KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİPROPİLEN MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Şenol MERT

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Armağan ARICI

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİPROPİLEN MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Şenol MERT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 ARALIK 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 12 ŞUBAT 2010

Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Aziz Armağan ARICI
(.....)

Üye
Prof. İbrahim UZMAN
(.....)

Üye
Prof.Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER
(.....)

Üye
Prof.Dr. Ahmet ÜNAL
(.....)

Üye
Yrd.Doç.Dr. Nurhan VATANSEVER
(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Fabrikasyon üretim veya tamir işlemleri gibi bir çok uygulamalarda polimerik malzemelerin kendi aralarında veya diğer malzemelerle birleştirilmesi gereklilik göstermektedir. Bu malzemelerin birleştirilmesi için uygulama şartlarına bağlı olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak plastik malzemelerin birleştirilme yöntemleri, mekanik bağlantı yöntemleri, yapıştırma yöntemleri ve kaynak yöntemleri olmak üzere sınıflandırılır. Yapıştırıcılar ve mekanik birleştirmeler oldukça yararlı birleştirme teknikleridir. Fakat kaynak, birleştirme sürelerinin genelde kısa olması, yüksek hacimli üretim kapasiteleri nedeniyle özellikle uygundur. Ayrıca kaynaklı parçalar, kolayca geri dönüşür veya yakılır böylece atık problemlerini hafifletir. Plastiklerin çentiğe karşı hassasiyetleri, perçin veya cıvata ile birleştirilmelerini zorlaştırır. Plastik folyelerin dikilmeleri halinde bile, dikişlerdeki oyuk yerleri, daha sonraki çatlakların başlangıçlarını oluşturabilir. Bu nedenle birleştirme yöntemi olarak yapıştırma ve kaynak ön plana çıkmıştır. Bu çalışmada, bindirme pozisyonundaki parçalara uygulanan, genellikle metal malzemeler üzerinde denenen ve yeni bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin (SKNK), pek çok avantajlı özelliği nedeniyle sanayide kullanımı oldukça yaygınlaşan plastik malzemelerden polipropilen (PP) malzemeye de uygun bir yöntem olduğunun ortaya konması amaçlanmıştır.

PP Malzemenin SKNK İle Birleştirilmesi konusunda bana çalışma fırsatı veren ve gerekli koşulları sağlayan, çalışmalarım sırasında bilgisini, değerli yardımlarını ve de zamanını esirgemeyen, her zaman büyük destek ve özveride bulunan, kendisini tanımaktan büyük gurur ve mutluluk duyduğum danışman hocam Yrd. Doç. Dr. A. Armağan ARICI'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Takım Tezgahları Laboratuar imkanlarını kullanmama olanak sağlayan ve her zaman desteğini gördüğüm değerli hocam Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a ve yine her zaman desteğini gördüğüm ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. J. Levon ÇAPAN'a teşekkürlerimi sunarım. Bilgisini, değerli yardımlarını ve de zamanını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Nurhan VATANSEVER'e teşekkür ederim. Değerli hocam Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL ve çalışmamda önemli katkıları olan değerli hocam Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e KOÜ'deki PLASMAM ve KOÜ Teknopark'daki İleri Malzeme Teknolojileri Laboratuarlarını kullanmama imkan sağladıkları için teşekkürlerimi sunarım. Özverili teknisyen Abdülkadir YAYLA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Tülin ŞAHİN'e çalışmalarımda yapmış oldukları destekten dolayı teşekkür ederim. KOÜ, O.D.T.Ü., SAÜ, TÜBİTAK-MAM ve Henkel firmasına çalışmalarımdaki katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Değerli arkadaşlarım KOÜ'den Arş. Gör. Y. Müh. Onur ÇOBAN'a ve Arş. Gör. Y. Müh. Eda OKUTAN'a, TÜBİTAK-MAM'dan Y. Müh. Zafer YÜCEL'e çalışmalarımda yapmış oldukları destekten dolayı teşekkür ederim. Manevi desteklerini eksik etmeyen anneme, babama ve yakınlarıma, her zaman tüm kalbiyle yanımda olan, destek ve önerilerini eksik etmeyen canım eşime ve varlığından dolayı canım kızıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ ix
SEMBOLLER xi
ÖZET xiii
İNGİLİZCE ÖZET xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 8
2.1. Plastik Malzeme Bilgisi 8
2.2. Plastik Malzemelerin Yapısal ve Termal İşlem Özellikleri 9
2.2.1. Plastik malzemelerin yapısal özellikleri 10
2.2.2. Plastik malzemelerin termal işlem özellikleri 10
2.2.2.1. Termoplastikler 10
2.3. Plastik Malzemelerin Reolojik (Akış) Özellikleri 12
2.3.1. Plastik malzemelerin reolojik kaynak kabiliyeti 13
2.4. Isının Plastik Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi 15
2.5. Plastik Malzemelerin Birleştirilmesi 16
2.5.1. Plastik malzemelerin mekanik bağlantı yöntemleri 17
2.5.2. Plastik malzemelerin yapıştırma (adhezyon) yöntemleri 17
2.5.3. Plastik malzemelerin kaynak yöntemleri 19
2.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemlerine Genel Bakış 21
2.7. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yöntemi 25
2.7.1. SKNK yönteminin uygulanışı 27
2.7.2. SKNK ile DNK yönteminin karşılaştırılması 32
2.7.3. SKNK makinaları 35
2.7.3.1. Masa üstü SKNK makinası 36
2.7.3.2. Sabit tip veya pres tipi SKNK makinası 37
2.7.3.3. Robotlar 38
2.7.3.4. Kullanılan SKNK makinalarının boyutları ve özellikleri 39
2.8. SKNK Yöntemi ile İlgili Çalışmalar 40
2.9. SKNK Yönteminin Kullanıldığı Uygulamalar 77
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA 82
3.1. Kaynak İçin Kullanılan Malzeme 82
3.2. Kullanılan Kaynak Takımı 83
3.3. Kaynağın Uygulanışı 84
3.4. Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi 86
3.4.1. Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelenmesi 86
3.4.2. Dalma derinliği parametresinin incelenmesi 87
3.5. Pimli Bağlantı İle Karşılaştırma 88
3.6. Geliştirme Amaçlı Farklı Bindirme Bağlantısı Tasarımlarına Uygulanan SKNK ve Yapıştırma Yöntemi 89

3.7. Yapılan Testler ve Kontroller 92
3.7.1. Deney numunelerine uygulanan mekanik test (çekme deneyi) 92
3.7.2. Deney numunelerine uygulanan tahribatsız malzeme muayenesi (radyografik malzeme muayenesi) 93
3.7.3. Deney numunelerine uygulanan makroskobik ve mikroskobik incelemeler ... 94
3.7.4. Deney numunelerine uygulanan termal analiz (DSC) 97
3.7.5. Farklı parametrelerde oluşturulan SKNK numuneleri için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değerlerinin ölçülmesi 100
3.7.6. Kaynak bölgesinin tespiti için enine kesit incelemesi 104
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR 107
4.1. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numunelerine Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 107
4.1.1. Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisi 107
4.1.2. Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisi 116
4.1.3. Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliği parametrelerinin çekme deneyi sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi 121
4.2. Pimli Bağlantı İçin Çekme Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi 124
4.3. Tahribatsız Malzeme Muayenesi Deneylerinin Sonuçlarının İncelenmesi 125
4.4. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numuneleri İçin Çekme Deneyi Sonrasında Ortaya Çıkan Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop ve SEM Görüntüleri Yardımı İle İncelenmesi 127
4.4.1. Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelenmesi 127
4.4.2. Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelenmesi 136
4.4.3. Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile birlikte değerlendirilmesi 140
4.5. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Bağlantılarından ve Esas Malzemelerden Alınan Numunelerin DSC Analiz Sonuçlarının Yorumlanması 141
4.6. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numuneleri İçin Takımda Oluşan Eksenel Kuvvet ve Parçalarda Oluşan Sıcaklığın İncelenmesi 146
4.6.1. Farklı bekleme süreleri ve devir sayıları için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi 147
4.6.2. Farklı dalma derinlikleri için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi 151
4.6.3. Farklı dalma hızları için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi 153
4.7. Kaynak Bölgelerinin Belirlenmesi İçin Kaynaklı Parçaların Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri Yardımı İle İncelenmesi 156
4.8. Geliştirme Amaçlı Farklı Bağlantı Tasarımlarına Uygulanan SKNK ve Yapıştırma Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi 160
4.8.1. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK artı yapıştırıcılı numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi 160
4.8.2. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan numunelerin çekme deneyi sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmesi 169

4.8.3. Farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK numunelerinde kaynak bölgelerinin belirlenmesi için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmesi 180
BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 183
5.1. Sonuçlar 183
5.2. Öneriler 195
KAYNAKLAR 196
EKLER 202
ÖZGEÇMİŞ 271

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: SKK yönteminin prensibi 25
Şekil 2.2: Yöntemin şematik olarak üç aşaması..... 28
Şekil 2.3: Birleştirme takımı 28
Şekil 2.4: Çeşitli takım omuz ve uç profilleri 29
Şekil 2.5: SKNK'nın birleştirme mekanizması..... 31
Şekil 2.6: Kaynak bölgesinin oluşumu..... 31
Şekil 2.7: Karıştırma bölgesinin görünümü 32
Şekil 2.8: Birbirine yakın kaynak noktalarının üstten görünüşü..... 34
Şekil 2.9: SKNK ve DNK yöntemlerinin donanım karşılaştırması 35
Şekil 2.10: Mafsallı robot kolu üzerinde bilgisayar kontrollü SKNK tabancası..... 36
Şekil 2.11: Masa üstü SKNK makinası..... 37
Şekil 2.12: Solda sabit tip ve sağda pres tipi SKNK makinası 38
Şekil 2.13: SKNK Robotları 38
Şekil 2.14: SKNK yönteminde kullanılan makinalardan bazılarının boyutları (solda sabit makina, sağda ise robot sistemi için SKNK tabancası) 40
Şekil 2.15: A6061 alüminyum alaşımı için, farklı levha kalınlıklarında SKNK ve Kenetlemede elde edilen çekme kuvveti değerlerinin, DNK için ulaşılması gereken çekme kuvveti değerleri ile karşılaştırılması..... 41
Şekil 2.16: A6061 alüminyum alaşımı için, SKNK ile DNK'nın yorulma davranışının karşılaştırılması 42
Şekil 2.17: SKNK ile birleştirilmiş Al 6111-T4 çekme numuneleri için, artan dalma derinliği ile çekme kuvvetinin değişimi..... 43
Şekil 2.18: Takımın dalma derinliğinin kırılma şekline etkileri 45
Şekil 2.19: Bağlantıların enine kesit makro fotoğrafları..... 46
Şekil 2.20: Al 6111-T4 numuneler için, solda ana metalin ve sağda karıştırma bölgesinin mikro yapısı..... 47
Şekil 2.21: Termokupul yerleştirilen takımın şematik görünüşü..... 48
Şekil 2.22: Alüminyum alaşımı Al 6061-T6 malzeme için, farklı dalma hızlarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi 49
Şekil 2.23: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar 50
Şekil 2.24: Magnezyum alaşımı AZ91D malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar 50
Şekil 2.25: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için farklı devir sayılarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi 51
Şekil 2.26: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzemeden SKNK sırasında çıkan malzeme parçacığı..... 52
Şekil 2.27: Nümerik kontrollü CNC makinanın tablasına monte edilmiş bağlama tertibatı ve kullanılan takımın fotoğrafı 53
Şekil 2.28: a) Farklı devir sayıları için eksenel kuvvetin zaman ile değişimi, b) Farklı dalma hızları için eksenel kuvvetin zaman ile değişimi..... 55
Şekil 2.29: Bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisi..... 55
Şekil 2.30: İki farklı devir sayısı için dalma hızının çekme kuvvetine etkisi 56

Şekil 2.31: Dalma derinliği ve bekleme süresinin çekme kuvvetine etkisi..... 57
Şekil 2.32: Çekme deneyi numunelerinin kopma şekilleri (a) kaynak bağlantısı ara yüzeyinde kırılma ve (b) sıyırma, fotoğraflardaki görünümler soldan sağa doğru; üst numunenin üstü, üst numunenin altı ve alt numunenin üstü..... 57
Şekil 2.33: (a) AA 6060-T5'in SKNK bağlantısının enine kesit fotoğrafı, (b) (a)'da seçilen alanın daha yakından görünümü, ayrıca (b)'de ince oksit partiküllerinin (taneciklerinin) dalgalı diziliminin büyütülmüş görüntüsü..... 59
Şekil 2.34: Al 5754/Al 6111 farklı levhaların SKNK sırasında kontrollü dalma derinliğinde oluşan bölgeler (a) Levhaların ara yüzeyindeki ilk oluşum (b) Farklı levha ara yüzey bölgesinin 0,1 mm içerisine dalma durumunda oluşan bölgeler (c) Takım ucunun alt levhanın 0,3 mm içerisine dalması durumunda oluşan bölgeler..... 60
Şekil 2.35: Al 5754/Al 2024 farklı levhaların SKNK sırasında takım yivinin dibinde tutulmuş Al 5754 malzemesi..... 61
Şekil 2.36: MMC/Al 5754 farklı levhaların SKNK sırasında, malzeme hareketine takım ucu yivlerinin etkisi (a) Takım ucu yivlerinin enine kesiti ve yukarı doğru hareket eden Al 5754 malzemesi, (b) Takım ucu yivinin dibinde yerleşen MMC malzemesi..... 62
Şekil 2.37: Al 5754/Al 6111 levhaların SKNK sırasında malzemelere nüfuz eden düz bir takım ucu kullanılarak üst levha malzemesinin aşağı doğru taşınması..... 62
Şekil 2.38: Al 6061-T6 parçaların SKNK sırasında, Al_2O_3 izleyici partiküllerinin yer değiştirmesi (a) SKNK sırasında izleyici partiküllerin yukarı ve dışa doğru hareketi, (b) SKNK'da takım ucu boşluğunun her iki karşı tarafında birbiri üzerine gelen iz görüntüleri..... 63
Şekil 2.39: Yatay enine kesitte görülen izleyici Al_2O_3 partikülleri..... 64
Şekil 2.40: UHSS'in SKNK..... 66
Şekil 2.41: SKNK uygulanmış AHSS çeliğinin çekme numunesinde kaynak noktası..... 68
Şekil 2.42: SKNK uygulanmış numunelerin enine kesitleri..... 69
Şekil 2.43: Bağlantının ara bölgesinin yakından kesit görünüşü..... 70
Şekil 2.44: Farklı iki AHSS malzeme için çekme deneyinden elde edilen maksimum kuvvetler..... 71
Şekil 2.45: Bindirme bağlantısı..... 72
Şekil 2.46: Kaynaklarda kullanılan SKNK takımı..... 73
Şekil 2.47: Numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları..... 74
Şekil 2.48: Çekme kuvvetinin karıştırma süresi ile değişimi..... 74
Şekil 2.49: Numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları..... 75
Şekil 2.50: Çekme kuvvetinin dalma derinliği ile değişimi..... 76
Şekil 2.51: Numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları..... 77
Şekil 2.52: SKNK ile oluşturulmuş seri kaynak noktaları ve kaynağın enine kesiti . 78
Şekil 2.53: Bir araca ait parçada SKNK..... 78
Şekil 2.54: Mazda RX-7 model spor araba..... 79
Şekil 2.55: Mazda RX-8 model spor araba..... 79
Şekil 2.56: Mazda RX-8'in arka kapısında SKNK uygulanırken..... 80
Şekil 2.57: Ford GT model spor araba..... 80
Şekil 3.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan SKNK takımı..... 84
Şekil 3.2: Tek nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip1)..... 85
Şekil 3.3: SKNK'nda kullanılan bağlama aparatları..... 85
Şekil 3.4: PP numunelerin pimli bağlantısı..... 89

Şekil 3.5: Çift nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip2)..... 90
Şekil 3.6: Dört nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip3)..... 90
Şekil 3.7: Instron 4411 üniversal elektromekanik test cihazı 92
Şekil 3.8: Tahribatsız malzeme muayenesinin şematik gösterimi 94
Şekil 3.9: LEICA S6D optik mikroskop 95
Şekil 3.10: SEM fotoğraflarının tamamında ilgili bölgelerden
a: X200, b: X18, c: X200, d: X200, e: X18 ve f: X50 büyütme
ile çekilmiştir..... 96
Şekil 3.11: SEM JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskop..... 96
Şekil 3.12: LEICA S8AP0 optik mikroskop 97
Şekil 3.13: METTLER TOLEDO DSC 1 cihazı..... 99
Şekil 3.14: a) SKNK sırasında kullanılan üniversal dik freze tezgahı, takım,
bağlama aparatı, dinamometre, dört kanallı termometre ve bu
termometreye bağlı termokupullar ile hassas infrared termometrenin
birlikte kullanılışı b) bindirme bağlantısı ve termokupul delikleri
c) kullanılan dinamometrenin, termometrelerin ve termokupulun
ayrı ayrı görüntüleri..... 102
Şekil 3.15: METKON GRIPO 1V GRINDER POLISHER marka parlatma cihazı 105
Şekil 4.1: 800 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları..... 108
Şekil 4.2: 1250 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları..... 108
Şekil 4.3: 2000 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları..... 108
Şekil 4.4: Çekme kuvvetinin bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi 109
Şekil 4.5: Bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvveti üzerine etkisi..... 110
Şekil 4.6: 800 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları 111
Şekil 4.7: 1250 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları 112
Şekil 4.8: 2000 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları 113
Şekil 4.9: Çekme kuvveti ve iz çapının bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi115
Şekil 4.10: Farklı dalma derinliklerinde oluşturulan numunelerin çekme deneyi
öncesi fotoğrafları 117
Şekil 4.11: Çekme kuvveti ve iz çapının dalma derinliği ile değişimi 118
Şekil 4.12: Farklı dalma derinliklerinde oluşturulan numunelerin çekme deneyi
sonrası fotoğrafları 119
Şekil 4.13: Pimli bağlantının çekme deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları 124
Şekil 4.14: Numunelerin tahribatsız malzeme muayenesi filmlerinin fotoğrafları.. 126
Şekil 4.15: En yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği numune ile pimli
bağlantı ve esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi139
Şekil 4.16: Örnek bir kaynaklı parçanın enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü ve
kaynak bölgesinin boyutlandırılması 158
Şekil 4.17: Farklı bağlantı şekilleri için oluşturulan yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan
artı kaynaklı birleştirmelerin çekme kuvvetine etkisi 168
Şekil 4.18: Farklı bağlantı tasarımlı ve yapıştırıcılı birleştirmeler için çekme
kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi 171
Şekil 4.19: Farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve kaynaklı birleştirmeler için
çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi..... 172
Şekil 4.20: Farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve yapışkanlı artı kaynaklı
birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi 173
Şekil 4.21: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip1 bağlantı tasarımı için
çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi..... 174
Şekil 4.22: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip2 bağlantı tasarımı için

çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi 175
Şekil 4.23: Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan, en yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği numuneler ile esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi 175
Şekil 4.24: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip3 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi 176
Şekil 4.25: Solda tip2 ve sağda tip3 bağlantı şekli için enine kesit alınışı 181
Şekil 4.26: Çift nokta kaynağının optik mikroskoptaki enine kesit görüntüsü 181

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Polimerik malzemelerin yapısal ve termal özellikler açısından sınıflandırılması 10
Tablo 2.2: Plastik malzemelerin bağlanma ve birleştirme yöntemleri..... 16
Tablo 2.3: Termoplastik malzemelerin kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması..... 21
Tablo 2.4: Çeşitli plastikler için maksimum çekme gerilmesi değerleri..... 24
Tablo 2.5: SKNK makina sistemlerinin özellikleri..... 39
Tablo 2.6: Yüzde ağırlık olarak, kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri..... 68
Tablo 3.1: Literatürde kullanılan SKNK takımlarına ait oranlar 83
Tablo 3.2: Tasarlanan kaynak takımının boyutları ve ilgili oranları..... 84
Tablo 3.3: Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler . 87
Tablo 3.4: Dalma derinliği parametresinin incelendiği numuneler 88
Tablo 3.5: Farklı bağlantı tasarımlı SKNK numuneleri ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılar için kullanılan optimum deney parametreleri..... 89
Tablo 3.6: Tahribatsız malzeme muayenesi deneyleri için numuneler..... 93
Tablo 3.7: Tahribatsız malzeme muayenesi sırasında kullanılan çekim parametreleri 94
Tablo 3.8: Eksenel kuvvet ve sıcaklık ölçümlerinin alındığı numuneler..... 101
Tablo 4.1: 800 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri..... 128
Tablo 4.2: 1250 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri..... 128
Tablo 4.3: 2000 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri..... 128
Tablo 4.4: 1250 d/d devir sayısında, farklı dalma derinlikleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri..... 137
Tablo 4.5: Esas malzemenin entalpi, onset, peak, endset değerleri ve standart sapmaları 142
Tablo 4.6: Kaynak bölgesinin parametreleri ve entalpi, onset, peak, endset değerleri..... 143
Tablo 4.7: Geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyi öncesi fotoğrafları 162
Tablo 4.8: Geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyi sonrası fotoğrafları 165
Tablo 4.9: Farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılar için ortalama çekme kuvveti değerleri..... 166

Tablo 4.10: Esas malzemenin 3090 N'luk çekme kuvveti ile farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılarda elde edilen ortalama çekme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında, esas malzemeden elde edilen çekme kuvvetinin %'de kaçına ulaşıldığını gösteren %'de oranları 169
Tablo 4.11: Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı olarak oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerjilerin değerleri 170

SEMBOLLER

η : Viskozite (kPa s = kNs/m^2)
E : Enerji ($kJ\ mol^{-1}$)
T : Sıcaklık (^oC)
t : Parça Kalınlığı (mm)

Alt indisler

a : Aktivasyon
c : Camsı Geçiş
e : Erime

Kısaltmalar

ABS : Akrilonitril Butadien Stiren
AHSS : Advanced High Strength Steels (İleri Yüksek Dayanımlı Çelikler)
CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
DNK : Direnç Nokta Kaynağı
DSC : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Tarama Kalorimetri)
em : Esas Malzeme
FSL : Friction Stir Link
HDPE : Yüksek Yoğunluklu Polietilen
ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standart Organizasyonu)
K : Kaynaklı
kb : Kaynak Bölgesi
KHI : Kawasaki Heavy Industries (Kawasaki Ağır Endüstrisi)
MAG : Metal Aktif Gaz Kaynağı
MAM : Marmara Araştırma Merkezi
MMC : Metal Matrisli Kompozit
NSK : Nokta Sürtünme Kaynağı (SFW: Spot Friction Welding)
PA : Poliamid
PC : Polikarbonat
PCBN : Polykristalin Kübik Boron Nitrit (Polikristal Kübik Boryum Nitrit)
PE : Polietilen
PMMA : Polimetilmetakrilat
PP : Polipropilen
PVC : Polivinil Klorür
RKK : Reolojik Kaynak Kabiliyeti
SEM : Scanning Electron Microscope (TEM: Taramalı Elektron Mikroskobu)
SKK : Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW: Friction Stir Welding)
SKNK : Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSSW: Friction Stir Spot Welding)
SKKNK : Sürtünme Karıştırma Kaynağının Nokta Kaynağı (FSWSW: FSW Spot Welding)

SNB : Sürtünme Nokta Birleştirmesi (FSJ: Friction Spot Joining)
TIG : Tungsten Inert Gas
TMAZ : Termomekanik Olarak Etkilenmiş Bölge
TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TWI : The Welding Institute (İngiliz Kaynak Enstitüsü)
UHSS : Ultra High Strength Steel (Ultra Yüksek Dayanımlı Çelik)
Y : Yapıştırıcılı
YK : Yapıştırıcılı Artı Kaynaklı

POLİPROPİLEN MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

Şenol MERT

Anahtar Kelimeler: PP, SKNK, Takım, Çekme Deneyi, Optik Mikroskop, SEM, Tahribatsız Malzeme Muayenesi, DSC, Enine Kesit İncelemesi, İnfrared Termometre, Dört Kanallı Termometre, Sıcaklık, Dinamometre, Eksenel Kuvvet, Farklı Bağlantı Tasarımları, Yapıştırıcı, Kaynaklı Bağlantı, Yapıştırıcılı Bağlantı, Kaynaklı+Yapıştırıcılı Bağlantı, Pimli Bağlantı, Optimum Kaynak Parametreleri.

Özet: Bu çalışmada, bindirme pozisyonundaki parçalara uygulanan, genellikle metal malzemeler üzerinde denenen ve yeni bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin (SKNK), pek çok avantajlı özelliği nedeniyle sanayide kullanımı oldukça yaygınlaşan plastik malzemelerden polipropilen (PP) malzemeye de uygun bir yöntem olduğunun ortaya konması amaçlanmıştır. Kaynak işlemi için uygun takım geometrisi tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Üniversal dik freze tezgahı kullanılarak farklı devir sayılarında, farklı bekleme sürelerinde, farklı dalma derinliklerinde ve farklı dalma hızlarında yönteme dair pek çok parametre ile kaynaklı bağlantılar oluşturulmuştur. Kaynaklı bağlantılardaki çapak, çatlak vb. unsurların varlığı, kaynak noktasının oluşumu ve fiziki şeklinin görsel olarak belirlenmesi için gözle kontrolü yapılmıştır. Mekanik testlerden çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma yüzeylerinin ve hasar mekanizmasının nasıl geliştiği, optik mikroskop ve SEM incelemeleri ile açıkça ortaya konulmuştur. Farklı parametreler ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde, kaynak bölgesinin kontrolünü sağlamak için tahribatsız malzeme muayenesi yapılmıştır. Kaynak yönteminin uygulanması sırasında oluşan sürtünme ısısı nedeniyle, plastik malzemelerin özelliklerini belirleyen moleküler yapıdaki değişimlerin gözlenebilmesi ve dolayısıyla kaynak parametrelerinin etkisinin açıklanabilmesi için DSC analizleri yapılmıştır. Kaynak bölgesinin belirlenmesi için ve kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği enine kesit incelemesi, ilave optik mikroskop incelemeleri ile ortaya konmuştur. İnfrared termometre ve dört kanallı termometre ile sıcaklık değerleri ölçülmüş, böylece kaynak için uygun sıcaklık değerlerinin elde edilip edilemediği belirlenmiştir. Dinamometre ile de eksenel kuvvetin zamanla değişimi belirlenmiştir. Farklı bağlantı tasarımlarında, kaynaklı, yapıştırıcılı, kaynaklı+yapıştırıcılı, pimli bağlantılar oluşturulmuş ve bağlantıların çekme kuvveti değerleri tespit edilerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelenerek optimum kaynak parametreleri ve bağlantı tasarımı belirlenmiştir.

JOINING OF POLYPROPYLENE MATERIAL BY FRICTION STIR SPOT WELDING

Şenol MERT

Keywords: PP, FSSW, Tool, Tensile Test, Optical Microscope, SEM, Nondestructive Material Testing, DSC, Cross-section Examination, Infrared Thermometer, Four Channel Thermometer, Temperature, Dynamometer, Axial Force, Various Joining Designs, Adhesive, Welded Joining, Adhered Joining, Welded + Adhered Joining, Pinned Joining, Optimal Welding Parameters.

Abstract: Friction Stir Spot Welding (FSSW) process is a new solid state welding process that is applied for overlapped metal parts. Because of its many advantageous properties in polymer materials; polypropylene was chosen of which its use in industry was grown up. In this study prove of the suitability of FSSW process for chosen PP material was aimed. Suitable tool geometry was designed for welding and then manufactured. Welded joints were obtained by all the parameters for the process as various rotational speeds, dwell times, plunge depths and plunge velocities by using universal vertical fraise. Existence of burrs and cracks on the welded joints, formation of welded point and for identifying the physical form of it; a control was done by naked eye. Tensile forces of joints were obtained by using tensile tests among mechanical tests. Broken surfaces, at how damage mechanism was growing up during the tensile tests of welded joints clearly proved by optical microscope or SEM examinations. In welded joints which were done by various parameters, non destructive testing was applied for controlling the welded area. Differential Scanning Calorimeter (DSC) analyses were done for observation of changes in molecular structure that identify the plastic material's properties because of friction heat occurred during applying welding process and for explaining the effect of welding parameters. Additionally; optical microscope examinations were done for identifying the welded area and for cross section investigation of physical situation of fused or not fused structure according as welding parameters in welded area. Temperature values were measured by infrared thermometer and four channel thermometer and thus suitable temperature values for welding were determined. Varying of axial force during time was determined by dynamometer. Welded, adhered, welded + adhered and pinned joints for various joining designs were generated and tensile force values of these joints were determined and compared. By evaluation of these results; the optimum welding parameters and joint design were determined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Plastik malzemelerin laboratuar şartlarında istenilen özelliklerinin geliştirilmesindeki sınırsızlık, bu malzemelere geleceğin mühendislik malzemeleri olma özelliğini kazandırmıştır. Metalik malzemelere göre mekanik özelliklerinin daha düşük olmasına rağmen plastik yapıya çeşitli katkı maddelerinin ilave edilmesiyle (cam, karbon, talk, fiber vb.) fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir. Polimer kimyasındaki gelişmelere bağlı olarak farklı yapı ve özelliklerde polimerler sentezlenmiş ve bu polimerlerden yapılan ürünler hızla, metal ve seramik türü malzemelerin yerlerini almışlardır. Dünya toplam plastik tüketimi 1980'li yılların başında, dünya toplam çelik tüketimini geçmiştir. Ayrıca, doymuş molekül zincirlerine sahip olmaları ile atmosferik ortamlarda karşılaşılan korozyona ve kimyasal maddelere karşı yüksek direnç göstermeleri, bu malzemeleri metalik malzemelere göre üstün bir konuma getirmiştir. Bunun haricinde mühendislik plastikleri düşük maliyet, hafiflik ve kolay üretilebilirlik gibi birçok avantaja sahiptirler. Plastik malzemelerin diğer bir üstün özelliği de kompleks şekillerde kalıplanabilmeleridir (Balkan 1999, Saçak 2005, Yayla 2007).

Geçmişte, tabakalar halinde üretilen reçine esaslı termoset plastik malzemelerin yüksek dayanımlı kompozitlerinin özellikle havacılık endüstrisindeki kullanımları sırasında yapıştırma ve mekanik bağlantı teknolojilerinin geliştirilmesinde oldukça başarılı olunmuştur. Özellikle yapıştırma teknikleri açısından daha çok pratik uygulamalarda yoğunlaşan bu gelişmeler sayesinde yapıştırıcılar, endüstriyel alanlardan günlük hayatın içerisindeki basit uygulamalara kadar bir çok üretim ve tamir işlerinde geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Tüm bu çalışmaların haricinde, plastiklerin az miktarlarda ve basit biçimlerindeki kullanımları sebebiyle kaynak teknikleri üzerinde pek fazla durulmamıştır. Ancak İkinci Dünya Savaşı yıllarında, özellikle metalik yapıların korozyon sebebiyle ciddi hasarlara uğraması, plastik malzemelerin endüstriyel alanlarda kullanılan diğer mühendislik malzemelerine alternatif teşkil edebilme koşullarını gündeme getirmiştir.

Termoplastik malzemelerin ısı ve basınç altındaki davranışlarının incelenerek bu malzemelerin kaynakla birleştirilebilme esasları belirlenmeye çalışılmıştır. İlk çalışmalar, daha çok polivinil klorür (PVC) üzerinde yoğunlaşan kaynak ile birleştirilme uygulamalarını içermektedir. Bu çalışmalar, geçen zaman ile birlikte ve ihtiyaçlar doğrultusunda bütün termoplastik malzemelerin kaynak işlemleri ile birleştirilmesinin gerçekleştirilmesine öncülük etmiştir (Balkan 1999).

Termoplastik malzemelerin yapıları itibariyle kaynak edilebilirliğinin anlaşılmasından sonra birçok kaynak yöntemi üzerinde ciddi çalışmalara başlanmıştır. Zamanımızda plastik malzemelerin, özellikle değişik kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri birçok sebepten dolayı önem kazanmıştır. Genel olarak bu sebeplerden en önemli olanları, giderek karmaşık hale gelen yapıların montaj işlemleri sırasında karşılaşılan tasarım problemleri, sabit ve değişken yükler altında kullanılan polimerik malzemelerin birleşim bölgelerinde ihtiyaç duyulan daha yüksek dayanım değerleri, arızalı parçaların tamir ve bakımı, belirli şekillerde üretilmiş termoplastik malzemelerin gerekli kısımlarının doldurularak istenen şekillere sahip parçaların üretilmesi ve üretim maliyetleri olarak sıralanabilir (Balkan 1999).

Yapılacak çalışmayla, genellikle metal malzemeler üzerinde denenen sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yönteminin, pek çok avantajlı özelliği nedeniyle sanayide kullanımı oldukça yaygınlaşan plastik malzemelere de uygulanabilirliğinin ortaya konulması hedeflenmektedir. Yöntemin bir diğer uygulaması olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) için plastik malzemelerde elde edilen başarılı sonuçlar göz önüne alındığında bu hedefin yakalanması oldukça mümkün görünmektedir. Özellikle plastik esaslı malzemelerin kullanım alanlarının oldukça arttığı otomotiv sanayisindeki birleştirilmelerin genellikle bindirme şeklinde nokta kaynağı olarak gerçekleştiği düşünüldüğünde, söz konusu uygulamanın önemi daha da artmaktadır. Yapılan ön çalışmalar neticesinde planlanan tez çalışması için PP (polipropilen) malzemenin uygun olduğu görülmüştür.

Yeni bir katı hal kaynak yöntemi olan tez konusu SKNK, hafif metaller ve ileri yüksek dayanımlı çeliklerin haricinde, PP malzemede de denenmesine ait sonuçlar,

yöntemin plastik esaslı bir malzemeye uygulanabilirliğinin ve yönteme ait mekanizmanın belirlenmesi açısından bilimsel alana katkı sağlayacağından dolayı özgün bir çalışmadır. Sonuçların bilimsel birikime katkısının yanında geniş bir kullanım alanına sahip PP malzemeden yapılan parçalarda, alternatif bir birleştirme tekniği olarak yer bulması oldukça mümkündür. Böylelikle ulusal sektörde çalışan plastik üretici ve kullanıcılarının yöntemden yararlanmaları söz konusu olacaktır.

Literatürden elde edilen bilgilerin ve de yapılan ön çalışmalardan elde edilen başarılı sonuçların ışığında tez konusu "polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi" olarak belirlenmiştir. Hem yurt içi hem de uluslararası literatür tarandığında metal malzemeler için bazı çalışmalar söz konusu olmasına rağmen plastik malzemeler için bu yönteme ait bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu konuda çalışan ticari kuruluşların da çalışmaları hakkında bilgi verici bir süreç işletmedikleri anlaşılmıştır. Dolayısıyla, yöntemin plastik malzemelerde uygulanabilirliğini belirleyecek tez çalışmasının literatürdeki bu boşluğu dolduracak bir referans çalışma olacağı açıktır.

Sonuç olarak çok yaygın kullanım alanına ve SKK'ında oldukça iyi kaynak özelliklerine sahip olan PP levhalar kullanılmak suretiyle SKNK yönteminin de plastik malzemelerin kaynaklı birleştirilmeleri için uygun bir yöntem olduğunun ortaya konacağı bir çalışma gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Yöntemin başarısını etkileyen faktörler ve parametreler kaynak takımının biçimi, malzemeye dalma hızı, dalma derinliği, kaynak takımının dönme devri ve malzeme içindeki bekleme süresidir. Kaynak bağlantısının yumuşamış malzemenin kaynaşmasıyla gerçekleştiği düşünüldüğünde yöntemin başarısının, ortaya çıkarılacak sürtünme ısısına olan bağlılığı açıkça görülmektedir. Sürtünme alanının arttırılması, dönme devrinin daha yüksek belirlenmesi ve bekleme süresinin daha uzun seçilmesi daha fazla ısı ortaya çıkaracaktır. Ancak ortaya çıkan ısının, malzeme sıcaklığını erime sıcaklığının üzerine çıkarmaması gerekmektedir. Dolayısıyla söz konusu faktörlerin hangi uygun değerlerinde, en iyi kaynak özelliklerinin elde edileceği belirlenmeye çalışılacaktır.

Öncelikle deneysel çalışma için gerekli planlama yapılacaktır. Numuneler standartlara uygun geometride testere tezgahında kesilerek hazırlanacaktır. Kaynak

işlemi için uygun takım geometrisi tasarlanacak ve kaynak takımı tornada işlenecektir. Üniversal dik freze tezgahı kullanılmak suretiyle planlanan program çerçevesinde kaynaklı bağlantıların oluşturulmasına başlanacaktır. SKNK ile oluşturulan kaynak bağlantılarının gerçekleştirilmesinde, yukarıda da belirtildiği gibi yönteme dair pek çok parametre söz konusudur. Bu amaçla farklı devir sayılarında, farklı bekleme sürelerinde, farklı dalma derinliklerinde ve farklı dalma hızlarında planlanan deney setleri çerçevesinde, deneyler gerçekleştirilecektir.

Oluşturulacak olan bindirme pozisyonundaki kaynaklı bağlantıların gözle kontrolü yapıldıktan sonra, mekanik testler uygulanacak, makroyapı ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilerek yöntemin başarısı belirlenmeye çalışılacaktır. İlaveten oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara tahribatsız malzeme muayenesi uygulanacak, DSC (Differential Scanning Calorimetry: Diferansiyel Tarama Kalorimetri) analizi yapılacak ve kaynak bölgesinin belirlenmesi için optik mikroskop ile enine kesit incelemesi yapılacaktır. Dinamometre üzerine uygun bağlama aparatı ile sabitlenen kaynak numunelerinden infrared termometre ve dört kanallı termometre ile sıcaklık değerleri ölçülürken, dinamometre ile de eksenel kuvvetin zamanla değişimi belirlenecektir. Sadece tek noktanın uygulandığı bindirme pozisyonundaki kaynak bağlantılarına ilaveten farklı bağlantı tasarımlarına da freze tezgahında SKNK uygulanacaktır. Henkel firmasının, PP malzeme için uygun gördüğü yapıştırıcı temin edilip, karşılaştırma amaçlı, bindirme pozisyonundaki ve farklı bağlantı tasarımlarında olmak üzere yapıştırıcılı bağlantılar, ayrıca yapıştırıcılı+kaynaklı bağlantılar oluşturulacaktır. İlaveten yine karşılaştırma amaçlı pimli bağlantılar oluşturulacaktır.

Gözle yapılacak kontrollerde, SKNK uygulanmış fakat herhangi bir test uygulanmamış numunelerin, söz konusu kaynaklı birleştirme bölgesi incelenerek çapak, çatlak vb. unsurların varlığı, kaynak noktasının oluşumu ve fiziki şekli görsel olarak ortaya konulacaktır.

Birleştirmenin yeterli dayanıma sahip olup olmadığı mekanik testlerden çekme deneyi ile belirlenecektir. Bunun için ilgili standarda uygun olarak hazırlanacak deney örnekleri yine aynı standardın PP için öngördüğü çekme hızlarında

çekilecektir. Elde edilen çekme kuvvetleri karşılaştırılarak yukarıda belirtilen parametrelerin hangisi veya hangilerinin birleştirmeye etkisi olduğu ve hangi değerler için en iyi sonuçların elde edildiği ortaya konulacaktır.

Çekme deneyi sonrasında oluşan kopma kesitlerinde, kaynak bölgesinin özelliklerinin belirlenerek makro ve mikroyapısının ortaya konulması için ve de elde edilen özelliklerle kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi saptamak üzere yapılması gerekli olan SEM (Scanning Electron Microscope: Taramalı Elektron Mikroskobu) ve optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilecektir. Kaynaklı parçalarda çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma yüzeylerini ve hasar mekanizmasının nasıl geliştiğini incelemek için gerekli olan optik mikroskop ve SEM incelemesi, kaynaklı parçalarda meydana gelen hasarın sünek veya gevrek özellik gösterip göstermediği, çatlak ilerleme mekanizmasının nasıl gerçekleştiği bu incelemeler ile açıkça ortaya konulacaktır. Tercih edilen sünek hasar mekanizmasının kaynak parametrelerinin hangi değerleri için gerçekleştiği tespit edilecektir.

Oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara tahribatsız malzeme muayenesi (radyografik malzeme muayenesi) uygulanacaktır. SKNK yöntemi ile farklı parametreler için yapılan kaynaklı birleştirmelerde tahribatsız malzeme muayenesi ile kaynak bölgesinin kontrol edilmesi, kaynaklı bölge hakkında elde edilen çekme deneyleri öncesi bilgilerle, yapılan çekme deneyleri sonrası elde edilen kaynağa ait çekme kuvveti bilgilerinin karşılaştırılması yapılarak parametrelerin etkisi vurgulanacaktır.

Oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantıların, kaynak bölgesinden ve esas malzemeden olmak üzere alınan numunelere kaynak bölgesinin özelliklerinin belirlenmesi için ve de elde edilen özelliklerle kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi saptamak üzere DSC analizi yapılacaktır. Böylece DSC analiz yöntemi ile kaynak yönteminin uygulanması sırasında oluşan sürtünme ısısı ve kaynaşma nedeniyle plastik malzemelerin özelliklerini belirleyen moleküler yapıdaki değişimler gözlenebilecek ve dolayısıyla kaynak parametrelerinin etkisi açıklanabilecektir.

Çekme deneyi sonrasında oluşan kopma kesitlerinin optik mikroskopta incelemesine ilaveten, oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara kaynak bölgesinin belirlenmesi için enine kesit incelemesi yapılacaktır. Bunun için oluşturulan kaynaklı numuneler, kaynak noktalarının tam ortasından, ince testere bıçağına sahip masa üstü testere cihazında kesilecek ve uygun parlatma aşamalarından geçirilip, yüzeyler optik mikroskopta incelenmeye hazır hale getirilecektir. Böylece bir diğer grup mekanik test uygulanmayan kaynak numunelerine, kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği ilave optik mikroskop incelemeleri yapılacaktır.

Üniversal dik freze tezgahı kullanılarak, bir grup numuneye planlanan program çerçevesinde kaynaklı bağlantılar oluşturulurken, infrared termometre ile de sıcaklık ölçümü yapılacaktır. Kaynak işlemi sırasında hassas infrared termometre ile oluşturulan kaynak noktalarının merkezlerinin sıcaklık değerleri, kaynak takımı kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz ölçülecektir. Ayrıca dört kanallı termometre kullanılarak oluşturulacak kaynak noktasına en yakın bölgelere açılan deliklere termokupullar yerleştirilecek ve kaynak işlemi sırasında sıcaklığın değişimi incelenecektir. Böylece alınacak sıcaklık ölçümleri sayesinde kaynak için uygun sıcaklık değerlerinin elde edilip edilemediği belirlenecektir. Ayrıca kaynak işlemi sırasında ilgili bölgelerde ortaya çıkan sıcaklığın ölçülmesi, daha sonra hem çekme deney sonuçlarının hem de kaynak bölgesi yapı özelliklerinin açıklanması için yardımcı olacak veri eldesi sağlayacaktır. Plastik malzeme moleküler yapısı ve buna bağlı olarak malzeme özellikleri sıcaklıktan oldukça etkilenmektedir. Dolayısıyla kaynak sırasında ulaşılan sıcaklıkların bilinmesi önem kazanmaktadır. Elde edilen sonuçlar ışığında ilgili kaynak parametreleri yeniden değerlendirilerek kaynak bağlantısı için en uygun parametre değerleri saptanacaktır.

Ayrıca kaynak işlemi sırasında takım eksenel kuvvetinin zaman ile değişiminin belirlenmesi için de bir çalışma planlanmaktadır. Bunun için dinamometre üzerine yerleştirilen numunelerde kaynak noktaları oluşturulurken, bir taraftan infrared termometre ve dört kanallı termometre ile sıcaklık değerleri ölçülecek, bir taraftan da dinamometre ile eksenel kuvvetin zamanla değişimi belirlenecektir. Böylece takımın

parçalarla teması ve ilerlemesi sonucu oluşan, eksenel kuvvet değişiminin ve parçalarda meydana gelen sıcaklığın, bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri ile ilişkisi incelenecektir.

İlgili kaynak yöntemiyle elde edilen birleştirilmelere ait dayanım değerleri, mevcut bilinen birleştirme yöntemleriyle (pimli bağlantı ve yapıştırıcı ile yapılan bağlantılar) elde edilen değerleri yakalıyorsa başarıya ulaşılmış sayılabilir. Bu açıdan, çalışmada ayrıca bahsi geçen diğer bağlantılarda denenecek ve bağlantı dayanım değerleri tespit edilerek SKNK yöntemine ait değerlerle karşılaştırılacaktır. Elde edilen sonuçlar irdelenerek optimum kaynak parametreleri ve bağlantı tasarımı belirlenecektir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Plastik Malzeme Bilgisi

Plastikler (polimerler), iri moleküllü kimyasallardır. Bazı polimerlerin moleküllerinin, geleneksel kimyasal maddelerin moleküllerinden çok büyük olabileceğine yönelik ilk görüş 1920'de Staudinger tarafından ortaya atılmıştır. Staudinger'in bu önerisi 10 yıl sonra 1930'da kabul edilmiş ve polimer kelimesi de 1930'lardan sonra bilimsel alanda kullanılmaya başlanmıştır. Polimer kimyası ve polimer teknolojisi bilimleri zaman içerisinde hızla gelişerek ayrı ve önemli birer bilim dalı haline gelmişlerdir (Saçak 2005).

Polimerler, mer veya monomer (tekrarlanan birimler) denilen basit birimlerin kimyasal yöntemlerle birleştirilmeleri ile oluşmuş, yüksek molekül ağırlıklı ve zincir şeklinde bir yapıya sahip olan sentetik malzemelerdir. Merler, birbirlerine kovalent bağlarla bağlanarak büyük moleküller oluşturabilen küçük mol kütleli kimyasal maddelerdir. Çok sayıda merin kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu iri molekülün adı ise polimerdir. Mer molekülleri, polimerizasyon tepkimeleri ile birbirlerine bağlanırlar ve polimer molekülüne dönüşürler. Polimerizasyon, bir mer karışımının polimere dönüştürülmesi işlemidir. Bir polimer molekülünde onlarca, yüzlerce, binlerce merden gelen birim bulunabilir. Amaç tekrarlanan birimlerden oluşan çok uzun zincir ve ağ şeklinde bir makromolekül meydana getirmektir. Böylece çeşitli merler kullanılarak çok çeşitli tip ve özelliklerde plastikler elde edilmektedir. Örneğin polipropilen (PP) bir polimerdir. Bir PP zincir molekülü içinde, birbirine kuvvetli kovalent bağlarla bağlı binlerce küçük molekül bireyleri bulunur. Birbirine kuvvetle bağlı bu küçük molekül zincirinde binlerce kez tekrarlanan mer birimleri PP polimerini oluşturur. Mer sayısı arttıkça, polimerin öncelikle fiziksel özellikleri değişir. Örneğin mer sayısı düşük iken sıvı halinde bulunabilen polimer, bu sayı arttıkça giderek yoğunluk ve viskozitesi iyice artacak,

belki bal kıvamında bir sıvı ve çok yüksek mer sayıları için ise bir katı polimer oluşturabilecektir (Balkan 1999, Savaşçı ve diğ. 2002, Saçak 2005, Yıldırım 2007).

Polimerleri malzeme olarak kullanabilmek için işlemek gereklidir ve polimerler genellikle tek başlarına (saf olarak) işlenemezler. Polimerler, içlerine çeşitli katkı ve dolgu maddeleri karıştırılarak (örneğin; boyar maddeler-güneş ışığına karşı korunmak için bazı özel katkılar-kaydırıcılar-işleme kolaylığı sağlayan diğer katkılar) bir ön karışım hazırlanır. Bu karışımlardan uygun yöntemlerle (eritme-kalıplama gibi), son şekli ile ürün malzeme elde edilir. Elde edilen şekillendirilmiş ürün, plastik olarak tanımlanır (Savaşçı ve diğ. 2002).

Kimyasal bakımdan plastikler, karbon atomlarının hidrojen (H), azot (N), oksijen (O), flor (F), silisyum (Si), kükürt (S), klor (Cl) vb. atomlarla kovalent bağlarla bağlandığı uzun zincirlerdir. Zinciri oluşturan kovalent bağlara birincil bağlar da denmektedir. Zincirleri oluşturan kovalent bağlarla birlikte, bu zincirleri kendi aralarında bir arada tutan diğer bir bağ daha bulunmaktadır. İkincil bağlar (Van der Waals bağları) olarak isimlendirilen bu bağlar, kimyasal olarak reaksiyona girmeyen polimer molekülleri arasında veya bir molekülün çeşitli bölümleri arasında oluşan bağlardır. Polimer zincirleri belirli bir hareketliliğe sahiptir ve aralarında nispeten zayıf olan kütle-kütle etkileşmesi (Van der Waals bağları) yanında, eğer zincirde bir polar grup (PVC'deki klor gibi) varsa daha kuvvetli etkileşmeler (dipol, hidrojen bağı ve iyonik etkileşmeler gibi) mevcuttur ve birbirlerinden bağımsız olarak hareket edemezler. Özellikle çok uzun ve büklümlü olduklarında, polimer zincirlerinin birbirlerine dolaşmış konumda oldukları saptanmıştır ve polimer zincir molekülleri, adeta iplikleri birbirine dolanmış bir yün yumağı görünümündedir (Balkan 1999, Savaşçı ve diğ. 2002).

2.2. Plastik Malzemelerin Yapısal ve Termal İşlem Özellikleri

Polimerik malzemeler yapısal ve termal işlem özellikleri açısından Tablo 2.1'de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir (Balkan 1999).

Tablo 2.1: Polimerik malzemelerin yapısal ve termal özellikler açısından sınıflandırılması (Balkan 1999)

Yapısal Özellikler	Termal Özellikler
• Homopolimer • Kopolimer • Karışım Polimerleri	• Termoplastik • Termoset

2.2.1. Plastik malzemelerin yapısal özellikleri

Kimyasal yapıya bağlı olarak polimerler, homopolimer, kopolimer ve karışım polimerleri olarak sınıflandırılmaktadır. Homopolimer'lerde polimer zinciri boyunca tekrar eden birim (mer) aynıdır. Mer A ise zincir AAAAAAAAA şeklinde bir yapı gösterir. Diğer bir deyişle, bu tür polimerler PP ve PE gibi tek bir tür monomerden elde edilir. Kopolimer'lerde ise, polimer zinciri boyunca tekrarlanan birim türü birden fazladır. Yani bu polimerler iki veya daha fazla değişik türde monomerden elde edilmiştir. Kopolimerizasyon ile elde edilen polimerlerin özellikleri, monomer oranları ayarlanarak geniş çapta değiştirilebilir. Bu yöntemle doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı yapılar elde edilebilir. Karışım polimerleri veya rastgele kopolimerlerde farklı türdeki monomer birimleri (örneğin, A ve B) zincir boyunca gelişi güzel dizilir. Farklı özelliklerdeki monomerlerin aynı makromoleküler zincir üzerinde tekrarlanmaları sonucunda istenilen özelliklere sahip yeni bir polimerik malzeme elde edilir (Balkan 1999, Ezdeşir ve diğ. 1999, Savaşçı ve diğ. 2002).

2.2.2. Plastik malzemelerin termal işlem özellikleri

Polimerler genellikle, ısıl bakımdan işleme yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre polimerler, termoplastikler (termoplastlar, ısıl plastikler) ve termoset plastikler (duroplastlar) olmak üzere iki büyük gruba ayrılırlar (Balkan 1999, Erkul 2001).

2.2.2.1. Termoplastikler

Termoplastik malzemeler, 100 yıldan fazla bir zaman öncesinden itibaren geliştirilmektedir. Ancak ciddi çalışmalar, 1930'lu yılların başlangıcında Almanya'da diğer malzemelerin yerini alabilecek malzemelerin araştırılmasından

sonra başlamıştır. Almanlar, termoplastiklerin ısıtıldıkları zaman birbirlerine bastırılarak kalıcı bir birleştirmenin elde edilebileceğini görmüşlerdir (Balkan 1999).

Termoplastikler ısı ile şekillendirilebilen yapay malzemelerdir ve lineer zincir biçimindeki makromoleküllerden oluşmuştur. Bunlar kuvvetli atom bağları ile birbirlerine bağlıdır, fakat moleküllerin birbiri ile olan bağları oldukça zayıftır. Polimer zincirlerinden oluşan bir kütleye ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük kısımlarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük kısımlarını kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlar ve katı polimer eriyerek akar. Polimerleri şekillendirirken, polimer malzemenin belirli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesinden yararlanılır. Artan sıcaklık ile, moleküller arası bağlar zayıflayarak zincir moleküllerin birbirleri boyunca kayabilmesi mümkün olur. Bu nedenle termoplastiklerin artan sıcaklık ile elastik durumdan, plastik hamur haline, sonrasında ise sıvı hale geçmesi sağlanır. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılarak ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma hazır hale getirilir. Buharlaşma ile bileşim değişmedikçe, fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm istenildiği kadar tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere, Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelen, “termoplastik” adı verilmektedir. Termoplastiklerin zincirleri arasında çapraz bağlar bulunmaması ve doğrusal veya dallanmış zincirli polimerler olması nedeniyle uygun çözücülerde çözünürler, ısıtıldıklarında erirler ve eritilerek defalarca yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastiklerin hamur halde bulunma sıcaklıklarının alt sınırında ekstrüzyon, haddeleme, basma vb. gibi işlemler, üst sınırında kaynak, sıvılaştırma sıcaklığının üzerinde ise püskürtme (enjeksiyon) ile üretimler gerçekleştirilir (Erkul 2001, Savaşçı ve diğ. 2002, Saçak 2005).

Termoplastiklerin kaynağı, bağlantının ara yüzeyindeki malzemelerin birlikte ısınması ve yumuşaması, sonrasında da birbirine kaynaşarak birleştirilmesi işlemidir. Termoplastikler ısıtıldığında yumuşama ve erime gösterdiklerinden kaynak edilebilir. Termoplastikler özellikle metaller ile karşılaştırıldığında, genel olarak düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler (TWI Ltd 2009a).

Termoplastik malzemeleri oluşturan lineer makromoleküler zincirlerde, zinciri oluşturan birimlerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar (birincil bağlar) bulunmasına rağmen makromoleküler zincirler arasında fiziksel bir bağ bulunmamaktadır. Sadece zincirleri birbirine yakın tutan zayıf elektrostatik çekme kuvvetleri (Van der Waals - ikincil bağlar) vardır. Bu moleküller arası kuvvet, makromoleküler zincirlerin birbirlerine göre hareketlerini engelleyen, ısıya karşı duyarlı bir kuvvettir. Isı artışı ile moleküllerin titreşim genliklerinin artması sonucunda, makromolekül zincirleri arasındaki mesafe büyür ve bu mesafe artışı ile ters orantılı olarak elektrostatik çekme kuvvetleri azalır. Sonuç olarak termoplastik bir malzeme ısıtıldığında, kritik bir sıcaklık olan camsı geçiş sıcaklığının (Tc) üzerine çıkılınca elektrostatik kuvvetlerin azalışı ile yumuşamaya başlar, sıcaklığın daha da artışı ile birlikte malzemenin viskozitesi düşer ve akıcılığı artar. Soğutulduğunda ise sert bir hale gelir. Sonuç olarak, termoplastik malzemeler ısı ve basınç altında yumuşayan, akan ve soğutulunca sertleşerek şekillendirilebilen ve bu işlemleri herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramadan tekrarlı olarak yapılabilen plastik malzemelerdir. Endüstride çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (polipropilen: PP, polietilen: PE, ve polivinil klorür: PVC gibi) termoplastiktir. Örneğin PP'den, lif, film, boru vb. ürünler üretilebilir (Balkan 1999, Savaşçı ve diğ. 2002, Saçak 2005).

2.3. Plastik Malzemelerin Reolojik (Akış) Özellikleri

Polimer zincirlerinin hareketliliği, reoloji ve akışkanlık dikkate alınarak incelenebilir. Camsı geçiş sıcaklığının altında, polimer maddeler akıcı değillerdir ve Hook elastikliği gösterirler. Yani bu sıcaklıklarda polimer maddelere gerilme uygulandığında, geri dönebilen, çok az bir esneklik gösterirler. Bu esneklik, gerilme uygulanan polimer zincirindeki karbon-karbon bağ açısının, gerilme ile kısmen genişletilmesinden ve zorlanmasından kaynaklanmaktadır. Gerilme kaldırıldığında karbon-karbon bağları normal açılara geri döndüğünden malzeme de eski boyutlarına geri döner (Savaşçı ve diğ. 2002).

Camsı geçiş sıcaklığının hemen üstünde, polimer maddeye bir gerilme uygulandığında, polimer moleküllerinde kısmi bir yönlenme meydana gelir ve

malzeme esner. Polimer zincirleri birbirine dolanmış olduğundan, gerilme kaldırıldığında polimer zincirleri eski konumlarına ve malzeme de eski boyutlarına döner. Kauçuğumsu, elastomerik malzemelerde de gözlenen bu duruma visko-elastisite denir (Savaşçı ve diğ. 2002).

Sıcaklık artırıldığında polimer malzeme erir ve sıvı davranışları göstermeye başlar. Fakat bu akıcılık örneğin suyun akıcılığı kadarda yüksek değildir. Eritilmiş polimer maddelerin viskoziteleri yüksektir, yani akıcılığı düşüktür ve sıvı haldeki akışa viskoz akış da denilmektedir. Örneğin iki polimer malzemeyi kendi arasında karşılaştırırsak PP'nin viskozitesi PVC'den daha düşüktür. Yani PP daha akıcıdır (Savaşçı ve diğ. 2002).

Polimer maddelerin akışkan haldeki özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Bu tekniklerin en önemli sonuçlarından birisi, erimiş polimerlerde akışların "Newton dışı" (Non-Newtonian) kurallara uyduğudur. Bu durum, polimer zincirlerinin birbirlerine dolanmış halde olmalarından kaynaklanmaktadır. Erimiş polimere basınç uygulandığında, zincir dolanmaları gevşetildiğinden veya yok edildiğinden viskozitede önemli düşüşler meydana gelmektedir (Savaşçı ve diğ. 2002).

2.3.1. Plastik malzemelerin reolojik kaynak kabiliyeti

Plastiklerin kaynağı, sıcaklığın yardımı ile malzemelerin yumuşamış yüzeylerinin birleştirmesi işlemi olarak ISO (International Organization for Standardization: Uluslararası Standart Organizasyonu) 472'de tanımlanmıştır. Termoplastiklerin kaynağı, ard arda gelen üç safhada tamamlanır. Bunlar, yüzey hazırlama, sıcaklık ve basınç uygulama, soğutmadır. Sıcaklık ve basınç, ara yüzeyde çapraz polimer zincirlerinin yayılması için gereklidir (Balkan ve Ezdeşir 2008).

Diğer taraftan iyi kalitede kaynak bağlantıları oluşturmak, yalnızca kaynak yöntemine ve kaynak parametrelerine değil, kullanılan malzemenin kaynak edilebilirliğine de bağlıdır. Bu yüzden kaynaktan önce kaynak edilebilirliğin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Yapılan bir çalışmada, seçilen termoplastiklerin

kaynak edilebilirlikleri onların reolojik özelliklerini ortaya koyan viskozite ve aktivasyon enerjisi değerleri yardımı ile araştırılmıştır (Balkan ve Ezdeşir 2008).

Balkan ve Ezdeşir (2008) yapmış oldukları çalışmada, polimer parçaların kaynak kabiliyetlerini güvenilir olarak belirlemek amacı ile pratik bir yöntem önermiş ve bu yöntem "reolojik kaynak kabiliyeti" (RKK) olarak adlandırılmıştır. Termoplastiklerin kaynağında reolojik açıdan uygun durumda, kaliteli bir bağlantı oluşturmak için ön şartlar gereklidir. Bu yönteme göre, viskozitesi (η) ve aktivasyon enerjisi (E_a) düşük olan polimerlerin kaynak kabiliyetlerinin iyi olacağı bildirilmiştir.

Balkan ve Ezdeşir (2008) tarafından yapılan reolojik çalışmada PP, PE ve PVC numunelerin farklı sıcaklıklarda nitrojen atmosferinde viskoziteleri belirlenmiştir. Viskozite akmaya karşı dirençtir ve viskozite düşük olursa akıcılık artar, yüksek olması ise akıcılığı zorlaştırır. Daha yüksek molekül ağırlıkları ve güçlü ikincil valans kuvvetleri, daha yüksek viskozite değerlerini sağlar. Yüksek viskozite ise, ara yüzeyde difüzyonun azalması nedeniyle kaynak dayanımını düşürür. PE'nin viskozite değerleri ise PP'e yakın olmakla beraber biraz daha yüksektir (Balkan ve Ezdeşir 2008).

İyi bir kaynak kalitesine ulaşmak için akış davranışı önemli bir faktördür. Erimiş bir polimerin akışı için makromoleküler zincir segmentleri (parçaları) taşınabilmelidir. Zincir segmentleri, enerji engelini yenmek için gerekli ısıl enerjiyi elde ettiği zaman kolayca taşınabilir. Bu enerji engeli aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. Aktivasyon enerjisi, kimyasal bir tepkimenin gerçekleşebilmesi için aşılması gereken enerji değeridir. Polimer malzemenin aktivasyon enerjisi düştükçe kaynak kabiliyetinin daha iyi olacağı söylenebilir. Aktivasyon enerjisi ile viskozite doğru orantılıdır. Aktivasyon enerjisi azalırsa viskozite düşer (Balkan ve Ezdeşir 2008).

Termoplastiklerin kaynağı için reolojinin kullanımı, pratik ve güvenilir bir metottur. Bu çalışma, PE ve PP'nin viskozite ve aktivasyon enerjisi değerlerinin PVC'nin değerlerinden daha düşük olduğunu yani PE ve PP'nin kaynak kabiliyetlerinin RKK'ya göre PVC'den daha iyi olduğunu göstermiştir (Balkan ve Ezdeşir 2008).

2.4. Isının Plastik Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Temel kavramlar kapsamında polimer madde davranışlarının anlaşılıp yorumlanmasında yararlı olan iki önemli sıcaklık vardır. Bunlar camsı geçiş sıcaklığı (Tc) ve erime sıcaklığı (Te)'dir. Amorf plastik malzemelerde zincirler gelişigüzel bulunduklarından dolayı, zincirlerin hareketleri kısıtlıdır. Bu malzemelerde sadece Tc görülür. Zincirler arası bir düzen olmadığı için birbirleriyle etkileşimleri söz konusu değildir. Bu yüzden amorf polimerlerde keskin bir Te noktası yoktur. Kısmi kristalin veya yarı kristalin polimerlerin örgüsünde hem amorf, hem de kristal faz (bölgeler) birlikte bulunduğundan, hem Tc hem de Te görülür. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında, amorf polimerler gibi kırılgandırlar. Kırılganlık özelliklerini camsı geçiş sıcaklığına kadar korurlar. Camsı geçiş sıcaklığı geçildiğinde belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal yapılarından dolayı esnek termoplastik davranışa geçerler (PP, PE gibi) (Balkan 1999, Savaşçı ve diğ. 2002, Saçak 2005, Yıldırım 2007).

Tc, bütün polimer maddeler için, daha aşağısına inildiğinde, polimer zincirlerinde hareketliliğin hemen hemen donduğu ve böylece polimer zincirinin hareketsiz hale geldiği bir sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle sıcaklık, molekül zincirlerini oluşturan birimlerin hareketini etkiler. Sıcaklığın arttırılması ile bu hareket hızlanır, molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirlerine göre daha bağımsız hale gelirler. Sıcaklığın azaltılması ile birimlerin hareketi yavaşlar ve Tc sıcaklığına gelindiğinde ise durur. Bu sıcaklık değerinin altında sadece atomların kendi konumları etrafında yaptıkları titreşim hareketi devam eder. Tc sıcaklığının üzerinde malzemenin molekülleri canlı moleküller olarak da tanımlanır. Bu sıcaklığın üzerinde malzemede, polimer zincirlerinin bölgesel ve ondülamsı katlanma hareketlerine olanak sağlayacak yeterli termal enerji bulunmaktadır. Malzemeyi kırmadan bükmek ve malzeme üzerine tork uygulamak mümkündür. Tc sıcaklığının altında malzeme camsı hal denilen rijit, sert ve gevrek bir yapıya sahiptir. Kırılgan özellik taşırlar, sünme dayanımları yüksek, yorulma dayanımları düşüktür. Tc'nin değeri, moleküller arası kuvvetlerin, molekül ağırlığının, zincir içerisindeki birimlerin rijitliğinin ve çapraz bağların büyümesi ile artar. Plastiklere ilave edilen yumuşatıcılar Tc değerini azaltır. Kristalin malzemelerde erime sıcaklığı da vardır ve Te'ye yaklaşıldıkça, kristalin düzen bozulmaya ve zincir birimleri de harekete başlar.

Sonuçta malzemede bir yumuşama meydana gelir. Te'ye ulaşıldığında ise kristalin düzen tamamen bozulup parçalanır ve malzeme viskoz halini alır. Te'nin üzerinde malzeme sıvı haldedir (Balkan 1999, Savaşçı ve diğ. 2002, Saçak 2005, Yıldırım 2007).

2.5. Plastik Malzemelerin Birleştirilmesi

Fabrikasyon üretim veya tamir işlemleri gibi bir çok uygulamalarda polimerik malzemelerin kendi aralarında veya diğer malzemelerle birleştirilmesi gereklilik göstermektedir. Bu malzemelerin birleştirilmesi için uygulama şartlarına bağlı olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak plastik malzemelerin birleştirilme yöntemleri, mekanik bağlantı yöntemleri, yapıştırma yöntemleri ve kaynak yöntemleri olmak üzere Tablo 2.2.'de görüldüğü gibi sınıflandırılmıştır (Balkan 1999, Erkul 2001, Arıcı ve Sınmazçelik 2004). Yapıştırıcılar ve mekanik birleştirmeler oldukça yararlı birleştirme teknikleridir, ama kaynaştırma (fusion) birleştirmesi veya kaynak, birleştirme sürelerinin genelde kısa olması, yüksek hacimli üretim kapasiteleri nedeniyle özellikle uygundur. Ayrıca kaynaklı parçalar, kolayca geri dönüşür veya yakılır ve atık problemlerini hafifletir. Bu durum, özellikle karmaşık yüzey aktivasyon teknikleri gerektiren polietilen ve polipropilen gibi, düşük yüzey enerjili polimerlerin birleştirilmesinde önemli bir faktördür (Arıcı ve Sınmazçelik 2004, Mert ve Arıcı 2008). Plastiklerin çentiğe karşı hassasiyetleri, perçin veya cıvata ile birleştirilmelerini zorlaştırır. Plastik folyelerin dikilmeleri halinde bile, dikişlerdeki oyuk yerleri, daha sonraki çatlakların başlangıçlarını oluşturabilir. Bu nedenle birleştirme yöntemi olarak yapıştırma ve kaynak ön plana çıkmıştır (Arıcı ve Şelale 2007).

Tablo 2.2: Plastik malzemelerin bağlanma ve birleştirme yöntemleri (Balkan 1999, Erkul 2001, Arıcı ve Sınmazçelik 2004)

Mekanik Bağlantılar		**Yapıştırma**	**Kaynak**
Sökülebilir	**Sökülemez**		
• Cıvatalar • Somunlar • Klipsler • Yaylı Kelepçeler	• Perçinler • Metalik ve Sıcak Saplamalar • Geçmeler • Dikiş	• Tek Bileşenli • Çift Bileşenli	• Isı Transfer Yöntemleri • Isının Malzemede Oluşturulduğu Yöntemler

2.5.1. Plastik malzemelerin mekanik bağlantı yöntemleri

Mekanik bağlanma yöntemleri, sökülebilen bağlantılar (cıvatalar, somunlar, vb.) ve sökülemeyen bağlantılar (perçinler, sıcak saplamalar, vb.) olmak üzere iki grupta incelenir. Bu bağlantı işlemlerinin sökülebilirliği, diğer birleştirme tekniklerine göre avantaj teşkil etmektedir. Montaj işlemlerinde bağlantıların hızlı yapılması, geniş uygulama alanlarının bulunması, işçiliğinin temiz ve basit oluşu ile yüksek teknoloji gerektirmemesi mekanik bağlama tekniklerinin tercih sebeplerinden bazılarıdır (Balkan 1999, Erkul 2001).

Plastik malzemelerin çentik etkisine karşı fazla hassasiyet göstermeleri, bu tür mekanik bağlantıların, yapıştırma ve kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerine göre taşıyabilecekleri yükleri sınırlı hale getirmiştir. Bu sebeple mekanik bağlantı tasarımlarının dikkatli olarak yapılması gerekmektedir. Mekanik bağlantıların hatasız bir şekilde uygulanmış olmasına rağmen bağlayıcı elemanlar ile bağlanan plastik malzemeler arasındaki ısıl genleşme katsayıları arasında farkların bulunması, ortam sıcaklığının değişmesi sırasında ciddi problemlerin çıkmasına sebep olmaktadır. Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak bağlantı bölgelerinde görülen gevşemeler veya aşırı büzülmeler buna örnek olarak verilebilir. Ayrıca, temas bölgesindeki plastik malzemenin gevrekliğine bağlı olarak, bağlantı elemanlarının plastik malzemelerden daha sert olması sebebiyle temas bölgelerinde çatlama ve kırılmalar görülebilmektedir. Mekanik bağlanma yöntemleri, az sayıdaki uygulamalar için ekonomik olmakla birlikte seri üretimler için oldukça pahalı bir yöntemdir (Balkan 1999, Arıcı ve Şelale 2007).

2.5.2. Plastik malzemelerin yapıştırma (adhezyon) yöntemleri

Herhangi bir türdeki iki benzer veya farklı malzemenin sökülemez bir şekilde birleştirilmesi bu yöntemle kolaylıkla sağlanabilmektedir. Yapıştırıcıların eşsiz avantajlarından bir diğeri de, hem termoset hem de termoplastik polimer malzemeleri birleştirmeye uygun olup, özellikle kaynak kabiliyetleri olmayan termoset plastik malzemelerin birleştirilmelerinde kullanılabilmeleridir. Geçmişte üretilen, yüksek dayanıma sahip plastik esaslı kompozit malzemelerin sadece termoset

malzemelerden yapılmış olması sebebiyle bu birleştirme yöntemi oldukça önem taşımaktaydı. Zamanımızda ise termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerindeki artışa bağlı olarak birçok alanda termoset plastik malzemelerin yerine geçmesi sonucunda, daha çok kaynak yöntemleri ile birleştirme teknikleri tercih edilmektedir. Fakat yapıştırma yöntemleri, birleştirilecek malzemelerin değişen çalışma sıcaklıkları altında bulunmaları sırasında ısıl genleşme katsayıları arasındaki farka bağlı olarak, birleşim bölgesinde görülen termal gerilimlerin minimum seviyede tutulması amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca titreşimli çalışan kısımlardaki birleşim bölgelerinde, yapıştırma bağlantısının sönümleme özelliklerine sahip olması sebebiyle esnek yapıdaki yapıştırma bağlantı yöntemlerinin kullanılması yararlı olabilmektedir (Balkan 1999, Erkul 2001, Strand 2004).

Birleşim yüzeylerine etki eden çekim kuvvetlerinin büyüklüğü, ara mesafenin artması ile azalmaktadır. Bu nedenle uygun bir yapıştırma işlemi için iki katı malzemenin kuru ve temiz haldeki yüzeyleri, en geniş alanda ve mümkün olan en yakın mesafede birleştirilmelidir. Yapıştırıcı malzemenin zaman içerisinde katılaşması ile birleşimin mukavemeti artarak işlem tamamlanır. Yapıştırma işlemi, yapıştırıcı madde ile birleştirilecek malzemenin yüzeyleri arasındaki ara fazda oluşan fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Yapıştırma işlemi için hafif bir basıncın uygulanması yeterlidir. Yapıştırıcının birleşim bölgesinden uzaklaşmaması için aşırı basınç uygulanmasından kaçınılmalıdır (Balkan 1999, Baykal 2008, Henkel 2008a, Henkel 2008b).

İyi bir yapıştırma işleminin gerçekleştirilebilmesi için önemli olan diğer bir husus da ön hazırlık işlemleridir. Parçalar arasında uygun teması sağlamak için parçaların temizlenerek hazırlanması gerekir. Birleşim yüzeylerine mikroskopik ölçekte bakıldığı zaman bölgede toz, kir veya yağ gibi istenmeyen maddelerin bulunduğu görülecektir. Yapıştırma işleminin mukavemetine direkt olarak etki eden bu istenmeyen maddelerin bölgeden uzaklaştırılması önem taşımaktadır. En iyi performans için, yapıştırılacak yüzeyler yağdan arındırılmalı ve temizlenmelidir. Temizleyici (çözücü) yüzeye buhar banyosu şeklinde uygulanabildiği gibi, pratikte daha çok fırça veya bez tampon kullanılarak yada direkt numunenin daldırılması

şeklinde de uygulanabilmektedir (Balkan 1999, Strand 2004, Baykal 2008, Henkel 2008a).

2.5.3. Plastik malzemelerin kaynak yöntemleri

Kaynak, ana malzemeden ayırt edilemeyen bir bağlantı sağlamak amacıyla, benzer yapılı (yapı bileşenleri benzerlik gösteren) termoplastik iki parçanın ısı ve basınç etkisiyle gerçekleştirilen sökülemez bir şekildeki birleştirilme işlemidir. Kaynak işlemlerinde birleştirilecek malzemelerin birleşim bölgelerinde oluşturulan sıcaklık sebebiyle tekrarlı bir yumuşamanın gerekliliği ve yumuşama sıcaklıklarının üzerinde (camsı geçiş sıcaklığı: Tc) bozulmadıkları, yanmadıkları ve özelliklerini kaybetmedikleri için uygulanabilirliği yalnızca termoplastik malzemelerde söz konusu olup, birleştirilecek malzeme veya parçaların yüzeyleri erime sıcaklığı altında ısıtılarak cisimlerin yüzeylerinin yumuşaması sağlanır. Bu yüzeylerin birbirlerine bastırılması ve son olarak da soğutulması ile kaynak işlemi gerçekleştirilir. Termoplastiklerin birleştirilmesinde en güçlü ve en temiz yöntem kaynak edilerek birleştirilme yöntemidir. Bazı durumlarda kaynak sağlamlığı ana malzemenin sağlamlığına oldukça yakın değerlere ulaşabilmektedir. İyi bir kaynak elde edebilmek için sıcaklık, basınç ve zaman gibi kaynak üzerinde etkili olan parametrelerin iyi bir optimizasyonu sağlanmalıdır (Balkan 1999, Erkul 2001).

Termoplastik malzemelerin kaynak ile birleştirilme işlemlerinin esası genel olarak şu şekilde açıklanabilir. Birleştirilecek yüzeyler herhangi bir yöntemle (ısıl yöntemler, mekanik ve elektromanyetik yöntemler) ısıtılıp camsı geçiş sıcaklık derecesinin üzerine çıkılıp yumuşamaları sağlanır. Bu yumuşamış bölgelerde bulunan makromoleküler zincirlerin ısı tesiri ile hareketlilik (Mikro-Brown) kazanmaları sonucu zincirlerin arasındaki ikincil bağlarda (Van der Waals) zayıflama görülür. Özellikle amorf yapıya sahip olan sınır yüzeylerdeki serbest ısıl hareketliliğe sahip makromoleküler zincirler, birleştirilecek yüzeylerin temas ettirilmesi ile karşılıklı olarak birbirleri içerisinde akarlar ve dolaşarak yumak haline gelirler. Kaynak bölgesinde sıcaklığın biraz daha yükseltilmesi, basıncın arttırılması, bekleme süresinin uzatılması ve titreşim hareketlerinin uygulanması ile makromoleküler zincirlerin birbirleri içerisindeki akış hızları arttırılır. Bu şekilde birleşim ara

yüzeyindeki makromoleküler zincirlerin daha fazla karışmaları sağlanabilmektedir. Dış görünüm itibariyle istenilen biçimdeki birleştirmenin tasarıma uygun olarak sağlanmasının ardından kaynak bölgesi basınç altında ve hareketsiz bir şekilde soğutulur. Birleşim ara yüzeyinde yumak haline gelmiş makromoleküler zincirler, sıcaklığın azalması ile ısıl hareketliliklerini kaybetmeye başlarlar. Aralarındaki mesafenin azalması ile iyice düğümlenirler. Zincirlerin birbirlerine yakınlaşmalarına bağlı olarak, sıcaklığın camsı geçiş sıcaklık derecesinin altına düşmesi ile makromoleküler zincirlerin arasında tekrar kurulan ikincil bağlar (Van der Waals), kaynak bölgesini katı hale getirir. Bu şekilde termoplastik malzemenin kaynak ile birleştirilme işlemi istenilen sağlamlıkta tamamlanmış olur (Balkan 1999).

Kaynak işlemlerine genel olarak etki eden faktörler, kaynak bölgesinin sıcaklığı, tatbik edilen ısı miktarı, ısıtma süresi ve uygulanan basınç olarak sıralanabilir. Bu faktörler malzeme cinsine ve kaynak işleminden istenen dayanım özelliklerine göre farklı değerler alırlar. Kaynak işlemi için gerekli ısı miktarı, plastik malzemenin bileşimi, kalınlığı, ısıtılan alan, ısıtma süresi ve uygulanan basınç gibi bazı faktörlere bağlıdır. Herhangi bir termoplastik malzemenin kaynaklı birleştirme işleminde etkili olan faktörlerin (sıcaklık, zaman, basınç vb.) belirlenen sayısal değerlerinin altında çalışıldığı zaman kaynak bölgesinde süreksizlikler, üstünde çalışıldığı zaman ise polimerik zincirlerin parçalanması sonucu malzemenin bozulması yada kaynak bölgesinde aşırı taşkınlıklar görülebilir. Bu tür kaynak hataları ile karşılaşmamak için mümkün olan optimum değerlerde çalışılması gerekir. Malzemenin yapısında bulunabilecek artık monomerler ile bazı plastikleştiriciler, kaynak işlemi sırasında sıcaklık etkisiyle buharlaşabilmektedir. Bunun önlenmesi zor olup, kaynak bölgesinde gaz kabarcıkları meydana getirerek birleşimin görünümünü bozmakla birlikte sağlamlığını azaltmaktadır. Ayrıca plastik malzemelerin kaynak uygulamaları sırasında termal bozulmalara (renk değişimleri, polimerik zincirlerin parçalanması, çözünmeler ve özellikle yanıcılığa) dikkat edilmelidir (Balkan 1999).

Termoplastik malzemelerin özellikleri gereği ısıyı iyi iletmezler ancak ısıdan kolay etkilenirler. Isıyı iyi iletmemeleri sebebiyle geniş bölgelerde ısıl deformasyonlara uğramazlar. Ancak, özellikle kalın malzemelerin kaynak işlemlerinde derin bir nüfuziyetin elde edilmesi oldukça zordur. Bu durumda kaynak ısısının, kaynağı

yapılacak termoplastik malzemenin dışında değil, doğrudan doğruya malzemenin içinde oluşturulması yoluna gidilir. Metallerde olduğu gibi plastiklerde, yeterli bölgesel ısıtmalar uygulanarak birleşim bölgesinin yumuşatılmasıyla kaynak edilir. Termoplastik malzemelerin kaynağı için birçok farklı kaynak yöntemi geliştirilmiştir. Bu çeşitli kaynak yöntemleri arasındaki en büyük fark, ısının uygulanış şeklidir. Bu düşünceyle, termoplastik malzemelerin kaynak yöntemleri, ısı transfer yöntemleri (ısıl yöntemler) ve ısının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemler (mekanik yöntemler ve elektromanyetik yöntemler) olmak üzere iki sınıfta toplanabilir. Tablo 2.3'te termoplastik malzemelerin kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir (Balkan 1999, Erkul 2001, Arıcı ve Sınmazçelik 2004, Sınmazçelik ve Arıcı 2004, Arıcı ve Sınmazçelik 2005, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Şelale 2007, Arıcı ve Mert 2008, Balkan ve Ezdeşir 2008, Mert ve Arıcı 2008).

Tablo 2.3: Termoplastik malzemelerin kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması (Balkan 1999, Erkul 2001, Arıcı ve Sınmazçelik 2004, Sınmazçelik ve Arıcı 2004, Arıcı ve Sınmazçelik 2005, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Şelale 2007, Arıcı ve Mert 2008, Balkan ve Ezdeşir 2008, Mert ve Arıcı 2008)

Isı Transfer Yöntemleri	**Isının Direkt Malzemede Oluşturulduğu Yöntemler**	
Isıl Yöntemler	**Mekanik Yöntemler (Sürtünme Esaslı)**	**Elektromanyetik Yöntemler**
• Sıcak Gaz (Hava) Kaynağı • Ekstrüzyon Kaynağı • Sıcak Kama Kaynağı • Sıcak Levha Kaynağı • Kızılötesi Isıtma Kaynağı • Lazer Kaynağı	• Döndürme Kaynağı • Titreşim Kaynağı • Ultrasonik Kaynak • Sürtünme Karıştırma Kaynağı • Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	• Rezistans Kaynağı • İndüksiyon Kaynağı • Dielektrik Kaynağı • Mikrodalga Kaynağı

2.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemlerine Genel Bakış

Otomotiv sanayi, gelişen teknolojiyi yakından takip eden ve her türlü gelişmeyi bünyesine adapte edebilme kolaylığına sahip bir endüstridir. Bir otomobilin üretilebilmesinde binlerce parça kullanılmakta ve yüzlerce farklı tipte işlem gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerden belki de en önemlisi, araç kalitesini %40 oranında etkileyen, aracın gövdesinin ortaya çıkarıldığı kaynak işlemleridir. Bir otomobil fabrikasının kaynak atölyesinde gövdenin imali için kullanılan belli başlı kaynak yöntemleri, direnç nokta kaynağı (DNK), direnç dikiş kaynağı, metal aktif gaz kaynağı (MAG), saplama kaynağı ve yumuşak lehimlemedir. Otomotiv

sektöründe kullanılan ince kesitli metal malzemeler yüksek ısı altında kaldıklarında kalıcı şekil bozukluklarına uğrarlar. Bu nedenle kaynaklama işleminin asgari ısıda ve en kısa sürede gerçekleştirme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Kaynaklı bağlantıların hızlı bir şekilde en az deformasyonla gerçekleştirilmesi, ekonomik ve kaynak mukavemetinin yüksek olması istenilen yerlerde, DNK ilk seçim olarak karşımıza çıkmaktadır (Anık ve diğ. 2002).

Ancak son yıllarda geliştirilen kaynak yöntemleri, özellikle otomotiv sanayisinde halen kullanılmakta olan kaynak yöntemlerinin yerini almaya adaydır. Bu anlamda DNK'nın alternatif kaynak yöntemi, sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) olarak ifade edilmektedir (Smith ve diğ. 2006). Yöntemin adı araştırmacılar tarafından farklı çalışmalarda daha çok Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı: SKNK (Friction Stir Spot Welding: FSSW) olarak adlandırılmakla beraber, bazı kaynaklarda Sürtünme Karıştırma Kaynağının Nokta Kaynağı: SKKNK (FSW Spot Welding: FSWSW), Sürtünme Nokta Birleştirmesi: SNB (Friction Spot Joining: FSJ) veya Nokta Sürtünme Kaynağı: NSK (Spot Friction Welding: SFW) olarak da adlandırılmaktadır (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Mitlin ve diğ 2006, Smith ve diğ. 2006, Thomas ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2008, Lin ve diğ. 2008a, 2008b, Uematsu ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2009).

Son zamanlarda önerilen SKNK yöntemi, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yönteminden türetilmiş ve SKK ile benzer avantajlara sahip bir katı faz kaynak yöntemidir. Kısa işlem zamanı ile etkili bir bindirme bağlantısı elde etmeye imkan verir. Günümüzde sadece otomotiv ve genel taşımacılık sektöründe değil aynı zamanda diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çekmektedir. Ticari amaçlı otomotiv üretiminde başarı ile kullanılmaktadır. Bu yöntem, SKK yöntemi temeline doğrudan dayanır (Feng ve diğ. 2004, Feng ve diğ. 2005, Awang ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005b, Santella ve diğ. 2005, Dunkerton ve Simpson 2006, Kyffin ve diğ. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Bufa ve diğ. 2007, Tozaki ve diğ. 2007, Arıcı ve Mert 2008, Uematsu ve diğ. 2008).

Birleştirme mekanizmaları her iki yöntemde de aynıdır. Ancak aralarında uygulama farklılıkları vardır. SKK yönteminde takım, parçaların boyu doğrultusunda (uçtan uca) hareket eder. SKNK yönteminde ise takım, bindirme pozisyonundaki parçaların kalınlığı doğrultusunda (arka arkaya duran parçaların içine düşey yönde) hareket eder. SKNK yönteminin uygulamadaki en belirgin farkı, kaynak takımının ileri doğru öteleme hareketi yapmayıp, düşey doğrultudaki hareketi dışında herhangi bir doğrultuda hareketinin olmamasıdır. SKNK yöntemi SKK'nın karşıdan karşıya ilerleme kısmı çıkarılmış şeklidir ve DNK yöntemini taklit eder. Böylece DNK, perçinleme ve diğer tek nokta birleştirme yöntemleri yerine kullanılabilir. Tüm bu yöntemlerin uygulanması sonucu ortaya çıkabilecek olan dezavantajların üstesinden SKNK ile gelinebilir (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Dunkerton ve Simpson 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).

Plastiklere uygulanan kaynak yöntemlerinden biri olan SKK, ilk olarak 1970'li yıllarda denenmeye başlanıp alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için yeni bir yöntem olarak 1991 yılında Ingiltere, Cambridge'de, İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI: The Welding Institute) tarafından geliştirilen, W. Thomas'ın çalışmalarıyla patenti alınan ve halen üzerinde oldukça fazla araştırma yapılarak geliştirilmeye devam edilen, klasik sürtünme kaynağının türevi olan bir katı faz kaynak yöntemidir. Diğer kaynak yöntemlerinde, birleşme yüzeylerinde erime sağlanıncaya kadar ısıtma, basınç uygulayarak bağ oluşturma ve basınç altında malzemede katılaşma sağlanıncaya kadar tutma olarak üç ayrı basamakta gerçekleşen kaynak basamakları bu yöntemde tek bir basamakta gerçekleşmektedir. Yöntem sıklıkla metal malzemelerin üzerinde çalışılmakla birlikte termoplastik esaslı plastik malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde de çalışılmaya başlanmış ve gelişim süreci hala devam etmektedir. Bu kaynak yöntemi günümüze kadar alüminyum, bakır, magnezyum, çinko ve titanyum alaşımlarına ilaveten çelik ve 1 mm'den 50 mm'ye kadar değişen kalınlıktaki termoplastiklerin bağlantısı için uzay, demiryolu, otomotiv ve deniz endüstrisi gibi bir çok endüstri kolunda kullanılmıştır (Dawes 1999, Dolby ve diğ. 2001, Thomas ve diğ. 2001, Feng ve diğ. 2004, Arıcı ve Sınmazçelik 2005, Awang ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005a, Kallee ve diğ. 2005, Mitlin ve diğ. 2006, Arıcı ve Şelale 2007, Bufa ve diğ. 2007, Arıcı ve Mert 2008).

Tablo 2.4'te, Brigham Young Üniversitesinde yüksek lisans tezi olarak yapılan çalışmada, SKK uygulanmış akrilonitril butadien stiren (ABS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), poliamid (PA), polikarbonat (PC), polimetilmetakrilat (PMMA), polipropilen (PP) gibi çeşitli plastik malzemelere ait çekme deney sonuçları verilmiştir. Tablo incelendiğinde, polipropilen (PP) için kaynaklı malzeme ile esas malzemenin çekme dayanımları arasındaki oranının yüksek olduğu görülmektedir (Strand 2004).

