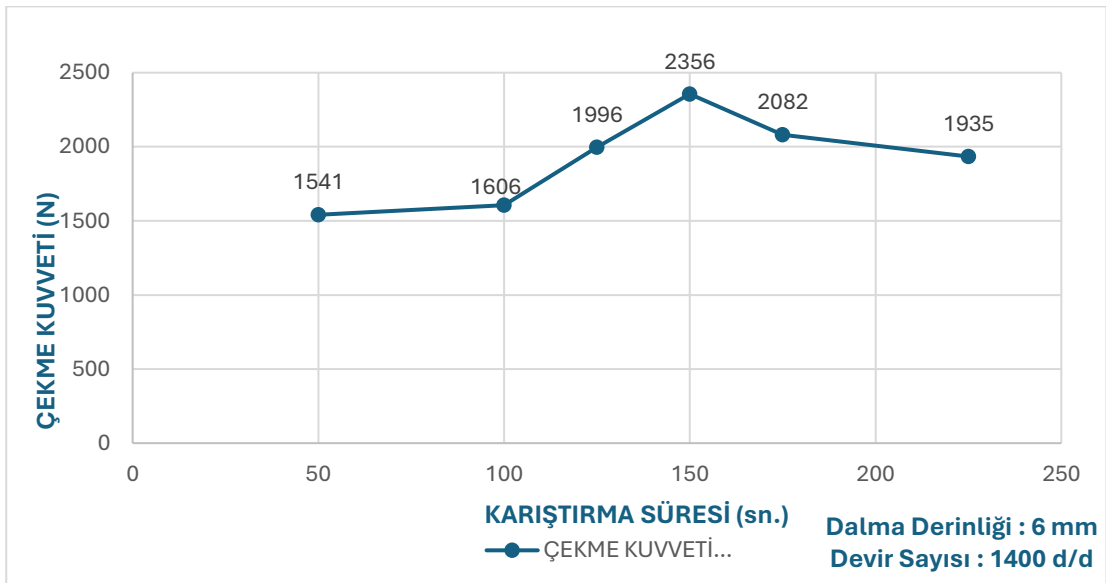
Şekil 4.40. Üçüncü kaynak takımı ile oluşturulan kaynaklı numunelerin kaynak sonrası görüntüleri.

Deneysel çalışmanın üçüncü kaynak takımıyla yürütülen aşamasında, daha önce gerçekleştirilen ön testlerin verileri temel alınarak, sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı koşulları altında; 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d olmak üzere üç farklı takım devir sayısında, karıştırma süresinin (50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye) çekme kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir (Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43). Analiz sonuçları, karıştırma süresinin artışıyla birlikte çekme kuvvetinde belirli bir süreye kadar düzenli bir artış gözlemlendiğini; ancak bu sürenin ardından mukavemet değerlerinde düşüş yaşandığını ortaya koymuştur. Özellikle 175. saniyeden sonra çekme kuvvetinde belirgin bir azalma eğilimi tespit edilmiştir.

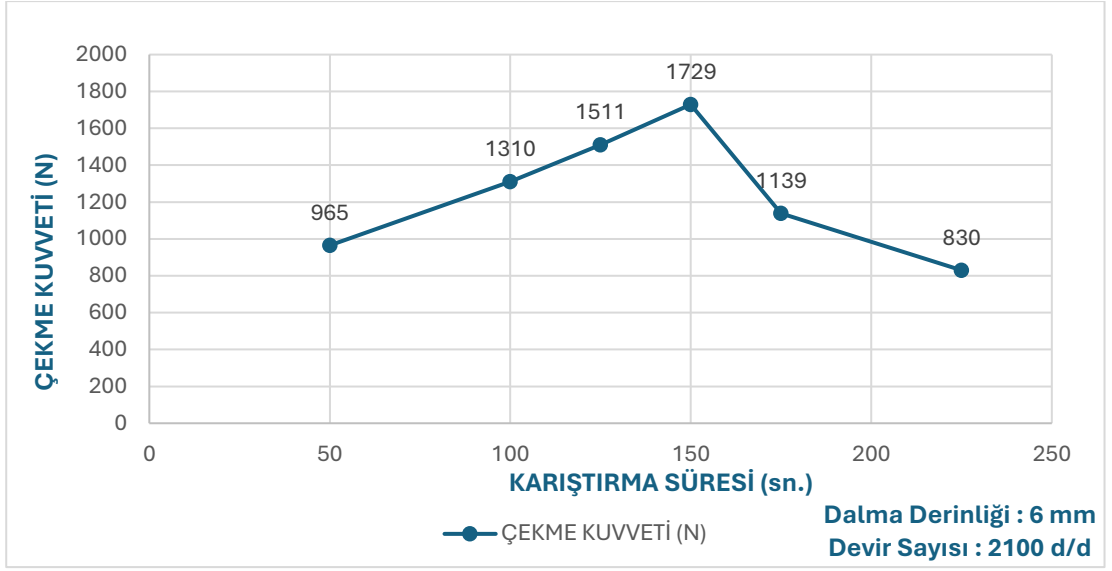
Bu bulgular, karıştırma süresinin belirli bir sınır değerinin üzerine çıkarılmasının, kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini daha ileri düzeyde iyileştirmede göstermektedir. Bu kapsamda, üçüncü kaynak takımı ile bu deneysel çalışmada, çekme dayanımını en üst düzeye çıkaran optimum karıştırma süresi belirlenmiştir.



Şekil 4.41. 700 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

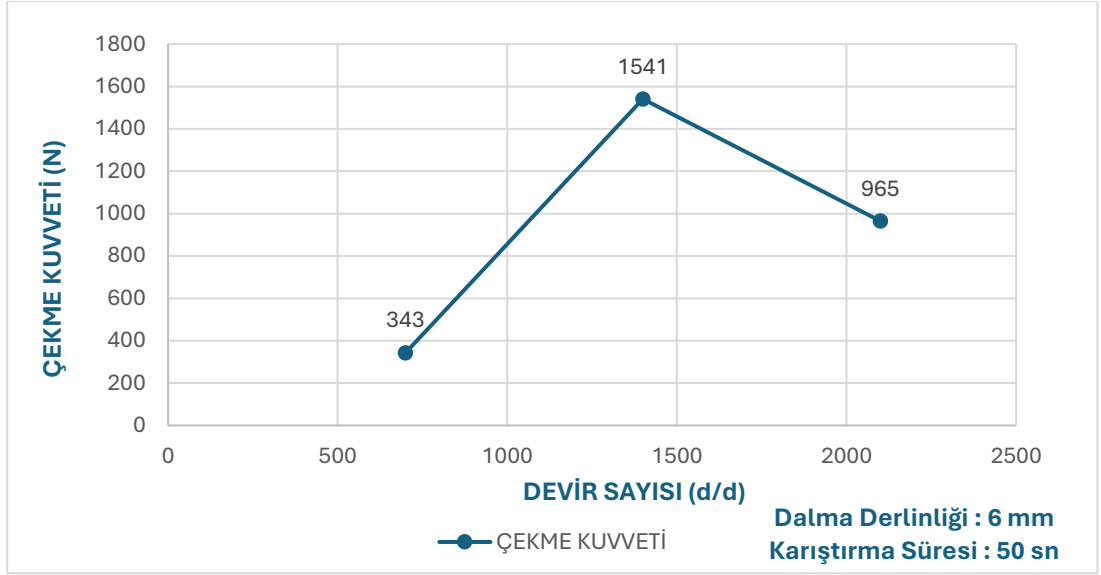


Şekil 4.42. 1400 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

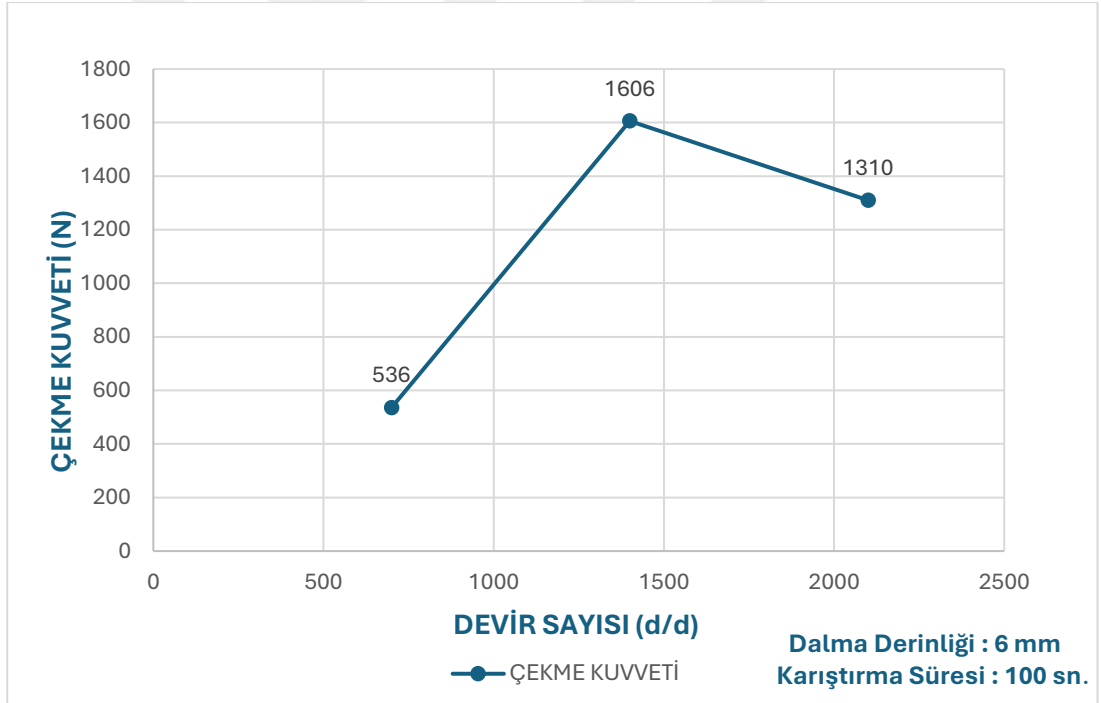


Şekil 4.43. 2100 d/d kaynak takımı devir sayısı, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi.

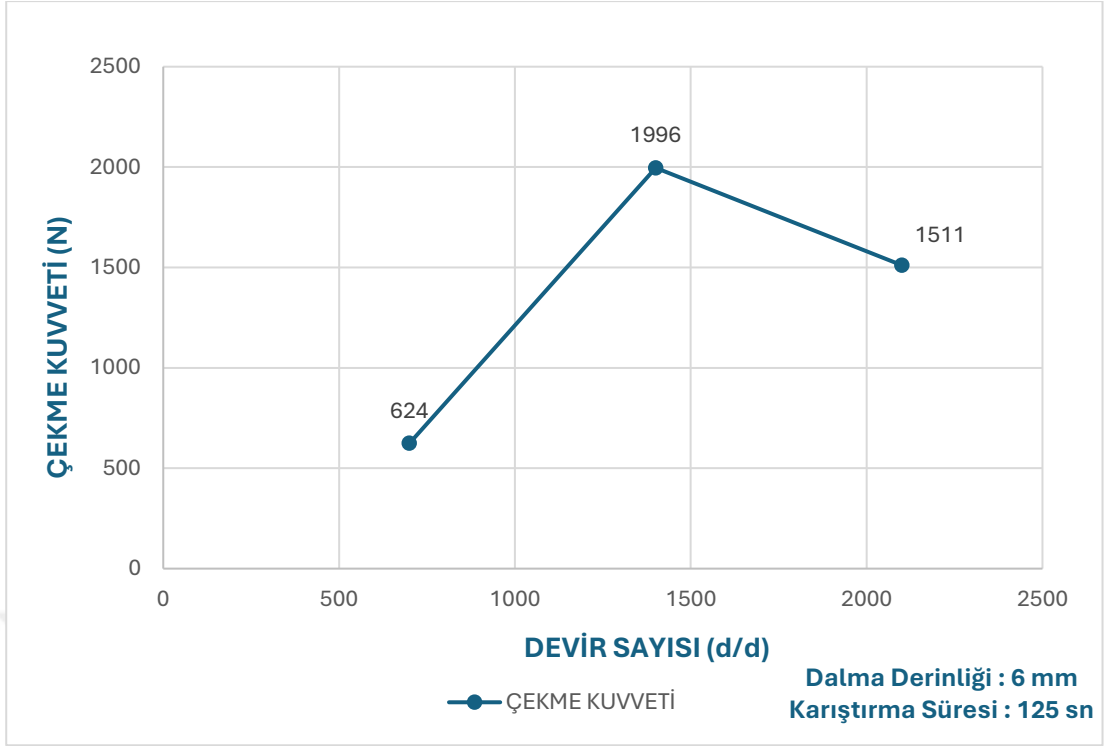
6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye sürelerindeki değişimlerde, 700, 1400 ve 2100 d/d için devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi incelendiğinde; çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar düzenli arttığı, sonrasında ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Böylece çekme kuvvetini maksimum yapan optimum devir sayısı değeri 1400 d/d olarak elde edilmiştir. Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49 'da 6 mm dalma derinliği için çekme kuvveti üzerine takım devir sayısının etkisini gösteren grafik görülmektedir.