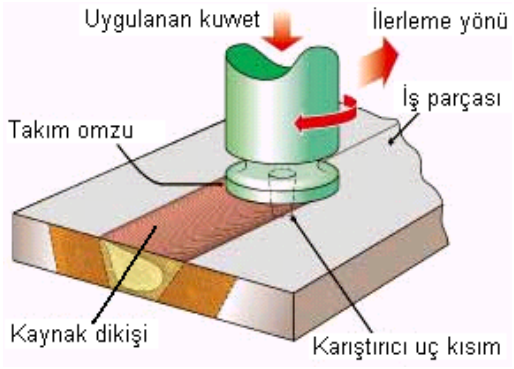
Tablo 2.4: Çeşitli plastikler için maksimum çekme gerilmesi değerleri (Strand 2004)

Malzeme	**Esas Malzeme**	**Sürtünme Karıştırma Kaynağı**	**Maksimum Çekme Gerilmeleri Oranı (%)**
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	**Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)**	
ABS	34.1	32.7	96
HDPE	22.5	21.5	95
PA (naylon)	72.4	28.4	39
PC	68.3	57.1	83
PMMA	42.0	21.5	51
PP	31.3	30.6	98

Hafif metal alaşımlar aslında, bilinen klasik TIG (Tungsten Inert Gas) ve laser kaynak yöntemleri ile otomotiv ve uzay endüstrisinde çok yaygın kullanılan malzemelerdir. Bu yöntemler ile yapılan birleştirmeler sonucunda oldukça geniş termal olarak etkilenen bölgeler ve ergimiş malzemede gözlemlenen ortalama tane boyutunun önemli artışından dolayı oldukça zayıf bağlantılar belirlenmiştir. Ayrıca, bu kaynak yöntemleri kullanıldığında, bağlantı bölgesinin içinde inklüzyonlardan ve diğer tipik hatalardan kaçınmak için önemli önlemler göz önünde bulundurulmak zorundadır. SKK, bir katı faz kaynak yöntemi oluşu nedeniyle kaynak edilemeyen veya zor kaynak edilen diye adlandırılan hafif metallerin bağlantı özelliklerini geliştirme yönünde ümit vericidir. Takımın hareketi ile yumuşayan malzemede meydana gelen oldukça karmaşık bir akış hareketi söz konusudur ve takım etrafında akışa zorlanan bu yumuşamış malzemede yeniden kristallenmiş yapı olarak tanımlanan çok özel bir mikroyapı meydana gelir (Bufa ve diğ. 2007).

Şekil 2.1'de verilen SKK yönteminde, özel olarak tasarlanmış dönen silindirik omuzlu bir takım alın alına getirilmiş levhaların arasına uygun bir açı ile sokulur ve

sonrasında tüm bağlantı hattı boyunca ilerletilir. Kaynakta kullanılan uç, kaynaklanacak plakaların kalınlığından biraz daha kısa ve çapı da yaklaşık olarak kaynaklanacak plakaların kalınlığına eşittir. Omuz kısmının çapı kaynak ucunun üç katı kadar olabilir. Kaynak takımı (omuz kısmı ve kaynak ucunu içerir) ve kaynaklanan malzeme arasındaki sürtünmeden ortaya çıkan ısı, kaynaklanan malzemenin ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta yumuşamasına neden olur. SKK sırasında yapılan incelemeler malzemenin ergimediğini göstermiştir. Kaynak takımının ilerletilmesi ile de omuz kısmının altında yumuşayan ve kaynak takımının arka tarafında bir nevi ekstrüzyona maruz kalan malzeme, kaynak çizgisi boyunca bağ oluşturur (Dawes 1999, Arıcı ve Sınmazçelik 2004, Sınmazçelik ve Arıcı 2004, Arıcı ve Sınmazçelik 2005, Arıcı ve Ertürk 2007, Bufa ve diğ. 2007).



Şekil 2.1: SKK yönteminin prensibi (Dawes 1999, Arıcı ve Sınmazçelik 2004)

2.7. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yöntemi

SKNK yöntemi 1993'te Mazda tarafından icat edilmiş, tamamen yeni ve ergime olmaksızın bindirme bağlantısı gerçekleştirilen bir katı faz kaynak yöntemidir (Feng ve diğ. 2004, Feng ve diğ. 2005, Mitlin ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Lin ve diğ. 2008a, 2008b, Mert ve Arıcı 2008, Tran ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2009). İlk olarak Mazda firması tarafından, önce Mazda RX-7 model spor arabaların sonrasında ise Mazda RX-8 model spor arabaların üretiminde kullanılmıştır. Yekpare alüminyum arka kapı için kaynak işlemi SKNK ile yapılmaktadır. Diğer bazı otomobil şirketleri de örneğin Ford, bazı modelleri için Al gövde kısımlarının kaynağını SKNK ile yaptıklarını duyurmuşlardır (Feng ve diğ. 2005, Kimberley 2005, Mortimer 2005, Santelle ve diğ. 2005, Mitlin ve diğ. 2006, CFSWC 2008, Lin ve diğ. 2008a, 2008b).

Malzemelerin birleştirme teknolojilerindeki bir yenilik olarak karşımıza çıkan SKNK, önemli bir buluştur (Dunkerton ve Simpson 2006). SKNK yöntemi etkili nokta bağlantıları geliştirmek için umut verici ve geleceği parlak bir bağlantı tekniği olarak tanımlanmaktadır (Bufa ve diğ. 2007). Devrim niteliğindeki bir birleştirme yöntemi olarak tanıtılan SKNK yöntemi, dünyada hafif alaşımlar için yeni fırsatlara yol açan yenilikçi ve özgün bir yöntemdir. Yöntem ayrıca, alüminyum, magnezyum ve diğer hafif metallerin bindirme bağlantıları için, Kawasaki ağır endüstrisi (KHI) tarafından geliştirilmiştir (KHI Ltd. 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Lin ve diğ. 2008a, 2008b, Tran ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2009). Kaynak sırasında malzemede ergime olmayışı, çarpılmaları minimuma çeker ve daha iyi özellikte bağlantılar sağlar (Kimberley 2005, Tran ve diğ. 2008, Uematsu ve diğ. 2008). Yöntemin basit ve çevre dostu olması, uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz, tel veya elektroda gereksinim duyulmaması, yatırım maliyetinin düşük ve önemli derecede enerji tasarrufu sağlaması, ayrıca otomasyona da yatkınlığından dolayı Amerikan otomotiv endüstrisi için büyük bir ilgi konusu olmuştur. Bu teknoloji Ford tarafından da denenmiştir ve teknolojiyi daha da geliştirmek amacıyla Ford yoğun çalışmalar yapmaktadır (Feng ve diğ. 2004, Mortimer 2005, KHI Ltd. 2006, Hinrichs 2006, Tozaki ve diğ. 2007).

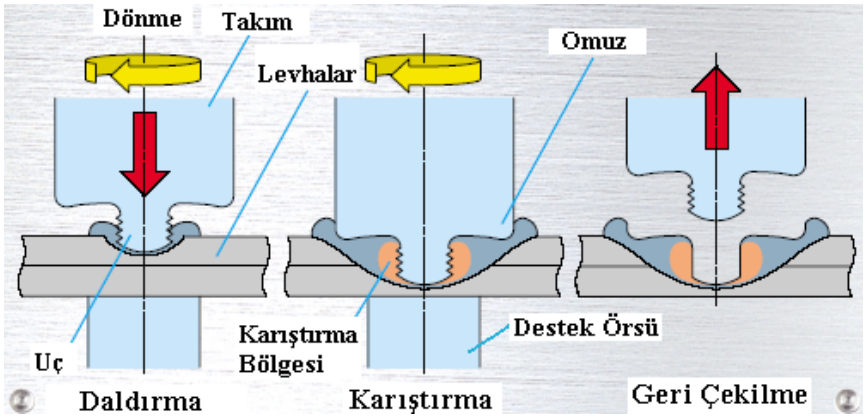
SKNK yönteminde meydana gelen kaynağın görünüşü, otomobil gövdelerinin montajı için yaygın olarak kullanılan DNK benzemektedir. SKNK yöntemi bir katı faz kaynak yöntemi oluşu ve diğer özelliklerinden dolayı gövde montajı ve diğer benzer uygulamalar için doğal olarak dikkat çekici hale gelmiştir. Yöntem alüminyum alaşımları, magnezyum, pirinç, bronz, bakır ve hatta ileri yüksek dayanımlı çelikler (AHSS: Advanced High Strength Steels) için kullanılmaktadır. Otomobil gövde montajı için ilk kaynak yöntemi olan DNK, birçok yeni yüksek performanslı hafif ağırlıkta yapı malzemeleri, örneğin alüminyum alaşımları ve ayrıca ileri yüksek dayanımlı çelikler için problemler oluşturabilir. SKNK yöntemi ile yapılan ilk çalışmalar, alüminyum alaşımlarına uygulanışının araştırılması ve geliştirilmesi üzerine olmuştur. Bununla beraber SKNK yöntemi, AHSS'in kaynağında, hem çelik gereksinimini sağlayan firmalara hem de otomobil kullanıcılarına bazı eşsiz teknik mükemmellikler sunmuştur. Bu nedenle de otomotiv ve taşımacılık endüstrisinde oldukça yoğun ilgi görmektedir (Feng ve diğ. 2005,

Dunkerton ve Simpson 2006, Hinrichs 2006, Kyffin ve diğ. 2006, Uematsu ve diğ. 2008).

DNK otomotiv endüstrisinde çeliklerin birleştirilmesi için yaygın olarak kullanılır fakat hafif alaşımlar için iyi sonuç vermez. Al alaşımlarının birleştirilmesi için, yüksek akım gereksinimi ve bitmiş kaynak bağlantısının kalitesindeki tutarsızlıktan dolayı DNK yöntemi pek uygun değildir. Günümüzde ise otomotiv endüstrisinde, geleneksel çelik elemanlar yerine hafif alaşımların kullanımı önemli bir şekilde artmıştır. Alüminyumun çeliğe oranla daha yüksek elektrik ve ısıl iletkenliği, çeliğin daha yüksek enerji tüketimine ve daha yüksek enerji kapasiteli ve de alt yapı gerektiren sistemlere sahip olmasını gerektirir. Bu durum ayrıca sık sık elektrot örtüsünün aşınmasına ve elektrot ömrünün azalmasına neden olur. Otomobil gövde ve kapıları için yaygın olarak kullanılan Al alaşımları ise, aracın ağırlığını azaltmayı sağlar. Böylece daha az yakıt kullanımı söz konusudur. Bu durum ekonomik açıdan yarar sağladığı gibi daha az eksoz gazı çıkışını da sağlamaktadır. Böylece aracın performansı artarken, çevrede daha az kirletilmiş olur (Lathabai ve diğ. 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Lin ve diğ. 2008a, Tran ve diğ. 2008, Uematsu ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2009).

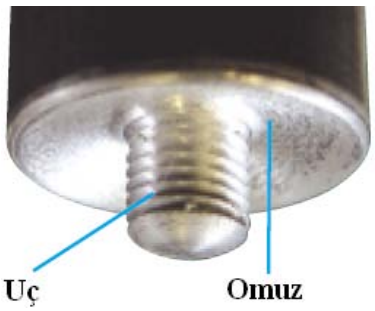
2.7.1. SKNK yönteminin uygulanışı

SKNK yönteminin, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takımla, dalma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademeli Şekil 2.2'de görüldüğü gibi son derece basit bir uygulaması vardır. Yöntemin başarısına ve bağlantının dayanımına etki eden beş ana parametresi ise takımın geometrisi, dönme hızı (devir sayısı), dalma hızı, dalma derinliği ve bekleme süresidir (takım geri çekilmeden önceki karıştırma süresidir) (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Hovanski ve diğ. 2007, Arıcı ve Mert 2008, Lin ve diğ. 2008a, Mert ve Arıcı 2008, Tran ve diğ. 2009). Bu üç aşama sırasıyla aşağıdaki gibidir.



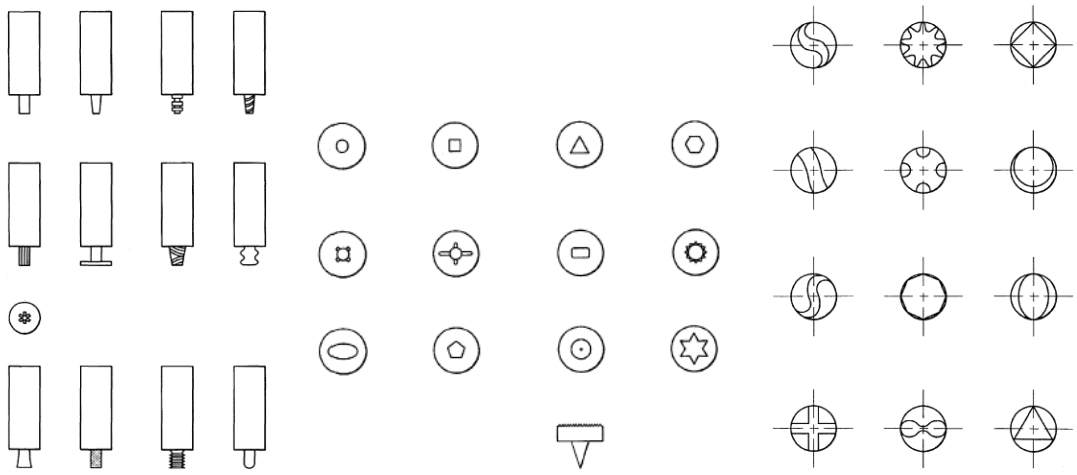
Şekil 2.2: Yöntemin şematik olarak üç aşaması (KHI Ltd. 2006)

Birleştirme takımı Şekil 2.3'teki gibi, genellikle silindirik bir takımın merkezinden dışarı çıkıntı yapmış küçük bir vidalı veya yivli takım ucu tasarımına sahiptir. Çeşitli takım şekilleri ve boyutları, birleştirme koşullarına bağlı olarak kullanılabilir (KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Lin ve diğ. 2008a).



Şekil 2.3: Birleştirme takımı (KHI Ltd. 2006)

Aşağıda Şekil 2.4'te çeşitli takım omuz ve uç profilleri görülmektedir (Nelson ve diğ. 2004). Bu takımlar SKK yönteminde kullanılan takımlar olup, istenildiğinde SKNK yönteminde de kullanılabilir.



Şekil 2.4: Çeşitli takım omuz ve uç profilleri (Nelson ve diğ. 2004)

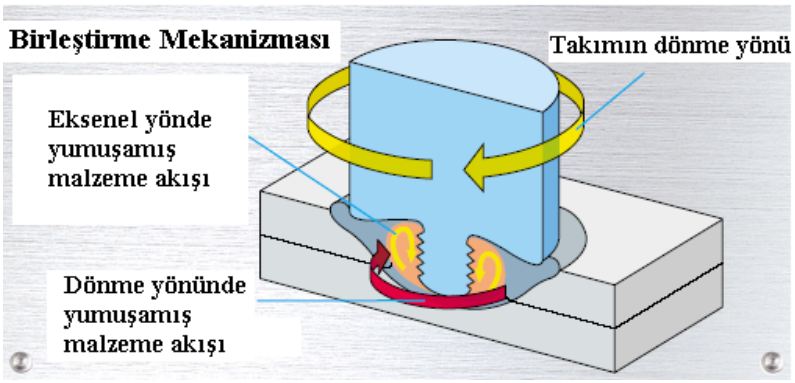
1) Daldırma: Belirli bir devirle döndürülen kaynak takımının uç kısmı bindirme kaynağı pozisyonundaki parçalara temas ettiği anda bu aşama başlamış olur. Takım, üst üste bindirilmiş levhaların içine ve önceden belirlenen derinliğe seçilen özel bir hızla dalar. Birleştirici takım dönüyor iken, belirli bir basınç ile iş parçasına karşı kuvvet uygulanır. Bu basınç ile takımın uyguladığı kuvvet, birleştirilecek parçalar ile takım ucu arasında sürtünme ısısının ortaya çıkmasını sağlar. Sürtünme ısısı ile bu bölgede yumuşayan malzeme, takım ucunun iş parçasına dalmasını kolaylaştırır. Bu aşama takım omzunun üst parça yüzeyine temas etmesiyle sona ermekle beraber gerektiğinde takımın omuzu da bir miktar üst parçaya daldırılır. Daldırma yükü, bu yüke dayanacak bir destek örsü veya levhası ile alttan desteklenir. Yada bu destek örsü, kullanılan tezgahın tablasıdır (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005b, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008, Lin ve diğ. 2008a, Mert ve Arıcı 2008, Tran ve diğ. 2009).

2) Bekleme (Karıştırma, Birleştirme veya Tamamlama): Yöntemin ikinci aşaması araştırmacılar tarafından farklı çalışmalarda bekleme, karıştırma, birleştirme veya tamamlama şeklinde adlandırılmaktadır. Bekleme, takımın geri çekilmeden önceki karıştırma süresidir. Takımın aşağı yönde hareketi bittiği için beklemede denilen bu aşamada, takımın ucu parçalara tamamen gömülü durumda iken dönme hareketi devam eder. Takım ucu ve omuzu SKNK süresince farklı zamanlarda önemli roller oynar. Önce takım ucu üst levha yüzeyi ile temas eder ve sonrasında en üst levhaya

tamamen gömülür ve alttaki levhaya nüfuz etmeye başlar. Sonrasında ise takım omzu da birleştirme işleminde önemli bir rol oynamaya başlar. Kaynak takımının omuz kısmı üst parça yüzeyine temas ettiğinden dolayı bu bölgede de sürtünme ısısı ortaya çıkmakta ve kaynak bölgesine daha fazla miktarda ısı girişi sayesinde daha geniş bir bölgede malzeme yumuşaması sağlanmaktadır. Kaynak bölgesinden yukarı hareket eden yumuşamış malzeme, dönen takım omuzu ile üst levhanın yüzeyi arasında adeta ekstrüzyona maruz kalır ve takım omuzu altında ve ucu etrafında karıştırılarak, bindirme pozisyonundaki parçalar arasında metalurjik bir bağ oluşturulur. Ayrıca, takım omzunun parçalara kuvvet uygulamaya devam etmesi, iki parça arasındaki birleşme ara yüzeyinin tam temasta olmasını sağlar ve takımın omuzu tarafından malzemeye uygulanan dövme basıncı, takımın ucu etrafında birleştirme işlemine önemli katkıda bulunur. Hatta istendiğinde takımın omuzu da bir miktar üst parçaya daldırılarak takımın parçalar ile temasta olan yüzey alanı artırılıp daha fazla sürtünme ısısı üretilerek yumuşayan malzeme miktarı artırılabilir. Böylece omuz kısmı parçalar ile temas ettikten sonra bile takıma uygulanan basınç belirli bir zaman için sürdürülmüş olur. Karıştırma aşamasında yumuşayan malzemenin Şekil 2.5'te görüldüğü gibi iki türlü akış hareketi mevcuttur. Takım malzeme akışını belirler ve takımın şekline ve dönme hareketine bağlı olarak meydana gelen, eksenel yönde yumuşamış malzeme akışı ve dönme yönünde yumuşamış malzeme akışı olarak adlandırılan bu hareketler SKNK yönteminin birleştirme mekanizmasını oluşturur. Bu sayede üstteki ve alttaki levhalara ait yumuşayan malzemeler birbiri içinde akarak karışır (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005b, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Bufa ve diğ. 2007, Arıcı ve Mert 2008, Lin ve diğ. 2008a, Mert ve Arıcı 2008, Tran ve diğ. 2009).

a) Eksenel yönde yumuşamış malzeme akışı: Takım ucunun çevresindeki yumuşamış malzeme, takımın dolayısıyla da takım ucundaki vida dişlerinin dönmesiyle takımın ekseni doğrultusunda (parçaların kalınlığı doğrultusunda) bir akış hareketi yapar (KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008, Mert ve Arıcı 2008).

b) Dönme yönünde yumuşamış malzeme akışı: Kaynak takımının dönüşüyle, yumuşamış malzeme takımın dönme yönünde sürükleniyormuş gibi dairesel bir akış hareketi yapar (KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008, Mert ve Arıcı 2008).



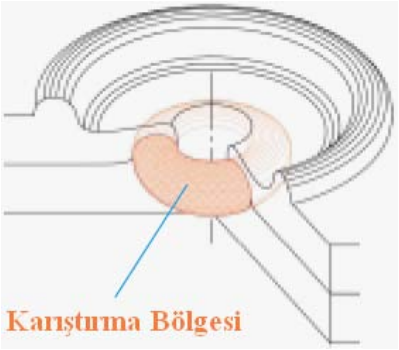
Şekil 2.5: SKNK'nın birleştirme mekanizması (KHI Ltd. 2006)

SKNK sonrası kaynak bölgesinin oluşumu incelendiğinde, metal malzemeler için, esas malzemeden farklı olarak ısıdan etkilenmiş bölge, yumuşamış malzeme bölgesi ve karıştırma bölgesi olarak adlandırılan kaynak bölgesi oluşumu Şekil 2.6'da görülmektedir. Ayrıca takımın uç kısmının hemen arkasındaki omuz, karıştırmanın yapıldığı malzemede dışbükey bir boşluk oluşturur. Bu dışbükey şekil, birleştirme bölgesinde fincan tabağı görünümü olarak adlandırılan ufak bir çukur şeklindedir (KHI Ltd. 2006).



Şekil 2.6: Kaynak bölgesinin oluşumu (KHI Ltd. 2006)

SKNK yönteminde takım omzu tarafından uygulanan basıncında etkisi ile takım ucu etrafında karıştırma bölgesi olarak adlandırılan halka şeklinde bir oluşum meydana gelir. Takım ucunun çevresinde oluşan karıştırma bölgesinin, yuvarlak lamba görünümü olarak adlandırılan veya simit halkasına benzetilen şekli Şekil 2.7'de görülmektedir (KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Lin ve diğ. 2008b).



Şekil 2.7: Karıştırma bölgesinin görünümü (KHI Ltd. 2006)

3) Geri çekilme: Kaynak takımı, karıştırma tamamlandıktan sonrada, dönmeye devam ederek hızlı bir şekilde geri çekilir (Gerlich ve diğ. 2005a, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Mert ve Arıcı 2008). Bütün bu işlemler saniyeler içinde tamamlanır ve sonrasında yumuşayan malzemeler tekrar katılaştığında, hiç yumuşamamış gibi katı durumunu sürdürür. Böylece birleştirme işlemi tamamlanmış ve bir kaynak noktası oluşturulmuş olur (KHI Ltd. 2006). Ayrıca kaynak takımı parçalardan tamamen uzaklaştığında, kaynak bölgesinin ortasında yöntemin kendisine özgü karakteristik bir boşluk oluştuğu görülür (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b, KHI Ltd. 2006, Lathabai ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Thomas ve diğ. 2006, Arıcı ve Mert 2007, Bufa ve diğ. 2007, Arıcı ve Mert 2008, Lin ve diğ. 2008a, 2008b, Mert ve Arıcı 2008, Tran ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2009).

2.7.2. SKNK ile DNK yönteminin karşılaştırılması

- SKNK yönteminde oluşturulan kaynak noktası, malzemeler ergimeksizin gerçekleştirilir. Böylece metalurjik açıdan bir değişim olmaz.

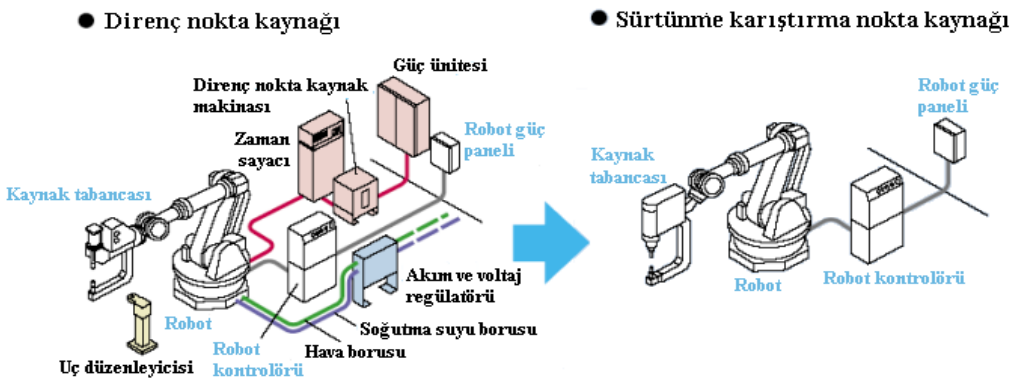
- Kaynak sırasında malzemede ergime olmayışı, çarpılmaları minimuma çeker ve daha iyi özellikte bağlantılar sağlar.
- SKNK yönteminde ortaya çıkan ısı daha az olduğundan dolayı bu ısının getirmiş olduğu deformasyon riskleri azalır. DNK'dan daha az ısı deformasyonu meydana gelir.
- Yüksek kalite ve yüksek çekme kuvveti değerleri elde edilir.
- Daha düşük yatırım ve çalışma maliyeti gerektirir. SKNK yöntemi ile tüketilen enerji, iki servomotorla çalıştırılan birleştirme takımına gerekli elektrik gücü kadardır. Bu nedenle yüksek elektrik akımlarına ihtiyaç duyulmaz.
- SKNK yönteminde, direnç nokta kaynağındaki teçhizatın tükettiği enerjinin 1/20'sinden daha az enerji kullanır. İşletme maliyetlerini azaltır ve güç maliyetinde yaklaşık %95-99 oranında azalma olur.
- DNK'da, Al alaşımlı levhaların kaynağı sırasında aşırı uç aşınmasın kaçınmak ve otomotiv endüstrisinde kullanılan diğer bir malzeme türü olan ileri yüksek dayanımlı çeliklerin kaynağında (AHSS) önemli bir sorun olan, çinko kaplama ve bakır elektrot arasında ortaya çıkan ve yüksek kaynak kuvvetinin neden olduğu kimyasal reaksiyon sonucu kısa elektrot ömrü, DNK'a bir alternatif olarak SKNK kullanımına ilgiyi artırmaktadır.
- Al levhaların birleştirilmesinde çok düşük işlem ve yatırım maliyetleri nedeniyle SKNK yöntemi tercih edilir.
- SKNK yönteminde kullanılan tükenmeyen birleştirici takım, alüminyum alaşımları için kullanıldığı zaman aşınmaya duyarlı değildir. Kullanıcılar, birkaç yüz bin nokta kaynağından sonra bile karıştırıcı uç kısımda aşınma rapor etmemişlerdir. Bu nedenle de kullanılan takım uzun ömre sahiptir.
- Seri ve çabuktur. Yöntemin hızı DNK ile rekabet halindedir ve kaynak süresini kısaltır. Özellikle Al levhaların kaynağında kaynak çevrimi zamanı 0,5 sn'ye düşer.
- Kaynak işlemi gözlemlenebilir.
- SKNK yöntemi malzemenin oksitlenmesine, yüzeylerdeki kirlilik ve yağlara duyarlı olmadığından kaynak ortamının veya kaynak edilecek parçaların çok temiz olması gerekmez. Bu nedenle de uygulamaya çok daha fazla uygundur.
- Tozsuz ve dumansız bir kaynak yöntemi olduğu için çevre dostudur. Çevresi temiz bir çalışma ortamı sağlar. Kullanımı temiz bir yöntem olmasının yanında, ayrıca herhangi bir elektromanyetik gürültüde üretmez.

- SKNK uygulamasında mükemmel renk uyumu vardır.
- SKNK yöntemi ile birbirine daha yakın kaynak noktaları oluşturulabilir. Buna karşılık manevradan dolayı DNK ile birbirine yakın mesafelerde kaynak noktaları elde etmek mümkün değildir. Al alaşımlı bindirme levhalarına SKNK uygulandıktan sonraki birbirine yakın kaynak noktalarının üstten görünüşü Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8: Birbirine yakın kaynak noktalarının üstten görünüşü (Hinrichs 2006)

- DNK'da ki aşırı derecede yüksek soğutma oranı yüzünden, ileri yüksek dayanımlı çeliklerin kaynak özelliği önemli oranda düşmekte ve kaynak bölgesinde katılaşma sırasında yüksek oranda sertleşmiş hassas mikroyapılar gelişerek, çatlak ve kusurlar oluşabilmektedir.
- SKNK, DNK'na göre uygulaması daha basit bir kaynak yöntemidir.
- Servis gereksinimlerini azaltır.
- SKNK ve DNK yöntemleri, kullanılan donanım açısından karşılaştırıldığında, SKNK yönteminin oldukça basit bir donanıma sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.9). SKNK yönteminin mekanik donanımları, DNK yönteminde gerekli olan yardımcı teçhizata gereksinim duymaz. Örneğin SKNK'da soğutma suyuna ve de sıkıştırılmış havaya gerek yoktur. Bu nedenle basit ve ekonomik bir yöntemdir. Böylece teçhizatın ve çalışma maliyetinin büyük ölçüde azaltılmasını sağlar ve %40 oranında ekipman maliyetlerini azaltmış olur (Feng ve diğ. 2004, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Kimberley 2005, Dunkerton ve Simpson 2006, Hinrichs 2006, KHI Ltd. 2006, Kyffin ve diğ. 2006, Lathabai ve diğ 2006, Mitlin ve diğ. 2006, Su ve diğ. 2006, Smith ve diğ. 2006, CFSWC 2008, Lin ve diğ. 2008a, Uematsu ve diğ. 2008, Tran ve diğ. 2008, RIFTEC GmbH 2009, Tran ve diğ. 2009).

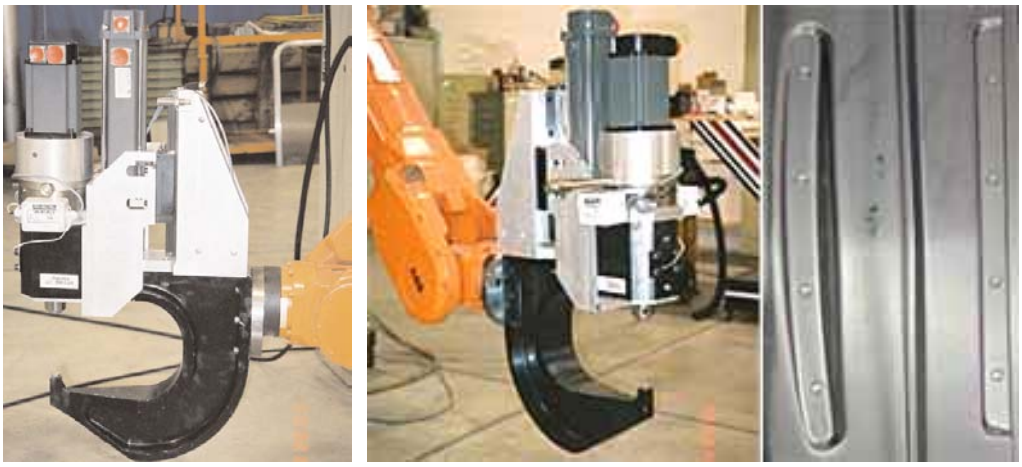


Şekil 2.9: SKNK ve DNK yöntemlerinin donanım karşılaştırması (KHI Ltd. 2006)

2.7.3. SKNK makinaları

SKNK yöntemi otomasyona yatkınlığı sayesinde, robot ve otomasyon sistemlerine entegre edilerek kolayca geliştirilmiştir ve bu sayede kısa işlem zamanı ile etkili bindirme bağlantıları elde etmeye imkan vermiştir (Santella ve diğ. 2005, Bufa ve diğ. 2007). FSL (Friction Stir Link), Amerika'nın Wisconsin şehrinde, otomotiv endüstrisi üzerine odaklanmış servis ve tedarikçi firmadır. Alüminyumun SKNK uygulamaları için çeşitli SKNK makina ve donanımları FSL'den sağlanabilir. FSL, SKK ve SKNK yöntemlerinin gelişmesini, teknoloji transferini, kaynak sonrası üretilen hacmin hafifliğini sağlamak için çalıştığı gibi, geliştirdiği StirWare yazılımı ile de SKK ve SKNK yöntemlerinin entegrasyonuna (bütünleşmesine) olanak sağlamıştır (Kallee ve diğ. 2005, Smith ve diğ. 2006, FSL 2007). Donanım, yazılım ve işlem parametrelerinin gelişiminin mümkün olması standart endüstriyel bir robotun kullanımına olanak sağlamıştır. Örneğin ABB ve Kawasaki firmaları SKK ve SKNK yöntemlerinde bunu uygulamışlardır. Çok eksenli bir Kawasaki robot ile SKNK yöntemi birleştirildiği zaman daha büyük faydalar sağlanabileceğinin farkına varılmıştır ve KHI, hafif alaşımları birleştirme işleminde özel bir SKNK tabancası geliştirmiştir. Dünya çapında başarıya ulaşmış KHI, dünya genelinde gelişmiş ve mükemmelleşmiş sabit SKNK makinalarını ve ilaveten Kawasaki mafsallı robotlarından faydalanan esnek birleştirici sistemlerini dünyaya tanıtmıştır (KHI Ltd. 2006, Smith ve diğ. 2006). Böylece Şekil 2.10'da görüldüğü gibi geliştirilmiş mafsallı robot kolu üzerinde bilgisayar kontrollü SKNK tabancası (C çerçeve sistemi) kullanılabilir ve bu sistemler gerektiğinde ticari olarak elde edilebilir

(Kallee ve diğ. 2005, Santella ve diğ. 2005, KHI Ltd. 2006, Smith ve diğ. 2006, FSL 2007).



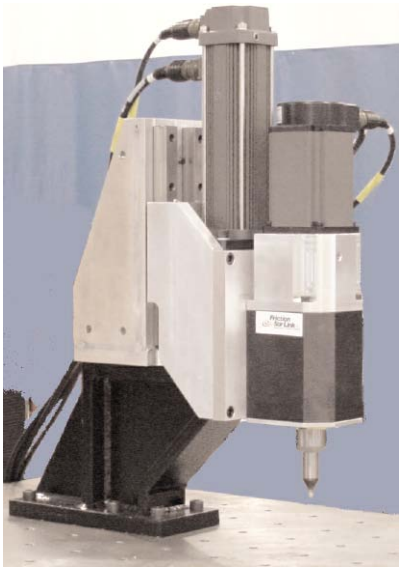
Şekil 2.10: Mafsallı robot kolu üzerinde bilgisayar kontrollü SKNK tabancası (Kallee ve diğ. 2005, Hinrichs 2006, Kallee 2006, FSL 2007)

SKNK yönteminde kullanılan makinalar temelde benzer kontrol sistemlerine sahip olmakla beraber mekanik donanımları açısından değişiklik gösterirler. SKNK yönteminde temelde üç şekilde makina tasarımı söz konusudur. Bu yöntemde masa üstü, sabit tipte veya pres tipi makinalar kullanılabildiği gibi robotlarda kullanılabilmektedir. Bunlardan robotların kullanımı, özellikle otomobillerde derin çekilmiş alüminyum levhalardan arka kapılar, kaputlar ve bagaj kapakları üretiminde önemli yer tutar. Mafsallı robot kolu üzerinde bilgisayar kontrollü SKNK tabancası (C çerçeve sistemi) kullanılması büyük ve önemli bir gelişmedir. Bunun haricinde ihtiyaca göre masa üstü SKNK makinaları ve sabit tipte veya pres tipi SKNK makinaları kullanılabilir (Kallee ve diğ. 2005, Hinrichs 2006, Kallee 2006, Smith ve diğ. 2006, KHI Ltd. 2006, FSL 2007). SKNK yöntemi için geliştirilen makinalar aşağıda görülmektedir.

2.7.3.1. Masa üstü SKNK makinası

Masa üstü tip SKNK makinası araştırma ve geliştirme amaçlı kullanılabileceği gibi çok sayıda üretimin söz konusu olduğu yüksek hacimli parça üretiminde de kullanılabilir. Eğer otomatik bir sistem ile kendi kendine bağlama tertibatı

kullanılırsa, el ile sabitleme gerekmeksizin çalıştırılabilir. Çok sayıdaki uygulamalar için ise çoklu masa üstü birimleri bir robot ile entegre (monte) edilebilir. Şekil 2.11'de masa üstü tip SKNK makinası görülmektedir (Hinrichs 2006, FSL 2007).



Şekil 2.11: Masa üstü SKNK makinası (Hinrichs 2006, FSL 2007)

2.7.3.2. Sabit tip veya pres tipi SKNK makinası

Sabit tip veya pres tipi SKNK makinası, araştırma ve geliştirme amaçlı kullanılabileceği gibi çok sayıda üretimin söz konusu olduğu yüksek hacimli parça üretiminde de kullanılabilir. Eğer otomatik bir sistem ile kendi kendine bağlama tertibatı kullanılırsa, el ile sabitleme gerekmeksizin çalıştırılabilir. Çok sayıdaki uygulamalar için ise bu makinalar bir robot ile entegre (monte) edilebilir. Kaynak noktasını oluşturacak tabanca ve destek için özel dayanak sistemleri olan makinalardır. Özel bir kontrol cihazı ile donatılmış makinalar, elektrik düğmeleri ve dokunma panelleri ile tamamlanmıştır. Operatör tarafından elle veya tutucular ile desteklenen iş parçasında belirlenen yere, istenildiği zaman ayak pedalına basılarak kaynak noktası oluşturulur. Şekil 2.12'de sabit tip ve pres tipi SKNK makinaları görülmektedir (KHI Ltd. 2006, FSL 2007).



Şekil 2.12: Solda sabit tip ve sağda pres tipi SKNK makinası (KHI Ltd. 2006, FSL 2007)

2.7.3.3. Robotlar

Çok sayıda üretimin söz konusu olduğu yüksek hacimli ve karmaşık geometriye sahip olan parçaların üretimi için robotlar idealdir. Bilgisayar kontrollü SKNK tabancası (C çerçeve sistemi) herhangi tip bir robota entegre (monte) edilebilir. Tabanca iki adet servo motor ile donatılmıştır. Bu motorlardan biri takımın dönmesi için diğeri de eksenel hareket içindir. Tabanca motorları, robot kontrolörü tarafından dışarıdan kullanılarak da kontrol edilebilir. İşletme panellerine ve ilaveten kontrol cihazlarına ihtiyaç duyulmaz. Robotu yöneten kimse, yerleştirilen iş parçasının şeklini, boyutlarını ve ilavetende gerekli çalışma aralığının birbirine uygun olmasını seçtirebilir. Şekil 2.13'te SKNK robotları görülmektedir (KHI Ltd. 2006, Hinrichs 2006, FSL 2007, GKSS 2009).



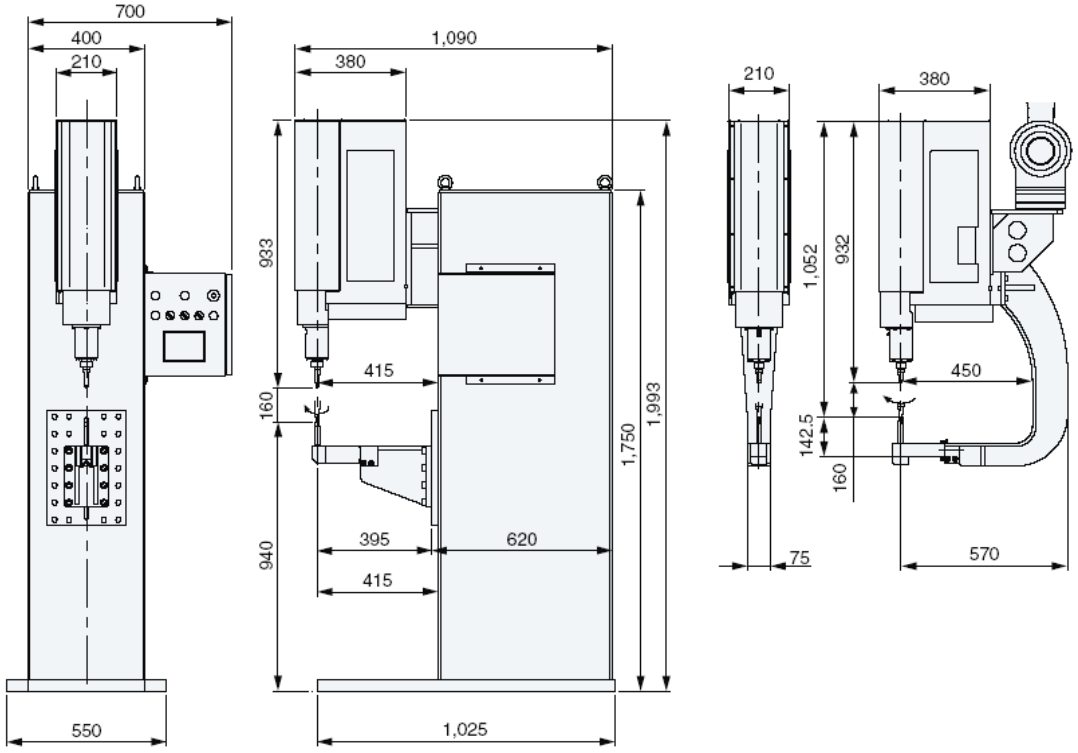
Şekil 2.13: SKNK Robotları (KHI Ltd. 2006, Hinrichs 2006, GKSS 2009)

2.7.3.4. Kullanılan SKNK makinalarının boyutları ve özellikleri

SKNK yönteminde kullanılan makinalardan sabit sistem ve robot sistemi için verilen özellikler Tablo 2.5'te, sabit makina ve robotlar için tasarlanmış, mafsallı robot kolu üzerinde bilgisayar kontrollü SKNK tabancasının boyutları ise Şekil 14'te görülmektedir. Kaynak tabancasının bağlı bulunduğu kısmın şekli, boyutları ve çalışma aralığı gerektiğinde değiştirilebilir (KHI Ltd. 2006).

Tablo 2.5: SKNK makina sistemlerinin özellikleri (KHI Ltd. 2006)

		Sabit Sistem	**Robot Sistemi**
Kaynak Tabancanın Monte Edilmesi		Özel dayanak	6-Eksenli mafsallı kol
Kontrol Cihazı		Özel kontrol cihazı	Robot kontrol cihazı
Tabanca Özellikleri	**Hareket Metodu**	AC Servomotor (eksenel basınç & eksenel dönme)	
	Basınç Aralığı	1470-5880 N	
	Devir Sayısı Aralığı	0-4500 d/d	
	Basınç Ekseni Mesafesi (Strok)	Max. 160 mm	
	Dış Boyutlar	SKNK Tabancanın boyutları ve dış görünüşü aşağıdaki şekil üzerinde verilmiştir	
	Ağırlık	Yaklaşık 125 kg	
Standart Aksesuarlar		İşlem takımı (standart tip), ayarlanabilir basınç takımı	
Seçenekler		Nokta pozisyonunda aydınlatma aleti	-
Sağlanan Gerekli Güç		CE: AC380V,AC400V,AC415V,AC440V±10%,3∅,50Hz UL: AC460V,AC480V,AC515V,AC575V±10%,3∅,50Hz	
		8 kVA	11 kVA
Brüt Ağırlık		~ 650 kg (Kontrolörü ve tabancayı içerir)	~ 1500 kg (Robot kolu ve tabancayı içerir) Robot kontrolörü ~ 120 kg



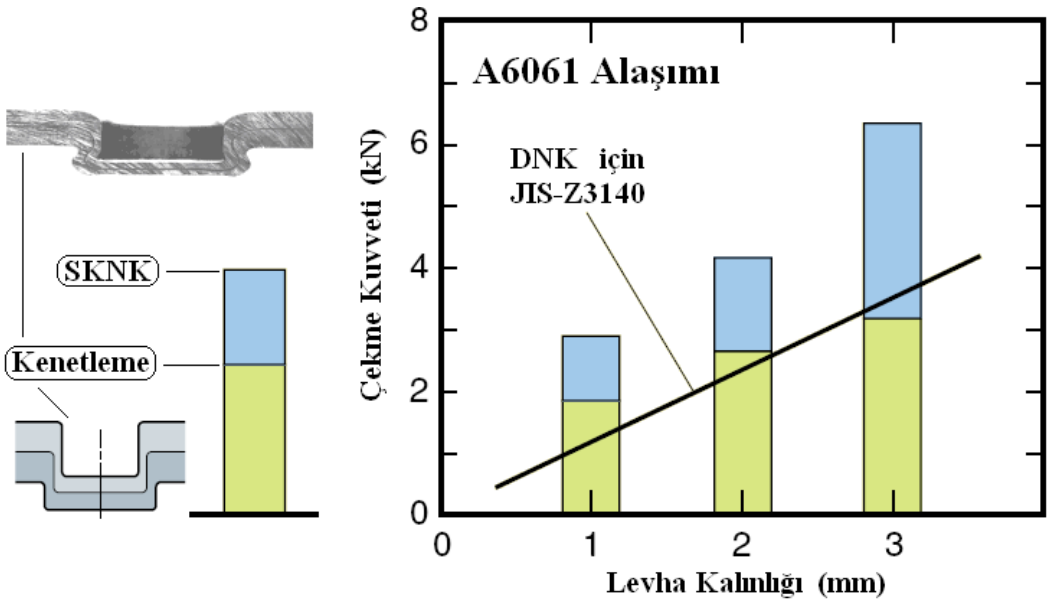
Şekil 2.14: SKNK yönteminde kullanılan makinalardan bazılarının boyutları (solda sabit makina, sağda ise robot sistemi için SKNK tabancası) (KHI Ltd. 2006)

2.8. SKNK Yöntemi ile İlgili Çalışmalar

KHI (Kawasaki Heavy Industries: Kawasaki Ağır Endüstrisi) tarafından yapılan çalışmada, 6000 serisi Al-Mg-Si alaşımı olan A6061 için, farklı levha kalınlıklarında SKNK ve pres bağlantı veya kenetleme olarak adlandırılan bağlantı şekillerinden elde edilen çekme kuvveti değerleri, DNK için Japon standardı olan JIS-Z3140'a göre ulaşılması gereken çekme kuvveti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca A6061 alüminyum alaşımı için, SKNK ile DNK'nın yorulma davranışının karşılaştırılması da verilmiştir (KHI Ltd. 2006, TWI Ltd. 2009b).

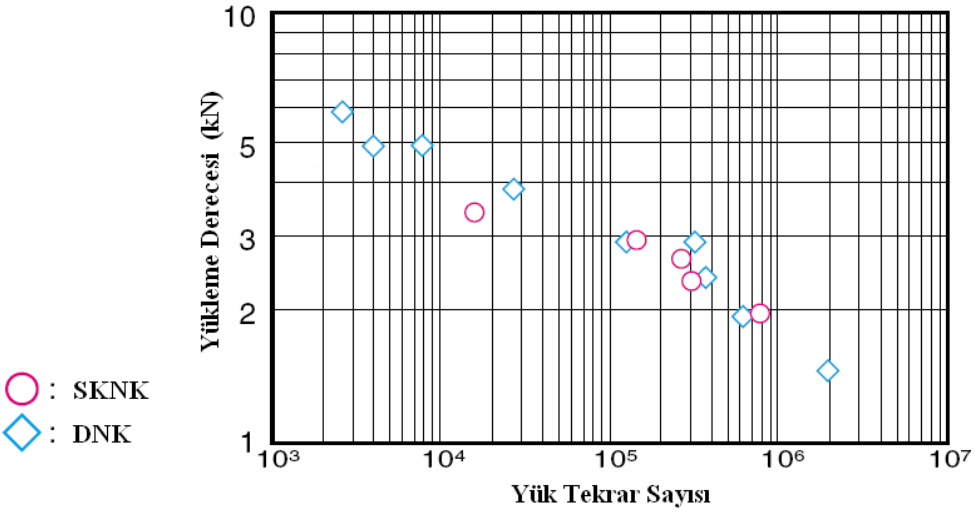
Şekil 2.15'te levha kalınlığı arttıkça çekme kuvveti doğrusal artış gösteren ve A6061 alaşımının DNK için verilmiş olan kısmı, DNK için Japon standardı olan JIS-Z3140'a göre ulaşılması gereken çekme kuvveti değeridir. Burada 1-2-3 mm levha kalınlıkları tek levhaya aittir. Düşük levha kalınlıklarında kenetlemede elde edilen çekme kuvveti değerleri, DNK standardına göre ulaşılması gereken çekme kuvveti değerlerinden daha yüksek olmakla beraber levha kalınlığı arttıkça DNK standardı

için ulaşılması gereken çekme kuvveti değerleri kenetlemeden elde edilen değerlerin biraz daha üzerinde görülmektedir. SKNK'dan elde edilen çekme kuvveti değerleri ise tüm levha kalınlıkları için kenetlemeden elde edilen ve de DNK standardına göre ulaşılması gereken çekme kuvveti değerlerinden oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlar SKNK yönteminin, bağlantıda üstün mekanik özellikler sağladığını doğrulamıştır (KHI Ltd. 2006). Ayrıca Şekil 2.15'te kenetlemeye ait şematik gösterime ilaveten kenetleme işlemi uygulanmış parçaların fotoğrafı da görülmektedir (ATTEXOR Inc. 2009a, 2009b).



Şekil 2.15: A6061 alüminyum alaşımı için, farklı levha kalınlıklarında SKNK ve Kenetlemede elde edilen çekme kuvveti değerlerinin, DNK için ulaşılması gereken çekme kuvveti değerleri ile karşılaştırılması (KHI Ltd. 2006, ATTEXOR Inc. 2009a, 2009b)

A6061 alüminyum alaşımı için, SKNK ile DNK'nın yorulma davranışının karşılaştırılması Şekil 2.16'da görülmektedir. Her iki yöntemde de birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Levha kalınlığı; 2,5 mm x 2'dir (KHI Ltd. 2006).

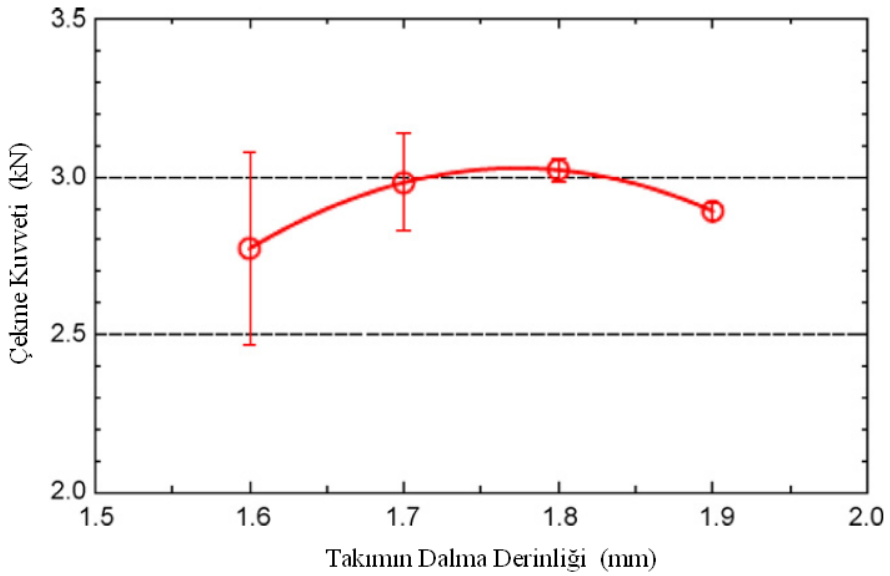


Şekil 2.16: A6061 alüminyum alaşımı için, SKNK ile DNK'nın yorulma davranışının karşılaştırılması (KHI Ltd. 2006)

Feng ve diğerlerinin ve de Mitlin ve diğerlerinin yaptığı çalışmalarda, SKNK ile birleştirilmiş Al 6111-T4 çekme numuneleri için, artan dalma derinliği ile çekme kuvvetinin değişimi, takımın dalma derinliğinin kırılma şekline etkileri, bağlantıların enine kesit makro fotoğrafları ve Al 6111-T4 numuneler için esas metalin ve karıştırma bölgesinin mikro yapıları incelenmiştir. 25 mm genişliğinde, 100 mm uzunluğunda ve 0,94 mm kalınlığında, 6111-T4 alüminyum alaşımından çekme numuneleri hazırlanmıştır. Üst üste bindirme standart mesafesi 25 mm olarak alınmıştır. Kaynak noktaları, üst üste bindirme bölgesinin merkezinde ve 2000 d/d devir sayısında oluşturulmuştur. Takımın dalma derinliği 1,6 mm ile 1,9 mm arasında seçilmiştir. Kullanılan takım H13 takım çeliğinden imal edilmiştir ve her bir kaynak noktasının oluşturulması için gerekli toplam çevrim süresi 1,5 sn'den bile kısadır (Feng ve diğ. 2004, Mitlin ve diğ. 2006).

1,6 mm ile 1,9 mm arasındaki dalma derinliklerinde yapılan çekme testlerinin sonuçları Şekil 2.17'de görülmektedir. 6111-T4 alüminyum alaşımı levhaların SKNK ile bindirme kaynağında, kaynak takımı dalma derinliğinin çekme kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Verilen grafik, dalma derinliğinin çekme kuvvetini bir değere kadar arttırdığı sonrasında ise düşürdüğünü göstermektedir. Her bir veri noktası en az üç deney sonucunun ortalamasını göstermektedir. Başlangıçta, bağlantının çekme kuvveti değeri dalma derinliği ile artmıştır. Daha sonra çekme kuvveti maksimum bir değere ulaşmıştır ve dalma derinliğinin daha da artması ile

düşmüştür. Çekme kuvveti, 1,8 mm dalma derinliğinde 3 kN'u geçmiştir. Araştırmacılar bunun önemli bir gelişme olduğunu çünkü kendi çalışmalarında elde edilen çekme kuvveti değerlerinin, rapor edilmiş olan değerleri aşmış olduğunu bildirmişlerdir. 1,6 mm ve 1,7 mm'lik düşük dalma derinliklerinde, elde edilen çekme kuvveti değerlerinde önemli bir salınım vardır. Bu salınım özellikle 1,6 mm dalma derinliği için çok açık olarak görülmektedir. 1,8 mm ve 1,9 mm dalma derinliklerinde ise elde edilen çekme kuvveti değerleri çok dar bir aralıkta salınım yapmıştır. Çekme kuvveti 1,8 mm dalma derinliğinde en yüksek değere ulaşmıştır (Feng ve diğ. 2004, Mitlin ve diğ. 2006).

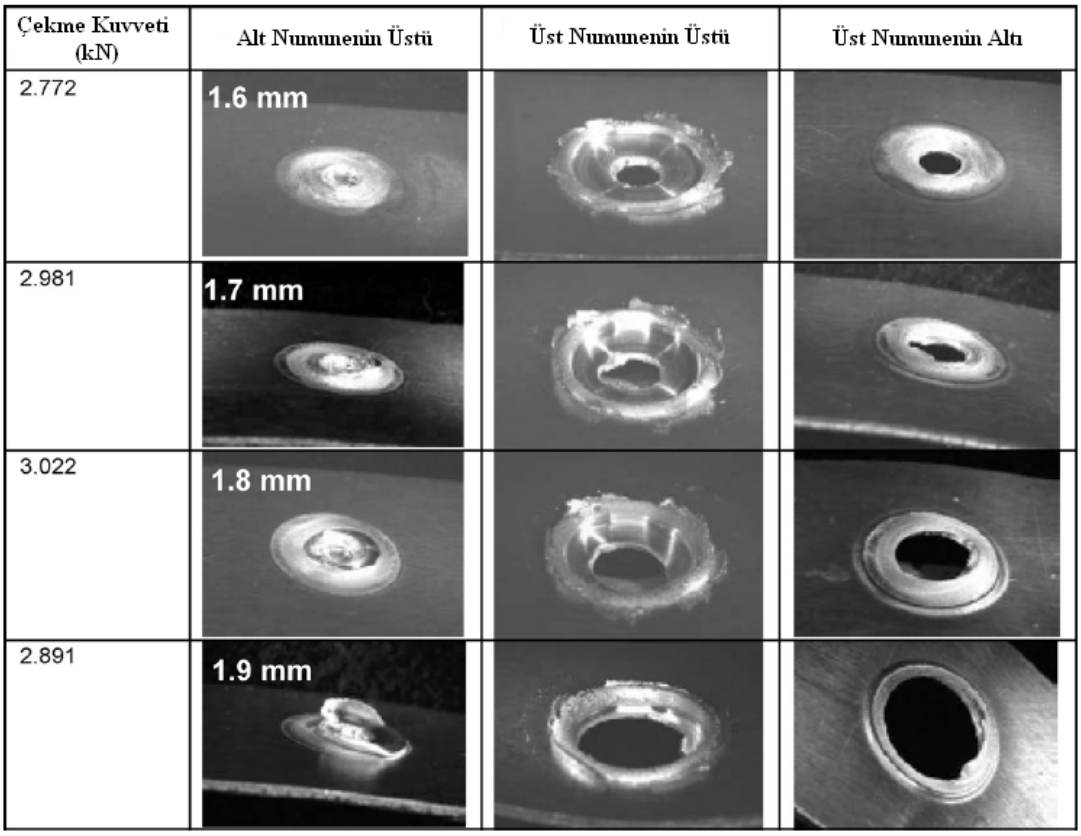


Şekil 2.17: SKNK ile birleştirilmiş Al 6111-T4 çekme numuneleri için, artan dalma derinliği ile çekme kuvvetinin değişimi (Feng ve diğ. 2004, Mitlin ve diğ. 2006)

Numunelerin kalınlığı 0,94 mm olduğundan, üst üste bindirilmiş numune kalınlığı 1,88 mm'dir. Takımın 1,9 mm'lik dalma derinliği, takımın uç kısmının alt taraftan çıkması anlamına gelir. Böylece kaynak edilen bölgede parçalar delinmiştir ve bu bölge zayıflamıştır. Bu durum ise çekme kuvveti değerinin düşmesine neden olmuştur. Düşük dalma derinliklerinde sürtünme ısısı daha düşük olacağından malzemede az yumuşayan ve çok yumuşayan kısımlar olabilir. Bu kısımlar her deney için, birleşme bölgesinde farklı şekilde dağılabileceğinden, tam homojen bir karıştırma sağlanamayacaktır. Bunun sonucu olarak da 1,6 mm ve 1,7 mm dalma derinlikleri için tekrarlanan üç deneyin çekme kuvveti değerlerinin geniş bir aralıkta salınım yaptığı düşünülmektedir. Dalma derinliği arttıkça ise yapılan üç deneyin

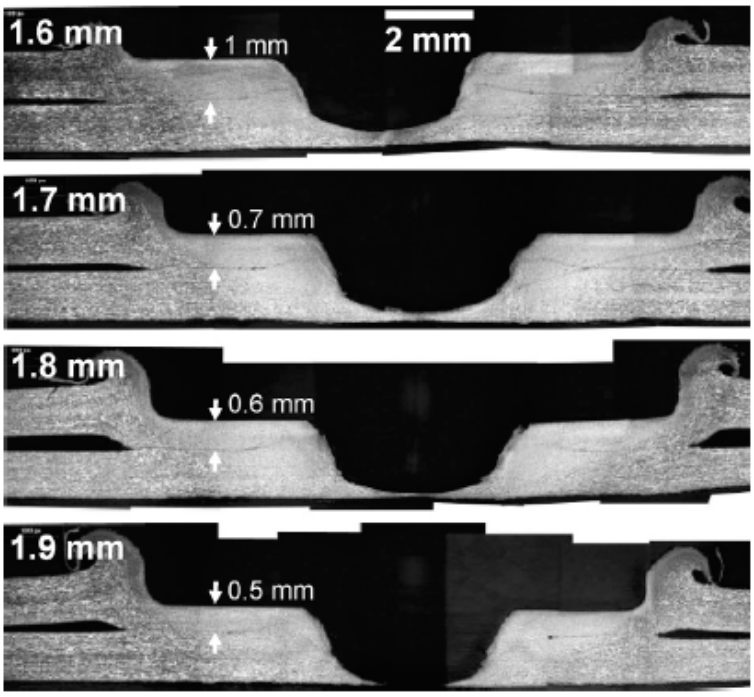
sonuçları birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni, dalma derinliği arttıkça takımın daha fazla yüzey alanının sürtünmeye katılması ve daha fazla sürtünme ısısı üretilmesi, bunun sonucunda da malzemede daha iyi yumuşamanın sağlanmasıdır. Böylece az yumuşayan ve çok yumuşayan bölgelerin olmaması veya çok az olması, kaynak bölgesinde daha homojen bir karışma sağlayacaktır. Bunun sonucu olarak da 1,8 mm ve 1,9 mm dalma derinliği için tekrarlanan üç deneyin çekme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olup dar bir aralıkta salınım yaptığı düşünülmektedir.

SKNK ile birleştirilen numunelerin farklı takım ucu dalma derinliklerindeki kopma yüzeylerinin fotoğrafları ve numunelerin çekme kuvveti değerleri incelenmiş, takımın dalma derinliğinin, bindirme kaynağı numunelerinin kırılma şekline etkileri belirlenmiştir (Şekil 2.18). Fotoğraflarda alttaki Al numunenin üstten görünüşü ve üstteki Al numunenin hem üstten hem de alttan görünüşü verilmiştir. Bu numunelerin çekme kuvvetleri arasındaki fark oldukça küçük olmakla beraber, takımın dalma derinliğinin artması ile kopma şeklinde göze çarpan bir değişim olmuştur. Derinlik artarken, kopma yerinin takım ucundan daha uzağa yani esas malzemeye doğru değiştiği görülmüştür. 1,6 mm'lik dalma derinliğine sahip numunede, üstteki levhanın takım ucu-omuz ara yüzeyi çevresi yaklaşık olarak tamamen kopmuştur. Alt ve üst numunenin fotoğraflarına bakıldığında, alt levhanın üstünde oluşan yüzey ve üst levhada oluşan iz yaklaşık olarak takım ucunun ölçüsündedir. 1,7 mm'lik dalma derinliğine sahip numunede kopma, takım ucu çevresinde büyük ölçüde sınırlandırılmıştır. Bununla beraber, kopma sonucunda üst levhanın küçük bir kısmı alttaki levhada kalmıştır. En yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği 1,8 mm'lik dalma derinliğine sahip numunede, üst levhada kopma meydana geldiği görülmüş ve takım omzunun altındaki bölgenin yarıya yakını kopmuştur. 1,9 mm'lik dalma derinliğine sahip numunede kopma, üsteki levhada ve omuz-esas malzeme ara yüzeyinde meydana gelmiştir (Mitlin ve diğ. 2006).



Şekil 2.18: Takımın dalma derinliğinin kırılma şekline etkileri (Mitlin ve diğ. 2006)

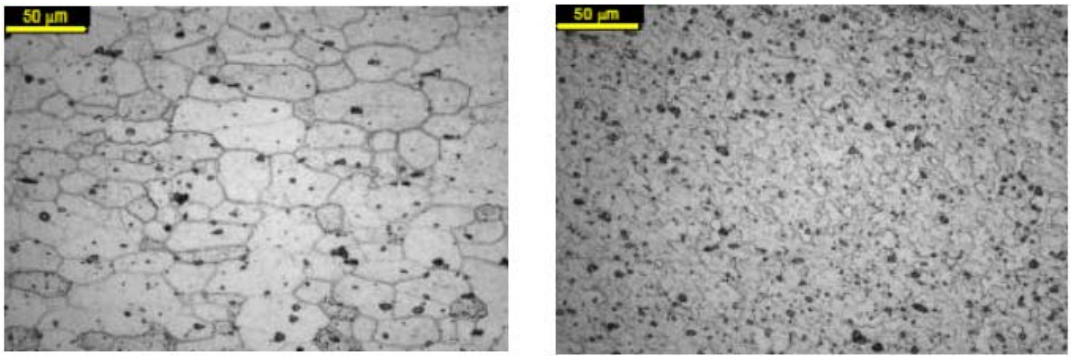
1,6-1,9 mm arasındaki dalma derinliklerinde oluşturulan nokta kaynağı bağlantılarının enine kesit makro fotoğraflarının elde edilmesi için çekme testi yapılmamış parçalardan numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.19). Böylece kaynaklı bölgenin kesit fotoğrafları incelenmiştir. Omuzun üst Al levhaya dalması ve dalma derinliğinin artışıyla üst levhaların kalınlığında belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Tüm üst ve alt levhalar, bir birleştirme ara yüzeyi oluşturmak için birlikte sıkıştırılmıştır. Üst levha kalınlığı, 1,6 mm dalma derinliğinde 1 mm'ye, 1,7 mm dalma derinliğinde 0,7 mm'ye, 1,8 mm dalma derinliğinde 0,6 mm'ye, 1,9 mm dalma derinliğinde 0,5 mm'ye düşmüştür. Ayrıca takımın 1,9 mm'lik dalma derinliğinde takım ucu alttaki levhada belirgin bir şekilde azalma meydana getirerek bir miktar numunelerin altından dışarı çıkmıştır (Mitlin ve diğ. 2006).



Şekil 2.19: Bağlantıların enine kesit makro fotoğrafları (Mitlin ve diğ. 2006)

Takımın omuz kısmının üst parçaya dokunması ile dalma işleminin bitirilmediği ve omuz kısmının gittikçe artan oranda üst parçanın içine daldırıldığı görülmektedir. Böylece takıma ait daha fazla yüzey alanının parçalar ile teması sağlanarak daha fazla sürtünme ısısı elde edilmiş ve yumuşayarak kaynak bağlantısına katılan malzeme miktarı artırılmıştır. En yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği 1,8 mm dalma derinliğinde ise takımın omuzu üst parçanın içine önemli oranda daldırılmıştır. Fakat takım ucunun bir miktar alt parçadan çıkmasına neden olan 1,9 mm dalma derinliğinde ise parçalar boylu boyunca delinmiş olduğundan, bağlantının ve parçaların zayıflamasına dolayısı ile de çekme kuvveti değerinin düşmesine neden olunmuştur. Şekil 2.17, Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 birlikte incelendiğinde bu açıkça görülmektedir.

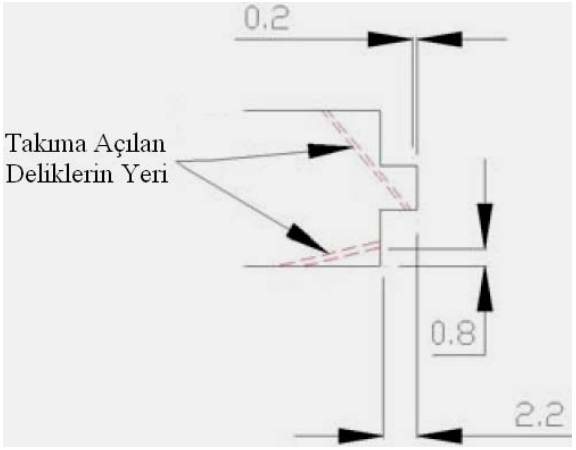
Al 6111-T4 alüminyum alaşımlı levhalardan alınan numuneler için ana malzeme bölgesindeki ve karışma bölgesindeki mikro yapılar incelenmiştir (Şekil 2.20). Karışma bölgesindeki tane boyutunun küçüklüğü çok açık görülmektedir. Kaynak bölgesi oluşumundaki karıştırma bölgesinin tane boyutunun, esas malzemenin tane boyutuna göre yaklaşık 3-5 kat daha küçük olduğu belirlenmiştir (Feng ve diğ. 2004).



Şekil 2.20: Al 6111-T4 numuneler için, solda ana metalin ve sağda karıştırma bölgesinin mikro yapısı (Feng ve diğ. 2004)

Gerlich ve diğerlerinin yaptığı çalışmalarda, otomotiv uygulamalarında kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşım esaslı malzemelerin, SKNK sırasında elde edilen sıcaklık ve eksenel kuvvet değerlerinin tespiti sağlanarak yöntem açıklanmaya çalışılmakla beraber dalma hızının ve devir sayısının etkisi de incelenmiştir. Çalışmalarda 1 mm'den 3 mm'ye kadar kalınlıklara sahip Al 5754-H12, Al 6061-T6, ve Al 6111 alüminyum alaşımı levhalar, ayrıca 1,5 mm kalınlıktaki AZ91D döküm magnezyum alaşımı levhalar kullanılmıştır. Tüm kaynak deneyleri sırasında kullanılan levhaların boyutları 25 mm x 100 mm'dir. Çalışmada kullanılan takımın uç boyu 2,2 mm, uç çapı 4 mm ve omuz çapı 10 mm'dir. Takım H13 takım çeliğinden imal edilmiştir. Kaynak işlemleri sırasında aşınmasını azaltmak için TiAlN ile kaplanmıştır ve 46-48 HRC'lik sertliğe sahiptir. Oluşturulan her bir kaynak noktası için, SKNK işlemi yaklaşık olarak 2 sn ile 5 sn arasında sürmüştür (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).

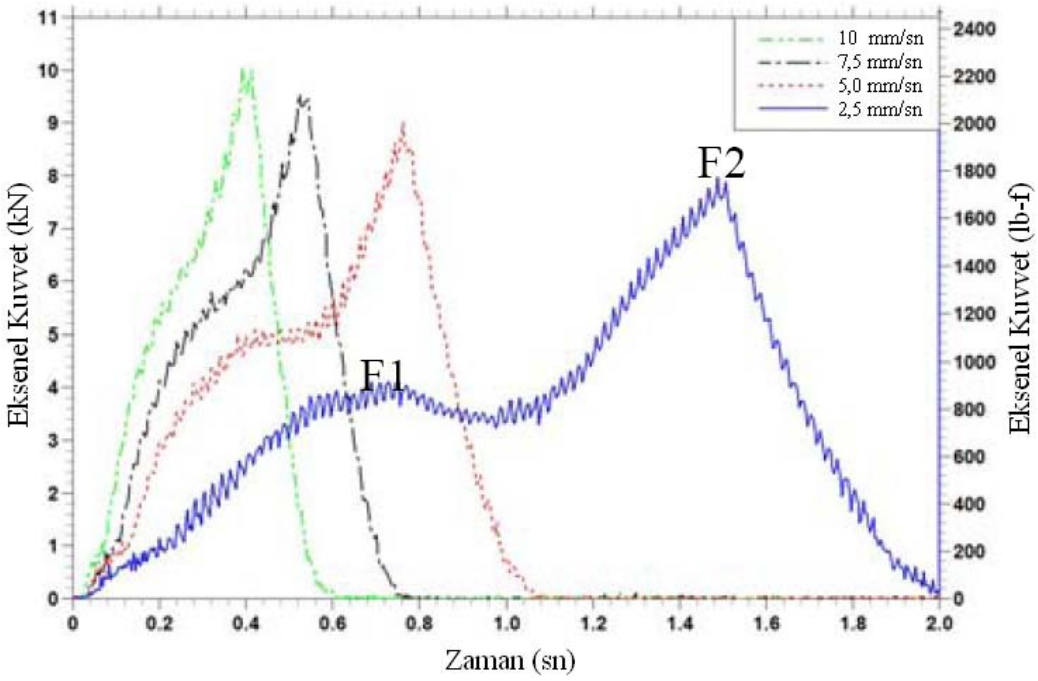
Termokupulların yerleştirildiği takımın şematik görünüşü Şekil 2.21'de verilmiştir ve tüm boyutlar mm'dir. Böylece omuz ve uçtaki sıcaklığın değişimi tespit edilmiştir. Takımın sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için K-tipi 0,25 mm çaplı termokupullar kullanılmıştır. Deneylerde takım döndürülmeyip sabit tutulmuştur. Al alaşımlı ve Mg alaşımlı deney numuneleri ise tüm sıcaklık ölçümleri sırasında döndürülmüştür. Termokupulların ucu, SKNK sırasında Al veya Mg alaşımı malzemeler ile doğrudan temas etmesi için takıma açılan 1 mm çaplı deliklerin içine yerleştirilmiştir (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).



Şekil 2.21: Termokupul yerleştirilen takımın şematik görünüşü (Gerlich ve diğ. 2005a)

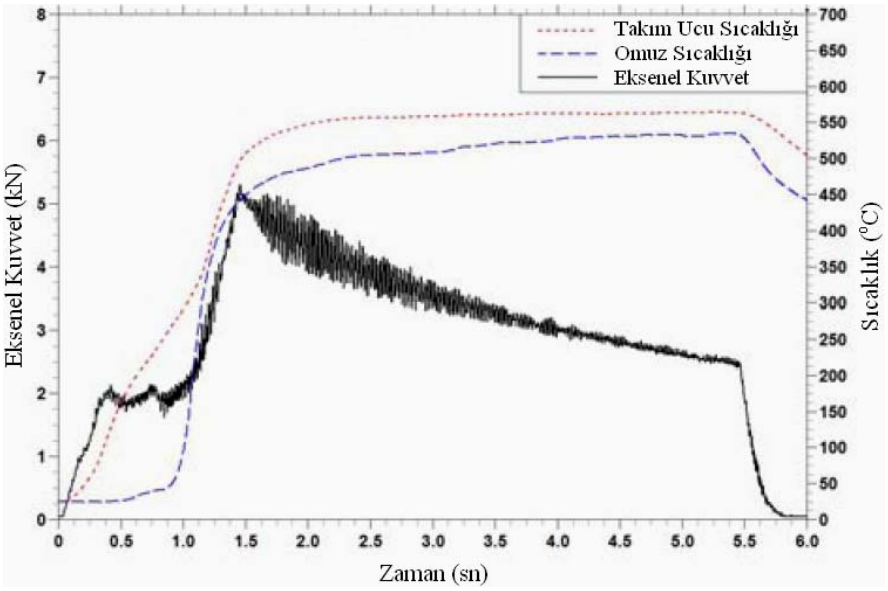
Alüminyum alaşımı Al 6061-T6 malzeme için, farklı dalma hızlarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi Şekil 2.22'de görülmektedir. Kullanılan 2,5 mm/sn'den 10 mm/sn'ye kadar değişen dalma hızları sonucu elde edilen eksenel kuvvet verileri kaydedilmiştir. Dalma hızının artması, kaynak işlemi için gerekli zamanı önemli bir şekilde azaltırken, üst üste levha kalınlığı 3 mm olan levhaların üst yüzeyine omuz temas ettiği zaman kaynak işlemi tamamlanmıştır. Bu sırada oluşan eksenel kuvvet verileri belirlenmiştir. İki eksenel kuvvet tepesinden F1 takım ucu tarafından, F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmaktadır. Dönen takım ucu üst parçaya dokunduğu zaman F1, takım ucu tamamen parçaya nüfuz ettirildiği zaman ve takım omzu Al alaşımlı levhanın üst yüzeyine temas ettiği zaman F2 maksimum noktası meydana gelir. Düşük viskoziteli çok yumuşayan hatta kısmen eriyen malzeme ince tabaka şeklinde, dönen takım ve ana malzemenin arasında temas eden ara yüzeyinde şekillendirildiği zaman, erime yağlaması olarak tanımlanan bir etkinin sonucu olarak, F1 tepesini izleyen eksenel kuvvet değerlerinin öncelikle bir miktar düştüğü bildirilmiştir. Çok yumuşayan yada kısmen eriyen bu ince tabaka şeklindeki malzeme eksenel kuvvetin bir miktar düşmesine neden olsa da, omuzun üst levhaya teması ile tekrar artar ve F2 tepesi oluşur. Kaynak parametrelerinden biri olan dalma hızının arttırılması sonucu F1 ve F2 eksenel kuvvetlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. Dalma hızı artınca, örneğin sn'de 10 mm dalma ile sn'de 2,5 mm dalma önemli bir zaman farkı oluşturmaktadır. Takım hızlı dalınca bir kaynak noktasını oluşturmak için gerekli kaynak zamanı azalır ve kaynak çevrimi daha kısa sürede tamamlanır. Ayrıca dalma hızının arttırılması sonucu takım parçalara daha

hızlı girdiğinden, malzeme tam yumuşamadan takım ilerlemiş olur. Takım henüz tam yumuşamamış bir malzeme ile karşılaştığı için de eksenel kuvvet hızla artar (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).



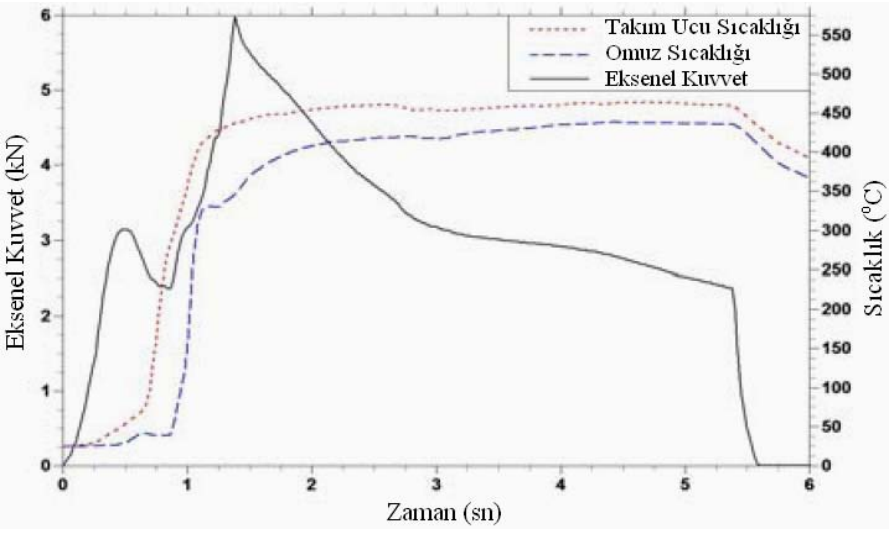
Şekil 2.22: Alüminyum alaşımı Al 6061-T6 malzeme için, farklı dalma hızlarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi (Gerlich ve diğ. 2005a)

Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar Şekil 2.23'te görülmektedir. Ayrıca Al 5754-H12 malzeme için, eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi de bu grafikten incelenebilir. Takım ucu 565 ^{o}C'de, takım omzu ise 538 ^{o}C'de maksimum sıcaklıklara ulaşmıştır. Omuzun sürtünmeye katılması ile maksimum sıcaklığa ulaşılırken, 4 sn'lik bekleme (karıştırma) peryoduna girmeden önce sıcaklık çok düşük değerdedir (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).



Şekil 2.23: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar (Gerlich ve diğ. 2005a)

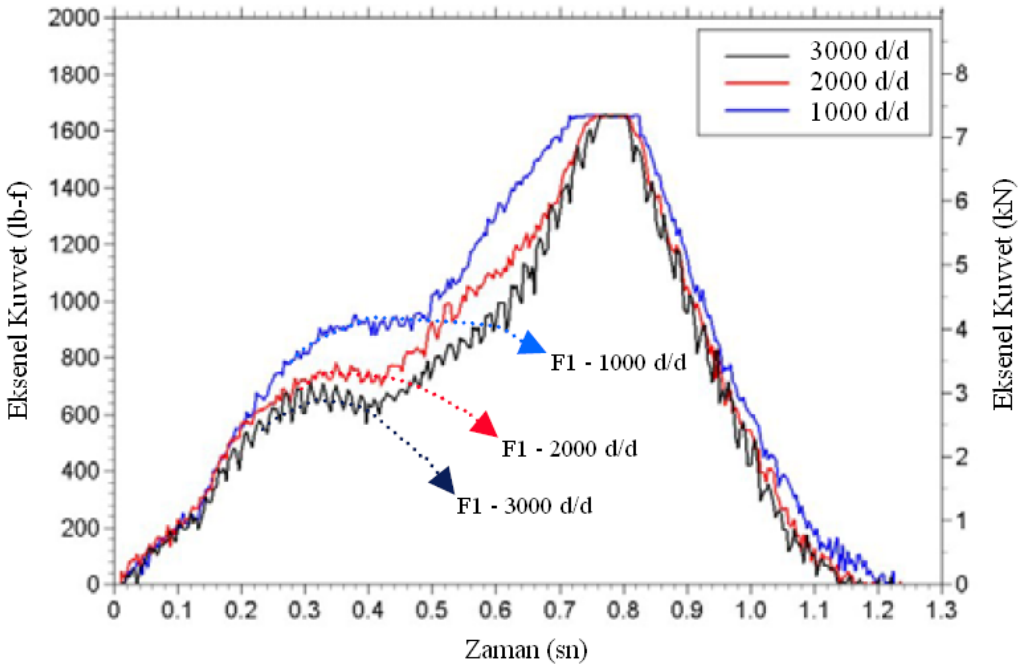
Magnezyum alaşımı AZ91D malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar Şekil 2.24'te görülmektedir. Ayrıca AZ91D malzeme için, eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi de bu grafikten incelenebilir. Takım ucu 462 ^{o}C'de, takım omzu ise 437 ^{o}C'de maksimum sıcaklıklara ulaşmıştır. Omuzun sürtünmeye katılması ile maksimum sıcaklığa ulaşılırken, 4 sn'lik bekleme (karıştırma) peryoduna girmeden önce sıcaklık çok düşük değerdedir (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).



Şekil 2.24: Magnezyum alaşımı AZ91D malzeme için SKNK sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b)

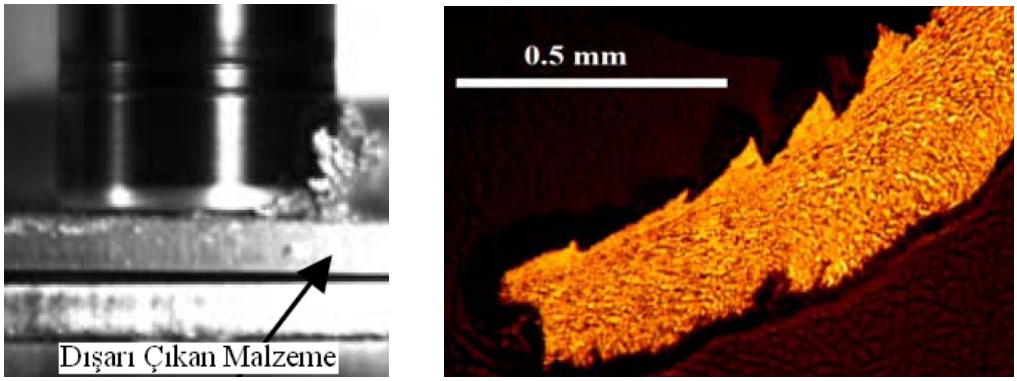
Elde edilen grafiklerde kuvvetin dalma sırasında iki tepecik yaptığı belirlenmiştir (Şekil 2.23 ve Şekil 2.24). Takım ucunun malzemeye temasıyla eksenel kuvvet artmaya başlamış ancak yumuşayan malzeme F1 tepeciği sonrası eksenel kuvvette düşme oluşturmuştur. Bu düşmeyi takiben tekrar artan kuvvet, takım omzunun malzeme yüzeyine temas ettiğinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Sonrasındaki karıştırma aşaması boyunca kuvvet azalma eğiliminde olmuştur. Takım uç ve omuz sıcaklıklarının da F2 değerine kadar arttığı sonrasındaki safhada bu sıcaklıklarını koruduğu görülmüştür (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).

Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için, SKNK sırasında farklı devir sayılarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi Şekil 2.25'te görülmektedir. Buradaki deneyler 5 mm/sn dalma hızında ve 1000 d/d'dan 3000 d/d'a değişen farklı devir sayılarında gerçekleştirilmiştir. Devir sayısı arttıkça daha az eksenel kuvvet gerekir (Gerlich ve diğ. 2005a). Çünkü sürtünmeden dolayı ısı artmış ve malzeme yumuşamıştır. Malzeme yumuşadığı içinde takım daha az dirençle karşılaşır. Takımın devir sayısının artışıyla ortaya çıkan ısı artışı sonucu daha fazla yumuşayan malzemenin, F1 eksenel kuvvetinde azalmaya neden olduğu aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 2.25: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzeme için farklı devir sayılarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi (Gerlich ve diğ. 2005a)

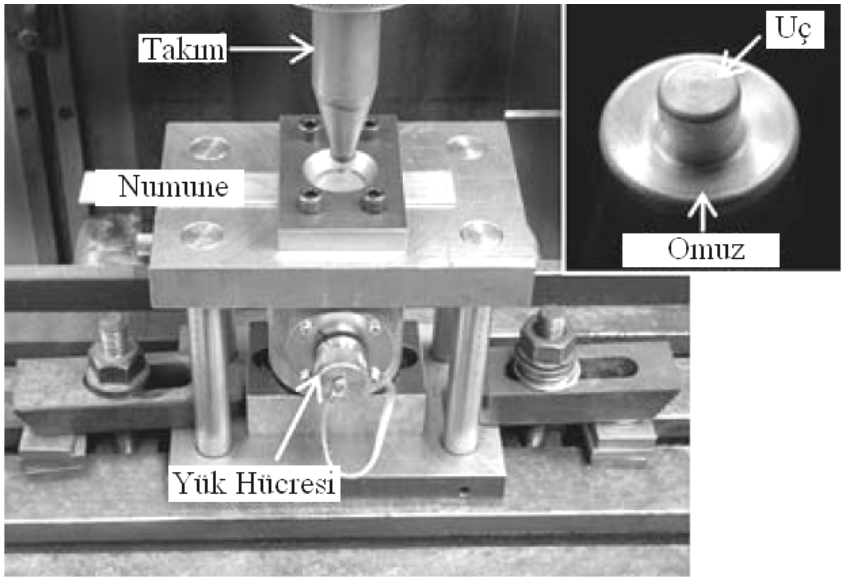
Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzemeden SKNK sırasında çıkan malzeme parçacığı Şekil 2.26'da görülmektedir. Bu malzeme parçacığı bu çalışmada kullanılan tüm malzemelerin kaynağı sırasında oluşmuştur. Dönen takımın yivleri tarafından oluşturulmuş ve takım ucu Al 5754-H12 levhanın üstünden 0,3 ile 0,4 mm içeri girdiği zaman, kaynak bölgesinin dışına çıkan veya kaçan girinti çıkıntılı malzeme parçacığı veya talaş olarak tanımlanır. Kaynağın ilerleyen aşamasında dönen takım omzunun çevresinden dışarı atılır (Gerlich ve diğ. 2005a, 2005b).



Şekil 2.26: Alüminyum alaşımı Al 5754-H12 malzemeden SKNK sırasında çıkan malzeme parçacığı (Gerlich ve diğ. 2005a)

Lathabai ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ekstrüzyon ürünü Al-Mg-Si alaşımı levhaların bindirme bağlantıları için SKNK kullanılmıştır. SKNK yöntemi endüstriyel üretimde kullanılmasına rağmen yöntemin parametrelerinin kaynak kalitesini nasıl etkilediği bilgisi sınırlıdır. Bu çalışmada kaynak sırasında oluşan eksenel kuvvet değişimine yöntemin dört ana parametresi olan takımın bekleme süresi, dalma derinliği, dalma hızı ve devir sayısının etkisi incelenmiştir. Yöntemin parametrelerinin, oluşturulan birleştirmelerden elde edilen çekme kuvveti değerleri üzerine ve takımın omuzu altında ve ucu etrafında oluşan metalurjik bağın oluşumu üzerine etkileri belirlenmiştir. Optimum birleştirmeyi sağlayan bu parametrelerin, bağlantının çekme kuvvetini maksimize eden değerleri tanımlanmıştır. Meydana gelen bağlantının boyutlarını belirlemek için kaynak merkezinden geçecek enine kesiti dikkatli bir şekilde parlatılarak hazırlanmış ve standart metalografik teknik olarak optik mikroskop kullanılmıştır (Lathabai ve diğ. 2006).

SKNK deneyleri CNC (Computer Numerical Control: Bilgisayarlı Nümerik Kontrol) bir makinada gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği, 100kN'luk yük hücresine sahip yüksek hızda veri elde edebilen bir sistemle birleştirilmiş ve Şekil 2.27'de görüldüğü gibi makinanın tablasına bağlanmıştır. Kaynak edilmek üzere hazırlanmış numuneler, bağlama tertibatı ile üst üste gelecek şekilde sıkıca bağlanmıştır. SKNK sırasında meydana gelen eksenel kuvvet verileri kullanılan yük hücresi ile sürekli kaydedilmiştir. Kullanılan takımın omuz çapı 10 mm, takım ucu çapı 4 mm ve takım ucu uzunluğu 2,6 mm'dir. Takım ucu, Şekil 2.27'de gösterildiği gibi yivsiz ve düzdür. Takım H13 takım çeliğinden üretilmiş, 48-50 HRC sertlik elde etmek için ısıl işlemden geçirilmiş ve yüzey aşınma direncini artırmak için nitrürasyon (nitrürleme) işlemi uygulanmıştır. 1,77 mm kalınlıkta AA 6060-T5 alaşımı plakadan, 20 mm genişliğinde ve 100 mm uzunluğunda levhalar çıkarılmıştır. Bu levhaların bindirme bölgesinde bağlantılar gerçekleştirilmiştir. Her bir birleştirme durumu için deney en az dört kere tekrarlanmıştır. Bunlardan ikisi metalografik inceleme, diğer ikisi ise çekme kuvvetinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Çekme deneyi için hız 0,5 mm/sn'dir (Lathabai ve diğ. 2006).