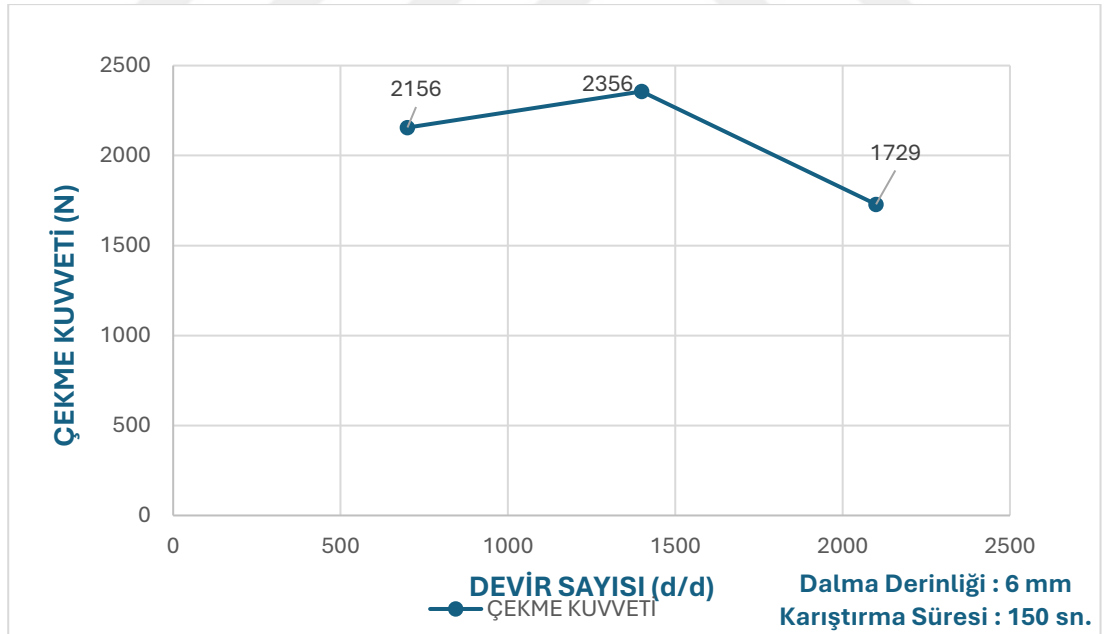
Şekil 4.44 50 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



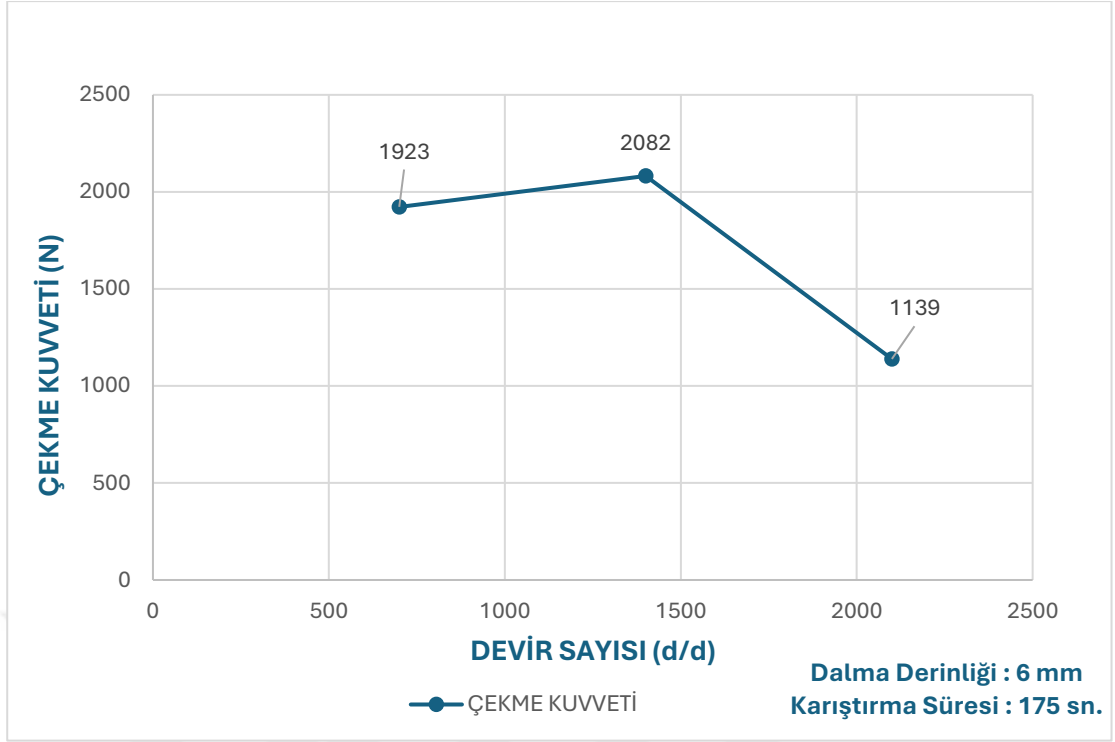
Şekil 4.45. 100 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



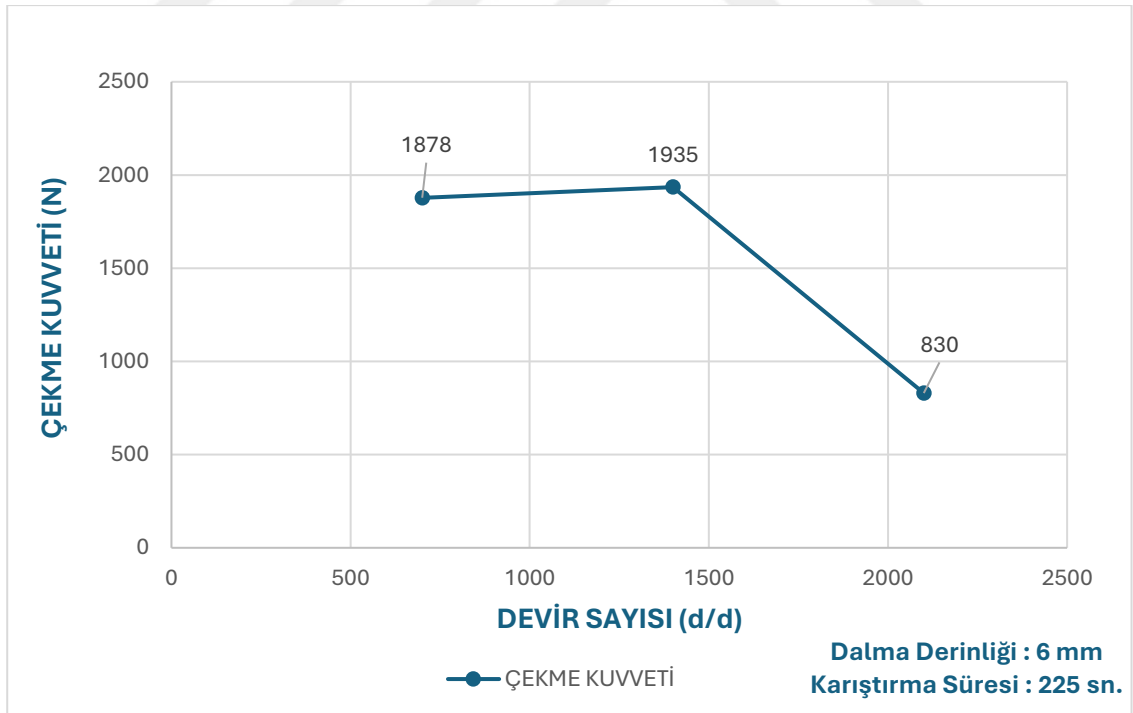
Şekil 4.46. 125 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.47. 150 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.48. 175 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.



Şekil 4.49. 225 sn karıştırma süresi, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, devir sayısının çekme kuvvetine olan etkisi.

Üçüncü takım ile 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetini 2356 N değerle maksimum yapan optimum deney parametreleri, 1400 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi ile H4 numunesidir. 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği için, 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetinin 343 N değerle minimum olduğu optimum deney parametreleri, 700 d/d devir sayısı ve 50 sn bekleme süresi ile G1 numunesidir.

6 mm dalma derinliğiyle ve farklı devir sayılarında gerçekleştirilen SKNK işlemlerinde, en yüksek çekme kuvveti elde edilen numunelere ait çekme deneyi öncesi görüntüler Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’da sunulmuştur. Farklı devir sayılarında uygulanan SKNK işlemleri sonucunda, 700 d/d – 150 sn – 6 mm, 1400 d/d – 150 sn – 6 mm ve 2100 d/d – 150 sn – 6 mm parametrelerine sahip numunelerin kaynak bölgelerinde yapılan makroskobik incelemelerde, karakteristik kaynak izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, plastik malzemenin kaynak işlemi sırasında ısı etkisiyle yumuşayarak kaynak takımını etrafında belirli oranlarda birikme ve sıvanma gösterdiği; bu durumun kullanılan parametrelere bağlı olarak farklılık arz ettiği gözlemlenmiştir.

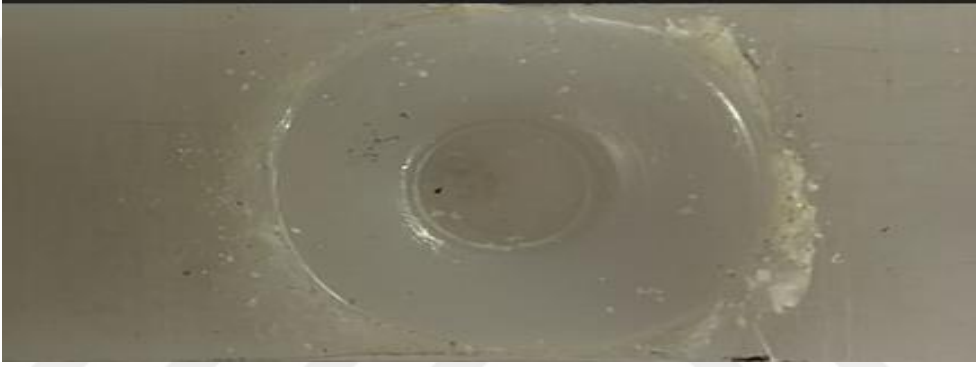
1400 d/d devir sayısı için yapılan gözlemler neticesinde, üçüncü kaynak takımının bu devir sayısında optimum sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu gözlemler, 1400 d/d devir sayısı ile elde edilen numunelerde çekme dayanımının daha yüksek çıkmasını destekleyen önemli bulgular sunmaktadır.



Şekil 4.50. 700 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen G4 kaynak numunesi.

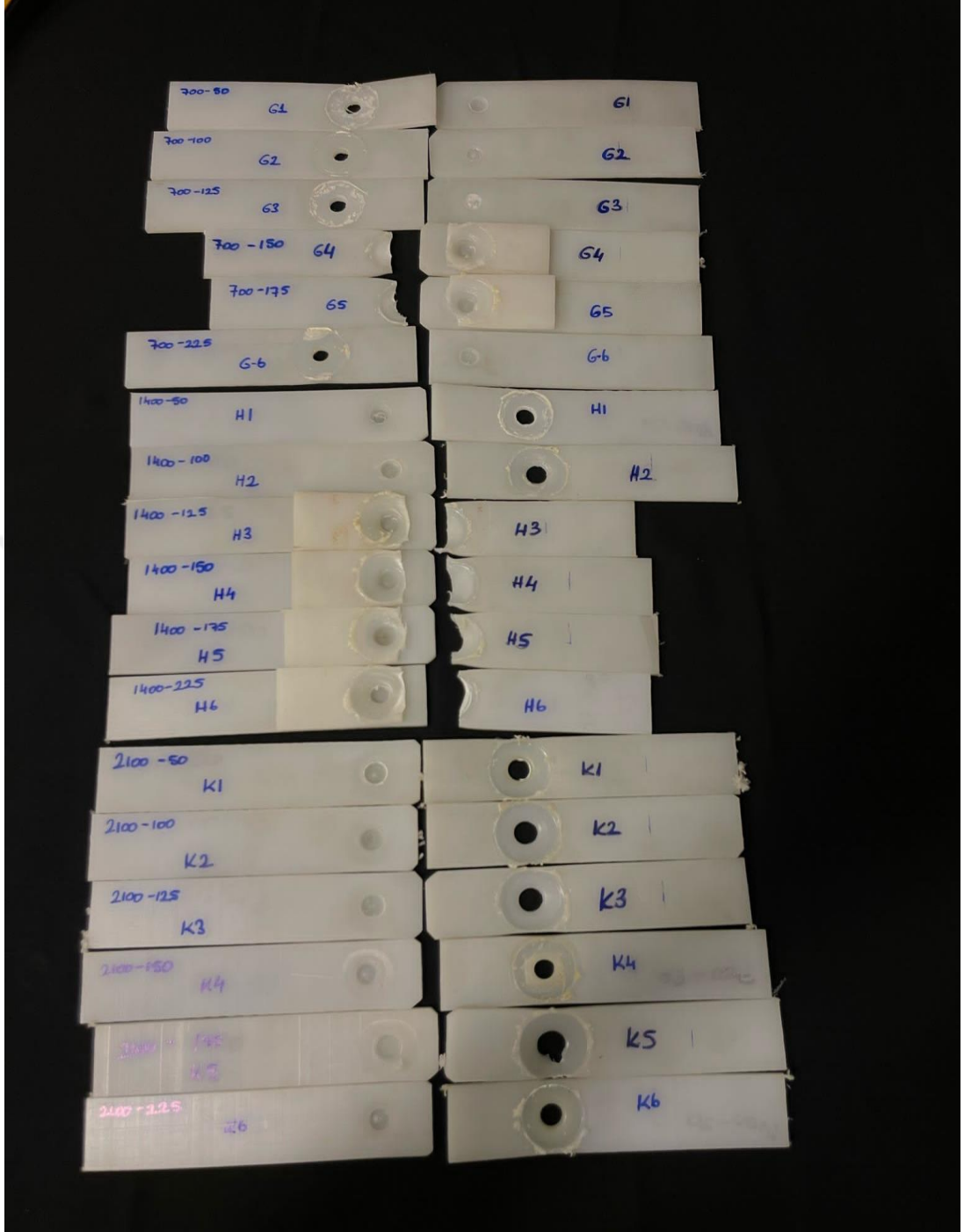


Şekil 4.51. 1400 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen H4 kaynak numunesi.



Şekil 4.52. 2100 d/d takım devrinde en yüksek çekme kuvveti elde edilen K4 kaynak numunesi.

Sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı parametreleri altında gerçekleştirilen tüm SKNK bağlantılarına ait çekme testi sonrasındaki görüntüler, Şekil 4.53'te yer almaktadır.



Şekil 4.53. 700 d/d, 1400 d/d, 2100 d/d kaynak takımı devir sayıları, 6 mm takım dalma derinliği ve 100 mm/dak takım dalma hızı için, çekme deneyi sonrası sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri.

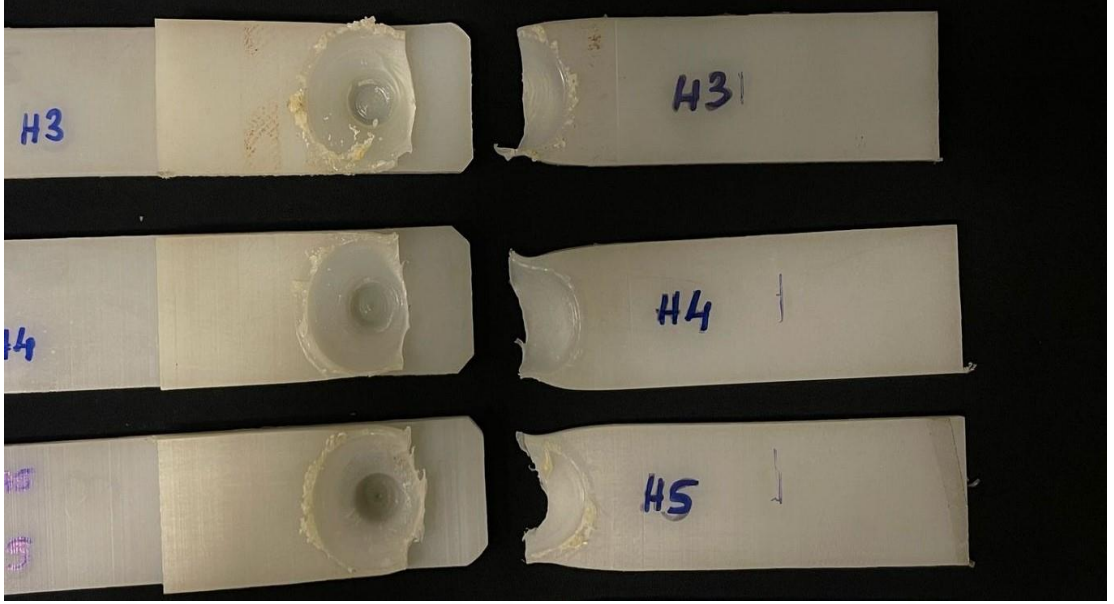
Üçüncü takım için yapılan deneysel çalışma kapsamında, sabit 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı koşullarında; 700, 1400 ve 2100 d/d devir sayılarında, 50, 100, 125, 150, 175 ve 225 saniye süresince uygulanan farklı karıştırma sürelerinin çekme

kuvveti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, maksimum çekme kuvveti olan 2356 N değerine, 1400 d/d devir sayısı ve 150 saniyelik karıştırma süresi parametreleriyle ulaşılmıştır. Bu koşullarda üretilen ve üçüncü kaynak takımına ait en yüksek çekme mukavemetini gösteren numune H4 olarak tanımlanmıştır.

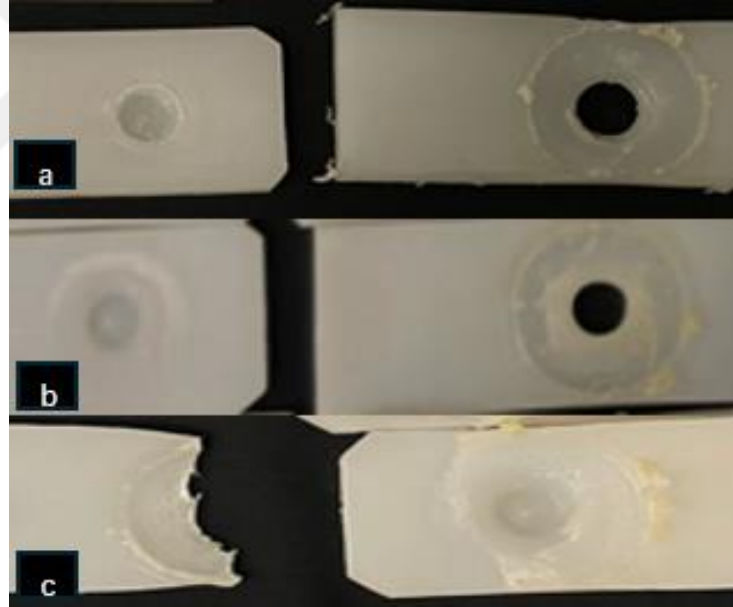
Elde edilen sonuçlar, kaynak işlemi sırasında optimum yumuşama koşullarını sağlayacak sıcaklık seviyesine 1400 d/d devir sayısında ve 150 saniyelik karıştırma süresinde ulaşıldığını göstermektedir. H4 numunesine ait kopma bölgeleri incelendiğinde, oluşan uzama lifleri ve kopma biçimi bu değerlendirmeyi desteklemektedir. Ayrıca kaynak bölgesinde yumuşayan plastik malzemenin, omuz altından dışa doğru çok sınırlı miktarda taşıdığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinde kalması gereken malzemenin büyük oranda yerinde kalması, mekanik dayanım açısından olumlu katkı sağlamış ve bu durum elde edilen yüksek çekme kuvvetiyle doğrulanmıştır.

Özellikle H3, H4 ve H5 numaralı numunelerde benzer çekme liflerinin ve kopma desenlerinin gözlenmesi, bu numunelerin yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşmasındaki ortak yapısal niteliklere işaret etmektedir. Elde edilen veriler, bu numunelerdeki kaynak kalitesinin ve mekanik bütünlüğün yüksek olduğunu göstermektedir.

Öte yandan, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit tutularak gerçekleştirilen deneylerde, 175 ve 225 saniyelik karıştırma sürelerinde elde edilen numunelerde, kaynak için gerekli optimum sıcaklık seviyesine ulaşamadığı anlaşılmıştır. Bu durum, kaynak bölgesinin yeterince etkin biçimde oluşmamasına ve dolayısıyla çekme kuvveti değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Genel olarak, karıştırma süresi belirli bir değerin ötesine uzatıldığında, çekme dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir. Şekil 4.54'te üçüncü kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri gösterilmiştir. Şekil 4.55'te çekme deneyi oluşan kopma türleri sunulmuştur.



Şekil 4.54. Üçüncü kaynak takımı ile yapılan kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası en yüksek mukavemetin elde edildiği SKNK numuneleri.



Şekil 4.55. Pim esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (a), Omuz esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (b), Ara yüzey esaslı kopma türüne ait kaynak bölgesinin üstten çekilmiş kopmuş fotoğrafı (c).

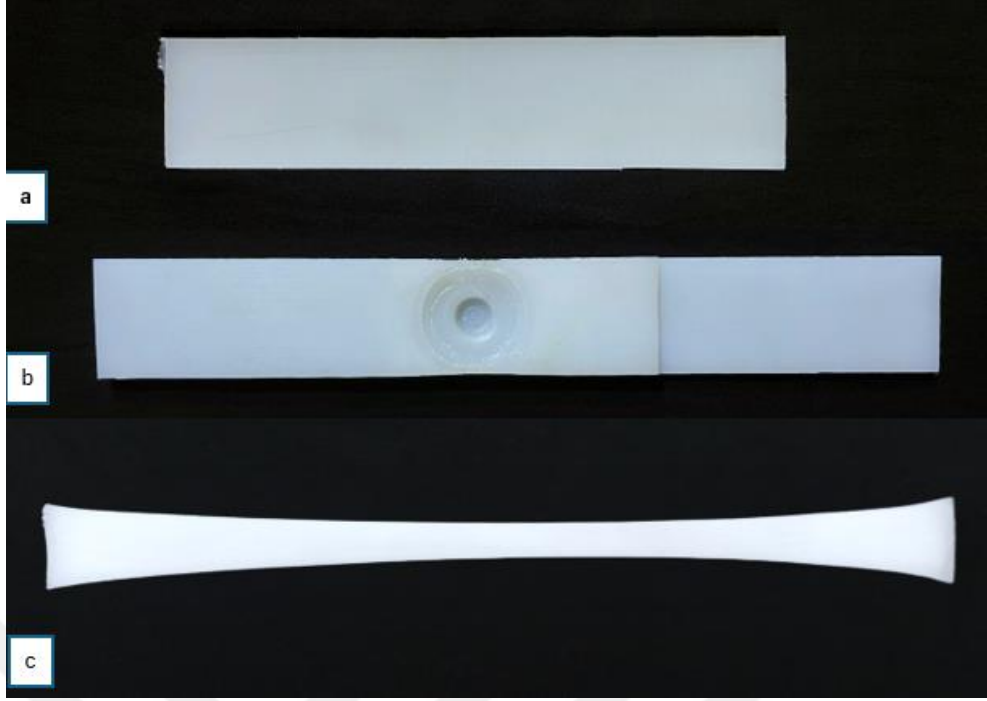
4.1.4. Çekme Deneyi Sonuçlarına Göre Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi ve Optimum Kaynak Parametresine Sahip Numune ile Asıl Numunenin Çekme Kuvveti Değerlerinin Kıyaslanması

Yürütülen deneysel çalışma kapsamında, SKNK (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı) yöntemiyle elde edilen numunelerin kaynak havuzları, çekme deneyi sonrası oluşan kopma bölgeleri ve deney çıktıları ayrıntılı şekilde incelenmiş ve bu veriler doğrultusunda optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Yapılan ön çalışmalar neticesinde, tüm deneylerde 100 mm/dak sabit dalma hızı ve 6 mm sabit dalma derinliği kullanılmıştır.

Birinci kaynak takımı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, en yüksek çekme kuvveti değeri olan 2412 N'ye ulaşılan B4 kodlu numune, 1400 d/d devir sayısı ve 150 saniye bekleme süresiyle optimum parametreleri temsil etmektedir. İkinci kaynak takımı için yapılan uygulamalarda ise, 1400 d/d devir sayısı ve 125 saniye bekleme süresiyle elde edilen 2176 N çekme kuvvetine sahip E3 kodlu numune, en uygun kaynak koşullarını sunmuştur. Üçüncü kaynak takımına ait deneysel analizler neticesinde ise, 1400 d/d devir sayısı ve 150 saniye bekleme süresiyle en yüksek çekme kuvveti olan 2356 N'ye ulaşılan H4 kodlu numune, optimum kaynak parametrelerine sahip olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.56'de bir kaynaklı numuneye, asıl (referans) numuneye ve bu referans numunenin çekme testi sonrası görünümüne yer verilmiştir. Referans numunede gözlemlenen uzama, malzemenin sünek karakterde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu numune için elde edilen çekme kuvveti değeri 2650 N'dir.

Elde edilen çekme kuvveti değerleri, kaynaklı numuneler ile referans numune arasında kıyaslandığında; birinci kaynak takımına ait B4 numunesinin ulaştığı 2412 N'lik değer, referans numunenin %91'i oranında bir performans sergilemiştir. İkinci kaynak takımı için E3 kodlu numunenin çekme kuvveti değeri olan 2176 N, referans numunenin %82,12'sine karşılık gelirken; üçüncü takımda elde edilen 2356 N'lik değer, %88,9'luk bir başarı oranını ifade etmektedir.

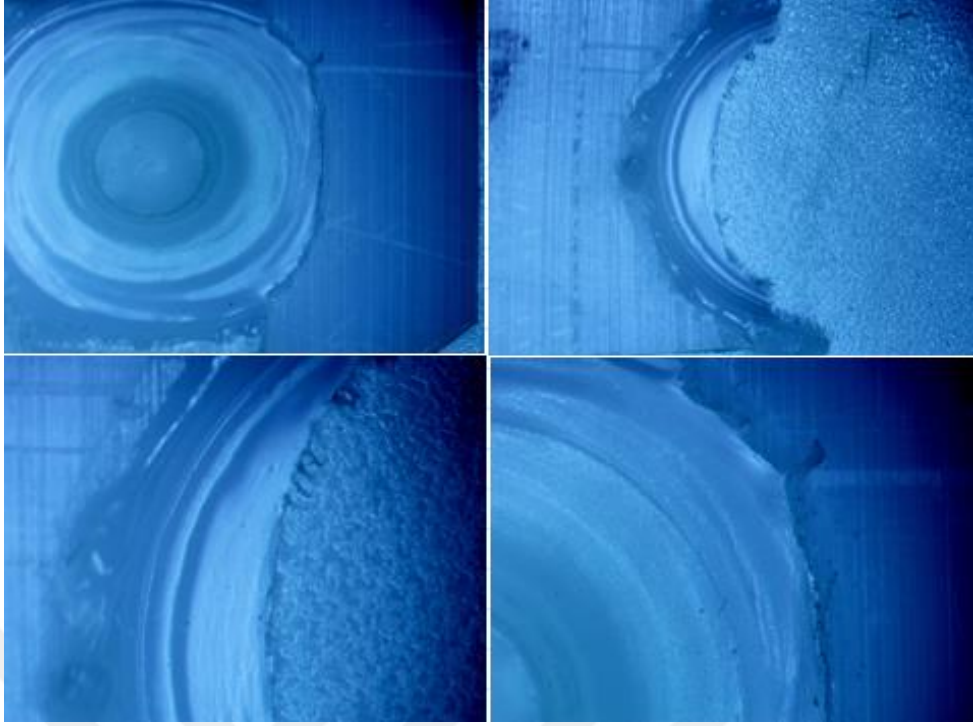


Şekil 4.56. a) Asıl numune b) Herhangi bir kaynaklı numune c) Asıl numunenin çekme deneyi sonrası görünümü.

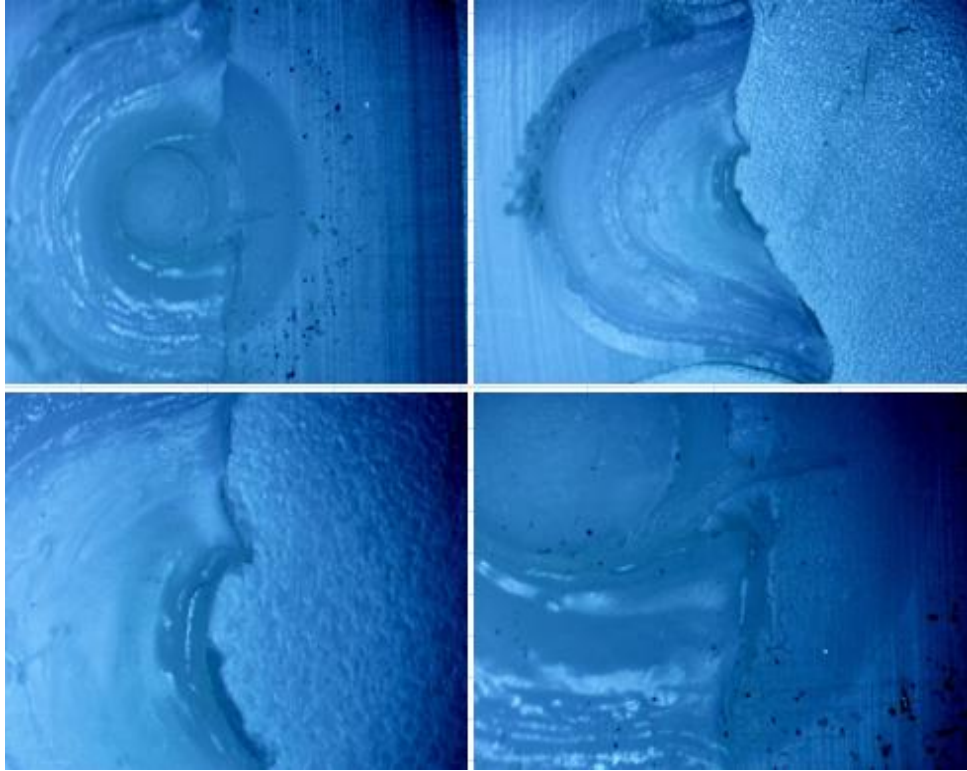
4.2. SKNK NUMUNELERİNİN ÇEKME DENEYİ SONRASINDA MEYDANA GELEN KOPMA BÖLGELERİNİN OPTİK MİKROSKOP YARDIMI İLE İNCELENMESİ

4.2.1. Birinci Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi

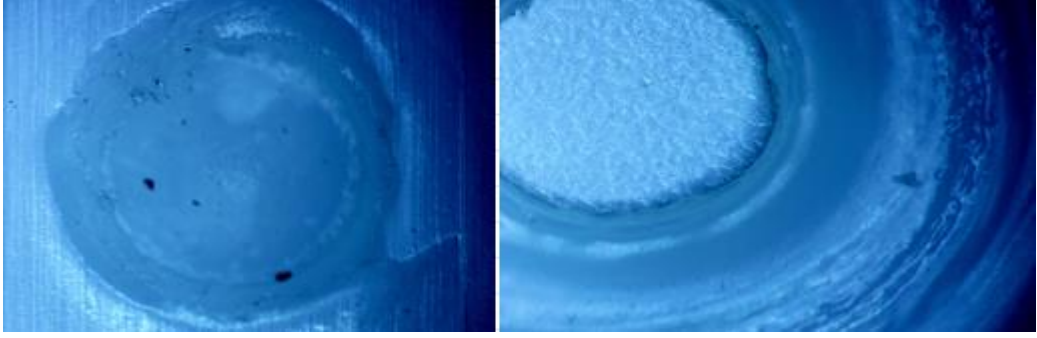
Birinci takım ile yapılan deneylerde 6 mm sabit dalma derinliğinde, 100 mm/dak sabit dalma hızı, 1400 d/d devir sayısı ve 150 saniye bekleme süresiyle 2412N çekme kuvveti elde edildiği, B4 numunesi, 700 d/d devir sayısı ve 175 saniye bekleme süresi ile 2354N çekme kuvveti elde edilen A5 numunesi, 1400 d/d devir sayısı ve 50 saniye bekleme süresi ile 1250N çekme kuvveti elde edilen B1 numunesi, 2100 d/d devir sayısı ve 175 saniye ile 2135N çekme kuvveti elde edilen C5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.57, Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da bu numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



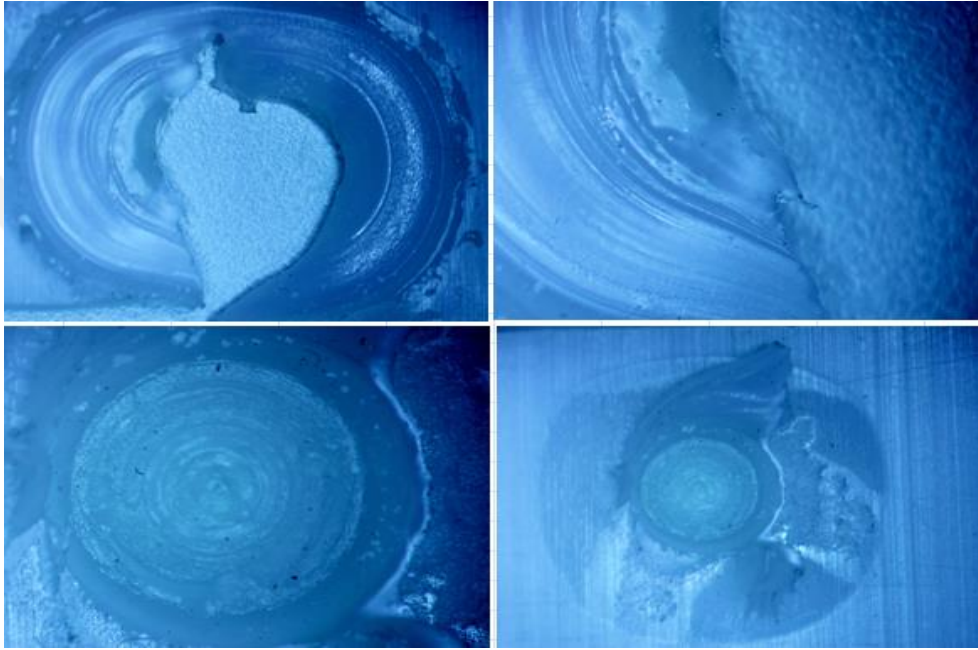
Şekil 4.57. B4 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.58. A5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.59. B1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



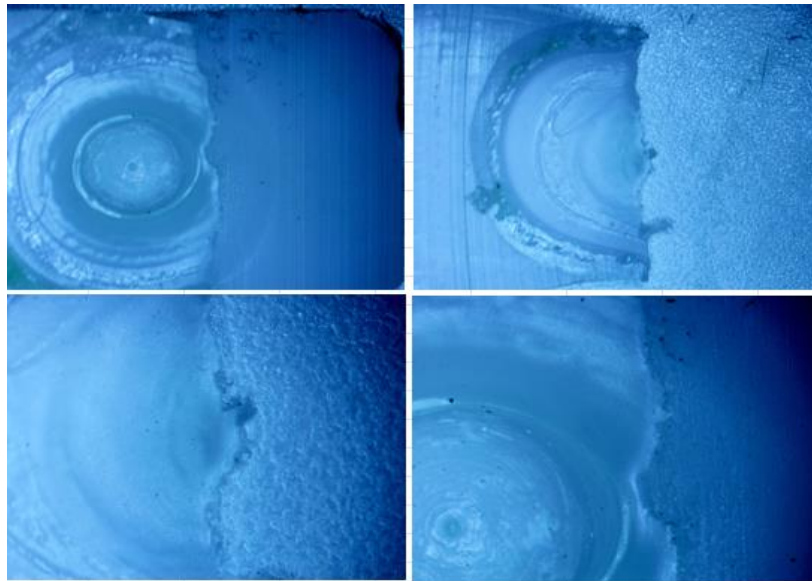
Şekil 4.60. C5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.

Çalışmada birinci kaynak takımıyla elde edilen numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop analizleri, belirli parametre kombinasyonlarının çekme kuvveti üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymuştur. 1400 d/d devir sayısı, 150 saniye bekleme süresi, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı parametreleriyle üretilen B4 numunesinde 2412 N ile diğer numunelere kıyasla en yüksek çekme kuvveti elde edilmiştir. Bu numunede gözlenen belirgin çekme lifleri, yüksek çekme dayanımını doğrulayan önemli bir göstergedir. Benzer şekilde, 700 d/d devir sayısı, 175 saniye bekleme süresi ile işlenen ve 2354 N çekme kuvveti elde edilen A5 numunesinde de yoğun çekme lifleri gözlenmiştir. A5 numunesinde meydana gelen bu lifli yapı, kopmanın sünek bir karakter taşıdığını ve yüksek dayanımın bu yapıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 2100 d/d devir sayısı ve 175 saniye bekleme süresiyle elde edilen, 2135 N çekme

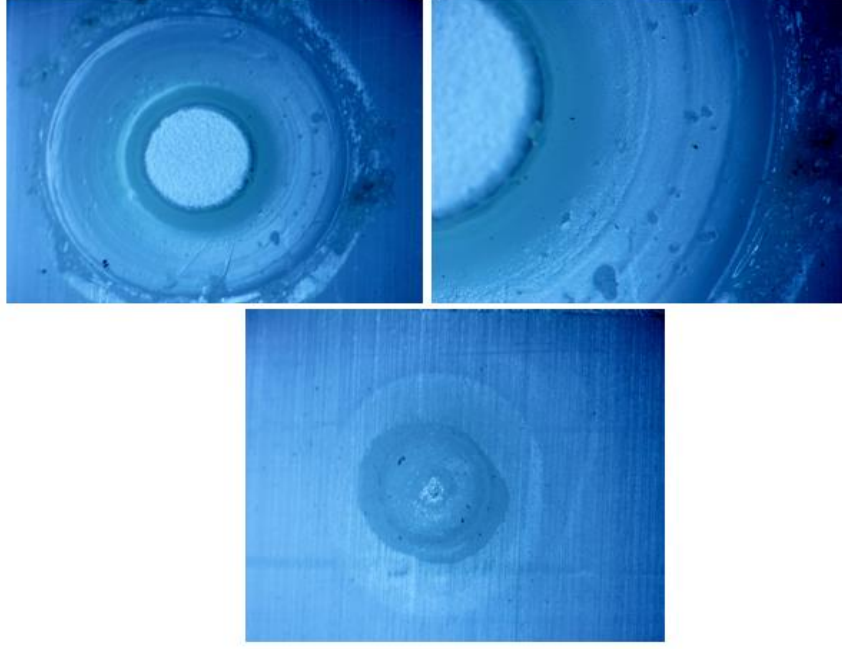
kuvvetine sahip C5 numunesinde de benzer şekilde sünek kopma özellikleri belirlenmiştir. Bu durum, kaynak sırasında oluşan ısıнын, malzemenin en uygun şekilde yumuşamasını ve hamur haline gelmesini sağladığını, bunun da çekme dayanımına olumlu katkı sunduğunu göstermektedir. Öte yandan, 1400 d/d devir sayısı ve yalnızca 50 saniyelik bekleme süresiyle üretilen B1 numunesinde, elde edilen 1250 N çekme kuvveti, diğer numunelere kıyasla oldukça düşük kalmıştır. Optik mikroskop görüntüleri, bu düşük değerin nedenini açıklamaktadır: Kaynak bölgesinde yeterli çapta birleşme sağlanamamış, nüfuziyet sınırlı kalmış ve çekme liflerinin oluşumu zayıf gerçekleşmiştir. Bu bulgular, numunenin yeterli sünekliğe ulaşamadığını ve bu nedenle mukavemetin düşük kaldığını ortaya koymaktadır.

4.2.2. İkinci Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi

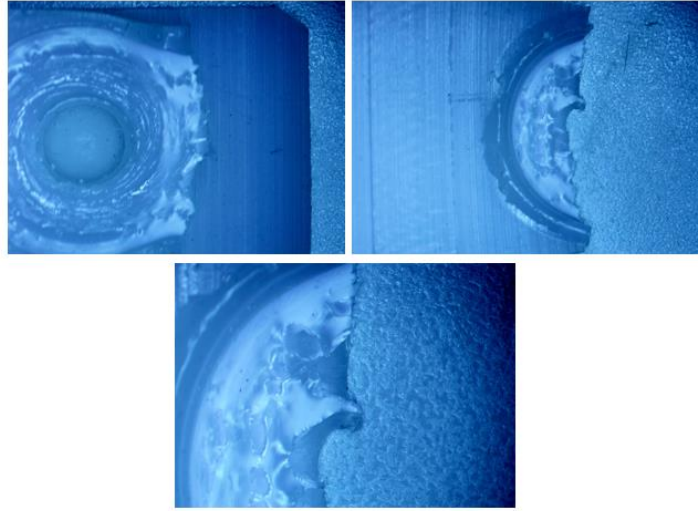
İkinci takım ile yapılan deneylerde, 6 mm sabit dalma derinliğinde, 100 mm/dak sabit dalma hızı, 700 d/d devir sayısı ve 125 saniye bekleme süresiyle 2111 N çekme kuvveti elde edilen D3 numunesi, 1400 d/d devir sayısı ve 50 saniye bekleme süresi ile 1060 N çekme kuvveti elde edilen E1 numunesi ve 2100 d/d devir sayısı ile 175 saniye bekleme süresiyle 2049 N çekme kuvveti elde edilen F5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te bu numunelerin görselleri verilmiştir.