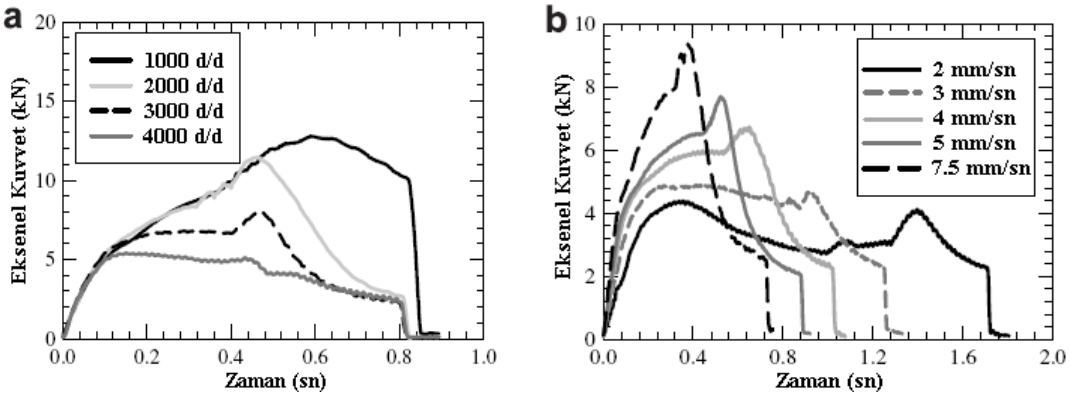


Şekil 2.27: Nümerik kontrollü CNC makinanın tablasına monte edilmiş bağlama tertibatı ve kullanılan takımın fotoğrafı (Lathabai ve diğ. 2006)

1000-4000 d/d aralığındaki farklı takım devir sayıları için SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvetin zamanla değişimi Şekil 2.28a'da görülmektedir. Devir sayısının artmasına karşılık eksenel kuvvetin önemli bir şekilde azaldığı ve zaman ile eksenel

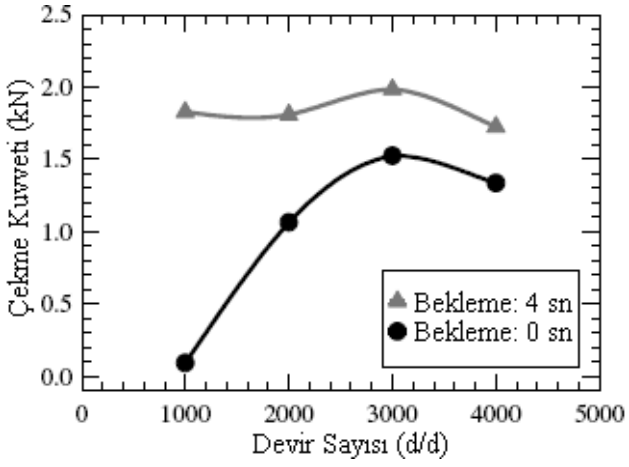
kuvvet arasındaki değişimin dört farklı devir sayısı için aynı eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu deney setinde dalma hızı 5 mm/sn ve dalma derinliği 2,9 mm'dir. Bu dalma derinliği üst üste getirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (3,54 mm) yaklaşık %82'sine karşılık gelir. Takım ucu uzunluğu 2,6 mm olduğundan, bu da takım omzu kaynak sırasında üst numunenin içine yaklaşık olarak 0,3 mm daldığı anlamına gelir. Burada iki tepe noktası söz konusudur. İlk tepe noktası takım ucunun malzemeye dalmaya başlamasından malzemenin yumuşama göstermesine kadar ortaya çıkan kuvvet artışını göstermektedir. İkinci tepe noktası ise takım omzunun üst parça yüzeyine temas etmesiyle ulaşılan noktadır. Her bir devir sayısı için, kuvvet öncelikle hızlı bir şekilde artmıştır. Sonra çok kısa bir süre için doğrusallaşmış ve daha sonra daha da azalmıştır. Takım omzu, numune yüzeyine temas eder etmezde eksenel kuvvet tekrar hızlı bir şekilde artmıştır. Omuz numuneye daldığı zaman eksenel kuvvet hızla maksimum değere ulaşmış ve takım aniden geri çekildiği zaman ise hızla düşmüştür. Maksimum eksenel kuvvet 1000 d/d'da ~13 kN'dan, 4000 d/d'da ~5 kN'dan düşmeye başlamıştır. SKNK sırasında daha yüksek takım devir sayıları daha yüksek sürtünme ısısının oluşmasını sağlar ve bu ısıdan dolayı oluşan yumuşama daha geniş hacimde gerçekleşir. Buda SKNK sırasında meydana gelen eksenel kuvvet değerlerinin daha düşük olmasına neden olur (Lathabai ve diğ. 2006).

Farklı dalma hızları için eksenel kuvvetin zaman ile değişimi Şekil 2.28b'de görülmektedir. Bu deney setinde devir sayısı 3000 d/d ve dalma derinliği 3,0 mm'dir. Bu dalma derinliği üst üste getirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (3,54 mm) yaklaşık %85'ine karşılık gelir. Daha yüksek dalma hızlarında daha düşük SKNK işlem süresi gerekir. Daha yüksek dalma hızları verimliliği artırabilir ve meydana gelen kaynağın kalitesinin kabul edilebilir olmasını sağlayabilir. Bununla beraber daha yüksek dalma hızları daha yüksek eksenel kuvvetler meydana getirmiştir ve bu da takım ömrünü azaltıcı yönde bir etki oluşturur (Lathabai ve diğ. 2006).



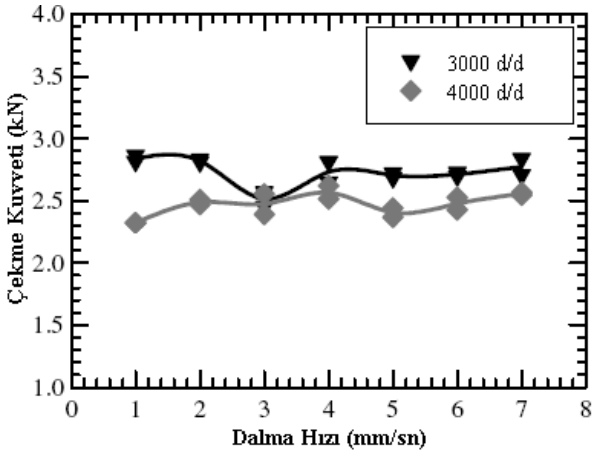
Şekil 2.28: a) Farklı devir sayıları için eksenel kuvvetin zaman ile değişimi, b) Farklı dalma hızları için eksenel kuvvetin zaman ile değişimi (Lathabai ve diğ. 2006)

Kaynak bağlantısının dayanımına etki eden en önemli olay, malzemenin yumuşatılması ve yumuşayan bu malzemenin yeterince karıştırılarak bir bağ elde edilmesidir. Dolayısıyla ortaya çıkacak ısı miktarını arttıran devir sayısı ve takım bekleme süresi önemli parametrelerdir. Bu iki parametrenin çekme kuvvetine olan etkileri Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Bu deney setinde dalma hızı 5 mm/sn ve dalma derinliği 2,9 mm'dir. 0 sn bekleme süresi için çekme kuvveti değerleri 1000-3000 d/d'lık devir sayısı aralığında artış gösterdiği ve bu devir sayısından sonraki 4000 d/d'da ise düşüş eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Takım bekleme süresinin artması ve 4 sn olması ise çekme kuvvetini hep arttırma yönünde sonuç vermiştir ve devir sayısının etkisini büyük ölçüde azaltmıştır. Böylece hangi devir sayısı olursa olsun 4 sn'lik bekleme süresi için birbirine yakın çekme kuvveti değerleri elde edilmiştir (Lathabai ve diğ. 2006).



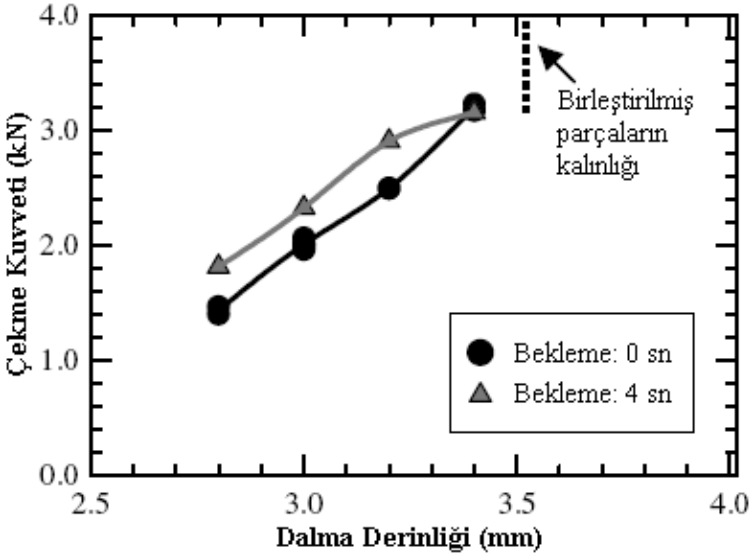
Şekil 2.29: Bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisi (Lathabai ve diğ. 2006)

Seçilen 3000 d/d ve 4000 d/d olmak üzere iki farklı devir sayısı için dalma hızının çekme kuvvetine etkisi Şekil 2.30'da görülmektedir. Bu deney setinde dalma derinliği 3,2 mm ve bekleme süresi 4 sn'dir. Hem 3000 d/d hem de 4000 d/d takım devri için dalma hızının, kaynaklı bağlantıda elde edilen çekme kuvvetini pek etkilemediği yada çok az etkilediği görülmektedir. Dolayısıyla daha yüksek dalma hızları, çekme kuvveti değerlerini etkilemeksizin, sadece kaynak işlem süresini azaltmak amacıyla kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Lathabai ve diğ. 2006).



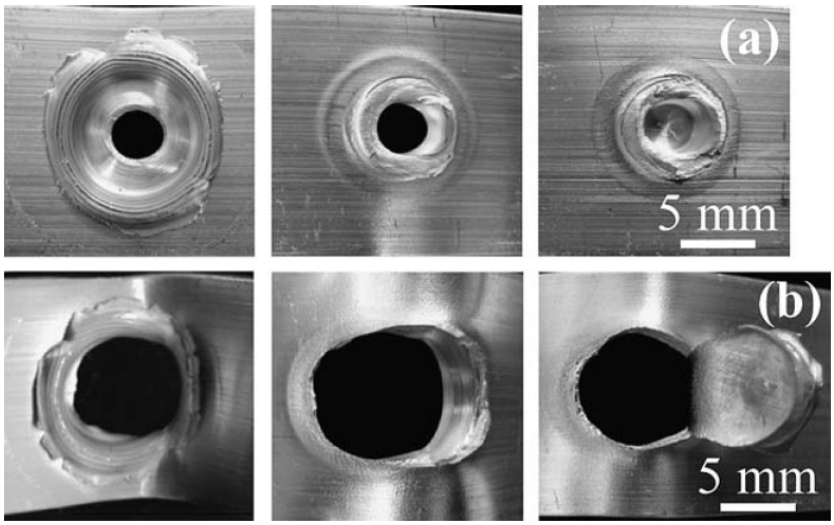
Şekil 2.30: İki farklı devir sayısı için dalma hızının çekme kuvvetine etkisi (Lathabai ve diğ. 2006)

Dalma derinliği ve bekleme süresinin çekme kuvvetine etkisi Şekil 2.31'de görülmektedir. Bu deney setinde dalma hızı 5 mm/sn ve dönme hızı 3000 d/d'dır. Grafik incelendiğinde, takımın bekleme süresinin artmasının çekme kuvvetini arttırıcı etkisi görülmektedir. Ayrıca takımın dalma derinliği de çekme kuvveti üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Takımın malzemeye dalma derinliği arttıkça çekme kuvveti de artmaktadır. Dalma derinliği 2,8 mm'den 3,4 mm'ye değişmektedir ve üst üste getirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (3,54 mm) yaklaşık %80'i ile %95'i arasına karşılık gelmektedir. Dalma derinliğinin 2,8 mm'den 3,4 mm'ye artması ile çekme kuvveti hemen hemen üç kat artmıştır. Sonuç olarak dalma derinliğinin daha fazla artması takım omzunun daha fazla üst parçanın içine girmesini sağlayacaktır ve bu durum çekme kuvvetini artırıcı açık bir etkiye sahiptir (Lathabai ve diğ. 2006).



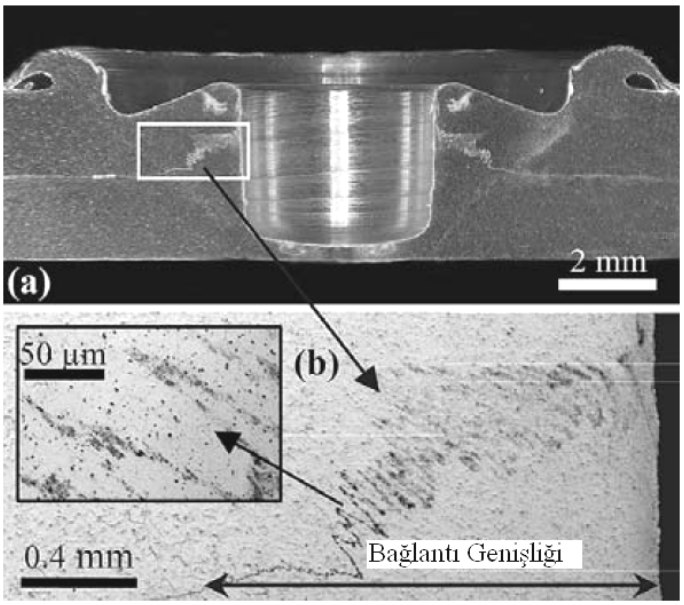
Şekil 2.31: Dalma derinliği ve bekleme süresinin çekme kuvvetine etkisi (Lathabai ve diğ. 2006)

Elde edilen çekme deneyi sonrası numunelerinin kopma şekilleri incelendiğinde hasar tipinin iki farklı modda (şekilde) gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 2.32'de birinci sıra numuneler birinci parçanın, ikinci sıra numuneler ikinci parçanın fotoğraflarıdır ve Şekil 2.32a kaynak bağlantısı ara yüzeyinde kırılma, Şekil 2.32b sıyırma veya çekip çıkarma olarak adlandırılan şekilde gerçekleşmiştir. Fotoğraflardaki görünümler soldan sağa doğru üst numunenin üstünü, üst numunenin altını ve alt numunenin üstünü göstermektedir (Lathabai ve diğ. 2006).



Şekil 2.32: Çekme deneyi numunelerinin kopma şekilleri (a) kaynak bağlantısı ara yüzeyinde kırılma ve (b) sıyırma, fotoğraflardaki görünümler soldan sağa doğru; üst numunenin üstü, üst numunenin altı ve alt numunenin üstü (Lathabai ve diğ. 2006)

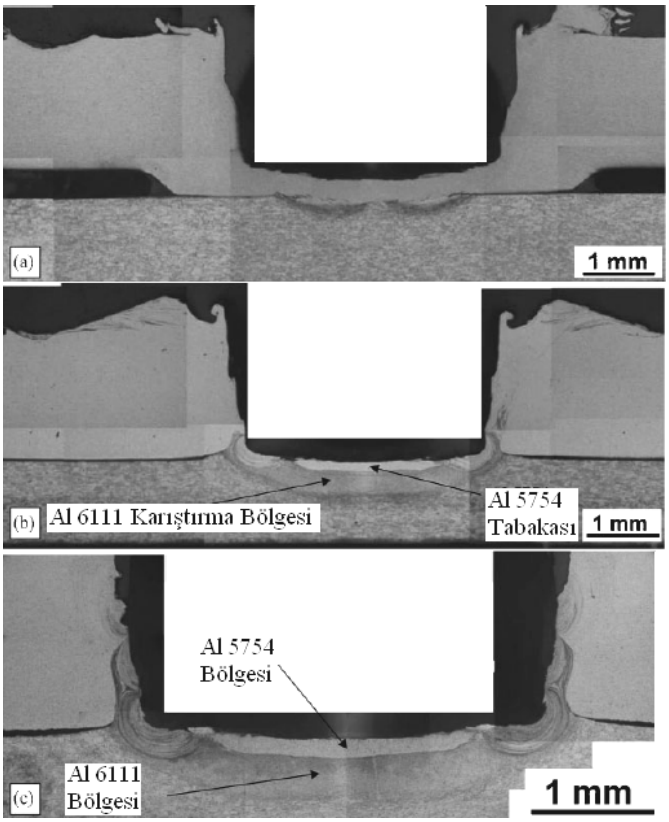
Şekil 2.33a'da AA 6060-T5'in SKNK bağlantısının merkezinden alınan enine kesit fotoğrafında takımın çıkış boşluğu ve bağlantı bölgesi görülmektedir. Şekil 2.33b ise Şekil 2.33a'da seçilen alanın daha yakından görünümünü vermektedir. Ayrıca Şekil 2.33b'de ince oksit partiküllerinin (taneciklerinin) dalgalı diziliminin büyütülmüş görüntüsü görülmektedir. Şekil 2.33b iki levha arasındaki bağlantı bölgesinin içinde dalgalı olarak yayılan çizgi ile ciddi bir şekilde ayrılmış olduğunu göstermektedir. Bu bölgenin daha yakından incelenmesinde ise yayılma çizgisini ince taneciklerin oluşturduğu ortaya çıkmıştır. Bu taneciklerin taramalı elektron mikroskobunda ve mikrokimyasal analiz sonucundaki incelemelerinde ise alüminyumca zengin oksitler olduğu tespit edilmiştir. Buradan yola çıkan araştırmacılar, SKNK sırasında levha yüzeylerinin oksit tabakalarından ayrılan taneciklerin bağlantı bölgesinin içine ince bir şekilde yayılmış ve malzeme akış çizgileri boyunca dağılmış olduğu sonucuna varmışlardır. Çekme deneyi uygulanan ve koparılan numunelerin kopma bölgelerinin incelenmesi ile, ince oksit taneciklerinin bu diziminin başarısızlık gösteren çatlak çizgilerinden etkilenmemiş olduğunu doğrulamıştır. Mikroskopik inceleme, SKNK'nın bağlantı bölgesinin levhalar arasındaki ara yüzey düzleminde ve bir halka şeklinde veya çember görünümünde olduğunu göstermiştir. Bu halka şeklindeki bağlantının genişliği, bağlantının tam merkezinden enine kesiti alınarak, takımın çıkış boşluğu ve levha ara yüzeyi arasındaki bağlantının bittiği yere kadarki uzaklık ölçülerek belirlenmiştir. Bu bölgenin belirlenmesi için yüzey uygun şekilde parlatılmıştır. Şekil 2.33b'de gösterilen ölçüm, takımın çıkış boşluğunun her iki tarafında yapılmıştır ve bu uzunluk bağlantı genişliği olarak tanımlanmıştır (Lathabai ve diğ. 2006).



Şekil 2.33: (a) AA 6060-T5'in SKNK bağlantısının enine kesit fotoğrafı, (b) (a)'da seçilen alanın daha yakından görünümü, ayrıca (b)'de ince oksit partiküllerinin (taneciklerinin) dalgalı diziliminin büyütülmüş görüntüsü (Lathabai ve diğ. 2006)

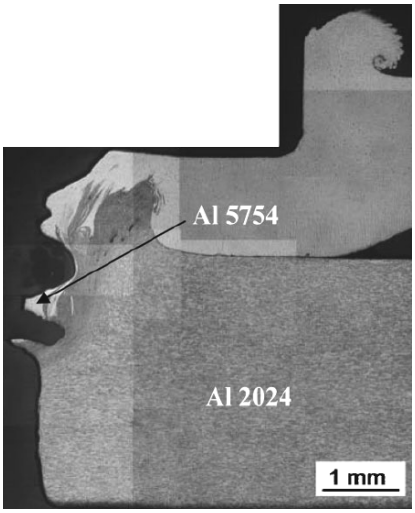
Su ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, SKNK sırasında ortaya çıkan malzeme akışı incelenmiştir. Farklı iki malzemenin SKNK, onların farklı karakteristik özelliklerinden dolayı malzeme akışının görsel olarak incelenmesine izin verir. Bu çalışmada SKNK sırasında kullanılan farklı malzeme çiftleri Al 5754/Al 6111, Al 5754/Al 2024, MMC:Metal Matrisli Kompozit/Al 5754'tür. İlaveten içine Al_2O_3 (alumina) izleyici partiküller (tanecikler) yerleştirilen Al 6061-T6 malzemesi de kullanılmıştır. Bunun için alt levha içine 0,7 mm çapında delikler açılarak, MMC levhanın testere ile kesilmesi sırasında çıkan talaşlar toplanıp bu deliklere doldurulmuştur. Böylece farklı malzemeler kullanarak, karıştırma bölgelerinde dikkat çeken malzeme hareketleri incelenmiştir. Çalışmada 1000 d/d - 3000 d/d arası dönme hızları ve 2,5 mm/sn dalma hızı kullanılmıştır. Kaynak noktaları, bileşim oranı % ağırlık olarak 0,35C-5Cr-1,5Mo-1V içeren ve sertliği 46-48 HRC olan bir çelik takım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takımın omuz çapı 10 mm, takım ucu çapı 4 mm ve takım ucu uzunluğu 2,2 mm'dir. Takımın silindirik takım ucuna yiv açılmıştır ve SKNK sırasında saat yönünün tersi yönde döndürülmüştür (Su ve diğ. 2006).

Al 5754/Al 6111 farklı parçaların SKNK sırasında, dönen takım ucu belirli bir dalma derinliğinde durdurulmuş ve Şekil 2.34'te görülen görüntüler elde edilmiştir. Şekilde Al 5754/Al 6111 levhaların SKNK sırasında kontrollü dalma derinliğinde oluşan bölgeler görülmektedir. Buradaki bindirme bağlantısında Al 5754 üst ve Al 6111 alt levhadır. Kullanılan kaynak parametreleri, 3000 d/d devir sayısı ve 2,5 mm/sn dalma hızıdır. Şekil 2.34a'da levhaların ara yüzeyindeki ilk oluşum incelendiğinde, takım ucu merkezinin her iki tarafında ve takım ucu boşluğunun tabanından yaklaşık 600 μm uzaklıkta yarım yarıçap bölgeleri meydana gelmiştir. Şekil 2.34b'de farklı levha ara yüzey bölgesinin 0,1 mm içerisine dalma durumunda takım ucunun altında oluşan Al 5754 tabakası ve Al 6111 malzemeyi içeren karıştırma bölgesi oluşumu görülmektedir. Şekil 2.34c'de ise takım ucunun alt levhanın 0,3 mm içerisine dalması durumunda, takım ucunun altında oluşan Al 5754 tabakasının ve Al 6111 malzemeyi içeren karıştırma bölgesi oluşumunun genişlediği bölgeler görülmektedir (Su ve diğ. 2006).



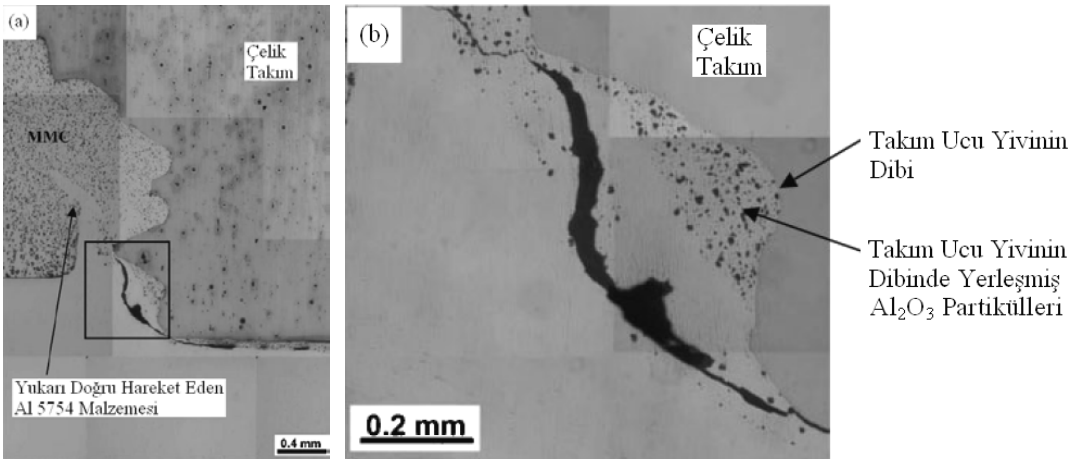
Şekil 2.34: Al 5754/Al 6111 farklı levhaların SKNK sırasında kontrollü dalma derinliğinde oluşan bölgeler (a) Levhaların ara yüzeyindeki ilk oluşum (b) Farklı levha ara yüzey bölgesinin 0,1 mm içerisine dalma durumunda oluşan bölgeler (c) Takım ucunun alt levhanın 0,3 mm içerisine dalması durumunda oluşan bölgeler (Su ve diğ. 2006)

Al 5754/Al 2024 farklı parçaların SKNK sırasında, dönen takım ucu bulunduğu yerde durdurulmuştur ve takım ucunun yivlerinin dibinde tutulan üst levha malzemesi Al 5754'ün, SKNK sırasında dönen takım ucu ile aşağı doğru taşındığı ve alt levhanın içine nüfuz ettiği saptanmıştır (Şekil 2.35). Kullanılan kaynak parametreleri, 3000 d/d devir sayısı, 2,5 mm/sn dalma hızı ve 2 sn bekleme süresidir (Su ve diğ. 2006).



Şekil 2.35: Al 5754/Al 2024 farklı levhaların SKNK sırasında takım yivinin dibinde tutulmuş Al 5754 malzemesi (Su ve diğ. 2006)

MMC/Al 5754 farklı parçaların SKNK sırasında, dönen takımın altındaki malzeme yukarı doğru hareket eder ve kaynak bölgesinin ortasında yöntemin kendisine özgü karakteristik bir boşluk oluştuğu görülür. Takımın bindirme pozisyonundaki parçalara dalmasından sonra, Al 5754 alt levha malzemesinin yukarı doğru yer değiştirmesi Şekil 2.36'da görülmektedir. Şekilde MMC/Al 5754 farklı levhaların SKNK sırasında, malzeme hareketine takım ucu yivlerinin etkisi görülmektedir ve takım ucundaki yivlerin oynadığı rolün önemini göstermektedir. Şekil 2.36a'da takım ucu yivlerinin enine kesiti ve yukarı doğru hareket eden Al 5754 malzemesi görülmektedir. Yukarı doğru hareket eden Al 5754 malzemesi, dönen takım ucunun parçalara nüfuz etmesi ile oluşur ve şekilde göze çarpan parlak kısımdır. Şekil 2.36b'de takım ucu yivinin dibinde yakalanan veya tutulan büyük oranda ve küçük çaplı Al_2O_3 partiküllerini içeren MMC malzemesi dönen takımın ucuna çok yakın yerleşmiştir. Kullanılan kaynak parametreleri, 3000 d/d devir sayısı, 2,5 mm/sn dalma hızı ve 4 sn bekleme süresidir (Su ve diğ. 2006).



Şekil 2.36: MMC/Al 5754 farklı levhaların SKNK sırasında, malzeme hareketine takım ucu yivlerinin etkisi (a) Takım ucu yivlerinin enine kesiti ve yukarı doğru hareket eden Al 5754 malzemesi, (b) Takım ucu yivinin dibinde yerleşen MMC malzemesi (Su ve diğ. 2006)

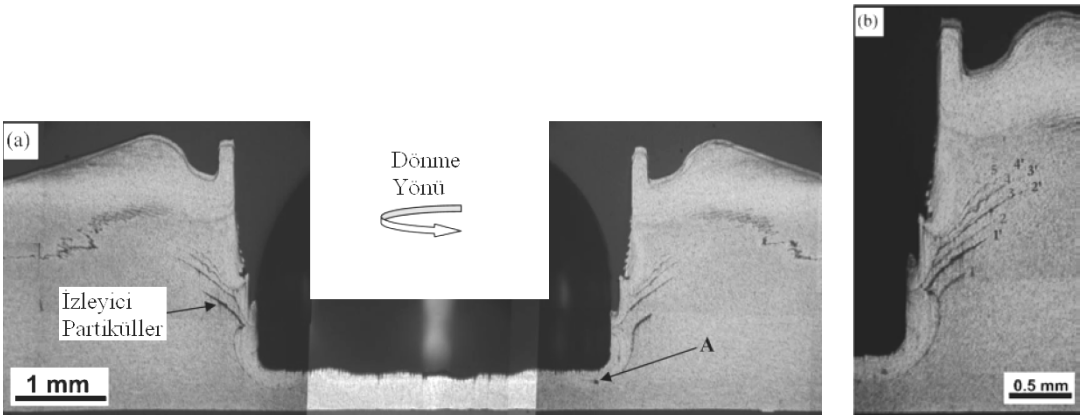
Ayrıca üst levha malzemesini, dönen takım ile aşağı doğru taşımak için yivlere ihtiyaç olmadığını vurgulamak içinde bir çalışma yapılmıştır. Yapılan deneyde Al 5754/Al 6111 farklı parçaların SKNK sırasında, Al 5754 üst levha malzemesinin takıma yapışan tabakası yaklaşık 100 μm kalınlığında olacak şekilde takım ucunun dış yüzeyini şekillendirdiği görülmektedir ve SKNK sırasında malzemelere nüfuz eden düz bir takım ucu kullanılarak üst levha malzemesi aşağı doğru taşınmıştır (Şekil 2.37). Kullanılan kaynak parametreleri ise, 2500 d/d devir sayısı ve 2,5 mm/sn dalma hızıdır (Su ve diğ. 2006).



Şekil 2.37: Al 5754/Al 6111 levhaların SKNK sırasında malzemelere nüfuz eden düz bir takım ucu kullanılarak üst levha malzemesinin aşağı doğru taşınması (Su ve diğ. 2006)

Ayrıca SKNK sırasında malzemenin yukarı doğru hareketi, Al 6061-T6 levhaların kaynağı sırasında karışma bölgesinin içinde, Al_2O_3 izleyici partiküllerin süreklilik gösterecek şekilde bir araya gelmesinden faydalanılarak araştırılmıştır. Bunun için alt

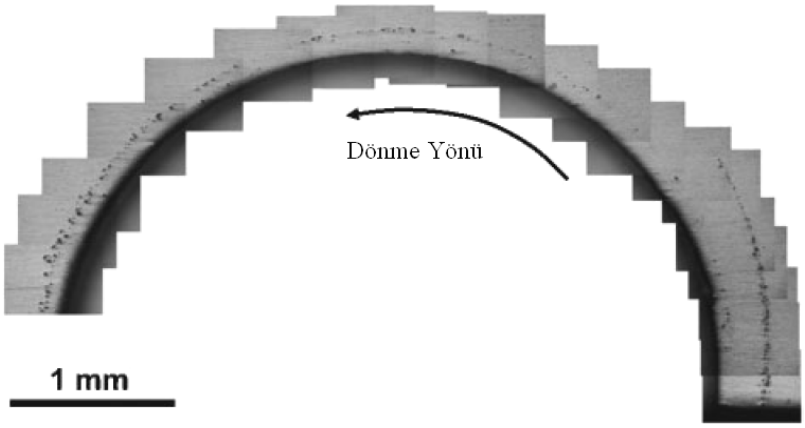
levha içine 0,7 mm çapında delikler açılarak, MMC levhanın testere ile kesilmesi sırasında çıkan talaşlar toplanıp bu deliklere doldurulmuştur. Kullanılan kaynak parametreleri ise, 3000 d/d devir sayısı ve 2,5 mm/sn dalma hızıdır. Al 6061-T6 parçaların SKNK sırasında, MMC malzemenin içindeki Al_2O_3 izleyici partiküllerinin yer değiştirmesi Şekil 2.38'de görülmektedir. Takım ucu boşluğunun bir tarafındaki izleyici partiküller 1, 2, 3, 4 ve 5'dir. Diğer tarafındaki ise 1', 2', 3' ve 4' dür. Takımın saat yönünün tersi yönde dönmesi ile art arda gelen izleyici partikül izleri 1, 1', 2, 2', 3, 3', 4, 4' ve 5'dir. Şekil 2.38a'da Al 6061-T6 parçalarda oluşturulan kaynak noktası sırasında, karışma bölgesindeki Al_2O_3 izleyici partiküllerin bir araya gelerek bir iz şeklinde süreklilik gösterdiği görülmektedir. İzleyici partiküllerin Şekil 2.38a'da "A" noktasında orijinal yeri görülmektedir ve bu partiküller takımın dış yüzeyi etrafında saat yönünün tersi yönde spiral (helezon) hareket ile yukarı doğru taşınmıştır. Şekil 2.38b'de ise takım ucu boşluğunun her iki tarafında birbiri üzerine oluşan izleyici partikülleri göstermektedir. İzleyici partiküllerin spiral hareketi, 1, 1', 2, 2', 3, 3', 4, 4' ve 5 ile gösterilen ve art arda gelen izleyici izler ile açık bir şekilde görülmektedir. Al_2O_3 partiküllerinin bu izleri, kaynakta bağlantı hatasından doğan bir eksiklik sonucu meydana gelmediği doğrulanmıştır. Morfoloji ve bu partiküllerin tane dağılımı, bunların yalnızca MMC malzemesinden meydana gelmiş olduğunu göstermiştir (Su ve diğ. 2006).



Şekil 2.38: Al 6061-T6 parçaların SKNK sırasında, Al_2O_3 izleyici partiküllerinin yer değiştirmesi (a) SKNK sırasında izleyici partiküllerin yukarı ve dışa doğru hareketi, (b) SKNK'da takım ucu boşluğunun her iki karşı tarafında birbiri üzerine gelen iz görüntüleri (Su ve diğ. 2006)

SKNK yapılmış Al 6061-T6 parçanın Şekil 2.39'de, Al_2O_3 izleyici partiküllerini içeren yatay enine kesiti görülmektedir. Kullanılan kaynak parametreleri ise, 3000

d/d devir sayısı ve 2,5 mm/sn dalma hızıdır. İzleyici partiküllerin orijinal yeri takım ucu boşluğunun altıdır ve buradaki kesit, oluşturulan kaynak noktasının yatay enine kesiti olduğundan, bu şekilden takım ucunun altındaki bölge görülemez. İzleyici partiküller yukarı doğru taşındığı zaman, dışa doğru açılan spiral akış hareketi oluşur. İzleyici partiküller, büyük oranda küçük çaplı Al_2O_3 partiküllerini içeren ve takım ucu boşluğunun dış yüzeyinden 80-280 µm uzaklığındaki mesafelerde gözlemlenmiştir. Bu izler, karışma bölgesinin içinde birleşmiş izleyici malzeme partikül kırıntıları ile süreklilik göstermektedir (Su ve diğ. 2006).



Şekil 2.39: Yatay enine kesitte görülen izleyici Al_2O_3 partikülleri (Su ve diğ. 2006)

Su ve diğ.'nin yaptığı çalışmada bildirdiğine göre, bu çalışmada elde edilen Şekil 2.38 ve 2.39'daki takım ucu etrafında dönen malzeme akışı bilgisi ve görüntüleri, Nagathil ve diğ.'nin yaptığı çalışmada Fluent kod kullanılarak malzeme akışının nümerik olarak modellenmesi sırasında elde edilen bazı bulgular ile uyum içindedir. Nümerik modelleme sırasında, düz bir takım etrafında spiral akış önceden bilinmesine karşın, düşey yöndeki akış bilinmiyordu. Yine Su ve diğ.'nin yaptığı çalışmada bildirdiğine göre, Askari ve diğ.'nin mekanik ve termodinamik zamana bağlı sürekli denklemleri çözerek, Al 7051-T7451 malzemenin SKK'nı modellediklerinde, yumuşayan malzemenin takım ucu yivleri ile aşağı doğru sürüklendiğini ve sonrasında takım ucunun alt kısmından yukarı doğru çıkarıldığını belirtmişlerdir. Yine Su ve diğ.'nin yaptığı çalışmada bildirdiğine göre, Colegrove ve diğ. benzer biçimde malzemenin matkap burgusu şeklinde aşağı doğru takım yivleri ile hareket ettiğini ve bununda alttaki malzemenin yukarı doğru taşınmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Yine Su ve diğ.'nin yaptığı çalışmada bildirdiğine göre,

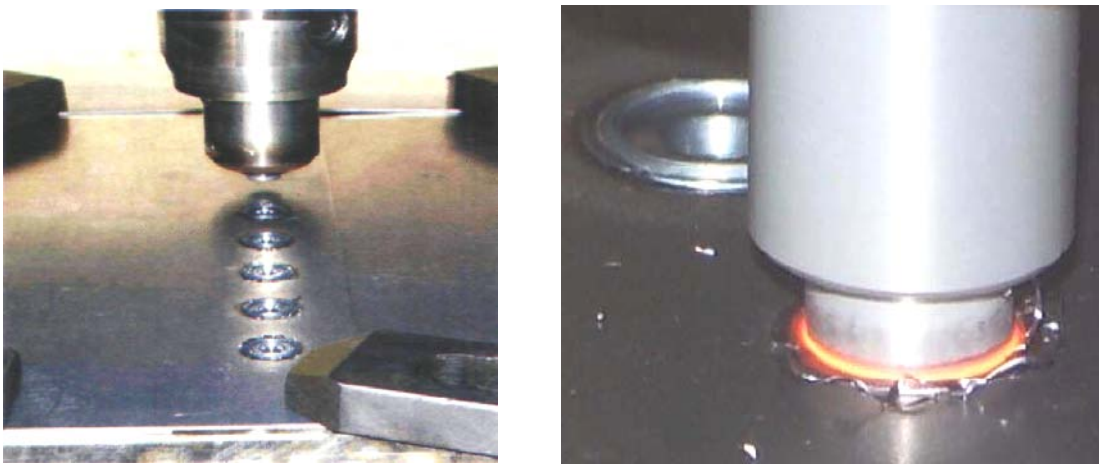
Arbegast'ın yaptığı çalışmada ise, dönen takıma çok yakın farklı bölgelerde örneğin başlangıç deformasyon bölgesinde, takımın altında hızla dönen girdap bölgesi, ekstrüzyon bölgesi ve dövme bölgesi gibi malzeme hareketlerinin meydana geldiği belirtilmiştir. Malzemenin aşağı doğru akışı başlangıç deformasyon bölgesinde oluşturulur iken malzeme, takım ucu dış yüzeyine çok yakın bölgede ekstrüzyona uğrar. Düşey bir dönme akışı, takım omzunun altındaki bölgede gösterilir iken dönen takım ucu altında bir girdap bölgesi şekillenir (Su ve diğ. 2006).

Sonuç olarak dönen takımın ucundaki yivlerin dibinde tutulmuş olan üst levhaya ait malzeme, takım ucunun aşağıya doğru hareketi ile alttaki levha malzemesinin içine doğru bastırılarak ve de itilerek taşınır. SKNK sırasında takım ucuna üst levhadan yapışan malzeme, takımın dış yüzeyine düz bir takım şeklini aldırır. Dönerek parçaların içine ve aşağı doğru hareket eden takımın uç kısmı, parçalarda yönteme ait karakteristik bir boşluk oluştururken alt levha malzemesi ise spiral hareket ile yukarı ve dışa doğru hareket eder. SKNK sırasında iki farklı malzeme akış bölgesi üretilir. Birincisi, takım ucunun dış yüzeyine yakın olan iç akış bölgesidir. Burada üst levha malzemesi, saat yönünün tersi yönde dönen takımın uç kısmı ile aşağı doğru hareket eder. İkincisi ise dış akış bölgesidir. Burada alt levha malzemesi spiral şeklindeki bir hareket ile yukarı ve dışa doğru hareket eder (Su ve diğ. 2006).

Kimberley tarafından rapor edilen ve Yorkshire'da ki TWI teknoloji merkezinde gösterime sunulan bir çalışmada, ultra yüksek dayanımlı çeliğin (UHSS: Ultra High Strength Steel) SKNK ile birleştirilmesinde yapılan ön çalışmalara değinilmiştir. Fakat yapılan bu çalışmada kullanılan takım, takım malzemesi ve kaynak edilen yüksek dayanımlı çeliğin kalınlığı hakkında bilgi verilmemiştir (Kimberley 2005).

Yeni malzemelerin birleştirilmesinin her zaman bir takım problemleri de yanında getireceği ve gelişmiş yeni parametrelere ihtiyaç duyulabileceği gibi, yeni tekniklere de ihtiyaç duyulabileceği belirtilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı çelik, geleneksel DNK veya MAG kaynağı ile birleştirilebilir fakat bağlantının performansı, kaynaklanmamış levhanınki ile karşılaştırılamaz. SKNK ile yapılan kaynak sırasında malzemede ergime olmayışı, çarpılmaları minimuma çeker ve daha iyi özellikte bağlantılar elde etme imkanı verir. SKNK, Mazda tarafından alüminyum malzemeler

için kullanılmıştır. Fakat ultra yüksek dayanımlı çeliğin, yumuşama sıcaklığı da yüksek olacağından, aşınma direnç ve dayanımına sahip takım malzemeleri gerektirir (Kimberley 2005, Kyffin ve diğ. 2006). Eğer kabul edilebilir bir maliyet ve başarılı sonuçlar elde edilir ise bu durum büyük bir avantaj sağlayacaktır. Seramikler aşınma direncine sahiptirler fakat çok kırılgandırlar. Bu konuda yapılan ön çalışmalar Yorkshire'da TWI teknoloji merkezinde gösterime sunulmuştur ve belirli takım malzemelerinden imal edilen takımlar kullanılarak, çok az aşınma ile teşvik edici SKNK bağlantıları etkileyici sayıda yapılabilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı çeliğin SKNK Şekil 2.40'da görülmektedir (Kimberley 2005).



Şekil 2.40: UHSS'in SKNK (Kimberley 2005, Kyffin ve diğ. 2006)

Feng ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, levha halindeki ileri yüksek dayanımlı çelik (AHSS: Advanced High Strength Steel) metallerde, SKNK'nın otomotiv uygulamaları için uygulanabilirliği araştırılmıştır. AHSS'in SKNK için, takım malzemesi seçimi kritik ve teknik bir konudur. SKNK yönteminin, SKK'dan türetilmesinden yola çıkılarak, çeliklerin ve de diğer yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin SKK için başarı ile kullanılan polikristal kübik boryum nitritten (Polykristalin Kübik Boron Nitrit: PCBN) yapılan tek parça takım kullanılmıştır ve yüzü aşkın kaynak noktası, takımda aşınma oluşmaksızın gerçekleştirilmiştir. Parçalar arasındaki metalurjik bağ yaklaşık 2-3 sn aralığında oluşturulmuştur. Takım belirlenen bir dalma derinliğine kadar ilerletilmiştir. Bu çalışmada tüm deneyler için takım dönme hızı 1500 d/d'dır. Kullanılan takımın ucu gittikçe incelen kesik koni şeklinde bir uç profiline sahiptir. Takım ucu uzunluğu 2 mm ve omuz çapı 10

mm'dir. Kaynak bölgesindeki mikro yapılar ve sertlik değişimleri incelenmiş ve ayrıca elde edilen çekme deneyi sonuçları verilmiştir (Feng ve diğ. 2005).

Literatürde takım ucu tasarımında temelde iki karakteristik farklılığa sahip yaklaşım vardır. İlk yaklaşım tek parça takım (sabit takım ucu) yaklaşımıdır. Çıkıntı yapan takım ucu, birleştirmenin ortasında karakteristik bir boşluk bırakarak ayrılır. İkinci yaklaşımda kullanılan takım iki parçalıdır. Takım ucu omuzun içine çekilir ve takım bu şekilde de bir süre döner. Takım ucunun hassas izafi hareketleri sayesinde, takım ucunun bıraktığı deliği omuz tekrar doldurur. İki yaklaşım karşılaştırılırsa, ikinci yaklaşımda deliğin doldurulması için takımın kompleks hareketleri sağlanarak oldukça uzun işlem süresi gerekli olacaktır. Tek parça takım yaklaşımı çok hızlıdır ve örneğin Al alaşımlar için kaynak bir saniyeden daha kısa zamanda yapılabilir. Ayrıca tek parça takım yaklaşımı, kaynak makinası ve kontrol sistemi açısından düşünüldüğünde, yüksek hacimli kütle üretimi yapan montaj hatlarında, işlemi gerçekleştirmek için basit ve kolaydır. Bu nedenle de bu çalışmada tek parça takım kullanılmıştır (Feng ve diğ. 2005).

Şimdiye kadar SKNK üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çabalarının çoğunluğu alüminyum alaşımları üzerine olmuştur. Çünkü Al alaşımları oldukça düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 550 ^{o}C ve altı) yumuşar ve kolayca şekil alır. Bu nedenle de Al'un kaynağı oldukça kolaydır. Al alaşımları için SKNK'nın gelişimi tamamen başarılı olmuştur ve birçok otomobil şirketi Al gövde kısımlarının kaynağını SKNK ile yaptıklarını duyurmuşlardır (Feng ve diğ. 2005).

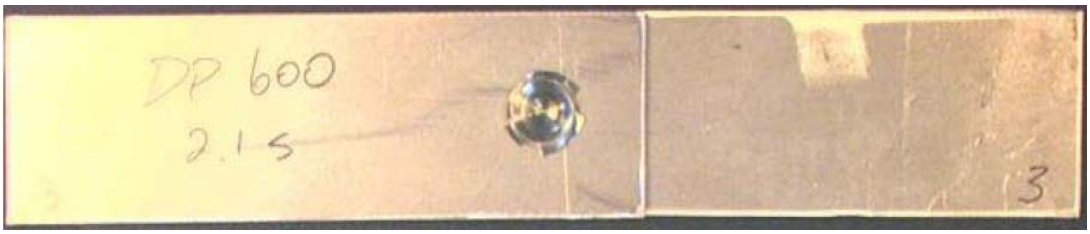
Günümüzde ise çelik hala bütün önemli araba piyasaları tarafından büyük hacimli kütle üretiminde ve otomobillerin gövde yapıları için ilk sırada malzemedir. Otomobil gövde konstrüksiyonunda emniyet açısından önemi büyük olan ve taşıtın ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini sağlayan AHSS'in kullanımı artarak sürmüştür. Bu malzeme, hem çelik gereksinimini sağlayan firmalara hem de otomobil kullanıcılarına bazı eşsiz teknik mükemmellikler sunar. Fakat şimdiye kadar elde edilen veriler, AHSS'in DNK ile birleştirilmesi sonucunda, bu malzemeden beklenen özelliklerin DNK ile sağlanamadığı yönündedir. Bu nedenle de AHSS'in kaynağında DNK tercih edilmez. AHSS için en büyük teknoloji engeli,

DNK kullanımıyla kaynak özelliğinin önemli oranda düşmesidir. DNK'da aşırı derecede yüksek soğutma oranı yüzünden, AHSS'in kaynak bölgesinde önemli miktarda hassas mikroyapılar gelişir ve sonuç olarak kaynak kusurları örneğin çatlaklar meydana gelebilir. AHSS'in DNK'da diğer önemli bir sorun olan çinko kaplama ve bakır elektrot arasında ortaya çıkan ve yüksek kaynak kuvvetinin neden olduğu kimyasal reaksiyon sonucu kısa elektrot ömrü, DNK'a bir alternatif olarak SKNK kullanımına ilgiyi artırmaktadır. Bu çalışma için AHSS'in iki çeşidi seçilmiştir. Birincisi iki fazlı bir çelik olan DP600, ikincisi ise martenzitik bir çelik olan M190'dır. Tablo 2.6'da yüzde ağırlık olarak, kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir (Feng ve diğ. 2005).

Tablo 2.6: Yüzde ağırlık olarak, kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri (Feng ve diğ. 2005).

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Mo	Cr	Cb	V	Ti
DP600	0.084	0.94	0.011	0.006	0.313	0.02	<0.01	<0.01	0.02	<0.003	0.004	0.004
M190	0.168	0.4	0.009	0.005	0.169	0.036	0.013	0.003	0.023	<0.003	<0.003	0.034

SKNK uygulanmış AHSS çeliğinin çekme numunesinde kaynak noktasının fotoğrafı Şekil 2.41'de verilmiştir. Çekme numunesi 38,1 mm genişlik ve 127 mm boyundadır. Malzemelerin kalınlığı ise 1,6 mm'dir. Levhaların bindirme uzunluğu 38 mm'dir. Kaynak noktası bindirilen bölgenin merkezinde oluşturulmuştur (Feng ve diğ. 2005).



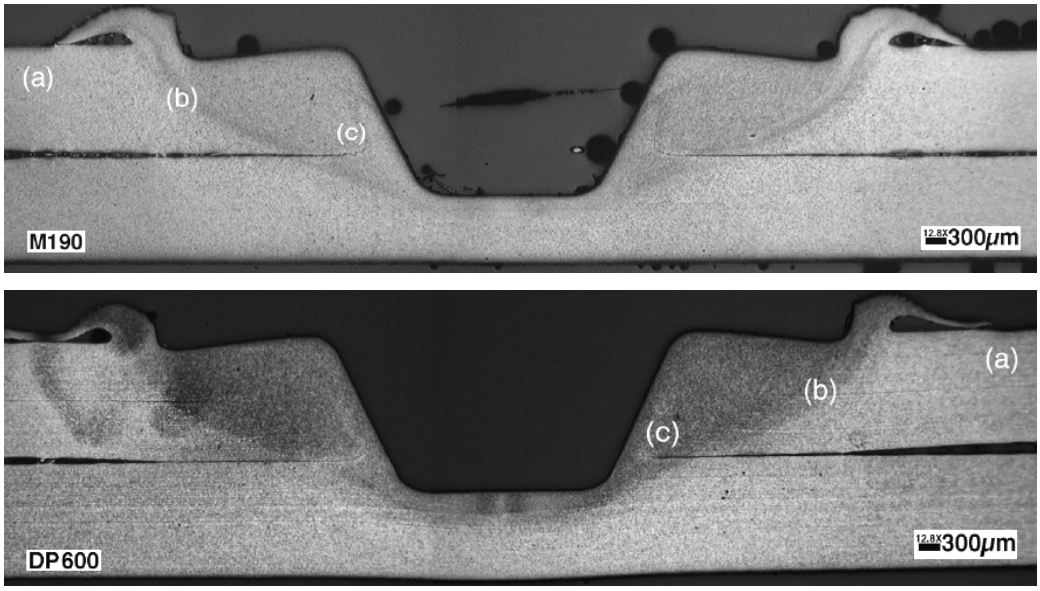
Şekil 2.41: SKNK uygulanmış AHSS çeliğinin çekme numunesinde kaynak noktası (Feng ve diğ. 2005)

Üst levhanın yüzeyinden ölçülerek, parça kalınlığının yaklaşık olarak ¼t (0,4 mm), ½t (0,8 mm) ve ¾t (1,2 mm)'ü olmak üzere üç farklı derinlikteki mikro sertlik incelemesi yapılmıştır. Buradaki parça kalınlığı "t", 1,6 mm'dir (Feng ve diğ. 2005).

M190 martenzitik çeliğinin kaynak bölgesi incelendiğinde, karışma bölgesinin dışında önemli bir yumuşama gösterdiği belirlenmiştir. Minimum sertlik yaklaşık olarak 200 HV'dir ve bu bölge kaynak merkezinden yaklaşık olarak 5 mm uzaktadır. Bu da takım omuz yarıçapına karşılık gelir. Ayrıca karışma bölgesindeki sertlik 430 HV olarak elde edilmiştir ve bu değer esas metalin sertliği seviyesindedir (Feng ve diğ. 2005).

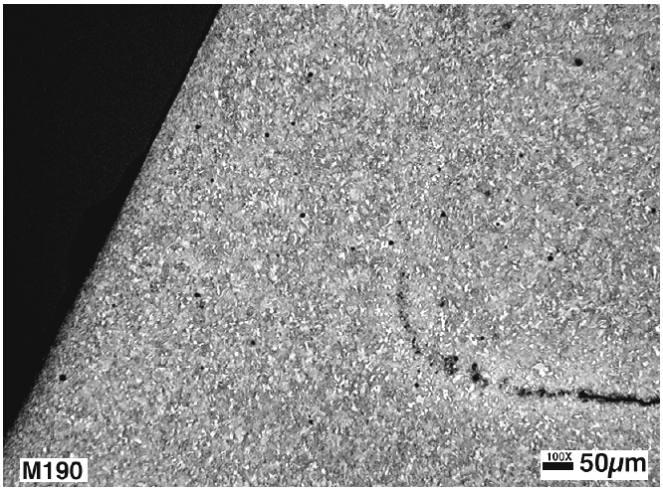
DP600 iki fazlı çeliği ise, aynı kaynak şartları altında çok farklı mikrosertlik dağılımı göstermiştir. Yumuşama, esas metalin mikro sertlik seviyesi ile karşılaştırıldığında oldukça önemsizdir. Özellikle ¼t ve ½t derinlikleri için yumuşama omuz çapının oldukça dışındadır. Diğer bir deyişle, karışma bölgesi sertleştirilmiş olarak oluşmuştur. Maksimum sertlik yaklaşık olarak 250 HV, esas metalin ortalama sertliği ise 210 HV'dir (Feng ve diğ. 2005).

Kaynak süresi 2,1 sn olan DP600 ve M190'nın enine kesitleri Şekil 2.42'de görülmektedir. Şekil 2.42a esas metal bölgesini, Şekil 2.42b geçiş bölgesini ve Şekil 2.42c bağlantı ara yüzeyinin hemen yanında ki, termomekanik olarak etkilenmiş bölgenin (TMAZ) içini göstermektedir (Feng ve diğ. 2005).



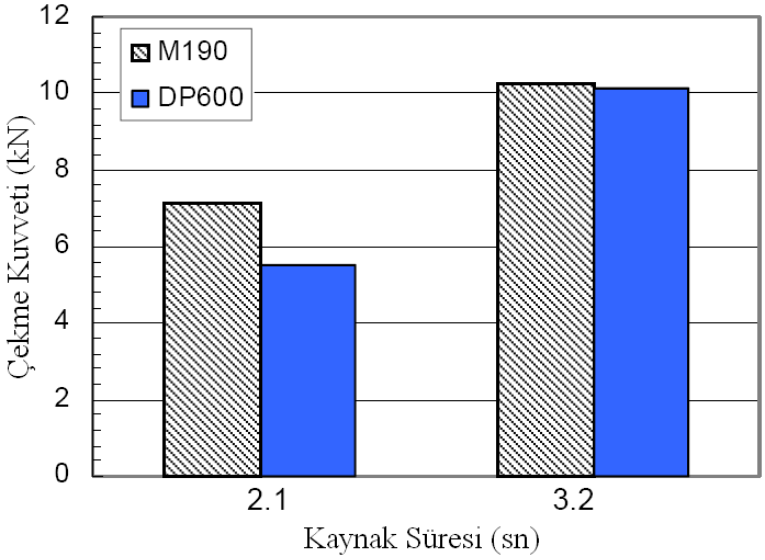
Şekil 2.42: SKNK uygulanmış numunelerin enine kesitleri (Feng ve diğ. 2005)

Kaynak süresi 2,1 sn olan M190 çeliği için bağlantının ara bölgesinin yakından kesit görünüşü Şekil 2.43'te görülmektedir. Nüfuz eden takım ucunun etrafında, üst ve alt levhaların arasında metalurjik bağın şekillenişi açıktır. Dönen takım ucunun parçaların içine dalması ile alt parçaya ait malzeme yukarı doğru harekete zorlanır. Bu durum levhaların ara yüzeyindeki yumuşayan malzemenin yukarı doğru bükülmesine ve adeta kanca şeklini almasına neden olmuştur. Bağlantının genişliği kaynağın dayanımını belirleyen kritik bir faktördür (Feng ve diğ. 2005).



Şekil 2.43: Bağlantının ara bölgesinin yakından kesit görünüşü (Feng ve diğ. 2005)

Farklı iki AHSS malzeme için çekme deneyinden elde edilen maksimum kuvvetler Şekil 2.44'te görülmektedir. Her bir veri noktası, aynı malzeme ve kaynak şartları altında yapılan üç örneğin ortalamasını sunmaktadır. DP600 ve M190 çeliklerinin her ikisi için de, kaynak süresindeki 2,1 sn'den 3,2 sn'ye kadar olan artış, maksimum çekme kuvvetinin artmasını sağlamıştır. Çünkü daha uzun kaynak süresi, birleştirme bağı genişliğinin artması ile ilişkilidir. Birleştirme bağı genişliği ise bağlantının dayanımı için bir kontrol faktörüdür (Feng ve diğ. 2005).



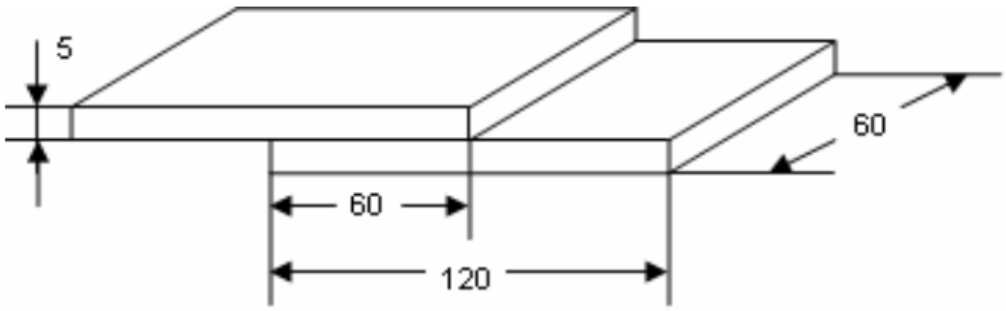
Şekil 2.44: Farklı iki AHSS malzeme için çekme deneyinden elde edilen maksimum kuvvetler (Feng ve diğ. 2005)

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada, AHSS'in SKNK'nın otomotiv uygulamaları için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Sabit takım ucu yaklaşımı ile DP600 iki fazlı çelik ve M190 martenzitik çeliğin her ikisi de, 3 sn'nin altında ki kaynak sürelerinde birleştirilebilmiştir. Polikristal kübik boryum nitrit takım malzemesi kullanılarak aşınma ve azalma olmaksızın, yüzün üzerinde kaynak noktası oluşturulmuştur. Her iki çelik malzeme ile yapılan çalışmalarda, esas metalin sertliği ve mikro yapısı termomekanik olarak etkilenmiş bölgeninki (TMAZ) ile benzer niteliktedir. Böylece SKNK yönteminin AHSS'in mikroyapısına uygunluğu belirlenmiştir. Endüstride kabul edilebilir nitelikte ve oldukça kısa sürede gerçekleştirilebilen SKNK yöntemi AHSS'in kaynağına uygundur. Bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri ile, oldukça küçük birleştirme bağı genişliği elde edilmiştir. Bu nedenle de bağlantının çekme kuvveti verileri limit değerlerdedir. Yöntemin daha da geliştirilmesi ve takım geometrisinde ki değişiklikler ile eğer birleştirme bağı genişliği artırılabilir ise bağlantı dayanımında önemli gelişme elde edileceği düşünülmektedir (Feng ve diğ. 2005).

Arıcı ve Mert'in yaptığı çalışmalarda, polipropilen malzemenin SKNK ile birleştirilmesi incelenmiştir. PP levhadan numuneler hazırlanmış ve bindirme bağlantıları SKNK ile gerçekleştirilmiştir. SKNK yönteminin başarısına ve bağlantının dayanımına etki eden başlıca parametreler takım geometrisi, devir sayısı,

dalma hızı, dalma derinliği ve karıştırma (bekleme) süresidir. Yapılan çalışmalar ile kaynak takımı dalma derinliği ve karıştırma süresinin bağlantıların çekme kuvveti üzerine olan etkisi belirlenmiştir. Bunun için çekme deneyi uygulanmıştır ve çekme kuvvetini maksimum yapan optimum parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Ayrıca, kopma kesitleri de incelenerek kırılma davranışı gözlenmiştir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).

Yapılacak olan çalışma için PP levhadan 5x60x120 mm boyutlarında parçalar kesilerek çıkarılmıştır. İki adet parça, bindirme kaynağı olacak şekilde freze tezgahına uygun aparatlarla bağlanmıştır. Bindirme mesafesi 60 mm olarak alınmıştır (Şekil 2.45). Yöntemin daldırma, karıştırma ve geri çekilme aşamaları sırasıyla uygulanmıştır. Karıştırma süresi sonunda kaynak takımı dönerek geri çekilmiş ve parçalardan uzaklaştırılmıştır. Kaynak takımının ölçüleri ise, literatürde bildirilen takımlara ait ölçüler arasındaki oranlar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



Şekil 2.45: Bindirme bağlantısı (Arıcı ve Mert 2007)

İlk etapta yapılan kaynaklarda, 10-250 sn arasında değişen karıştırma süresinin etkisi incelenmiştir. Bu kaynak serisinde takım devri ve takım dalma derinliği sabit tutularak sırasıyla 1250 d/d ve 9,5 mm olarak seçilmiştir. Böylece işlem uygulanırken dalma aşamasında takım omuzu parça yüzeyine temas ettikten sonra 2 mm daha dalma derinliği uygulanmıştır. Takım çeliğinden imal edilen kaynak takımının omuz çapı 37 mm, pim (uç) çapı 12 mm ve pim uzunluğu 7,5 mm'dir (Şekil 2.46). İkinci etap kaynaklarda ise takım dalma derinliğinin etkisi incelenmiştir. Dalma derinliği 1 ile 3 mm arasında değişmektedir. Kaynak takımının devri 1250

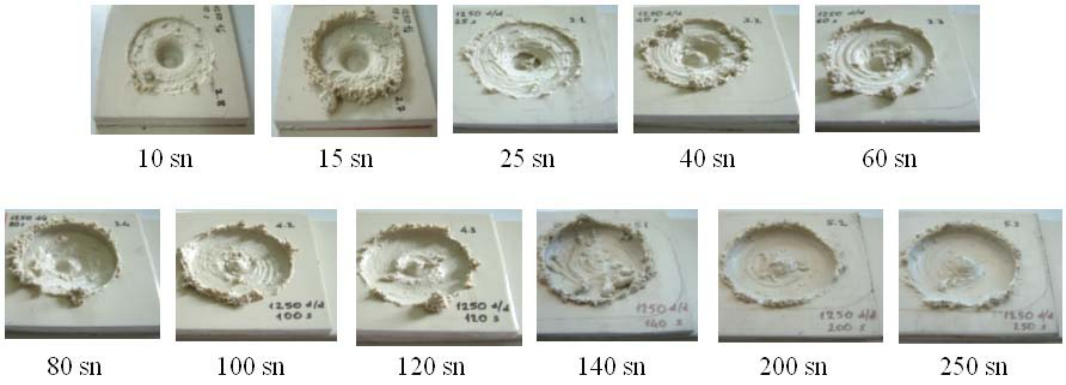
d/d'dır. Kaynak takımının omuz çapı 37 mm, pim çapı 12 mm ve pim uzunluğu 6 mm'dir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



Şekil 2.46: Kaynaklarda kullanılan SKNK takımı (Arıcı ve Mert 2007)

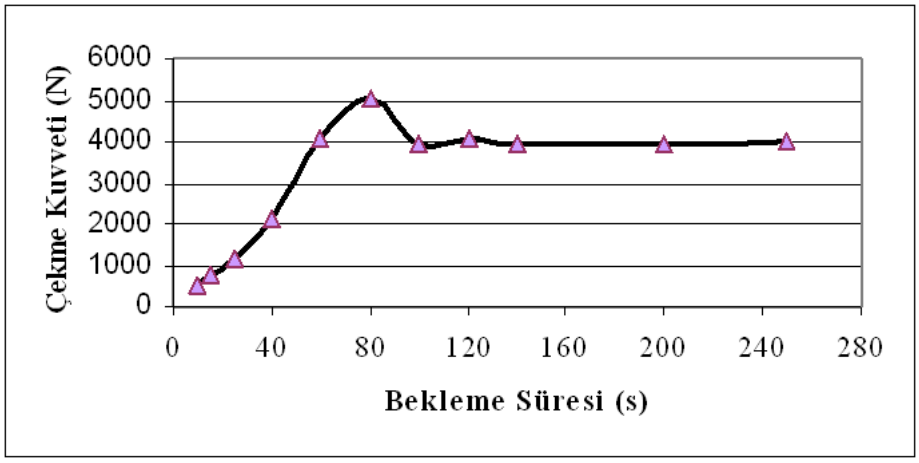
Instron 4411 çekme test cihazı kullanılarak kaynaklı parçaların çekme deneyleri yapılmıştır. Levhalarla aynı kalınlığa sahip parçalar kullanılarak çekme çenelerine sıkıştırılan numuneler 5 mm/dk hızla çekilmişlerdir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).

Şekil 2.47'de sürtünme karıştırma nokta kaynaklı numunelerin, çekme deneyi öncesi fotoğraflarının gözle yapılan incelemesinde, kaynak bölgesinde yönteme ait karakteristik boşluğun oluştuğu ancak 100 sn ve sonrasında ki karıştırma sürelerinde boşluğun dolduğu, kaynak takımının geri çekilmesi sonrasında ayrıca bir tepeciğin oluştuğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla karıştırma süresinin kaynak bölgesi görünümüne etkisi olduğu anlaşılmıştır. Kaynak bölgesinde malzemenin pim etrafındaki sürüklenişini ifade eden karışım izleri açıkça görülmektedir. Yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinden kaçması sonucu kaynak takımı omzunu çepeçevre saran bir çapak oluşumu söz konusudur. Ayrıca kaynak bölgesi malzemesi ile esas malzemenin rengi arasında herhangi bir farklılık olmayışı kaynak bölgesi malzemesinde herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir (Arıcı ve Mert 2007).



Şekil 2.47: Numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları (Arıcı ve Mert 2007)

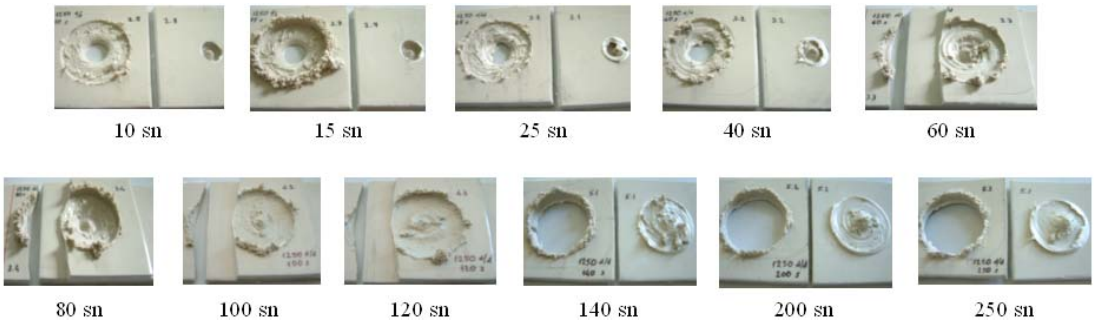
Karıştırma süresinin çekme kuvveti üzerine etkisi Şekil 2.48'de görülmektedir. Çekme kuvveti, 80 sn'lik karıştırma süresine kadar arttıktan sonra 80 sn'lik karıştırma süresinde 5005 N ile maksimuma ulaşmıştır. Sonrasında bir miktar düşüş göstermiş ve yaklaşık 4000 N değerinde sabit kalmıştır. Sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı karıştırma süresi uzadıkça artmış ve böylelikle kaynak bölgesindeki malzemede etkin yumuşama sağlanıp kaynak bağlantı dayanımının artış gösterdiği daha sağlam bir metalürjik bağ oluşmuştur (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



Şekil 2.48: Çekme kuvvetinin karıştırma süresi ile değişimi (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008)

Şekil 2.49'da çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Karıştırma süresinin artması ile kopma şekil değiştirerek pim esaslı, esas malzeme ile kaynak bölgesi kenarında ve omuz esaslı olmak üzere üç şekilde meydana gelmiştir. Pim ve omuz esaslı kopmalarda üst ve alt levha

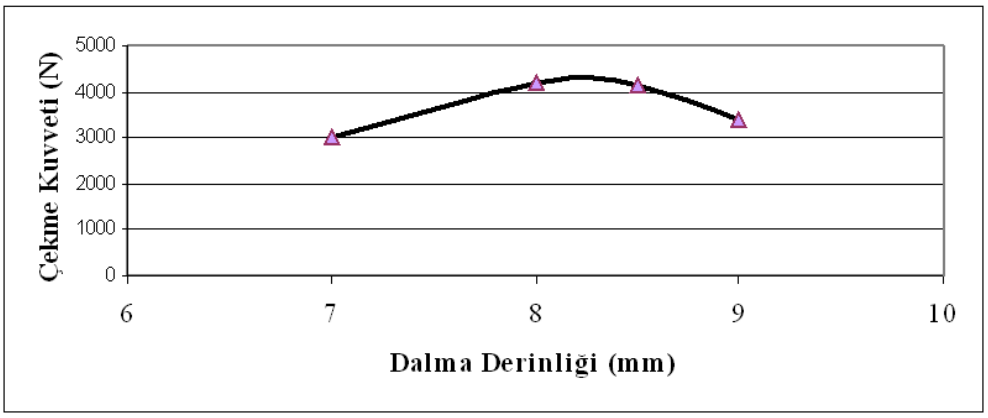
birbirinden ayrılır. Fakat kırılma bölgelerinin yerleri farklıdır. Bu fotoğraflardan, 10 ile 40 sn arasındaki karıştırma süreleri için, kopmanın pim esaslı olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık değerde olmakla birlikte karıştırma süresinin artışına paralel olarak bu iz çapı da artış göstermiştir. 40 sn'lik karıştırma süresine kadar izlenen bu durumda ayrıca sürenin artışıyla beraber malzemenin kopma öncesi bu bölgede daha fazla uzama gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çekme uzamaları 10 sn gibi çok kısa karıştırma süresi için neredeyse oluşmamakla birlikte, özellikle 25 ve 40 sn'de hem üst hem de alt parçada çok net olarak oluşmuştur. Çekme uzamalarındaki bu artış elde edilen çekme kuvveti değerlerindeki artışı da açıklamaktadır. Ancak çekme kuvvetlerinin çok daha yüksek değerlere ulaştığı 60 ve 80 sn'ler için kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerinde üst levhadan kopan parça yer almaktadır. Çekme kuvvetinin bir miktar düşüş gösterdiği 100 ve 120 saniyelik karıştırma süreleri için de kopmanın benzer şekilde esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülmüştür. 140, 200 ve 250 sn'lik daha uzun karıştırma sürelerinde ise kopmanın şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Kopmaya neden olan yırtılma omuz çevresi boyunca kaynak bölgesi ile esas malzeme ara yüzeyinde oluşmuştur. Böylelikle, karıştırma süresinin kopma davranışına etkisi olduğu belirlenmiştir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



Şekil 2.49: Numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008)

Dalma derinliğinin çekme kuvveti üzerine etkisi Şekil 2.50'de görülmektedir. Çekme kuvveti, belirli bir dalma derinliğine kadar artış göstermiştir ve 8 mm'lik dalma

derinliğinde maksimuma ulaşmıştır. 9 mm'lik dalma derinliğinde ise biraz düşmüştür. Takım omzunun bir miktar malzeme yüzeyinden içeri girdirilmesi sayesinde omuz altındaki karışma gösteren malzemede daha yüksek bir basma etkisi sağlanmaktadır. Dalma derinliğinin artması ile takımın omuzu altındaki malzemeye uygulanan basıncın artması sağlanmış ve böylece malzemenin omuz tarafından yeterince dövülmesi, dalma derinliğinin çekme kuvveti üzerine etkisini artırmıştır. Bu etki sayesinde de yumuşayan malzeme daha iyi ve güçlü bir metalürjik bağ oluşturmuştur. Fakat dalma derinliğinin çok fazla artması, üst levha malzemesinin kalınlığının önemli miktarda azalmasına neden olmuş ve bu nedenle kaynak kalınlığının da azalmasının, çekme kuvveti üzerine olumsuz etkiye sahip olduğu görülmüştür (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



Şekil 2.50: Çekme kuvvetinin dalma derinliği ile değişimi (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008)

Şekil 2.51'de takım dalma derinliğinin, kopma şekline etkileri görülmektedir. Yukarıda karıştırma süresinin incelendiği durumda olduğu gibi dalma derinliğinin incelendiği durumda da, dalma derinliğinin artması ile kopma şekil değiştirerek pim esaslı, esas malzeme ile kaynak bölgesi kenarında ve omuz esaslı olmak üzere üç şekilde meydana gelmiştir. Takımın 7-8- 8,5 ve 9 mm malzeme içine daldırılması ile ulaşılan derinlik, üst üste bindirilen toplam malzeme kalınlığının sırasıyla %70, %80, %85 ve %90'ına karşılık gelmektedir. Bu takım omzunun 1-2-2,5 ve 3 mm malzeme içine daldırılması demektir. Çekme kuvvetinin en yüksek olduğu dalma derinliklerinden daha düşük derinlikte (7 mm) kopma pim esaslı gerçekleşmiştir. Çekme uzaması alt ve üst parçada net olarak izlenmiştir. Çekme kuvvetinin en

yüksek değerlere ulaştığı 8 ve 8,5 mm'lik dalma derinlikleri için ise kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Dalma derinliğinin daha da artması ile kopmanın şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Böylelikle, dalma derinliğinin kopma davranışına etkisi olduğu belirlenmiştir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).



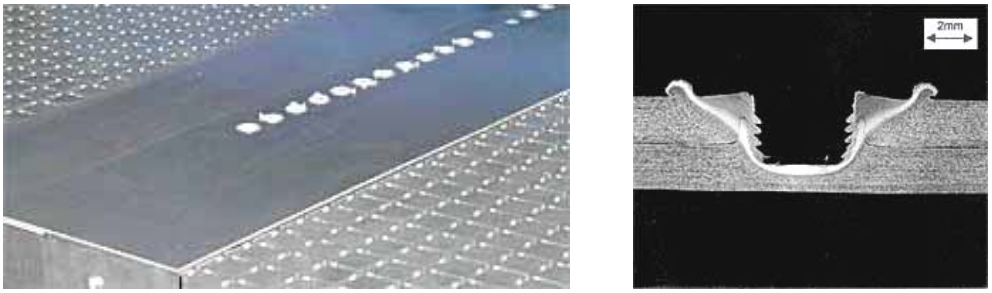
Şekil 2.51: Numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008)

Sonuç olarak en yüksek çekme kuvveti değerlerine 80 sn karıştırma süresinde ve malzeme kalınlığının yaklaşık %80-85'ine denk gelen dalma derinliklerinde ulaşılmıştır. Bu değerlerin incelenen parametreler için optimum değerler olduğu belirlenmiştir. Karıştırma süresi ve dalma derinliği olmak üzere incelenen her iki parametrenin de kopma davranışına ve kaynak bağlantısının dayanımına etkisi olduğu belirlenmiştir. Kopma pim esaslı, esas malzeme ile kaynak bölgesi kenarında ve omuz esaslı olarak üç şekilde gerçekleşmiştir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008).

2.9. SKNK Yönteminin Kullanıldığı Uygulamalar

SKNK için özellikle taşımacılık endüstrisindeki alüminyum yapılarda kullanılan birçok uygulama vardır. Herhangi bir uygulamada SKNK, günümüzde yaygın olan perçinleme veya DNK'nın yerine sık sık geçebilmektedir. Bu uygulamalara otomobil parçaları, otomobil gövde panelleri, kamyon ve treyler gövdeleri, kamyon alt iskeleti (şasisi) ve süspansiyon elemanları, golf arabaları, trenler, tekneler ve benzeri araçlar örnek olarak verilebilir. Yapılan uygulamalarda önemli maliyet azalması sağlanmış ve mekanik özelliklerde de heyecan verici gelişmelere ulaşılmıştır (Smith ve diğ. 2006).

SKNK yöntemi alüminyum ve çeliklerin kullanımında otomotiv ve genel taşımacılık endüstrisinde oldukça dikkat çekmektedir ve bağlantılar şimdiye kadar alüminyum ve çeliklerin kullanımında gösterilmiştir. Bindirme levhalarına SKNK uygulandıktan sonra, bir seri şeklindeki kaynak noktalarının görünümü ve oluşturulan nokta kaynağının enine kesiti Şekil 2.52'de verilmiştir (Dunkerton ve Simpson 2006).



Şekil 2.52: SKNK ile oluşturulmuş seri kaynak noktaları ve kaynağın enine kesiti (Dunkerton ve Simpson 2006).

Japon otomobillerinde derin çekilmiş alüminyum levhalardan arka kapılar, kaputlar ve bagaj kapakları üretiminde SKNK'nın kullanılması büyük ve önemli bir gelişmedir. Bir araç için üretilen, SKNK kullanılmış parça örneği Şekil 2.53'te görülmektedir (Kallee 2006).



Şekil 2.53: Bir araca ait parçada SKNK (Kallee 2006)

Otomotiv endüstrisinde, Hiroşima'daki Japon otomobil fabrikası Mazda, ilk uygulama olarak otomobil gövdesinin üretiminde DNK yerine SKNK yöntemini

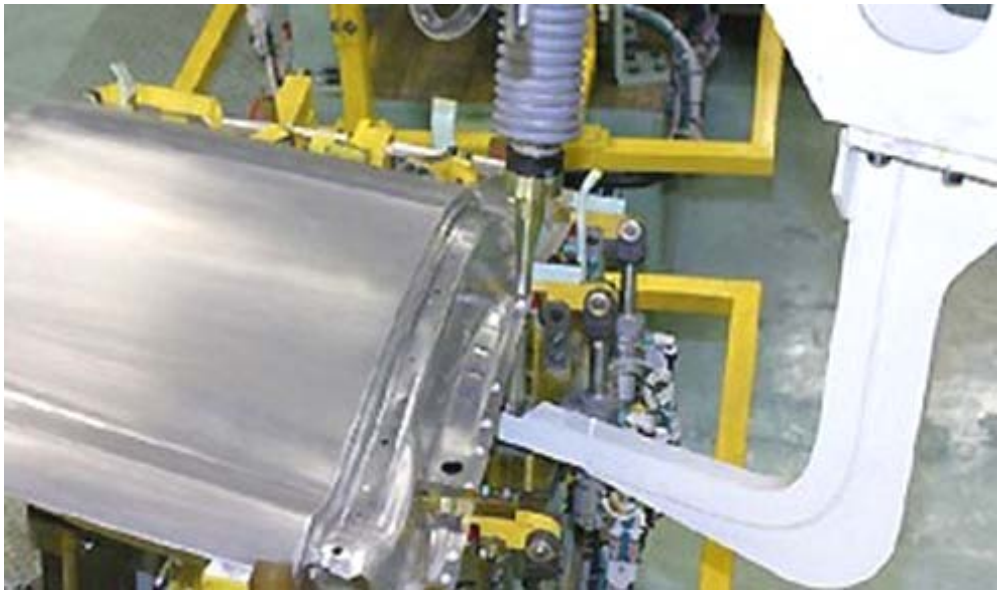
seçmiştir. Mazda firması, SKNK yöntemini DNK ile karşılaştırdığında, kaynak sırasında ortaya çıkan saçılan kıvılcımlardan kaçınmak ve enerji tüketimini azaltmak için bu yöntemi kullanmaktadır. SKNK yöntemi, %99 oranında enerji tasarrufu sağlanması ve %40 oranında ekipman maliyetlerinin azaltılması nedeni ile ilk olarak Mazda firması tarafından, önce Mazda RX-7 model spor arabaların sonrasında ise Mazda RX-8 model spor arabaların üretiminde kullanılmıştır. Mazda RX-7 model spor arabanın önden ve arkadan görünüşü Şekil 2.54'te, Mazda RX-8 model spor arabanın önden görünüşü ise Şekil 2.55'te verilmiştir. Mazda firması, Mazda RX-8 spor arabalarının yekpare alüminyum arka kapılarında ve bir çarpma esnasında yaya korumayı artırmayı amaçlı darbe emici özelliği olan kaputlarının üretiminde SKNK yöntemini kullanmaktadır. Mazda RX-8'in arka kapısında SKNK uygulanırken Şekil 2.56'da görülmektedir. Ayrıca diğer bazı otomobil şirketleri de örneğin Ford, bazı modelleri için Al gövde kısımlarının kaynağını SKNK ile yaptıklarını duyurmuşlardır (Feng ve diğ. 2005, Kallee ve diğ. 2005, Kimberley 2005, Mortimer 2005, Santelle ve diğ. 2005, Adamowski 2006, Mitlin ve diğ. 2006, CFSWC 2008, Lin ve diğ. 2008a, 2008b, Mazda RX7 2009a, 2009b, Mazda RX8 2009).



Şekil 2.54: Mazda RX-7 model spor araba (Mazda RX7 2009a, 2009b)



Şekil 2.55: Mazda RX-8 model spor araba (Mazda RX8 2009)



Şekil 2.56: Mazda RX-8'in arka kapısında SKNK uygulanırken (Kallee ve diğ. 2005, Adamowski 2006)

Elde edilen sonuçların cesaret verici olmasından dolayı, dünya çapında çeşitli ülkelerde alüminyum otomotiv parçalarının seri üretiminde SKK ve bu yöntemden türetilen SKNK yöntemi kullanılmaktadır. Detroit'te ki Amerikan otomobil fabrikası Ford, bir spor araba olan Ford GT'de bu yöntemleri kullanmıştır. Böylece Mazda firmasından sonra Ford firması da SKNK yöntemini kullanmış ve bir spor araba olan Ford GT'nin alüminyum şasisinde bu yöntemi uygulamıştır. Ford GT model spor arabanın önden ve arkadan görünüşü Şekil 2.57'de verilmiştir. Ayrıca Amerika'nın Tower firması, otomotiv parçalarının üretiminde SKNK yöntemini seçmiştir (Kallee ve diğ. 2005, CFSWC 2008, Ford GT 2009a, 2009b).



Şekil 2.57: Ford GT model spor araba (Ford GT 2009a, 2009b)

İngiliz otomobil firması Jaguar'dan yetkililer, Jaguar arabalarında alüminyum araba gövdelerinin maliyetini düşürmek için bir teknolojik yol haritası ortaya koyduklarını

duyurmuşlardır. Jaguar firmasındaki mühendisler, gelecekteki araba modellerinin performansında artış sağlayacak gövde yapılarının teknolojisi üzerinde çalışmaktadır. Üretimin önemli bir kısmı için robot esaslı otomasyon uygulamasının kullanılmasına devam edilecektir. İngiltere'de Land Rover ve Jaguar araba firmalarında, gövde yapıları üzerine çalışan birimin müdürü olan Mark White'a göre, yapılan çalışmalar Jaguar arabalarının görünümünü güçlendirirken, aynı zamanda bazı modellerin beyaz gövdesi için seçilen malzeme olarak alüminyumun statüsünü pekiştirmiştir. Çelik gövdelere alışılmış olsa bile, alüminyum paneller ağırlığın azalmasını sağlamıştır. Alüminyum kullanımının giderek artması parça başına maliyetleri düşürmek, güvenirliliği artırmak ve ağırlığı azaltmak için üretim teknolojilerinin sürekli değerlendirilmesini gerektirir. Bu arada yapıştırıcılar bazı kısıtlamaları yüzünden birincil birleştirme yöntemi olarak kullanılmayıp ikincil birleştirme yöntemi olarak kalmıştır. İngiliz otomobil fabrikası Jaguar, SKNK'nın geliştirilmesi için İngiltere'de ki Warwick Üniversitesi ile birlikte çalışmaktadır. Mark White, Jaguar firmasında şu an bir yöntem seçmek zorunda kalınsa SKNK'nı seçeceklerini ve beş yıl içinde her şeyin değişebileceğini, on yıl içinde ise şu an kullanılan yöntemin yerini SKNK yöntemine bırakabileceğini bildirmiştir (Mortimer 2005).

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kaynak İçin Kullanılan Malzeme

Deneysel çalışmada kaynaklı bağlantıların oluşturulmasında kullanılacak olan numuneler için, DIN EN ISO 15013 TG1.1 standardında, RÖCHLING Engineering Plastics firması tarafından 2000x1000x3 mm boyutlarında ekstrüzyon ürünü olarak üretilmiş, Polystone P-grau Homopolimer polipropilen (PP) levhalar temin edilmiştir. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (yumuşama sıcaklığı) 88 ^{o}C ve erime sıcaklığı 165 ^{o}C'dir (Catalog1 2006). Kaynak sırasında kaynak bölgesi sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığının üstünde ve erime sıcaklığının altındadır. PP malzeme, kalıplanabilen, ekstrüzyonla çekilebilen, elyaf ve film haline getirilebilen termoplastiklerin en önemlisidir ve geniş bir kullanım alanı vardır. Elyaf, iplik, halat ve çuval lifi üretiminde, ayrıca ambalaj ipliği ve şeffaf ambalaj malzemesinde, paketleme filmi üretiminde, özel gıda ambalajlarında en yaygın olarak da ekmek ambalajlamasında, peruk, sentetik çim, keçe, paspas, dokumasız tekstil ve halı üretiminde, yer döşemesi yapımında, masa örtüsü, hasır örgü, balık ağı, kumaş, güneşlik ve giyim eşyası yapımında, özel giysi üretiminde, tekstil bobinlerinin ve makaralarının imalatında, sentetik kağıt üretiminde, valiz, bavul, çanta imalatında, tıraş kremi ve diş macunu tüplerinde, plastik raf ve kaplarda, şişeler ve şişe kapaklarında, meşrubat şişesi kasalarında, aerosol kapak ve vanalarında, piknik ve yemek takımlarında, termoslarda, gösterge tabloları ve hassas cihaz kutularında, taşıma ve depolama kaplarında, plastik koli bandı yapımında, şerit ve film imalatında, tel, kablo kaplamasında ve diğer kaplama işlemlerinde, masa, sandalye gibi bahçe mobilyalarında ve çeşitli el aletlerinde, mutfak, banyo ve elektrikli ev eşya ve aletlerinde, örneğin elektrik süpürgesi, çamaşır ve bulaşık makinası parçalarında, deterjan çekmeceleri, çamaşır makinası tankı ve su pompası gövdelerinde, pencere ve kapı kollarında, ütü ve su ısıtıcısı gövdelerinde, filtre imalatında, optik ve elektrik malzemelerinde, elektrik düğme ve prizlerinde, ayakkabı topuğu, tarak, menteşe yuvası ve oyuncak yapımında, hastane ve

laboratuarda kullanılan malzemelerde ve tıbbi ekipmanlarda, örneğin steril sağlık gereçlerinde, 120 ^{o}C sıcaklıkta ve basınç altında sterilize edilerek tıbbi uygulamalarda kullanılan tüp ve enjektör yapımında, ilaç ambalaj sanayinde, teyp ve video kasetlerinde, televizyon kasasında, ekstrüzyon ürünü çeşitli profillerin üretiminde, örneğin plastik boru, levha üretiminde, tüfek ve tabanca kabzasında, otomobil endüstrisinde çeşitli parçalarda ve konteynır imalatında, örneğin tampon, direksiyon, tavan, ön konsol, gösterge tablosu, güneş siperliği, benzin deposu, radyatör fanı, motor davlumbazı ve pervanesi, akü kutuları, araç iç dekorasyonlarında vb.'nin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Monasse ve Haudin 1995, Ezdeşir ve diğ. 1999, Savaşçı ve diğ. 2002, Kaya 2005, Saçak 2005, Yıldırım 2007).