Şekil 4.61. D3 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.62. E1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



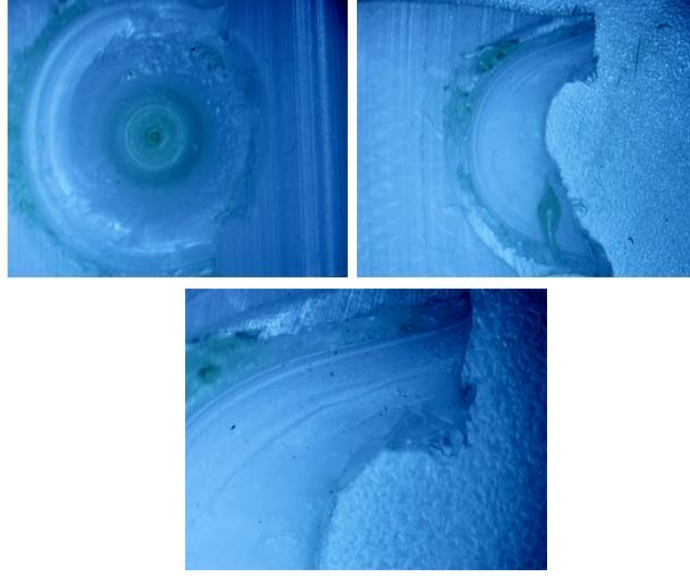
Şekil 4.63. F1 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.

Çalışmada, ikinci kaynak takımıyla elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen optik mikroskop analizleri, belirli kaynak parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini net bir biçimde ortaya koymuştur. 700 d/d devir sayısı, 125 saniyelik bekleme süresi, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı parametreleriyle üretilen D3 numunesinde, 2111 N ile diğer numunelere kıyasla en yüksek çekme kuvveti elde edilmiştir. Bu numunede gözlenen belirgin çekme lifleri, yüksek dayanımı doğrulayan önemli bulgular sunmaktadır. Benzer şekilde, 2100 d/d devir sayısı ve 175 saniyelik

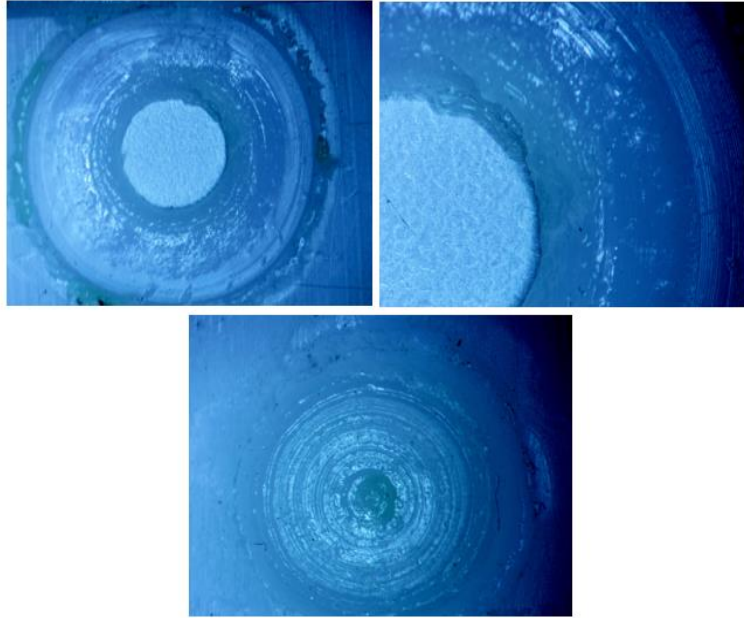
bekleme süresiyle hazırlanan F5 numunesinde 2049 N'luk çekme kuvveti değerine ulaşılmış ve bu numunede de yoğun çekme lifleri tespit edilmiştir. Her iki numunede de gözlemlenen lifli yapı, kopmanın sünek bir mekanizmayla gerçekleştiğini ve bu durumun malzemenin mekanik dayanımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu durum, kaynak sırasında oluşan ısının, malzemenin en uygun şekilde yumuşamasını ve hamur haline gelmesini sağladığını, bunun da çekme mukavemetini artırdığını ortaya koymaktadır. Öte yandan, 1400 d/d devir sayısı ve 50 saniyelik bekleme süresiyle hazırlanan E1 numunesinde 1060 N'luk oldukça düşük bir çekme kuvveti ölçülmüştür. Optik mikroskop görüntülerinde, bu numunede kaynak havuzundan dışarı çıkan ve kaynak bölgesinin çevresine yayılan malzeme tespit edilmiştir. Bu durum, kaynak bölgesinde yeterli malzeme birikiminin sağlanamamasıyla ilişkilendirilmiş ve çekme dayanımının düşmesine neden olmuştur. D3 numunesinde gözlenen, kopma bölgesindeki daha fazla hasar ve daha uzun çekme lifleri, bu numunede elde edilen en yüksek çekme dayanımını açıklayan önemli göstergelerdendir. Ayrıca, optik mikroskop altında yapılan gözlemlerde, D3 ve F5 numunelerinin karıştırma sürelerinin E1 numunesine göre daha uzun olması nedeniyle, kaynak nüfuziyetinin daha fazla olduğu görülmüştür. Nüfuziyetin artmasıyla birlikte çekme kuvveti değerlerinde meydana gelen artış, bu parametrelerin kaynak kalitesine olan etkisini doğrulayan önemli veriler sunmaktadır.

4.2.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Yapılan SKNK Numunelerinin Çekme Deneyi Sonrasında Meydana Gelen Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop Yardımı ile İncelenmesi

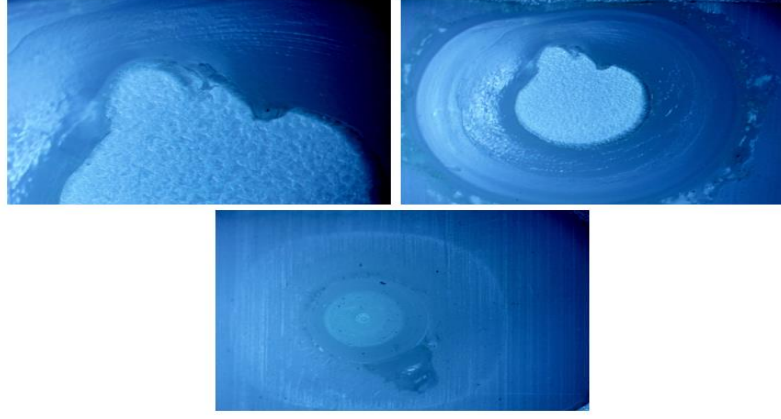
Üçüncü takım ile yapılan deneylerde 6 mm sabit dalma derinliğinde, 100 mm/dak sabit dalma hızı, 1400 d/d devir sayısı ve 175 saniye bekleme süresiyle 2082 N çekme kuvveti elde edildiği, H5 numunesi, 1400 d/d devir sayısı ve 100 saniye bekleme süresi ile 1606 N çekme kuvveti elde edilen H2 numunesi, 2100 d/d devir sayısı ve 175 saniye bekleme süresi ile 1139 N çekme kuvveti elde edilen K5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.64, Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da bu numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.64. H5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.65. H2 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.66. K5 numunesinin optik mikroskop görüntüleri.

Çalışmada, üçüncü kaynak takımıyla elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen optik mikroskop analizleri, belirli kaynak parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymuştur. 1400 d/d devir sayısı, 175 saniyelik bekleme süresi, 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı parametreleriyle üretilen H5 numunesinde 2082 N ile diğer numunelere kıyasla en yüksek çekme kuvveti elde edilmiştir. Bu numunede gözlemlenen belirgin lifli yapı, kopmanın sünek bir mekanizmayla gerçekleştiğini ve bu durumun malzemenin mekanik dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu bulgular, kaynak sırasında oluşan ısının, malzemenin en uygun şekilde yumuşamasını ve hamur haline gelmesini sağladığını, bunun da çekme dayanımına olumlu katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. 1400 d/d devir sayısı ve 100 saniyelik bekleme süresiyle hazırlanan H2 numunesinde ise 1606 N'luk çekme kuvveti elde edilmiştir. Ancak bu numunede yoğun çekme lifleri gözlenememiştir. Optik mikroskop görüntülerinde, kaynak havuzundan dışarı taşmış ve kaynak bölgesinin çevresine yayılmış malzeme tespit edilmiştir. Bu durum, kaynak bölgesinde yeterli malzeme birikiminin sağlanamamasıyla ilişkilendirilmiş ve bu eksikliğin çekme dayanımının düşmesine neden olduğu anlaşılmıştır. Öte yandan, 2100 d/d devir sayısı ve 175 saniyelik bekleme süresi ile hazırlanan K5 numunesinde 1139 N'luk bir çekme kuvveti ölçülmüştür. Bu numunede karıştırma işlemi sonucunda yeterli kaynak nüfuziyeti sağlanamamıştır. Kopma görünümüleri incelendiğinde, kaynak bölgesi içerisinde bulunan delik ve boşlukların çentik etkisi yaratarak çekme olayının başlar başlamaz ani kırılmalara sebep olduğu ve bu nedenle uzama gerçekleşdikten kısa bir süre sonra düşük çekme dayanımı elde edildiği anlaşılmaktadır. H5 numunesinde gözlenen

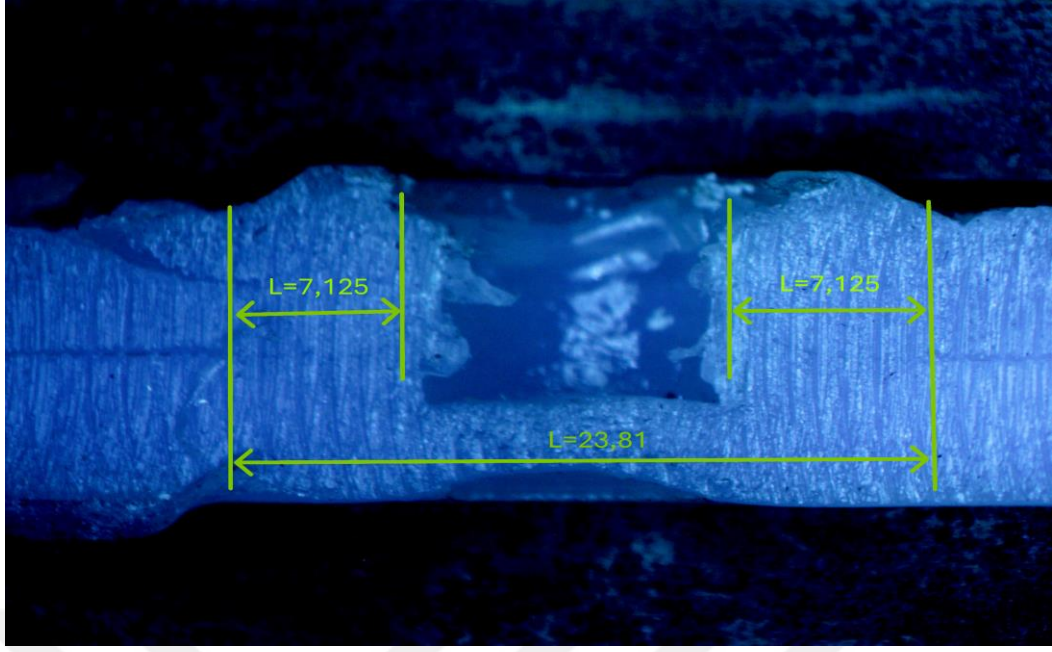
daha fazla hasar ve uzun çekme lifleri, bu numunede elde edilen en yüksek çekme dayanımını destekleyen önemli bulgular olarak değerlendirilmiştir.

4.3. KAYNAKLI NUMUNELERİN ENİNE KESİTLERİNİN OPTİK MİKROSKOP İLE ANALİZİ VE KAYNAK BÖLGESİ TESPİTİ

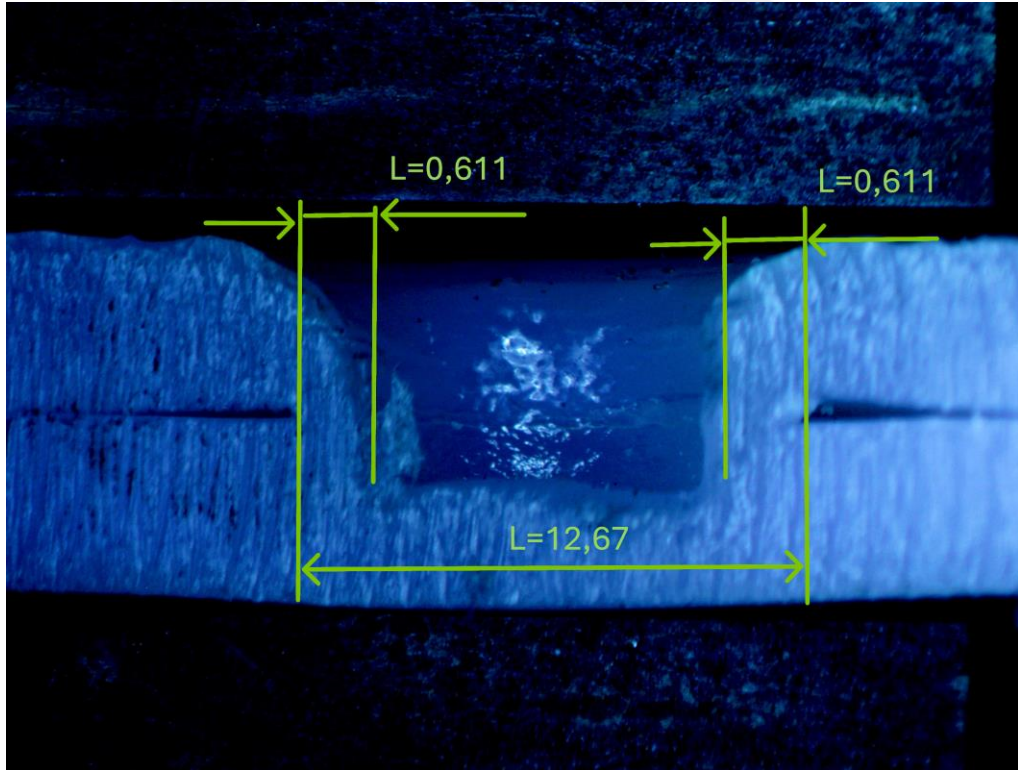
Bu bölümde, çekme deneyi uygulanmamış çeşitli parametrelerle üretilmiş kaynaklı numunelerin, kaynak bölgelerinin belirlenmesi amacıyla enine kesitleri hazırlanarak optik mikroskop altında yapılan analizlerine yer verilmiştir.

4.3.1. Birinci Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi

100 mm/dak dalma hızı, 6 mm dalma derinliği sabit tutularak, farklı bekleme sürelerinde elde edilen SKNK numuneleri için kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturulup enine kesit incelemesi için uygun duruma getirildikten sonra optik mikroskop yardımı ile alınan görüntüler yoluyla kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir. Birinci takım için optik mikroskop altında incelemek üzere enine kesiti alınan numuneler sırasıyla 700 d/d devir sayısında ve 175 sn karıştırma süresine sahip olan A5 numunesi ve 1400 d/d devir sayısında ve 50 sn karıştırma süresine sahip olan B1 kodlu numunelerdir. Bu numunelerin enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.67, Şekil 4.68’te alt ve üst parçadaki kaynaşmış yapının et kalınlıklarının karşılıklı olarak boyutlandırılması ile bu karşılıklı boyutlandırılmış bölgenin arasındaki uzunluğunun boyutlandırılması birlikte verilmiştir. Burada önemli olan alt ve üst parçada meydana gelen kaynaşmış bölgenin et kalınlığıdır. Bu et kalınlığının artması numunenin daha yüksek mukavemet göstermesi anlamına gelmektedir. A5 ve B1 kodlu numunelerin çekme kuvveti değerleri sırasıyla 2354 N ve 1250 N’dur. A5 kodlu numunenin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığının B1 kodlu numuneden fazla olması meydana gelen çekme kuvveti sonucunu açıklayan önemli bir veridir.



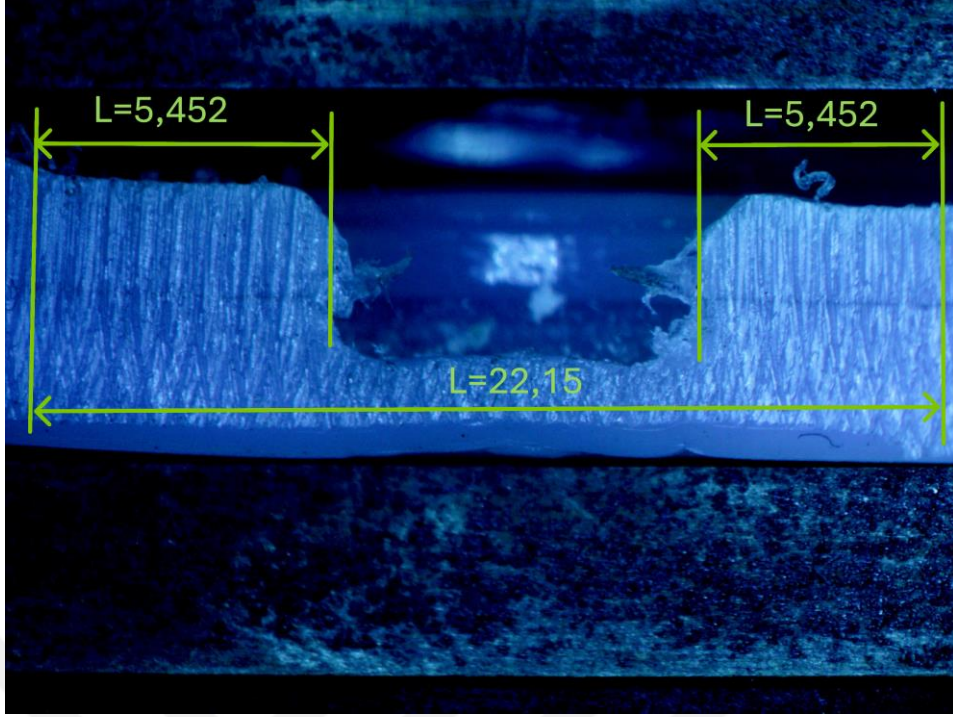
Şekil 4.67. A5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 2354 N).



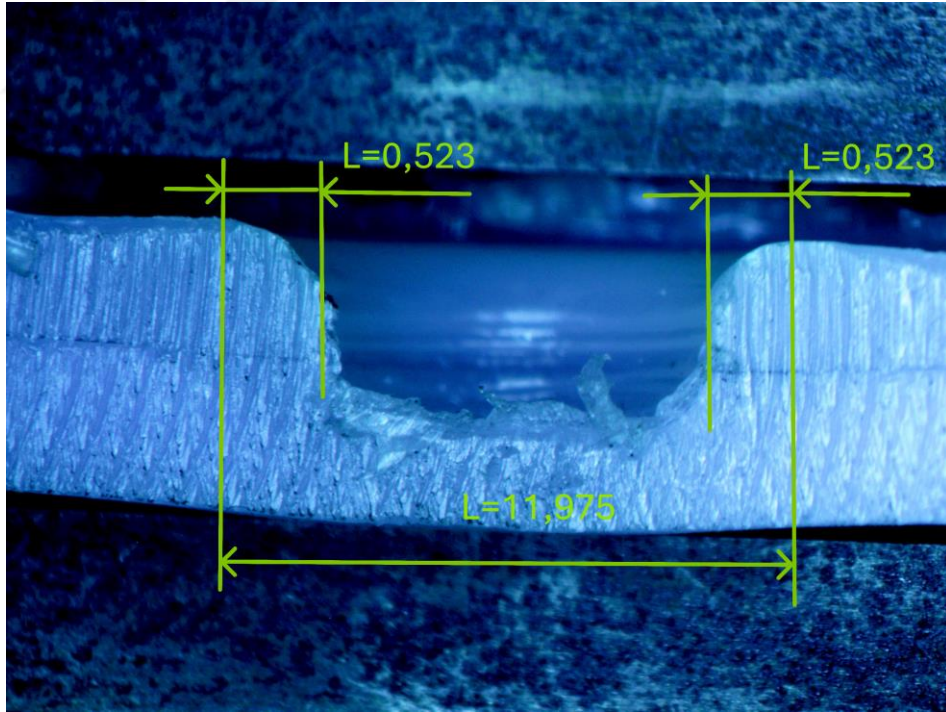
Şekil 4.68. B1 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1250 N).

4.3.2. İkinci Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi

100 mm/dak dalma hızı, 6 mm dalma derinliği sabit tutularak, farklı bekleme sürelerinde elde edilen SKNK numuneleri için kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturulup enine kesit incelemesi için uygun duruma getirildikten sonra optik mikroskop yardımı ile alınan görüntüler yoluyla kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir. İkinci takım için optik mikroskop altında incelemek üzere enine kesiti alınan sırasıyla 2100 d/d devir sayısında ve 175 sn karıştırma süresine sahip olan F5 numunesi ve 1400 d/d devir sayısında ve 50 sn karıştırma süresine sahip olan E1 kodlu numunelerdir. Bu numunelerin enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.69, Şekil 4.70’te alt ve üst parçadaki kaynaşmış yapının et kalınlıklarının karşılıklı olarak boyutlandırılması ile bu karşılıklı boyutlandırılmış bölgenin arasındaki uzunluğunun boyutlandırılması birlikte verilmiştir. Burada önemli olan alt ve üst parçada meydana gelen kaynaşmış bölgenin et kalınlığıdır. Bu et kalınlığının artması numunenin daha yüksek mukavemet göstermesi anlamına gelmektedir. F5 ve E1 kodlu numunelerin çekme kuvveti değerleri sırasıyla 2049N ve 1060 N’dur. F5 kodlu numunenin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığının E1 kodlu numuneden fazla olması meydana gelen çekme kuvveti sonucunu açıklayan önemli bir veridir.



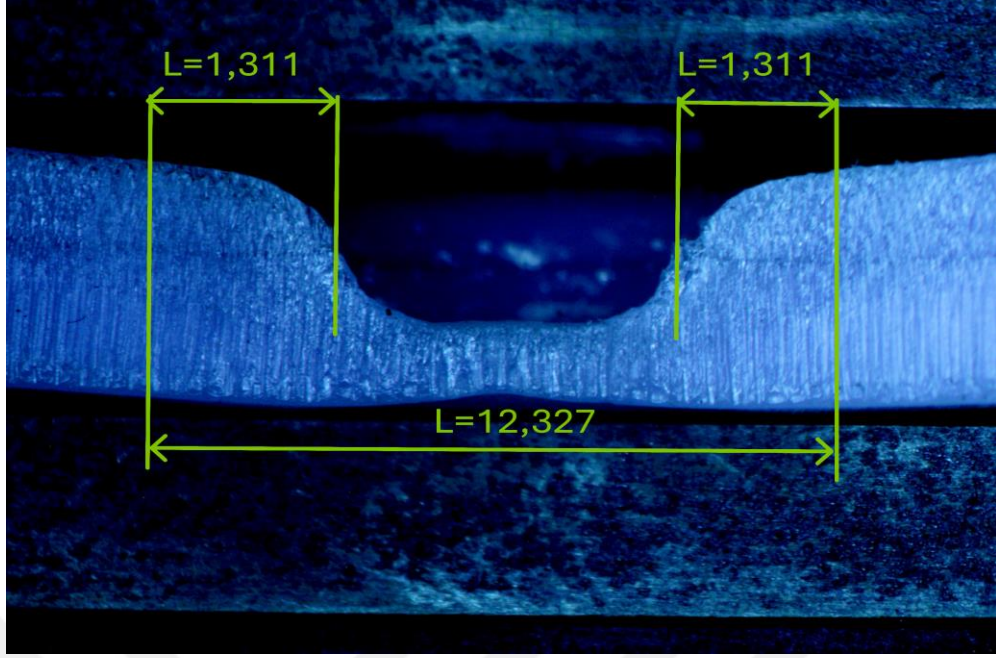
Şekil 4.69. F5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 2049 N).



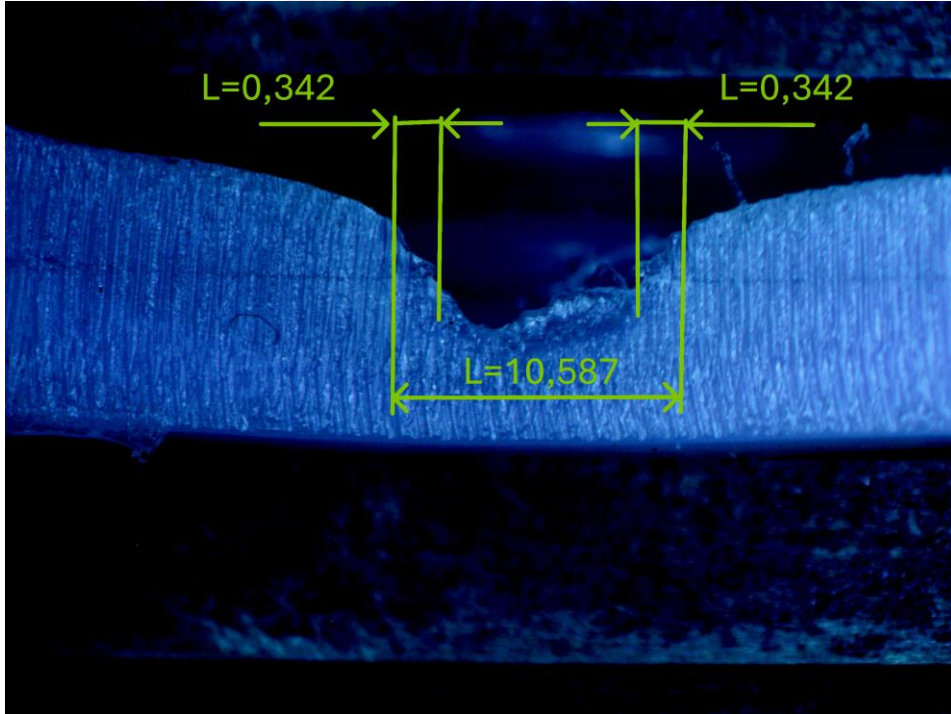
Şekil 4.70. E1 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1060 N).

4.3.3. Üçüncü Kaynak Takımı ile Çeşitli Parametrelerde Oluşturulan Numunelerin Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri ile İncelenmesi

100 mm/dak dalma hızı, 6 mm dalma derinliği sabit tutularak, farklı bekleme sürelerinde elde edilen SKNK numuneleri için kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturulup enine kesit incelemesi için uygun duruma getirildikten sonra optik mikroskop yardımı ile alınan görüntüler yoluyla kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir. Üçüncü takım için optik mikroskop altında incelemek üzere enine kesiti alınan sırasıyla 2100 d/d devir sayısında ve 175 sn karıştırma süresine sahip olan K5 ve 1400 d/d devir sayısında ve 100 sn karıştırma süresine sahip olan H2 kodlu numunelerdir. Bu numunelerin enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.71, Şekil 4.72’de alt ve üst parçadaki kaynaşmış yapının et kalınlıklarının karşılıklı olarak boyutlandırılması ile bu karşılıklı boyutlandırılmış bölgenin arasındaki uzunluğunun boyutlandırılması birlikte verilmiştir. Burada önemli olan alt ve üst parçada meydana gelen kaynaşmış bölgenin et kalınlığıdır. Bu et kalınlığının artması numunenin daha yüksek mukavemet göstermesi anlamına gelmektedir. K5 ve H2 kodlu numunelerin çekme kuvveti değerleri sırasıyla 1139 N ve 1606 N’dur. H2 kodlu numunenin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığının K5 kodlu numuneden fazla olması meydana gelen çekme kuvveti sonucunu açıklayan önemli bir veridir.