3.2. Kullanılan Kaynak Takımı

Kaynak noktalarının oluşturulmasında kullanılan takım için markası Asil Çelik, türü ıslah çeliği olan 4140 çelik malzeme temin edilmiştir. Takım malzemesinin % alaşım elemanları oranı; Cr: 0.90-1.20, Mn: 0.50-0.80, C: 0.38-0.45, Si: 0.15-0.40, Mo: 0.15-0.30, P<0.035, S<0.035'dir. Kaynak takımının imalinde kullanılmış olan 4140 takım malzemesi genellikle, otomobil, inşaat ve ziraat makinaları, takım tezgahları, uçak parçaları, akslar, krank kolları, krank milleri, dişliler, civatalar, somunlar, saplamalar vb. parçaların yapımında kullanılmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında kullanılan takımlar göz önüne alınarak (Feng ve diğ. 2004, Speller 2002, Lathabai ve diğ. 2006, Santella ve diğ. 2005, Awang ve diğ. 2005, Feng ve diğ. 2005, Gerlich ve diğ. 2005a, KHI Ltd. 2006, Gerlich ve diğ. 2005b, Nelson ve diğ. 2004), bu takımlara ait ölçüler arasındaki oranlar tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak takımın ölçüleri belirlenirken Tablo 3.1 dikkate alınmıştır.

Tablo 3.1: Literatürde kullanılan SKNK takımlarına ait oranlar

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

En çok kullanılan ve tercih edilen oranlar göz önünde bulundurularak uygun kaynak takımı geometrisi tasarlanmış ve oluşturulacak SKNK bağlantılarında kullanılacak takımın boyutları ve de ilgili oranları belirlenmiştir. Tablo 3.2'de bu boyutlar ve oranlar verilmiştir.

Tablo 3.2: Tasarlanan kaynak takımının boyutları ve ilgili oranları

Omuz Çapı	20 mm
Takım Ucu Çapı (Pim Çapı)	M7 (7 mm)
Uç Uzunluğu (Pim Uzunluğu)	4,25 mm
Omuz İçi Eğimi	6º
Omuz Çapı / Uç Çapı	2,86
Uç Çapı / Uç Uzunluğu	1,65

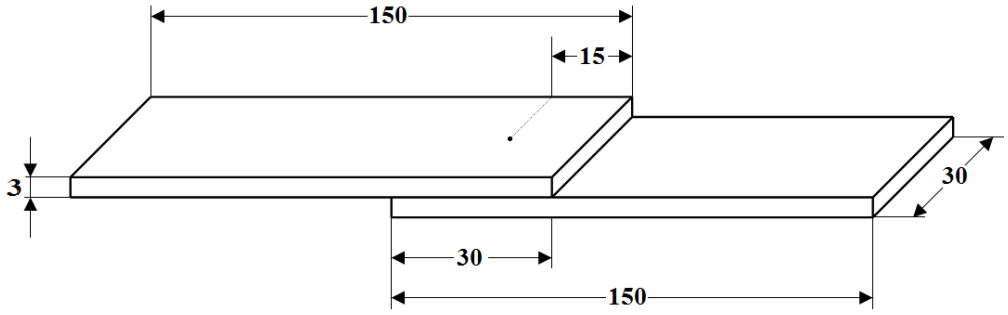
Bu oranlara bağlı kalarak yapılacak deneylerde kullanılacak uygun kaynak takımının teknik resmi çizilip, 4140 çelik malzemeden, torna tezgahında işlenerek imal edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, kaynak noktalarının oluşturulmasında kullanılan bu kaynak takımının fotoğrafları Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan SKNK takımı

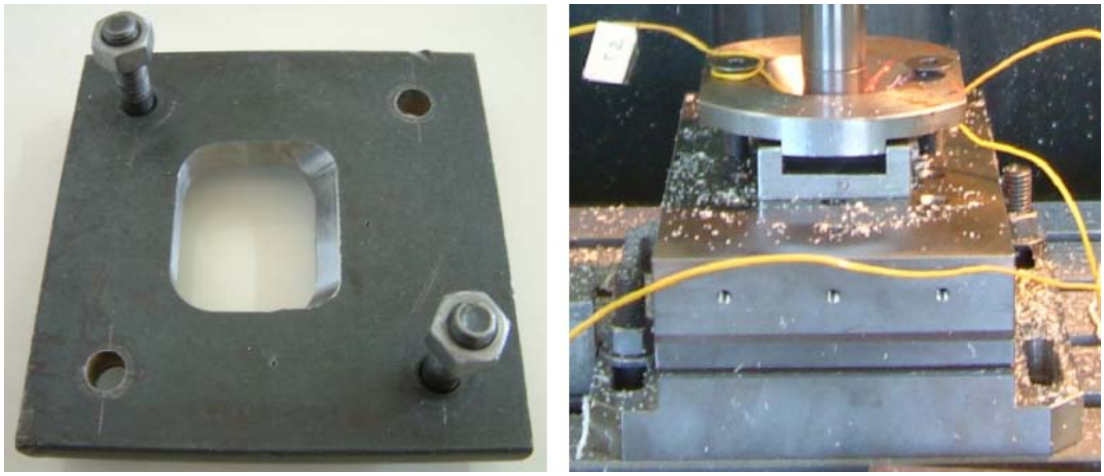
3.3. Kaynağın Uygulanışı

SKNK yöntemi ile oluşturulan kaynak bağlantıları bindirme şeklinde olduğundan, birleştirilen parçalara mekanik testlerden çekme deneyi uygulanmıştır. Bu nedenle de yapılan deneysel çalışmada PP levhadan (3x30x150) mm boyutlarında numuneler TS EN 12814-2 standardına uygun geometride, şerit testere tezgahında kesilerek çıkarılmıştır. Şekil 3.2'de boyutları verilen iki adet parçayı, bindirme kaynağı olacak şekilde üniversal dik freze tezgahının tablasına bağlamak için bağlama aparatları (baskı plakaları) tasarlanmıştır.



Şekil 3.2: Tek nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip1)

Üst taraftan kaynağı gerçekleştirmek ve görsel olarak kontrol etmek için tasarlanan bu baskı plakaları, freze ve matkap tezgahlarında işlenerek imal edilmiştir. Çalışmadaki SKNK uygulamalarında kullanılan bağlama aparatlarının fotoğrafları Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3: SKNK'nda kullanılan bağlama aparatları

Yapılan ilk çalışmalarda kullanılan bağlantı şekli tip1 olarak adlandırılmıştır. Parçaların bindirme mesafesi 30 mm'dir. Bindirme bağlantısı konumundaki parçaların, 30x30 bindirme bölgesinin merkezine omuz çapı 20 mm, pim çapı 7 mm ve pim uzunluğu 4,25 mm olarak imal edilmiş kaynak takımı ile yöntemin daldırma, karıştırma ve geri çekilme aşamaları sırasıyla uygulanmıştır. Takım numunelere, belirlenen dalma hızında otomatik olarak daldırılmış ve istenilen dalma derinliğine ulaşılınca belirlenen bekleme (karıştırma) süresinden sonra geri çekilmesi yine aynı hız ile otomatik olarak ve kaynak takımı dönerek gerçekleştirilmiş ve parçalardan

uzaklaştırılmıştır. Bu noktada parça hemen sökülmemiş, soğuması için beklenmiştir. Takım ucuna yapışan malzemenin henüz katılaşmadan kaynak işleminden hemen sonra çıkarılmasına, bu işlem sırasında takıma zarar verilmemesine ve bir sonraki kaynak noktasının en uygun şekilde oluşturulması için kaynak takımının hazır hale getirilmesine özen gösterilmiştir. Böylece üniversal dik freze tezgahı kullanılmak suretiyle planlanan program çerçevesinde kaynaklı bağlantılar oluşturulmuştur.

3.4. Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında farklı bekleme süresi, farklı devir sayısı ve de farklı dalma derinliği parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.4.1. Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelenmesi

Yapılan ön çalışmaların ışığında seçilen 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d olmak üzere üç farklı takım devri için ve 0-200 saniye aralığında değişen bekleme sürelerinde kaynaklar yapılmıştır. Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler Tablo 3.3'te verilmiştir. Bu kaynakların yapılmasında, kaynak takım ucunun üst parçaya temasından sonra aşağıya doğru hareket mesafesi olan dalma derinliği, yapılan ön çalışmaların ışığında 5,5 mm olarak sabit alınmıştır. Bu değere ulaşılıncaya kadar daldırma işlemi (tezgahın tablasının yukarı doğru yani dönen takıma doğru hareketi) devam ettirilmiştir. Bu işlemler sırasında kaynak takımının dalma hızı da yine ön çalışmaların ışığında ve kontrol edilebilecek yüksek bir hızda olmasına özen gösterilerek 100 mm/dak olarak seçilmiştir ve sabittir (Arıcı ve Mert 2007, Arıcı ve Mert 2008). Her bir deney en az üç kere tekrarlanmıştır. Bekleme süresi ve devir sayısı ise çalışmanın bu aşamasında esas olarak incelenen kaynak parametreleridir. Buradan yola çıkarak ortaya çıkan kopma şekilleri ve çekme kuvvetini maksimum yapan, optimum bekleme süresi ve devir sayısı değerleri tespit edilmiştir.

Tablo 3.3: Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği numuneler

Bekleme Süresi (sn)	Devir Sayısı (d/d)	Dalma Derinliği (mm)	Dalma Hızı (mm/dak)
0	800	5,50	100
25	800	5,50	100
50	800	5,50	100
75	800	5,50	100
100	800	5,50	100
125	800	5,50	100
150	800	5,50	100
200	800	5,50	100
0	1250	5,50	100
25	1250	5,50	100
50	1250	5,50	100
75	1250	5,50	100
100	1250	5,50	100
125	1250	5,50	100
150	1250	5,50	100
200	1250	5,50	100
0	2000	5,50	100
25	2000	5,50	100
50	2000	5,50	100
75	2000	5,50	100
100	2000	5,50	100
125	2000	5,50	100
150	2000	5,50	100
200	2000	5,50	100

3.4.2. Dalma derinliği parametresinin incelenmesi

Bekleme süresinin çekme kuvvetine etkisi 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d için, 0-200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için incelenmiş ve 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi için en yüksek çekme kuvveti değeri elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisini incelemek için, elde edilen bu optimum değerler kullanılarak çalışılmıştır. Dalma derinliğinin etkisi ise, 4,25-5,85 mm aralığında değişen farklı dalma derinlikleri için tekrarlanan kaynaklarla ayrıca incelenmiştir (Tablo 3.4). Belirlenen dalma derinliği aralığı, küçük artışlar ile taranmıştır. Takım ucu uzunluğu 4,25 mm olduğunda, takım omzunun 0-1,6 mm aralığında değişen değerlerde malzeme içine daldırılması ile ulaşılan derinlik, toplam malzeme kalınlığının %70,8 ile %97,5'i aralığında değişen oranlarına karşılık gelmektedir. Takımın 0,15 mm

daha parçalara daldırılması, takım ucunun alt parçadan dışarı çıkmasına neden olacağından, takım ucu ya tezgah tablasına ya da alta konulan altlığa sürtünecektir. Bu durumu engellemek için, otomatik dalma ile kontrol edilebilecek en fazla dalma derinliğine kadar inilmiştir (toplam parça kalınlığı 6 mm olup, 5,85 mm dalma derinliğine kadar inilmiştir). Buradan yola çıkarak ortaya çıkan kopma şekilleri ve çekme kuvvetini maksimum yapan, optimum dalma derinliği değeri tespit edilmiştir.

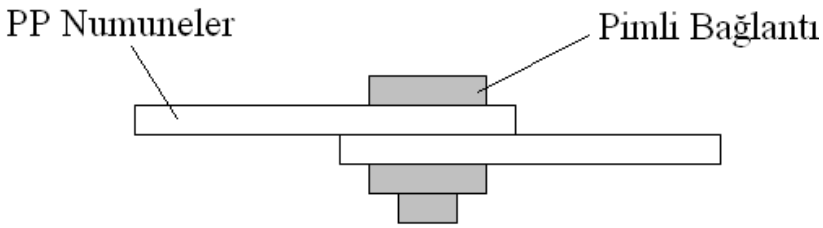
Tablo 3.4: Dalma derinliği parametresinin incelendiği numuneler

Bekleme Süresi (sn)	**Devir Sayısı (d/d)**	**Dalma Derinliği (mm)**	**Dalma Hızı (mm/dak)**
150	1250	4,25	100
150	1250	4,35	100
150	1250	4,45	100
150	1250	4,55	100
150	1250	4,65	100
150	1250	4,70	100
150	1250	4,75	100
150	1250	4,85	100
150	1250	4,90	100
150	1250	4,95	100
150	1250	5,00	100
150	1250	5,10	100
150	1250	5,15	100
150	1250	5,20	100
150	1250	5,25	100
150	1250	5,30	100
150	1250	5,35	100
150	1250	5,40	100
150	1250	5,50	100
150	1250	5,60	100
150	1250	5,70	100
150	1250	5,80	100
150	1250	5,85	100

3.5. Pimli Bağlantı İle Karşılaştırma

Yapılan deneysel çalışmada PP levhadan (3x30x150) mm boyutlarında, şerit testere tezgahında kesilerek numuneler çıkarılmıştır. Şekil 3.2'deki tip1 bindirme bağlantısı konumunda ve boyutlarındaki parçaların 30x30 bindirme bölgesinin merkezine matkap tezgahında, kaynak takımı uç çapı değeri olan 7 mm çapında delik açılmıştır. Bağlantı bölgesine uygulanan yükün PP numunelere iletilmesi için, açılan delik çapındaki bir çelik pimle boşluksuz bir pimli bağlantı sağlanmıştır. Şekil 3.4'te PP

numunelerin pimli bağlantısı görülmektedir. Böylece test edilen numuneye uygulanan çekme yükü pim vasıtasıyla PP numuneye iletilmektedir. Uygulanan yük, numune ekseni ve doğrultusu ile paraleldir. Pim dayanımı, PP numunelerin dayanımından çok daha fazladır. Bu nedenle pimde hasar oluşmamıştır. Burada esas incelenen, PP numuneler ile oluşturulan pimli bağlantıda meydana gelen hasar mekanizması ve elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeridir. Böylece pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvveti değeri ile kaynaklı bağlantılar için farklı parametrelerin incelenmesi sonucu elde edilen çekme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4: PP numunelerin pimli bağlantısı

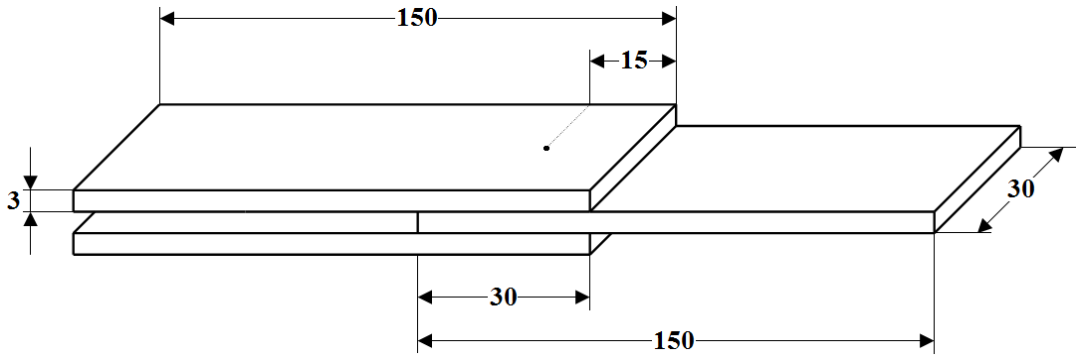
3.6. Geliştirme Amaçlı Farklı Bindirme Bağlantısı Tasarımlarına Uygulanan SKNK ve Yapıştırma Yöntemi

Çalışmanın bu aşamasında geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları (bindirme bağlantısı tasarımları) incelenmiştir. Kolaylık olması ve de bağlantı şekillerini sınıflandırma açısından Şekil 3.2'deki bağlantı şekli tip1 olarak, Şekil 3.5'teki bağlantı şekli tip2 olarak ve Şekil 3.6'daki bağlantı şekli ise tip3 olarak adlandırılmıştır. Deney parametreleri Tablo 3.5'te verilmiştir. En yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği bu parametreler, farklı bağlantı tasarımlı SKNK numuneleri ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılar için kullanılmıştır.

Tablo 3.5: Farklı bağlantı tasarımlı SKNK numuneleri ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılar için kullanılan optimum deney parametreleri

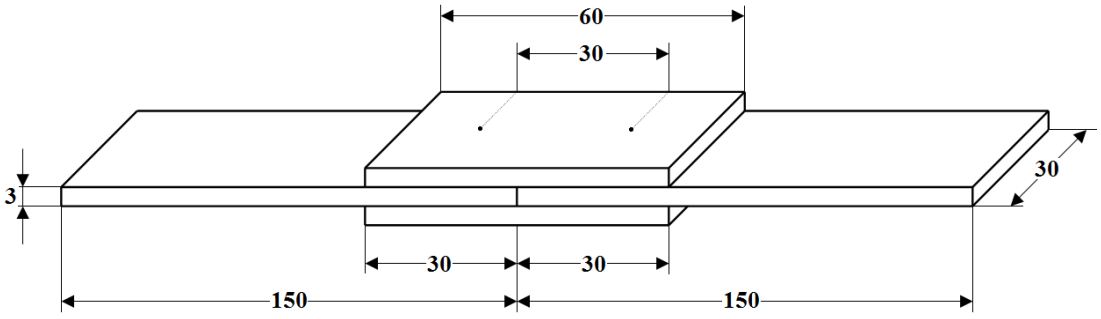
Bekleme Süresi (sn)	Devir Sayısı (d/d)	Dalma Derinliği (mm)	Dalma Hızı (mm/dak)
150	1250	4,65	100

Sadece tek kaynak noktasının oluşturulduğu Şekil 3.2'deki bindirme pozisyonundaki kaynak bağlantısının dışında Şekil 3.5'te verilen üstten ve alttan bir kaynak noktası olmak üzere, aynı düşey eksende karşılıklı olarak çift nokta kaynağı uygulanmıştır.



Şekil 3.5: Çift nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip2)

Şekil 3.6'da ise üstten iki ve alttan iki kaynak noktası olmak üzere, aynı düşey eksende karşılıklı olarak iki çift nokta kaynağı oluşturulmuştur.



Şekil 3.6: Dört nokta kaynağı için bindirme bağlantısı (tip3)

Böylece planlanan program çerçevesinde farklı bağlantı tasarımları için kaynaklı (K), yapıştırıcılı (Y) ve yapıştırıcılı artı kaynaklı (YK) bağlantılar oluşturulmuştur. Farklı bağlantı tasarımları için elde edilen çekme kuvvetleri karşılaştırılarak, bağlantı tasarımlarının hangilerinin birleştirmeye nasıl etkisi olduğu ve hangi bağlantı tasarımı için en iyi sonuçların elde edildiği ortaya konulmuştur.

Henkel firmasının, özellikle plastik ve kauçuk parçaları birbirlerine ve farklı yüzeylere yapıştırmada endüstriyel uygulamalar için geliştirdiği ve yapılan tez

çalışmasında PP levhalar için Henkel firmasının önerdiği LOCTITE® 406™ yapıştırıcı ve yapıştırıcı öncesi kullanılan PRIMER PP33 (Baykal 2008), Henkel firmasından temin edilmiştir.

LOCTITE® 406™ çok hızlı sabitlemenin gerekli olduğu, özellikle plastik ve kauçuk malzemelerin yapıştırılarak birleştirilmesi için tasarlanmıştır. Kimyasal tipi etil siyanoakrilat, görünüşü şeffaf, karıştırmaya gerek duyulmadan uygulanabilen düşük viskoziteli bir yapıştırıcıdır. En iyi performans için, yapıştırılacak yüzeyler yağdan arındırılmalı ve temizlenmelidir. Yapıştırıcının viskozitesi düşük olduğundan 0,05 mm'lik dar bağlantı boşluklarına bile sızarak en iyi performansı sağlar. Fazlalık yapışkan, aseton veya nitrometan loctite temizleyici çözücüler ile çözülebilir (Baykal 2008, Henkel 2008a).

PRIMER PP33 ise yapıştırma işlemi öncesi, polipropilen veya polietilen malzemelerin yüzeylerinin hazırlanmasında tavsiye edilmiştir. Bu ürün polipropilen veya polietilen gibi plastiklerin yapıştırılmasında sağlamlaştırıcı ve yapıştırıcı dayanımını artırıcıdır. Primerin görünüşü şeffaftır ve fırça yada daldırma yoluyla uygulanabilir. Yapıştırılacak yüzeylere primer uygulandıktan sonra içindeki çözücünün uçması (buharlaşması) için, oda sıcaklığında yaklaşık 10-15 dakika beklenmelidir. Bu beklemenin ardından 8 saat içinde yapıştırıcı ince bir tabaka şeklinde uygulanabilir (Baykal 2008, Henkel 2008b).

LOCTITE 406 yapıştırıcı ve PRIMER PP33'ün birlikte uygulanışında öncelikle yapıştırılacak yüzeye primer uygulanır. Primerin içindeki solventin (çözücünün) uçması için yaklaşık 10-15 dakika beklenmelidir. Bundan sonraki 8 saat içinde yapıştırıcı ince bir tabaka şeklinde sürülmelidir. Yapıştırıcının viskozitesi düşük olduğundan oldukça akıcıdır ve yüzeye iyi bir şekilde yayılır. Boşluk var ise buralara çok iyi nüfuz eder. Parçalar yapıştırılmak için üst üste konulunca üst parça üzerinden el ile yaklaşık 10 sn bastırılabilir ya da 10 saniye boyunca 2-3 kg'lık bir ağırlık konulabilir. Bundan sonra da kür olması yani bağların oluşması, yapıştırıcının tamamen kuruması ve yapıştırma çevriminin tamamlanması için en az 24 saat beklenir. 24 saat sonrasında ise birleştirilen parçalara çekme deneyi uygulanabilir (Baykal 2008, Henkel 2008a, Henkel 2008b).

3.7. Yapılan Testler ve Kontroller

Çalışmanın bu kısmında farklı parametrelerde (farklı bekleme süresi, farklı devir sayısı ve farklı dalma derinliği parametreleri) gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların yanında, pimli bağlantı ve de geliştirme amaçlı yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı olmak üzere farklı bindirme bağlantısı tasarımlarına (tip1, tip2 ve tip3) uygulanan çeşitli test ve kontroller detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.7.1. Deney numunelerine uygulanan mekanik test (çekme deneyi)

Birleştirmenin yeterli dayanıma sahip olup olmadığı mekanik testlerden çekme deneyi ile belirlenmiştir. Kocaeli Üniversitesi'ndeki PLASMAM Laboratuarı'nda bulunan Şekil 3.7'deki, yükleme kapasitesi 5 kN olan Instron 4411 üniversal elektromekanik test cihazı kullanılarak, kaynaklı parçaların TS EN 12814-2 standardına uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme test hızı 20 mm/dak ve çeneler arası mesafe 180 mm olarak ilgili standarda göre belirlenmiştir. Şekil 3.2'deki tip1 bağlantı tasarımında, Şekil 3.4'teki pimli bağlantıda, Şekil 3.5'teki tip2 ve Şekil 3.6'daki tip3 bağlantı tasarımlarında bindirme numuneleri çekme cihazının çenelerine bağlanırken, parçaların ekseni ile çenelerin ekseninin çakışması için, gerektiğinde levhalarla aynı kalınlığa sahip parçalar kullanılarak çekme çenelerine sıkıştırılması sağlanmıştır.



Şekil 3.7: Instron 4411 üniversal elektromekanik test cihazı

Elde edilen çekme kuvvetleri karşılaştırılarak, parametrelerin hangisi veya hangilerinin ve de hangi bağlantı tasarımının birleştirmeye nasıl etkisi olduğu ve hangi değerler için en yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği ortaya konulmuştur.

3.7.2. Deney numunelerine uygulanan tahribatsız malzeme muayenesi (radyografik malzeme muayenesi)

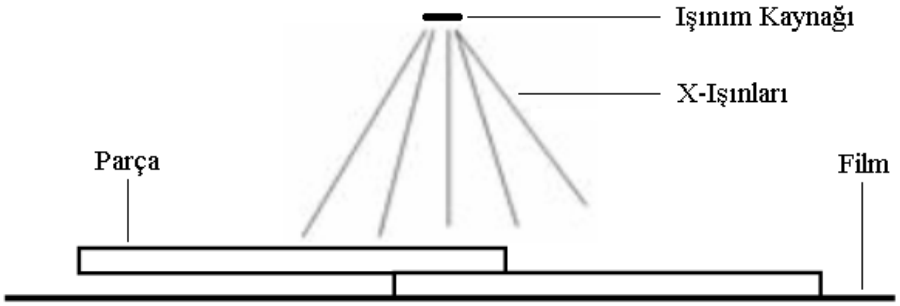
Farklı parametrelerde oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara tahribatsız malzeme muayenesi (radyografik malzeme muayenesi) uygulanmıştır. SKNK yöntemi ile farklı parametreler için yapılan kaynaklı birleştirmelerde tahribatsız malzeme muayenesi ile kaynak bölgesinin kontrol edilmesi ve herhangi bir kaynak hatasının olup olmadığının belirlenmesi, kaynaklı bölge hakkında elde edilen çekme deneyleri öncesi bilgilerle, yapılan çekme deneyleri sonrası elde edilen kaynağa ait çekme kuvveti bilgilerinin karşılaştırılması yapılarak parametrelerin etkisi vurgulanmıştır. Bu nedenle belirlenen parametrelerde, 12 adet numuneye kaynak noktaları oluşturulmuş ve O.D.T.Ü.'de tahribatsız malzeme muayenesi uygulanmıştır. Tahribatsız malzeme muayenesi deneyleri için belirlenen numuneler Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Tahribatsız malzeme muayenesi deneyleri için numuneler

Numune No	Bekleme Süresi (sn)	Devir Sayısı (d/d)	Dalma Derinliği (mm)	Dalma Hızı (mm/dak)
1	150	1250	4,25	100
2	150	1250	4,65	100
3	150	1250	5,00	100
4	150	1250	5,80	100
5	0	1250	5,50	100
6	25	1250	5,50	100
7	50	1250	5,50	100
8	75	1250	5,50	100
9	100	1250	5,50	100
10	125	1250	5,50	100
11	150	1250	5,50	100
12	200	1250	5,50	100

O.D.T.Ü.'de yapılan radyografik muayenenin (tahribatsız malzeme muayenesinin) şematik gösterimi Şekil 3.8'de görülmektedir. Tahribatsız malzeme muayenesi

sırasında kullanılan çekim parametrelerinin detayları ise Tablo 3.7'de verilmiştir (Sonat 2008).



Şekil 3.8: Tahribatsız malzeme muayenesinin şematik gösterimi (Sonat 2008).

Tablo 3.7: Tahribatsız malzeme muayenesi sırasında kullanılan çekim parametreleri (Sonat 2008).

Çekim Parametreleri	
Kullanılan Işınım Kaynağı	X Işını (ERESCO 150 KV X-Işını Tüpü)
Işınlama Enerjisi	30 KV
Işınlama Süresi	30 sn
Kullanılan Film	AGFA D5
Film Yoğunluğu	2.0
Film-Işınım Kaynağı Mesafesi	590 mm

3.7.3. Deney numunelerine uygulanan makroskobik ve mikroskobik incelemeler

Gerek kaynak sonrasında ortaya çıkan yüzey görünümü gerekse çekme testleri sonrasındaki kopma bölgeleri makroskobik ve mikroskobik olarak (göz, makro fotoğraf, optik mikroskop ve SEM) incelenmiştir. Gözle yapılan kontrollerde, SKNK uygulanmış fakat herhangi bir test uygulanmamış numunelerin, söz konusu kaynaklı birleştirme bölgesi incelenerek çapak, çatlak vb. unsurların varlığı, kaynak noktasının oluşumu ve fiziki şekli görsel olarak ortaya konulmuştur.

Çekme deneyi sonrasında oluşan kopma kesitlerinde, kaynak bölgesinin özelliklerinin belirlenerek makro ve mikroyapısının ortaya konulması için ve de elde edilen özelliklerle kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi saptamak üzere, bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliği parametrelerinin incelendiği Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'teki tüm numunelere SEM (SEM: Scanning Electron Microscope) ve optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı parçalarda meydana gelen

hasarın sünek veya gevrek özellik gösterip göstermediği, çatlak ilerleme mekanizmasının nasıl gerçekleştiği bu incelemeler ile açıkça ortaya konulmuştur. Tercih edilen sünek hasar mekanizmasının kaynak parametrelerinin hangi değerleri için gerçekleştiği tespit edilmiştir.

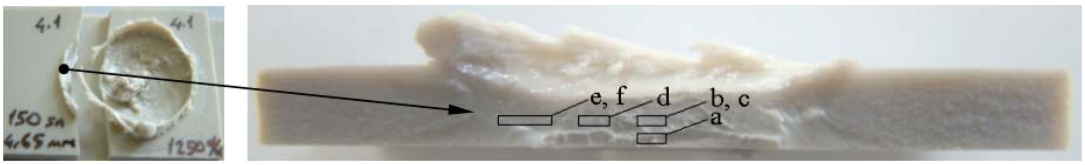
Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kopma bölgelerinin direkt numunelerin kendisinin incelenmesi ve de kopma şekillerine ait çekilen fotoğrafların incelenmesi ile belirlenen üç farklı şekli, bekleme süresinin değişimi ile tüm takım devir sayılarında görülmüştür. Aynı kopma şekilleri dalma derinliğinin artması ile farklı dalma derinlikleri içinde gözlemlenmiştir. Optik mikroskop ve SEM incelemelerinde kolaylık olması ve de kopma türlerini sınıflandırma açısından ilk kopma şekli olan pim esaslı kopma mod 1 olarak, ikinci kopma şekli olan omuz esaslı kopma mod 2 olarak ve üçüncü kopma şekli olan ara yüzey esaslı kopma ise mod 3 olarak adlandırılmıştır.

Uzamaların gözle bile rahatlıkla görüldüğü mod 1 ve mod 2 tipi kırılmaların incelenmesi için TÜBİTAK MAM (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi) Laboratuarı'nda bulunan LEICA S6D optik mikroskop ile görüntüler alınmıştır (Şekil 3.9). Dördüncü bölümde verilmiş olan tablolarda her bir mod 1 ve mod 2 kırılması için, kırılma bölgesini en iyi şekilde gösterebilecek "a", "b" ve "c" olmak üzere 3 optik mikroskop fotoğrafı konulmuştur. Büyütme oranları ise çekilen fotoğrafların altında verilmiştir.



Şekil 3.9: LEICA S6D optik mikroskop

Uzamaların rahatlıkla görülemediği mod 3 tipi kırılmaların incelenmesi için ise Sakarya Üniversitesi'nde SEM ile görüntü alınmıştır. Bütün mod 3 kırılmalarının SEM fotoğrafları için dördüncü bölümde verilmiş olan tablolarda *"a"*, *"b"*, *"c"*, *"d"*, *"e"* ve *"f"*, farklı her bir parça için kırılma yüzeyinde aynı yeri ve aynı büyütmeleri göstermektedir. Bu büyütme oranları *"a"* için 200, *"b"* için 18, *"c"* için 200, *"d"* için 200, *"e"* için 18 ve *"f"* için 50'dir (Şekil 3.10). Optik mikroskop ve SEM görüntülerinin verildiği tablolardaki çekme kuvveti değerleri, en az 3 kere tekrarlanan deneylerden elde edilen çekme kuvveti değerlerinin aritmetik ortalaması değil, optik mikroskop veya SEM fotoğrafı çekilen numuneye ait çekme kuvveti değeridir.



Şekil 3.10: SEM fotoğraflarının tamamında ilgili bölgelerden *a*: X200, *b*: X18, *c*: X200, *d*: X200, *e*: X18 ve *f*: X50 büyütme ile çekilmiştir.

SEM incelemesi öncesinde, numunelerin incelenmek istenen yüzeyi üzerine plazma ile vakum altında püskürtülerek, altın kaplama işlemi yapılmıştır. Altın kaplamada kullanılan karışımın bileşimi %80 altın, %20 paladyumdur. Bu işlemin yapılmasının sebebi, incelenmek istenen ve iletken olmayan plastik malzemenin yüzeyini iletken hale getirmek ve yüzeyi daha iyi görmektir. SEM incelemesi için SEM JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskop kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: SEM JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskop

Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları (tip1, tip2 ve tip3) için oluşturulan numunelerin, çekme deneyi sonrasında ortaya çıkan kopma bölgeleri optik mikroskop ile incelenmiştir.

Farklı bağlantı tasarımları ile birleştirilen çekme deneyi numunelerinin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyleri, Kocaeli Teknopark'daki İleri Malzeme Teknolojileri Laboratuarı'nda bulunan ve görüntüyü bilgisayar ekranına yansıtan, LEICA DFC290 HD mercek özelliğine sahip LEICA S8AP0 optik mikroskop ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 3.12). Kopma bölgesini en iyi şekilde gösterebilecek üçer tane optik mikroskop fotoğrafı verilmiştir. Büyütme oranları ise çekilen fotoğrafların yanlarında belirtilmiştir. Böylece optimum parametreler kullanılarak farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı numunelere de optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 3.12: LEICA S8AP0 optik mikroskop

3.7.4. Deney numunelerine uygulanan termal analiz (DSC)

Farklı parametrelerde oluşturulan SKNK bağlantılarından ve esas malzemelerden alınan numunelere termal analiz yöntemlerinden DSC analizi uygulanmıştır. Diferansiyel tarama kalorimetri (DSC) yönteminde enerji farkının ölçülmesi esastır. Zamanımızda DSC, termal yöntemler arasında en çok kullanılanıdır. Yöntemde, numune ve referans maddesine aynı sıcaklık programı uygulanırken, numunede bir değişiklik olması halinde, numune veya referansa bir elektrik devresi yardımı ile dışarıdan ısı eklenerek her ikisinin de aynı sıcaklıkta kalması sağlanır. DSC eğrileri,

eklenen ısının sıcaklığa karşı çizilen grafikleridir. Pikin altında kalan alan, tepkimede alınan veya açığa çıkan ısı ile, pik yükseklikleri de tepkime hızı ile doğrudan orantılıdır. Entalpi (ΔH) pozitif ise (endotermik tepkime), numune ısıtıcısına ısı eklenir ve pozitif bir sinyal elde edilirΔH negatif ise, referans ısıtıcısına ısı ek lenir ve negatif bir sinyal elde edilir. Bu piklerin integrali numunenin aldığı veya verdiği ısı miktarına eşittir (Gündüz 2002, Yıldız ve diğ. 1997).

Yöntemde, analiz edilecek numune miktarı 1-100 mg arasında değişir. Isıtıcılar numune ve referans hücrelerine mümkün olduğu kadar yakın konmuştur. Isı alış verişi olmaması için, numune ve referans bölmelerinin bir birinden çok iyi izole edilmiş olmaları gerekir. Bu nedenle numune ve referans maddesi, birbirlerinden yalıtılmış ayrı kaplara yerleştirilir. Isıtma hızı, dakikada 0,5 - 80 ^{o}C aralığında seçilebilir. Cihazlar çok küçük olan ısı alışını veya verişini algılayacak kadar hassastır. Elektrik sinyalleri şiddetlendirilip kaydedilir. Kapalı numune kaplarının kullanılması, atmosferden gelebilecek olumsuzlukları bertaraf eder. Sıcaklıklar genel olarak platin direnç termometresiyle ölçülür. Termoçift bir sıcaklık farkı gösterdiğinde, soğuk olan tarafa sıcaklık eşitleninceye kadar ısı eklenir. Sıcaklıkları eşit tutabilmek için uygulanan ısıtma hızı, numune sıcaklığının fonksiyonu olarak kaydedilir (Gündüz 2002, Yıldız ve diğ. 1997, DSC 2009).

Endotermik reaksiyonlarda numunenin düşen sıcaklığını ısı vererek tekrar yükseltmek numunenin lineer olarak ısıtılmasına mani olmaz. Ancak, numunede ekzotermik reaksiyon meydana geldiği zaman durum farklı olur. Çünkü, bu durumda ikisinin sıcaklığını dengelemek için referansın ısıtılması gerekir. Bu da numunenin lineer olarak ısıtılması prensibini bozar. Ekzotermik bir reaksiyon olduğu zaman cihazda bulunan ortalama sıcaklık devresi otomatik olarak ısıtma hızını düşürür. Bunun sonucu hem numunenin, hem de referansın sıcaklığı eşit olarak düşer. Sıcaklık düşme hızı, numune kısmında ekzotermik reaksiyonun verdiği ısıyla karşılanırken, referans kısmında diferansiyel ısıtıcı, ortalama sıcaklık devresinde aldığı ısıyla eşitliğe ulaşır ve böylece lineer ısıtma sağlanmış olur (Gündüz 2002).

DSC yönteminin en önemli uygulamalarından biri, polimerik maddelerin incelenmesi ve karakterizasyonudur. Yöntem sayesinde bir polimerin ısıtılması sırasında

karşılaşılabilecek çeşitli geçişleri gösteren şematik termogramlar elde edilir. Örneğin bu sayede polimerin erime noktası ve kristallenme aralığı tespit edilebilir. Uygun ısıtma hızı seçilir ise (düşük ısıtma hızında), camsı geçiş sıcaklığı tespit edilebilir. Ayrıca eğrinin altında kalan alan, kristallenme derecesini hesaplama da kullanılabilir. Aynı deney farklı sıcaklıklarda da yapılarak tam kristallenmenin hangi sıcaklıkta ne kadar sürede meydana geleceği tespit edilebilir. Maddelerin saflıkları yükseldikçe erime noktaları yükselir ve erime için birim kütle başına saniyede verilmesi gereken enerji de artar. Bu bilgi doğrultusunda yöntemden, farmasötik kimya endüstrisinde kullanılan maddelerin ve ilaç örneklerinin saflığının araştırılmasında da faydalanılmaktadır (Gündüz 2002, Yıldız ve diğ. 1997, DSC 2009, Catalog2 2009).

DSC analizlerinde, Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuarı'nda bulunan Şekil 3.13'te görülen METTLER TOLEDO DSC 1 cihazı kullanılmıştır. Cihazın yazılımı STAR^{e} System'dir (Catalog2 2009). DSC analizi için ısıtma hızı 10 ^{o}C/dak olarak seçilmiştir. Her bir numune için 25-220 ^{o}C sıcaklık aralığı ve 0-20 dak zaman aralığında DSC analizi yapılmıştır. Kullanılan DSC cihazına ait yazılımın eşzamanlı olarak çizdirmiş olduğu eğrilerde, x ekseni ^{o}C olarak sıcaklıktaki ve dak. olarak zamandaki değişimi, y ekseni ise miliwatt (mW) olarak ısıtıcıdan çekilen gücü, diğer bir deyişle birim zamanda ısıtıcıdan çekilen enerjiyi (ısıyı) göstermektedir.



Şekil 3.13: METTLER TOLEDO DSC 1 cihazı (Catalog2 2009).

Oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantıların, kaynak bölgesinden ve esas malzemeden olmak üzere alınan numunelere kaynak bölgesinin özelliklerinin belirlenmesi için ve de elde edilen özelliklerle kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi saptamak üzere DSC analizi yapılmıştır. Böylece DSC analiz yöntemi ile kaynak yönteminin uygulanması sırasında oluşan sürtünme ısısı ve kaynaşma nedeniyle plastik malzemelerin özelliklerini belirleyen moleküler yapıdaki değişimler gözlenebilmiş ve dolayısıyla kaynak parametrelerinin etkisi açıklanabilmiştir. Farklı parametrelerde, belirlenen 12 adet kaynak bölgesine ve 12 adet esas malzemeye DSC analizi yapılmıştır. Kullanılan numuneler tahribatsız malzeme muayenesi için oluşturulan ve Tablo 3.6'da verilen numuneler ile aynı parametrelere sahiptir ve DSC analizleri için tekrar oluşturulmuştur. Testere ile kaynak bölgesine küçük bir çentik açılmıştır. Sonrasında da sıvı azota daldırılarak kaynak bölgesinden kırılmış ve numune çıkarılmıştır. Bu numuneler T1'den T12'ye kadar numaralandırılmıştır. Dördüncü bölümde sonuçlar verilirken ilgili tabloda T1-T4 arası numuneler 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 4,25-5,80 mm aralığında değişen farklı dalma derinliklerinde oluşturulan numunelerdir. T5-T12 arası numuneler ise 1250 d/d devir sayısı, 5,5 mm dalma derinliği ve 0-200 sn aralığında değişen farklı bekleme sürelerinde oluşturulan numunelerdir.

3.7.5. Farklı parametrelerde oluşturulan SKNK numuneleri için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değerlerinin ölçülmesi

Çalışmanın bu aşamasında, dinamometre üzerine uygun bağlama aparatı ile sabitlenen kaynak numunelerine takımın teması ve ilerlemesi sonucu oluşan, eksenel kuvvetin zamanla değişimi ve parçalarda meydana gelen sıcaklığın, bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği, dalma hızı parametreleri ile ve de eksenel kuvvet ile ilişkisi incelenmiştir. Üniversal dik freze tezgahı kullanılarak, numunelere planlanan program çerçevesinde kaynaklı bağlantılar oluşturulurken, dört kanallı termometre ile de oluşturulacak kaynak noktasına en yakın bölgelere açılan deliklere termokupullar yerleştirilmiş ve kaynak işlemi sırasında sıcaklığın değişimi incelenmiştir. Ayrıca takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden hassas infrared termometre ile kaynak noktasının merkezinin sıcaklığı ölçülmüştür. Böylece alınan sıcaklık ölçümleri sayesinde kaynak için uygun sıcaklık değerlerinin

de elde edilip edilemediği belirlenmiştir. Ayrıca kaynak işlemi sırasında ilgili bölgelerde ortaya çıkan sıcaklığın ölçülmesi, hem çekme deneyi sonuçlarının hem de kaynak bölgesi yapı özelliklerinin açıklanması için yardımcı olacak veri eldesi sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında ilgili kaynak parametreleri yeniden değerlendirilerek kaynak bağlantısı için en uygun parametre değerleri saptanmıştır.

Tablo 3.8: Eksenel kuvvet ve sıcaklık ölçümlerinin alındığı numuneler

Bekleme Süresi (sn)	**Devir Sayısı (d/d)**	**Dalma Derinliği (mm)**	**Dalma Hızı (mm/dak)**
25	800	5,50	100
150	800	5,50	100
200	800	5,50	100
0	1250	5,50	100
25	1250	5,50	100
50	1250	5,50	100
75	1250	5,50	100
100	1250	5,50	100
125	1250	5,50	100
150	1250	5,50	100
200	1250	5,50	100
0	2000	5,50	100
25	2000	5,50	100
150	2000	5,50	100
150	1250	4,25	100
150	1250	4,65	100
150	1250	5,00	100
150	1250	5,80	100
150	1250	5,50	12,5
150	1250	5,50	25
150	1250	5,50	50
150	1250	5,50	100

Eksenel kuvvet ve sıcaklık ölçümlerinin alındığı numuneler Tablo 3.8'de verilmiştir. Eksenel kuvvet ölçümleri için üç kanallı Kistler 9257B tipi dinamometre ve dataların alınması için 5070A tipi bir amplifikatör, sıcaklık ölçümleri için ise TM-946 Lutron dört kanallı termometreden ve K tipi termokupullardan (direkt temaslı sıcaklık proplarından) faydalanılmıştır. Online kayıt almak için gerekli olan SW-U801/WIN Lutron Software+UPCB-02/Win yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca uzaktan sıcaklık ölçümü için Fluke 574CF tipi hassas infrared termometreden faydalanılmıştır. Şekil

3.14a'da SKNK sırasında kullanılan üniversal dik freze tezgahı, takım, bağlama aparatı, dinamometre, dört kanallı termometre ve bu termometreye bağlı termokupullar ile hassas infrared termometrenin birlikte kullanılışı, Şekil 3.14b'de bindirme bağlantısı ve termokupul delikleri, Şekil 3.14c'de ise soldan sağa doğru, kullanılan dinamometre, infrared termometre, dört kanallı termometre ve termokupulun ayrı ayrı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.14: a) SKNK sırasında kullanılan üniversal dik freze tezgahı, takım, bağlama aparatı, dinamometre, dört kanallı termometre ve bu termometreye bağlı termokupullar ile hassas infrared termometrenin birlikte kullanılışı b) bindirme bağlantısı ve termokupul delikleri c) kullanılan dinamometrenin, termometrelerin ve termokupulun ayrı ayrı görüntüleri

Tezgah tablasına bağlanarak yerleştirilen dinamometrenin üzerine, kaynak yapılacak PP bindirme numuneleri, özel olarak tasarlanan ve çelik malzemeden imal edilen Şekil 3.3'te sağdaki bağlama aparatı ile sabitlenmiştir. Metal bağlama aparatında ilgili yerlere delikler açılmıştır. Açılan deliklerden matkap ucu sokulmuş ve bindirme bağlantısı şeklinde yerleştirilen PP numunelere termokupulların boşluksuz girebileceği küçük çaplı eşit delikler açılmıştır. Dört kanallı termometrenin çıkışlarına bağlanan termokupullarda bu deliklere yerleştirilmiştir. Bağlama aparatının üzerine açılan delikler sabit olduğundan, kaynak yapılacak PP numuneler bağlama aparatı ile dinamometrenin üzerine merkezlenerek sabitlendikten sonra, PP numunelere delikler açılmıştır. Böylece Şekil 3.14b'deki "1"-"2"-"3" noktalarının bir diğer numunede sağa sola kayması önlenmiştir. Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına üç adet K tipi termokupul bağlanmış ve termokupullardan "1" üst parçanın

yanından, “2” üst parçanın üstünden ve “3” alt parçanın yanından olmak üzere Şekil 3.14b’de görüldüğü gibi, termokupullara zarar vermeyecek fakat kaynak bölgesine en yakın olacak yerlerden matkap ucu ile açılan deliklere yerleştirilmiştir. Gerekli olan SW-U801/WIN Lutron Software+UPCB-02/Win yazılımı kullanılarak online olarak sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. İnfrared termometre ile de, takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden kaynak noktasının merkezinin sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Kaynak sırasında yumuşayan ve karıştırılan malzeme, kaynak bölgesi hacmi (kaynak havuzu) olarak adlandırılan bölgeyi oluşturur. Bu hacmin artması ise kaynak alanının artmasına bağlıdır. Kaynak havuzu, oluşturulan tüm kaynak noktalarında tamamen parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır ve görünümü literatürde KHI Ltd. tarafından da belirtildiği gibi fincan tabağı şeklindedir. Bu fincan tabağı görünümündeki kaynak havuzunun oluşumu ve boyutları kullanılan parametrelere bağlı olarak değişeceğinden, kaynak havuzuna yakın her üç noktada da sıcaklık yüksek çıkabilir. Daha açık bir şekilde belirtilirse, yumuşayan ve karıştırılan malzemenin “1”, “2”, “3” nolu termokupulların bağlı olduğu noktalara doğru ilerlemesi ve yaklaşması ile ölçülen sıcaklık değerleri doğrudan ilgilidir. Deneyler sırasında ise yumuşayan ve karıştırılan malzemenin hangi termokupula daha çok yaklaştığı, sürekli kaydedilen sıcaklık değerleri ile belirlenmiştir.

Dört kanallı termometreye bağlanan termokupullar ile kaynak noktasının merkezinin veya kaynak havuzunun içinin sıcaklığını ölçmek mümkün olmayacağından, kaynak havuzuna mümkün olduğunca yakın bölgelerin sıcaklığı ölçülmüştür. Bunun sebebi, eğer termokupullar yumuşayan bölgenin içinde gömülü kalır ise yumuşayan malzeme katılaştığı zaman termokupulda buraya yapışıp kalacağından, bu bölgeden çıkarılamayacağı içinde bir daha kullanılmaz. Çıkarmak için zorlanıldığı takdirde de özelliğini kaybederek yine bozulacaktır. Termokupulların defalarca kullanılabilmesi için bu durum göz önünde tutulmuştur. İnfrared termometrenin kullanımında ise böyle bir risk yoktur. Çünkü ölçümlerin 30 cm uzaklıktaki odaklama mesafesinden yapılması gerektiğinden infrared termometre ile kaynak noktasının merkezinin sıcaklığı ölçülebilmiştir. Ölçüm yapılmadan önce her iki termometrede uzun süre

deney yapılacak ortamda kalmış ve gösterdikleri sıcaklık değerlerinin aynı olduğu görülmüştür.

Bu çalışma, üniversal dik freze tezgahının kontrolü için, dört kanallı termometrenin bağlı olduğu bilgisayarın kontrolü ve de infrared termometrenin kullanılması için ve dinamometrenin bağlı olduğu bilgisayarın kontrolü için olmak üzere üç kişinin aynı anda birlikte çalışması ile gerçekleştirilmiştir. Eksenel kuvvetin zamanla değişimi ve parçalarda meydana gelen sıcaklığın, bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği, dalma hızı parametreleri ile ve de eksenel kuvvet ile ilişkisi belirlenmiştir. İlgili parametrelerin, bağlantılardan elde edilen çekme kuvveti değerlerine etkisi tespit edilmiştir. Çekme kuvveti değerinin maksimum olduğu optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir.

3.7.6. Kaynak bölgesinin tespiti için enine kesit incelemesi

Çekme deneyi sonrasında oluşan kopma kesitlerinin optik mikroskopta incelenmesine ilaveten, oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara, kaynak bölgesinin belirlenmesi için enine kesit incelemeleri yapılmıştır. Bunun için oluşturulan kaynaklı numuneler, kaynak noktalarının tam ortasından, ince testere bıçağına sahip masa üstü testere cihazında kesilmiş ve uygun parlatma aşamalarından geçirilerek, yüzeyler optik mikroskopta incelenmeye hazır hale getirilmiştir. Farklı parametrelerde, belirlenen 12 adet kaynak bölgesi için enine kesit incelemeleri yapılmıştır. Kullanılan numuneler tahribatsız malzeme muayenesi için ve de DSC analizleri için oluşturulan ve Tablo 3.6'da verilen numuneler ile aynı parametrelere sahiptir ve enine kesit incelemeleri için tekrar oluşturulmuştur. Böylece bir diğer grup olan, mekanik test uygulanmayan kaynak numunelerine, kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği ilave optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır.

TÜBİTAK MAM'da yapılan enine kesit incelemesinde, parlatma işlemi için METKON GRIPO 1V GRINDER POLISHER marka yüzey parlatma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.15). 240-1200-4000'lik zımparalar sırası ile PP parçaların

enine kesit yüzeylerinin parlatılması için kullanılmıştır. 4000'lik zımpara kullanılmadan önce iki parça arasındaki ayrım çizgisi daha net gözükmekle beraber, zımpara izleri de gözüktüğünden, yüzeyin daha iyi parlatılması için 4000'lik zımparada kullanılmıştır. Zımpara kağıtlarının numarası yükseldikçe, kağıt üzerindeki aşındırıcı taneciklerin boyutları küçüldüğünden daha pürüzsüz bir numune yüzeyi elde edilmektedir. Parlatma işlemi 187 d/d devir sayısında, sıvı olarak su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi sonrası numunelerin enine kesitlerinin incelenmesi için TÜBİTAK MAM Laboratuarı'nda bulunan LEICA S6D optik mikroskop ile görüntüler alınmıştır. Enine kesitlerde, optik mikroskop ile alınan yarım görüntüler için 8, tam görüntüler için ise 6,3 büyütme yapılmıştır.



Şekil 3.15: METKON GRIPO 1V GRINDER POLISHER marka parlatma cihazı

SKNK'lı farklı bağlantı tasarımlarının, çekme deneyi sonrasında oluşan kopma kesitlerinin optik mikroskopta incelenmesine ilaveten, oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan farklı bağlantı tasarımındaki kaynaklı bağlantıya, kaynak bölgesinin belirlenmesi için enine kesit incelemesi yapılmıştır. Çift nokta kaynağında uygulanan alttan ve üstten kaynak noktaları, aynı düşey eksende karşılıklı yer aldığından Şekil 3.5'teki tip2 veya Şekil 3.6'daki tip3 bindirme bağlantılarından birinin enine kesiti alınır ise çift nokta kaynağı (iki taraftan nokta kaynağı) için bindirme bağlantısının görünümü ortaya çıkarılabileceğinden, oluşturulan çift nokta kaynaklı numune, kaynak noktalarının tam ortasından, ince testere bıçağına sahip masa üstü testere cihazında kesilmiş ve uygun parlatma aşamalarından geçirilerek, yüzey optik mikroskopta incelenmeye hazır hale getirilmiştir.

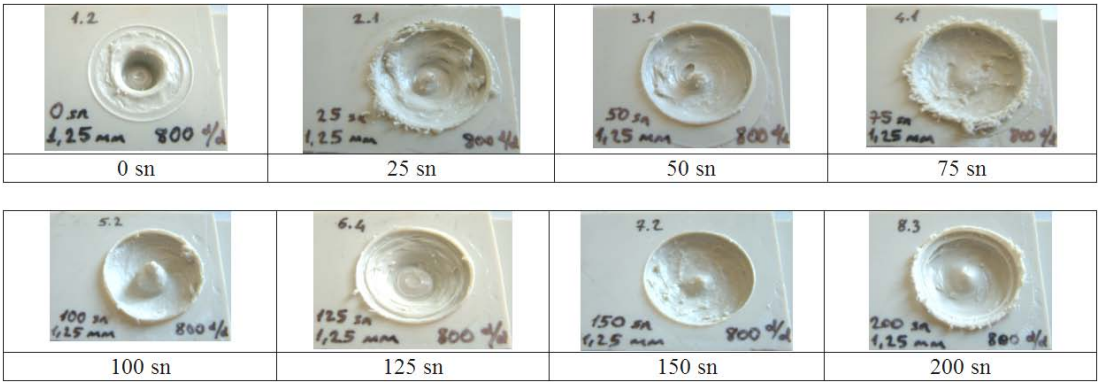
TÜBİTAK MAM'da yapılan parlatma işlemi ve enine kesit incelemesi için, tek nokta kaynağının bindirme bağlantısının enine kesitinin incelenmesi sırasında uygulanan adımlar burada da aynı şekilde uygulanmıştır. Parlatma işlemi sonrası numunenin enine kesitinin incelenmesi sonucunda, TÜBİTAK MAM Laboratuarı'nda bulunan LEICA S6D optik mikroskop ile görüntü alınmıştır. Böylece mekanik test uygulanmayan çift nokta kaynağı numunesine, kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği optik mikroskop incelemesi yapılmıştır.

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

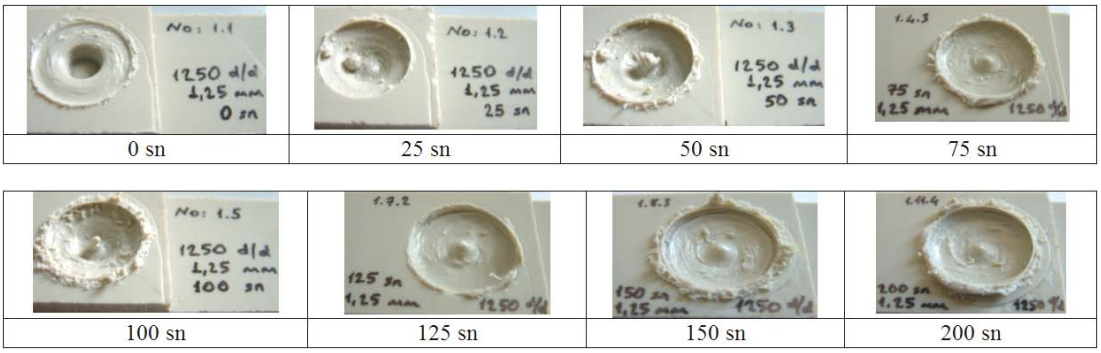
4.1. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numunelerine Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.1.1. Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisi

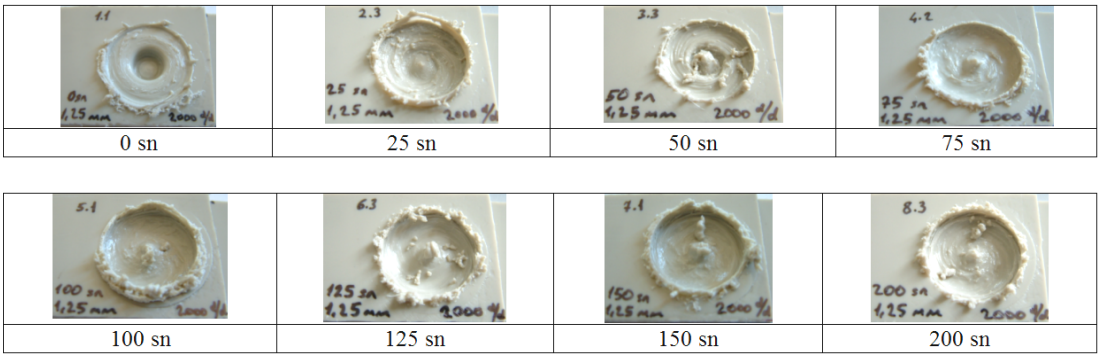
Kaynaklı parçaların kaynak sonrası görünümlerinin fotoğrafları 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d takım devir sayıları için sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı parçaların kaynak bölgelerinin gözle yapılan incelemelerinde, tüm deney parçalarındaki kaynak noktalarının adeta bulamaç veya çamur gibi sıvandığı ve özellikle düşük bekleme sürelerinde ve de düşük devir sayılarında daha belirgin olan yönteme ait karakteristik bir boşluğun oluştuğu görülmektedir. Ancak artan devir sayısı ve bekleme sürelerinde kaynak bölgesine olan ısı girdisine bağlı olarak artan yumuşamış malzeme miktarıyla bu boşluğun dolduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, 800 d/d için karakteristik boşluğun hep oluştuğu, 1250 d/d için 125 saniye ve 2000 d/d için ise 75 saniye bekleme sürelerinden itibaren, artan devir sayısına bağlı olarak daha kısa bekleme sürelerinde boşluğun dolduğu görülmüştür. Ayrıca, kaynak takımının geri çekilmesi sonrasında bir malzeme tepeciğinin de oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak bölgesinde malzemenin pim etrafındaki sürüklenişini ifade eden karışım izleri bütün kaynak noktalarında açıkça görülmektedir. Yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinden kaçması sonucu kaynak takımı omzunu çepeçevre saran bir çapak oluşumu söz konusudur. Ayrıca kaynak bölgesi malzemesi ile esas malzemenin rengi arasında herhangi bir farklılık olmayışı (renk uyumu) kaynak bölgesi malzemesinde herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir ki bu yapılan kaynağın durumu için olumlu bir göstergedir.



Şekil 4.1: 800 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları



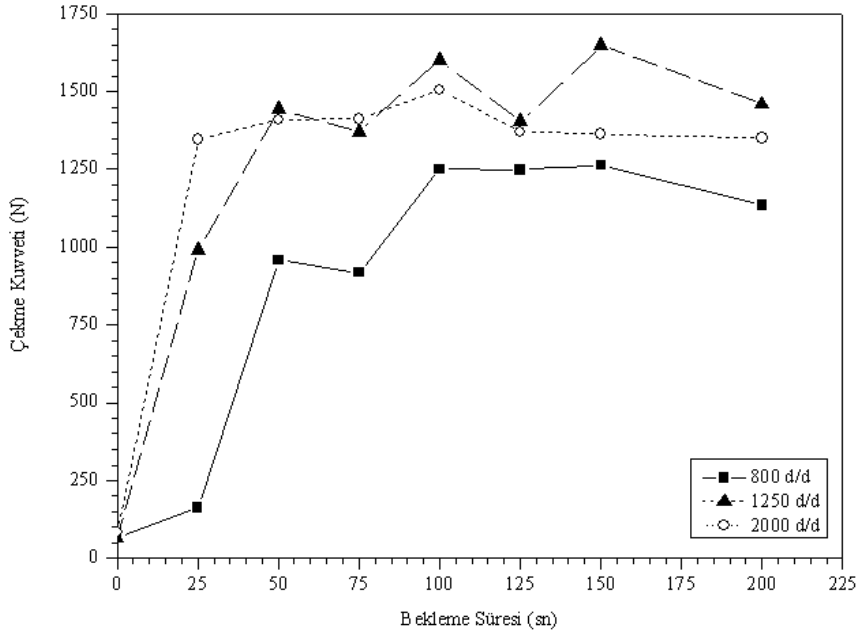
Şekil 4.2: 1250 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları



Şekil 4.3: 2000 d/d için numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları

Şekil 4.4'te çekme kuvvetinin bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi görülmektedir. İlgili grafik bekleme süresi açısından incelendiğinde, her üç devir için de çekme kuvvetinin belirli bir bekleme süresi değerine kadar artış gösterdiği ve sonraki bekleme sürelerinde ise yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir. Bu kritik süreler 800, 1250 ve 2000 d/d takım devirleri için sırasıyla 100, 50 ve 25 sn

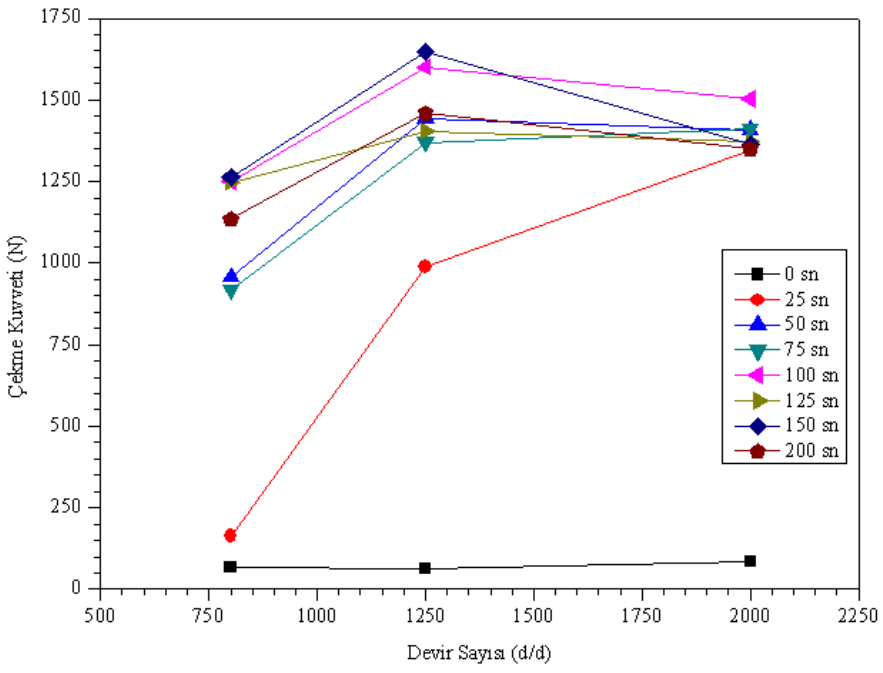
değerleridir. Takım devrinin artışıyla belli bir çekme kuvveti değerine daha kısa bekleme süresinde ulaşılması artan devir sayısıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı girdisinin artışı, dolayısıyla kaynak bölgesinde yumuşamış malzeme miktarının artması nedeniyledir. 1250 ve 2000 d/d takım devirlerinin kritik süreler sonrasında elde edilen çekme kuvvet değerleri yaklaşık aynı seviyelerde olmasına karşın 800 d/d takım devrinin çekme kuvveti değerleri daha düşük bir kuvvet seviyesinde kalmaktadır. Bu da 800 d/d takım devrinin kaynakta yeterli malzeme yumuşamasına ulaşılacak ısı girdisi sağlayamadığını göstermektedir. En yüksek çekme kuvvetlerine ise, 800 ve 1250 d/d takım devirleri için 150 sn bekleme sürelerinde ve 2000 d/d takım devri içinse 100 sn bekleme süresinde ulaşılmıştır. İlgili grafik kaynak takımı devri açısından incelendiğinde, 75 sn bekleme süresine kadar 2000 d/d takım devri için daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşılırken bu süreden daha uzun beklemelerde ise 1250 d/d takım devrinde daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşıldığı anlaşılmıştır. Tüm kaynaklar içinde en yüksek çekme kuvvetine 1250 d/d takım devrinde 150 sn bekleme süresinde ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 4.4: Çekme kuvvetinin bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi

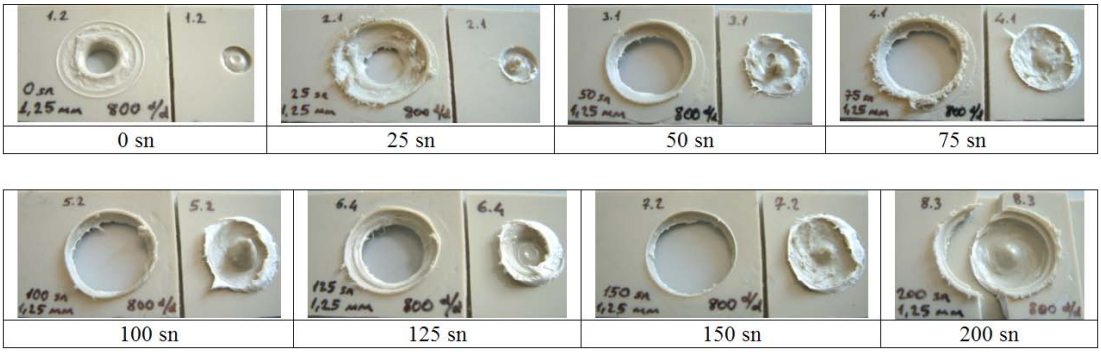
Şekil 4.5'te bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvveti üzerine etkisi görülmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 birlikte incelendiğinde, hiç beklemenin olmadığı 0 sn için, her üç devir sayısı içinde oldukça düşük ve yaklaşık eşit çekme

kuvveti değerleri elde edilmiştir. Burada bekleme olmadığından yeterli sürtünme ısısı elde edilememiş ve kaynak bağlantısının oluşturulması için yeterli yumuşama sağlanamamıştır. Bu nedenle de düşük çekme kuvveti değerleri elde edilmiştir. 800 d/d için ise düşük bekleme sürelerinde, çekme kuvveti değerlerinin de düşük olduğu ve bekleme süresi arttıkça çekme kuvvetinin de önemli ölçüde arttığı fakat 1250 d/d ve 2000 d/d için elde edilen çekme kuvveti değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum çekme kuvveti yüksek bir kaynak noktası oluşturmak için gerekli sürtünme ısısının ve yumuşamanın 800 d/d'da yeterince sağlanamadığını göstermektedir. 1250 d/d ve 2000 d/d için ise düşük bekleme sürelerinde bile, yaklaşık olarak 800 d/d'da elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Devir sayısının artışı belirli bir bekleme süresi değerine kadar çekme kuvvetini artırmış, fakat sonrasında devir sayısını artırmak çekme kuvvetini yaklaşık sabit tutmuştur. Hatta bir noktadan sonra devir sayısını artırmak çekme kuvvetini bir miktar düşürmüştür. Ancak devir sayısının artışı sürtünme sonucu açığa çıkan ısıyı artırarak, daha kısa sürede kaynak için gerekli değerlere taşımıştır. Böylece malzemenin daha kısa sürede yumuşamasını ve daha düşük bekleme sürelerinde bile yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır. Fakat en yüksek çekme kuvveti değerlerine en yüksek devir sayısında değil, 1250 d/d'da ulaşılmıştır.



Şekil 4.5: Bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvveti üzerine etkisi

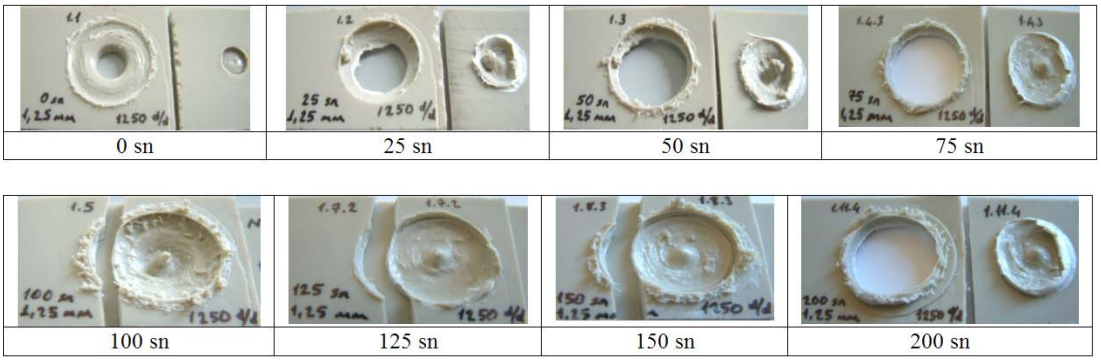
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sırasıyla 800, 1250 ve 2000 d/d devirlerde ve de farklı bekleme sürelerinde kaynak edilen parçaların çekme deneyleri sonrasında kopma bölgelerini gösteren fotoğraflar görülmektedir. Bu görüntülerden takım bekleme süresinin ve devir sayısının, kopma şekline etkileri belirlenmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde, kopmanın üç farklı şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Kaynak bölgesinin yetersiz oluştuğu düşük bekleme sürelerinde pim esaslı, iz çapının artışı ile önce omuz sonrasında ise ara yüzey esaslı kopma şekli ortaya çıkmıştır. Bunlardan ilkinde, kopma yırtılmasının kaynak takımı piminin etrafında çevresel olduğu (pim esaslı) anlaşılmıştır. İkincisinde, kopma yırtılmasının kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu (omuz esaslı) anlaşılmıştır. Üçüncüsünde ise, kopma yırtılmasının üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği (ara yüzey esaslı) anlaşılmıştır.



Şekil 4.6: 800 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.6'da 800 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 ile 25 saniye bekleme süreleri için, kopmanın pim esaslı olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olmakla birlikte bekleme süresinin artışına paralel olarak bu iz çapı da artış göstermiştir. Ayrıca 0 sn için neredeyse oluşmamakla birlikte 25 sn'lik bekleme süresi için malzemenin kopma öncesi bu bölgede bir miktar uzama gösterdiği tespit edilmiştir. 50 sn ve 150 sn aralığındaki bekleme süreleri için ise kopmanın şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Kopmaya neden olan yırtılma kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olarak oluşmuştur. Bekleme sürenin artışıyla beraber malzemenin kopma öncesi bu bölgede daha fazla çekme uzaması

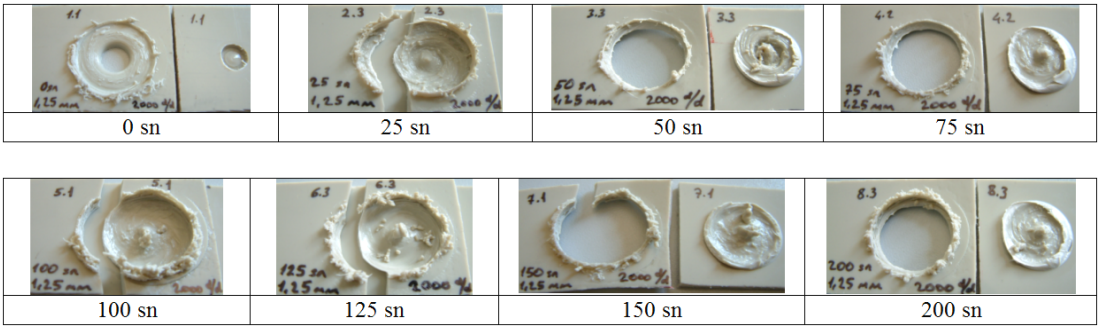
gösterdiği net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki bu artış elde edilen çekme kuvveti değerlerindeki artışı da açıklamaktadır. 200 saniye için ise kopmanın tekrar şekil değiştirerek üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde yani ara yüzey esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerinde üst levhadan kopan parça yer almaktadır.



Şekil 4.7: 1250 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.7'de 1250 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 sn bekleme süresi için, kopmanın pim esaslı olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olmakla birlikte bekleme süresinin artışına paralel olarak bu iz çapı da artış göstermiştir. 25 sn ve 75 sn aralığındaki bekleme süreleri için ise kopmanın şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Bu parçalarda uzama çok net olarak görülmektedir. Ancak çekme kuvvetlerinin çok daha yüksek değerlere ulaştığı 100 sn ve 150 sn aralığındaki bekleme süreleri için kopmanın şekil değiştirerek üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerinde üst levhadan kopan parça yer almaktadır. Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin incelendiği çalışmanın bu kısmında en yüksek çekme kuvveti değeri, 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için 1728 N olarak elde edilmiştir. Çekme kuvvetinin bir miktar düşüş gösterdiği 200 saniyelik daha uzun bekleme süresi için ise kopmanın şekil değiştirerek tekrar omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca 0 sn için neredeyse oluşmamakla birlikte, bekleme sürenin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda malzemenin kopma öncesi bu bölgede

daha fazla çekme uzaması gösterdiği net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki bu artış elde edilen çekme kuvveti değerlerindeki artışı da açıklamaktadır.

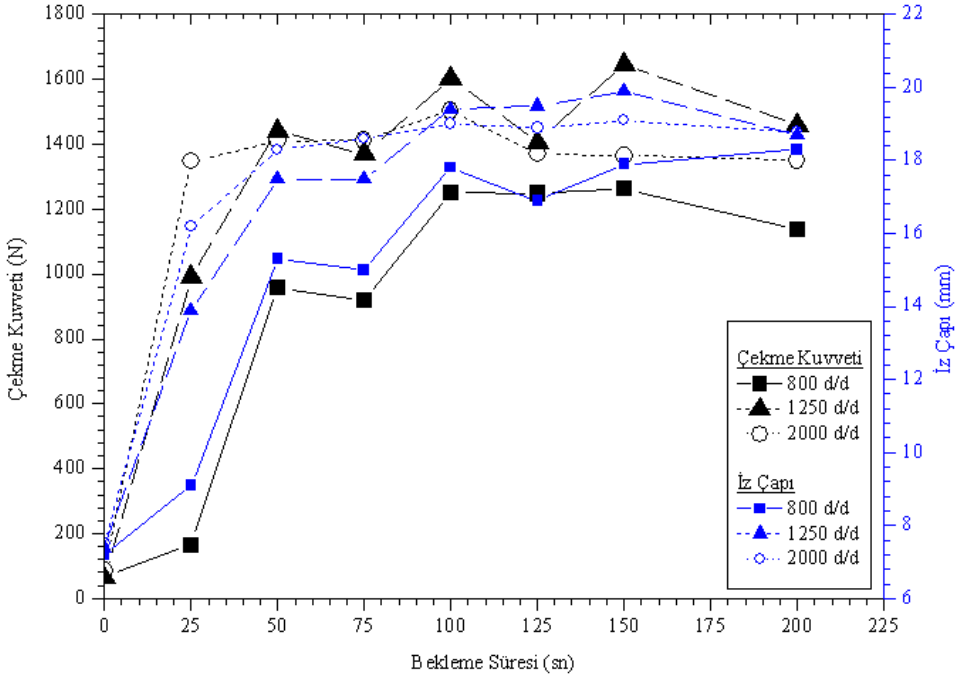


Şekil 4.8: 2000 d/d için numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.8'de 2000 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 sn bekleme süresi için, kopmanın pim esaslı olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olmakla birlikte bekleme süresinin artışına paralel olarak bu iz çapı da diğer devir sayılarında olduğu gibi artış göstermiştir. 25 saniyelik kısa bekleme süresi için bile yüksek bir çekme kuvveti değerine ulaşıldığı, üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde kopmanın şekil değiştirdiği görülmüştür. 50 sn ve 75 sn bekleme süreleri için ise kopmanın tekrar şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Ancak çekme kuvvetinin daha yüksek değerlere ulaştığı 100 sn ve 125 sn bekleme süreleri için kopmanın şekil değiştirerek tekrar üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde yani ara yüzey esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Alt levha üzerinde üst levhadan kopan parça yer almaktadır. Çekme kuvvetinin bir miktar düşüş gösterdiği 150 ve 200 saniyelik daha uzun bekleme süresi için ise kopmanın şekil değiştirerek tekrar omuz esaslı gerçekleştiği görülmüştür. 150 sn için kopmaya neden olan yırtılma diğer omuz esaslı kopma biçimlerinden farklılık göstererek, kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olarak ve ayrıca üst levhanın enine kesiti doğrultusunda ilerlemiştir. Diğer devir sayıları ile yapılan çalışmalara paralel olarak burada da, 0 sn için neredeyse oluşmamakla birlikte, bekleme sürenin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda

malzemenin kopma öncesi bu bölgede daha fazla çekme uzaması gösterdiği net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki bu artış elde edilen çekme kuvveti değerlerindeki artışı da açıklamaktadır. Böylelikle, bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin incelendiği araştırmanın bu kısmında, her iki parametrenin de kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.9'da çekme kuvveti ve iz çapının bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi görülmektedir. Alt levha üzerindeki kaynak bölgesi izi çapının, çekme kuvveti ile olan paralelliği dikkat çekicidir. Böylece farklı bekleme süreleri ve devir sayıları için yapılan kaynakların çekme testleri sonrasında çekme kuvvetine olan etkisi belirlenmiştir. Bu eğride, iz çapı değişimi de verilerek çekme kuvveti değişimi ile olan paralelliği karşılaştırılmıştır. Üç farklı devir sayısı içinde, bekleme süresi arttıkça elde edilen çekme kuvveti değerlerinin bir değere kadar arttığı sonrasında ise yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Hatta bekleme süresinin çok fazla artırılması çekme kuvvetini bir miktar düşürmüştür. İz çapı ile bekleme süresi arasındaki eğrilerde, çekme kuvveti ile bekleme süresi arasındaki eğrilere benzer şekilde elde edilmiştir. Bekleme süresinin artması ile iz çapı artmış, iz çapının artmasına paralel olarak da çekme kuvveti değerleri artmıştır. Takım omzunun bir miktar malzeme yüzeyinden içeri daldırılması sayesinde omuz altındaki karışım gösteren malzemede daha yüksek bir basma etkisi sağlanmaktadır. Bu etki sayesinde de yumuşayan malzeme daha iyi bir metalürjik bağa sahip olmaktadır. Sürtünme sonucu ortaya çıkan ısının belirli bir bekleme süresine kadar malzemede daha iyi yumuşama sağlayıp kaynak bağlantısının daha iyi performans göstermesini sağlamıştır. Renk uyumuna paralel olarak çekme kuvveti değerlerinin de gittikçe artması malzemede herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir. Bu durum, parçaların iyi kaynak edildiğinin de bir göstergesidir.



Şekil 4.9: Çekme kuvveti ve iz çapının bekleme süresi ve devir sayısı ile değişimi

Başlangıçta yeterli ısı girdisi oluşamadığından kaynak bölgesinde malzeme yeterli miktarda yumuşayamamaktadır. Bu yüzden, her üç farklı devir için de kaynak bölgesi alanı daha az oluştuğundan öncelikle pim esaslı kopma görülmektedir. Bu durumu ayrıca alt levha parçası üzerindeki kaynak izinin çap değerinden de gözlemek mümkündür (Şekil 4.9). Örneğin bekleme yapılmadan kaynak gerçekleştiğinde (0 saniye) kaynak izi çapının pim çapına eşit değerde olduğu görülmektedir. Ancak bekleme süresi 25 saniye olduğunda devir sayısının ısı girdisi oluşturma anlamında etkisi ortaya çıkmaktadır. Devrin artışı ile birlikte kaynak bölgesi alanı genişlemekte ve çekme sonrası elde edilen kaynak izi çapı da artış göstermektedir. 800 d/d için kaynak alanının hala yeterince genişlememiş olması nedeniyle kopmanın yine pim esaslı olarak gerçekleştiği görülmektedir. 1250 d/d için, iz çapının artış göstermesine rağmen henüz istenen kaynak alanı genişliğine ulaşamadığı görülmektedir. Ancak iz etrafında görülen çekme uzamaları çekme kuvvetinin de artışını açıklamaktadır. 2000 d/d için ise, kopma yerleşimi şekil değiştirerek ara yüzey esaslı olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda üst levha parçasının bahsi geçen şekilde ikiye ayrıldığı görülmektedir. Üst levhanın kalan parçası alt levha üzerinde yer almaktadır.

Kaynak izi çapının 50 ve 75 saniye bekleme sürelerinde de kaynak devrine olan bağlılığı devam etmiştir. Yani devir sayısı arttıkça iz çapı da artmıştır. Bu durum yukarıda belirtilen 75 saniye bekleme süresine kadar en yüksek devirdeki kaynakların en yüksek çekme kuvveti ile koptuğu tespiti ile ilişkilendirilmiştir. Daha yüksek iz genişliği daha yüksek çekme kuvveti değeri oluşturmaktadır. Zira 100 saniye ve üzerindeki beklemelerde de iz genişliğinin daha yüksek olduğu 1250 d/d devirleri için çekme kuvveti değerleri de daha yüksek gerçekleşmiştir.

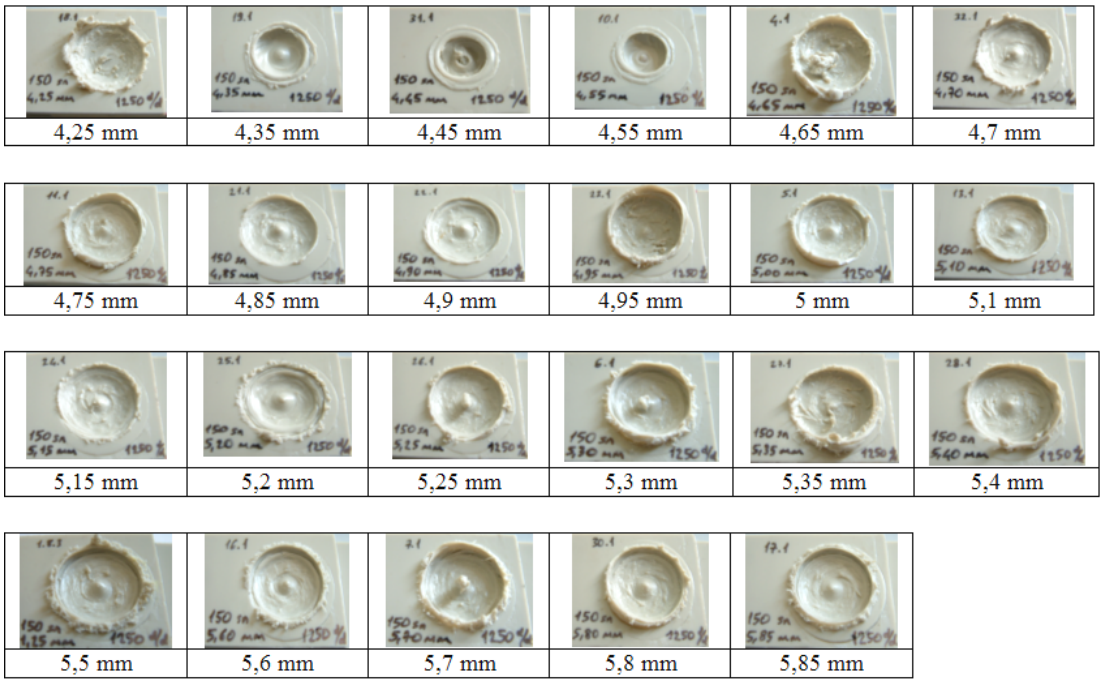
Kopma şekillerini incelemeye devam edersek; 50 ve 75 saniye bekleme sürelerinde tüm devirler için yeterli kaynak alanı oluştuğundan kopma omuz esaslı olarak gerçekleşmiştir. 1250 d/d değeri için 800 d/d değerine göre çekme uzamalarının daha fazla gerçekleştiği, 2000 d/d için ise alt levha üzerinde kalan kaynak malzemesinin diğerlerine göre daha fazla miktarda olduğu anlaşılmıştır. 100, 125 ve 150 saniye bekleme süreleri beraber incelendiğinde, 800 d/d için omuz esaslı kopma devam ederken 1250 ve 2000 d/d için kopma şekil değiştirerek ara yüzey esaslı kopmaya dönmektedir. Bu devirler için omuz çapına en yakın iz çapı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. 800 d/d için ise bu söylenememektedir. Ancak 200 saniye bekleme süresinde 800 d/d için en yüksek iz çapına ulaşıldığı ve kopmanın ara yüzey esaslı olarak gerçekleştiği görülmüştür.

Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin, tek nokta kaynağı için bindirme bağlantıları ile yapılan ve çok sayıda tekrarlanan deneylerle incelendiği çalışmanın bu kısmında, 1728 N olarak elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri için bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri sırası ile 150 sn - 1250 d/d - 5,5 mm - 100 mm/dak olarak bulunmuştur.

4.1.2. Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisi

150 sn bekleme süresi ve 1250 d/d devir sayısında elde edilen çekme kuvveti değerinden yola çıkarak dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Buradaki kaynaklarda kaynak takımı devir sayısı 1250 d/d, bekleme süresi 150 sn ve dalma hızı 100 mm/dak olarak sabit tutulmuştur. Dalma derinliğinin etkisi ise, 4,25-5,85 mm aralığında değişen farklı dalma derinlikleri için tekrarlanan kaynaklarla

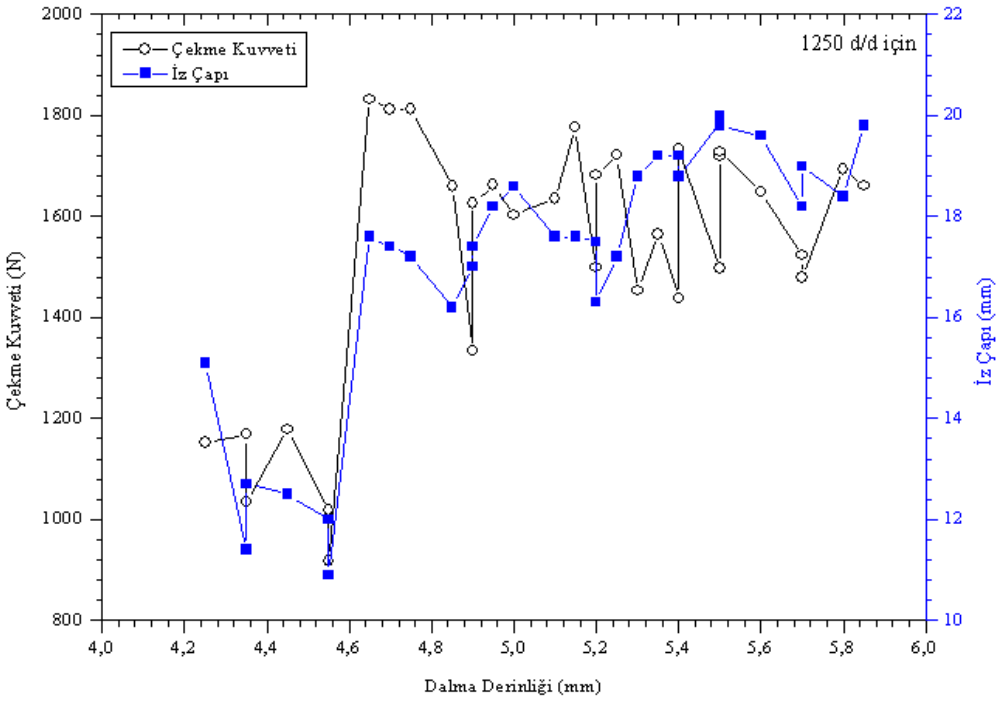
incelenmiştir. Şekil 4.10'da farklı dalma derinliklerinde oluşturulan sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bu numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları görülmektedir. Böylece takım dalma derinliğinin, kaynak noktasının oluşumuna ve fiziki şekline görsel olarak etkileri ortaya konulmuştur.



Şekil 4.10: Farklı dalma derinliklerinde oluşturulan numunelerin çekme deneyi öncesi fotoğrafları

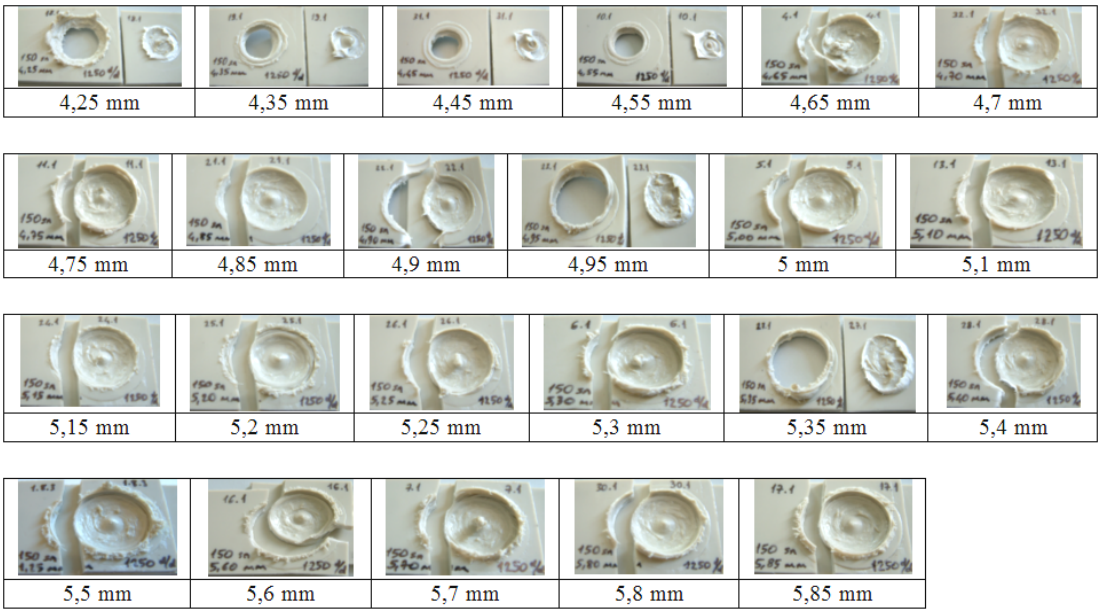
Şekil 4.10'daki numunelerin gözle yapılan incelemesinde, tüm deney parçalarındaki kaynak noktalarının adeta bulamaç veya çamur gibi sıvandığı ve özellikle düşük dalma derinliklerinde daha belirgin olan yönteme ait karakteristik boşluğun oluştuğu ancak 4,65 mm ve sonrasındaki dalma derinlikleri için bu boşluğun dolduğu, kaynak takımının geri çekilmesi sonrasında ayrıca bir tepeciğin oluştuğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla dalma derinliğinin kaynak bölgesi görünümüne etkisi olduğu anlaşılmıştır. Kaynak bölgesinde malzemenin pim etrafındaki sürüklenişini ifade eden karışım izleri açıkça görülmektedir. Yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinden kaçması sonucu kaynak takımı omzunu çepeçevre saran bir çapak oluşumu söz konusudur. Ayrıca kaynak bölgesi malzemesi ile esas malzemenin rengi arasında herhangi bir farklılık olmayışı (renk uyumu) kaynak bölgesi malzemesinde herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir ki bu yapılan kaynağın durumu için olumlu bir göstergedir.

Şekil 4.11'de çekme kuvveti ve iz çapının dalma derinliği ile değişimi görülmektedir. Alt levha üzerindeki kaynak bölgesi izi çapının, çekme kuvveti ile olan paralelliği dikkat çekicidir. Böylece farklı dalma derinlikleri için yapılan kaynakların çekme testleri sonrasında, dalma derinliğinin çekme kuvvetine olan etkisi belirlenmiştir. Bu eğride, iz çapı değişimi de verilerek çekme kuvveti değişimi ile olan paralelliği karşılaştırılmıştır. Kaynak takımının dalma derinliği arttıkça, elde edilen çekme kuvveti değerlerinin bir değere kadar arttığı sonrasında ise düştüğü ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. İz çapı ile dalma derinliği arasındaki eğride bu eğriye benzer şekilde elde edilmiştir. Dalma derinliğinin artması ile iz çapı artmış, iz çapının artmasına paralel olarak da çekme kuvveti değerleri artmıştır. Takım omzunun bir miktar malzeme yüzeyinden içeri daldırılması sayesinde omuz altındaki karışım gösteren malzemede daha yüksek bir basma etkisi sağlanmaktadır. Bu etki sayesinde de yumuşayan malzeme daha iyi bir metalürjik bağa sahip olmaktadır. Sürtünme sonucu ortaya çıkan ısının belirli bir dalma derinliğine kadar malzemede daha iyi yumuşama sağlayıp kaynak bağlantısının daha iyi performans göstermesini sağlamıştır. Renk uyumuna paralel olarak çekme kuvveti değerlerinin de gittikçe artması malzemede herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir. Bu durum, parçaların iyi kaynak edildiğinin de bir göstergesidir.



Şekil 4.11: Çekme kuvveti ve iz çapının dalma derinliği ile değişimi

Şekil 4.12'de farklı dalma derinliklerinde kaynak edilen parçaların çekme deneyleri sonrasında kopma bölgelerini gösteren fotoğraflar görülmektedir. Bu görüntülerden takım dalma derinliğinin, kopma şekline etkileri belirlenmiştir. Takım omzunun 0-1,6 mm aralığında değişen değerlerde malzeme içine daldırılması ile ulaşılan derinlik, toplam malzeme kalınlığının % 70,8 ile % 97,5'i aralığında değişen oranlarına karşılık gelmektedir. Şekil 4.11'de verilen eğrideki ilk değer, kaynak takımının parça içerisine dalmasının takım omzunun üst parça yüzeyine değmesi ile sona erdiği durumu göstermektedir. Bu durumda kaynak takımı, pim uzunluğu (4,25 mm) kadar parça içerisinde yer almaktadır. Levha kalınlığı 3 mm olduğundan, pimin 1,25 mm'si alt parça içerisinde bulunmaktadır. Bu da sürtünme ısısı sonucunda alt parçada az miktarda bir alanın yumuşama göstererek kaynak bölgesini oluşturacağı (düşük kaynak izi çap değerleri de bunu göstermektedir) anlamına gelmektedir. Bu durum birleşme dayanımının yani çekme kuvvetinin düşük olması sonucunu doğurmaktadır. Çekme kuvvetinin en yüksek olduğu dalma derinliklerinden daha düşük derinliklerde (4,25-4,55 mm aralığında) kopma pim esaslı gerçekleşmiştir. Şekil 4.12'de verilen kopma şekilleri incelendiğinde bu parçaların pim esaslı kopma davranışı gösterdiği görülmektedir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri de dalma derinliğine ve oluşan iz çapına da bağlı olarak düşük çıkmıştır. Düşük çekme kuvvetlerinin gerçekleştiği bu durum 4,65 mm dalma derinliğine kadar devam etmiştir.



Şekil 4.12: Farklı dalma derinliklerinde oluşturulan numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları

4,65 mm dalma derinliğinde çekme kuvveti değerinin hızlı bir artış gösterdiği görülmüştür. Kaynak izi çapının da artış göstermesi kaynak bölgesinin genişlediğini belirtmektedir. Takım omzunun parça içine daldırılması sayesinde omuz altında karışan malzemede daha yüksek basma kuvveti etkisi sağlanarak daha iyi bir metalürjik bağ elde edilmiştir. Dalma derinliğinin artmasıyla iz çapının artış eğilimi gösterdiği ve çekme kuvvetinin de iz çapına paralel olarak aynı artış eğilimini gösterdiği anlaşılmıştır. Çekme kuvvetinin en yüksek değerlere ulaştığı 4,65-4,70-4,75 mm' lik dalma derinlikleri için ise kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde yani ara yüzey esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Bu dalma derinlikleri sırasıyla toplam malzeme kalınlıklarının %77,5-%78,3-%79,2'sine karşılık gelmektedir. Elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri, 4,65 mm dalma derinliğinde 1832 N'dur. Dalma derinliğinin daha da artması ile kopmanın yine ara yüzey esaslı ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği fakat çekme kuvveti değerlerinin yaklaşık 1500-1700 N aralığında değişim gösterecek şekilde bir miktar düştüğü görülmüştür. Şekil 4.12'de kopma şekilleri incelendiğinde, birkaç omuz esaslı (dalma derinliği 4,95 mm ve 5,35 mm olmak üzere iki parçada kopma şekil değiştirerek omuz esaslı gerçekleşmiştir) kopma davranışı olsa bile kopmanın genellikle ara yüzey esaslı gerçekleştiği görülmüştür. Böylelikle, dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin incelendiği araştırmanın bu kısmında, dalma derinliğinin kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu belirlenmiştir.

Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin, tek nokta kaynağı için bindirme bağlantıları ile yapılan ve belirlenen dalma derinliği aralığının, küçük artışlar ile taranması sonucu çok sayıda tekrarlanan deneylerle incelendiği çalışmanın bu kısmında, 1832 N olarak elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri için optimum bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri sırası ile 150 sn - 1250 d/d - 4,65 mm - 100 mm/dak olarak bulunmuştur.

4.1.3. Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliği parametrelerinin çekme deneyi sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi

Bekleme süresinin çekme kuvvetine etkisi 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d için, 0-200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için incelenmiş ve her bir deney bütün bekleme süreleri için en az 3 kez tekrarlanmıştır. 1250 d/d ve 2000 d/d için herhangi bir bekleme süresinde elde edilen çekme kuvveti değerleri, tekrarlanan her üç deneyde de birbirine yakın değerlerdedir. Herhangi bir bekleme süresi için en yüksek ve en düşük çekme kuvvetleri arasındaki fark maksimum 300-400 N aralığında salınım yaparken, minimum 50-100 N aralığında salınım yapacak kadar düştüğü de görülmüştür. Buradan 1250 ve 2000 d/d için denge durumunun mevcut olduğu belirlenmiştir. Fakat 800 d/d için ise, geniş bir aralıkta salınım yaptığı görülmüştür. Örneğin 125 sn bekleme süresi için 800 d/d'da en düşük 584 N, en yüksek 1661 N çekme kuvveti elde edilmiştir. Salınım neredeyse 1100 N'a ulaşmıştır. Bu nedenle deney 6 kez tekrarlanmıştır. 800 d/d'da diğer bekleme süreleri içinde bu büyük salınımlar devam etmiş, bu nedenle de deneyler 3 kereden fazla tekrarlanmıştır. Buradan, 800 d/d'da ulaşılan kaynak sıcaklığının, karıştırma safhasında homojen bir karışma sağlayacak düzeye çıkamadığı ve denge durumunun olmadığı belirlenmiştir.

Kaynak bölgesine giren ısı miktarı düşük bekleme sürelerinde devir sayısına bağlı olduğundan 75 sn bekleme süresine kadar araştırılan en yüksek devir sayısı olan 2000 d/d için daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Bu süreden daha uzun beklemelerde ise 1250 d/d takım devrinde daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşıldığı görülmüştür. Özellikle 0 - 75 sn aralığındaki bekleme süreleri için 2000 d/d'da, hemen hemen diğer iki devir sayısında elde edilen ortalama çekme kuvveti değerlerinden yüksek değerlere ulaşılmıştır. 100 - 200 sn aralığındaki bekleme süreleri için 2000 d/d'da ise 1250 d/d'da elde edilen ortalama çekme kuvveti değerlerinden düşük, 800 d/d'da elde edilen ortalama çekme kuvveti değerlerinden yüksek değerlere ulaşılmıştır.

Fotoğraflar incelendiğinde, kopmanın üç farklı şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Bekleme süresinin değişimi ile tüm takım devir sayılarında her üç kopma şekli de

görülmüştür. Aynı kopma şekilleri dalma derinliğinin artması ile farklı dalma derinlikleri içinde gözlemlenmiştir. Bunlardan ilkinde, alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olan, kopma yırtılmasının kaynak takımı piminin etrafında çevresel olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülen kopma şekli, pim esaslı kopma olarak adlandırılmıştır. İkincisinde, bekleme süresinin ve dalma derinliğinin artışına paralel olarak iz çapının da artış gösterdiği ve buna paralel olarak da kopma sonrası parçalarda meydana gelen çekme uzamasının çok net olarak görüldüğü ve çekme kuvvetlerinin önemli derecede artış gösterdiği, kopmaya neden olan yırtılmanın kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu görülen kopma şekli ise, omuz esaslı kopma olarak adlandırılmıştır. Üçüncüsünde ise, çekme kuvvetlerinin genellikle çok daha yüksek değerlere ulaştığı ve kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında (ara yüzeyinde) ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülen ve alt levha üzerinde üst levhadan kopan parçanın yer aldığı kopma şekli ise, ara yüzey esaslı kopma olarak adlandırılmıştır.

Bir yumak halinde duran polimer zincirlerinin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde hareketliliği artar. Bindirme bağlantısı konumundaki parçalara uygulanan SKNK yönteminde kullanılan takım vasıtasıyla yumuşayan malzeme, yine takım tarafından karıştırılarak ve basınç uygulanarak iki malzemeye ait polimer zincirlerinin birbirleri içine kayması (hareket etmesi) sağlanır. Kaynak havuzunu oluşturan ve her iki malzemeye ait yumuşayan bölgeler, tekrar katılaştığında birbiri içine geçmiş bu polimer zincirleri en son yer aldığı yerleşim bölgesinde kaldığı için iki malzeme arasında bir bağlantı oluşturulmuş olur. Kaynak bölgesi veya kaynak havuzu, artık tek bir malzeme gibi davranmaya çalışan ve her iki malzemeye ait polimer zincirlerini içeren bölgedir. Her ne kadar sadece takımın sürtündüğü en üst yüzeylerde yer yer erime noktasının üzerine çıkılsa da, bu üst yüzeyin hemen altındaki bölgelerde erime noktasının altında, camsı geçiş sıcaklığının ise üstünde çalışılmaktadır. Yöntemin katı faz kaynak yöntemi oluşundan ve malzemeleri bozacak yada bağları koparacak çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadığından, zincir boyutlarında herhangi bir parçalanma veya küçülme (degragasyon) beklenmediği için elde edilen dayanım değerlerinde de olumsuz yönde bir etki oluşmamıştır.

Her iki malzemeye ait iç içe geçmiş polimer zincirlerini içeren (yeni bir yumak oluşumunu içeren) ve tek malzeme gibi davranmaya çalışan kaynak bölgenin alanı ve de hacmi elde edilen dayanım değerleri ile doğrudan ilgilidir. Bu alan ve hacim değerleri arttığında çekme kuvveti değerleri de artar. Oluşturulan bağlantılarda 30x30 mm bindirme bağlantısı alanının tamamı değil, sadece omuz çapı 20 mm olan takımın altındaki bölge kaynağa katılmıştır. Bu bölgenin alanı, bindirme bölgesinin alanının yaklaşık üçte birine denk gelmektedir.

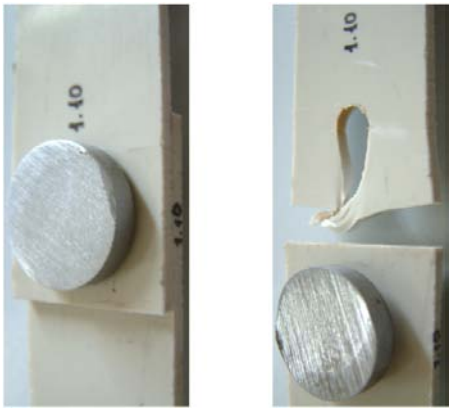
Malzeme, kaynak bölgesinden esas malzemeye geçiş bölgesinde, esas malzemeye yakın özelliklere sahip olacağından, kopma yerleşiminin buraya doğru yaklaştıkça daha yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edilmesi, esas malzemenin polimer zinciri yapısına yaklaşma ile ilişkilendirilmiştir. Çünkü kaynak havuzunda, bindirme bağlantısındaki her iki malzemenin zincirleri varken, geçiş bölgesine yaklaştıkça tek ve esas malzemeye ait zincir yapısı vardır. Yapılan çekme deneylerinde, düşük çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği numunelerde kopma kaynak bölgesinin içinde gerçekleşirken, daha yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği numunelerde ise kopma yerleşimi geçiş bölgesine ve esas malzemeye doğru ilerleyerek konumunu değiştirmiştir.

Bu nedenle kaynak bölgesinin yetersiz oluştuğu düşük bekleme sürelerinde, devir sayılarında ve de dalma derinliklerinde alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olan, kopma yırtılmasının kaynak takımı piminin etrafında çevresel olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülen pim esaslı kopma şeklinde elde edilen çekme kuvveti değerleri oldukça düşüktür. Bekleme süresinin ve dalma derinliğinin artışına paralel olarak iz çapının da artış gösterdiği ve buna paralel olarak da kopma sonrası parçalarda meydana gelen çekme uzamasının çok net olarak görüldüğü, kopmaya neden olan yırtılmanın kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu omuz esaslı kopma şeklinde ise çekme kuvvetlerinin önemli derecede artış gösterdiği görülmüştür. Yine bekleme süresinin ve dalma derinliğinin artışına paralel olarak iz çapının da artış gösterdiği, kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında (ara yüzeyinde) ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülen ve alt levha üzerinde üst levhadan kopan parçanın yer aldığı ara yüzey esaslı kopma şeklinde ise çekme kuvvetlerinin genellikle çok daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.

Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliği parametrelerinin incelendiği deneysel çalışmalar ile, takım omzunun üst parça içine belirli miktar daldırılmasının alt parçada yeterli birleşme dayanımı oluşturacak kaynak bölgesi oluşumu açısından önemli olduğu anlaşılmıştır. En yüksek çekme kuvvetlerine toplam birleşme parçaları kalınlığının %77,5 - 79,2 aralığındaki dalma derinliklerinde ulaşılmıştır. Yönteme ait parametrelerin sayısal değerleri değiştirilerek, tek nokta kaynağı için bindirme bağlantıları ile yapılan çok sayıda deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve çekme kuvvetini 1832 N değerine taşıyarak maksimum yapan optimum bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri sırası ile 150 sn - 1250 d/d - 4,65 mm - 100 mm/dak olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, kaynak parametreleri olan bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliğinin kaynak noktasının oluşumuna ve fiziki şekline, birleşmenin kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu belirlenmiştir.

4.2. Pimli Bağlantı İçin Çekme Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Pimli bağlantıya uygulanan çekme deneyinde en yüksek çekme kuvveti değeri 1754 N olarak elde edilmiştir. Bu değer esas malzemeden elde edilen 3090 N'luk çekme kuvvetinin %56,76'sına denk gelmektedir. Ayrıca pimli bağlantı için parçada meydana gelen hasar mekanizması ise bu tarz pimli bağlantılarda tercih edilen ezilme şeklindeki hasar mekanizmasıdır. Pimli bağlantının çekme deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 4.13'te görülmektedir. Bağlantının çekme cihazının çenelerine bağlanışı şekilde verildiği konumda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Pimli bağlantının çekme deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları

Çekme cihazının alt çenesi hareketsiz, üst çenesi ise hareketli olduğundan, üst çenenin yukarıya doğru hareketi ile pimin PP numuneye baskı etkisi sonucu, Şekil 4.13'te sağdaki fotoğrafın üstündeki PP numunede önce ezilme meydana gelmiş ve sonrasında ise dairesel olarak açılmış olan delik elips şeklinde deforme olmuştur. Yük devam ettirildiğinde ise parça çekme doğrultusunda yırtılarak kopmuştur. Pimli bağlantıdan elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri, kaynaklı parçalardan elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri olan 1832 N'nun altındadır. Kaynaklı bağlantıdan elde edilen 1832 N çekme kuvveti değeri ile, esas malzemeden elde edilen 3090 N'luk çekme kuvvetinin %59,29'una ulaşılmıştır. Tez çalışmasının, geliştirme yönündeki bundan sonraki aşamalarında, bu çekme kuvvetinin elde edildiği kaynak parametreleri kullanılmıştır.

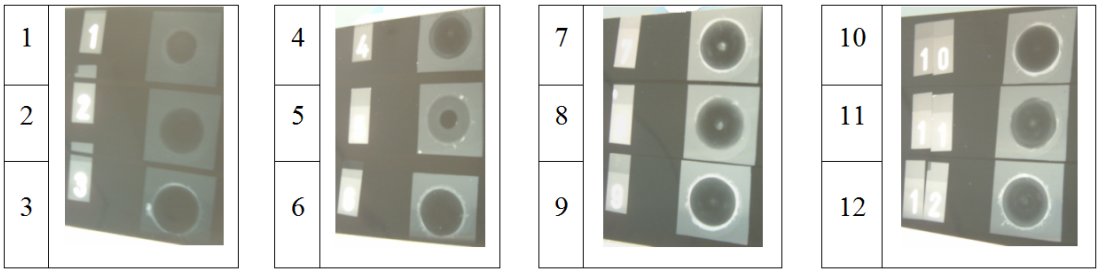
4.3. Tahribatsız Malzeme Muayenesi Deneylerinin Sonuçlarının İncelenmesi

Yapılan tahribatsız malzeme muayenesi deneylerinde kullanılan ve Şekil 4.14'te verilen, 1'den 4'e kadar numaralandırılmış olan numuneler dalma derinliğinin incelendiği numunelerdir ve sırasıyla dalma derinlikleri 4,25-4,65-5,00-5,80 mm'dir. 5'ten 12'ye kadar numaralandırılmış olan numuneler ise bekleme süresinin incelendiği numunelerdir ve sırasıyla bekleme süreleri 0-25-50-75-100-125-150 ve 200 sn'dir. Bütün numunelerin kaynağı 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızında yapılmıştır.

Oluşturulan ve mekanik testler uygulanmayan kaynaklı bağlantılara uygulanan tahribatsız malzeme muayenesi sonucu çekilen filmlerin, arkasından yoğun ışık gönderilerek ön taraftan çekilen fotoğrafları Şekil 4.14'te görülmektedir. 12 adet kaynak noktası için çekilen filmler, kaynak hataları varsa bunların tespiti için incelenmiştir. Bunun için filmlerin arkasından yoğun ışık gönderilmiş, ön taraftan inceleme yapılmış ve fotoğrafları çekilmiştir. Numunelerin hiçbirinde bir kaynak hatası olan gözenek veya herhangi bir boşluk oluşumu görülmemiştir. Ayrıca filmlerin arkasından yoğun ışık gönderildiğinde ön taraftan gözlemlenen kaynak bölgesinin izi de dikkat çekmektedir.

Şekil 4.14'te 1-4 arası numaralandırılan ve farklı dalma derinlikleri dikkate alınarak oluşturulan tahribatsız malzeme muayenesi numuneleri incelenirse, düşük dalma derinliğinde kaynak bölgesinin iz çapı küçüktür. Bunun sebebi takımın dalma derinliği düşük olduğunda yumuşayan malzeme miktarının ve buna bağlı olarak da kaynak bölgesi alanının daha düşük oluşması ile doğrudan ilgilidir. Dalma derinliği arttıkça iz çapı artmış, buna paralel olarak da çekme kuvveti değerleri daha üst değerlere ulaşmıştır.

Şekil 4.14'te 5-12 arası numaralandırılan ve farklı bekleme süreleri dikkate alınarak oluşturulan tahribatsız malzeme muayenesi numuneleri incelenirse, düşük dalma derinliğinde olduğu gibi burada da, düşük bekleme süresi için kaynak bölgesi iz çapı küçüktür. Bunun sebebi takımın bekleme süresi düşük olduğunda yumuşayan malzeme miktarının ve buna bağlı olarak da kaynak bölgesi alanının daha düşük oluşması ile doğrudan ilgilidir. Bekleme süresi arttıkça kaynak bölgesi iz çapı artmış, buna paralel olarak da çekme kuvveti değerleri daha üst değerlere ulaşmıştır. Dalma derinliği ve bekleme süresi parametrelerinin incelendiği çekme deneylerinde de bu durum açıkça görülmektedir.



Şekil 4.14: Numunelerin tahribatsız malzeme muayenesi filmlerinin fotoğrafları

Ayrı ayrı incelendiğinde, dalma derinliğinin artması ve bekleme süresinin artması, incelenen çekme kuvveti açısından birbirine paralel sonuçlar vermiştir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri, dalma derinliği ve bekleme süresine dolayısıyla da kaynak bölgesinin iz çapına bağlı olarak artmıştır. Ayrıca oluşturulan kaynak noktalarında herhangi bir kaynak hatasının oluşmaması, oluşturulan kaynak noktalarının iyi kaynak edildiğini göstermiştir.

4.4. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numuneleri İçin Çekme Deneyi Sonrasında Ortaya Çıkan Kopma Bölgelerinin Optik Mikroskop ve SEM Görüntüleri Yardımı İle İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında, çekme deneyi sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelenmesi

Tablo 4.1'de 800 d/d, Tablo 4.2'de 1250 d/d ve Tablo 4.3'te 2000 d/d devir sayısında ve de farklı bekleme süreleri için oluşturulan birleştirmelerin, çekme deneyleri sırasında çekme kuvveti ile çekme uzaması arasında çizilen eğrilerin altında kalan alanların (numunelerin absorbe ettiği enerjilerin) sayısal değerleri verilmiştir. Numune yüksek miktarda enerji absorbe ettiyse elde edilen çekme kuvveti değeri de genellikle (bazen düşük enerji değerleri için de yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır) yüksek olarak elde edilmiştir. Kolayca karşılaştırılabilmesi için tablolarda, bekleme süresinin olduğu sütunda, esas malzeme ve pimli bağlantı için de çekme kuvveti ve enerji değerleri verilmiştir. Burada verilen çekme kuvveti ve enerji değerleri, tez çalışmasında çekme deneyi sonrası kopma bölgeleri gösterilen ve fotoğrafları verilen numunelere aittir. Buradaki 0-200 sn aralığında değişen farklı bekleme sürelerinde oluşturulan kaynaklı bağlantılarda, devir sayısı 800 d/d - 1250 d/d ve 2000 d/d, dalma derinliği 5,5 mm, dalma hızı 100 mm/dak'dır.

Tablo 4.1: 800 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri

Bekleme Süresi (sn)		Çekme Kuvveti (N)	Enerji (J)
Esas Malzeme		3090	80,87
Pimli Bağlantı		1754	32,66
800 d/d	0	67,9	0,10
	25	164,2	0,34
	50	1277	5,66
	75	1298	5,85
	100	1583	10,84
	125	1661	9,70
	150	1514	8,43
	200	1648	4,53

Tablo 4.2: 1250 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri

Bekleme Süresi (sn)		Çekme Kuvveti (N)	Enerji (J)
Esas Malzeme		3090	80,87
Pimli Bağlantı		1754	32,66
1250 d/d	0	63,62	0,10
	25	1087	2,16
	50	1701	10,13
	75	1548	10,28
	100	1748	3,78
	125	1452	2,46
	150	1728	4,06
	200	1628	11,87

Tablo 4.3: 2000 d/d devir sayısında, farklı bekleme süreleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri

Bekleme Süresi (sn)		Çekme Kuvveti (N)	Enerji (J)
Esas Malzeme		3090	80,87
Pimli Bağlantı		1754	32,66
2000 d/d	0	84,42	0,11
	25	1468	3,00
	50	1515	11,80
	75	1460	9,32
	100	1503	2,80
	125	1461	2,23
	150	1501	2,83
	200	1501	8,95

Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler, 0-200 sn aralığında değişen farklı bekleme sürelerinde, 800 d/d - 1250 d/d ve 2000 d/d devir sayılarında, 5,5 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızında oluşturulan kaynaklı birleştirmeler için, karşılaştırma amacı ile her bekleme süresi için ve de farklı devir sayılarında Şekil A.1 ile Şekil A.8 arasındaki sekiz adet şekilde eklerde verilmiştir. Düşük bekleme süreleri için 1250 d/d ve 2000 d/d devir sayıları için, yüksek bekleme süreleri için ise 800 d/d devir sayısı için enerji değerleri yüksek çıkmıştır. Bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği çalışmanın bu kısmında, elde edilen enerji değerleri pimli bağlantının ve de esas malzemenin absorbe ettiği enerji değerlerinden düşük olmakla beraber pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvveti değeri yakalanmıştır.

800 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 ile 25 saniye bekleme süreleri için mod 1 tipi bir kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.1 ve Tablo A.2, 800 d/d için incelendiğinde, 0 sn için neredeyse oluşmamakla birlikte 25 sn' lik bekleme süresi için mod 1 tipi kırılmaya uğrayan parçaya ait optik mikroskop görüntülerinde bindirme bağlantısının alt parçasında, sünek kırılmayı ifade eden kopma öncesi çekme uzamaları çok az miktarda gözlenmiştir. Çekme uzamalarına ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.1'den incelendiğinde, elde edilen oldukça düşük enerji değerleri, elde edilen düşük çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır. Ayrıca uzamaların yönü, bize alt parçanın konumu hakkında da bilgi vermektedir.

50 sn ve 150 sn aralığındaki bekleme süreleri için ise kopmanın şekil değiştirerek mod 2 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.3, Tablo A.4, Tablo A.5, Tablo A.6 ve Tablo A.7, 800 d/d için incelendiğinde, bekleme süresinin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda olduğu gibi burada da malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme uzaması gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait optik mikroskop incelemesinde net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.1'den incelenip, düşük bekleme sürelerinde

elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değerleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır.

200 saniye için ise kopmanın tekrar şekil değiştirerek mod 3 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.8, 800 d/d için incelendiğinde *"a"*, *"c"* ve *"d"* SEM görüntülerinin birbirine çok benzediği ve pürüzsüz bir yapıda olduğu görülmektedir. *"b"* de özellikle altta uzamış lifler ve malzemenin yüzeyinde ise çekme uzamaları görülmektedir. *"e"* de tam geçiş bölgesinde çekme uzamaları dikkat çekmekle beraber *"f"* de tam geçiş bölgesinin sağ ve solunda farklı yapılar göze çarpmaktadır. Sağ taraftaki yüzey girinti çıkıntılarla kaplanmış ve pürüzlü iken sol taraftaki yüzey ise prüzsüzdür. Geçiş bölgesinde çok net olarak görülen çekme uzamalarına ilaveten ilgili kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.1'den incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen nispeten yüksek enerji değeri, çekme kuvveti değerinin yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

Şekil 4.7'de 1250 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 saniye bekleme süresi için mod 1 tipi bir kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.1, 1250 d/d için incelendiğinde, 0 sn' lik bekleme süresi için mod 1 tipi kırılmaya uğrayan parçaya ait optik mikroskop görüntülerinde bindirme bağlantısının alt parçasında sünek kırılmayı ifade eden kopma öncesi çekme uzamaları çok az miktarda gözlenmiştir. Çekme uzamalarına ilaveten ilgili kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.2'den incelendiğinde, elde edilen oldukça düşük enerji değeri, çekme kuvveti değerinin düşük çıkmasını açıklamaktadır. Ayrıca uzamaların yönü, bize alt parçanın konumu hakkında da bilgi vermektedir.

25 sn ve 75 sn aralığındaki bekleme süreleri için ise kopmanın şekil değiştirerek mod 2 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.2, Tablo A.3 ve Tablo A.4, 1250 d/d için incelendiğinde, bekleme süresinin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda olduğu gibi burada da malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme uzaması gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait optik mikroskop incelemesinde net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki

artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.2'den incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değerleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır.

Ancak çekme kuvvetlerinin genelde daha yüksek değerlere ulaştığı 100 sn ve 150 sn aralığındaki bekleme süreleri için kopmanın şekil değiştirerek mod 3 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.5, 1250 d/d için incelendiğinde ise, *"b"* de sünek kırılmayı karakterize eden, çekme uzamalarının olduğu bir yüzey görünümü görülmektedir. Çekme uzamaları, elde edilen çekme kuvvetinin oldukça yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Eklerdeki Tablo A.6, 1250 d/d için incelendiğinde, *"f"* de gevrek kırılmayı karakterize eden, uzamaların olmadığı yüzey görünümü görülmektedir. Tam geçiş bölgesinin sağ ve solunda benzer yapılar göze çarpmaktadır. Çekme uzamalarının olmayışı ve gevrek yapının varlığı elde edilen çekme kuvvetinin nispeten düşük çıkmasını açıklamaktadır. 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi için ise ortalaması en yüksek çekme kuvveti değeri elde edilmiştir (her bir deney en az üç kere tekrarlandığından, diğer 1250 d/d, 150 sn için yapılan deneylerden elde edilen çekme kuvveti değerleri, buradaki değer ile toplanıp ortalaması alındığında en yüksek çekme kuvveti değeri elde edilmiştir). Kırılma tipi mod 3'tür ve eklerdeki Tablo A.7 1250 d/d için *"a"* mikro fotoğrafı incelendiğinde bu bölgede sünek kırılmayı karakterize eden önemli miktarda çekme uzamaları görülmektedir. Çekme kuvvetinin yüksek çıkmasını da bu uzamalar açıklamaktadır. Buradan yola çıkarak, daha sonraki çalışma aşamalarında, dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisini incelemek için, elde edilen bu optimum değerler, farklı dalma derinlikleri için uygulanarak çalışılmıştır. Tablo 4.2'den elde edilen enerji değeri incelendiğinde ise yukarıdaki sonuçları destekleyici bilgi vermektedir. Çünkü 100 sn ve 150 sn bekleme süreleri için elde edilen enerji değerleri birbirine yakındır ve 125 sn bekleme süresinde elde edilen enerji değerinden yüksektir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri de 100 sn ve 150 sn bekleme süreleri için birbirine çok yakın ve de 125 sn bekleme süresi için elde edilen çekme kuvveti değerinden oldukça yüksektir.

Çekme kuvvetinin bir miktar düşüş gösterdiği 200 saniyelik daha uzun bekleme süresi için ise kopmanın şekil değiştirerek tekrar mod 2 şeklinde gerçekleştiği

görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.8, 1250 d/d için incelendiğinde ise, bekleme sürenin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda olduğu gibi burada da malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme uzaması gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait optik mikroskop incelemesinde net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.2'den incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değeri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerini açıklamaktadır.

Şekil 4.8'de 2000 d/d için çekme deneyleri sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 0 saniye bekleme süresi için mod 1 tipi bir kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.1, 2000 d/d için incelendiğinde, 0 sn' lik bekleme süresi için mod 1 tipi kırılmaya uğrayan parçaya ait optik mikroskop görüntülerinde bindirme bağlantısının alt parçasında, sünek kırılmayı ifade eden kopma öncesi çekme uzamaları çok az miktarda gözlenmiştir. Çekme uzamalarına ilaveten ilgili kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.3'ten incelendiğinde, elde edilen oldukça düşük enerji değeri de, çekme kuvveti değerinin oldukça düşük çıkmasını açıklamaktadır. Ayrıca uzamaların yönü, bize alt parçanın konumu hakkında da bilgi vermektedir.

2000 d/d ve 25 sn'lik bekleme süresi için ise kopmanın şekil değiştirerek mod 3 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Buna karşılık 800 d/d için 200 sn'lik bekleme süresinde, 1250 d/d için ise 100 sn'lik bekleme süresinde ilk mod 3 tipi kırılma ile karşılaşılmıştır. 2000 d/d devir sayısı, diğer devir sayılarının 25 sn'lik bekleme süreleri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır. Çünkü 1250 d/d ve 25 sn bekleme süresinde mod 2, 800 d/d ve 25 sn bekleme süresinde ise mod 1 tipi kırılma oluşmuştur. Fakat diğer bekleme sürelerinin ilk mod 3 kırılmalarına göre düşük bir çekme kuvveti elde edilmiştir. Devir sayısının yüksek olması, 25 sn'lik kısa bir bekleme süresinde bile sürtünmeden dolayı sıcaklığı iyice artırmıştır. Eklerdeki Tablo A.2, 2000 d/d için incelendiğinde, *"d"* de çekme uzamalarının olmayışı ve yapıdaki mikro boşlukların varlığı elde edilen çekme kuvvetinin diğer devir sayılarına ait mod 3 kırılmalarından düşük çıkmasını açıklıyor. Oluşan gözenekli yapının ortaya çıkmasında yüksek devir sayısının

dolayısıyla da sıcaklığın etkisinin olduğu düşünülmektedir. "*f*" de ise, tam geçiş bölgesinde oldukça büyük gözenekler ve geçiş bölgesinin sağında gevrek kırılmayı karakterize eden pürüzsüz fakat dalgalı bir yüzey görülmektedir. Çekme uzamalarının olmayışı, gevrek ve de gözenekli yapının varlığı çekme kuvvetinin diğer mod 3 kırılmalarına göre düşük çıkmasını desteklemektedir. Fakat 25 sn bekleme süresi göz önüne alındığında, diğer devir sayıları için 25 sn bekleme süresinde elde edilen çekme kuvveti değerlerinden daha yüksek bir değere ulaşılmıştır. İlgili kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.3'ten incelendiğinde, elde edilen enerji değerinin diğer devir sayıları için 25 sn bekleme süresinde elde edilen enerji değerlerinden yüksek çıkması, buradaki çekme kuvveti değerinin yüksek çıkması sonucunu desteklemektedir.

50 sn ve 75 sn bekleme süreleri için ise kopmanın tekrar şekil değiştirerek mod 2 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.3 ve Tablo A.4, 2000 d/d için incelendiğinde, bekleme süresinin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda olduğu gibi burada da malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme uzaması gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait optik mikroskop incelemesinde net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki artış, bu bölgede malzemenin sünek özellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çekme uzamalarındaki artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.3'ten incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değerleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır. Ulaşılan çekme kuvveti değerleri ise, 800 d/d'da elde edilen çekme kuvveti değerlerinden yüksek, 1250 d/d'da elde edilen çekme kuvveti değerlerinden düşük çıkmıştır. Bu durumun, artan devir sayısına ve de bekleme süresine bağlı olarak, sıcaklığın oldukça fazla artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

100 sn ve 125 sn bekleme süreleri için kopmanın tekrar şekil değiştirerek mod 3 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.5 ve Tablo A.6, 2000 d/d için incelendiğinde, her iki tabloda da, "*b*" de uzamış lifler ve çekme uzamaları görülmemektedir. Ortada ağ şeklinde sünek kırılmayı gösteren kısmın sağ ve solunda gevrek kırılmayı gösteren yüzeyler hakimdir. Çekme kuvvetinin düşük çıkmasını bu

durum açıklamaktadır. Eklerdeki Tablo A.5 *"c"* de ise çekme uzamalarının ve de yer yer boşlukların olduğu bir yüzey görünmektedir. Her ne kadar çekme uzamaları yüksek çekme kuvvetinin elde edilmesini sağlasa da, oluşan boşluklar çekme kuvvetinin düşmesine neden olmuştur. Devir sayısının yüksek olması ve 100 sn'lik yüksek bir bekleme süresinden dolayı sıcaklık iyice artmış, sonuç olarak oluşan boşluklu yapının ortaya çıkmasında yüksek devir sayısının dolayısıyla da sıcaklığın etkisi ön plana çıkmıştır. *"f"* de, tam geçiş bölgesinin hem sağında hem de solunda oldukça büyük gözenekli bir yapının varlığı ayrıca sağ taraftaki mikro gözeneklerin varlığı çekme kuvvetinin düşük çıkmasını açıklamaktadır. Eklerdeki Tablo A.6 *"f"* de ise, geçiş bölgesinin sağında gevrek kırılmayı karakterize eden pürüzsüz ve düz yüzey görünümü vardır. Çekme uzamalarının olmayışı ve gevrek yapının varlığı elde edilen çekme kuvvetinin düşük çıkmasını açıklamaktadır. 2000 d/d gibi yüksek bir devir sayısına ilaveten, 125 sn'lik uzun bir bekleme süresinin de varlığı, sürtünmeden dolayı sıcaklığı iyice artırmış, dolayısıyla da artan bu sıcaklığın ve de sonrasındaki soğumanın etkisi ile malzemenin gevrekleşmesine neden olmuştur. Yukarıdaki bilgilere ilaveten, elde edilen enerji değerleri Tablo 4.3'ten incelendiğinde ise yukarıdaki sonuçları destekleyici bilgi vermektedir. Çünkü 100 sn ve 125 sn bekleme süreleri için elde edilen enerji değerleri birbirine yakındır ve düşüktür. Bütün bunlar çekme kuvveti değerlerinin bir miktar düşük çıkmasını açıklamaktadır.

150 sn ve 200 sn'lik daha uzun bekleme süreleri için ise kopmanın tekrar şekil değiştirerek mod 2 şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Eklerdeki Tablo A.7 ve Tablo A.8, 2000 d/d için incelendiğinde, bekleme süresinin artışıyla beraber tüm omuz esaslı kopmalarda olduğu gibi burada da malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme uzaması gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait optik mikroskop incelemesinde net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarındaki artış, bu bölgede malzemenin sünek özellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çekme uzamalarındaki artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.3'ten incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değerleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır. Ulaşılan bu çekme kuvveti değerleri, aynı bekleme süreleri için 800 d/d'da elde edilen ve de 1250 d/d'da elde edilen çekme kuvveti değerlerinden düşük çıkmıştır. Bu durumun, artan

devir sayısına ve de bekleme süresine bağlı olarak, sıcaklığın oldukça fazla artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca 150 sn için kopmaya neden olan yırtılma diğer omuz esaslı kopma biçimlerinden farklılık göstererek, kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olarak ve ayrıca üst levhanın enine kesiti doğrultusunda ilerlemiştir.

Ayrıca yapılan çalışmaların sonucunda, 1250 d/d ve 2000 d/d için herhangi bir bekleme süresinde elde edilen çekme kuvveti değerleri, tekrarlanan her üç deneyde de birbirine yakın değerlerdedir. Herhangi bir bekleme süresi için en yüksek ve en düşük çekme kuvvetleri arasındaki fark maksimum 300-400 N aralığında salınım yaparken, minimum 50-100 N aralığında salınım yapacak kadar düştüğü de görülmüştür. Buradan 1250 ve 2000 d/d için denge durumunun mevcut olduğu belirlenmiştir. Fakat 800 d/d için ise, geniş bir aralıkta salınım yaptığı görülmüştür. Örneğin 125 sn bekleme süresi için 800 d/d'da en düşük 584 N, en yüksek 1661 N çekme kuvveti elde edilmiştir. Salınım neredeyse 1100 N'a ulaşmıştır. Bu nedenle deney 6 kez tekrarlanmıştır. 800 d/d'da diğer bekleme süreleri içinde bu büyük salınımlar devam etmiş, bu nedenle de deneyler 3 kereden fazla tekrarlanmıştır. Buradan, 800 d/d'da ulaşılan kaynak sıcaklığının, karıştırma safhasında homojen bir karışma sağlayacak düzeye çıkamadığı ve denge durumunun olmadığı belirlenmiştir.

800 d/d'da, SEM fotoğraflarında herhangi bir boşluk ve gözenek görülmemekle beraber, çekme kuvveti değerlerinde geniş bir alanda salınım vardır. Ortalama çekme kuvveti değerleri olarak, üç devir sayısı arasında en düşük ortalama çekme kuvveti değerine 800 d/d'da ulaşılmıştır. 2000 d/d'da ise çekme kuvveti değerlerinin daha dar bir aralıkta salınım yaptığı görülmüştür. Ortalama çekme kuvveti değerleri tespit edilince, bu değerlerin 800 d/d'da elde edilen değerlerden daha yüksek, 1250 d/d'da elde edilen değerlerden ise çoğunlukla daha düşük olduğu görülmüştür. SEM fotoğrafları incelendiğinde ise, 2000 d/d için boşluklu ve gözenekli yapıların ortaya çıkması dikkat çekici bir noktadır. Bu durum 2000 d/d için değil de, 1250 d/d için daha yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edilmesini açıklamaktadır. Böylece 1250 d/d devir sayısı için optimum dönme hızı yakalanmıştır. Çünkü, hem çekme kuvveti değerlerindeki salınımlar daha dar bir aralıkta kalmış ve ortalama çekme kuvveti değerleri 800 d/d ve 2000 d/d'dan daha yüksek çıkmış, hem de yapılan SEM

incelemelerinde boşluklu ve gözenekli bir yapının oluşmadığı görülmüştür. Ayrıca mod 1 ve mod 2 tipi kırılmalara uğrayan parçaların tamamında, optik mikroskop ile yapılan incelemelerle de, uzamaların çekme kuvvetine olumlu yönde önemli etkisinin olduğu belirlenmiştir. Böylelikle, bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelendiği araştırmanın bu kısmında, her iki parametrenin de kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu açıkça belirlenmiştir.

4.4.2. Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelenmesi

Tablo 4.4'te 1250 d/d ve de farklı dalma derinlikleri için oluşturulan birleştirmelerin, çekme deneyleri sırasında çekme kuvveti ile çekme uzaması arasında çizilen eğrilerin altında kalan alanların (numunelerin absorbe ettiği enerjilerin) sayısal değerleri verilmiştir. Numune yüksek miktarda enerji absorbe ettiyse elde edilen çekme kuvveti değeri de genellikle (bazen düşük enerji değerleri için de yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır) yüksek olarak elde edilmiştir. Kolayca karşılaştırılabilmesi için tabloda, dalma derinliğinin olduğu sütunda, esas malzeme ve pimli bağlantı için de çekme kuvveti ve enerji değerleri verilmiştir. Burada verilen çekme kuvveti ve enerji değerleri, tez çalışmasında çekme deneyi sonrası kopma bölgeleri gösterilen ve fotoğrafları verilen numunelere aittir. Buradaki 4,25 - 5,85 mm aralığında değişen farklı dalma derinliklerinde oluşturulan kaynaklı bağlantılarda, bekleme süresi 150 sn, devir sayısı 1250 d/d ve dalma hızı 100 mm/dak'dır.

Tablo 4.4: 1250 d/d devir sayısında, farklı dalma derinlikleri için oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri

Dalma Derinliği (mm)	Çekme Kuvveti (N)	Enerji (J)
Esas Malzeme	3090	80,87
Pimli Bağlantı	1754	32,66
4,25	1152	5,21
4,35	1034	6,49
4,45	1179	6,47
4,55	1018	3,91
4,65	1832	4,68
4,70	1812	4,74
4,75	1812	4,32
4,85	1660	3,31
4,90	1626	17,30
4,95	1662	15,29
5,00	1603	2,75
5,10	1634	3,29
5,15	1776	4,14
5,20	1682	3,59
5,25	1722	3,65
5,30	1454	2,32
5,35	1565	11,86
5,40	1734	8,07
5,50	1728	4,06
5,60	1649	3,16
5,70	1523	2,49
5,80	1693	3,65
5,85	1661	3,45

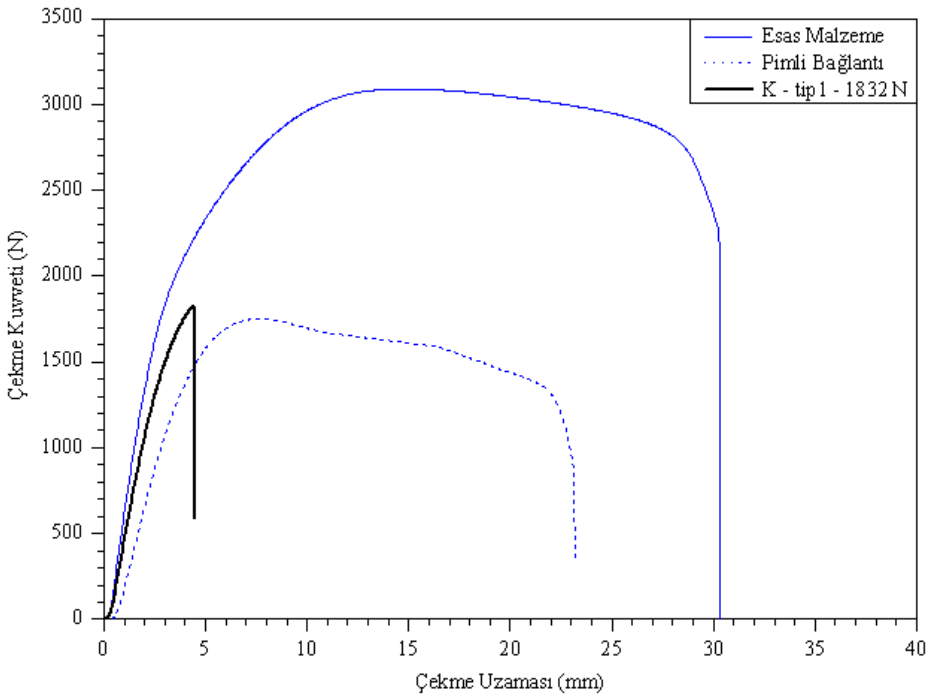
Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler, 4,25 - 5,85 mm aralığında değişen farklı dalma derinliklerinde, 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızında oluşturulan kaynaklı birleştirmeler için, her dalma derinliğinde eklerdeki Şekil A.9 ile Şekil A.31 arasındaki yirmi üç adet şekilde ayrı ayrı verilmiştir. Dalma derinliği parametresinin incelendiği çalışmanın bu kısmında, elde edilen enerji değerleri pimli bağlantının ve de esas malzemenin absorbe ettiği enerji değerlerinden düşük olmakla beraber pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvveti değeri aşılmıştır.

Takım dalma derinliğinin, kopma şekline etkileri Şekil 4.12'de görülmektedir. Takım omzunun 0-1,6 mm aralığında değişen değerlerde malzeme içine daldırılması ile

ulaşılan derinlik toplam malzeme kalınlığının % 70,8 ile % 97,5'i aralığında değişen oranlarına karşılık gelmektedir. Çekme kuvvetinin en yüksek olduğu dalma derinliklerinden daha düşük derinliklerde (4,25-4,55 mm aralığında) kopma pim esaslıdır yani mod 1 tipi kırılma gerçekleşmiştir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri de bekleme süresine ve oluşan iz çapına da bağlı olarak düşük çıkmıştır. Eklerdeki Tablo A.9 incelendiğinde, mod 1 tipi kırılmaya uğrayan parçalara ait optik mikroskop görüntülerinde bindirme bağlantısının alt parçasında, sünek kırılmayı ifade eden kopma öncesi çekme uzamaları az miktarda gözlenmiştir. Çekme uzamalarına ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.4'ten incelendiğinde, elde edilen nispeten düşük enerji değerleri, çekme kuvveti değerlerinin de düşük çıkmasını destekleyici bilgi vermektedir. Ayrıca uzamaların yönü, bize alt parçanın konumu hakkında da bilgi vermektedir.

Çekme kuvvetinin en yüksek değerlere ulaştığı 4,65-4,70-4,75 mm'lik dalma derinlikleri için ise kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği yani mod 3 tipi kırılma görülmüştür. Bu dalma derinlikleri sırasıyla toplam malzeme kalınlıklarının %77,5-%78,3-%79,2'sine karşılık gelmektedir. Elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri, 4,65 mm dalma derinliğinde 1832 N'dur. Eklerdeki Tablo A.9 ve Tablo A.10 incelendiğinde mod 3 tipi kırılmaya uğrayan bu üç parçaya ait SEM görüntüleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini ortaya koyacak önemli ip uçları sunmaktadır. Eklerdeki Tablo A.9'daki, 4,65 mm dalma derinliği için *"a"* mikro fotoğrafı incelenirse, önemli miktarda çekme uzamaları görülmektedir. Oldukça yoğun miktarda uzamış liflerin varlığı, incelenen bu bölgede kırılmanın sünek olarak gerçekleştiğini çok açık göstermektedir. Bu durum, elde edilen çekme kuvvetinin yüksekliğini de açıklayıcı niteliktedir. *"f"* fotoğrafını incelersek, geçiş bölgesinin sağı ve solu aynı mikro yapıya sahiptir. Burada kullanılan devir sayısı, bekleme süresi ve dalma derinliği parametreleri, yapılan deneyler arasında en yüksek çekme kuvveti değerine ulaşılan optimum parametrelerdir. Bu parametrelerde ortaya çıkan sıcaklık değerleri de, yapılan deneyler arasında malzemenin bozulmadan iyi kaynak edilmesi için optimum değerlere ulaşmıştır. 4,70-4,75 mm'lik diğer iki dalma derinliğinde de 4,65 mm'lik dalma derinliğinde elde edilen çekme kuvvetinden biraz düşük ama oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Bu üç dalma derinliği içinde, mikro yapı fotoğrafları

birbirine oldukça benzer görünümdedir. Yukarıdaki bilgilere ilaveten, elde edilen enerji değerleri Tablo 4.4'ten incelendiğinde bu üç dalma derinliği numunesinin de absorbe ettiği enerji değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu, bu nedenle de elde edilen çekme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Dalma derinliği parametresinin incelendiği bağlantılardan, en yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği numune ile pimli bağlantı ve esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi ise Şekil 4.15'te görülmektedir. Dalma derinliği ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda elde edilen 1832 N en yüksek çekme kuvveti değeri, numunenin absorbe ettiği enerji değeri nispeten düşük olmasına rağmen pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvvetinin üzerinde, esas malzemeden elde edilen çekme kuvvetinin ise altındadır.



Şekil 4.15: En yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği numune ile pimli bağlantı ve esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

Eklerdeki Tablo A.10, Tablo A.11 ve Tablo A.12 incelendiğinde ise dalma derinliğinin daha da artması (4,85-5,85 mm aralığında) ile iki parça haricinde, kopmanın yine mod 3 tipi gerçekleştiği fakat çekme kuvveti değerlerinin yaklaşık 1500-1750 N aralığında değişim gösterecek şekilde bir miktar düştüğü görülmüştür. Buradaki SEM görüntüleri için hemen hemen bütün *"a"* ve *"c"* fotoğraflarında

çekme uzamaları az yada çok görülmektedir. Çekme uzamalarının az olduğu fotoğraflar bize ağırlıklı olarak gevrek kırılmanın hakim olduğunu, çekme uzamalarının çok olduğu fotoğraflar ise ağırlıklı olarak sünek kırılmanın hakim olduğunu anlatmaktadır. Yukarıdaki bilgilere ilaveten, elde edilen enerji değerleri Tablo 4.4'ten incelendiğinde, en yüksek çekme kuvveti değerlerine, en yüksek enerji absorbe eden numunelerde ulaşılmamakla beraber, yüksek enerji absorbe eden numuneler için çekme kuvveti değerlerinin belirli değerlerin altına düşmediği görülmüştür.

Eklerdeki Tablo A.10 ve Tablo A.11'de, sadece dalma derinliği 4,95 mm ve 5,35 mm olan iki parçada ise kopmanın şekil değiştirerek omuz esaslı yani mod 2 tipinde gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri de bekleme süresine ve oluşan iz çapına da bağlı olarak mod 1 kırılmalarından oldukça yüksek, mod 3 kırılmalarından ise çoğunlukla düşük çıkmıştır. Kırılma tipi mod 2 olan bu iki parçaya ait optik mikroskop görüntülerinde bindirme bağlantısının alt parçasında sünek kırılmayı ifade eden çekme uzamaları çok net olarak gözlenmiştir. Çekme uzamalarındaki artışa ilaveten ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerji değerleri Tablo 4.4'ten incelenip, düşük bekleme sürelerinde elde edilen enerji değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen yüksek enerji değerleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini açıklamaktadır.

Böylelikle, dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile incelendiği araştırmanın bu kısmında, dalma derinliğinin kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu açıkça belirlenmiştir.

4.4.3. Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri yardımı ile birlikte değerlendirilmesi

800 d/d devir sayısından 1250 d/d devir sayısına çıkıldığında daha fazla sürtünme oluşacağından sıcaklık artar. Yani malzeme daha yumuşamış hale gelir. 2000 d/d'da ise daha da iyi yumuşar. Fakat incelenen SEM görüntülerinde, 2000 d/d'da gözenekli bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. 800 d/d ve 1250 d/d'da ise gözenekli yapıya

rastlanmamıştır ve bu bir avantajdır. 800 d/d'nın dezavantajı ise aynı parametrelerde oluşturulan SKNK'lı bağlantıların tekrarlanan çekme deneyleri için elde edilen çekme kuvveti değerlerinde geniş bir aralıkta salınım olduğu belirlenmiştir. 1250 d/d ve 2000 d/d'da ise tekrarlanan çekme deneylerinde elde edilen çekme kuvveti değerlerinde oluşan salınım dar bir aralıkta kalmıştır ve bu bir avantajdır. Sonuç olarak 800 d/d'da çekme kuvveti değerlerinde oldukça geniş aralıklarda salınımlar oluşması ve 2000 d/d'da ise gözenekli yapının oluşması ile karşılaşılmıştır. Bu durumda, hem gözenekli yapının oluşmadığı, hem de tekrarlanan deneylerde elde edilen çekme kuvveti değerlerinde geniş salınımlar olmayan 1250 d/d ön plana çıkmıştır. Buradan yola çıkarak 800 d/d için yeterli kaynak sıcaklığına ulaşılamadığı için, yeterince yumuşamanın sağlanamadığı ve yumuşayan bölgenin yeterince homojen karışamadığı, bu nedenle de çekme kuvveti değerlerinde salınımlar olduğu belirlenmiştir. 2000 d/d için ise kaynak işlemi için gerekli sıcaklıkların oldukça üstüne çıkılmasına bağlı olarak soğuma sırasında gözenekli yapının oluştuğu belirlenmiştir. Böylece 800 d/d'da yeterli yumuşamanın sağlanamamasına bağlı olarak kaynak alanının yeterince genişlememesinden kaynaklanan ve 2000 d/d'da ise gözenekli yapının oluşmasından kaynaklanan durum gereği bağlantının dayanımında düşüş olacağı açıktır. Nitekim böyle de olmuştur ve en yüksek çekme kuvvetine de 1250 d/d'da ulaşılmıştır.

4.5. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Bağlantılarından ve Esas Malzemelerden Alınan Numunelerin DSC Analiz Sonuçlarının Yorumlanması

Kullanılan PP malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (yumuşama sıcaklığı) 88 ^{o}C'dir (Catalog1 2006). Bu sıcaklığın hemen üstünde malzeme yumuşamaya başlayacak fakat erime olmayacaktır. Kaynak noktaları ise camsı geçiş sıcaklığının üstünde, erime sıcaklığının ise altında oluşturulmaktadır. Çizilen grafik ve tablolarda numune adından sonra belirtilen *em:* esas malzemeyi, *kb:* kaynak bölgesini ifade etmektedir.

12 adet esas malzemenin DSC analizi sonucu çizilen grafikleri eklerdeki Şekil A.32 ile Şekil A.43 arasında görülmektedir. Bu grafiklerden, esas malzemenin entalpi ve onset, peak, endset sıcaklık değerlerinin belirli bir aralıkta salınım yaptığı görülmüştür. Bu nedenle esas malzemeye ait standart sapma değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan standart sapma değerlerinin küçük çıkması, bize deneyde elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğunu ve güvenilir olduğunu ifade etmektedir (Tablo 4.5). 12 adet kaynak bölgesinin DSC analizi sonucu çizilen grafikleri eklerdeki Şekil A.44 ile Şekil A.55 arasında görülmektedir. Farklı kaynak bölgelerinin analizi sonucu elde edilen grafiklerden, entalpi ve onset, peak, endset sıcaklık değerlerinin yer aldığı Tablo 4.6 oluşturulmuştur.

Tablo 4.5: Esas malzemenin entalpi, onset, peak, endset değerleri ve standart sapmaları

Numune Adı	**Entalpi (J/g)**	**Onset (°C)**	**Peak (°C)**	**Endset (°C)**
T1-em	-84,91	155,69	164,69	169,22
T2-em	-80,17	153,10	167,16	175,46
T3-em	-86,02	160,84	167,68	176,10
T4-em	-82,02	156,35	164,78	172,16
T5-em	-79,20	149,89	166,85	176,95
T6-em	-75,37	158,23	165,05	170,15
T7-em	-75,69	155,51	174,06	184,46
T8-em	-82,39	162,73	171,13	176,74
T9-em	-90,22	157,90	165,19	172,80
T10-em	-76,47	153,50	164,04	169,84
T11-em	-64,05	154,29	165,90	172,29
T12-em	-76,17	164,28	167,02	171,40
Max.	-90,22	164,28	174,06	184,46
Min.	-64,05	149,89	164,04	169,22
Ortalama	-79,39	156,86	166,96	173,96
Standart Sapma	**6,69**	**4,18**	**2,93**	**4,28**

Tablo 4.6: Kaynak bölgesinin parametreleri ve entalpi, onset, peak, endset değerleri

Parametreler		Numune Adı	Entalpi (J/g)	Onset (°C)	Peak (°C)	Endset (°C)
Dalma Derinliği (mm)	4,25 mm 1250 d/d-150 sn	**T1-kb**	-67,59	157,06	168,85	173,79
	4,65 mm 1250 d/d-150 sn	**T2-kb**	-81,88	166,88	171,94	176,98
	5,00 mm 1250 d/d-150 sn	**T3-kb**	-58,54	151,29	170,61	179,08
	5,80 mm 1250 d/d-150 sn	**T4-kb**	-71,19	158,17	165,25	172,28
Bekleme Süresi (sn)	0 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T5-kb**	-92,38	158,04	167,90	174,22
	25 sn 1250d/d-5,5 mm	**T6-kb**	-71,98	154,44	163,77	170,22
	50 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T7-kb**	-74,33	158,98	164,15	175,60
	75 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T8-kb**	-72,13	155,83	165,67	171,60
	100 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T9-kb**	-68,70	155,72	169,03	173,86
	125 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T10-kb**	-69,97	156,20	169,47	176,91
	150 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T11-kb**	-72,20	160,51	166,84	171,88
	200 sn 1250 d/d-5,5 mm	**T12-kb**	-78,06	154,54	166,18	172,21

Esas malzemeye ait ortalama değerler için, standart sapma değerleri ± 1σ hesaba katılarak grafikler çizilmiştir. Aynı grafiklerde kaynak bölgesinden elde edilen DSC verilerinin, kaynak parametreleri olan bekleme süresi ve dalma derinliği ile değişimi de yer almaktadır. Kaynak bölgesinin entalpi ve onset, peak, endset sıcaklık değerleri, esas malzemeye ait entalpi ve onset, peak, endset sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Eklerdeki Şekil A.56'da dalma derinliği ile onset sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte, 4,25 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için kaynak bölgesinin onset sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının (bandının) içinde kalmıştır. 4,65 mm için bu aralığın biraz üzerinde, 5 mm için ise biraz altındadır. Eklerdeki Şekil A.57'de bekleme süresi ile onset sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte ise kaynak bölgesinin onset sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının içinde kalmıştır. Eklerdeki Şekil A.58'de dalma derinliği ile peak sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte, 4,25 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için kaynak bölgesinin peak sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma

aralığının (bandının) içinde kalmıştır. 4,65 mm ve 5 mm için ise standart sapma aralığının bir miktar üstündedir. Eklerdeki Şekil A.59'da bekleme süresi ile peak sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte ise kaynak bölgesinin peak sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının içinde kalmıştır. Sadece 25 sn için ise standart sapma aralığının bir miktar altındadır. Eklerdeki Şekil A.60'da dalma derinliği ile endset sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte, 4,25 mm, 4,65 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için kaynak bölgesinin endset sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının (bandının) içinde kalmıştır. Sadece 5 mm için ise standart sapma aralığının bir miktar üstündedir. Eklerdeki Şekil A.61'de bekleme süresi ile endset sıcaklık değerinin değişiminin incelendiği grafikte ise kaynak bölgesinin endset sıcaklık değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının içinde kalmıştır. Eklerdeki Şekil A.62'de dalma derinliği ile entalpi değerinin değişiminin incelendiği grafikte, 4,25 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için kaynak bölgesinin entalpi değerleri, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının (bandının) bir miktar altındadır. 4,65 mm için ise standart sapma aralığının içindedir. Eklerdeki Şekil A.63'te bekleme süresi ile entalpi değerinin değişiminin incelendiği grafikte ise kaynak bölgesinin entalpi değerleri 0 sn için, esas malzeme için çizilen standart sapma aralığının biraz üzerinde, 25sn, 75 sn, 100 sn, 125 sn ve 150 sn için biraz altında, 50 sn ve 200 sn için ise bu aralığın içinde kalmıştır. Sonuç olarak eklerdeki Şekil A.56 ile Şekil A.63 arasındaki grafikler incelendiğinde kaynak bölgesinden elde edilen değerlerin esas malzeme için elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinde de, esas malzemede olan fakat aşırı olmayan, kabul edilebilir salınımlar vardır. Esas malzeme ile kaynak bölgesinin DSC analizi sonucu elde edilen veriler birbirine yakın olduğundan, kaynak bölgesindeki malzemenin yapısında bir bozulma olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca kaynak bölgesinin onset, peak, endset sıcaklık değerleri, esas malzemeye ait ortalama onset, peak, endset sıcaklık değerlerinin yer aldığı ve kaynak parametreleri olan dalma derinliği ve bekleme süresinin birlikte incelendiği eklerdeki Şekil A.64 ile Şekil A.65 grafiklerinde, salınımın oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Polimer malzemelerde kristallenme artınca malzemeyi eritmek için gerekli olan sıcaklık ve gram başına gerekli olan enerji yani entalpi değeri artar. Diğer bir deyişle

sıcaklığın ve entalpinin artması, kristallenmenin arttığını gösterir. Çok fazla kristallenme var ise, bu durumda polimer malzemenin yapısını bozabilmek yada eritebilmek, sürtünme karıştırma nokta kaynağı için ise yumuşatabilmek için daha fazla enerjiye gerek duyulacaktır. Bu enerji değeri ne kadar yüksek ise malzemeyi yumuşatmak için o kadar fazla enerji gerekiyor demektir. Bu enerji değeri ne kadar düşük ise malzemeyi yumuşatmak için o kadar az enerji gerekiyor demektir. Bu iki ifadeyi birlikte düşünürsek, kaynak işlemi için düşük enerji bir avantajdır. Çünkü malzeme daha çabuk akıcı hale gelir ve daha az enerji ile eriyor demektir. Yani daha az sürtünme ile, malzemede kaynak işlemi için gereken yumuşama sağlanır. Bu da devir sayısını düşürmeyi veya daha kısa bekleme süresinde kaynak işlemini gerçekleştirmeyi sağlar. Kristallenmenin çok fazla azalması ise malzemenin yapısının bozulduğunu gösterir. Bu durumda entalpi ve onset, peak, endset sıcaklık değerleri de çok düşecektir. Fakat malzeme bozulacağından, kaynak için bir avantaj olmaktan çıkar. Yapılan deneylerde ise elde edilen sonuçlar kabul edilebilir dar bir aralıkta salınım yapmaktadır. DSC analizi yapılan numunelerde esas malzeme ile kaynak bölgesi verileri birbirine yakın olmakla beraber esas malzeme baz alındığında, kaynak bölgesinde yer yer kristallenme artmış, yer yer azalmış ve yer yerde standart sapma aralığının içinde kalmıştır. Sonuç olarak kristallenmede, malzemede bozulma oluşturacak bir azalma veya artma söz konusu değildir. Buradan, kaynaklı bölgenin kristallenmesi artmıştır veya azalmıştır demek yerine, esas malzeme ile karşılaştırıldığında, kaynak sonrası malzemeyi bozacak önemli bir değişim yoktur demek doğru olacaktır.

Eğrilerde taralı alan erimenin en yoğun olduğu kristallenme bölgesidir. Malzeme, camsı geçiş sıcaklığı ile erimenin başladığı onset sıcaklık değeri arasında yumuşamış haldedir. Peak yani tepe noktası ise malzemenin erime noktasını, endset sıcaklık değeri ise malzemenin tamamen eridiğini göstermektedir. Endset sıcaklık değerinden sonrada malzeme ısıtılmaya devam edilirse, ilk başta bozulma gözlenmez iken sıcaklığın gittikçe artması ile bozulma başlayacaktır. Bağlantıların gerçekleştirildiği sıcaklık camsı geçiş sıcaklığının üstü, erime sıcaklığının altı olduğu için yapılan kaynak bağlantılarının renginde bozulmaya (sararma) rastlanmamıştır.

4.6. Farklı Parametrelerde Oluşturulan SKNK Numuneleri İçin Takımda Oluşan Eksenel Kuvvet ve Parçalarda Oluşan Sıcaklığın İncelenmesi

Eğrilerin üzerindeki F1 dönen takım ucu, F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmuştur. Tüm eksenel kuvvetin zaman ile değişiminin incelendiği eğrilerde, F1'in bir miktar düşmesinin nedeni literatürde de belirtildiği gibi erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanır. Bu karakteristik eğri, tüm bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızının incelendiği çalışmalarda aynı eğilimi gösterecek şekilde oluşmuştur. Ayrıca takımın omzu altındaki malzemenin sıcaklığı incelenirse, karıştırma işlemi tamamlanıpta üst parçanın üzerinden geri çekilir çekilmez infrared termometre ile kaynak noktasının merkezinde, farklı kaynak parametreleri ile yapılan tüm bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızının incelendiği çalışmalarda en fazla 101-184 ^{o}C aralığında değişen sıcaklık değerleri ölçülmüştür. PP ise yaklaşık 165 ^{o}C'de erir. En fazla 184 ^{o}C'ye kadar ölçülen sıcaklık değerleri, omzun temas ettiği üst parçanın en üst yüzeyinin sıcaklığıdır. Buda erime sıcaklığının üstüdür. Oysa SKNK katı faz kaynak yöntemidir. Malzeme yumuşar fakat erime meydana gelmez. Bunu şöyle açıklamak mümkündür; ölçülen en fazla 101-184 ^{o}C aralığında sıcaklık değerleri takımın omzunun temas ettiği üst parçanın en üst yüzeyinin merkezinin sıcaklık değerleridir. Bu kısım sürtünmenin en yoğun olduğu bölge olduğundan sıcaklık burada en yüksek değere ulaşmıştır. Kaynak takımının direkt malzeme ile temasta olduğu omuz ve uç kısımlarında sıcaklık değerlerinin yüksek olması beklenen bir sonuçtur ve literatürde de bu noktaya dikkat çekilmiştir. Kaynak takımının direkt malzeme ile temasta olmadığı üst yüzeyin hemen altındaki bölgelerde ve takım ucunun ise malzeme ile temasta olmadığı takım-malzeme ara yüzeyinden hemen içerideki bölgelerde ise aynı sıcaklık değerleri yoktur. Kaynak işlemi camsı geçiş sıcaklığının üstünde fakat erime sıcaklığının ise altındaki sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmektedir. Yani malzeme yumuşar fakat erimez. Kısaca, takımın kaynak edilecek malzeme ile direkt temasta olduğu omuz ve uç ara yüzeyi boyunca (kaynak bölgesi malzemesi ile dönen takım ucu ve omzu arasında) kısmi bir viskozitesi düşük erimiş malzeme bölgesinin oluşumu gerçekleşebilir. Fakat bu erime tüm kaynak bölgesi içinde gerçekleşmez. Kaynak havuzu içinde yumuşama hakimdir.

Kaynak alanı veya buna bağlı olarakta kaynak havuzu genişledikçe veya daraldıkça, yumuşayan kısmın "1","2","3" nolu noktalara yaklaşması veya uzaklaşması söz konusudur. Kaynak alanı arttıkça da elde edilen çekme kuvveti değeri artmıştır. Örneğin kaynak havuzu arttı ise ve yumuşayan kısım "1" nolu termokupula yaklaştı ise ölçülen sıcaklık değerleri buradaki termokupuldan artmış olarak kaydedilirken "2" nolu termokupula yaklaştı ise ölçülen sıcaklık değerleri buradaki termokupuldan artmış olarak kaydedilmiştir ve "3" nolu termokupula yaklaştı ise, ölçülen sıcaklık değerleri buradaki termokupuldan artmış olarak kaydedilmiştir.

Eklerdeki Tablo A.13'te ise oluşturulan kaynak noktasına ait bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği, dalma hızı, çekme deneyi sonucu elde edilen çekme kuvveti değeri ve kırılma türü görülmektedir. Ayrıca, t_1 (sn): F1 tepesine ulaşıncaya kadar geçen zaman, t_2 (sn): F2 tepesine ulaşıncaya kadar geçen zaman, F1 (N): t_1 sn sonra ulaşılan birinci eksenel kuvvet tepesi değeri, F2 (N): t_2 sn sonra ulaşılan maksimum eksenel kuvvet değeri ve T_1 (^oC): Takımın kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden (30 cm'lik odaklama mesafesi) infrared termometre ile ölçülen kaynak noktası merkezinin sıcaklık değerini belirtmektedir.

4.6.1. Farklı bekleme süreleri ve devir sayıları için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi

SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi, 25sn-150sn-200sn'lik bekleme süreleri ve 800 d/d devir sayısı için eklerdeki Şekil A.66, Şekil A.67 ve Şekil A.68, 0-200 sn aralığında değişen bekleme süreleri ve 1250 d/d devir sayısı için eklerdeki Şekil A.69 ile Şekil A.76 arasındaki şekiller, 0sn-25sn-150sn'lik bekleme süreleri ve 2000 d/d devir sayısı için ise eklerdeki Şekil A.77, Şekil A.78 ve Şekil A.79, 100 mm/dak dalma hızı ve 5,5 mm dalma derinliğinde incelenmiştir.

SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 25 sn bekleme süresi, 100 mm/dak dalma hızı ve 5,5 mm dalma derinliği için 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d devir sayılarında incelendiğinde (eklerdeki Şekil A.66, Şekil A.70 ve Şekil A.78), kaynak işlemi boyunca iki tane eksenel kuvvet maksimum

noktası (F1 ve F2) oluştuğu görülmüştür. Bunlardan F1 dönen takım ucu, F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmuştur. F1'in bir miktar düşmesinin nedeni erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanır. Yumuşayan malzeme eksenel kuvvetin bir miktar düşmesine neden olsada, omuzun malzemeye temas ederek ilerlemesi ile tekrar artar ve F2 tepesini oluşturur. Omuzun malzeme yüzeyi ile teması ve bir miktar parçaların içine daldırılması, takımın henüz yumuşamamış malzeme ile temasta olan yüzeyini artırdığından eksenel kuvvet eğri üzerindeki en yüksek değerine çıkmıştır. Sürtünmeden dolayı sıcaklık arttıkça da malzeme yumuşamış ve takım daha az malzeme direnci ile karşılaştığından eksenel kuvvet, sıcaklık arttıkça düşme eğilimi göstermiştir. Karıştırma süresinde yaklaşık yedinci saniyeden sonra sıcaklığın artmasına zıt olarak eksenel kuvvet hızla düşmüştür. Bu durum her üç devir sayısı içinde aynı eğilimi göstermiştir. Devir sayısı arttıkça daha fazla sürtünmeden dolayı sıcaklık daha da artmış, bu nedenle de eksenel kuvvet daha fazla düşmüştür. Eklerdeki Şekil A.66, Şekil A.70 ve Şekil A.78, yaklaşık 15 sn sonrası için incelenirse, 2000 d/d için eksenel kuvvet sıfıra oldukça yaklaşmıştır. Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 800 d/d, 1250 d/d, 2000 d/d ve 25 sn bekleme süresi için en yüksek sıcaklık değerleri 2000 d/d için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini ve böylece yüksek devir sayısı için düşük bekleme sürelerinde bile yeterli kaynak sıcaklığına ulaşılabildiğini göstermiştir. Eklerdeki Şekil A.80'de 25 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise devir sayısı ile değişimi görülmektedir. 2000 d/d ve 25 sn için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerinin de incelenmesi sonucu, 800 d/d ile 1250 d/d ve 25 sn'de yapılan birleştirmelerde elde edilen iz çapı değerlerinden yüksek çıkması kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermektedir. Bu veriler, 2000 d/d ve 25 sn için elde edilen çekme kuvveti değerinin, aynı parametreler için 800 d/d ile 1250 d/d ve 25 sn'den yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Kırılma türleri ise 800 d/d ve 25 sn için mod 1, 1250 d/d ve 25 sn için mod 2, 2000 d/d ve 25 sn için ise mod 3'tür. İnfrared termometre ile de, takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden kaynak noktasının merkezinin sıcaklık değerleri 800 d/d, 1250 d/d,

2000 d/d ve 25 sn bekleme süresi için sırasıyla 119 ^{o}C, 130 ^{o}C ve 143 ^{o}C olarak ölçülmüştür (Eklerdeki Tablo A.13).

Eklerdeki Şekil A.81, 800d/d, 1250 d/d, 2000 d/d takım devir sayıları ve 25 sn bekleme süresi için SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvetlerin zamanla değişimini göstermektedir. Bu deney setinde, dalma hızı 100 mm/dak, bekleme süresi 25 sn ve dalma derinliği 5,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Dalma derinliği üst üste bindirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (6 mm) %91,6'sına karşılık gelir. Takım ucu uzunluğu 4,25 mm olduğundan, bu da takım omzu kaynak sırasında numunenin içine 1,25 mm daldığı anlamına gelir. Şekilden de görüldüğü gibi, devir sayısının artması ile eksenel kuvvetin azaldığı ve zaman ile eksenel kuvvet arasındaki değişimin ise, üç devir sayısı için aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür. Devir sayısı arttıkça sürtünmeden dolayı sıcaklık artmış, malzeme daha fazla yumuşadığı içinde eksenel kuvvet daha fazla düşmüştür. Üç farklı devir sayısı ve 25 sn bekleme süresi için en yüksek F1 eksenel kuvvet değerine 800 d/d'da, en düşük ise 2000 d/d'da ulaşılmıştır. Maksimum eksenel kuvvet (F2), 800 d/d ve 1250 d/d'da 10000 N' dan, 2000 d/d' da ise 8261 N' dan azalmaya başlamıştır (Eklerdeki Tablo A.13).

SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 150 sn bekleme süresi, 100 mm/dak dalma hızı ve 5,5 mm dalma derinliği için 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d devir sayılarında incelendiğinde (eklerdeki Şekil A.67, Şekil A.75 ve Şekil A.79), kaynak işlemi boyunca iki tane eksenel kuvvet maksimum noktasının yine (F1 ve F2) oluştuğu görülmüştür. Bunlardan F1 dönen takım ucu, F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmuştur. F1'in bir miktar düşmesinin nedeni erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanır. Yumuşayan malzeme eksenel kuvvetin bir miktar düşmesine neden olsada, omuzun teması ile tekrar artar ve F2 tepesi oluşur. Omuzun malzeme yüzeyi ile teması ve bir miktar parçaların içine daldırılması, takımın henüz yumuşamamış malzeme ile temasta olan yüzeyini artırdığından eksenel kuvvet eğri üzerindeki en yüksek değerine çıkmıştır. Sürtünmeden dolayı sıcaklık arttıkça da malzeme yumuşamış ve takım daha az malzeme direnci ile karşılaştığından eksenel kuvvet, sıcaklık arttıkça düşme eğilimi göstermiştir. Sıcaklık değeri, numunelere bağlı olan her üç termokupul için, dalma

aşamasında takımın ucunun üst parçaya dokunması ile oda sıcaklığından hızla yükselmiştir. Karıştırma aşamasının önemli bir kısmında ise eğimi azalmış ve hemen hemen yatay olarak kalmıştır. Geri çekilme aşamasında ise düşmeye başlamıştır. Karıştırma süresinde yaklaşık yedinci saniyeden sonra sıcaklığın artmasına zıt olarak eksenel kuvvet hızla düşmüştür. Bu durum her üç devir sayısı içinde aynı eğilimi göstermiştir. Devir sayısı arttıkça daha fazla sürtünmeden dolayı sıcaklık daha da artmış, bu nedenle de eksenel kuvvet daha fazla düşmüştür. Eklerdeki Şekil A.67, Şekil A.75 ve Şekil A.79, 40 sn sonrası için incelenirse, 2000 d/d için eksenel kuvvet neredeyse sıfırlanmış durumdadır. Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d için en yüksek sıcaklık değerleri 1250 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi için ölçülmüştür. "3" nolu termokupuldan alınan bu sıcaklık değerleri, SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişiminin incelendiği, 25sn-150sn-200sn'lik bekleme süreleri ve 800 d/d devir sayısı için (eklerdeki Şekil A.66, Şekil A.67 ve Şekil A.68), 0-200 sn aralığında değişen bekleme süreleri ve 1250 d/d devir sayısı için (eklerdeki Şekil A.69 ile Şekil A.76 arasındaki şekiller), 0sn-25sn-150sn'lik bekleme süreleri ve 2000 d/d devir sayısı için (eklerdeki Şekil A.77, Şekil A.78 ve Şekil A.79) 100 mm/dak dalma hızı ve 5,5 mm dalma derinliğinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleridir. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Eklerdeki Şekil A.82'de 150 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise devir sayısı ile değişimi görülmektedir. 1250 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerinin de incelenmesi sonucu, 1250 d/d'nın diğer bekleme sürelerinde ve 800 d/d ile 2000 d/d'da yapılan ve bekleme süresinin incelendiği birleştirmelerde elde edilen iz çapı değerlerinden yüksek çıkması, kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermektedir. Bu veriler, 150 sn ve 1250 d/d için elde edilen çekme kuvveti değerinin, aynı parametreler için 800 d/d ve 2000 d/d'dan yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

Sonuç olarak, 150 sn - 1250 d/d'da "3" nolu termokupuldan yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir ve çekme kuvveti değerleri de yüksek çıkmıştır. Diğer birçok deneyde

ise çoğunlukla “1” nolu termokupuldan yüksek sıcaklık değerleri ölçülse de, bu durum yer yer değişmiştir. Bazı deneylerde “2” veya “3” nolu termokupullar içinde yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Tüm bekleme süreleri için kırılma türleri ise mod1, mod2 ve mod3 olmak üzere üç şekilde meydana gelmiştir. 800 d/d ve 2000 d/d’nın 150 sn’si için kırılma türü mod2, 1250 d/d’nın 150 sn’si için ise kırılma türü mod3’tür. İnfrared termometre ile de, takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden kaynak noktasının merkezinin sıcaklık değerleri 800 d/d, 1250 d/d, 2000 d/d ve 150 sn için sırasıyla 161 ^{o}C, 176 ^{o}C ve 181 ^{o}C olarak ölçülmüştür (Eklerdeki Tablo A.13).

Eklerdeki Şekil A.83, 800d/d, 1250 d/d, 2000 d/d takım devir sayıları ve 150 sn bekleme süresi için SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvetlerin zamanla değişimini göstermektedir. Bu deney setinde, dalma hızı 100 mm/dak, bekleme süresi 150 sn ve dalma derinliği 5,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Dalma derinliği üst üste bindirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (6 mm) %91,6’sına karşılık gelir. Takım ucu uzunluğu 4,25 mm olduğundan, bu da takım omzu kaynak sırasında numunenin içine 1,25 mm daldığı anlamına gelir. Şekilden de görüldüğü gibi, devir sayısının artması ile eksenel kuvvetin azaldığı ve zaman ile eksenel kuvvet arasındaki değişimin ise, üç devir sayısı için aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür. Devir sayısı arttıkça sürtünmeden dolayı sıcaklık artmış, malzeme daha fazla yumuşadığı içinde eksenel kuvvet daha fazla düşmüştür. Üç farklı devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi için en yüksek F1 eksenel kuvvet değerine 800 d/d’da, en düşük ise 2000 d/d’da ulaşılmıştır. Maksimum eksenel kuvvet (F2), 800 d/d ve 1250 d/d’da 10000 N’ dan, 2000 d/d’ da ise 6796 N’ dan azalmaya başlamıştır (Eklerdeki Tablo A.13).

4.6.2. Farklı dalma derinlikleri için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi

SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 100 mm/dak dalma hızı için 4,25mm, 4,65mm, 5mm ve 5,80mm dalma derinliklerinde incelendiğinde (eklerdeki Şekil A.84, Şekil A.85, Şekil A.86 ve Şekil A.87), kaynak işlemi boyunca iki tane eksenel kuvvet maksimum noktasının yine (F1 ve F2) oluştuğu görülmüştür. Bunlardan F1

dönen takım ucu, F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmuştur. F1'in bir miktar düşmesinin nedeni erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanır. Yumuşayan malzeme eksenel kuvvetin bir miktar düşmesine neden olsada, omuzun teması ile tekrar artar ve F2 tepesi oluşur. Omuzun malzeme yüzeyi ile teması ve gittikçe artan miktarda parçaların içine daldırılması, takımın henüz yumuşamamış malzeme ile temasta olan yüzeyini artırdığından eksenel kuvvet eğri üzerindeki en yüksek değerine çıkmıştır. Karıştırma aşamasında sürtünmeden dolayı sıcaklık arttıkça da malzeme yumuşamış ve takım daha az malzeme direnci ile karşılaştığından eksenel kuvvet, sıcaklık arttıkça düşme eğilimi göstermiştir. Sıcaklık değeri, numunelere bağlı olan her üç termokupul için, dalma aşamasında takımın ucunun üst parçaya dokunması ile oda sıcaklığından hızla yükselmiştir. Karıştırma aşamasının önemli bir kısmında eğimi azalmış ve hemen hemen yatay olarak kalmıştır. Geri çekilme aşamasında ise düşmeye başlamıştır. Karıştırma süresinde yaklaşık altıncı, yedinci saniyeden sonra sıcaklığın artmasına zıt olarak eksenel kuvvet hızla düşmüştür. Bu durum her dört dalma derinliği içinde aynı eğilimi göstermiştir. Eklerdeki Şekil A.84, Şekil A.85, Şekil A.86 ve Şekil A.87, 40 sn sonrası için incelenirse, 5,80 mm için eksenel kuvvet sıfıra çok yaklaşmış durumdadır. Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 4,25 mm, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için en yüksek sıcaklık değerleri 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Eklerdeki Şekil A.88'de 1250 d/d devir sayısı; 150 sn bekleme süresi; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise dalma derinliği ile değişimi görülmektedir. Buradaki dalma derinlikleri için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerlerinin de incelenmesi sonucu, elde edilen iz çapı değerlerinin de yüksek çıkması kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermektedir. Fakat en yüksek çekme kuvveti değerine en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılan dalma derinliklerinde değil 4,65 mm dalma derinliğinde ulaşılmıştır. Böylece sıcaklığın çok artması değil de optimum değerlerde olması gerektiği yorumu yapılmıştır. Kırılma türleri ise 4,25 mm dalma derinliği için mod1, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için ise mod3'tür. İnfrared

termometre ile de, takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden kaynak noktasının merkezinin sıcaklık değerleri 4,25 mm, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için sırasıyla 123 ^{o}C, 175 ^{o}C, 177 ^{o}C ve 184 ^{o}C olarak ölçülmüştür (Eklerdeki Tablo A.13).

Eklerdeki Şekil A.89, 4,25 mm, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvetlerin zamanla değişimini göstermektedir. Bu deney setinde, devir sayısı 1250 d/d, bekleme süresi 150 sn ve dalma hızı 100 mm/dak olarak sabit tutulmuştur. Dalma derinliği arttıkça, takımın daha fazla yüzey alanı numune ile temas edeceğinden ve daha fazla yumuşamamış malzeme ile karşılaşacağından, dalma derinliği arttıkça takıma karşı henüz yumuşamamış olan malzemeden dolayı bir direnç oluşmuştur. Bu nedenle eksenel kuvvet, dalma derinliği arttıkça artmıştır. Buradaki dalma derinlikleri üst üste bindirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (6 mm) sırasıyla %70,8'ine, %77,5'ine, %83,3'üne ve %96,6'sına karşılık gelmektedir. Takım ucu uzunluğu 4,25 mm olduğundan, bu da takım omzu kaynak sırasında numunenin içine sırasıyla 0 mm (omuz üst parçaya dokunmuş fakat içine hiç dalmamış), 0,4 mm, 0,75 mm ve 1,55 mm daldığı anlamına gelir. Eklerdeki Şekil A.89'dan ve eklerdeki Tablo A.13'ten de görüldüğü gibi, dalma derinliğinin artması ile eksenel kuvvetin arttığı ve zaman ile eksenel kuvvet arasındaki değişimin ise, dört farklı dalma derinliği içinde aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür. En yüksek F1 eksenel kuvvet değerine 5,80 mm'de, en düşük ise 4,25 mm'de ulaşılmıştır. En yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği 4,65 mm dalma derinliği için ise F1 değeri 2937 N'dur. Maksimum eksenel kuvvet (F2), 5,80 mm'de 10000 N' dan, 4,25 mm'de ise 3506 N' dan, en yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği 4,65 mm dalma derinliği için ise 4359 N'dan azalmaya başlamıştır (Eklerdeki Tablo A.13).