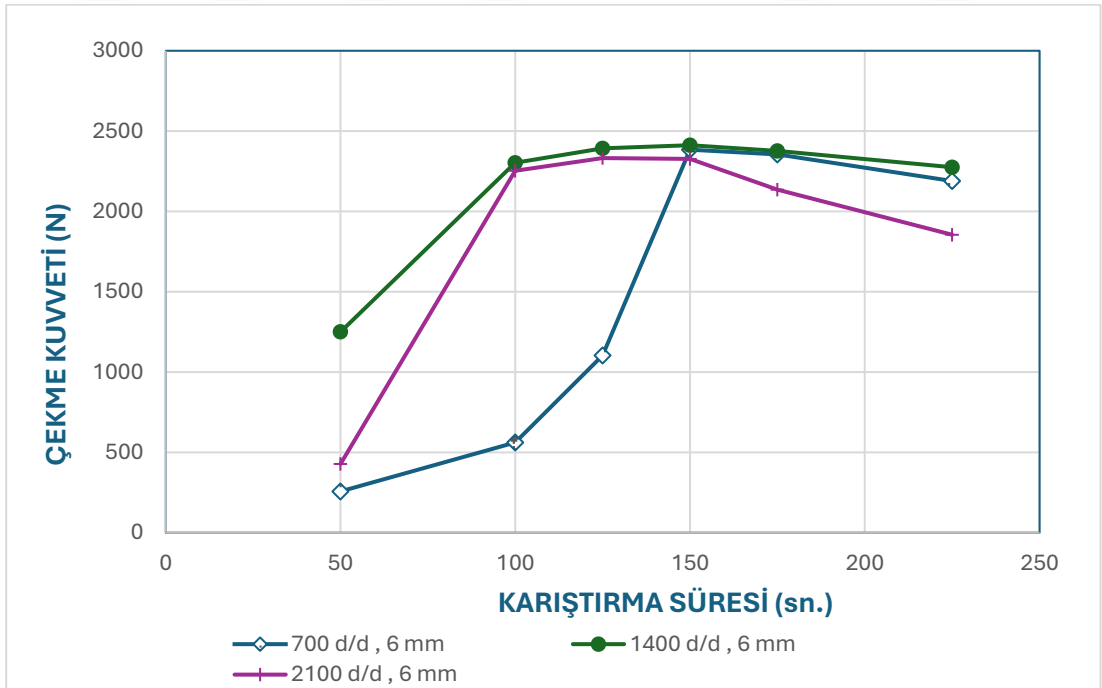
Şekil 4.71. H2 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1606 N).



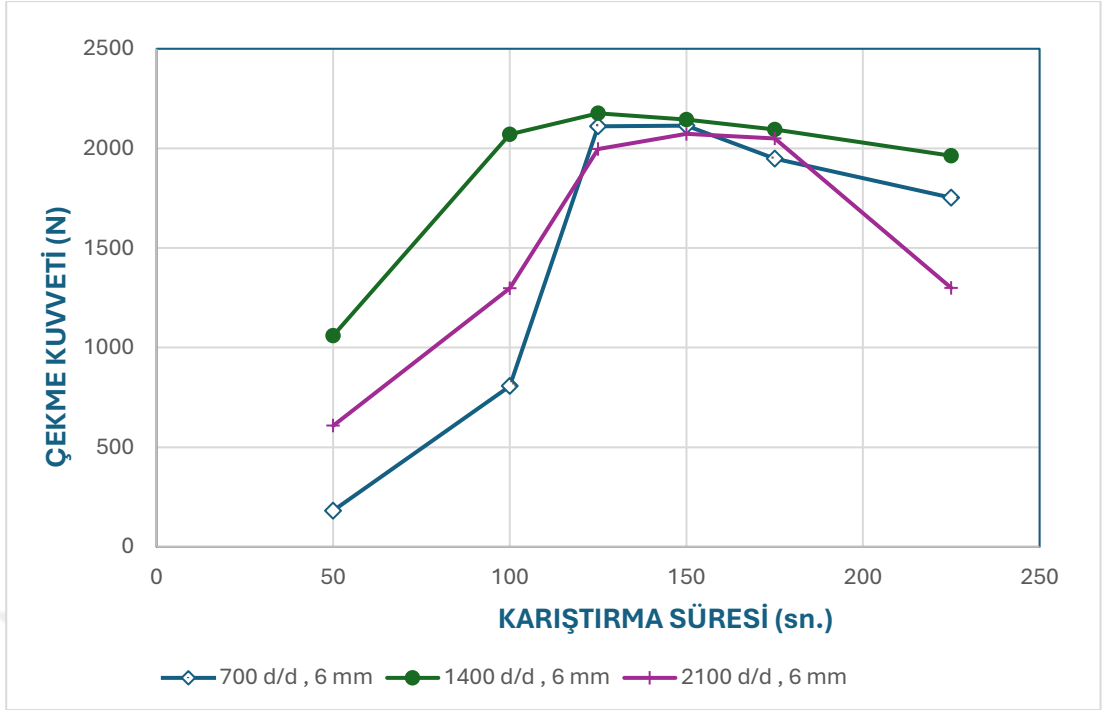
Şekil 4.72. K5 Numunesinin enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü (elde edilen çekme kuvveti 1139 N).

4.4. FARKLI DEVİR SAYILARINDA ELDE EDİLEN ÇEKME KUVVETİ SONUÇLARININ KIYASLANMASI

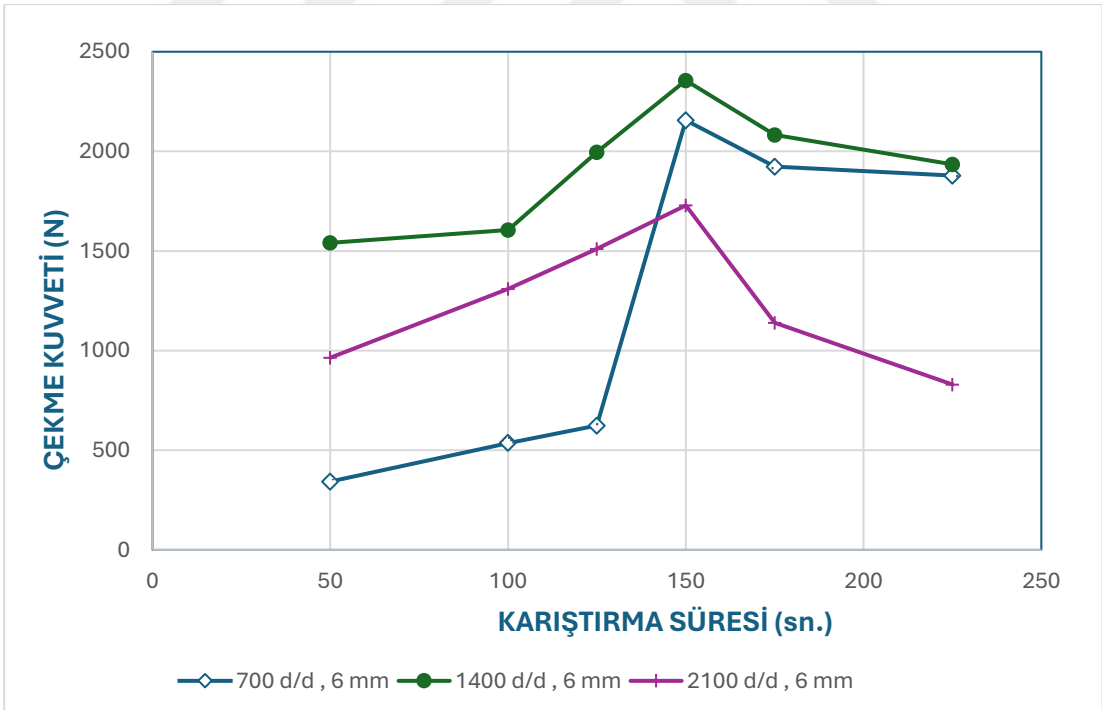
Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te sabit dalma derinliği ve farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetleri kıyaslanmıştır. Parametrelerden bekleme süresinin artmasıyla çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde birinci kaynak takımı, ikinci kaynak takımı ve üçüncü kaynak takımı için optimum devir sayısı değerinin 1400 d/d olduğu görülmektedir. Birinci ve üçüncü kaynak takımı için en yüksek çekme kuvveti sonuçlarının 6 mm sabit dalma derinliğinde, 1400 d/d devir sayısı ve 150 saniye bekleme süresi parametrelerinde meydana geldiği, ikinci kaynak takımında ise 1400 d/d devir sayısı ve 125 saniye bekleme süresinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Birinci kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti asıl numunenin çekme kuvvetinin %91'ine, ikinci kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti asıl numunenin çekme kuvvetinin %82,12'sine ve üçüncü kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti asıl numunenin %88,9'una karşılık gelmektedir. Devir sayısı, dalma derinliği, bekleme süresi, dalma hızı parametrelerinin yanında takım tasarımı da çekme kuvveti sonuçlarına doğrudan etki eden çok önemli bir parametredir.



Şekil 4.73. Birinci takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.



Şekil 4.74. İkinci takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.



Şekil 4.75. Üçüncü takım için farklı devir sayılarında elde edilen çekme kuvvetlerinin kıyaslanması.

5. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen malzeme, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle; üç farklı kaynak takımı, sabit dalma derinliği, sabit dalma hızı, değişen bekleme süreleri ve farklı devir sayısı parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Belirlenen parametreler ile SKNK yöntemi uygulandığında, kaynak bölgelerinin oluşumu, çekme testiyle elde edilen çekme kuvveti değerlerinin değişimi ve kopma bölgelerine bu parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Birinci kaynak takımı ile farklı devir sayıları, farklı bekleme sürelerinde yapılan 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızına sahip tüm numunelerde sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemine ait karakteristik boşluğun meydana geldiği ve kaynak işlemi sırasında yumuşayan plastik malzemenin parametrelere bağlı olarak farklı oranlarda, kaynak takımı etrafına sıvandığı görülmüştür. Takım 1 ile yapılan deneylerde, çekme testi sonrasında oluşan kopma bölgeleri incelendiğinde, kopmanın pim esaslı, omuz esaslı ve numunenin kaynak bölgesi çevresindeki yanaklardan plastik malzemenin sünek özellik gösterip kopması sonucu oluşan üç farklı kopma türü görülmüştür.

2. İkinci kaynak takımı ile farklı devir sayıları farklı bekleme sürelerinde yapılan 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızına sahip numunelerde yonteme ait karakteristik boşluğun görüldüğü ve kaynak işlemi sırasında yumuşayan plastik malzemenin parametrelere bağlı olarak farklı oranlarda, kaynak takımı etrafına sıvandığı, bu kaynak takımı ile yapılan deneylerde de görülmüştür.

3. Üçüncü kaynak takımı ile farklı devir sayıları farklı bekleme sürelerinde yapılan 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızına sahip numunelerde yonteme ait karakteristik boşluğun görüldüğü ve kaynak işlemi sırasında yumuşayan plastik malzemenin parametrelerin etkisiyle değişen oranlarda kaynak takımı çevresine yayıldığı ve bu durumun yapılan deneylerle de gözlemlendiği tespit edilmiştir.

4. Yapılan bu deneysel çalışmanın sonucunda, farklı takım tasarımlarının, farklı devir sayısı ve farklı bekleme süresi değerlerinin, elde edilen çekme kuvvetlerine ve kaynaklı numunelerin kopma davranışlarına çok önemli etkileri olan parametreler olduğu tespit edilmiştir.

5. Birinci, ikinci ve üçüncü kaynak takımı ile elde edilen tüm çekme testi sonuçları incelendiğinde, belirli bir bekleme süresine kadar çekme kuvvetinin düzenli artıp daha sonrasında düzenli azaldığı, sonuç olarak bir maksimum noktanın yakalandığı görülmektedir. Böylece, bu deneysel çalışmada kullanılan her bir takım için, maksimum çekme kuvvetine ulaşılan, optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir.

6. Birinci kaynak takımı için 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği sabit tutularak 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında yapılan deneysel çalışmada optimum kaynak parametreleri, 150 sn bekleme süresi ve 1400 d/d devir sayısı olarak tespit edilmiştir. Optimum kaynak parametrelerine sahip numunenin kodu B4'tür ve 2412 N çekme kuvveti değerine ulaşılmış olup, birinci kaynak takımı için bu değer en yüksek çekme kuvveti değeridir.

7. İkinci kaynak takımı için 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği sabit tutularak 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında yapılan deneysel çalışmada optimum kaynak parametreleri, 125 sn bekleme süresi ve 1400 d/d devir sayısı olarak tespit edilmiştir. Optimum kaynak parametrelerine sahip numunenin kodu E3'tür ve 2176 N çekme kuvveti değerine ulaşılmış olup, ikinci kaynak takımı için bu değer en yüksek çekme kuvveti değeridir.

8. Üçüncü kaynak takımı için 100 mm/dak dalma hızı ve 6 mm dalma derinliği sabit tutularak 50, 100, 125, 150, 175, 225 sn bekleme sürelerinde 700 d/d, 1400 d/d ve 2100 d/d devir sayılarında yapılan deneysel çalışmada optimum kaynak parametreleri, 150 sn bekleme süresi ve 1400 d/d devir sayısı olarak tespit edilmiştir. Optimum kaynak parametrelerine sahip numunenin kodu H4'tür ve 2356 N çekme kuvveti değerine ulaşılmış olup, üçüncü kaynak takımı için bu değer en yüksek çekme kuvveti değeridir.