4.6.3. Farklı dalma hızları için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık değişiminin incelenmesi

SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 5,5 mm dalma derinliği için 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızlarında incelendiğinde

(eklerdeki Şekil A.90, Şekil A.91, Şekil A.92 ve Şekil A.75), özellikle düşük dalma hızlarında, kaynak işlemi boyunca oluşan iki tane eksenel kuvvet maksimum noktasına (F1 ve F2) ilaveten, bu iki tepenin arasında bir diğer eksenel kuvvet tepesi daha oluşmuştur. Bunlardan ilk eksenel kuvvet tepesi olan F1 dönen takım ucu, maksimum eksenel kuvvet tepesi F2 ise takım omzu tarafından oluşturulmaktadır. Arada oluşan diğer tepecik ise, düşük dalma hızlarında yine takım ucu tarafından fakat M7 takımın üzerinde bulunan vida dişlerinin parçalar ile teması sırasında oluşmaktadır. Bu tepecik yüksek dalma hızlarında belirgin şekilde oluşamadan takımın omzu üst parça ile temas eder ve F2 oluşur. Takımın yavaş hareketi sonucu ise omzun üst parçaya dokunması için (örneğin 12,5 mm/dak'lık dalma hızında) yaklaşık 50 sn geçer. Takım parçaların içine doğru ağır hareket ettiği içinde, dişlerin teması sonucu oluşan tepecikte net bir şekilde gözlemlenmiştir. F1'in bir miktar düşmesinin nedeni ise yine erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanır. Yumuşayan malzeme eksenel kuvvetin bir miktar düşmesine neden olsa da, düşük dalma hızlarında dişlerin teması ve sonrasında omuzun teması ile, yüksek dalma hızlarında ise omuzun teması ile tekrar artar ve F2 tepesi oluşur.

Dalma hızının artması, takımın henüz yumuşamamış malzeme ile temasta olan yüzeyini daha kısa sürede buluşturduğundan F1 ve F2 eksenel kuvvet değerleri dalma hızı arttıkça artma eğilimi göstermiştir. Karıştırma aşamasında sürtünmeden dolayı sıcaklık arttıkça da malzeme yumuşamış ve takım daha az malzeme direnci ile karşılaştığından eksenel kuvvet, sıcaklık arttıkça düşmüştür. Sıcaklık değeri, numunelere bağlı olan her üç termokupul için, dalma aşamasında takımın ucunun üst parçaya dokunması ile oda sıcaklığından hızla yükselmiştir. Karıştırma aşamasının önemli bir kısmında eğimi azalmış ve hemen hemen yatay olarak kalmıştır. Geri çekilme aşamasında ise düşmeye başlamıştır. Karıştırma süresinde dalma hızına bağlı olarak, örneğin 12, 5 mm/dak dalma hızı için yaklaşık ellinci saniyeden sonra, 100 mm/dak dalma hızı için ise yaklaşık yedinci saniyeden sonra sıcaklığın artmasına zıt olarak eksenel kuvvet hızla düşmüştür. Bu durum her dört dalma hızı içinde aynı eğilimi göstermiştir. Dalma hızı arttıkça daha fazla sürtünmeden dolayı sıcaklık daha da artmış, bu nedenle de eksenel kuvvet daha fazla düşmüştür. Eklerdeki Şekil A.90, Şekil A.91, Şekil A.92 ve Şekil A.75, sırasıyla yaklaşık olarak

120 sn, 100 sn, 80 sn ve 40 sn sonrası için incelenirse, 100 mm/dak'lık dalma hızı için eksenel kuvvet sıfıra çok yaklaşmış durumdadır. Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile, 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızları için en yüksek sıcaklık değerleri 100 mm/dak dalma hızı için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Eklerdeki Şekil A.93'te 1250 d/d devir sayısı; 150 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise dalma hızı ile değişimi görülmektedir. Buradaki dalma hızları için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerlerinin de incelenmesi sonucu iz çapı değerinin 100 mm/dak dalma hızı için yüksek çıkması, kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermekte ve elde edilen çekme kuvveti değerinin yüksekliğini de açıklamaktadır. Kırılma türü ise dört dalma hızı içinde mod3'tür. İnfrared termometre ile de, takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden kaynak noktasının merkezinin sıcaklık değerleri 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızları için sırasıyla 153 ^{o}C, 165 ^{o}C, 168 ^{o}C ve 176 ^{o}C olarak ölçülmüştür (Eklerdeki Tablo A.13).

Eklerdeki Şekil A.94, 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızları için SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvetlerin zamanla değişimini göstermektedir. Bu deney setinde, devir sayısı 1250 d/d, bekleme süresi 150 sn ve dalma derinliği 5,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Dalma hızı arttıkça, takımın daha fazla yüzey alanı daha kısa sürede parçalar ile temas edeceğinden, daha kısa sürede daha fazla yumuşamamış malzeme ile karşılaşmıştır. Bu durumda dalma hızı arttıkça takıma karşı henüz yumuşamamış malzemeden dolayı bir direnç oluşmuştur. Bu nedenle eksenel kuvvet, dalma hızı arttıkça artmıştır. Dalma hızı yavaş olunca ise F1 ve F2 eksenel kuvvet tepelerinin oluşması için, özelliklede takımın omzunun parçanın üst yüzeyi ile teması için oldukça uzun bir zaman geçmiştir. Buna karşılık takımın omuz kısmı üst parçaya dokunduğunda ve hatta bir miktar içeri doğru ilerlediğinde, omuz kısmı kaynak bölgesini adeta bir kapak gibi örttüğünden, kaynak bölgesinden kaçan malzeme miktarında azalma gözlenmiştir. Ayrıca takıma ait daha geniş yüzey alanı sürtünmeye katılacağından, sıcaklık değerleri daha kısa sürede kaynak için gereken değerlere taşınmıştır. Takımın yavaş dalma hızında, omuz

dokununcaya kadar geçen uzun zaman aralığında, takımın sadece ucu malzemeyi yeterince yumuşatamadığından daha fazla malzeme kaçışına neden olduğu gözlenmiştir. Buda kaynak bölgesine katılan malzeme miktarını azaltacağından, bağlantının dayanımı düşecektir. Böylece düşük dalma hızının önemli bir dezavantajı, elde edilen çekme kuvvetinin düşmesi olarak belirlenmiştir.

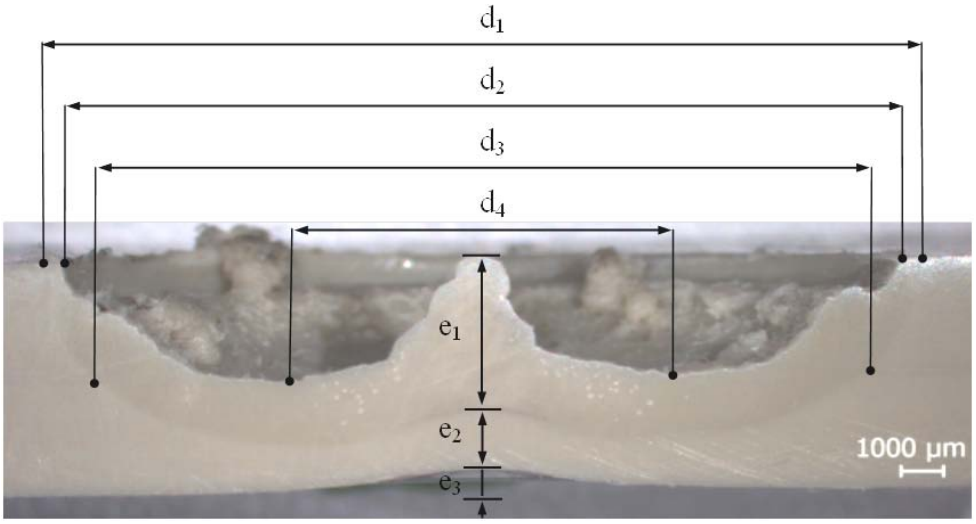
Karıştırma süresi eşit olan kaynak noktaları oluşturulmak istenildiğinde, dalma hızı yüksek olan kaynak noktası daha kısa sürede oluşturulacaktır. Böylece bir kaynak noktası oluşturmak için gerekli olan kaynak çevrimi süresi yani kaynak zamanı kısalmış olacaktır. Çünkü dalma hızı artınca, dalma aşaması için harcanan zaman azalacak böylece toplamda bir kaynak noktası için geçen süre kısalacaktır. Örneğin 0 sn bekleme süresi için kaynak zamanını incelersek, 100 mm/dak dalma hızı için kaynak işlemi yaklaşık 10 sn'de tamamlanırken, 12,5 mm/dak dalma hızında ise kaynak işlemi yaklaşık 60 sn'de tamamlanacaktır. Dalma derinliği üst üste bindirilmiş parçaların birleştirilmiş kalınlığının (6 mm) %91,6'sına karşılık gelir. Takım ucu uzunluğu 4,25 mm olduğundan, bu da takım omzu kaynak sırasında numunenin içine 1,25 mm daldığı anlamına gelir. Eklerdeki Şekil A.94'ten ve eklerdeki Tablo A.13'ten de, dalma hızının artması ile eksenel kuvvetin arttığı ve zaman ile eksenel kuvvet arasındaki değişimin ise, dört farklı dalma hızı içinde aynı eğilimi gösterdiği görülmektedir. En yüksek F1 eksenel kuvvet değerine 100 mm/dak dalma hızında, en düşük değerine ise 12,5 mm/dak dalma hızında ulaşılmıştır. En yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği 100 mm/dak dalma hızı için F1 değeri 2630 N'dur. Maksimum eksenel kuvvet (F2) ise 10000 N' dan azalmaya başlamıştır (Eklerdeki Tablo A.13).

4.7. Kaynak Bölgelerinin Belirlenmesi İçin Kaynaklı Parçaların Enine Kesitlerinin Optik Mikroskop Görüntüleri Yardımı İle İncelenmesi

Kaynak sırasında yumuşayan ve karıştırılan malzeme, kaynak bölgesi hacmi (kaynak havuzu) olarak adlandırılan bölgeyi oluşturur. Bu hacmin artması ise kaynak alanının artmasına bağlıdır. Kaynak havuzu, oluşturulan tüm kaynak noktalarında tamamen parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır ve görünüm literatürde de belirtildiği gibi fincan tabağı şeklindedir. Deneyler sırasında ise yumuşayan ve karıştırılan

malzemenin hangi termokupula daha çok yaklaştığı, sürekli kaydedilen sıcaklık değerleri ile ölçülebildiği gibi kaynak işlemi sonrası, herhangi bir mekanik teste maruz bırakılmayan bağlantıların enine kesit incelemeleri ile de kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Kaynak alanı arttıkça da elde edilen çekme kuvveti değeri artmıştır.

Örnek bir kaynaklı parçanın enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü ve kaynak bölgesinin boyutlandırılması Şekil 4.16'da görülmektedir. d_1 ve d_2 uzunlukları kaynak takımının omuz çapı ile doğrudan ilgilidir. d_1'in artması d_2'nin ise azalması böylece yumuşayan malzemenin et kalınlığının artması, d_3'ün artması d_4'ün ise azalması böylece alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması (hatta bu çukur kısmın yukarı doğru kendini doldurması) kaynak alanının artmasını sağlamıştır. Buda bağlantının dayanımının artmasını desteklemiştir. d_1'in artması yumuşayan kaynak bölgesi malzemesinin üst parçanın üstünde bulunan "2" nolu termokupula, d_3'ün artması ise yumuşayan kaynak bölgesi malzemesinin üst parçanın yanında bulunan "1" ve alt parçanın yanında bulunan "3" nolu termokupullara yaklaşmasını sağlamıştır. Termokupullar, daha öncede belirtildiği gibi zarar görmeyecek fakat kaynak bölgesine en yakın olacak yerlerden matkap ucu ile açılan deliklere yerleştirilmiştir. d_3, alt ve üst parçanın birbirine tamamen karışıp hamur haline geldiği ve üst parça ile alt parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği (kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve tek bir parça şeklinde görülen kısım) uzunluğu göstermektedir. Bu ölçünün sağında ve solunda alt ve üst parçayı birbirinden ayıran ayrım çizgisi görülmektedir. d_3'ün artması, alt ve üst parçadan yumuşayarak kaynak bölgesine katılan malzeme miktarını artırmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen, e_3 çökme miktarının az olması ve kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2'nin azalması buna karşılık yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı e_1'in artması yine bağlantının dayanımının artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.16: Örnek bir kaynaklı parçanın enine kesitinin optik mikroskop görüntüsü ve kaynak bölgesinin boyutlandırılması

Farklı bekleme süresi ve dalma derinliği için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçülerinin belirlenmesinde, yarım görünüşler için 8 büyütme, tam görünüşler için ise 6,3 büyütme yapılmıştır. Kaynak bölgesinin boyutlandırılması ise her optik mikroskop görüntüsünün altında verilmiştir (eklerdeki Tablo A.14 ile Tablo A.19 arası). Farklı bekleme süreleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri 1250 d/d devir sayısı, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için eklerdeki Tablo A.14, Tablo A.15, Tablo A.16 ve Tablo A.17'de, farklı dalma derinlikleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri ise 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 100 mm/dak dalma hızı için eklerdeki Tablo A.18 ve Tablo A.19'da verilmiştir.

Bekleme süresinin incelendiği eklerdeki Tablo A.14, Tablo A.15, Tablo A.16 ve Tablo A.17'deki numunelerde, d_1 en yüksek değerine 100 ile 200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde ulaşmıştır. d_2 ise en düşük değerine 150 sn bekleme süresi için ulaşmıştır. Böylece d_1'in artması d_2'nin ise azalması ile yumuşayan malzemenin et kalınlığının artması sağlanmıştır. Kaynak takımı omuz çapı olan 20 mm dikkate alındığında, d_1 tüm bekleme süreleri için bu omuz çapı değerinin üstünde, d_2 ise altında oluşmuştur. d_3 en yüksek değerine 75 ile 200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde ulaşmıştır. d_4 ise en düşük değerine 75 ile 150 sn aralığındaki bekleme

sürelerinde ulaşmıştır. Böylece d_3'ün artması d_4'ün ise azalması ile alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması böylece kaynak alanının artması sağlanmıştır. Ayrıca eklerdeki Tablo A.14, Tablo A.15, Tablo A.16 ve Tablo A.17 incelendiğinde bekleme süresi arttıkça d_1 ve d_3'ün arttığı görülmüştür. 0 sn bekleme süresi için ise oluşan düşük d_4 değerini dikkate almaya gerek yoktur. Çünkü d_3 değeri de oldukça düşüktür ve 0 sn bekleme süresi için yeterli yumuşama ve kaynak alanı oluşamadığından elde edilen çekme kuvveti değeri de oldukça düşüktür. En yüksek çekme kuvveti değerine ise d_1 ve d_3 değerleri yüksek, d_2 ve d_4 değerleri düşük olan 150 sn bekleme süresi için ulaşılmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen e_1, e_2 ve e_3 değerleri de elde edilen buradaki sonucu pekiştirici özellik göstermiştir. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı olan ve bağlantının dayanımını artırıcı rol oynayan e_1, en yüksek değerine 150 sn bekleme süresinde ulaşmıştır. Bu bekleme süresinde, kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2 ve çökme miktarı e_3 değerleri ise nispeten düşüktür. Bu durumda elde edilen çekme kuvvetinin artmasını sağlamıştır.

Dalma derinliğinin incelendiği eklerdeki Tablo A.18 ve Tablo A.19'daki numunelerde, d_1 en yüksek değerine 4,65 mm ile 5,80 mm aralığındaki dalma derinliklerinde ulaşmıştır. d_2 ise en düşük değerine 4,65 mm dalma derinliği için ulaşmıştır. Böylece d_1'in artması d_2'nin ise azalması ile yumuşayan malzemenin et kalınlığının artması sağlanmıştır. Kaynak takımı omuz çapı olan 20 mm dikkate alındığında, d_1 tüm dalma derinlikleri için bu omuz çapı değerinin üstünde, d_2 ise altında oluşmuştur. Dalma derinliği arttıkça d_1 artmış d_2 ise azalmış fakat d_2 en düşük değerine 4,65 mm'de ulaşmıştır. Yine dalma derinliği arttıkça d_3 artmış ve en yüksek değerine 4,65 mm ile 5,80 mm aralığındaki dalma derinliklerinde ulaşmıştır. d_4 ise en düşük değerine 4,65 mm ile 5,80 mm dalma derinliklerinde ulaşmıştır. Böylece d_3'ün artması d_4'ün ise azalması ile alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması böylece kaynak alanının artması sağlanmıştır. Ayrıca eklerdeki Tablo A.18 ve Tablo A.19 incelendiğinde dalma derinliği arttıkça d_1 ve d_3'ün düzenli bir şekilde arttığı

görülmüştür. 4,25 mm dalma derinliği için ise nispeten oluşan düşük d_4 değerini dikkate almaya gerek yoktur. Çünkü d_3 değeri de oldukça düşüktür ve 4,25 mm dalma derinliği için yeterli yumuşama ve kaynak alanı oluşamadığından elde edilen çekme kuvveti değeri de düşüktür. En yüksek çekme kuvveti değerine ise en yüksek dalma derinliğinde değil, d_1 ve d_3 değerleri nispeten yüksek, d_2 ve d_4 değerleri düşük olan 4,65 mm dalma derinliği için ulaşılmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen e_1, e_2 ve e_3 değerleri de, bekleme süresinin incelendiği numunelerde olduğu gibi dalma derinliğinin incelendiği numunelerde de, elde edilen buradaki sonucu pekiştirici özellik göstermiştir. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı olan ve bağlantının dayanımını artırıcı rol oynayan e_1, en yüksek değerine 4,65 mm dalma derinliğinde ulaşmıştır. Bu dalma derinliğinde, kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2 değeri diğer dalma derinliklerinde ki değerler ile yakın olmakla beraber, çökme miktarı e_3 değeri ise en düşük değerde kalmıştır. Böylece elde edilen çekme kuvveti değeri artmış ve 4,65 mm dalma derinliği için en yüksek çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır.

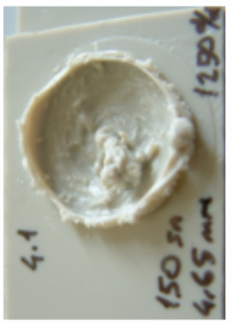
4.8. Geliştirme Amaçlı Farklı Bağlantı Tasarımlarına Uygulanan SKNK ve Yapıştırma Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

4.8.1. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK artı yapıştırıcılı numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Belirlenen optimum parametreler kullanılarak geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı (kaynaklı: K), yapıştırıcılı (Y) ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı (yapıştırıcılı artı kaynaklı: YK) olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyi öncesi fotoğrafları Tablo 4.7'de verilmiştir. Böylece farklı bağlantı tasarımları için karşılıklı olarak oluşturulan çift nokta kaynağı sonrası kaynak noktasının oluşumu ve fiziki şekli görsel olarak ortaya konmuştur. Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı parçaların kaynak bölgelerinin gözle yapılan incelemelerinde, tüm deney parçalarındaki kaynak noktalarının adeta bulamaç veya çamur gibi sıvandığı ve yönteme ait karakteristik bir boşluğun oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, kaynak takımının geri çekilmesi sonrasında bir malzeme

tepeciğinin de oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak bölgesinde malzemenin pim etrafındaki sürüklenişini ifade eden karışım izleri bütün kaynak noktalarında açıkça görülmektedir. Yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinden kaçması sonucu kaynak takımı omzunu çepeçevre saran bir çapak oluşumu söz konusudur. Ayrıca karşılıklı olarak oluşturulan çift nokta kaynağı sonrası, kaynak bölgesi malzemesi ile esas malzemenin rengi arasında herhangi bir farklılık olmayışı (renk uyumu) kaynak bölgesi malzemesinde herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir ki bu yapılan kaynağın durumu için olumlu bir göstergedir.

Tablo 4.7: Geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyi öncesi fotoğrafları

Farklı Bağlantı Tasarımları	Çekme Deneyi Öncesi Yapışkanlı, Kaynaklı ve Yapışkan Artı Kaynaklı Numune Örnekleri		
	Yapışkanlı	Kaynaklı	Yapışkan + Kaynaklı
tip1			
tip2			
tip3			

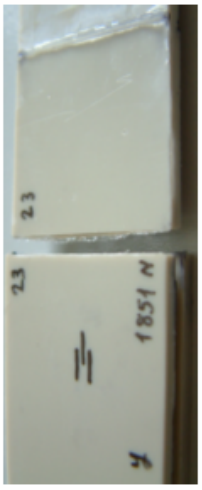
Geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyleri sonrasında kopma bölgelerini gösteren fotoğrafları Tablo 4.8'de verilmiştir. Bu görüntülerden farklı bağlantı tasarımları için SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerin kopma şekline etkileri belirlenmiştir. Kaynak bölgesinin yetersiz oluştuğu kopma yırtılmasının kaynak takımı piminin etrafında çevresel olduğu (pim esaslı kopma yani mod 1) kopma şekli, farklı bağlantı tasarımları için SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerin hiç birinde oluşmamıştır. Kopma yırtılmasının kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu (omuz esaslı kopma yani mod 2) kopma şekli ve kopma yırtılmasının üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği (ara yüzey esaslı kopma yani mod 3) kopma şekli özellikle daha yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerin çoğunda elde edilmiştir.

Ayrıca daha önce bilinen bu kopma şekillerine ilaveten, tip3 bağlantı tasarımı için kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası daha önce rastlanmayan ve kopmanın çoğunluğunun esas malzemede, çok az bir kısmının kaynak bölgesinde gerçekleştiği (8 nolu tip3 kaynaklı bağlantı) ve de kopmanın tamamen esas malzemede yani kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği (19 nolu tip3 yapışkan artı kaynaklı bağlantı), çekme kuvvetinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı yeni ve diğer iki kopma şekline ulaşılmıştır. Bu iki bağlantı için kopma şekilleri incelenmeye devam edilirse, buradaki kopmanın daha önce elde edilen kopma şekillerinden bir farklılık daha göstererek, kaynak noktası baz alındığında, diğer kaynak bağlantılarında olduğu gibi kaynak noktasına doğru içbükey bir görünüm değil de, dışbükey bir görünüm vererek kopmanın gerçekleştiği görülmüştür. Bu numunelerden 8 nolu tip3 kaynaklı bağlantı için 2830 N ve 19 nolu tip3 yapışkan artı kaynaklı bağlantı için 2780 N çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen bu çekme kuvveti değerleri oldukça yüksektir ve de birbirine yakındır fakat elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleri değildir. Elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine daha öncede tanımlanan mod 2 ve mod 3 kopma şekilleri için ulaşılmıştır. 25 nolu tip2 kaynaklı bağlantıda mod 2 kopma şekli için 2985 N ve 4

nolu tip2 yapışkan artı kaynaklı bağlantıda ise mod 3 kopma şekli için 3040 N çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.

Ayrıca 4.1 nolu tip1 kaynaklı bağlantıda (4.1 nolu tip1 ve kaynaklı bağlantı, çalışmanın ilk aşamasında çeşitli parametreler için tip1 bağlantı tasarımı ile çalışılırken elde edilen ve de çekme kuvvetini maksimum yapan optimum parametrelerin bulunduğu numune örneğidir. Bu numune ile ilgili incelemelerde çalışmanın ilk aşamasında yapılmıştır.) mod 3 kopma şekli için 1832 N, 22 nolu tip1 yapışkan artı kaynaklı bağlantıda mod 3 kopma şekli için 1588 N çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Bu kopma şekillerine ilaveten ayrılma şeklindeki yeni ve diğer bir kopma şekline ise tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan sadece yapıştırıcılı bağlantılarda rastlanmıştır. Sadece yapıştırıcılı olan bağlantılar için çekme deneyi sonrası parçalar birbirinden koparılarak ayrıldıktan sonra, kopma işleminin birbirine yapışan yüzeyler boyunca ayrılma şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca yüzeylere ince bir tabaka şeklinde sürülen yapıştırıcının, birbirinden ayrılan yüzeylerde bozulmadan kaldığı ve boşluksuz bir şekilde yüzeye gayet iyi tutunduğu görülmüştür. 21 nolu tip1 yapıştırıcılı bağlantı için 1066 N, 23 nolu tip2 yapıştırıcılı bağlantı için 1851 N ve 28 nolu tip3 yapıştırıcılı bağlantı için ise 1225 N çekme kuvvetine ulaşılmıştır. 1851 N çekme kuvveti, sadece yapıştırıcılı bağlantı için farklı bağlantı tasarımları içinde elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeridir. Aynı parametreler ve de bağlantı tasarımları için deneyler tekrarlandığından, elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır ve tip2 yapıştırıcılı bağlantı için bu değerde bir miktar düşerek Tablo 4.9'da görüldüğü gibi 1534 N ortalama çekme kuvveti değeri elde edilmiştir.

Tablo 4.8: Geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için, SKNK'lı, yapıştırıcılı ve SKNK'lı artı yapıştırıcılı olarak oluşturulan numunelerden bazılarının çekme deneyi sonrası fotoğrafları

Farklı Bağlantı Tasarımları	Çekme Deneyi Sonrası Yapışkanlı, Kaynaklı ve Yapışkan Artı Kaynaklı Numune Örnekleri		
	Yapışkanlı	Kaynaklı	Yapışkan + Kaynaklı
tip1			
tip2			
tip3			

Farklı bağlantı tasarımları (tip1, tip2 ve tip3) için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılarda ortalama çekme kuvveti değerleri Tablo 4.9'da verilmiştir. tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekillerinin her biri kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numuneler için ayrı ayrı incelendiğinde her zaman için kaynaklı bağlantıdan elde edilen ortalama çekme kuvvetinin, yapışkanlı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantıdan daha yüksek çıktığı görülmüştür. En yüksek ortalama çekme kuvveti değeri 2887 N, tip2 bağlantı şekli için kaynaklı numunede elde edilmiştir. Her ne kadar tip2 bağlantı şekli için yapışkan artı kaynaklı parçada 3040 N'luk çekme kuvveti de elde edilmiş olsa da, deneyler en az üç kere tekrarlanıp ortalaması alındığından tip2 bağlantı şekli için yapışkan artı kaynaklı parçada elde edilen ortalama çekme kuvveti değeri 2557 N'a düşmüştür. tip2 bağlantı şekli için ise kaynaklı numunedeki ortalama çekme kuvveti değeri yapışkan artı kaynaklı numunede elde edilen ortalama çekme kuvveti değerinden oldukça yüksek olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.9: Farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılar için ortalama çekme kuvveti değerleri

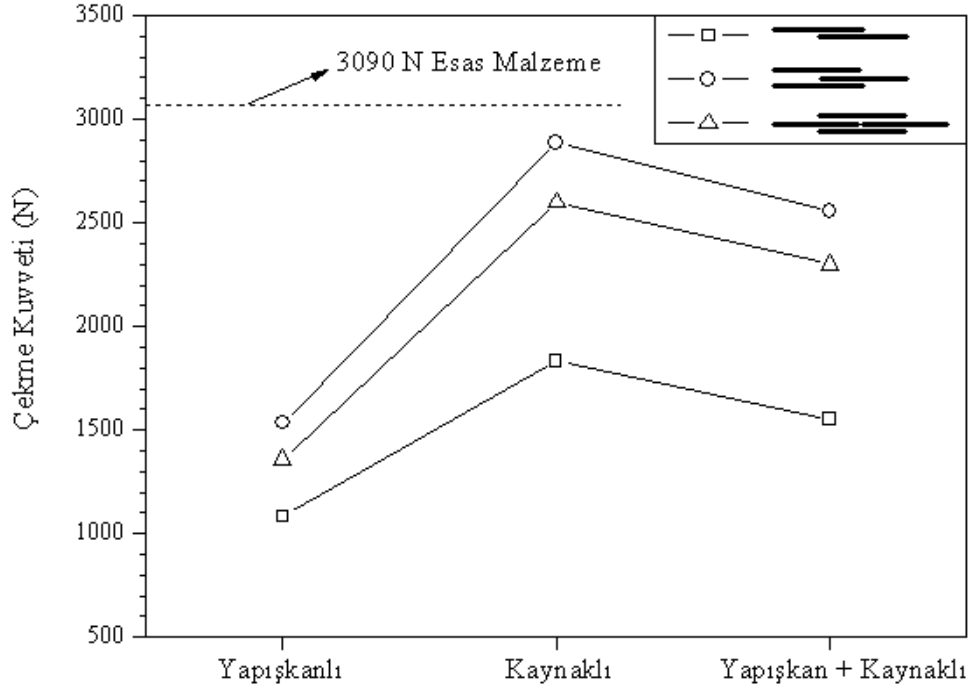
Farklı Bağlantı Tasarımları		**Ortalama Çekme Kuvveti Değerleri (N)**		
		Yapışkanlı	**Kaynaklı**	**Yapışkan + Kaynaklı**
tip1		1082	1832	1553
tip2		1534	2887	2557
tip3		1356	2600	2301

Şekil 4.17 incelendiğinde tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı şekilleri için oluşturulan yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı birleştirmelerin çekme kuvvetine etkisi görülmektedir. Bu eğrideki çekme kuvveti değerleri, tekrarlanan deneyler sonucu bulunan ve ortalaması alınan çekme kuvveti değerleridir. Iskartaya ayrılan numuneler hariç (örneğin tip3 bağlantı şekli için oluşturulan dört kaynak noktasından üçü düzgün oluşup biri bile düzgün oluşmasa, bu kısım bağlantı dayanımını olumsuz etkileyeceğinden bu parça tamamen atılmış ve çekme deneyi uygulanmamıştır),

sadece tip3 bağlantı şekli için üçgen şeklindeki kutular ile gösterilen ortadaki eğrinin kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı kısmına ait iki noktanın her birinin elde edilmesi için deneyler dörder kere tekrarlanmış ve eğri üzerindeki bu iki noktadan kaynaklı tip3 bağlantı şekli için bulunan noktanın elde edilmesinde 16, yapışkan artı kaynaklı tip3 bağlantı şekli için bulunan noktanın elde edilmesinde 16 olmak üzere toplam 32 adet kaynak noktası oluşturulmuştur. tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı şekillerinin her birinin, kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numuneler için çekme kuvveti ile değişiminin ayrı ayrı eğrileri çizildiğinde, eğrilerde mükemmel bir uyum ve birbirine paralellik görülmüştür. Ayrıca grafiğin üzerinde belirtilen esas malzemenin 3090 N'luk çekme kuvveti değerine ne kadar yaklaşıldığının rahatlıkla görülmesi için kesik çizgi ile bu değer eğri üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.17'de tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı şekillerinin her birinin, kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numuneler için çekme kuvveti ile değişimi incelendiğinde her zaman için kaynaklı bağlantıdan elde edilen ortalama çekme kuvvetinin, yapışkanlı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantıdan elde edilen ortalama çekme kuvveti değerinden daha yüksek çıktığı görülmüştür. Böylece parçalara sadece SKNK yönteminin uygulanmasının, sadece yapıştırıcılı uygulamadan ve de yapıştırıcılı artı SKNK'lı uygulamadan daha iyi sonuç verdiği ve ortalama çekme kuvveti değerlerinin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca yapışkanlı numuneler için tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekilleri, kaynaklı numuneler için tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekilleri ve de yapışkan artı kaynaklı numuneler için tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekilleri ayrı ayrı incelendiğinde, ortalama çekme kuvveti değerleri için her zaman aynı sıralamanın oluştuğu görülmüştür. Örneğin yapışkanlı parçalar ele alındığında en yüksek ortalama çekme kuvvetine tip2 bağlantı şekli için, en düşük ortalama çekme kuvvetine ise tip1 bağlantı şekli için ulaşıldığı, tip3 bağlantı şekli için ise ortalama çekme kuvveti değerinin her zaman tip2 ve tip1 bağlantı şekli için elde edilen değerin arasında kaldığı görülmüştür. Bu sıralama kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı parçalar içinde aynı şekilde gerçekleşmiştir. Böylece tip1 ve tip3 bağlantı şekilleri ile karşılaştırıldığında, yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılar için tip2 bağlantı şeklinin en uygun bağlantı tasarımı olduğu görülmüştür. Yukarıdaki sonuçlar ile birlikte değerlendirildiğinde en

yüksek ortalama çekme kuvvetine ulaşılmasını sağlayan optimum bağlantı tasarımının SKNK'lı tip2 bağlantı şekli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.17: Farklı bağlantı şekilleri için oluşturulan yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı birleştirmelerin çekme kuvvetine etkisi

Esas malzemenin 3090 N'luk çekme kuvveti ile farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılarda elde edilen ortalama çekme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında, esas malzemeden elde edilen çekme kuvvetinin %'de kaçına ulaşıldığı Tablo 4.10'da verilmiştir. tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekilleri için yapılan yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numuneler için elde edilen en yüksek ortalama çekme kuvveti değeri tip2 bağlantı şekli için kaynaklı numunede elde edilen 2887 N, esas malzemenin % 93,43'üne denk gelmektedir. Ayrıca tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekillerinin her biri kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkanlı artı kaynaklı numuneler için incelendiğinde, kaynaklı numunelerde elde edilen yüzde çekme kuvveti değerleri, yapışkanlı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde elde edilen yüzde çekme kuvveti oranlarından her zaman için daha yüksek çıkmıştır ve tip1 için bu oran % 59,29 iken, tip2 için % 93,43 ve tip3 için ise % 84,14'tür. tip1 bağlantı şekli için yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde % 80'lik yüzde çekme kuvveti oranının üzerinde

değer elde edilemezken, tip2 ve tip3 bağlantı şekilleri için özellikle kaynaklı parçalarda bu oranın oldukça üzerinde değerler elde edilmiştir. Ayrıca % 80'lik yüzde çekme kuvveti oranı, yapışkan artı kaynaklı numunede de ilk defa tip2 bağlantı şekli için geçilmiş ve bu oran % 82,75 olarak elde edilmiştir. Fakat elde edilen en yüksek yüzde çekme kuvveti oranı tip2 bağlantı şekli için kaynaklı numunede elde edilen % 93,43'lük yüzde çekme kuvveti değeridir.

Tablo 4.10: Esas malzemenin 3090 N'luk çekme kuvveti ile farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, SKNK'lı ve yapıştırıcılı artı SKNK'lı bağlantılarda elde edilen ortalama çekme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında, esas malzemeden elde edilen çekme kuvvetinin %'de kaçına ulaşıldığını gösteren %'de oranları

Farklı Bağlantı Tasarımları		**Yüzde Çekme Kuvveti Değerleri**		
		Yapışkanlı	**Kaynaklı**	**Yapışkan + Kaynaklı**
tip1		% 35,02	% 59,29	% 50,26
tip2		% 49,64	% 93,43	% 82,75
tip3		% 43,88	% 84,14	% 74,47

4.8.2. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan numunelerin çekme deneyi sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmesi

Çalışmanın bu kısmında, geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan numunelerin, çekme deneyi sonrasında ortaya çıkan kopma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrılma şeklindeki yeni bir kopma şekline tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan sadece yapıştırıcılı bağlantılarda rastlanmıştır. Sadece yapıştırıcılı olan bu bağlantılar için çekme deneyi sonrası parçalar birbirinden koparılarak ayrıldıktan sonra, kopma işleminin birbirine yapışan yüzeyler boyunca ayrılma şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüzeylere ince bir tabaka şeklinde sürülen yapıştırıcının, birbirinden ayrılan yüzeylerde bozulmadan kaldığı ve boşluksuz bir şekilde yüzeye

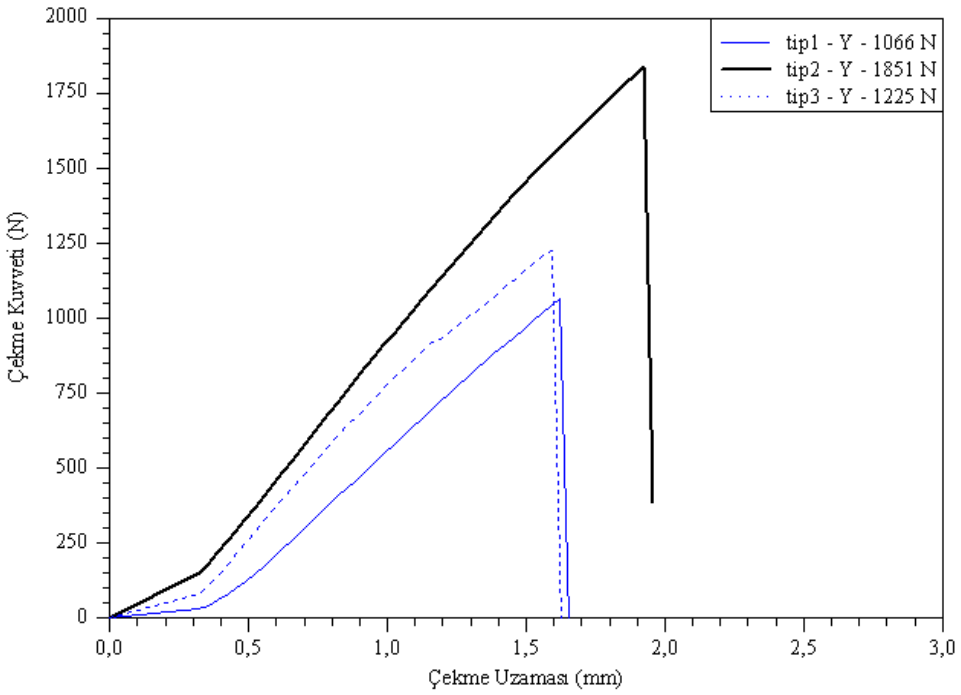
gayet iyi tutunduğu görülmüştür. Bu nedenle de optik mikroskop incelemesi yerine gözle muayene yapılmıştır. Oluşturulan kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan seçilen numunelere ise optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Tablo 4.11'de geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı (Y), kaynaklı (K) ve yapışkan artı kaynaklı (YK) olarak oluşturulan birleştirmelerin, çekme deneyleri sırasında çekme kuvveti ile çekme uzaması arasında çizilen eğrilerin altında kalan alanların (numunelerin absorbe ettiği enerjilerin) sayısal değerleri verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi elde edilen çekme kuvveti değerleri, numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri ile doğru orantılıdır. Numune yüksek miktarda enerji absorbe ettiyse elde edilen çekme kuvveti değeri de yüksek olarak elde edilmiştir. Kolayca karşılaştırılabilmesi için aynı tabloda, farklı bağlantı tasarımlarının olduğu sütunda, esas malzeme içinde çekme kuvveti ve enerji değeri verilmiştir. Burada verilen çekme kuvveti ve enerji değerleri, tez çalışmasında çekme deneyi sonrası kopma bölgeleri gösterilen ve fotoğrafları verilen numunelere aittir. Buradaki kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılarda, daha önce belirlenen optimum parametreler kullanılmıştır ve devir sayısı 1250 d/d, bekleme süresi 150 sn, dalma derinliği 4,65 mm, dalma hızı 100 mm/dak'dır.

Tablo 4.11: Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı olarak oluşturulan numunelerin absorbe ettiği enerjilerin değerleri

Bağlantı Tasarımı	**Çekme Kuvveti (N)**	**Enerji (J)**
Esas Malzeme	3090	80,87
tip1 - Y	1066	0,72
tip1 - K	1832	4,68
tip1 - YK	1588	2,62
tip2 - Y	1851	1,72
tip2 - K	2985	13,28
tip2 - YK	3040	24,67
tip3 - Y	1225	0,93
tip3 - K	2830	15,96
tip3 - YK	2780	10,23

Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve yapıştırıcılı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile

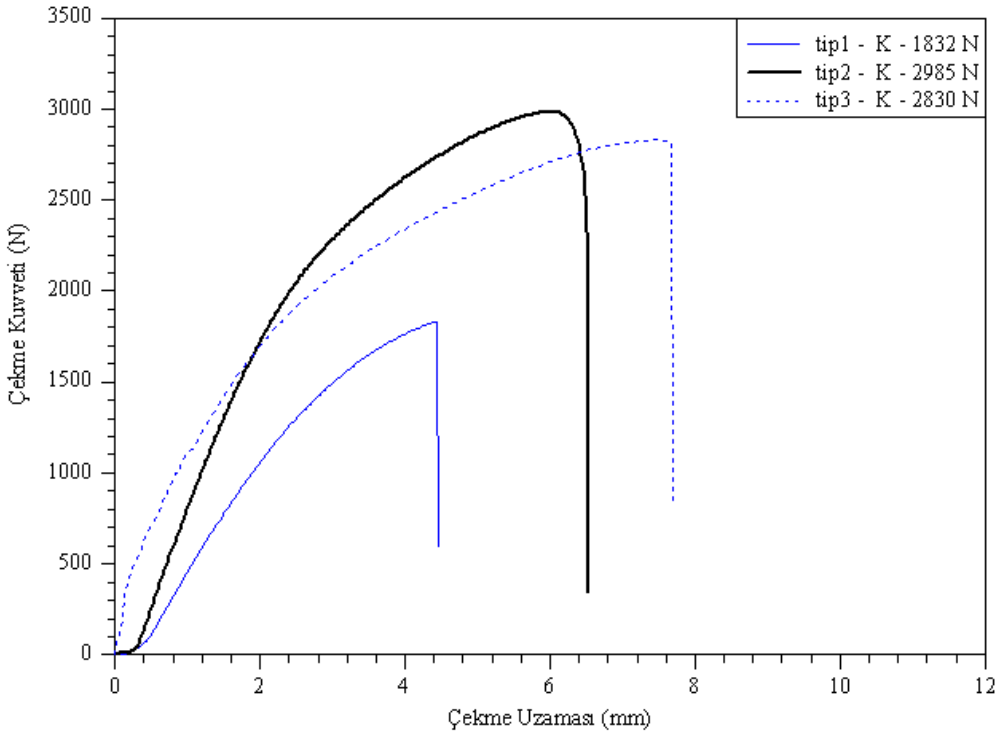
değişimine ait eğriler Şekil 4.18'de görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili yapıştırıcılı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip2 yapışkanlı numunenin, tip1 ve tip3 yapışkanlı numuneden yaklaşık iki kat daha fazla enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Fakat bu enerji değeri esas malzemeden elde edilen enerji değerinden oldukça düşüktür. Elde dilen çekme kuvveti değeri ise çok düşük olmamakla beraber esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinden önemli miktarda aşağıdadır. Yapışkanlı bağlantılar için en yüksek çekme kuvvetine, tip2 yapışkanlı numunede ulaşılmıştır.



Şekil 4.18: Farklı bağlantı tasarımlı ve yapıştırıcılı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

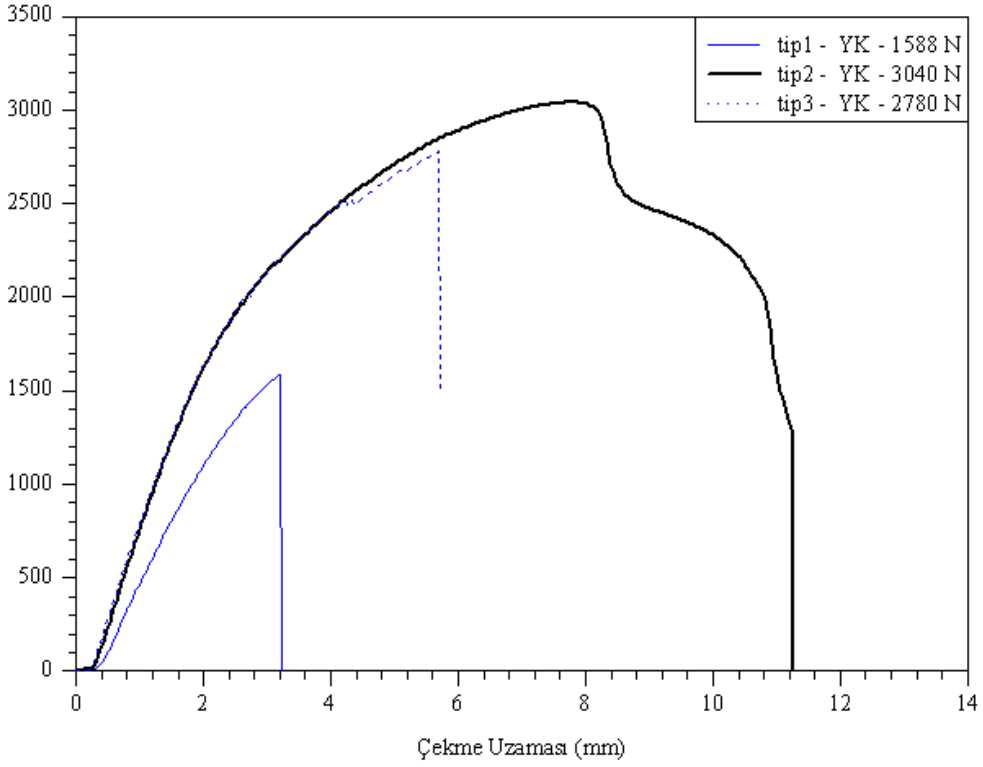
Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve kaynaklı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler Şekil 4.19'da görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip2 ve tip3 kaynaklı numunelerin enerji değerleri birbirine yakındır ve tip1 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değerinin yaklaşık dört katı enerjiyi absorbe etmişlerdir. Fakat bu enerji değerleri esas malzemeden elde edilen enerji değerinden oldukça düşüktür. Elde edilen çekme kuvveti değerleri ise esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti

değerine oldukça yakındır. Kaynaklı bağlantılar için de en yüksek çekme kuvvetine, tip2 kaynaklı numunede ulaşılmıştır.



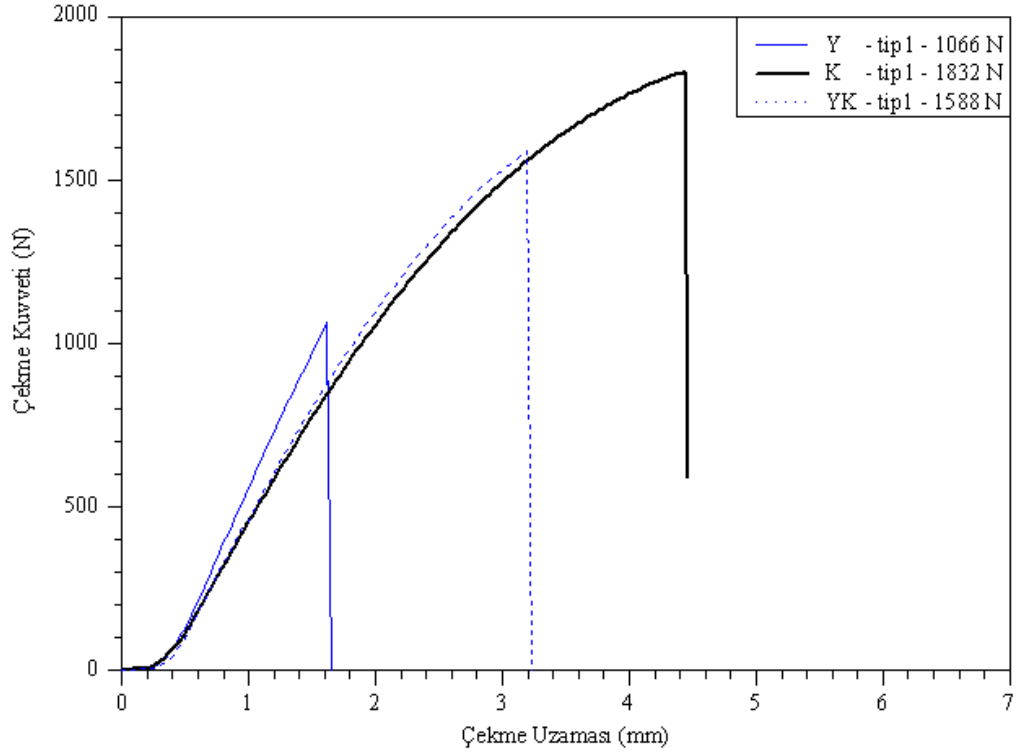
Şekil 4.19: Farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve kaynaklı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve yapışkan artı kaynaklı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler Şekil 4.20'de görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili yapışkan artı kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip2 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri, tip3 yapışkan artı kaynaklı numunenin yaklaşık iki katı, tip1 yapışkan artı kaynaklı numunenin ise yaklaşık on katıdır. Fakat bu enerji değeri de esas malzemeden elde edilen enerji değerinden oldukça düşüktür. Buna karşın elde edilen çekme kuvveti değeri ise esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerine çok yakındır. Yapışkan artı kaynaklı bağlantılar için de en yüksek çekme kuvvetine, tip2 yapışkan artı kaynaklı numunede ulaşılmıştır.



Şekil 4.20: Farklı bağlantı tasarımlı (tip1, tip2 ve tip3) ve yapışkanlı artı kaynaklı birleştirmeler için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

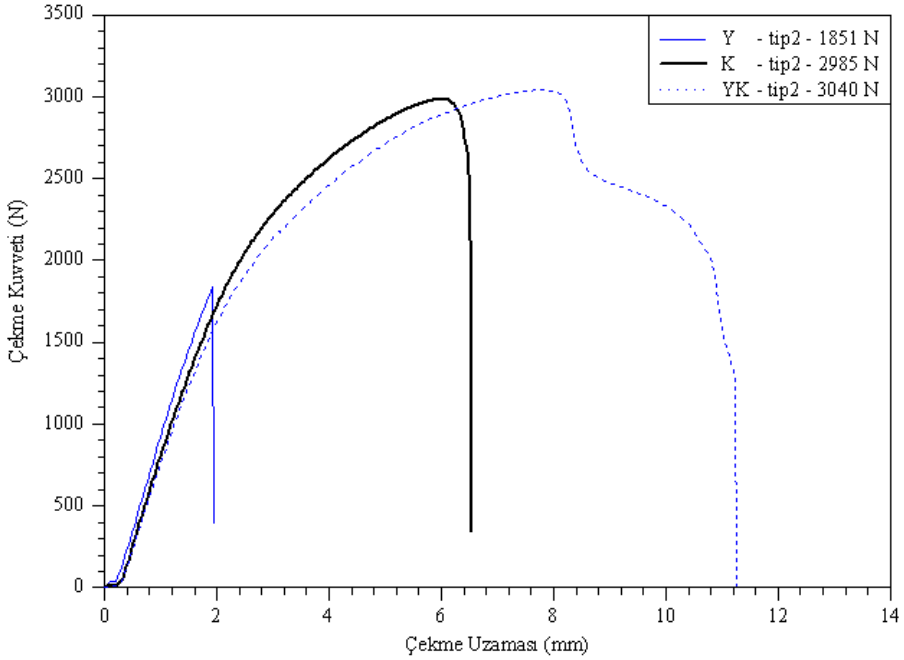
Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip1 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler Şekil 4.21'de görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili tip1 yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip1 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri, tip1 yapışkanlı numunenin yaklaşık yedi katı ve yapışkan artı kaynaklı numunenin ise yaklaşık iki katıdır. Fakat bu enerji değeri esas malzemeden elde edilen enerji değerinden oldukça düşüktür. Elde dilen çekme kuvveti değeri ise çok düşük olmamakla beraber esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinden önemli miktarda aşağıdadır. tip1 bağlantı tasarımı için en yüksek çekme kuvvetine, kaynaklı numunede ulaşılmıştır.



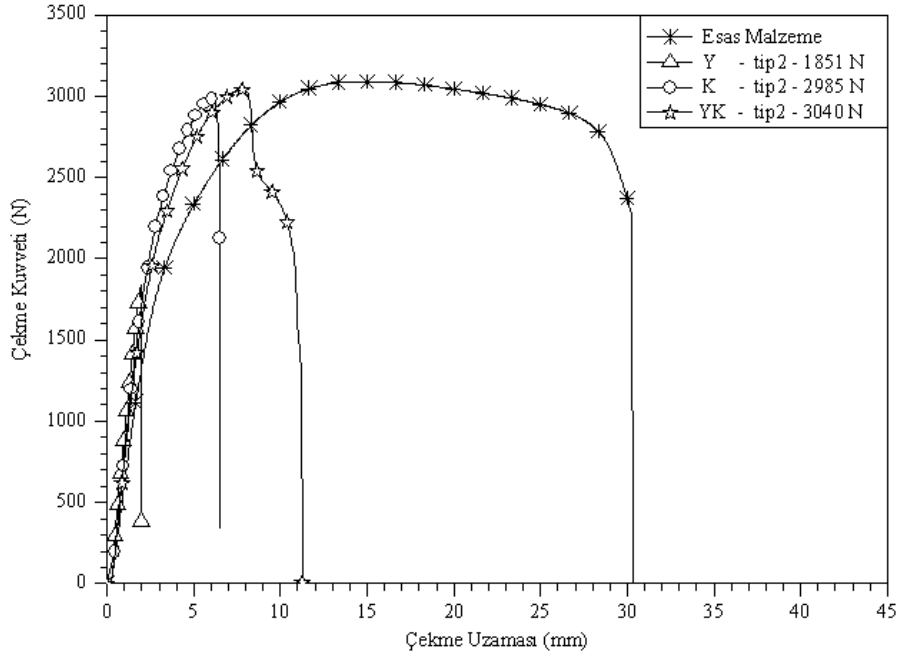
Şekil 4.21: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip1 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip2 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler Şekil 4.22'de görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili tip2 yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip2 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri, tip2 yapışkanlı ve tip2 kaynaklı numunelerin absorbe ettikleri enerji değerlerinden oldukça yüksektir. Fakat bu enerji değeri esas malzemeden elde edilen enerji değerinden ise oldukça düşüktür. Elde dilen çekme kuvveti değerleri ise tip2 kaynaklı ve tip2 yapışkan artı kaynaklı numuneler için, yapılan tez çalışmasında elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleri olup birbirine oldukça yakındır. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan, en yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği numuneler ve de esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi Şekil 4.23'te görülmektedir. Yapılan çalışmalarda elde edilen en yüksek değerler, esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değeri ile karşılaştırıldığında, esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerine de çok yakın olduğu görülmüştür.

tip2 bağlantı tasarımı için en yüksek çekme kuvvetine, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde ulaşılmıştır.

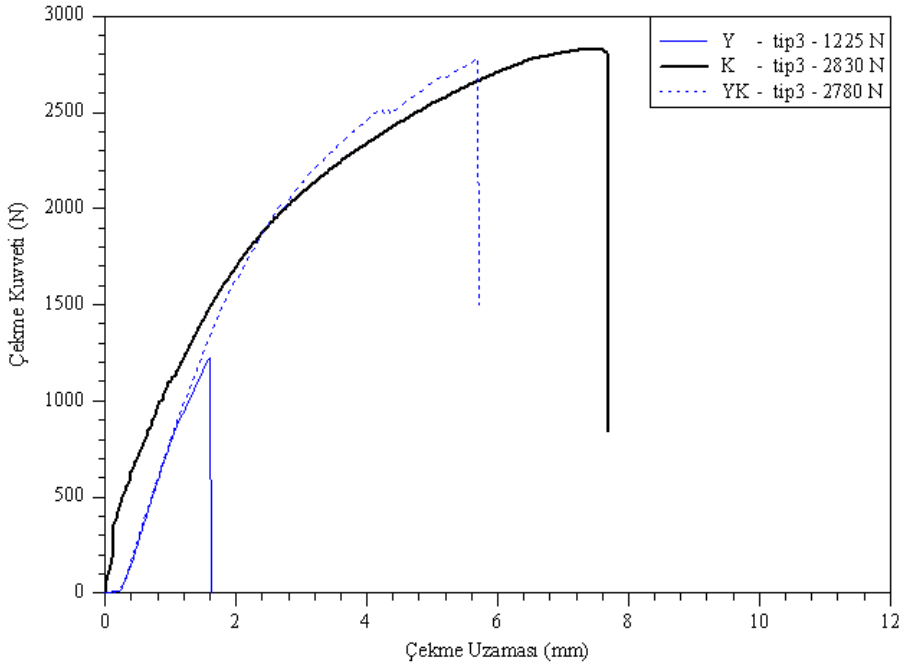


Şekil 4.22: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip2 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



Şekil 4.23: Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımlarında yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan, en yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği numuneler ile esas malzeme için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

Uygulanan çekme deneyleri sonucu elde edilen, yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip3 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimine ait eğriler Şekil 4.24'te görülmektedir. Tablo 4.11'de ise ilgili tip3 yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerin absorbe ettiği enerjilerin sayısal değerleri görülmektedir. tip3 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri, tip3 yapışkanlı ve tip3 yapışkan artı kaynaklı numunelerin absorbe ettikleri enerji değerlerinden oldukça yüksektir. Fakat bu enerji değeri esas malzemeden elde edilen enerji değerinden ise oldukça düşüktür. Elde dilen çekme kuvveti değerleri ise tip3 kaynaklı ve tip3 yapışkan artı kaynaklı numunelerde oldukça yüksek olup, esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerine yakındır. tip3 bağlantı tasarımı için en yüksek çekme kuvvetine, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde ulaşılmıştır.



Şekil 4.24: Yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı tip3 bağlantı tasarımı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi

Farklı bağlantı tasarımları (tip1, tip2 ve tip3) ve de kaynaklı, yapışkan artı kaynaklı bağlantılar için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Elde edilen optik mikroskop görüntüleri eklerdeki Tablo A.20, Tablo A.21, Tablo A.22, Tablo A.23 ve Tablo A.24'teki beş adet tabloda verilmiştir. Kırılma şekline bağlı olarak eklerdeki Tablo A.21'de büyütme oranları 10, 40 ve 40 olarak seçilirken,

diğer dört tabloda 10, 20 ve 40 büyütme oranları ile optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

Eklerdeki Tablo A.20'de tip1 bağlantı tasarımı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantı için seçilen 22 nolu numunenin kopma yüzeyleri optik mikroskop ile incelenip farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Seçilen bu numune için alınan üç optik mikroskop görüntüsünde 10, 20 ve 40 büyütme oranları kullanılmıştır. 22 nolu tip1 yapışkan artı kaynaklı bağlantıda kopma yırtılmasının üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği ara yüzey esaslı kopma yani mod 3 kopma şekli için 1588 N çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır. Çekme deneyi sonrası, kopma bölgesindeki çekme uzamaları çok yoğun olmamakla beraber, 10 ve 20 büyütme oranlarında özelliklede 40 büyütme oranı için görülmektedir. Tek kaynak noktası artı yapıştırıcılı bu bağlantı için elde edilen çekme kuvveti değeri çok düşük olmamakla beraber, yapıştırıcı kullanılmadan oluşturulan ve optimum kaynak parametrelerinin elde edildiği tek nokta kaynaklı bağlantıdan elde edilen 1832 N çekme kuvveti değerinden oldukça düşüktür. Numune yüzeyinde sünek kırılma izleri olmakla beraber gevrek kırılmanın hakim olduğu görülmektedir. Tablo 4.11 incelendiğinde, elde edilen enerji değerleri de bunu desteklemektedir. tip1 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değerinin, tip1 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değerinden düşük olması, elde edilen çekme kuvvetinin düşük çıkası sonucunu desteklemektedir.

Eklerdeki Tablo A.21'de verilen 25 nolu deney numunesi ile eklerdeki Tablo A.22'de verilen 4 nolu deney numunesi için kopma şekilleri farklılık göstermekle beraber, elde edilen çekme kuvveti değerleri birbirine çok yakındır. Ayrıca elde edilen optik mikroskop görüntüleri de benzerlik göstermektedir. Her iki numunede de sayfa düzlemine dik olarak gelişen çekme uzamaları görülmektedir. 25 nolu tip2 kaynaklı bağlantıda kopma yırtılmasının kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu omuz esaslı kopma yani mod 2 kopma şekli için 2985 N ve 4 nolu tip2 yapışkan artı kaynaklı bağlantıda kopma yırtılmasının üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği ara yüzey esaslı kopma yani mod 3 kopma şekli için ise 3040 N çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Her iki bağlantının kopma yüzeyleri optik mikroskop ile incelenip belirli

büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. 25 nolu numune için çekme deneyi sonucu, alt ve üst kaynak noktalarına ait kopma sonrası sünek kırılmayı karakterize eden, çekme uzamalarının olduğu bir yüzey görünümü 10 ve de özellikle 40 büyütme için çok net olarak görülmektedir. Çekme uzamalarına ilaveten tip2 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.11'den incelendiğinde, elde edilen nispeten yüksek enerji değeri, elde edilen 2985 N'luk çekme kuvvetinin oldukça yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

Eklerdeki Tablo A.22'de 4 nolu numune için ise çekme deneyi sonrası kopma bölgesindeki uzamalar 10, 20 ve 40 büyütme için çok net olarak görülmektedir. 10 büyütme için kopma yüzeyinin sol tarafında adeta bir çok iplikçikler şeklinde lifler ve ayrıca kopma yüzeyinde çekme uzamaları görülmektedir. Özellikle yüksek büyütme oranlarında daha da net olarak görülen çekme uzamaları ise daha çok sayfa düzlemine dik olarak gelişmiştir. Sünek kırılmayı karakterize eden çekme uzamalarının yoğun olduğu bu yüzey görünümüne ilaveten tip2 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.11'den incelendiğinde, elde edilen nispeten yüksek enerji değeri, elde edilen 3040 N'luk çekme kuvvetinin oldukça yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için elde edilen 2985 N ve 3040 N'luk bu çekme kuvveti değerleri oldukça yüksektir ve de yapılan tez çalışmasında elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleridir. Böylece elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine daha öncede tanımlanan mod 2 ve mod 3 kopma şekilleri için ulaşılmıştır.

Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için elde edilen buradaki çekme kuvveti değerleri, yapılan tez çalışmasında ortalaması alınmadan elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleridir. Bu şekli ile ortalaması alınmadan, esas malzemeden elde edilen 3090 N'luk çekme kuvveti değeri ile karşılaştırılır ise 2985 N çekme kuvveti için esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinin % 96,60'ına, 3040 N çekme kuvveti için ise esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinin % 98,38'ine ulaşılmıştır. Deneyler en az üç kere tekrarlandığı ve de elde edilen çekme kuvveti değerlerinin ortalaması alındığı için % 96, 60'lık oran bir miktar düşerek % 93,43'e, % 98,38'lik oran ise önemli bir miktar düşerek % 82,75'e gerilemiştir. Buradan tip2 kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme kuvveti değerlerinin dar bir

aralıkta salınım yaptığı (tekrarlanan üç deneye ait çekme kuvveti değerleri 2785 N, 2891 N ve 2985 N) ve tip2 yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme kuvveti değerlerinin ise daha geniş bir aralıkta salınım yaptığı (tekrarlanan üç deneye ait çekme kuvveti değerleri 2151 N, 2481 N ve 3040 N) görülmüştür.

Eklerdeki Tablo A.23'te verilen 8 nolu deney numunesi ile eklerdeki Tablo A.24'te verilen 19 nolu deney numunesi için kopma bölgeleri ve de elde edilen çekme kuvveti değerleri birbirine çok yakın olmakla beraber elde edilen optik mikroskop görüntüleri oldukça farklıdır. Çünkü 8 nolu tip3 kaynaklı bağlantı için kopmanın çoğunluğu esas malzemede, çok az bir kısmı ise kaynak bölgesinde gerçekleşirken, 19 nolu tip3 yapışkan artı kaynaklı bağlantı için ise kopma tamamen esas malzemede yani kaynak bölgesinin dışında gerçekleşmiştir. Her iki bağlantının kopma yüzeyleri optik mikroskop ile incelenip belirli büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. 8 nolu numune için oldukça yoğun bir şekilde, sünek kırılmayı karakterize eden uzamış lifler ve çekme uzamaları görülmektedir. Çekme kuvvetinin yüksek çıkmasını da bu uzamalar açıklamaktadır. 10 ve daha yüksek büyütme oranlarında (20 ve 40 büyütme) bu uzamış lifler çok daha net olarak görülmektedir. Bu lifler adeta bir çok iplikçikler şeklinde görülmektedir ve çekme deneyi sırasında uzayarak kopmuştur. Bütün bu veriler malzemenin sünek yapıda olduğunu göstermektedir. Çekme uzamalarına ilaveten tip3 kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.11'den incelendiğinde, elde edilen nispeten yüksek enerji değeri, elde edilen 2830 N'luk çekme kuvvetinin yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Ayrıca 8 nolu numune için 10 büyütme yapılan optik mikroskop görüntüsünde, numunenin sağında ve solunda esas malzemenin kırılması sonucu gözlemlenebilecek kopma yüzeyi görünümü belirlenmiştir. Bütün bu gözlemler elde edilen 2830 N'luk yüksek çekme kuvveti değerini açıklamaya yardımcı olmuştur.

Eklerdeki Tablo A.24'teki numunede ise kopma tamamen esas malzemede yani kaynak bölgesinin dışında gerçekleşmiştir. Bu nedenle de elde edilen kopma yüzeyi görünümü, daha önce elde edilen diğer kopma yüzeylerine ait optik mikroskop görüntülerinden farklıdır. Optik mikroskop görüntülerindeki uzamalar ve de kopmanın kaynak bölgesinin dışında gerçekleşmesine ilaveten, tip3 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği enerji değeri Tablo 4.11'den incelendiğinde, elde

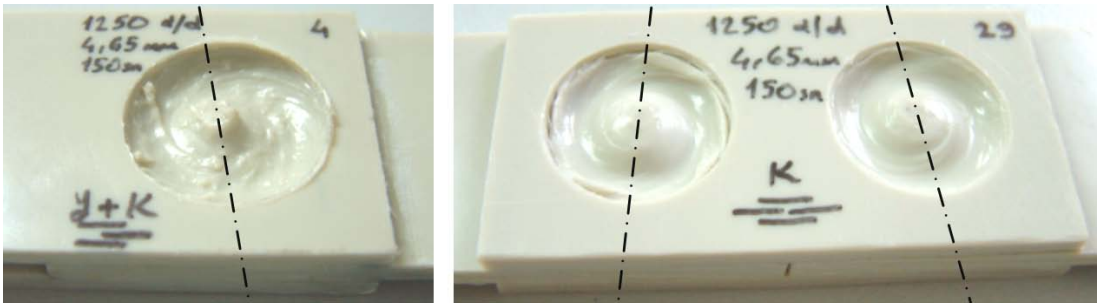
edilen nispeten yüksek enerji değeri, elde edilen 2780 N'luk çekme kuvvetinin yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için elde edilen buradaki çekme kuvveti değerleri oldukça yüksektir fakat elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleri değildir. Elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine daha öncede tanımlanan mod 2 ve mod 3 kopma şekilleri için ulaşılmıştır. Bu şekli ile ortalaması alınmadan, esas malzemeden elde edilen 3090 N'luk çekme kuvveti değeri ile karşılaştırılır ise 2830 N çekme kuvveti için esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinin % 91,59'una, 2780 N çekme kuvveti için ise esas malzemeden elde edilen çekme kuvveti değerinin % 89,97'sine ulaşılmıştır. Deneyler en az üç kere tekrarlandığı ve de elde edilen çekme kuvveti değerlerinin ortalaması alındığı için % 91,59'luk oran bir miktar düşerek % 84,14'e, % 89,97'lik oran ise önemli bir miktar düşerek % 74,47'ye gerilemiştir. Böylece tip3 kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme kuvveti değerlerinin tip2 kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi dar bir aralıkta salınım yaptığı (tekrarlanan dört deneye ait çekme kuvveti değerleri 2419 N, 2482 N 2670 N ve 2830 N) ve tip3 yapışkan artı kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme kuvveti değerlerinin ise tip2 yapışkan artı kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi daha geniş bir aralıkta salınım yaptığı (tekrarlanan dört deneye ait çekme kuvveti değerleri 1802 N, 2195 N 2428 N ve 2780 N) görülmüştür. Böylece tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımlarına bağlı kalmaksızın, her zaman için kaynaklı bağlantılarda, tekrarlanan deneyler sonucu daha güvenilir ve daha tutarlı sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Eğer kaynaklı bağlantılarda kendi arasında karşılaştırılırsa, tip2 bağlantı tasarımı için kaynaklı bağlantının en yüksek ortalama çekme kuvveti değerini verdiği belirlenmiştir.

4.8.3. Farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK numunelerinde kaynak bölgelerinin belirlenmesi için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmesi

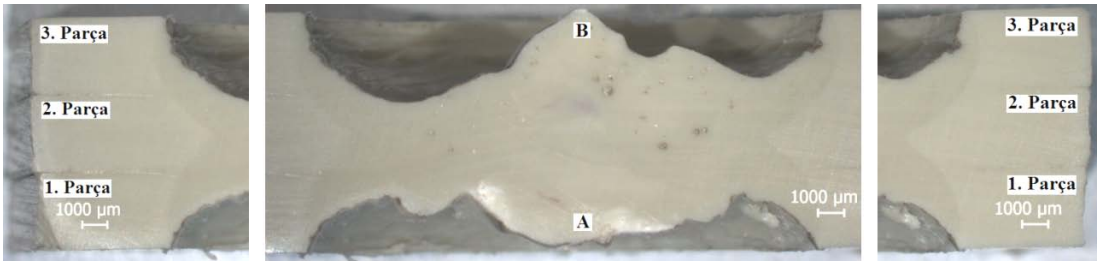
Çift nokta kaynağında uygulanan alttan ve üstten kaynak noktaları, aynı düşey eksende karşılıklı yer aldığından Şekil 4.25'teki tip2 veya tip3 bindirme bağlantılarından birinin enine kesiti alınır ise (noktalı kesik çizgilerle belirtildiği gibi

kesilirse) çift nokta kaynağı (iki taraftan nokta kaynağı) için bindirme bağlantısının kaynak bölgesinin görünümü ortaya çıkarılabileceğinden, oluşturulan çift nokta kaynaklı numunenin, kaynak noktalarının tam ortasından, ince testere bıçağına sahip masa üstü testere cihazında kesilmesi (enine kesitinin alınması) ve uygun parlatma aşamalarından geçirilerek, yüzeyin optik mikroskopta incelenmesi sonucunda Şekil 4.26'daki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 4.25: Solda tip2 ve sağda tip3 bağlantı şekli için enine kesit alınışı

Şekil 4.26'da karşılıklı olarak oluşturulan iki adet kaynak noktasının (çift nokta kaynağının) optik mikroskoptaki enine kesit görüntüsü verilmiştir. Bağlantıda, önce A sonra B kaynak noktası oluşturulmuştur. Bu nedenle 1. 2. ve 3. parçaların sıralanışı şekilde görüldüğü gibidir.



Şekil 4.26: Çift nokta kaynağının optik mikroskoptaki enine kesit görüntüsü

Bu üç parçanın ayrım çizgileri de çok net olarak görülmektedir. A kaynak noktası oluşturulurken, tek kaynak noktası için uygulanan kaynak adımları aynen uygulanmıştır. Parçanın soğuması beklenmiş ve sökülüp ters çevrilip parça tekrar üniversal dik freze tezgahının tablasına bağlama aparatı ile bağlanmış ve B kaynak noktası da aynı adımlar ile oluşturulmuştur. Çift nokta kaynağında noktalar karşılıklı

olduğundan, 2. kaynak noktası (B) oluşturulurken, 1. kaynak noktasının (A) kaynak bölgesinin de önemli bir kısmı tekrar yumuşamış ve ikinci kez karıştırılmıştır. Bu malzeme takım ucu ile 2. kaynak noktası B'nin içine dağılmıştır. Bu nedenle olduğu varsayılan 2. kaynak noktasının oluşturulduğu kısımda azda olsa bir miktar gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Alt ve üst parçanın birbirine tamamen karışıp hamur haline geldiği ve üst parça ile alt parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği (kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve tek bir parça şeklinde görülen kısım) kısım çok net bir şekilde gözlenmektedir. Bu bölgenin artması alt ve üst parçadan yumuşayarak kaynak bölgesine katılan malzeme miktarını artırmıştır. Bu bölgenin sağında ve solunda alt ve üst parçaları birbirinden ayıran ayrım çizgileri görülmektedir. Ayrıca tek nokta kaynak bağlantısında görülen ve kaynak takımı ucu altında gelişen, e_3 çökme miktarının ve kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2'nin oluşmadığı çünkü diğer taraftan oluşturulan ikinci kaynak noktası ile bu kısımlarında yumuşayarak kaynak bölgesine katıldığı görülmüştür. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı e_1'in ise A ve B kaynak noktaları için bir kesişim bölgesi oluşturacak şekilde ortak bir bölgeyi de oluşturarak meydana geldiği belirlenmiştir.

Her iki malzemeye ait iç içe geçmiş polimer zincirlerini içeren (yeni bir yumak oluşumunu içeren) ve tek malzeme gibi davranmaya çalışan kaynak bölgenin alanı ve de hacmi elde edilen dayanım değerleri ile doğrudan ilgilidir. Bu alan ve hacim değerleri arttığında çekme kuvveti değerleri de artar. Oluşturulan tek kaynak noktalı bağlantılarda 30x30 mm bindirme bağlantısı alanının tamamı değil, sadece omuz çapı 20 mm olan takımın altındaki bölge kaynağa katılmıştır. Bu bölgenin alanı, bindirme bölgesinin alanının yaklaşık üçte birine denk gelmektedir. Çift nokta kaynağında ise tek malzeme gibi davranmaya çalışan alan ve de hacim daha da artmış ve böylece elde edilen çekme kuvveti değerleri de beklendiği gibi tek nokta kaynağına göre daha da yükselmiş olarak elde edilmiştir. Her ne kadar bir miktar gözenek oluşumu söz konusu olsa da bunun göz ardı edilebileceği çünkü bağlantının dayanımının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

1. Farklı takım bekleme süresinin, devir sayısının ve dalma derinliğinin kaynak noktasının oluşumuna ve fiziki şekline görsel olarak etkileri araştırılmıştır. Tüm deney parçalarındaki kaynak noktalarının adeta bulamaç veya çamur gibi sıvandığı ve özellikle düşük bekleme sürelerinde, devir sayılarında ve dalma derinliklerinde daha belirgin olan yönteme ait karakteristik bir boşluğun oluştuğu görülmüştür. Ancak artan devir sayısı, bekleme süresi ve dalma derinliklerinde kaynak bölgesine olan ısı girdisine bağlı olarak artan yumuşamış malzeme miktarıyla bu boşluğun dolduğu gözlemlenmiştir.

800 d/d için karakteristik boşluğun hep oluştuğu, 1250 d/d için 125 saniye ve 2000 d/d için ise 75 saniye bekleme sürelerinden itibaren, dalma derinliğinin incelendiği numunelerde ise 4,65 mm ve sonrasında ki dalma derinlikleri için bu boşluğun dolduğu, kaynak takımının geri çekilmesi sonrasında ise ayrıca bir malzeme tepeciğinin de oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak parametreleri olan bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliğinin, kaynak noktasının oluşumuna ve fiziki şekline (kaynak bölgesi görünümüne) etkisi olduğu görülmüştür.

2. Bekleme süresinin, devir sayısının ve dalma derinliğinin, numunelerin kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu açıkça belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde, kopmanın üç farklı şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Bunlardan ilkinde, kaynak bölgesinin yetersiz oluştuğu düşük bekleme sürelerinde, devir sayılarında ve de dalma derinliklerinde alt levha üzerindeki kaynak izinin çapı pim çapına yaklaşık eşit değerde olan, kopma yırtılmasının kaynak takımı piminin etrafında çevresel olduğu ve kaynak bölgesinde gerçekleştiği görülen kopma şekli, pim esaslı kopma (mod 1) olarak adlandırılmıştır. İkincisinde, bekleme süresinin ve dalma derinliğinin artışına paralel olarak iz çapının da artış gösterdiği ve buna paralel

olarak da kopma sonrası parçalarda meydana gelen çekme uzamasının çok net olarak görüldüğü ve çekme kuvvetlerinin önemli derecede artış gösterdiği, kopmaya neden olan yırtılmanın kaynak takımı omzunun etrafında çevresel olduğu görülen kopma şekli ise, omuz esaslı kopma (mod 2) olarak adlandırılmıştır. Üçüncüsünde ise, çekme kuvvetlerinin genellikle çok daha yüksek değerlere ulaştığı ve kopmanın üst levhada esas malzeme ve kaynak bölgesi kenarında (ara yüzeyinde) ilerleme gösterecek şekilde gerçekleştiği görülen ve alt levha üzerinde üst levhadan kopan parçanın yer aldığı kopma şekli ise, ara yüzey esaslı kopma (mod 3) olarak adlandırılmıştır.

3. 800, 1250 ve 2000 d/d'lık her üç devir sayısı için de çekme kuvvetinin belirli bir bekleme süresi değerine kadar artış gösterdiği ve sonraki bekleme sürelerinde ise yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Bu kritik süreler 800, 1250 ve 2000 d/d takım devirleri için sırasıyla 100, 50 ve 25 sn değerleridir. Takım devrinin artışıyla belli bir çekme kuvveti değerine daha kısa bekleme süresinde ulaşılması artan devir sayısıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı girdisinin artışı, dolayısıyla kaynak bölgesinde yumuşamış malzeme miktarının artması nedeniyledir.

75 sn bekleme süresine kadar 2000 d/d takım devri için daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşılırken bu süreden daha uzun beklemelerde ise 1250 d/d takım devrinde daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşıldığı görülmüştür. Çekme kuvveti yüksek bir kaynak noktası oluşturmak için gerekli sürtünme ısısı ve yumuşama 800 d/d'da yeterince sağlanamamış, 1250 d/d ve 2000 d/d için ise düşük bekleme sürelerinde bile, yaklaşık olarak 800 d/d'da elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek çekme kuvvetlerine 800 ve 1250 d/d takım devirlerinde 150 sn bekleme süresinde, 2000 d/d takım devrinde ise 100 sn bekleme süresinde ulaşılmıştır.

Çalışmanın bekleme süresi ve devir sayısı parametrelerinin incelendiği kısmında, elde edilen enerji değerleri pimli bağlantının ve de esas malzemenin absorbe ettiği enerji değerlerinden düşük olmakla beraber pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvveti değeri yakalanmıştır.

Bekleme süresinin ve devir sayısının çekme kuvvetine etkisinin incelendiği ve tek nokta kaynağı için bindirme bağlantıları ile yapılan çalışmalarda, 1728 N olarak elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri için optimum bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri sırası ile 150 sn - 1250 d/d - 5,5 mm - 100 mm/dak olarak bulunmuştur.

4. İncelenen SEM görüntülerinde, 2000 d/d'da gözenekli bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. 800 d/d ve 1250 d/d'da ise gözenekli yapıya rastlanmamıştır. 800 d/d'da ise aynı parametrelerde oluşturulan SKNK'lı bağlantıların tekrarlanan çekme deneyleri için elde edilen çekme kuvveti değerlerinde geniş bir aralıkta salınım olduğu belirlenmiştir. 1250 d/d ve 2000 d/d'da ise tekrarlanan çekme deneylerinde elde edilen çekme kuvveti değerlerinde oluşan salınım dar bir aralıkta kalmıştır. Bu durumda, hem gözenekli yapının oluşmadığı, hem de tekrarlanan deneylerde elde edilen çekme kuvveti değerlerinde geniş salınımlar olmayan 1250 d/d devir sayısı optimum dönme hızı olarak belirlenmiştir.

5. Çekme kuvvetinin en yüksek olduğu dalma derinliklerinden daha düşük derinliklerde (4,25-4,55 mm aralığında) mod 1 tipi kırılma gerçekleşmiştir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri de bekleme süresine ve oluşan iz çapına da bağlı olarak düşük çıkmıştır.

Çekme kuvvetinin en yüksek değerlere ulaştığı 4,65-4,70-4,75 mm'lik dalma derinlikleri için ise mod 3 tipi kırılma görülmüştür. SEM görüntüleri, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerlerini destekleyici önemli ip uçları sunmaktadır. Oldukça yoğun miktarda uzamış liflerin ve çekme uzamalarının varlığı, incelenen bu bölgede kırılmanın sünek olarak gerçekleştiğini çok açık göstermiştir. Takım omzunun bir miktar malzeme yüzeyinden içeri daldırılması sayesinde omuz altındaki karışım gösteren malzemede daha yüksek bir basma etkisi ile daha iyi yumuşama sağlanıp, kaynak bağlantısının daha iyi bir metalürjik bağa sahip olması ve daha iyi performans göstermesi sağlanmıştır.

Dalma derinliğinin daha da artması ile çekme kuvveti değerlerinin yaklaşık 1500-1700 N aralığında değişim gösterecek şekilde bir miktar düştüğü görülmüştür.

Kopma şekilleri incelendiğinde, birkaç mod 2 kopma davranışı olsa bile kopmanın genellikle mod 3 şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çalışmanın dalma derinliği parametresinin incelendiği kısmında, elde edilen enerji değerleri pimli bağlantının ve de esas malzemenin absorbe ettiği enerji değerlerinden düşük olmakla beraber pimli bağlantıdan elde edilen çekme kuvveti değeri aşılmıştır.

Dalma derinliğinin çekme kuvvetine etkisinin incelendiği ve tek nokta kaynağı için bindirme bağlantıları ile yapılan çalışmalarda, belirlenen dalma derinliği aralığının küçük artışlar ile taranması sonucu, 1832 N olarak elde edilen en yüksek çekme kuvveti değeri için optimum bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı parametreleri sırası ile 150 sn - 1250 d/d - 4,65 mm - 100 mm/dak olarak bulunmuştur.

6. Alt levha üzerindeki kaynak bölgesi izi çapının, çekme kuvveti ile olan paralelliği dikkat çekicidir. Kaynak izi çapının artış göstermesi, kaynak bölgesinin genişlediğini belirtmektedir. Bekleme süresinin veya dalma derinliğinin artması ile iz çapı artmış, iz çapının artmasına paralel olarak da çekme kuvveti değerleri artmıştır.

Üç farklı devir sayısı içinde, bekleme süresi arttıkça elde edilen çekme kuvveti değerlerinin bir değere kadar arttığı sonrasında ise yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Benzer durum artan dalma derinliği ile elde edilen çekme kuvveti değerleri içinde gözlemlenmiştir.

Bekleme süresi, devir sayısı ve dalma derinliğinin incelendiği tüm numunelerde, kaynak bölgesi malzemesi ile esas malzemenin rengi arasında herhangi bir farklılık olmayışına (renk uyumu) paralel olarak çekme kuvveti değerlerinin de gittikçe artması kaynak bölgesi malzemesinde herhangi bir bozulma olmadığını göstermektedir ki bu yapılan kaynağın durumu için olumlu bir gösterge olmuştur.

7. Pimli bağlantıya uygulanan çekme deneyinde en yüksek çekme kuvveti değeri 1754 N olarak elde edilmiştir. Bu değer esas malzemeden elde edilen 3090 N'luk çekme kuvvetinin %56,76'sına denk gelmektedir. Ayrıca pimli bağlantı için parçada

meydana gelen hasar mekanizması ise bu tarz pimli bağlantılarda tercih edilen ezilme şeklindeki hasar mekanizmasıdır. Çekme cihazının alt çenesi hareketsiz, üst çenesi ise hareketli olduğundan, üst çenenin yukarıya doğru hareketi ile pimin PP numuneye baskı etkisi sonucu, PP numunede önce ezilme meydana gelmiş ve sonrasında ise dairesel olarak açılmış olan delik elips şeklinde deforme olmuştur. Yük devam ettirildiğinde ise parça çekme doğrultusunda yırtılarak kopmuştur.

8. Tahribatsız malzeme muayenesi deneylerinin sonuçlarının incelendiği numunelerin hiçbirinde bir kaynak hatası olan gözenek veya boşluk oluşumu görülmemiştir. Ayrıca filmlerin arkasından yoğun ışık gönderildiğinde ön taraftan gözlemlenen kaynak bölgesinin izi de dikkat çekmektedir. Düşük dalma derinliği ve düşük bekleme süresinde kaynak bölgesinin iz çapı küçüktür. Bu durum takımın dalma derinliği veya bekleme süresi düşük olduğunda yumuşayan malzeme miktarının ve buna bağlı olarak da kaynak bölgesi alanının daha düşük oluşması ile doğrudan ilgilidir. Ayrı ayrı incelendiğinde, dalma derinliğinin artması ve bekleme süresinin artması, incelenen çekme kuvveti açısından birbirine paralel sonuçlar vermiştir. Elde edilen çekme kuvveti değerleri, dalma derinliği ve bekleme süresine dolayısıyla da kaynak bölgesinin iz çapına bağlı olarak artmıştır.

9. Kaynak bölgesinden alınan numunelere yapılan DSC analizi sonucu elde edilen verilerin esas malzeme için elde edilen verilere yakın olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinde de, esas malzemede olan fakat aşırı olmayan, kabul edilebilir salınımlar vardır. Esas malzeme ile kaynak bölgesinin DSC analizi sonucu elde edilen veriler birbirine yakın olduğundan, kaynak bölgesindeki malzemenin yapısında bir bozulma olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca kaynak bölgesinin onset, peak, endset sıcaklık değerleri, esas malzemeye ait ortalama onset, peak, endset sıcaklık değerlerinin yer aldığı ve kaynak parametreleri olan dalma derinliği ve bekleme süresinin birlikte incelendiği grafiklerde, salınımın oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak kristallenmede, malzemede bozulma oluşturacak bir azalma veya artma söz konusu değildir. Esas malzeme ile karşılaştırıldığında, kaynak sonrası malzemeyi bozacak önemli bir değişim yoktur. Endset sıcaklık değerinden sonrada malzeme ısıtılmaya devam edilirse, ilk başta bozulma gözlenmez iken sıcaklığın gittikçe

artması ile bozulma başlayacaktır. Bağlantıların gerçekleştirildiği sıcaklık camsı geçiş sıcaklığının üstü, erime sıcaklığının altı olduğu için yapılan kaynak bağlantılarının renginde de bozulmaya (sararma) rastlanmamıştır.

10. Farklı parametrelerde oluşturulan SKNK numuneleri için takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalarda oluşan sıcaklık incelenmiştir. Eğrilerin üzerindeki F1 tepesi takım ucu, F2 tepesi ise takım omzu tarafından oluşturulmuştur. Tüm eksenel kuvvetin zaman ile değişiminin incelendiği eğrilerde, F1'in bir miktar düşmesinin nedeni literatürde de belirtildiği gibi erime yağlamasından dolayıdır. Bu durum, esas malzeme ile dönen takım ucu arasında meydana gelen viskozitesi düşük erimiş malzemeden kaynaklanmaktadır. Tüm numuneler için sıcaklık değeri, numunelere bağlı olan her üç termokupul için, dalma aşamasında takımın ucunun üst parçaya dokunması ile oda sıcaklığından hızla yükselmiştir. Karıştırma aşamasının önemli bir kısmında ise eğimi azalmış ve hemen hemen yatay olarak kalmıştır. Geri çekilme aşamasında ise düşmeye başlamıştır. Karıştırma süresi içinde sıcaklığın artmasına zıt olarak eksenel kuvvet hızla düşmüştür.

11. SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi, 25sn-150sn-200sn'lik bekleme süreleri ve 800 d/d devir sayısı için, 0-200sn aralığında değişen bekleme süreleri ve 1250 d/d devir sayısı için, 0sn-25sn-150sn'lik bekleme süreleri ve 2000 d/d devir sayısı için 100 mm/dak dalma hızı ve 5,5 mm dalma derinliğinde incelenmiştir.

Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 800 d/d, 1250 d/d, 2000 d/d ve 25 sn bekleme süresi için en yüksek sıcaklık değerleri 2000 d/d için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini ve böylece yüksek devir sayısı için düşük bekleme sürelerinde bile yeterli kaynak sıcaklığına ulaşılabildiğini göstermiştir. 2000 d/d ve 25 sn için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerinin de, 800 d/d ile 1250 d/d ve 25 sn'de yapılan birleştirmelerde elde edilen iz çapı değerlerinden yüksek çıkması, kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermektedir. Bu veriler, çekme kuvveti değerinin, aynı parametreler için 800 d/d ile 1250 d/d'dan yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

Kırılma türleri ise 800 d/d için mod 1, 1250 d/d için mod 2 ve 2000 d/d için ise mod 3 olarak gerçekleşmiştir.

Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 800 d/d, 1250 d/d ve 2000 d/d için en yüksek sıcaklık değerleri 1250 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. 1250 d/d devir sayısı ve 150 sn bekleme süresi için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerinin de, 1250 d/d'nın diğer bekleme sürelerinde ve 800 d/d ile 2000 d/d'da yapılan ve bekleme süresinin incelendiği birleştirmelerde elde edilen iz çapı değerlerinden yüksek çıkması, kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermektedir. Bu veriler, 150 sn ve 1250 d/d için elde edilen çekme kuvveti değerinin, aynı parametreler için 800 d/d ve 2000 d/d'dan yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Kırılma türleri ise 800 d/d ve 2000 d/d için mod 2, 1250 d/d için ise mod 3 olarak gerçekleşmiştir.

12. SKNK sırasında oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 100 mm/dak dalma hızı için 4,25 mm, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinliklerinde incelenmiştir.

Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile 4,25 mm, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için en yüksek sıcaklık değerleri 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. En yüksek çekme kuvveti değerine en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılan dalma derinliklerinde değil 4,65 mm dalma derinliğinde ulaşılmıştır. Böylece sıcaklığın çok artması değil de optimum değerlerde olması gerektiği yorumu yapılmıştır. Kırılma türleri ise 4,25 mm dalma derinliği için mod 1, 4,65 mm, 5 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için ise mod 3'tür.

13. SKNK sırasında takımda oluşan eksenel kuvvet ve parçalardaki sıcaklığın zaman ile değişimi 1250 d/d devir sayısı, 150 sn bekleme süresi ve 5,5 mm dalma derinliği

için 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızlarında incelenmiştir.

Dört kanallı termometrenin üç adet çıkışına bağlanan üç adet K tipi termokupuldan alt parçaya bağlanan "3" nolu termokupul ile, 12,5 mm/dak, 25 mm/dak, 50 mm/dak ve 100 mm/dak dalma hızları için en yüksek sıcaklık değerleri 100 mm/dak dalma hızı için ölçülmüştür. Bu durum üst parçada olduğu gibi alt parçada da yumuşamanın ve karıştırma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Buradaki dalma hızları için çekme deneyi sonrası ölçülen iz çapı değerlerinin de, 100 mm/dak dalma hızı için yüksek çıkması, kaynak bölgesi alanının genişlediğini göstermekte ve elde edilen çekme kuvveti değerinin yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Kırılma türü ise dört dalma hızı içinde mod 3 olarak gerçekleşmiştir.

Takımın yavaş dalma hızında, omuz dokununcaya kadar geçen uzun zaman aralığında, takımın sadece ucu malzemeyi yeterince yumuşatamadığından daha fazla malzeme kaçışına neden olduğu gözlenmiştir. Buda kaynak bölgesine katılan malzeme miktarını azaltacağından, bağlantının dayanımı düşmüştür. Böylece düşük dalma hızının dezavantajı, elde edilen çekme kuvvetinin düşmesi olarak belirlenmiştir.

Dalma hızı artınca, dalma aşaması için harcanan zaman azalmış böylece toplamda bir kaynak noktası oluşturmak için geçen süre (kaynak çevrimi süresi yani kaynak zamanı) kısalmıştır.

14. Kaynak bölgelerinin belirlenmesi için kaynaklı parçaların enine kesitleri optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmiştir. Yumuşayan ve karıştırılan malzemenin hangi termokupula daha çok yaklaştığı, sürekli kaydedilen sıcaklık değerleri ile ölçülebildiği gibi kaynak işlemi sonrası, enine kesit incelemeleri ile de kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile kaynaşmamış yapının kaynak parametrelerine bağlı olarak konumunun ve fiziksel durumunun net olarak belirlenebileceği optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Kaynak alanı arttıkça da elde edilen çekme kuvveti değeri artmıştır.

Kaynak bölgesinin boyutlandırılmasında, d_1 ve d_2 uzunlukları kaynak takımının omuz çapı ile doğrudan ilgilidir. d_1'in artması d_2'nin ise azalması böylece yumuşayan malzemenin et kalınlığının artması, d_3'ün artması d_4'ün ise azalması böylece alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması (hatta çukur kısmın yukarı doğru kendini doldurması) kaynak alanının ve hacminin artmasını sağlamıştır. Buda bağlantının dayanımının artmasını desteklemiştir. d_1'in artması yumuşayan kaynak bölgesi malzemesinin üst parçanın üstünde bulunan "2" nolu termokupula, d_3'ün artması ise yumuşayan kaynak bölgesi malzemesinin üst parçanın yanında bulunan "1" ve alt parçanın yanında bulunan "3" nolu termokupullara yaklaşmasını sağlamıştır.

d_3, alt ve üst parçanın birbirine tamamen karışıp hamur haline geldiği ve üst parça ile alt parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği (kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve tek bir parça şeklinde görülen kısım) uzunluğu göstermektedir. Bu ölçünün sağında ve solunda alt ve üst parçayı birbirinden ayıran ayrım çizgisi görülmektedir. d_3'ün artması, alt ve üst parçadan yumuşayarak kaynak bölgesine katılan malzeme miktarını artırmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen, e_3 çökme miktarının az olması ve kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2'nin azalması buna karşılık yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı e_1'in artması yine bağlantının dayanımının artmasını sağlamıştır.

15. Bekleme süresinin incelendiği numunelerde, d_1 en yüksek değerine 100 ile 200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde ulaşmıştır. d_2 ise en düşük değerine 150 sn bekleme süresi için ulaşmıştır. Böylece d_1'in artması d_2'nin ise azalması ile yumuşayan malzemenin et kalınlığı artmıştır.

d_3 en yüksek değerine 75 ile 200 sn aralığındaki bekleme sürelerinde ulaşmıştır. d_4 ise en düşük değerine 75 ile 150 sn aralığındaki bekleme sürelerinde ulaşmıştır. Böylece d_3'ün artması d_4'ün ise azalması ile alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması böylece kaynak alanının artması sağlanmıştır.

En yüksek çekme kuvveti değerine ise d_1 ve d_3 değerleri yüksek, d_2 ve d_4 değerleri düşük olan 150 sn bekleme süresi için ulaşılmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen e_1, e_2 ve e_3 değerleri de elde edilen buradaki sonucu pekiştirici özellik göstermiştir. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı olan ve bağlantının dayanımını artırıcı rol oynayan e_1, en yüksek değerine 150 sn bekleme süresinde ulaşmıştır. Bu bekleme süresinde, kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2 ve çökme miktarı e_3 değerleri ise nispeten düşüktür. Bu durumda elde edilen çekme kuvvetinin artmasını sağlamıştır.

16. Dalma derinliğinin incelendiği numunelerde, d_1 en yüksek değerine 4,65 mm ile 5,80 mm aralığındaki dalma derinliklerinde ulaşmıştır. d_2 ise en düşük değerine 4,65 mm dalma derinliği için ulaşmıştır. Böylece d_1'in artması d_2'nin ise azalması ile yumuşayan malzemenin et kalınlığı artmıştır.

Dalma derinliği arttıkça d_1 artmış d_2 ise azalmış fakat d_2 en düşük değerine 4,65 mm'de ulaşmıştır. Yine dalma derinliği arttıkça d_3 artmış ve en yüksek değerine 4,65 mm ile 5,80 mm aralığındaki dalma derinliklerinde ulaşmıştır. d_4 ise en düşük değerine 4,65 mm ile 5,80 mm dalma derinliklerinde ulaşmıştır. Böylece d_3'ün artması d_4'ün ise azalması ile alt ve üst parçaya ait yumuşayarak kaynaşmanın tamamen gerçekleştiği ve alt parça ile üst parça arasındaki ayrım çizgisinin görülmediği, daire halkasına benzer kısmın et kalınlığının artması böylece kaynak alanının artması sağlanmıştır. Ayrıca dalma derinliği arttıkça d_1 ve d_3'ün düzenli bir şekilde arttığı görülmüştür.

En yüksek çekme kuvveti değerine ise en yüksek dalma derinliğinde değil, d_1 ve d_3 değerleri nispeten yüksek, d_2 ve d_4 değerleri düşük olan 4,65 mm dalma derinliği için ulaşılmıştır. Ayrıca kaynak takımı ucu altında gelişen e_1, e_2 ve e_3 değerleri de, bekleme süresinin incelendiği numunelerde olduğu gibi dalma derinliğinin incelendiği numunelerde de, elde edilen buradaki sonucu pekiştirici özellik göstermiştir. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı olan ve bağlantının dayanımını artırıcı rol oynayan e_1, en yüksek değerine 4,65 mm dalma derinliğinde ulaşmıştır. Bu dalma derinliğinde, kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2 değeri diğer dalma derinliklerinde ki değerler ile

yakın olmakla beraber, çökme miktarı e_3 değeri ise en düşük değerde kalmıştır. Böylece elde edilen çekme kuvveti değeri artmış ve 4,65 mm dalma derinliği için en yüksek çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır.

17. Belirlenen optimum parametreler kullanılarak geliştirme amaçlı tip1, tip2 ve tip3 olmak üzere farklı bağlantı tasarımları için yapıştırıcılı, kaynaklı ve yapıştırıcılı artı kaynaklı numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan numunelerin kopma davranışına ve çekme kuvvetine etkisi olduğu açıkça belirlenmiştir.

Kaynak bölgesinin yetersiz oluştuğu mod 1 kopma şekli, farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan numunelerin hiç birinde oluşmamıştır. mod 2 ve mod 3 kopma şekli özellikle daha yüksek çekme kuvveti değerlerinin elde edildiği kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerin çoğunda elde edilmiştir.

18. Daha önce bilinen mod 1, mod 2 ve mod 3 kopma şekillerine ilaveten, tip3 bağlantı tasarımı için kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde, çekme deneyi sonrası daha önce rastlanmayan ve kopmanın çoğunluğunun esas malzemede, çok az bir kısmının kaynak bölgesi kenarında gerçekleştiği (tip3 kaynaklı bağlantı için çekme kuvveti 2830 N) ve de kopmanın tamamen esas malzemede yani kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği (tip3 yapışkan artı kaynaklı bağlantı için çekme kuvveti 2780 N) çekme kuvvetinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı yeni ve diğer iki kopma şekline ulaşılmıştır. Ayrıca diğer kaynak bağlantılarında olduğu gibi kaynak noktasına doğru içbükey bir görünüm değil de, dışbükey bir görünüm vererek kopmanın gerçekleştiği görülmüştür.

19. Bu kopma şekillerine ilaveten ayrılma şeklindeki yeni ve diğer bir kopma şekline ise tip1, tip2 ve tip3 farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan sadece yapıştırıcılı bağlantılarda rastlanmıştır. tip1 yapıştırıcılı bağlantı için 1066 N, tip2 yapıştırıcılı bağlantı için 1851 N ve tip3 yapıştırıcılı bağlantı için ise 1225 N çekme kuvvetine ulaşılmıştır.

20. tip2 kaynaklı bağlantıda mod 2 kopma şekli için 2985 N ve tip2 yapışkan artı kaynaklı bağlantıda ise mod 3 kopma şekli için 3040 N çekme kuvveti değerlerine

ulaşılmıştır. Sünek kırılmayı karakterize eden çekme uzamalarının yoğun olduğu yüzey görünümüne ilaveten tip2 yapışkan artı kaynaklı numunenin absorbe ettiği oldukça yüksek enerji değeri, elde edilen 3040 N'luk çekme kuvvetinin oldukça yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Geliştirme amaçlı farklı bağlantı tasarımları için elde edilen 2985 N ve 3040 N'luk bu çekme kuvveti değerleri oldukça yüksektir ve de yapılan tez çalışmasında elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerleridir. Böylece elde edilen en yüksek çekme kuvveti değerlerine daha öncede tanımlanan mod 2 ve mod 3 kopma şekilleri için ulaşılmıştır.

21. tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekillerinin her biri kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı numuneler için ayrı ayrı incelendiğinde her zaman için kaynaklı bağlantıdan elde edilen ortalama çekme kuvvetinin, yapışkanlı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantıdan daha yüksek çıktığı görülmüştür. En yüksek ortalama çekme kuvveti değeri 2887 N, tip2 bağlantı şekli için kaynaklı numunede elde edilmiştir. Elde edilen bu ortalama çekme kuvveti, esas malzemenin 3090 N'luk çekme kuvvetinin % 93,43'üne denk gelmektedir. Böylece parçalara sadece SKNK yönteminin uygulanmasının, sadece yapıştırıcılı uygulamadan ve de yapıştırıcılı artı SKNK'lı uygulamadan daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. tip1 ve tip3 bağlantı şekilleri ile karşılaştırıldığında, yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantılar için tip2 bağlantı şeklinin en uygun bağlantı tasarımı olduğu görülmüştür. En yüksek ortalama çekme kuvvetine ulaşılmasını sağlayan optimum bağlantı tasarımının SKNK'lı tip2 bağlantı şekli olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca tip1, tip2 ve tip3 bağlantı şekillerinin her biri kendi içinde yapışkanlı, kaynaklı ve yapışkanlı artı kaynaklı numuneler için incelendiğinde, kaynaklı numunelerde elde edilen yüzde çekme kuvveti değerleri, yapışkanlı ve yapışkan artı kaynaklı numunelerde elde edilen yüzde çekme kuvveti oranlarından her zaman için daha yüksek çıkmıştır. Kaynaklı numunelerde tip1 için bu oran % 59,29 iken, tip2 için % 93,43 ve tip3 için ise % 84,14'tür.

22. Farklı bağlantı tasarımları için oluşturulan SKNK numunelerinde kaynak bölgelerinin belirlenmesi için kaynaklı parçanın enine kesiti optik mikroskop ile incelenmiştir. Enine kesit incelemesi ile kaynak bölgesindeki kaynaşmış yapı ile

kaynaşmamış yapının konumu ve fiziksel durumu net olarak belirlenmiştir. Kaynak alanı ve hacmi arttığı için elde edilen çekme kuvveti değerleri artmıştır.

Çift nokta kaynağında noktalar karşılıklı olduğundan, 2. kaynak noktası (B) oluşturulurken, 1. kaynak noktasının (A) kaynak bölgesinin de önemli bir kısmı tekrar yumuşamış ve ikinci kez karıştırılmıştır. Bu malzeme takım ucu ile 2. kaynak noktası B'nin de içine dağılmıştır. Bu nedenle olduğu varsayılan 2. kaynak noktasının oluşturulduğu kısımda azda olsa bir miktar gözenek oluşumu tespit edilmiştir.

Ayrıca tek nokta kaynak bağlantısında görülen ve kaynak takımı ucu altında gelişen, e_3 çökme miktarının ve kaynağa katılmayan alt parçada kalan yumuşamayan malzeme kalınlığı e_2'nin oluşmadığı çünkü diğer taraftan oluşturulan ikinci kaynak noktası ile bu kısımlarında yumuşayarak kaynak bölgesine katıldığı görülmüştür. Bu kısımların bağlantıların dayanımına önemli katkısı olmuştur. Yumuşayan ve kaynağa katılan malzeme kalınlığı e_1'in ise karşılıklı kaynak noktaları için bir kesişim bölgesi oluşturacak şekilde ortak bir bölgeyi de oluşturarak meydana geldiği belirlenmiştir. Her ne kadar bir miktar gözenek oluşumu söz konusu olsa da bunun göz ardı edilebileceği çünkü bağlantılardan elde edilen çekme kuvvetlerinin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

5.2. Öneriler

Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda, farklı uç ve omuz profillerine sahip kaynak takımları kullanılarak, SKNK yöntemine uygunluğu araştırılabilir.

Ayrıca kullanılan takımın omuz kısmının içine, takımın uç kısmının geri çekilebildiği, bilgisayar ile kontrol edilen özel takımlar kullanılarak, kaynak sonrası oluşan boşluğun doldurulması ve böylece dolan boşluğun dayanıma sağlayacağı katkı araştırılabilir.

Erime noktaları birbirine yakın olan iki farklı malzemenin SKNK yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Anık, S., Oğur, A., Vural, M., Turan, H., "Direnç Nokta Kaynak Elektrodu Ömrünün Deneysel Analizi", ***Mühendis ve Makina,*** 513, (2002).

Arıcı, A., A., Sınmazçelik, T., "Plastiklerin Kaynaklı Birleştirme Yöntemleri", ***PAGEV Plastik Dergisi,*** 124-133, (2004).

Arıcı, A., A., Sınmazçelik, T., "Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene", ***Journal of Materials Science,*** 40, 3313-3316, (2005).

Arıcı, A., A., Mert, Ş., "Polipropilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi", ***PAGEV Plastik Dergisi,*** 95, 152-162, (2007).

Arıcı, A., A., Mert, Ş., "Friction Stir Spot Welding of Polypropylene", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites,*** 27, 2001-2004, (2008).

Arıcı, A., A., Ertürk, A., T., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Polietilen Levhalarda Kaynak Bölgesi Özelliklerinin Belirlenmesi", ***8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı,*** Yıldız Teknik Üniversitesi, 490-497, İstanbul, 7-9 Kasım (2007).

Arıcı, A., A., Şelale S., "Polietilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi", ***PAGEV Plastik Dergisi,*** 130-138, (2007).

Adamowski, J., 2006, Friction Stir Welding - przełomowa metoda zgrzewania w stanie stałym i jej zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, http://www.ithink. pl /artykuly/aktualnosci/nowinki-technologiczne/friction-stir-welding-8211-przelomowa-metoda-zgrzewania-w-stanie-stalym-i-jej-zastosowanie-w-przemysle-motoryzacyjnym/ **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009).**

ATTEXOR Inc., What is clinching? USA, http://www.attexorinc.com/Publication 4_files/page0018.htm **(Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2009a).**

ATTEXOR Inc., What is clinching? USA, http://www.attexorinc.com/Publication 4_files/page0001.htm **(Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2009b).**

Awang, M., Mucino, V., H., Feng, Z., David, S., A., "Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme", ***SAE International,*** 2005-01-1251, (2005).

Balkan, O., "Sıcak Gaz Kaynağı ile Plastiklerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** İstanbul, 1-7, 13-17, 23-61, 62-63, 111, (1999).

Balkan, O., Ezdeşir, A., "Rheological Weldability of Polymers", ***12th International Materials Symposium,*** Pamukkale University, 1046-1051, Denizli, 15-17 October (2008).

Baykal, G., "Özel Görüşme ve Mail" http://www.henkel.com.tr/cps/rde/xchg/henkel_trt/hs.xsl/2097_TRT_HTML.htm, **(Ziyaret tarihi: 6 Ekim 2008).**

Bufa, G., Fratini, L., Piacentini, M., "Tool Path Design In Friction Stir Spot Welding Of AA6082-T6 Aluminum Alloys", ***Key Engineering Materials,*** 344, 767-774, (2007).

Catalog1, RÖCHLING Engineering Plastics Catalog, Polystone Thermoplastics Characteristics and Applications, www.roechling-plastics.com, **(Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2006).**

Catalog2, Differential Scanning Calorimetry for all Requirements Catalog, Metler Toledo, www.mt.com, (**Ziyaret tarihi: 14 Mart 2009).**

CFSWC (China FSW Center), 2008, Bejing FSW Technology Co. Ltd Technical & Applications, P.R.China, http://www.cfswt.com/brief/technology3-e.html **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009).**

Dawes, J., 1999, Friction Stir Welding-Training in Aluminium Application Technologies Lecture 4410, The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts/fswintro.html **(Ziyaret tarihi: 9 Ocak 2003).**

Dolby, R., E., Sanderson, A., Threadgill, P., L., "Recent Developments & Applications in Electron Beam and Friction Technologies", ***7th International Aachen Welding Conference,*** TWI, UK, 3rd/4th May (2001).

DSC, www.webhatti.com/kimya/68808-dsc.html - 32k, **(Ziyaret tarihi: 10 Mart 2009).**

Dunkerton, S. Simpson, J., 2006, Innovation in Materials Joining Technologies, Malaysia, www.twi.co.uk/content/spsbdjuly2006.html **(Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2009).**

Erkul, M., "Plastiklerin Ultrasonik Kaynağı", Yüksek Lisans Tezi, ***Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** İstanbul, 3-4, 6-10, (2001).

Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkıran, İ., Yağcı, M., A., Cöbek, M., Bilgiç, T., "Polimerler", 1. Baskı, ***Pagev Yayınları,*** 55-67, (1999).

Feng, Z., Diamond, S., Santella, M., L., Pan, T., Y., Li, N., "High Strength Weight Reduction Materials-Friction Stir Welding and Processing of Advanced Materials", ***Oak Ridge National Laboratory Report, DE-AC05-00OR22725,*** 101-108, (2004).

Feng, Z., Santella, M., L., David, S., A., Steel, R., J., Packer, S., M., Pan, T., Kuo, M., Bhatnagar, R., S., "Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength

Steels-A Feasibility Study", ***SAE World Congress,*** Detroit, Michigan, USA, 11-14 April (2005).

Ford GT, ön, http://www.verhoeven-veldeman.net/yordi/autos/auto%27s/top% 2015/ ford%20GT/Ford%20GT%205.jpg **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009a).**

Ford GT, arka, http://cache.jalopnik.com/cars/assets/resources/2007/04/Ford-GT.jpg **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009b).**

FSL (Friction Stir Link), 2007, Friction Stir Welding (FSW) System Integration Services-Friction Stir Spot Welding (FSSW) Equipment, USA, http://www. frictionstirlink.com/fslfswsystemintegrationservices.html **(Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2009).**

Gerlich, A., Su, P., North, T., H., Bendzsak, G., J., "Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloys" ***Materials Forum,*** 29, 290-294, (2005a).

Gerlich, A., Su, P., North, T., H., "Tool Penetration During Friction Stir Spot Welding of Al and Mg Alloys" ***Journal of Materials Science,*** (2005b).

GKSS Geesthacht Research Centre, Techniques and Equipment, Germany, http://www.gkss.de/institute/materials_research/structure/materials_mechanics/solid_ state_joining_processes/techniques/index.html.en **(Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2009).**

Gündüz, T., "İnstrümental Analiz", 6. Baskı, ***Gazi Kitapevi,*** 767-769, (2002).

Henkel, "LOCTITE® 406™ Technical Data Sheet" July 2008, www.henkel.com/ industrial, **(Ziyaret tarihi: 7 Ekim 2008a).**

Henkel, "Primer PP33 Technical Data Sheet", www.henkel.com/industrial, **(Ziyaret tarihi: 7 Ekim 2008b).**

Hinrichs, J., Friction Stir Spot Welding, Friction Stir Link Inc., www.frictionstirlink. com, **(Ziyaret tarihi: 21 Mart 2006).**

Hovanski, Y., Santella, M., L., Grant, G., J., "Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel", ***Scripta Materialia,*** 57, 873-876, (2007).

Kallee, S., W., Kell, J., M., Thomas, W., M., Wiesner, C., S., 2005, Development and implementation of innovative joining processes in the automotive industry, DVS Annual Welding Conference - Große Schweißtechnische Tagung, Germany, http://www.twi.co.uk/content/spswksept2005.html **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009).**

Kallee, S., W., 2006, NZ Fabricators begin to use Friction Stir Welding to produce aluminium components and panels, New Zealand, http://www.twi.co.uk/content /spswkaug2006.html **(Ziyaret tarihi: 21 Nisan 2009).**

Kaya, F., "Plastikler ve Katkı Maddeleri", 1. Baskı, ***Birsen Yayınevi,*** 49-51, (2005).

KHI Ltd. (Kawasaki Heavy Industries Ltd.), A new method for light alloy joining - Friction Spot Joining - Kawasaki Robot, Japan, www.kawasakirobot.com, **(Ziyaret tarihi: 18 Mart 2006).**

Kimberley, W., "Joining up", ***Focus Manufacturing,*** 36, (2005).

Kyffin, W., Kell, J., Threadgill, P., "Friction Stir Spot Welding of High Strength Steels For Transport Industries-Project TWI", ***TWI Ltd, PR10199, Cambridge,*** (2006).

Lathabai, S., Painter, M., J., Cantin, G., M., D., Tyagi, V., K., " Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", ***Scripta Materialia***, (2006).

Lin, P., C., Pan, J., Pan, T., "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,*** 30, 74-89, (2008a).

Lin, P., C., Pan, J., Pan, T., "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,*** 30, 90-105, (2008b).

Mazda RX7, ön, http://pictures.topspeed.com/IMG/crop/200805/mazda-rx-7-coming -in_460x0w.jpg **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009a).**

Mazda RX7, arka, http://fc03.deviantart.com/fs36/f/2008/243/2/8/Mazda_RX_7 _ Concept_by_armandodesign.jpg **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009b).**

Mazda RX8, http://www.wallpaperpimper.com/wallpaper/Automobile/Mazda /RX8/ Mazda-RX8-4-Q96EHV2OYS-1024x768.jpg **(Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2009).**

Mert, Ş., Arıcı, A., A., "Friction Stir Spot Welding Method Using in Polypropylene Sheet Materials Joining", ***12th International Materials Symposium,*** Pamukkale University, 1150-1156, Denizli, 15-17 October (2008).

Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chean, J., Feng, Z., Santella, M., L., "Structure properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", ***Materials Science and Engineering***, 441, 79-96, (2006).

Monasse, B., Haudin, J., M., "Polypropylene Structure Blends and Composites", First Edition, Kocsis, J., K., ***Chapman & Hall,*** 3-8, (1995).

Mortimer, J., "Jaguar roadmap rethinks self-piercing technology", ***Industrial Robot: An International Journal,*** 32, 3, 209-213, (2005).

Nelson, T., W., Sorenson, C., D., Johns, C., J., "Friction Stir Welding of Polymeric Materials", ***United States Patent, Patent No: US 6,811,632 B2,*** www.free patentsonline.com, (2004).

RIFTEC GmbH, Innovative Friction Welding Processes, Germany, http://www.sovereign-publications.com/riftec.htm **(Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2009).**

Saçak, M., "Polimer Teknolojisi", 1. Baskı, ***Gazi Kitapevi,*** 1-27, 71-81, 171-172, (2005).

Santella, M., L., Grant, G., J., Feng, Z., Carpenter, J., A., Sklad, P., S., " Friction Stir Spot Welding of High Strength Steel", ***Oak Ridge National Laboratory & Pacific Northwest National Laboratory Progress Report, DE-AC05-00OR22725 & DE-AC06-76RLO1830,*** 336-339, (2005).

Savaşçı, Ö., T., Uyanık, N., Akovalı, G., "Plastikler ve Plastik Teknolojisi", 2. Baskı, ***Pagev Yayınları***, 7-8, 12-16, 19-20, 24-25, 59, 306-307, 433-435, 501, (2002).

Sınmazçelik, T., Arıcı, A., A., "Polimer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi", ***PAGEV Plastik Dergisi,*** 142-148, (2004).

Smith, C., B., Hinrichs, J., F., Ruehl, P., C., Friction Stir and Friction Stir Spot Welding - Lean, Mean and Green, Friction Stir Link Inc, www.frictionstirlink.com, **(Ziyaret tarihi: 21 Mart 2006).**

Sonat, E., E., "Tahribatsız Malzeme Muayenesi", ***O.D.T.Ü. Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Araştırma/Uygulama Merkezi,*** Ankara, (2008).

Speller, T., "DOE 01 of Friction Stir Spot Welding Assembly (FSSA)", www. statease.com, www.minitab.com, **(Ziyaret tarihi: 24 Mart 2006).**

Strand, S., R., "Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure", The Degree of Master of Science, ***Department of Mechanical Engineering Brigham Young University,*** U.S.A., 17-21, 40-41, (2004).

Su, P., Gerlich, A., North, T., H., Bendzsak, G., J., "Material flow during friction stir spot welding", ***Science and Technology of Welding and Joining,*** 11, 61-71, (2006).

Thomas, W., M., Nicholas, E., D., Smith, S., D., "Friction Stir Welding - Tool Developments", ***Aluminum Joining Symposium,*** TMS Annual Meeting, New Orleans, Lousiana, USA, 11-15 February (2001).

Thomas, W., M., Staines, D., J., Norris, I., M., Westgate, S., A., Wiesner, C., S., "Transition Joints Between Dissimilar Materials" TWI Ltd, (2006).

Tozaki, Y., Uematsu, Y., Tokaji, K., "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture,*** 47, 2230-2236, (2007).

Tran, V., X., Pan, J., Pan, T., "Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens", ***International Journal of Fatigue,*** 30, 2175-2190, (2008).

Tran V., X., Pan, J., Pan, T., "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,*** 209, 3724-3739, (2009).

TS EN 12814-2, "Yarı Mamul Termoplastik Malzemeler - Kaynaklı Bağlantı Deneyleri - Bölüm 2: Çekme Deneyi", ***Türk Standardları Enstitüsü (TSE),*** Ankara, (2003).

TWI Ltd., "Mechanical assessment of welded joints in thermoplastics-a guide to best practice", UK, http://www.twi.co.uk/content/bpsiplass01.html, **(Ziyaret tarihi: 19 Şubat 2009a)**

TWI Ltd., "Clinching Process Description", UK, http://www.twi.co.uk/content/ kschjg001.html **(Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2009b).**

Uematsu, Y., Tokaji, K., Tozaki, Y., Kurita, T., Murata, S., "Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy", ***International Journal of Fatigue,*** 30, 1956-1966, (2008).

Yayla, P., "Kırılma Mekaniği", 1. Baskı, ***Çağlayan Kitapevi,*** 169-172, (2007).

Yıldırım, H., "Plastiklere Uygulanan Kalite Kontrol Yöntemleri ve Plastiklere Katılan Katkı Maddeleri Seminer Notları", ***MMO İstanbul Şubesi,*** 4, 23-25, 71-73, (2007).

Yıldız, A., Genç, Ö., Bektaş, S., "Enstrumental Analiz Yöntemleri", ***Hacettepe Üni. Yayınları,*** 446-448, (1997).

EKLER

(Tablolar ve Şekiller)

Tablo A.1: 0 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 0 sn	mod 1			mod 2	mod 3
800 d/d [F = 68 N]	a		X 12,6	-	-
1250 d/d [F = 64 N]	a	b	X 12,6 X 50	-	-
			c		
			X 40		
2000 d/d [F = 84 N]	a	b	X 12,6 X 50	-	-
			c		
			X 50		

Tablo A.2: 25 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 25 sn	mod 1			mod 2			mod 3		
800 d/d [F = 164 N]	a	b	c	-			-		
	X 12,6	X 25	X 25						
1250 d/d [F = 1087 N]	-			a	b	c	-	a	b
				X 12,6	X 40	X 20		c	d
2000 d/d [F = 1468 N]	-			-				e	f

Tablo A.3: 50 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 50 sn	mod 1	mod 2						mod 3
		a		b		c		
800 d/d [F = 1277 N]	-		X 12,6		X 20		X 40	-
1250 d/d [F = 1701 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-
2000 d/d [F = 1515 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-

Tablo A.4: 75 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 75 sn	mod 1	mod 2						mod 3
		a		b		c		
800 d/d [F = 1298 N]	-		X 12,6		X 25		X 12,6	-
1250 d/d [F = 1548 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-
2000 d/d [F = 1331 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-

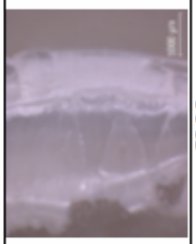
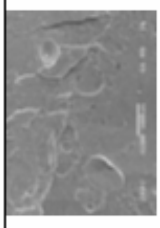
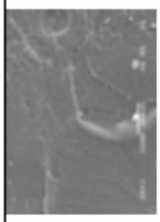
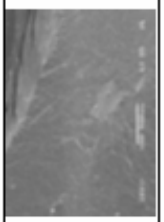
Tablo A.5: 100 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 100 sn	mod 1	mod 2				mod 3					
		a	b	c		a	b	c	d	e	f
800 d/d [F = 1583 N]	-				X 12,6	-					
					X 40						
					X 25						
1250 d/d [F = 1748 N]	-	-									
2000 d/d [F = 1503 N]	-	-									

Tablo A.6: 125 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 125 sn	mod 1	mod 2				mod 3					
		a	b	c		a	b	c	d	e	f
800 d/d [F = 1661 N]	-					-					
		X 12,6	X 25	X 12,6							
1250 d/d [F = 1452 N]	-	-									
2000 d/d [F = 1461 N]	-	-									

Tablo A.7: 150 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 150 sn	mod 1	mod 2				mod 3								
		a		b		c		-	a	b	c	d	e	f
800 d/d [F = 1514 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-						
1250 d/d [F = 1728 N]	-	-												
2000 d/d [F = 1501 N]	-		X 12,6		X 25		X 20	-						

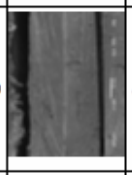
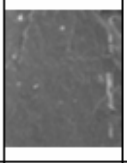
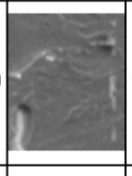
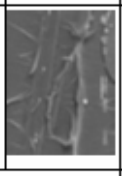
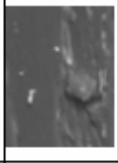
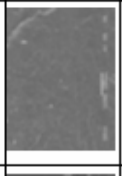
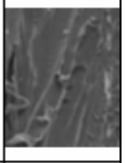
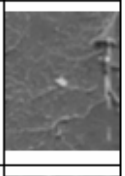
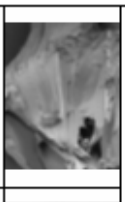
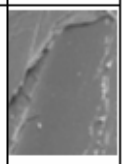
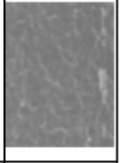
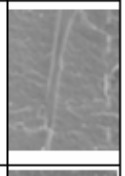
Tablo A.8: 200 sn bekleme süresi için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Bekleme: 200 sn	mod 1	mod 2						mod 3					
								a		b			
800 d/d [F = 1648 N]	-	-						-		-			
1250 d/d [F = 1628 N]	-	a	X 12,6	b	X 25	c	X 20						
2000 d/d [F = 1501 N]	-	a	X 12,6	b	X 25	c	X 20						

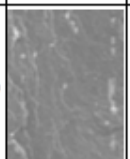
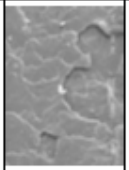
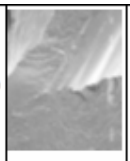
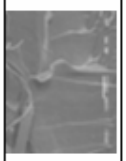
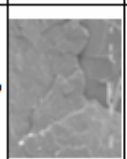
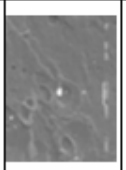
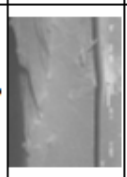
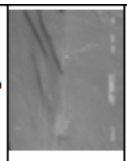
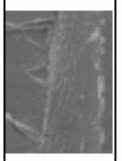
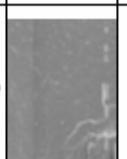
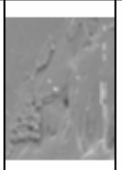
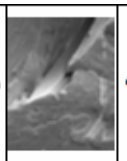
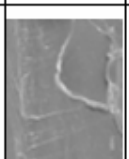
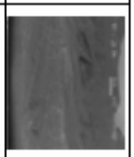
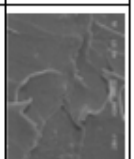
Tablo A.9: 4,25 - 4,65 mm aralığındaki dalma derinlikleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Dalma Derinliği	mod 1			mod 2	mod 3					
	a	b	c		a	b	c	d	e	f
4,25 mm [F = 1152 N]	X 12,6	X 50	X 50	-	-					
4,35 mm [F = 1034 N]	X 12,6	X 50	X 12,6	-	-					
4,45 mm [F = 1179 N]	X 12,6	X 50	X 50	-	-					
4,55 mm [F = 1018 N]	X 12,6	X 50	X 12,6	-	-					
4,65 mm [F = 1832 N]	-			-						

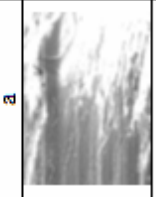
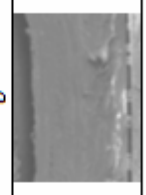
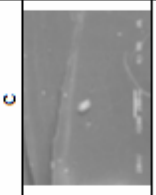
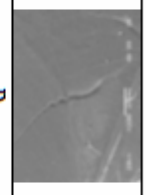
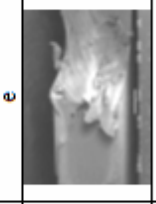
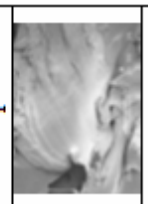
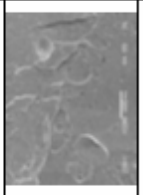
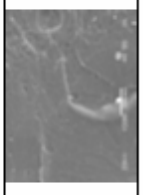
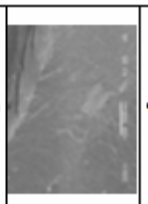
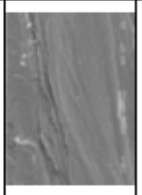
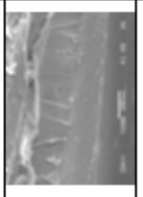
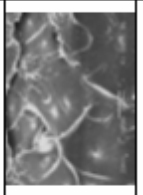
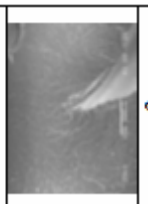
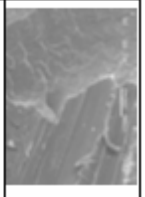
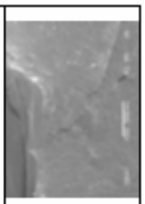
Tablo A.10: 4,70 - 5,00 mm aralığındaki dalma derinlikleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Dalma Derinliği	mod 1	mod 2				mod 3					
						a	b	c	d	e	f
4,70 mm [F = 1812 N]	-	-									
4,75 mm [F = 1812 N]	-	-									
4,85 mm [F = 1660 N]	-	-									
4,90 mm [F = 1626 N]	-	-									
4,95 mm [F = 1662 N]	-	-	a  X 12,6	b  X 20	c  X 12,6	-					
5 mm [F = 1603 N]	-	-									

Tablo A.11: 5,10 - 5,35 mm aralığındaki dalma derinlikleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Dalma Derinliği	mod 1	mod 2	mod 3					
			a	b	c	d	e	f
5,10 mm [F = 1634 N]	-	-						
5,15 mm [F = 1776 N]	-	-						
5,20 mm [F = 1682 N]	-	-						
5,25 mm [F = 1722 N]	-	-						
5,30 mm [F = 1454 N]	-	-						
5,35 mm [F = 1565 N]	-	a  X 12,6 b  X 20 c  X 12,6	-					

Tablo A.12: 5,40 - 5,85 mm aralığındaki dalma derinlikleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri

Dalma Derinliği	mod 1	mod 2	mod 3					
			a	b	c	d	e	f
5,40 mm [F = 1734 N]	-	-						
5,50 mm [F = 1728 N]	-	-						
5,60 mm [F = 1649 N]	-	-						
5,70 mm [F = 1523 N]	-	-						
5,80 mm [F = 1693 N]	-	-						
5,85 mm [F = 1661 N]	-	-						

Tablo A.13: t_1 (sn): F1 tepesine ulaşıncaya kadar geçen zaman, t_2 (sn): F2 tepesine ulaşıncaya kadar geçen zaman, F1 (N): t_1 sn sonra ulaşılan birinci eksenel kuvvet tepesi değeri, F2 (N): t_2 sn sonra ulaşılan maksimum eksenel kuvvet değeri, T_1 (^{o}C): Takım kaynak bölgesinden çıkar çıkmaz uygun mesafeden (30 cm'lik odaklama mesafesi) infrared termometre ile ölçülen kaynak noktasının merkezinin sıcaklığı

800 d/d - 5,5 mm - 100 mm/dak - M7									
Bekleme Süresi (sn)	**Çekme Kuvveti (N)**	**Kırılma Türü**			**t_1 (sn)**	**F1 (N)**	**t_2 (sn)**	**F2 (N)**	**T_1 (^{o}C)**
		mod1	**mod2**	**mod3**					
25	**164**	X			2,09	4105	6,48	10000	119
150	**1264**		X		3,02	3889	7,11	10000	161
200	**1136**			X	3,30	4429	7,15	10000	138
1250 d/d- 5,5 mm - 100 mm/dak - M7									
Bekleme Süresi (sn)	**Çekme Kuvveti (N)**	**Kırılma Türü**			**t_1 (sn)**	**F1 (N)**	**t_2 (sn)**	**F2 (N)**	**T_1 (^{o}C)**
		mod1	**mod2**	**mod3**					
0	**64**	X			5,91	3174	9,89	10000	101
25	**990**		X		2,39	3135	6,53	10000	130
50	**1443**		X		2,81	3062	6,91	10000	158
75	**1370**		X		2,77	2951	6,92	10000	162
100	**1602**			X	2,92	3247	7,24	10000	171
125	**1405**			X	3,02	2804	7,05	10000	168
150	**1648**			X	2,34	2630	6,26	10000	176
200	**1460**		X		4,29	2883	6,86	10000	147
2000 d/d- 5,5 mm - 100 mm/dak - M7									
Bekleme Süresi (sn)	**Çekme Kuvveti (N)**	**Kırılma Türü**			**t_1 (sn)**	**F1 (N)**	**t_2 (sn)**	**F2 (N)**	**T_1 (^{o}C)**
		mod1	**mod2**	**mod3**					
0	**84**	X			6,99	2566	11,07	6554	108
25	**1347**			X	2,75	3036	6,56	8261	143
150	**1364**		X		4,20	2290	7,19	6796	181
1250 d/d - 150 sn - 100 mm/dak - M7									
Dalma Derinliği (mm)	**Çekme Kuvveti (N)**	**Kırılma Türü**			**t_1 (sn)**	**F1 (N)**	**t_2 (sn)**	**F2 (N)**	**T_1 (^{o}C)**
		mod1	**mod2**	**mod3**					
4,25	**1152**	X			3,43	2658	5,67	3506	123
4,65	**1832**			X	3,32	2937	5,99	4359	175
5,00	**1603**			X	4,61	3029	6,54	6077	177
5,80	**1693**			X	2,81	3379	6,89	10000	184
1250 d/d - 150 sn - 5,5 mm - M7									
Dalma Hızı (mm/dak)	**Çekme Kuvveti (N)**	**Kırılma Türü**			**t_1 (sn)**	**F1 (N)**	**t_2 (sn)**	**F2 (N)**	**T_1 (^{o}C)**
		mod1	**mod2**	**mod3**					
12,5	**1291**			X	19,2	1679	49,55	2406	153
25	**1254**			X	9,60	2046	25,74	4594	165
50	**1215**			X	5,98	2530	13,72	6557	168
100	**1648**			X	2,34	2630	6,26	10000	176

Tablo A.14: 0 ve 25 sn bekleme süreleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
0 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 64 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,03	19,52	7,45	6,91	0,19	1,74	0,10
25 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 990 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,15	19,63	13,75	11,45	2,49	1,55	0,16

Tablo A.15: 50 ve 75 sn bekleme süreleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
50 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1443 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,19	19,76	16,68	10,78	1,83	2,06	0,33
75 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1370 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,23	19,84	17,42	8,46	2,10	1,57	0,36

Tablo A.16: 100 ve 125 sn bekleme süreleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
100 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1602 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,29	19,71	18,01	7,24	3,49	1,24	0,62
125 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1405 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,28	19,57	17,33	7,14	2,18	1,38	0,77

Tablo A.17: 150 ve 200 sn bekleme süreleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
150 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1648 N**							
d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**		**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
20,32	19,23	17,46	9,68		3,89	1,58	0,64
200 sn 1250 d/d 5,5 mm 100 mm/dak **F = 1460 N**							
d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**		**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
20,29	19,67	17,52	10,63		2,89	1,43	0,94

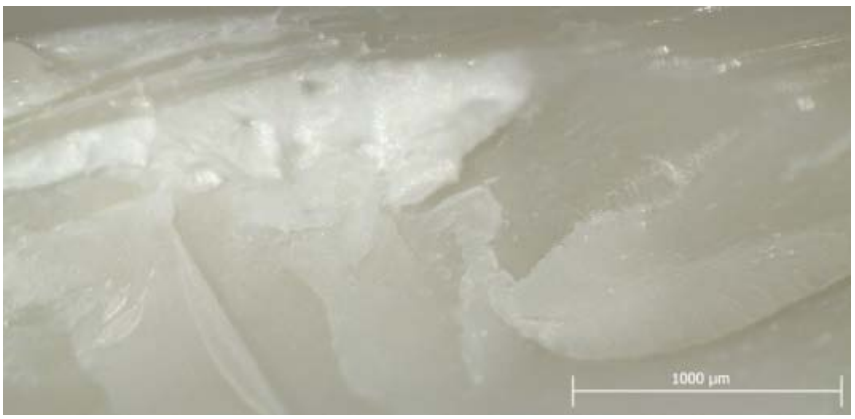
Tablo A.18: 4,25 mm ve 4,65 mm dalma derinlikleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
4,25 mm 1250 d/d 150 sn 100 mm/dak **F = 1152 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,01	19,35	15,44	9,77	1,15	1,58	0,16
4,65 mm 1250 d/d 150 sn 100 mm/dak **F = 1832 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,07	19,05	16,44	8,71	2,47	1,73	0,10

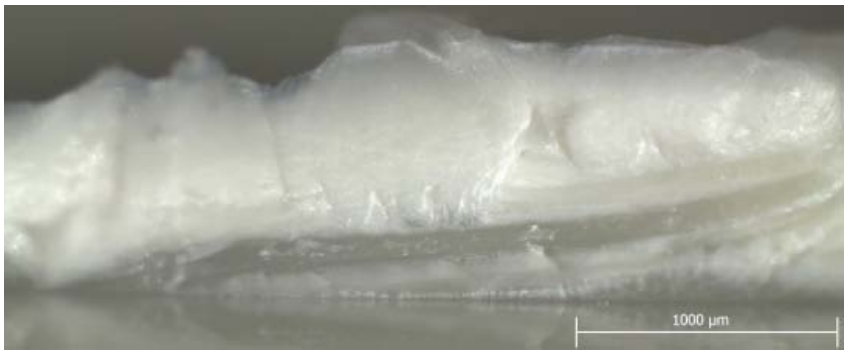
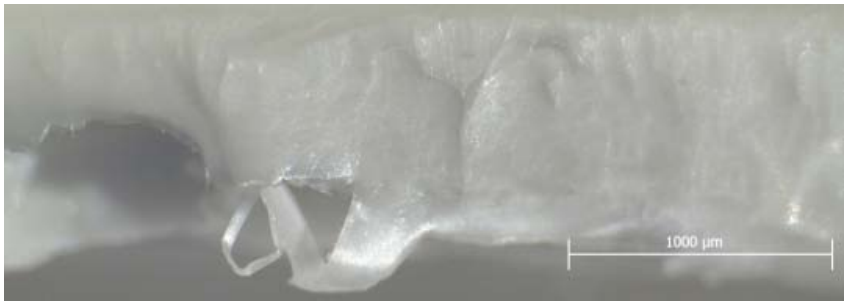
Tablo A.19: 5,00 mm ve 5,80 mm dalma derinlikleri için kaynaklı parçaların enine kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri ve kaynak bölgelerinin ölçüleri

Parametreler ve Çekme Kuvvetleri (N)	Yarım Görünüş x 8 büyütme				Tam Görünüş x 6,3 büyütme		
5,00 mm 1250 d/d 150 sn 100 mm/dak **F = 1603 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,28	19,62	16,50	9,70	2,18	1,66	0,49
5,80 mm 1250 d/d 150 sn 100 mm/dak **F = 1693 N**							
	d_1 (mm)	**d_2 (mm)**	**d_3 (mm)**	**d_4 (mm)**	**e_1 (mm)**	**e_2 (mm)**	**e_3 (mm)**
	20,55	19,85	18,48	8,52	1,76	1,23	0,76

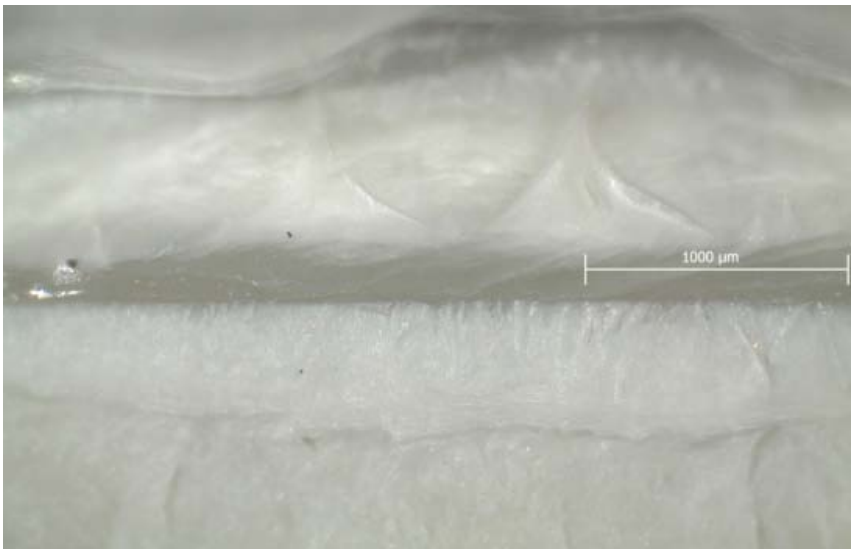
Tablo A.20: Seçilen tip1 bağlantı tasarımı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantı için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri

Büyütme Oranı	Numune No : 22 Bağlantı Tasarımı : tip1 ve Yapışkan + Kaynaklı Çekme Kuvveti : 1588 N
X 10	
X 20	
X 40	

Tablo A.21: Seçilen tip2 bağlantı tasarımı ve kaynaklı bağlantı için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri

Büyütme Oranı	Numune No : 25 Bağlantı Tasarımı : tip2 ve Kaynaklı Çekme Kuvveti : 2985 N
X 10	
X 40	
X 40	

Tablo A.22: Seçilen tip2 bağlantı tasarımı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantı için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri

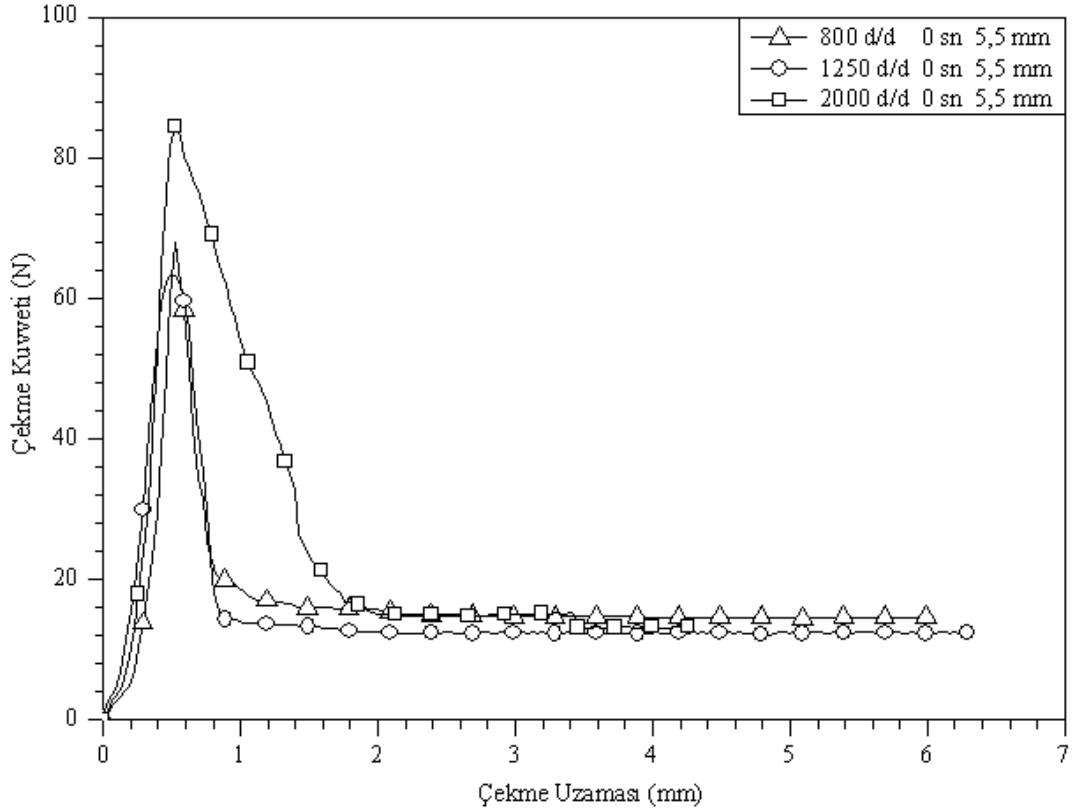
Büyütme Oranı	Numune No : 4 Bağlantı Tasarımı : tip2 ve Yapışkan + Kaynaklı Çekme Kuvveti : 3040 N
X 10	
X 20	
X 40	

Tablo A.23: Seçilen tip3 bağlantı tasarımı ve kaynaklı bağlantı için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri

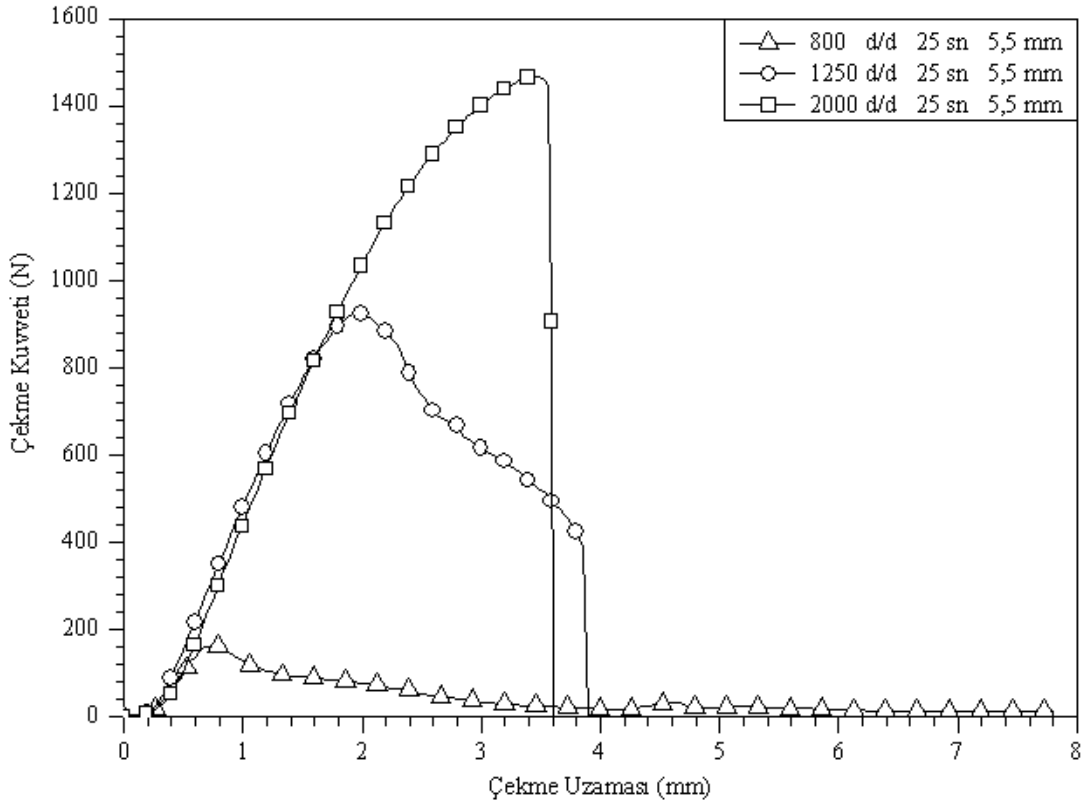
Büyütme Oranı	Numune No : 8 Bağlantı Tasarımı : tip3 ve Kaynaklı Çekme Kuvveti : 2830 N
X 10	
X 20	
X 40	

Tablo A.24: Seçilen tip3 bağlantı tasarımı ve yapışkan artı kaynaklı bağlantı için farklı büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüleri

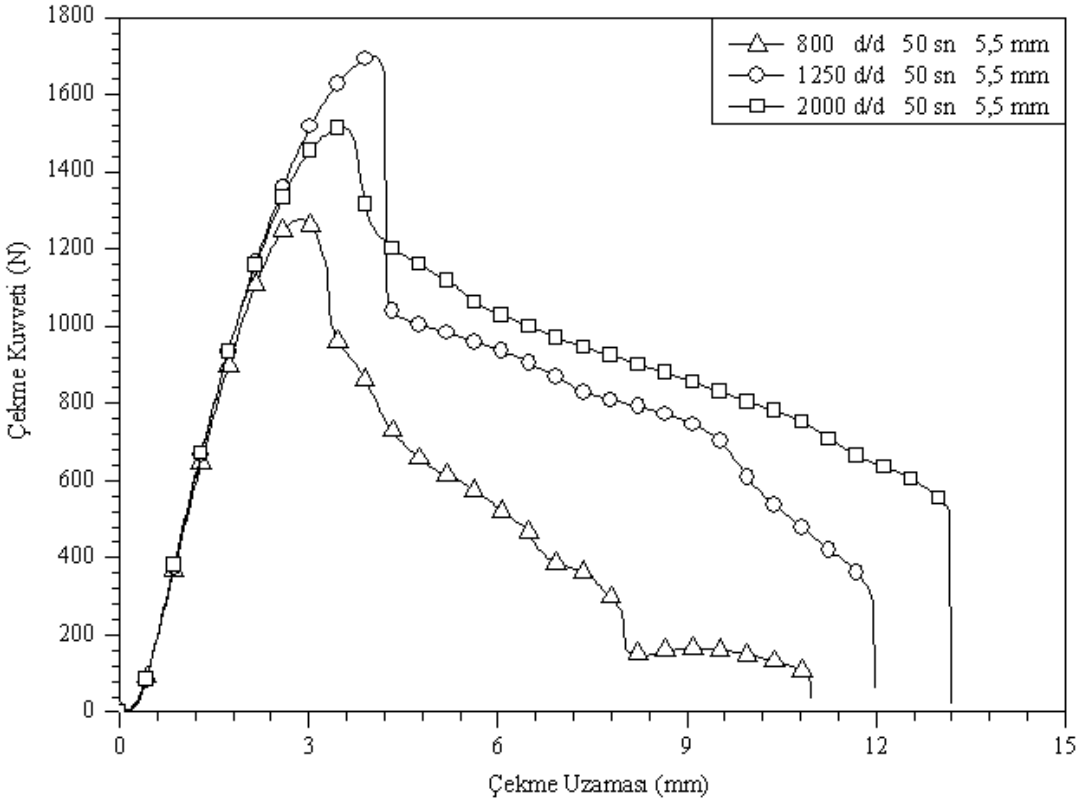
Büyütme Oranı	Numune No : 19 Bağlantı Tasarımı : tip3 ve Yapışkan + Kaynaklı Çekme Kuvveti : 2780 N
X 10	
X 20	
X 40	



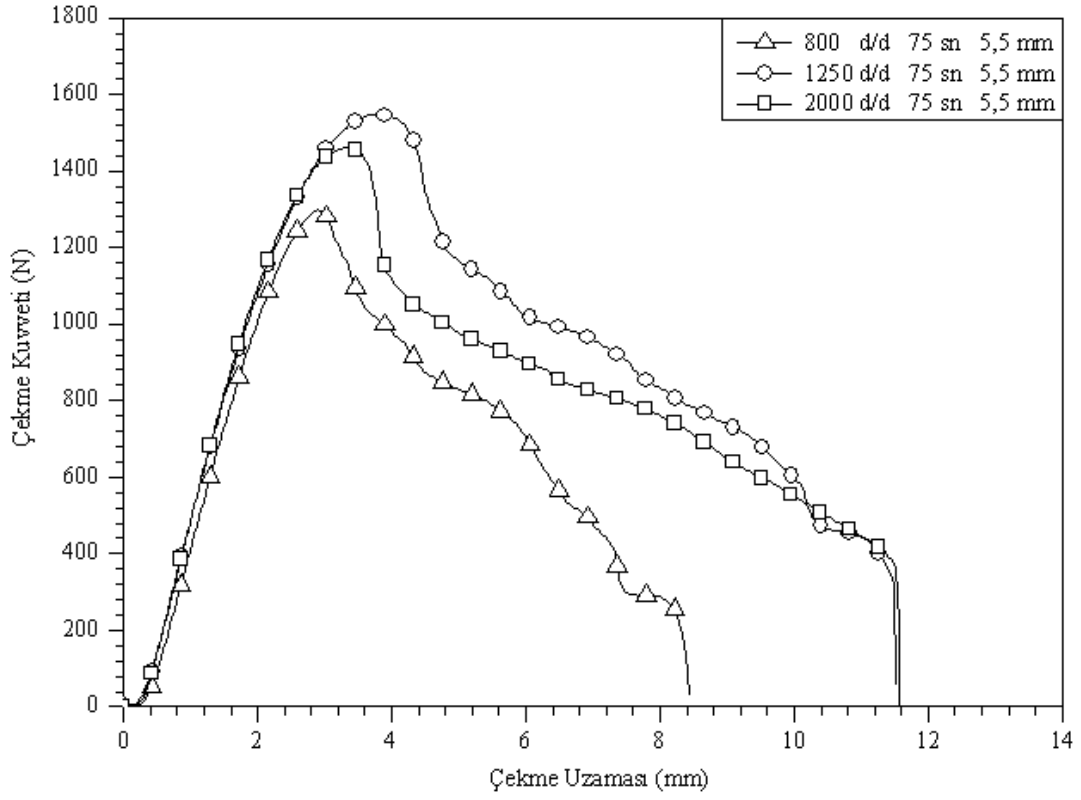
Şekil A.1: Farklı devir sayılarında 0 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



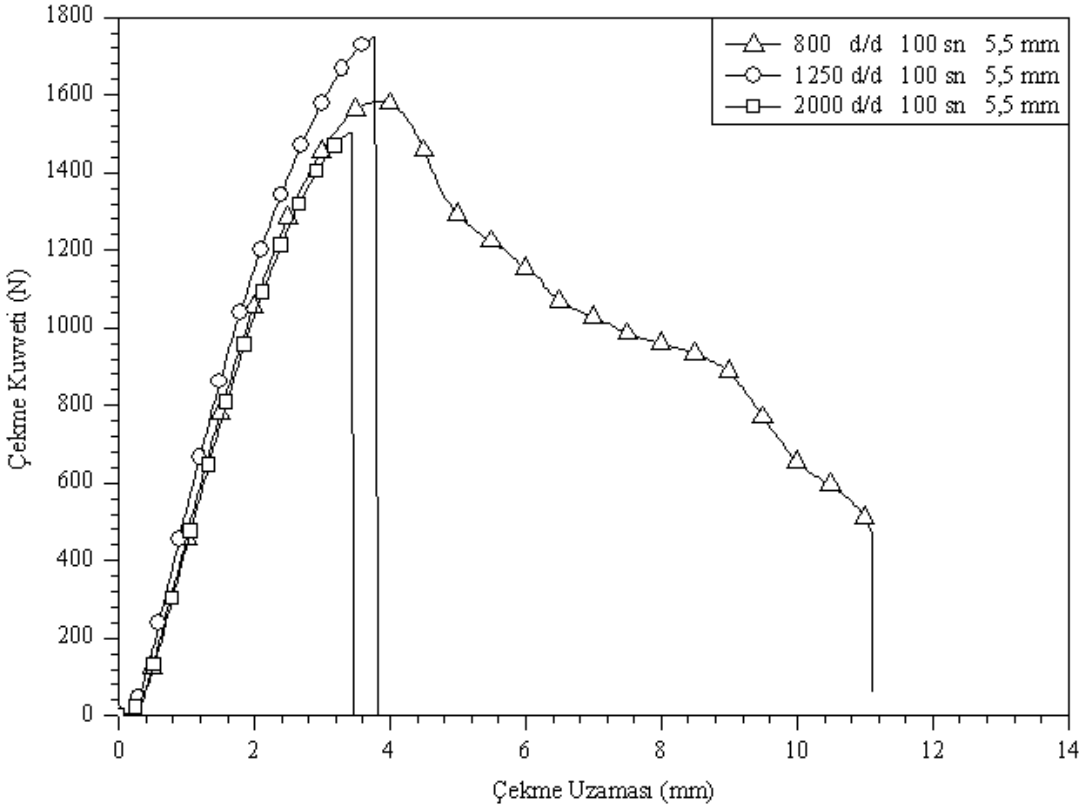
Şekil A.2: Farklı devir sayılarında 25 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



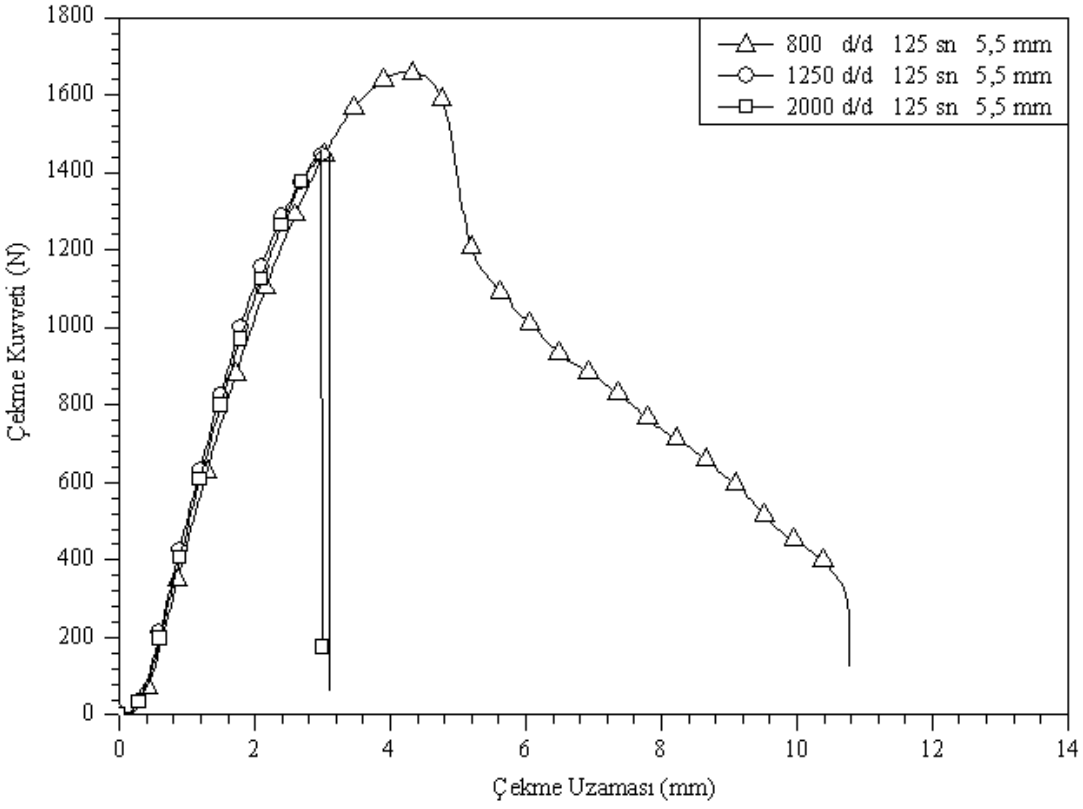
Şekil A.3: Farklı devir sayılarında 50 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



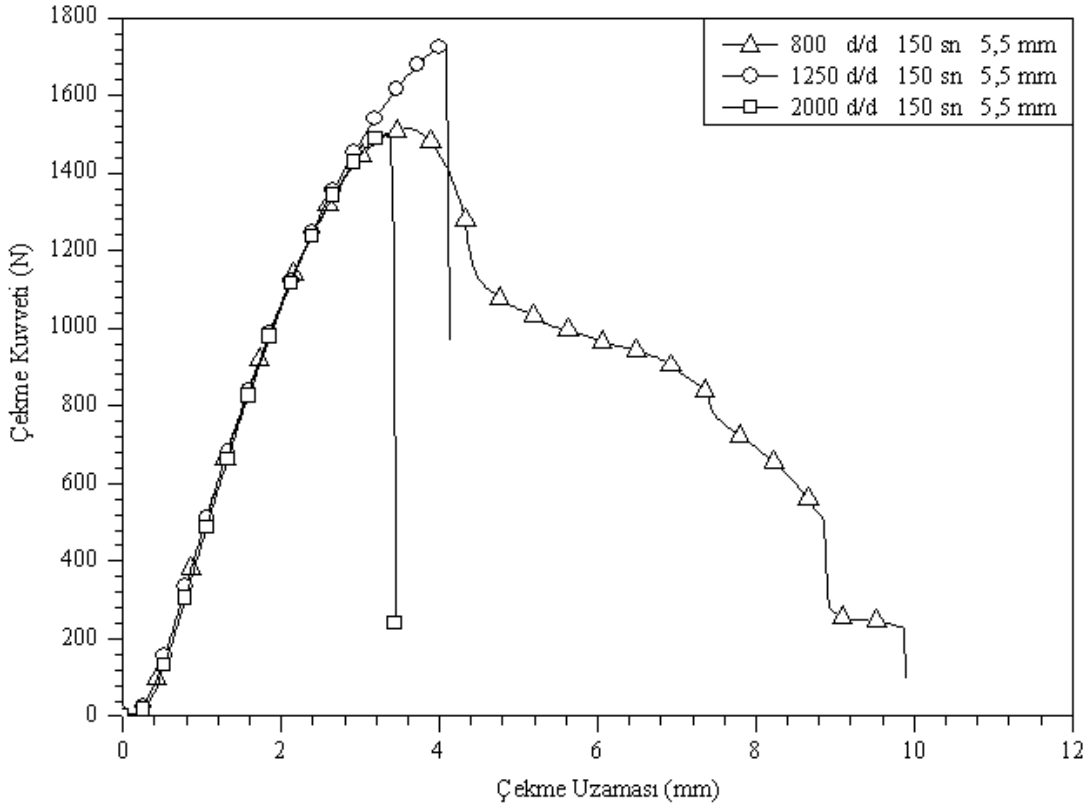
Şekil A.4: Farklı devir sayılarında 75 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



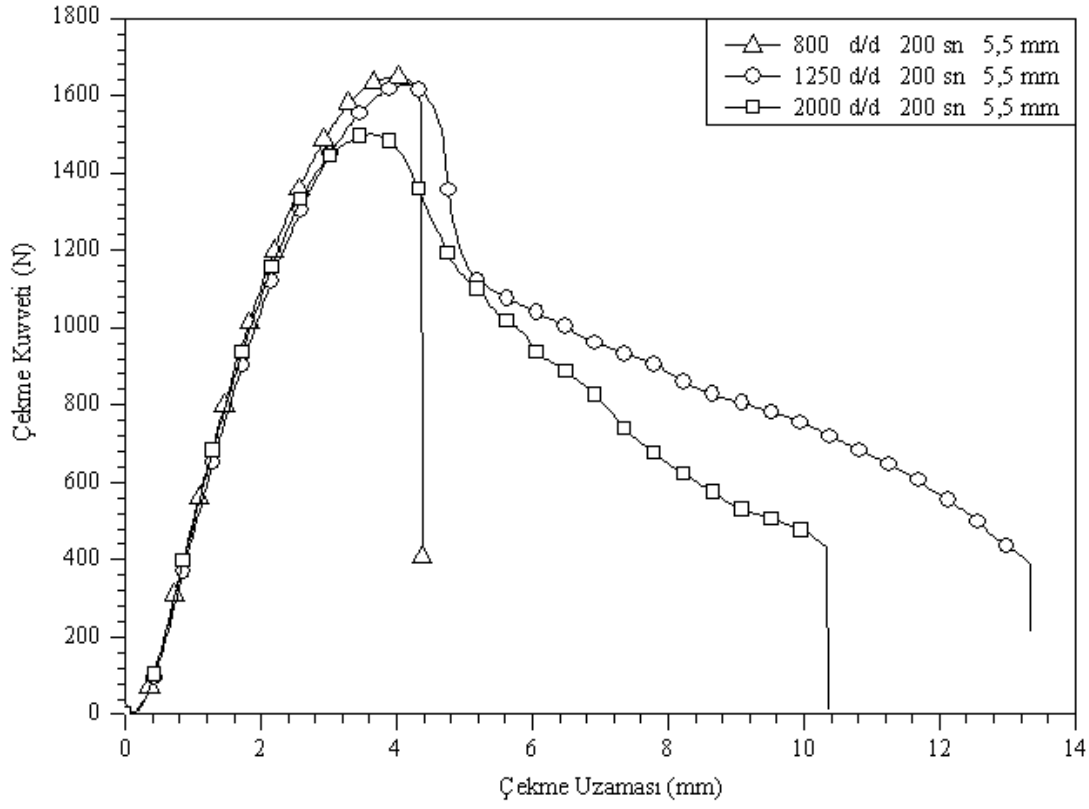
Şekil A.5: Farklı devir sayılarında 100 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



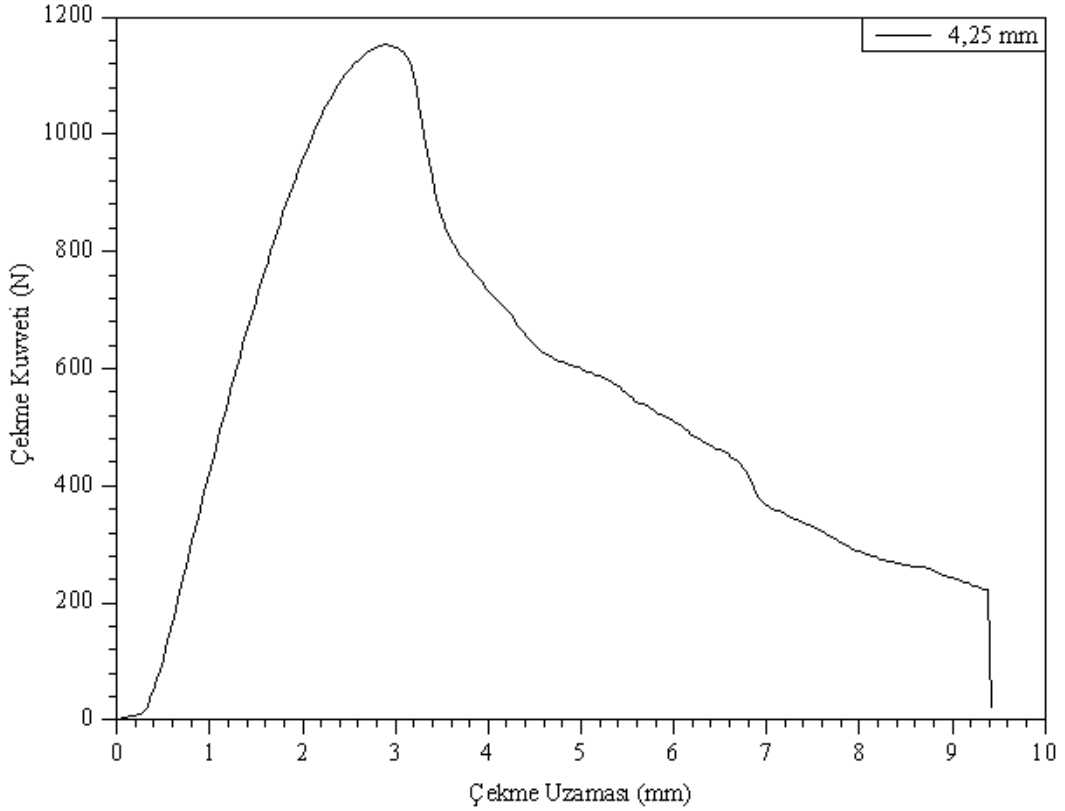
Şekil A.6: Farklı devir sayılarında 125 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



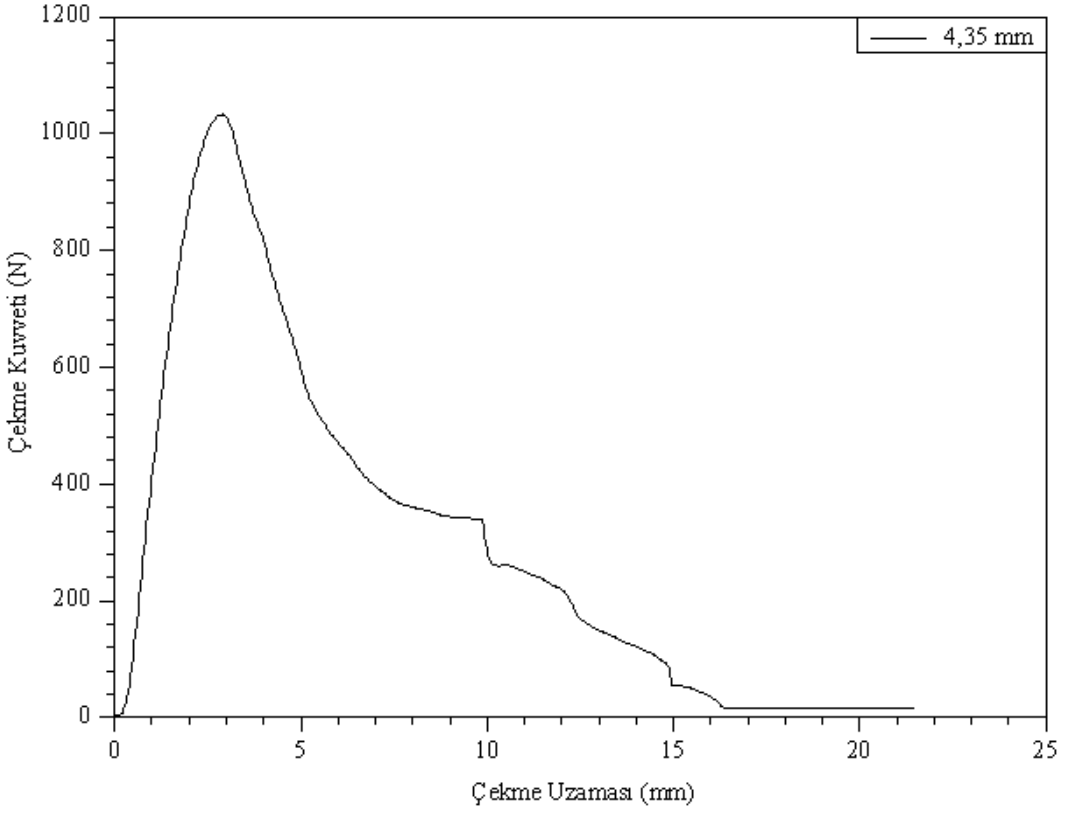
Şekil A.7: Farklı devir sayılarında 150 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



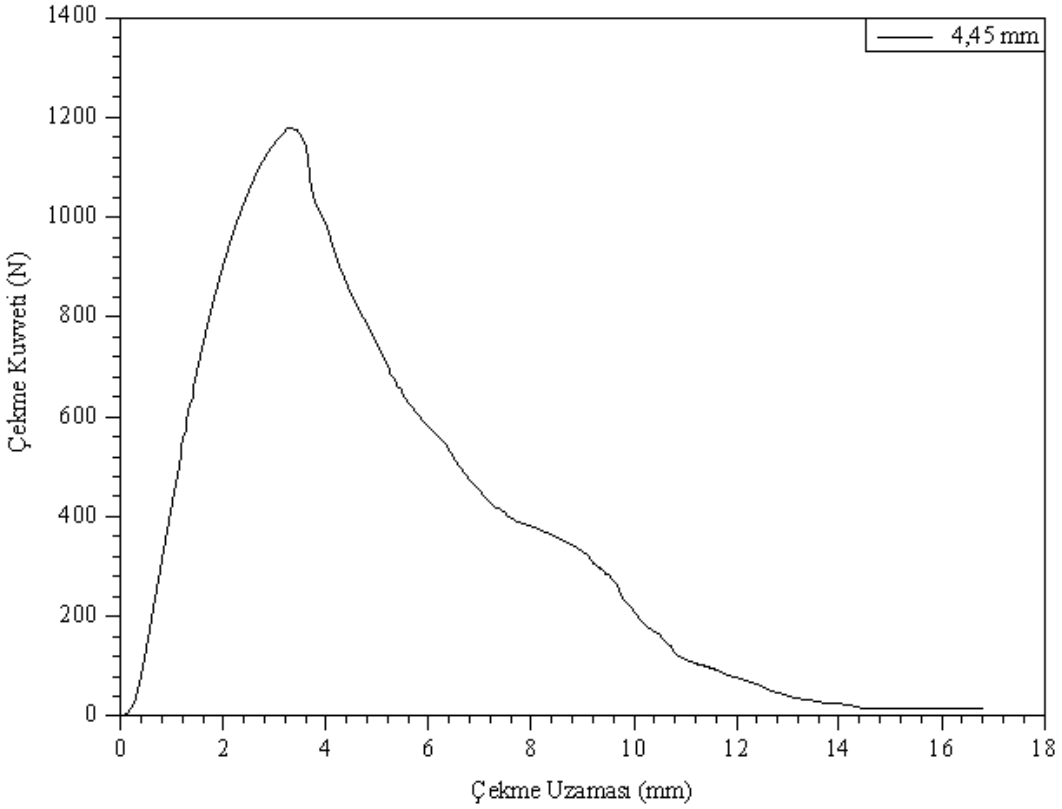
Şekil A.8: Farklı devir sayılarında 200 sn bekleme süresi, 5,5 mm dalma derinliği ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



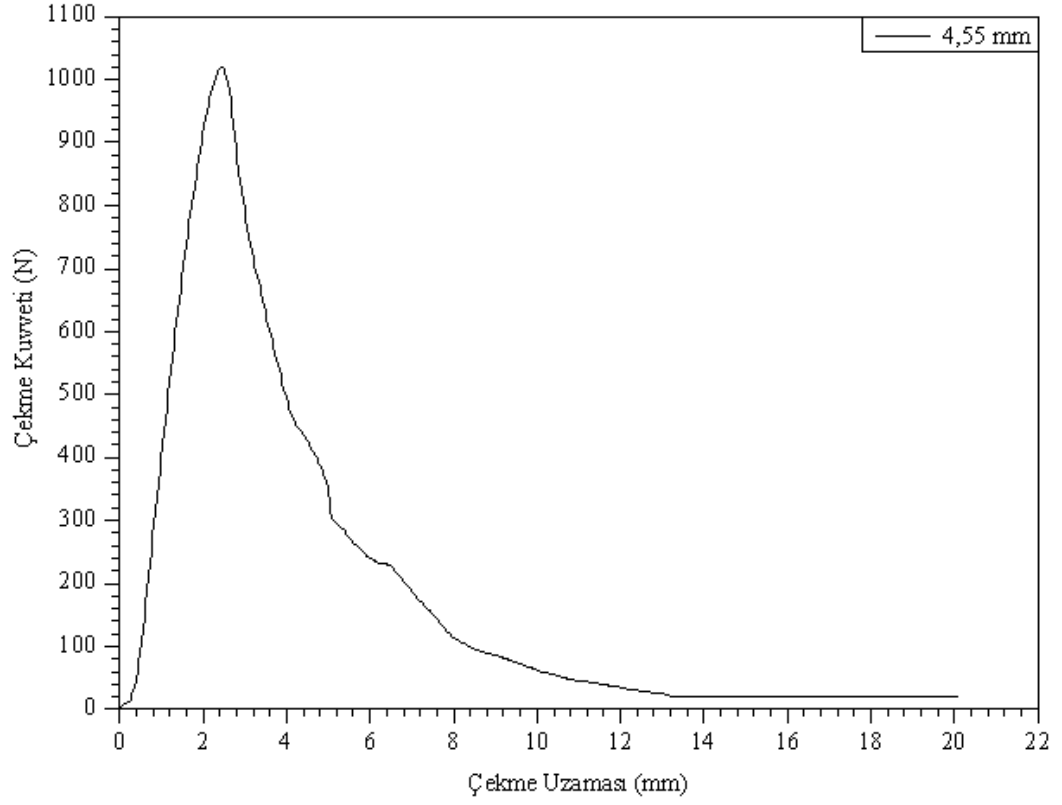
Şekil A.9: 4,25 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



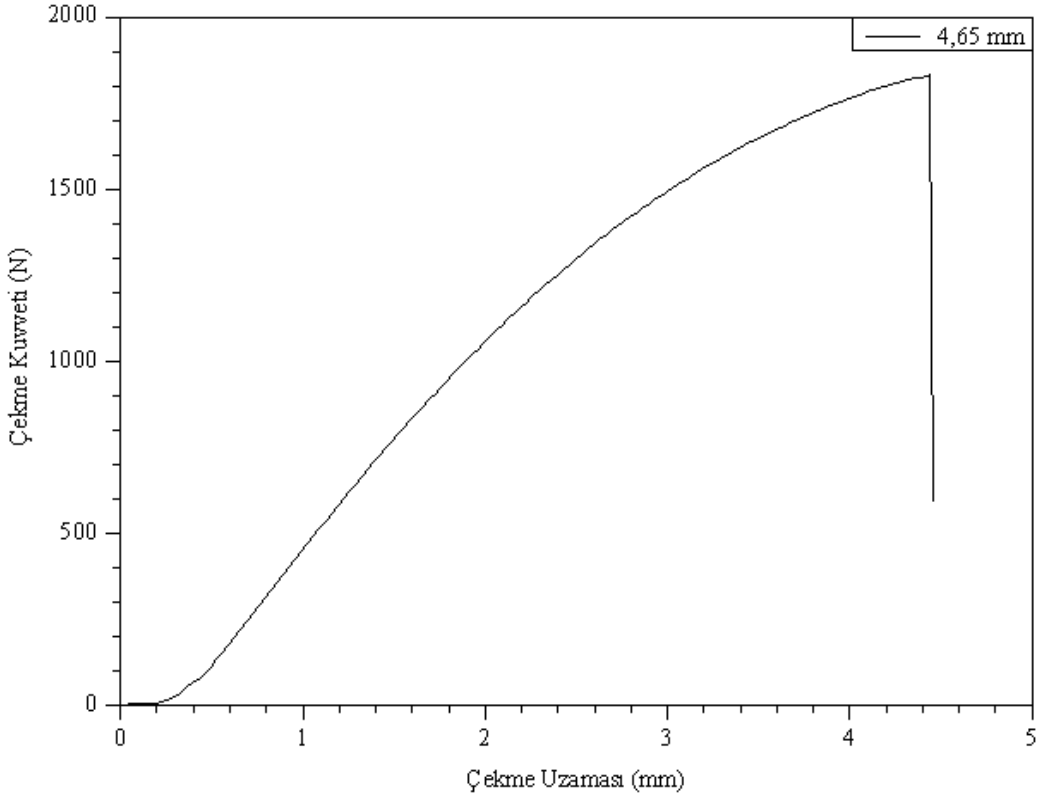
Şekil A.10: 4,35 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



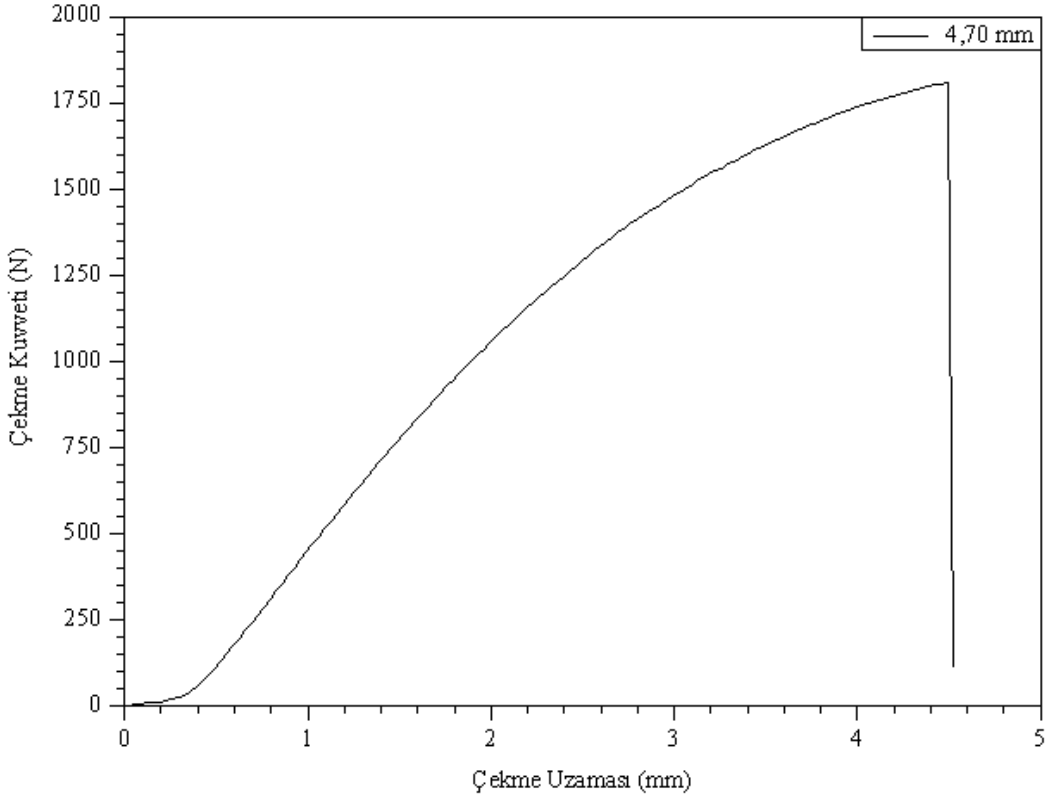
Şekil A.11: 4,45 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