9. Üç farklı kaynak takımı için 6 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı sabit olduğundan ve her üç takım için optimum kaynak parametreleri kıyaslandığında, birinci ve üçüncü takım için optimum bekleme süresinin 150 sn ve optimum devir sayısının 1400 d/d devir sayısı olduğu, ikinci takımda ise optimum bekleme süresinin 125 sn ve optimum devir sayısının 1400 d/d devir sayısı olduğu anlaşılmıştır.

10. Birinci kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti 2412 N değeri, asıl numuneden elde edilen 2650 N olan çekme kuvveti ile kıyaslandığında, asıl numunenin çekme kuvvetinin %91'ine karşılık gelmektedir.

11. İkinci kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti 2176 N değeri, asıl numuneden elde edilen 2650 N olan çekme kuvveti ile kıyaslandığında, asıl numunenin çekme kuvvetinin %82,12'sine karşılık gelmektedir.

12. Üçüncü kaynak takımı ile elde edilen en yüksek çekme kuvveti 2356 N değeri, asıl numuneden elde edilen 2650 N olan çekme kuvveti ile kıyaslandığında, asıl numunenin çekme kuvvetinin %88,9'una karşılık gelmektedir.

13. SKNK numunelerinin çekme deneyi sonrası kopma bölgeleri optik mikroskop altında incelenmiştir. Kopma bölgelerinin optik mikroskop yardımı ile yakınlaraştırılarak görüntüleri alınmış olup, bu görüntülere detaylı olarak ilgili bölümde yer verilmiştir. Yapılan optik mikroskop incelemesi neticesinde, elde edilen çekme kuvveti değerleri arttıkça numunelerin kopma bölgelerinde meydana gelen hasarlarının arttığı ve çekme liflerinin daha fazla uzamaya ve kopmaya maruz kaldığı görülmüştür. Elde edilen çekme kuvveti değerleri azaldıkça meydana gelen hasarın azaldığı optik mikroskop incelemesi ile elde edilen görüntüler yoluyla tespit edilmiştir. Yapılan bu incelemenin, çekme testi sonuçlarını desteklediği açıkça görülmüştür.

14. Birinci kaynak takımı ile 100 mm/dak dalma hızı, 6 mm sabit dalma derinliği ve farklı bekleme sürelerinde, 750 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d parametrelerinde yapılan deneylerde kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, A5 ve B1 numunelerinin ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturularak enine kesit incelemesi için uygun duruma getirilmiş olup optik mikroskop ile alınan görüntüler sayesinde kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir ve ilgili bölümde bu sonuçlara detaylı olarak yer verilmiştir. Enine kesit incelemesi neticesinde A5 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 7,125 mm, B1 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 0,611 olarak ölçülmüştür. Kaynaşmış yapının et kalınlığı arttıkça, elde edilen çekme kuvveti değerinin de arttığı belirlenmiştir.

15. İkinci kaynak takımı ile 100 mm/dak dalma hızı, 6 mm sabit dalma derinliği ve farklı bekleme sürelerinde, 750 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d parametrelerinde yapılan deneylerde kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, F5 ve E1 numunelerinin ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturularak enine kesit incelemesi için uygun

duruma getirilmiş olup optik mikroskop ile alınan görüntüler sayesinde kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir ve ilgili bölümde bu sonuçlara detaylı olarak yer verilmiştir. Enine kesit incelemesi neticesinde F5 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 5,452 mm, E1 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 0,523 olarak ölçülmüştür. Kaynaşmış yapının et kalınlığı arttıkça, elde edilen çekme kuvveti değerinin de arttığı belirlenmiştir.

16. Üçüncü kaynak takımı ile 100 mm/dak dalma hızı, 6 mm sabit dalma derinliği ve farklı bekleme sürelerinde, 750 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d parametrelerinde yapılan deneylerde kaynak bölgelerinin tespit edilmesi amacıyla, H2 ve K5 numunelerinin ilgili parametrelerdeki numuneler yeniden oluşturularak enine kesit incelemesi için uygun duruma getirilmiş olup optik mikroskop ile alınan görüntüler sayesinde kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının durumu incelenmiştir ve ilgili bölümde bu sonuçlara detaylı olarak yer verilmiştir. Enine kesit incelemesi neticesinde H2 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 1,311 mm, K5 numunesinin kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapının et kalınlığı 0,342 olarak ölçülmüştür. Kaynaşmış et kalınlığı arttıkça, elde edilen çekme kuvveti değerinin de arttığı belirlenmiştir.

17. Çalışmada CNC Dik İşleme Tezgâhı tercih edilmiş, parametreler ISO G, M sistemine uygun şekilde programlanarak tezgâhın otomatik olarak uygulaması sağlanmıştır. Böylece operatör kaynaklı hatalar minimuma indirgenmiş ve parametrelerin tam uygulanması sayesinde yüksek hassasiyetle numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Mert. Ş, ‘Polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi’, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2010.
- [2] Z. Feng, S. Diamond, M. L. Santella, T. Y. Pan ve N. Li, *High Strength Weight Reduction Materials – Friction Stir Welding and Processing of Advanced Materials*, Oak Ridge National Laboratory, ABD, Rapor No: DE-AC05-00OR22725, 2004.
- [3] Z. Feng, M. L. Santella, S. A. David, R. J. Steel, S. M. Packer, T. Pan, M. Kuo ve R. S. Bhatnagar, “Friction stir spot welding of advanced high-strength steels: A feasibility study,” *SAE World Congress*, Detroit, Michigan, ABD, 2005, ss. 11–14.
- [4] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Cheadle, Z. Feng ve M. L. Santella, “Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum,” *Materials Science and Engineering A*, c. 441, ss. 79–96, 2006.
- [5] A. A. Arıcı ve Ş. Mert, “Polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi,” *PAGEV Plastik Dergisi*, sayı 95, ss. 152–162, 2007.
- [6] P. C. Lin, J. Pan ve T. Pan, “Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool,” *International Journal of Fatigue*, c. 30, ss. 74–89, 2008.
- [7] P. C. Lin, J. Pan ve T. Pan, “Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool,” *International Journal of Fatigue*, c. 30, ss. 90–105, 2008.
- [8] Ş. Mert ve A. A. Arıcı, “Friction stir spot welding method using in polypropylene sheet materials joining,” *12th International Materials Symposium*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2008, ss. 1150–1156.
- [9] V. X. Tran, J. Pan ve T. Pan, “Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens,” *International Journal of Fatigue*, c. 30, ss. 2175–2190, 2008.
- [10] V. X. Tran, J. Pan ve T. Pan, “Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6

sheets,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, ss. 3724–3739, 2009.

- [11] Ş. Mert ve S. Mert, “Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin incelenmesi,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 2, sayı 1, ss. 26–35, 2013.
- [12] Ş. Mert ve S. Mert, “Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde kullanılan makina ve ekipmanların incelenmesi,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi (Journal of Advanced Technology Sciences)*, c. 2, sayı 3, ss. 121–129, 2013.
- [13] Ş. Mert ve S. Mert, “Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin otomotiv sektöründeki yeri,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 3, sayı 2, ss. 432–438, 2015.
- [14] M. Fujimoto, S. Koga, N. Abe, Y. S. Sato ve H. Kokawa, “Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding,” *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 13, sayı 7, ss. 663–670, 2008.
- [15] Y. H. Yin, N. Sun, T. H. North ve S. S. Hu, “Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 210, sayı 14, ss. 2062–2070, 2010.
- [16] M. I. Khan, M. L. Kuntz, P. Su, A. Gerlich, T. North ve Y. Zhou, “Resistance and friction stir spot welding of DP600: A comparative study,” *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 12, sayı 2, ss. 175–182, 2007.
- [17] A. A. Arıcı ve Ş. Mert, “Friction stir spot welding of polypropylene,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 27, sayı 18, ss. 2001–2004, 2008.
- [18] İ. Aslan ve H. Yaka, “Friction stir welding (FSW) and friction stir spot welding (FSSW) on polycarbonates: A review,” *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, c. 23, sayı 2, ss. 54–63, 2024.
- [19] Rosendo, T., Mazzaferro, J., Mazzaferro, C., Tier, M., Ramos, F., Regulý, A., Strohaecker, T. ve dos Santos, J. (2013). Friction spot processes – FSSW and FSpW. *HZG Araştırma Enstitüsü’nde poster sunumu olarak sunuldu*, Almanya. Erişim: 28.03.2013, http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut_fuer_werkstoffforschung/wmp/poster-apresentacao-gkss2.pdf

- [20] Ş. Mert ve A. A. Arıcı, “Design of optimal joining for friction stir spot welding of polypropylene sheets,” *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 16, sayı 6, ss. 522–527, 2011.
- [21] F. Yusof, Y. Miyashita, N. Seo, Y. Mutoh ve R. Moshwan, “Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate,” *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 17, ss. 544–549, 2012.
- [22] M. K. Bilici ve A. I. Yukler, “Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets,” *Materials and Design*, c. 33, ss. 545–550, 2012.
- [23] M. K. Bilici ve A. I. Yukler, “Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets,” *Materials and Design*, c. 33, ss. 145–152, 2012.
- [24] A. Mostafapour ve F. T. Asad, “Investigations on joining of nylon 6 plates via novel method of heat assisted friction stir welding to find the optimum process parameters,” *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 21, sayı 8, ss. 660–669, 2016.
- [25] Y. Yan, Y. Shen, W. Zhang ve W. Guan, “Effects of friction stir spot welding parameters on morphology and mechanical property of modified cast nylon 6 joints produced by double-pin-tool,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 92, ss. 2511–2523, 2017.
- [26] G. Çakır, Ş. Mert ve S. Mert, “CNC tezgahta polipropilen malzemeye sürtünme karıştırma nokta kaynağının uygulanması ve optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi,” *ISMSIT 2017 – 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, Tokat, Türkiye, 2017, ss. 36–41.
- [27] G. Çakır, Ş. Mert ve S. Mert, “Polipropilen malzemeye uygulanan sürtünme karıştırma nokta kaynağında takım geometrisinin bağlantı dayanımına etkisinin incelenmesi,” *ISMSIT 2017 – 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, Tokat, Türkiye, 2017, ss. 207–213.
- [28] Z. Parlar, ‘Poliamid malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğine sıcaklığın etkisinin deneysel olarak incelenmesi’ (Doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 2002.

- [29] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng ve S. A. David, “Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme,” *SAE International Technical Paper Series*, ABD, 2005, Bildiri No: 2005-01-1251.
- [30] S. Lathabai, M. J. Painter, G. M. D. Cantin ve V. K. Tyagi, “Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy,” *Scripta Materialia*, c. 55, ss. 899–902, 2006.
- [31] D. K. Pradhan, B. Sahu, D. K. Bagal, A. Barua, S. Jeet ve S. Prahhan, “Application of progressive hybrid RSM-WASPAS-grey wolf method for parametric optimization of dissimilar metal welded joints in FSSW process,” *Materials Today: Proceedings*, c. 50, sayı 5, ss. 766–772, 2022
- [32] M. Gürü ve H. Yalçın, *Malzeme Bilgisi*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2012.
- [33] M. Kutz, *Handbook of Materials Selection*, New York, ABD: John Wiley & Sons, 2001.
- [34] K. Onaran, *Malzeme Bilimi*, 3. baskı, İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 1991.
- [35] J. Wickert ve K. Lewis, (A. O. Ayhan, Çev.) *Makine Mühendisliğine Giriş*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2014.
- [36] W. F. Smith, (N. G. Kınikoğlu, Çev.) *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 3. baskı, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 2001.
- [37] M. P. Groover, (M. Yurdakul ve Y. T. İç, Çev.) *Modern İmalatın Prensipleri*, 4. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2016.
- [38] W. D. Callister ve D. G. Rethwisch, (K. Genel, Çev.) *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 8. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2014.
- [39] F. Kaya, *Ana Hatlarıyla Yapıştırıcılar*, İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 2004, ss. 277..
- [40] F. Kaya, *Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katkı Maddeleri*, İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 2005, ss. 37–120.

- [41] B. Beşergil, *Hampetrolden Petrokimyasallara El Kitabı*, Ankara, Türkiye: Gazi Kitabevi, 2007, ss. 531–599.
- [42] S. Kıralp, G. Özkoç, S. Erdoğan, P. Çamurlu, M. Doğan ve T. Baydemir, *Modern Çağın Malzemesi Plastikler*, Ankara, Türkiye: ODTÜ Yayıncılık, 2007, ss. 57–58.
- [43] M. Saçak, *Polimer Teknolojisi*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Gazi Kitabevi, 2014, ss. 78.
- [44] P. Jedrasiak ve H. R. Shercliff, “Small strain finite element modelling of friction stir spot welding of Al and Mg alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 263, ss. 207–222, 2019.
- [45] RÖCHLING Engineering, *Polystone Thermoplastics Characteristics and Applications*, 27 Temmuz 2014. Erişim: <http://www.roechling.com>
- [46] Ö. T. Savaşçı, N. Uyanık ve G. Akovalı, *Plastikler ve Plastik Teknolojisi*, Pagev Yayınları, 2002, s. 2, ss. 7–8, 12–16, 19–20, 24–25, 59, 306–307, 433–435, 501.
- [47] H. Yıldırım, *Plastiklere Uygulanan Kalite Kontrol Yöntemleri ve Plastiklere Katılan Katkı Maddeleri Seminer Notları*, İstanbul, Türkiye: MMO İstanbul Şubesi Yayınları, 2007, ss. 4, 23–25, 71–73.
- [48] F. Kaya, *Plastikler ve Katkı Maddeleri*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 2005, ss. 49–51.
- [49] M. Subaşı ve Ç. Karataş, “AISI 4140 çeliğinde elde edilen farklı sertliklerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisinin araştırılması,” *Politeknik Dergisi*, c. 14, sayı 4, ss. 289–295, 2011.
- [50] M. Subaşı ve Ç. Karataş, “AISI 4140 çeliğinde sertlik, yorulma dayanımı ilişkisi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 13, sayı 1, ss. 21–27, 2010.