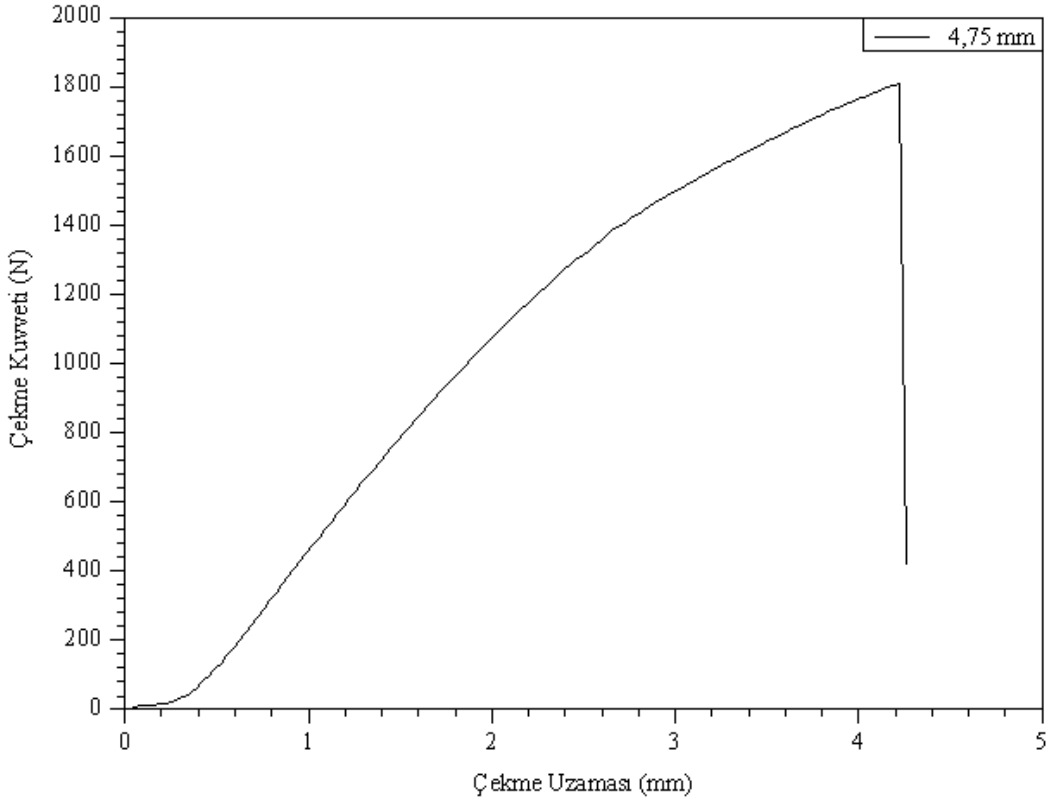
Şekil A.12: 4,55 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



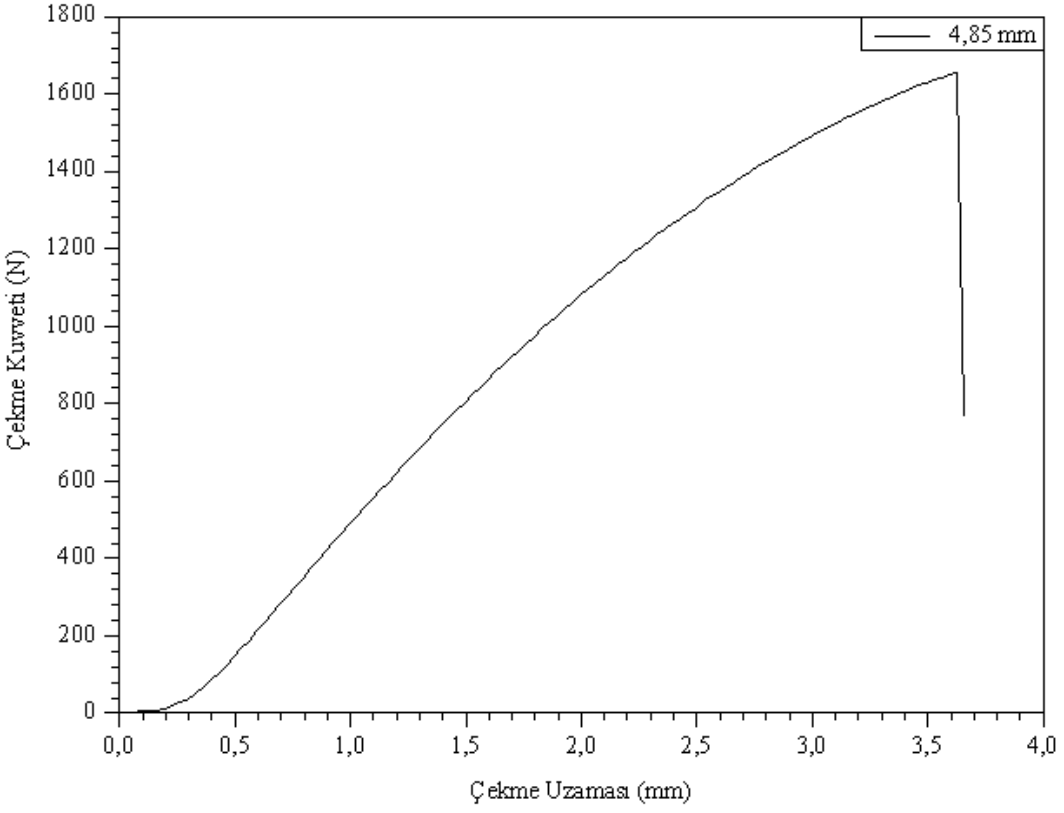
Şekil A.13: 4,65 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



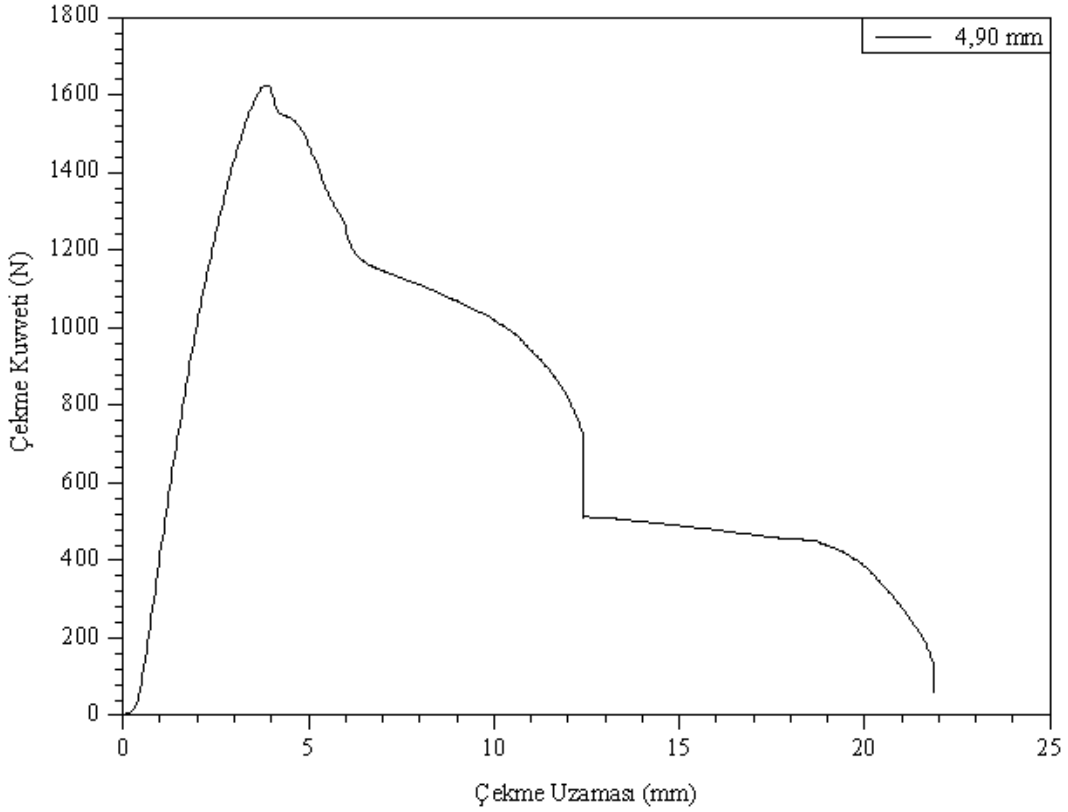
Şekil A.14: 4,70 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



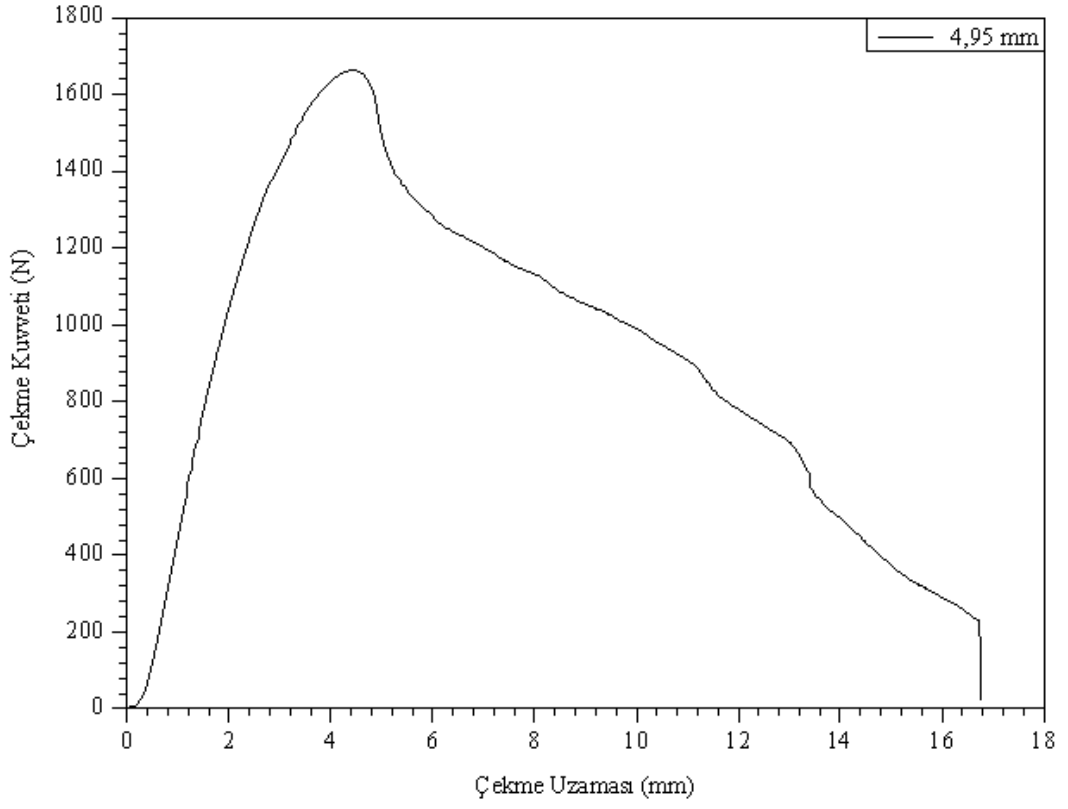
Şekil A.15: 4,75 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



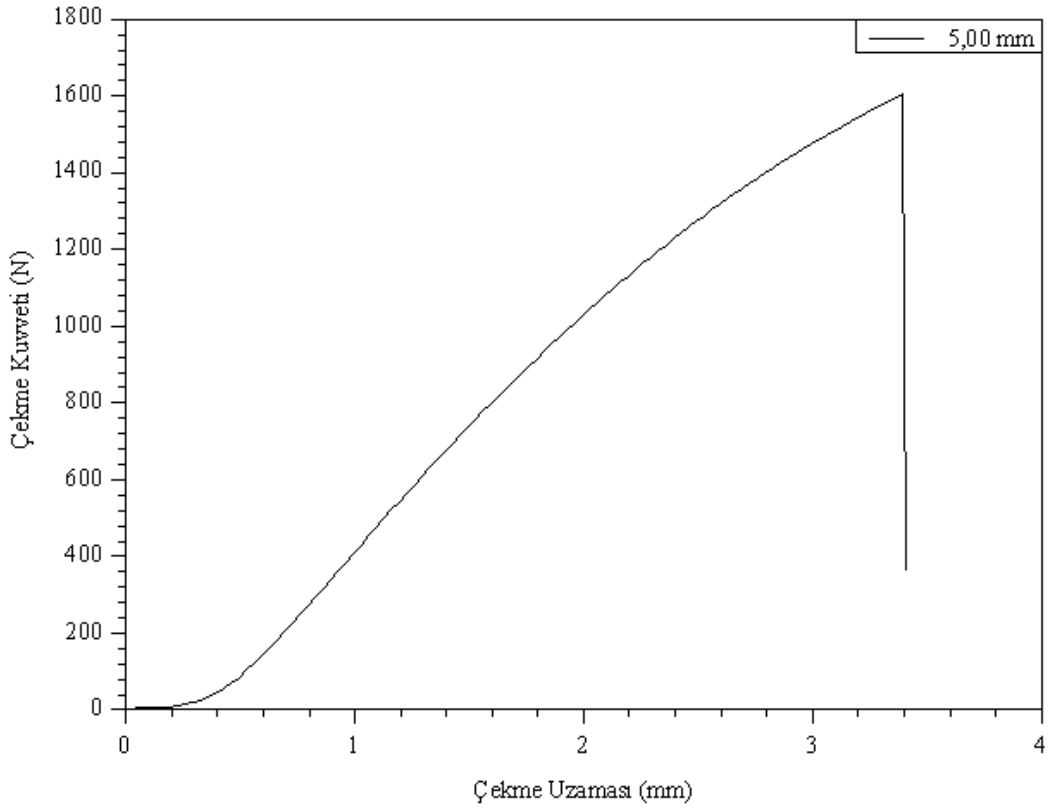
Şekil A.16: 4,85 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



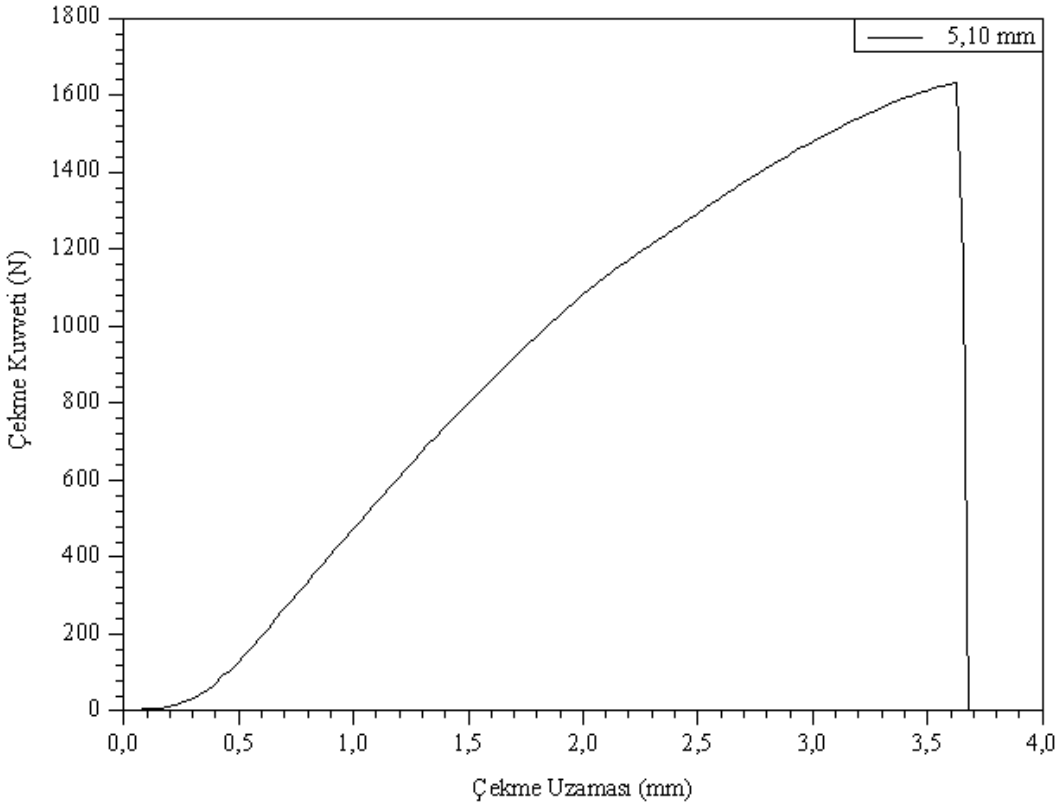
Şekil A.17: 4,90 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



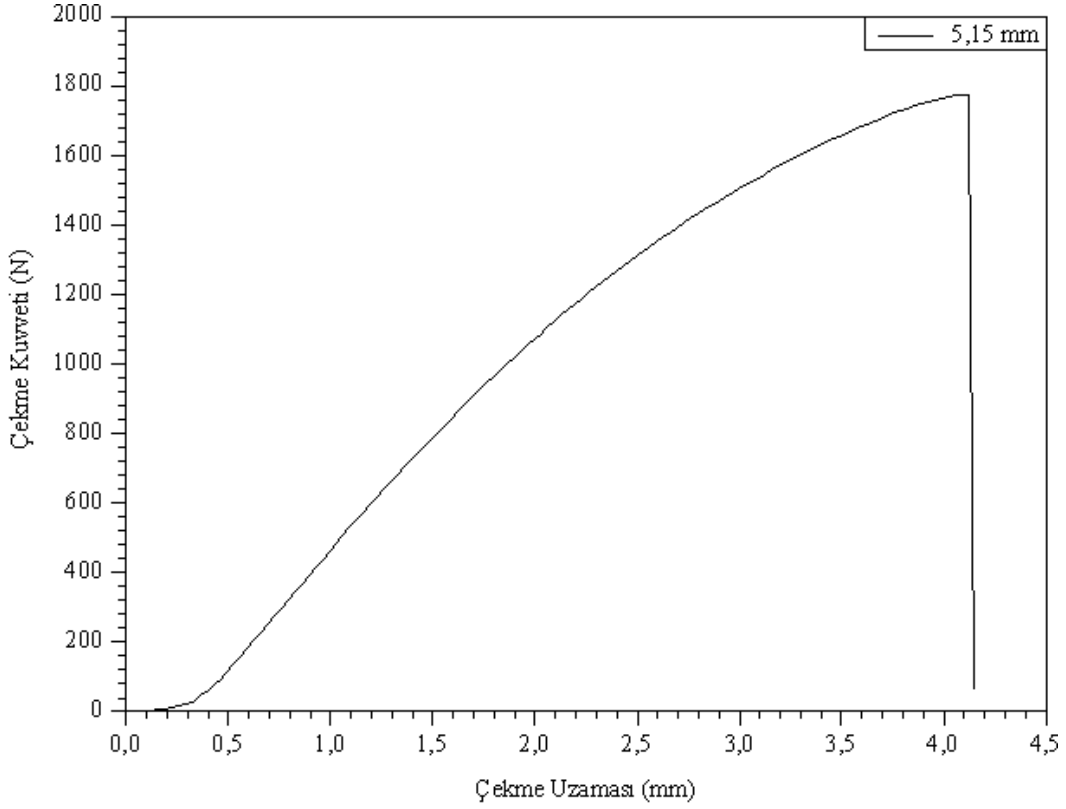
Şekil A.18: 4,95 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



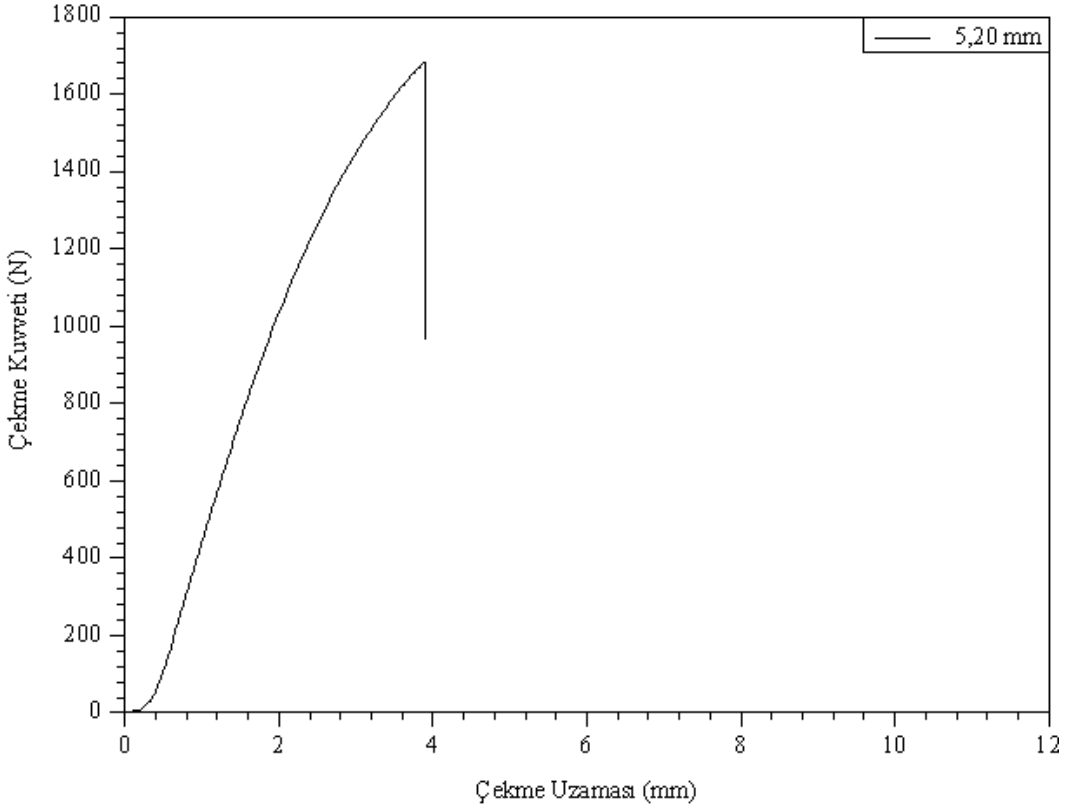
Şekil A.19: 5,00 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



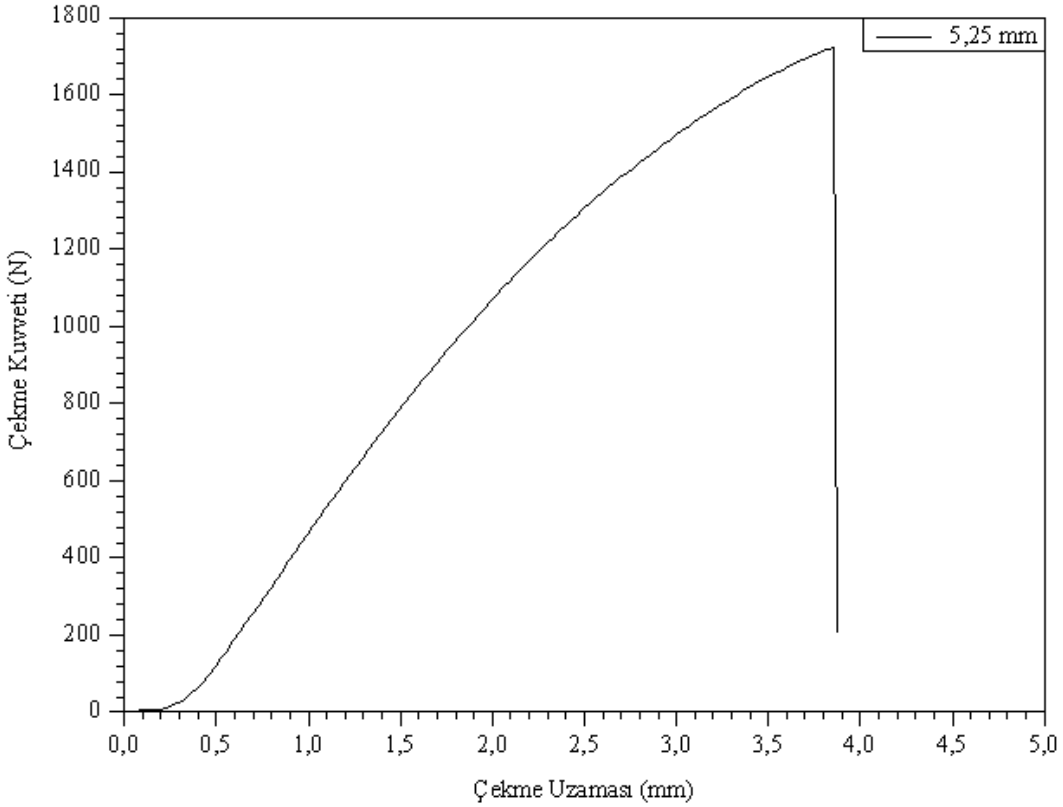
Şekil A.20: 5,10 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



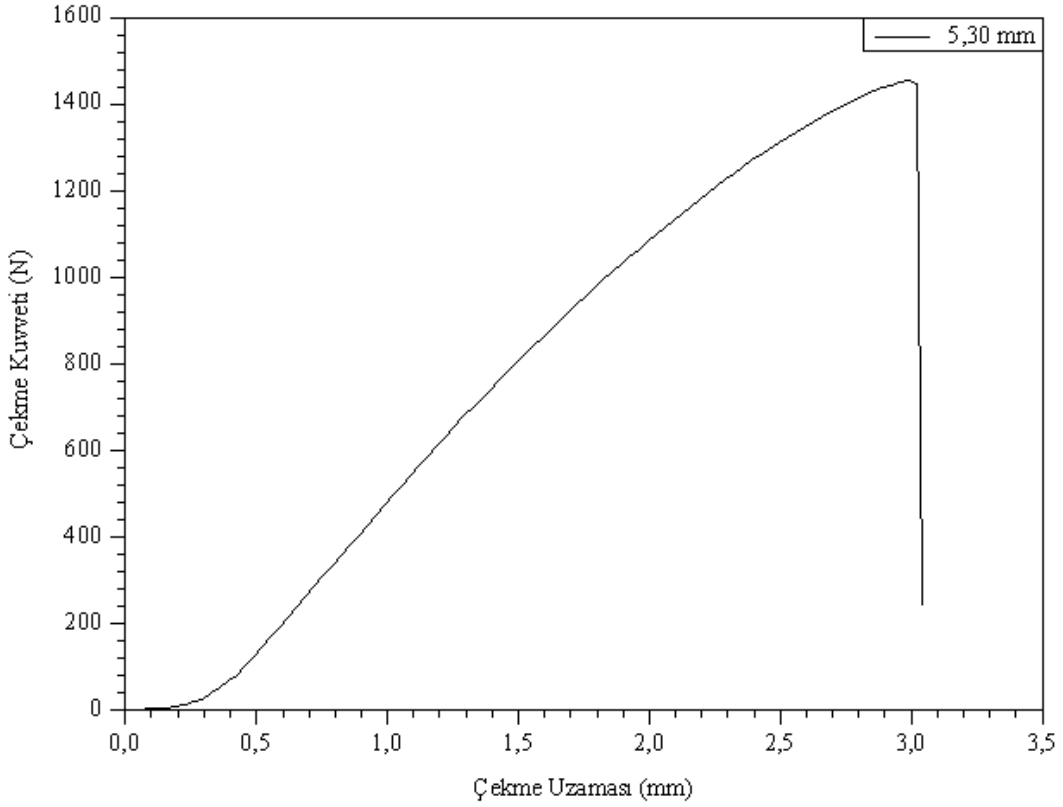
Şekil A.21: 5,15 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



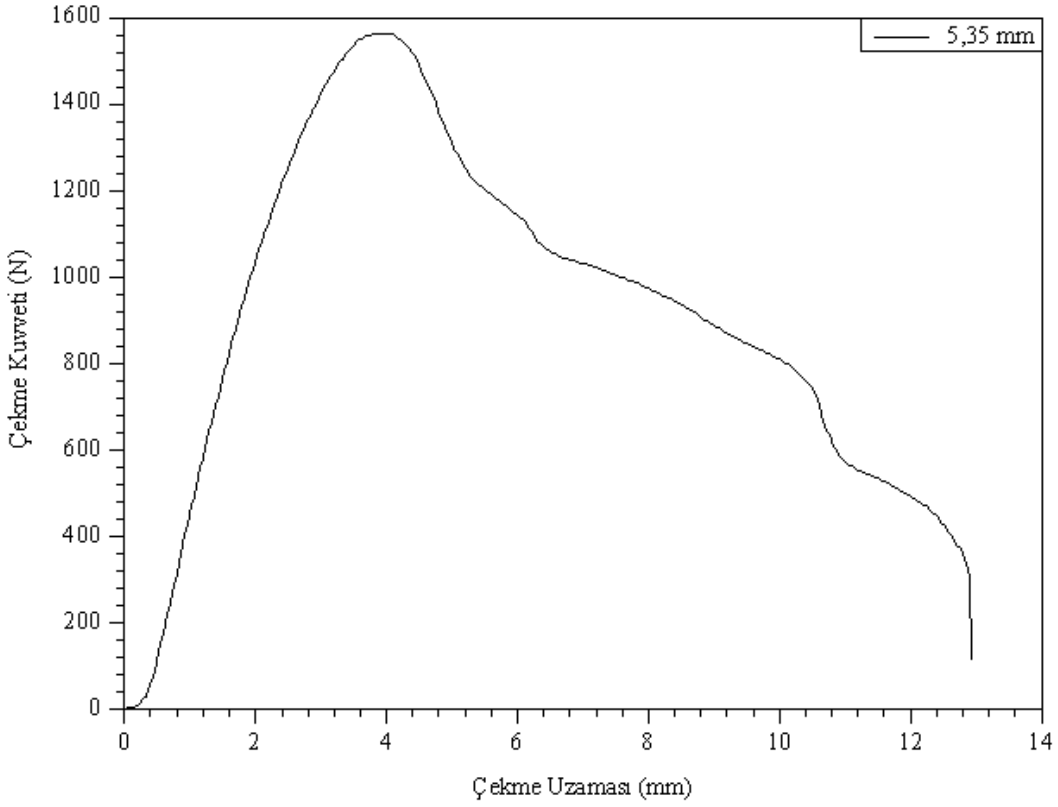
Şekil A.22: 5,20 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



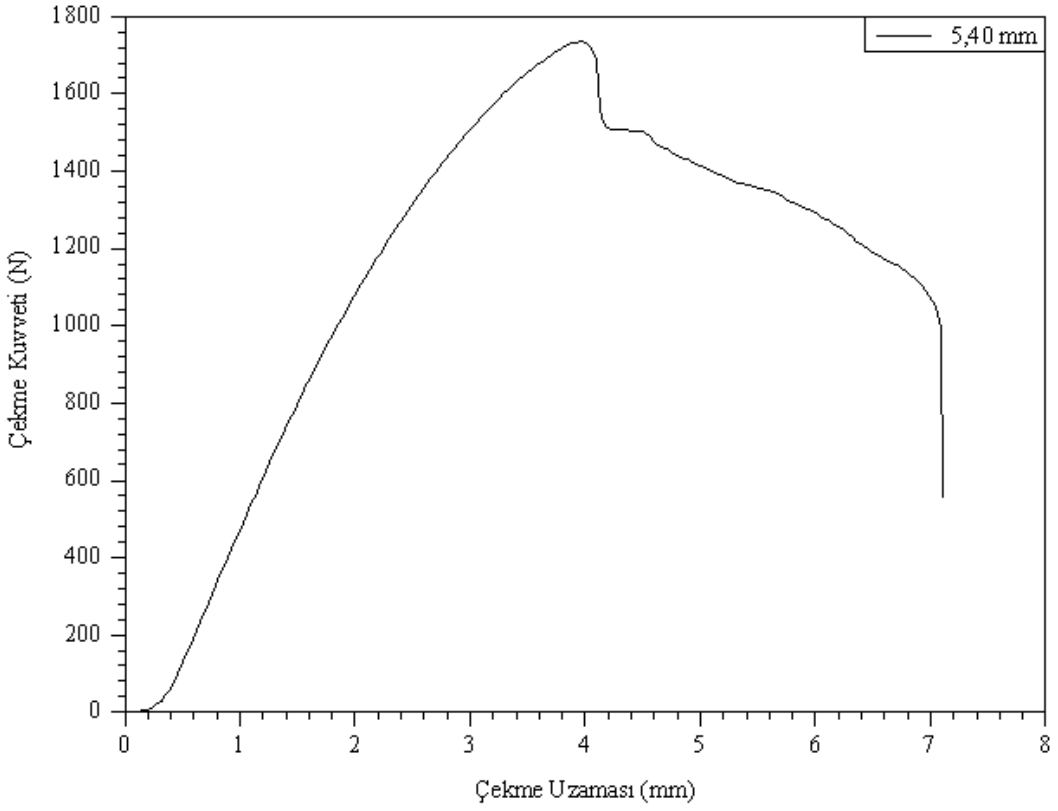
Şekil A.23: 5,25 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



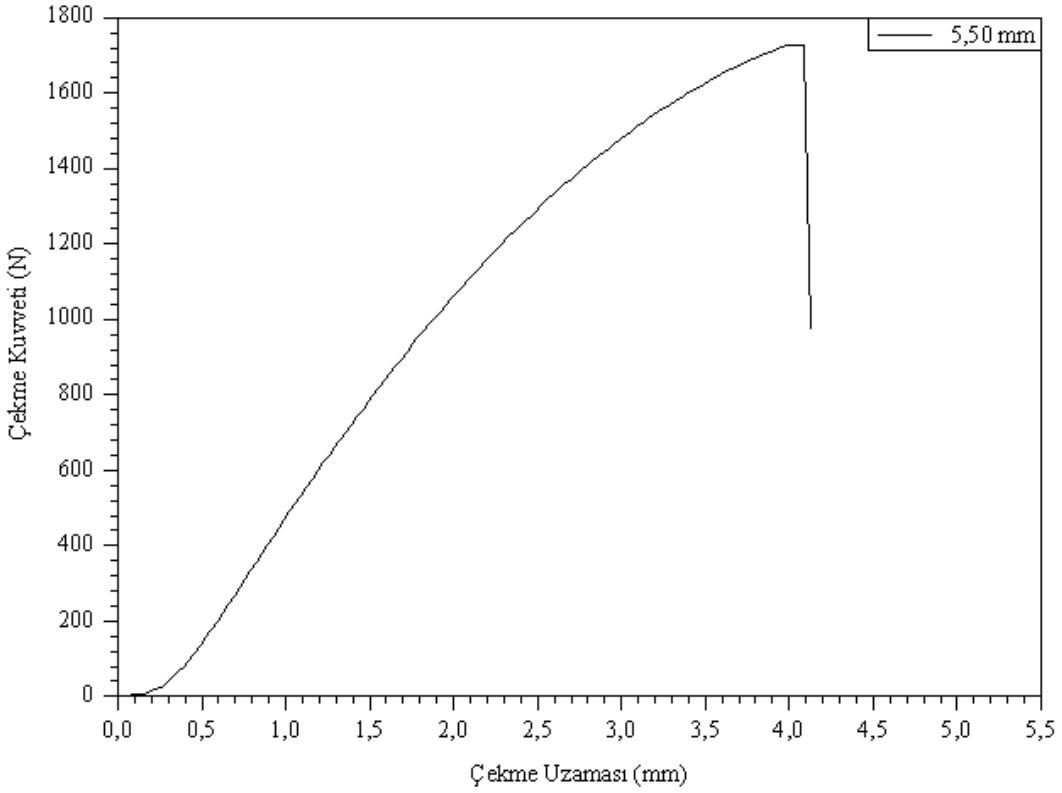
Şekil A.24: 5,30 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



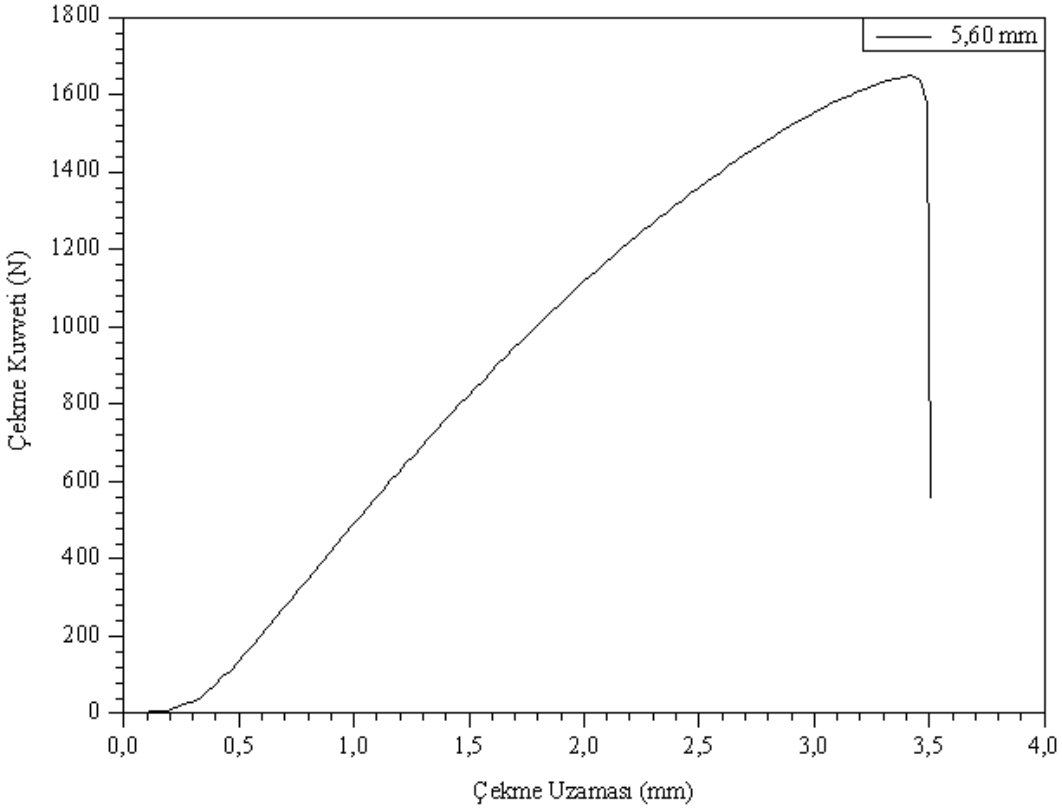
Şekil A.25: 5,35 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



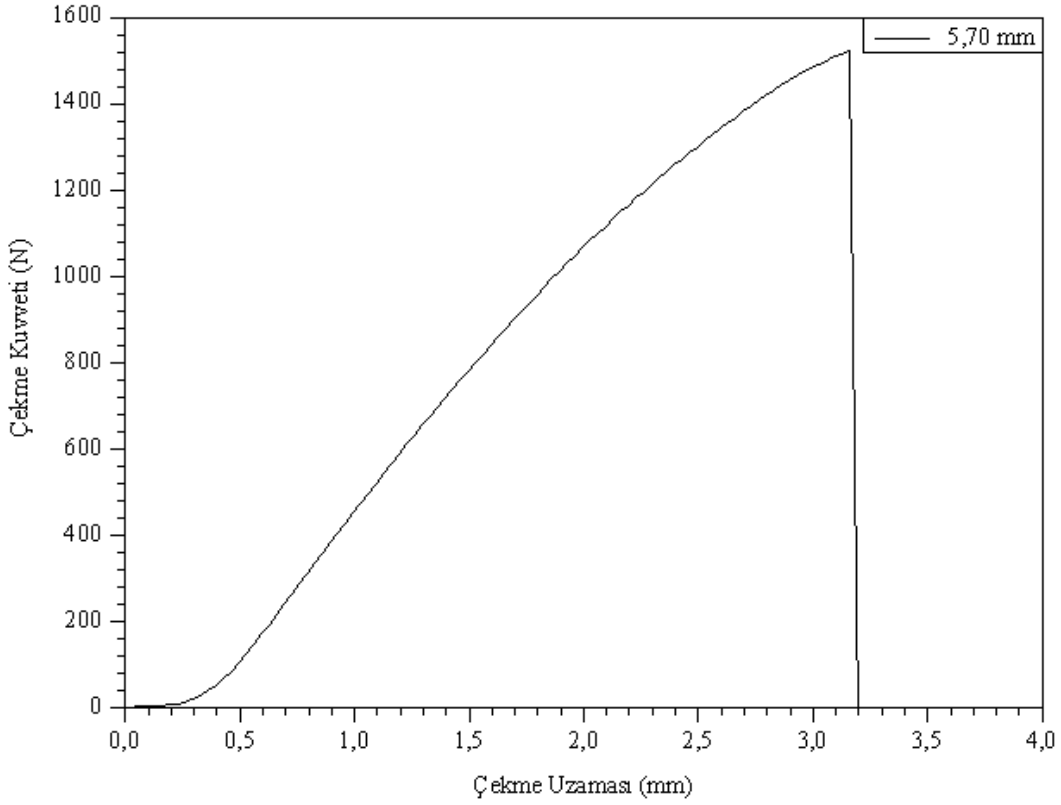
Şekil A.26: 5,40 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



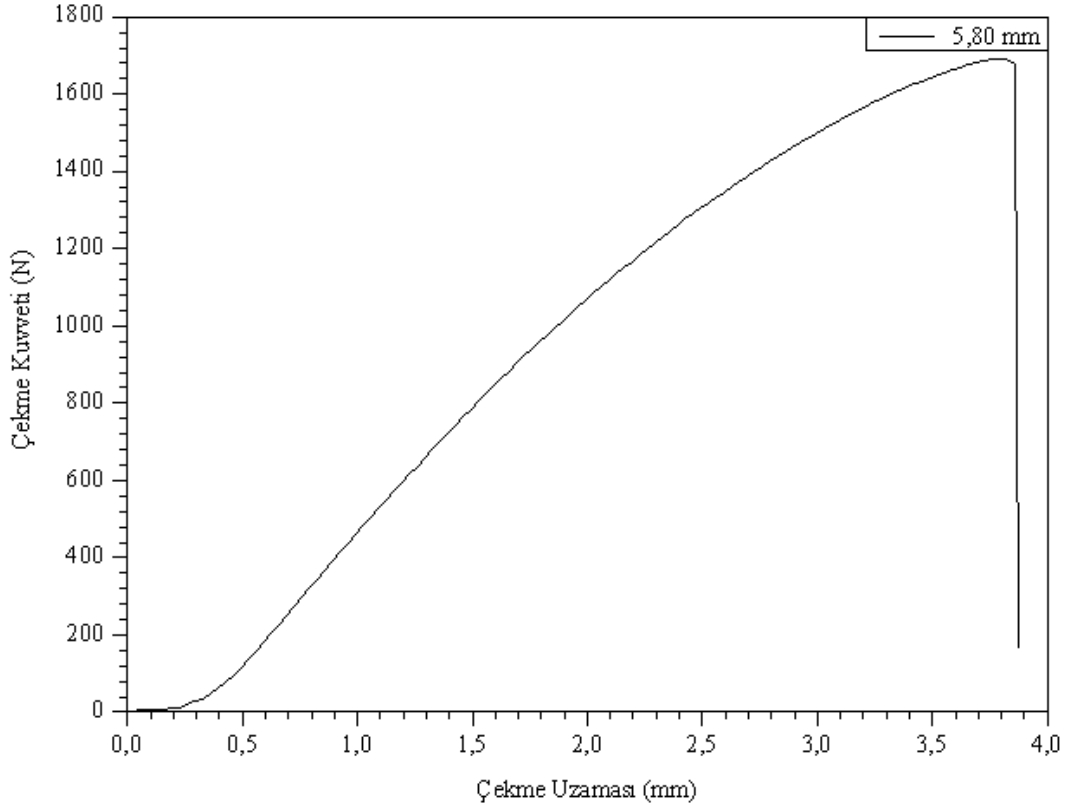
Şekil A.27: 5,50 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



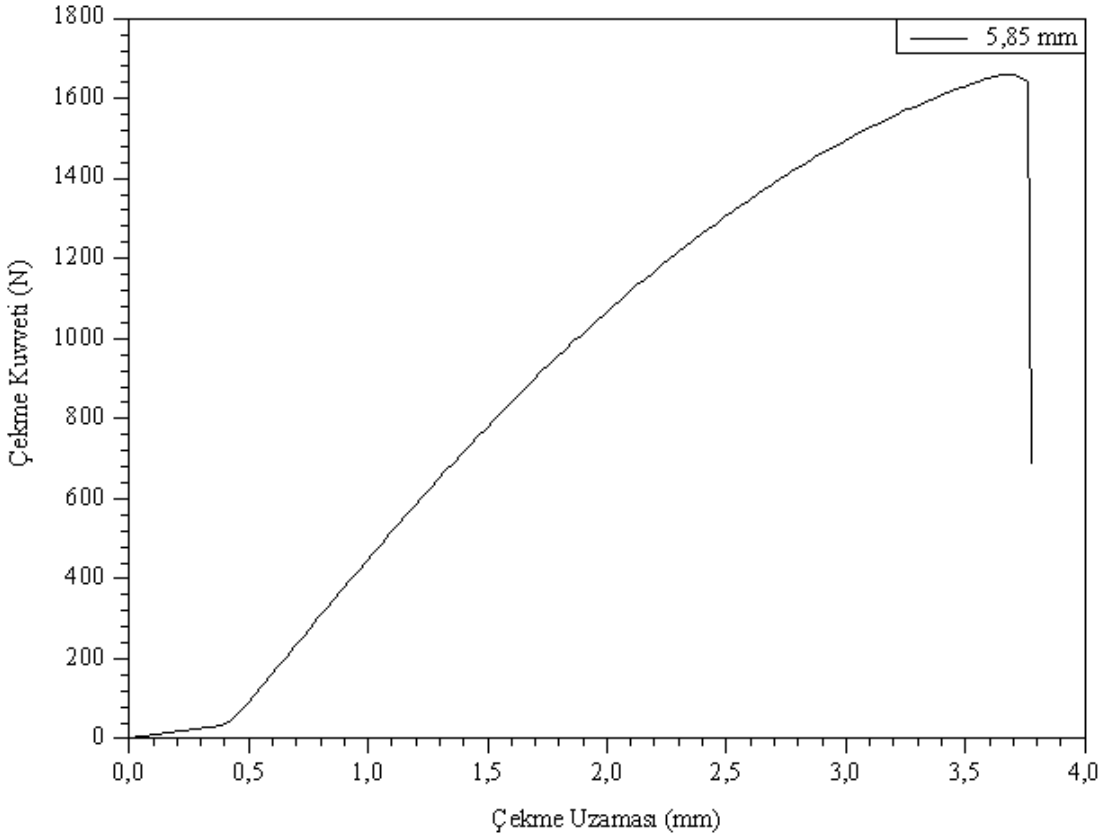
Şekil A.28: 5,60 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



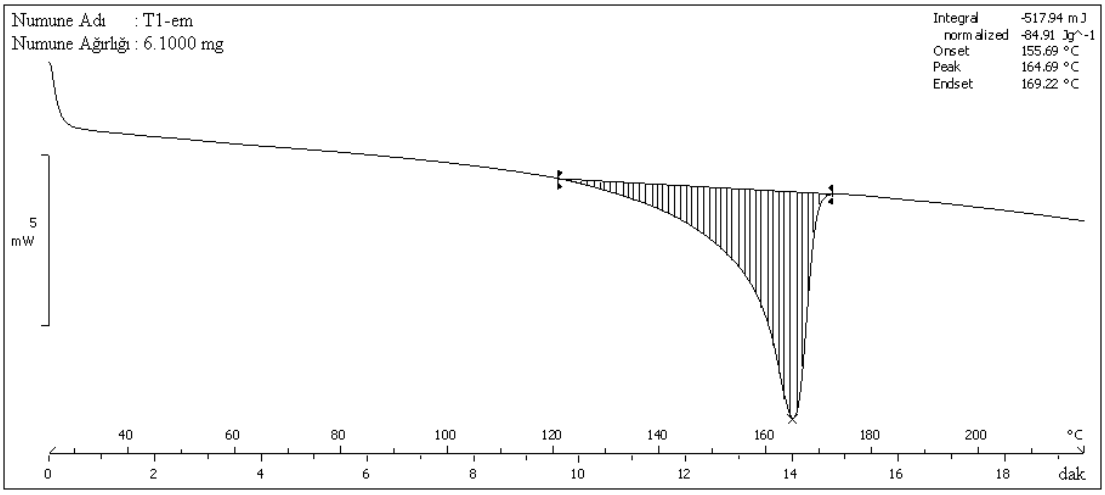
Şekil A.29: 5,70 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



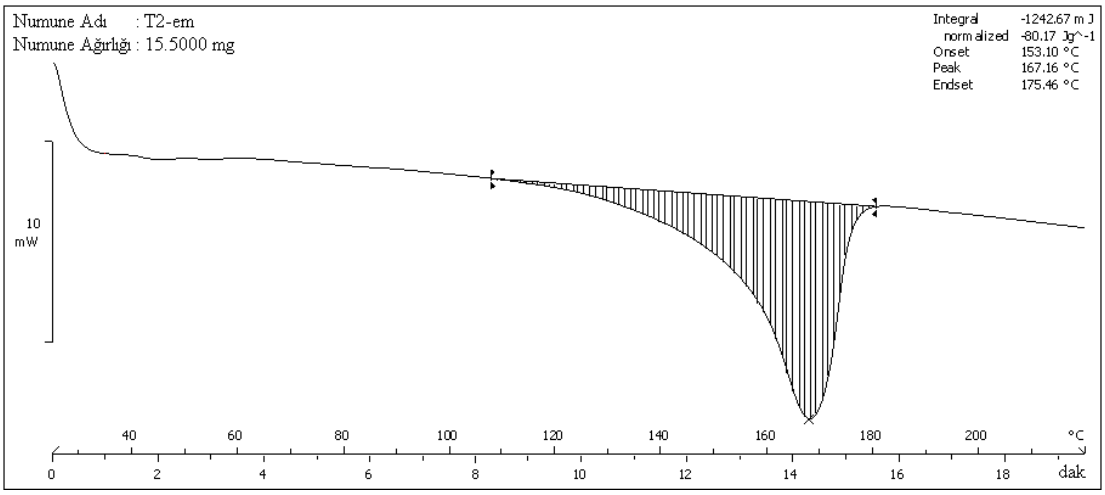
Şekil A.30: 5,80 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



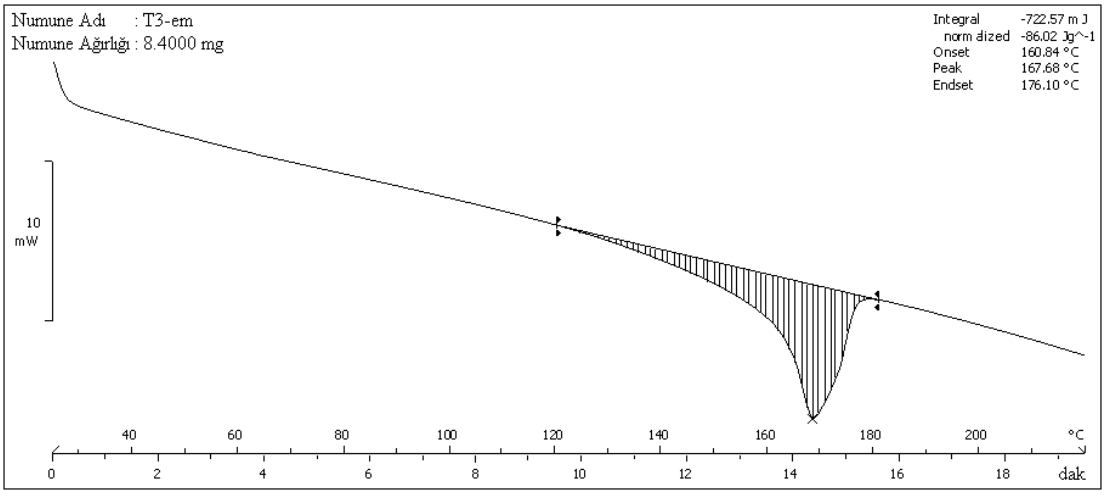
Şekil A.31: 5,85 mm dalma derinliğinde 150 sn bekleme süresi, 1250 d/d devir sayısı ve 100 mm/dak dalma hızı için çekme kuvvetinin çekme uzaması ile değişimi



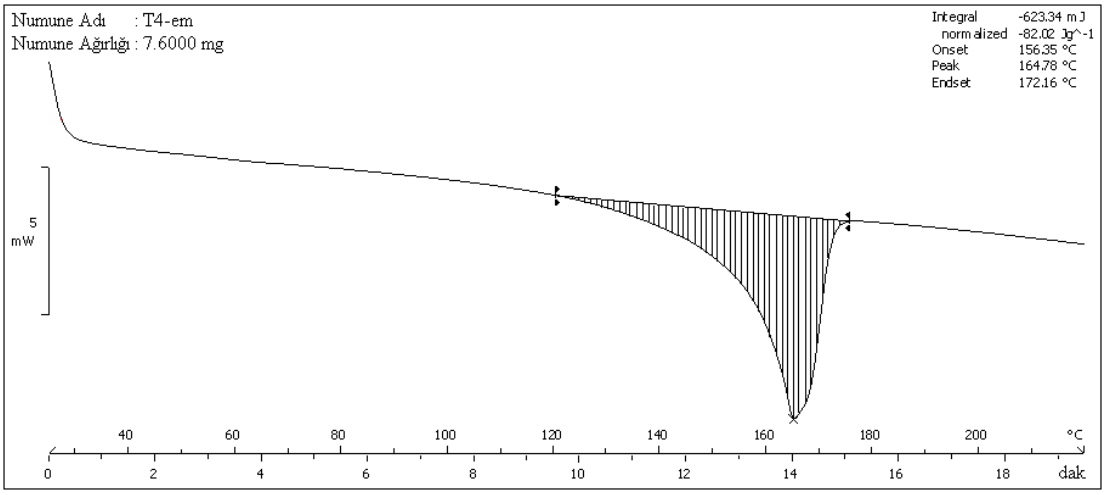
Şekil A.32: T1-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



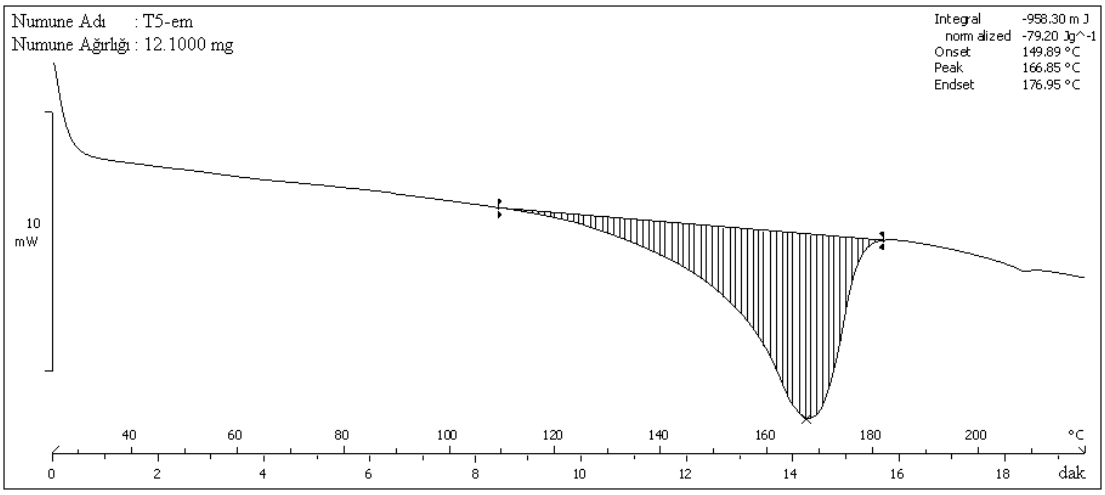
Şekil A.33: T2-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



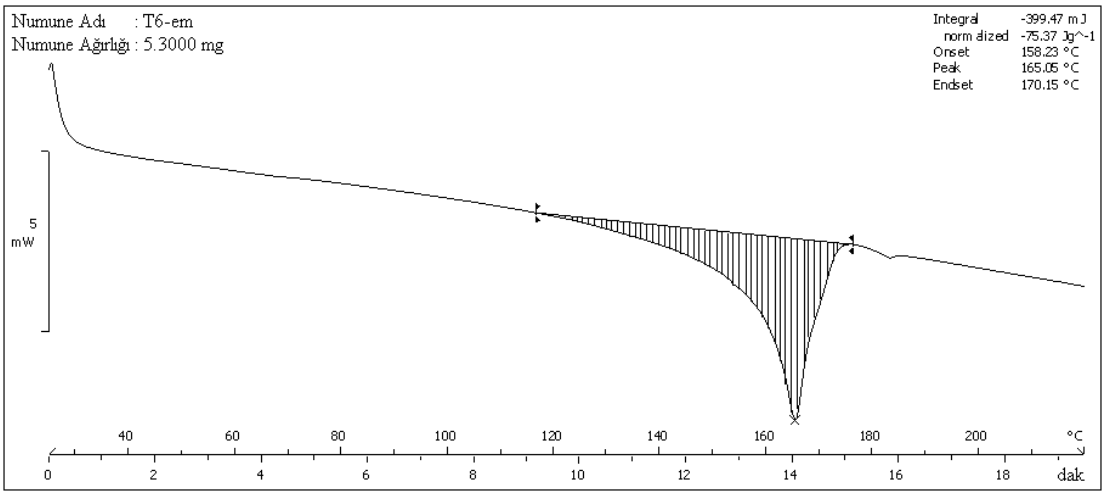
Şekil A.34: T3-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



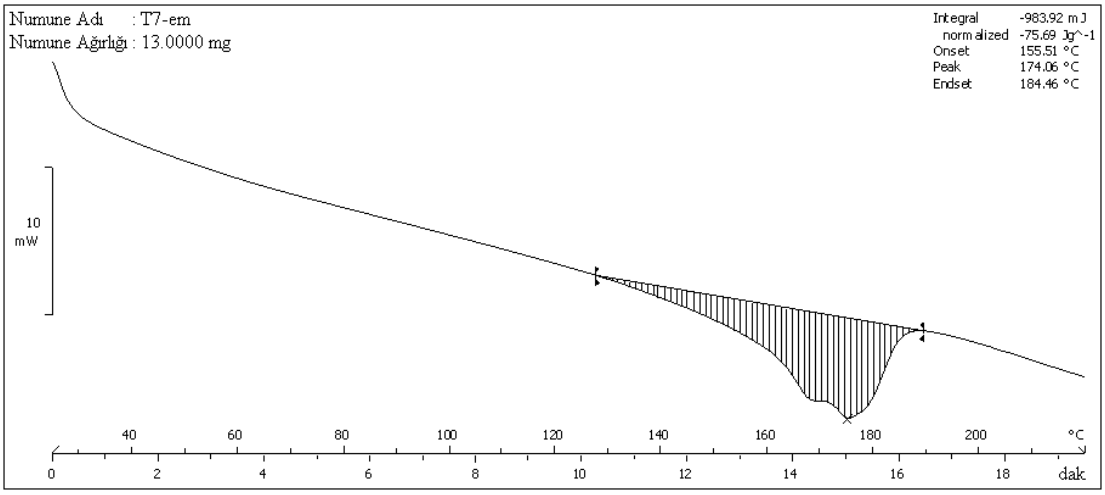
Şekil A.35: T4-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



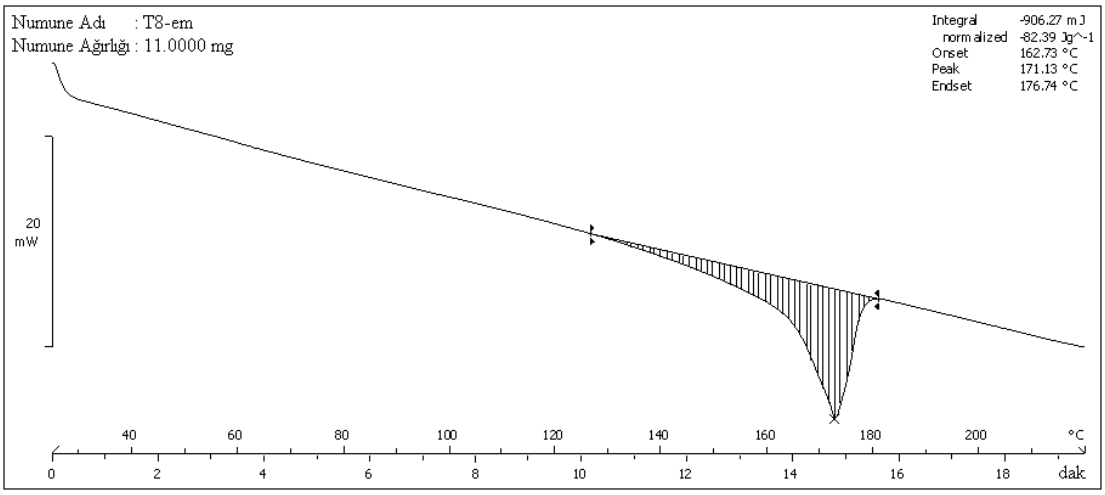
Şekil A.36: T5-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



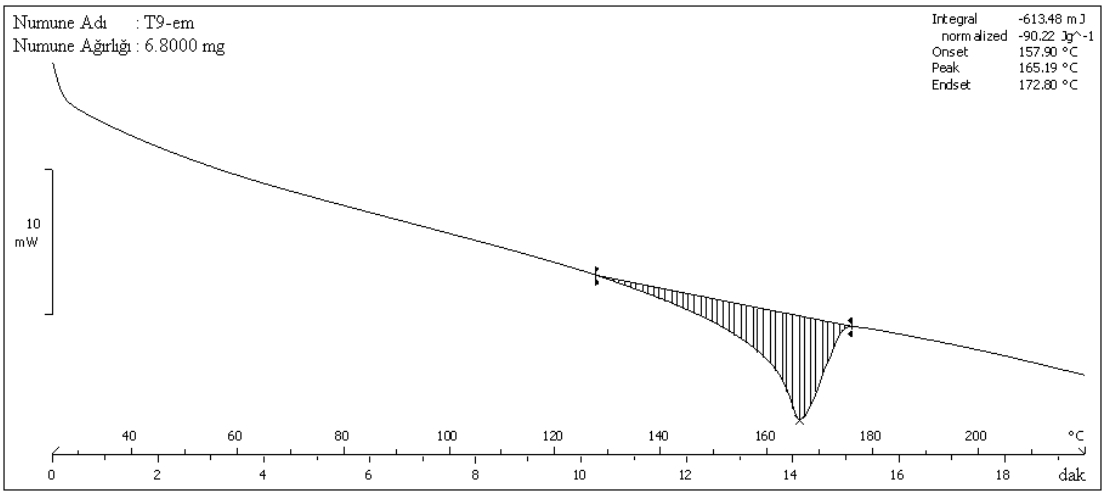
Şekil A.37: T6-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



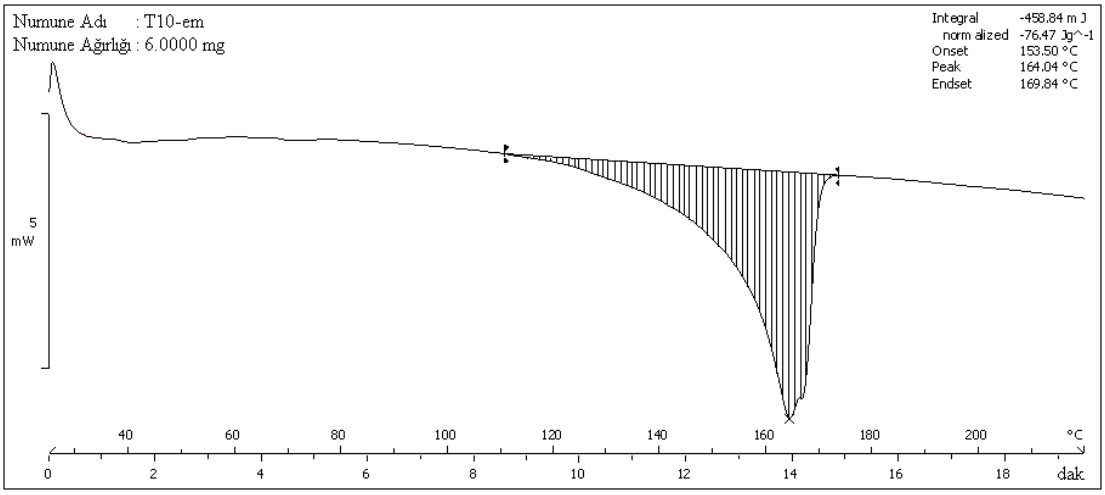
Şekil A.38: T7-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



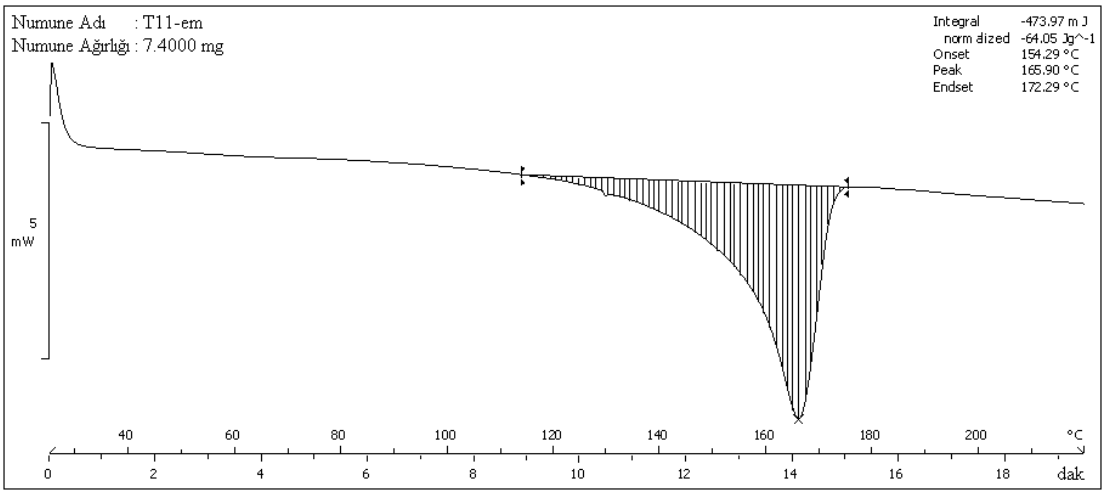
Şekil A.39: T8-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



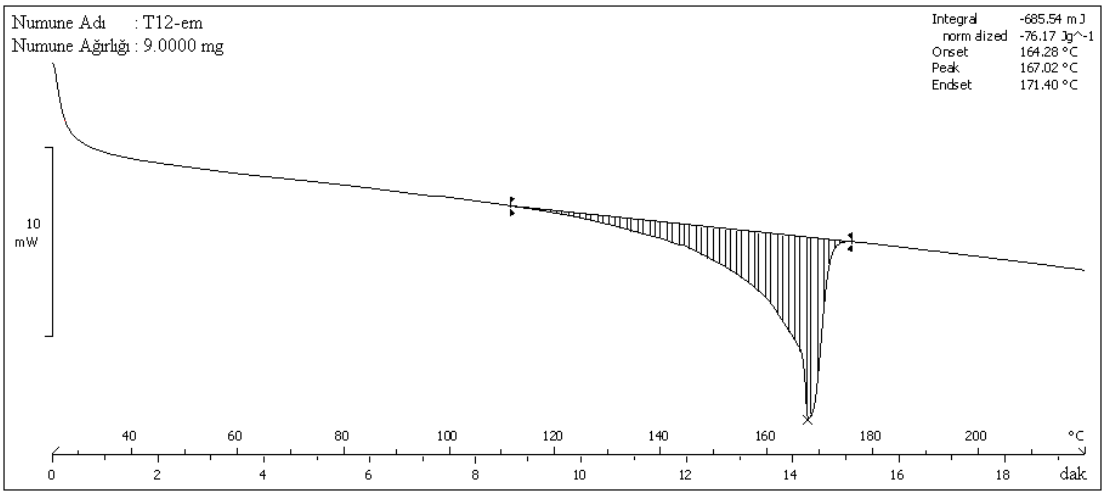
Şekil A.40: T9-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



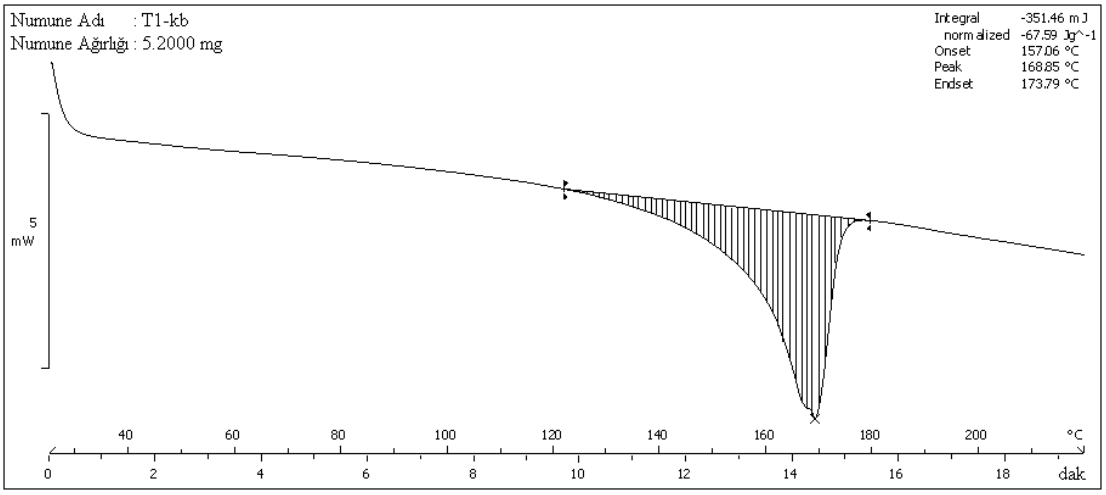
Şekil A.41: T10-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



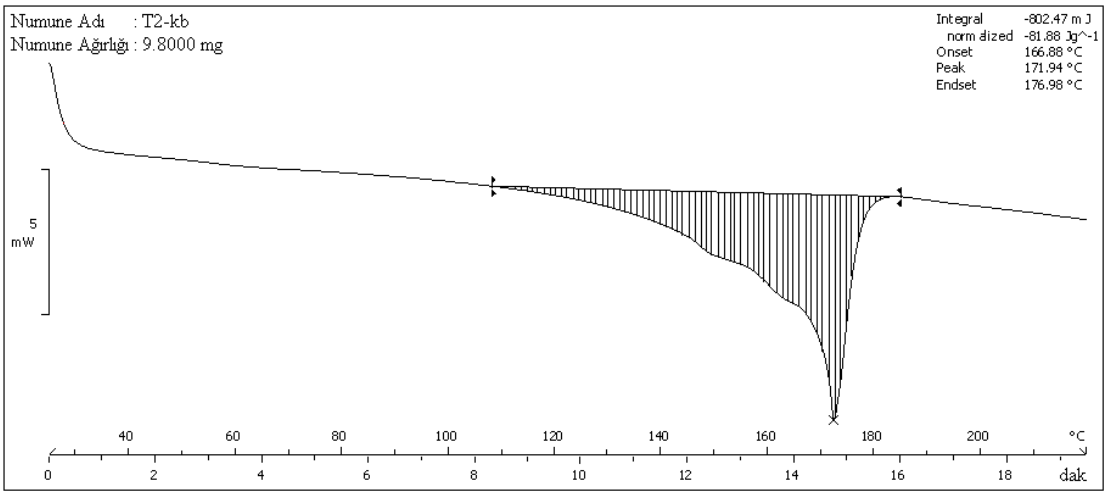
Şekil A.42: T11-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



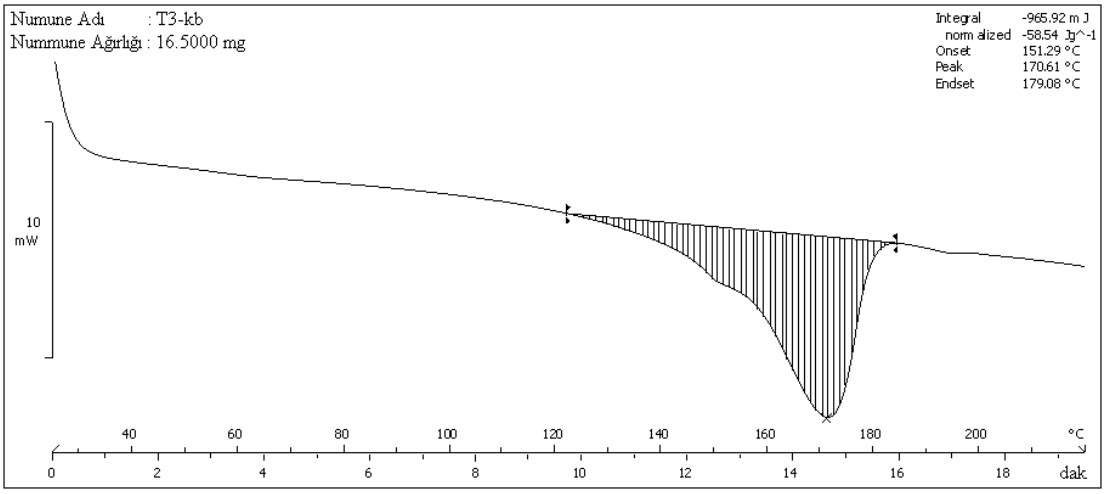
Şekil A.43: T12-em için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



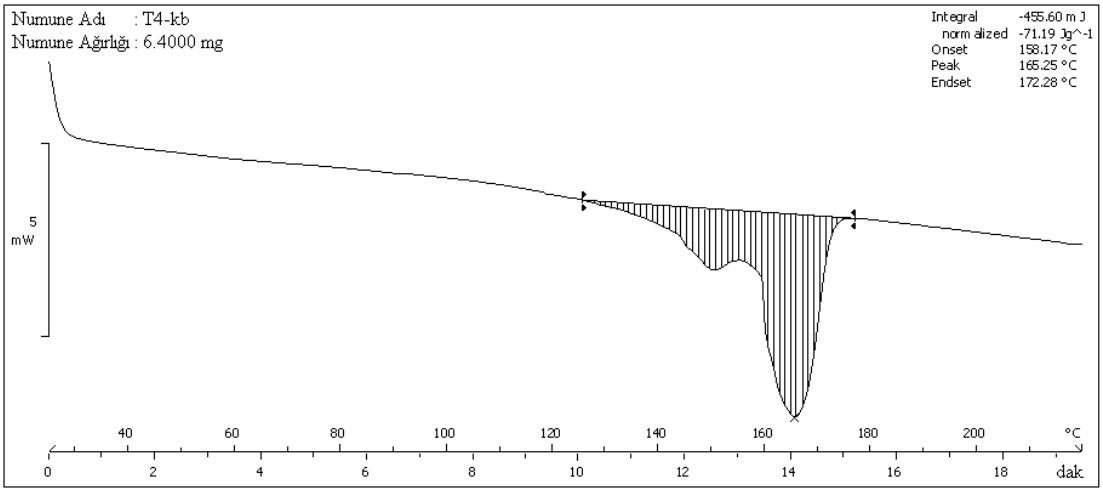
Şekil A.44: T1-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



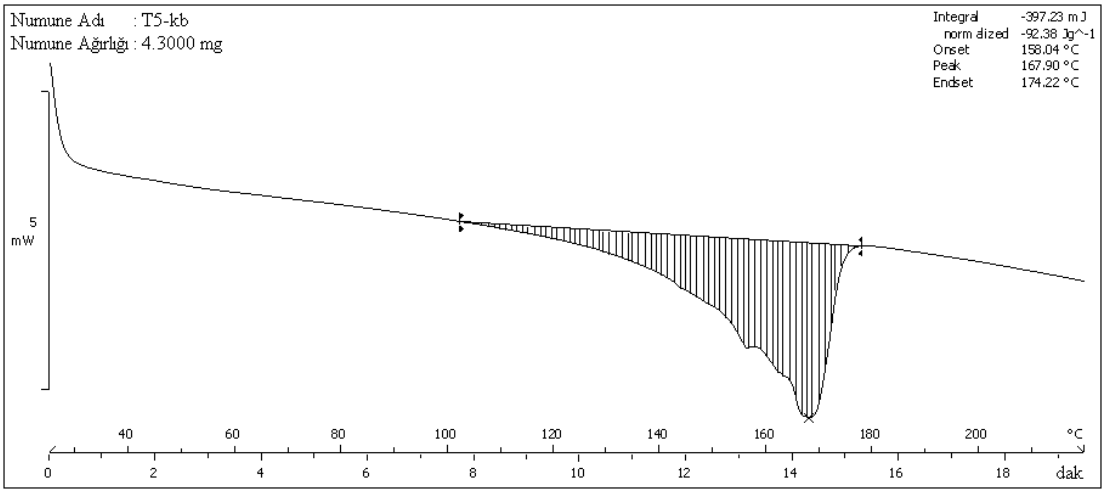
Şekil A.45: T2-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



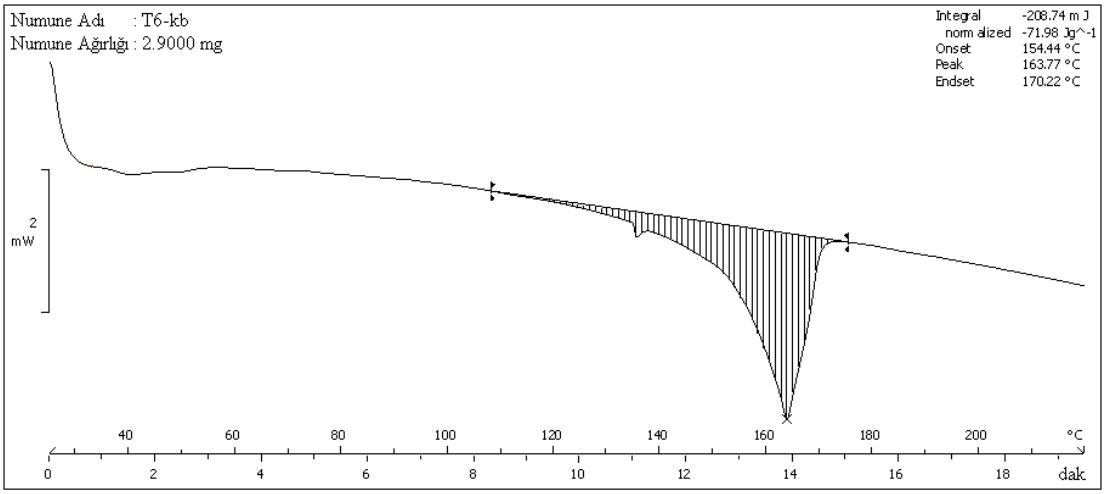
Şekil A.46: T3-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



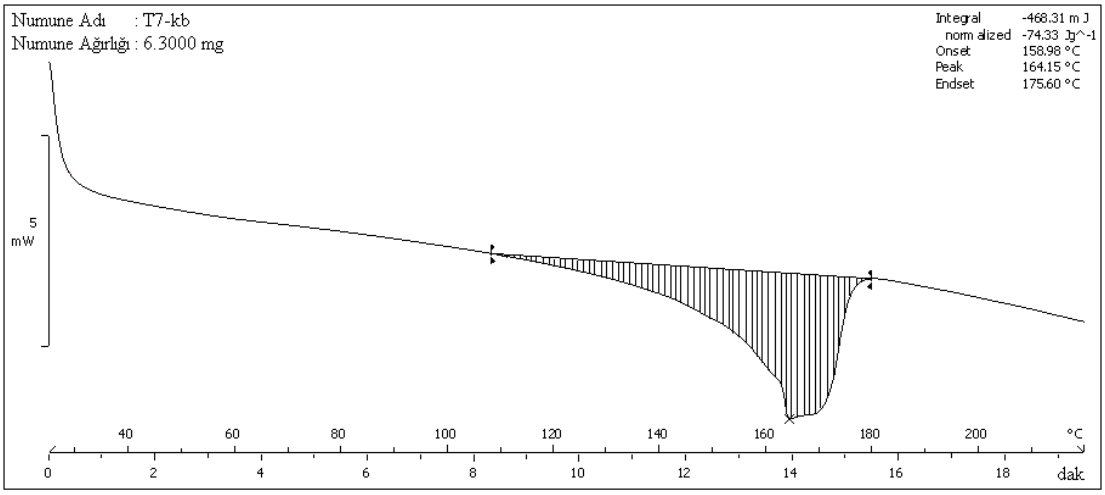
Şekil A.47: T4-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



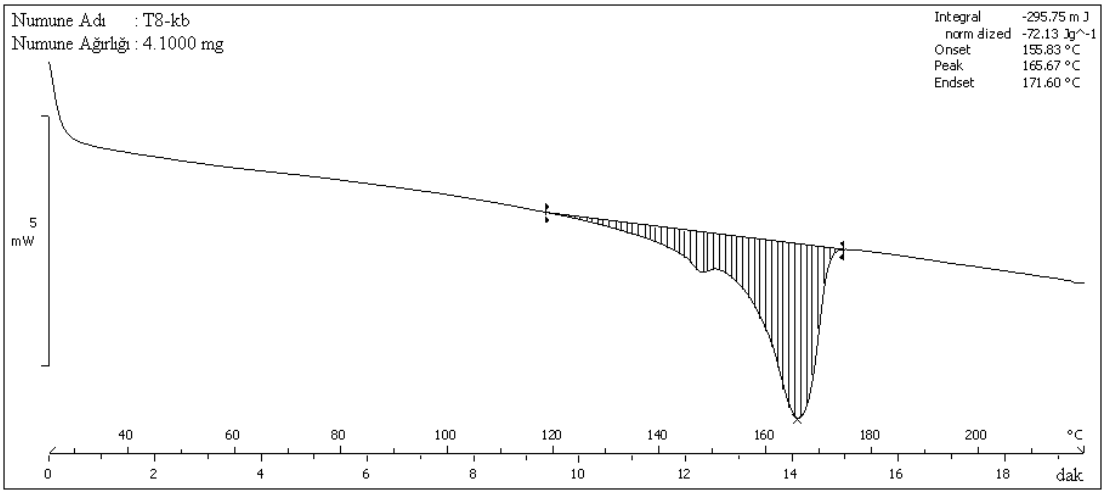
Şekil A.48: T5-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



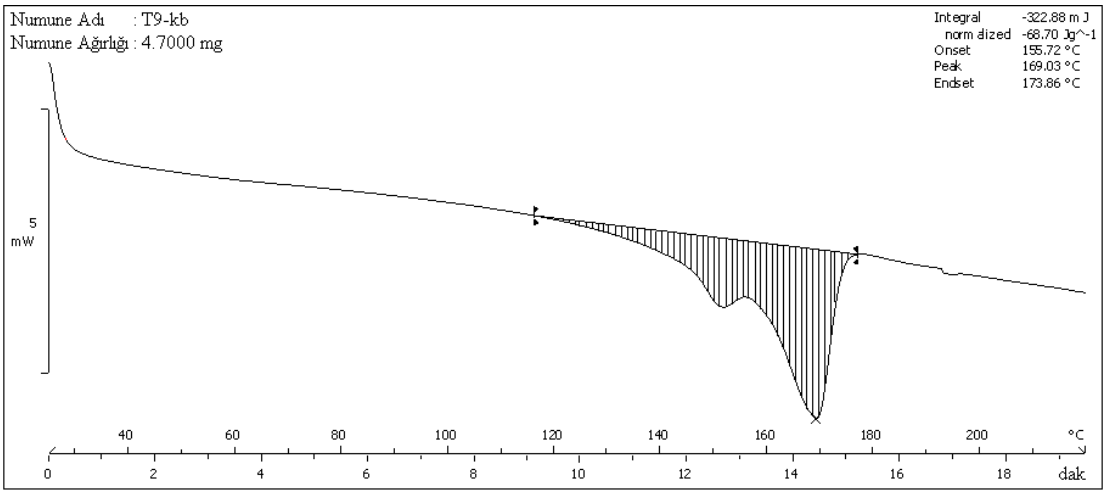
Şekil A.49: T6-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



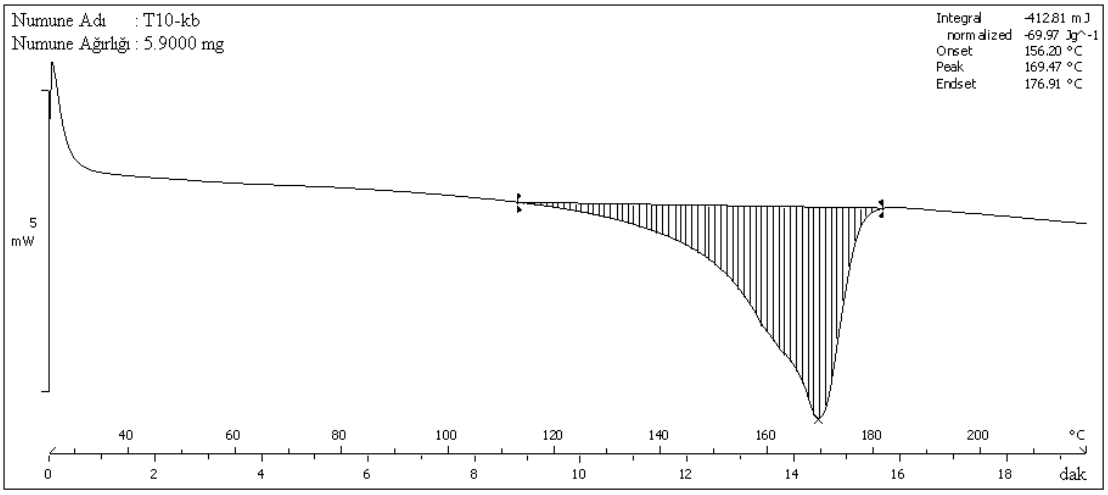
Şekil A.50: T7-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



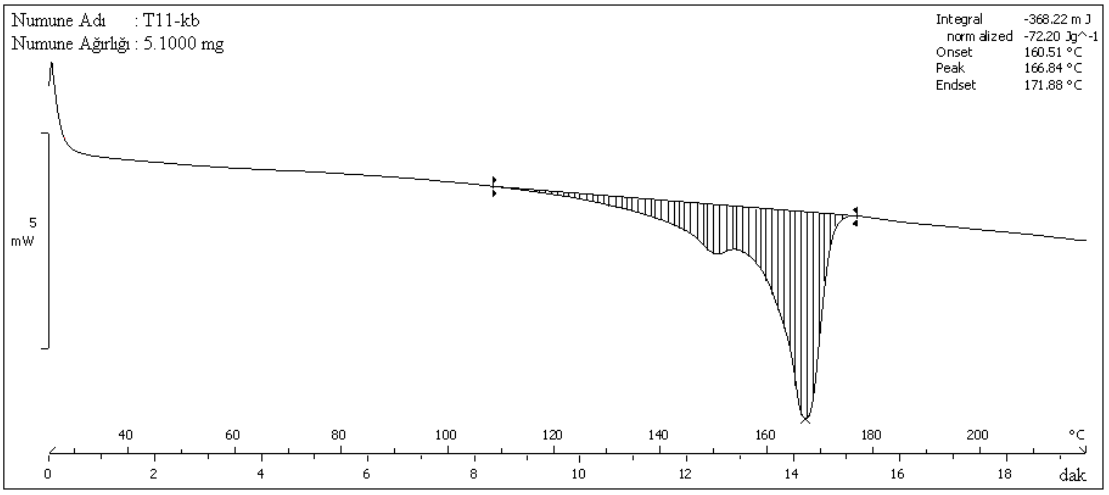
Şekil A.51: T8-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



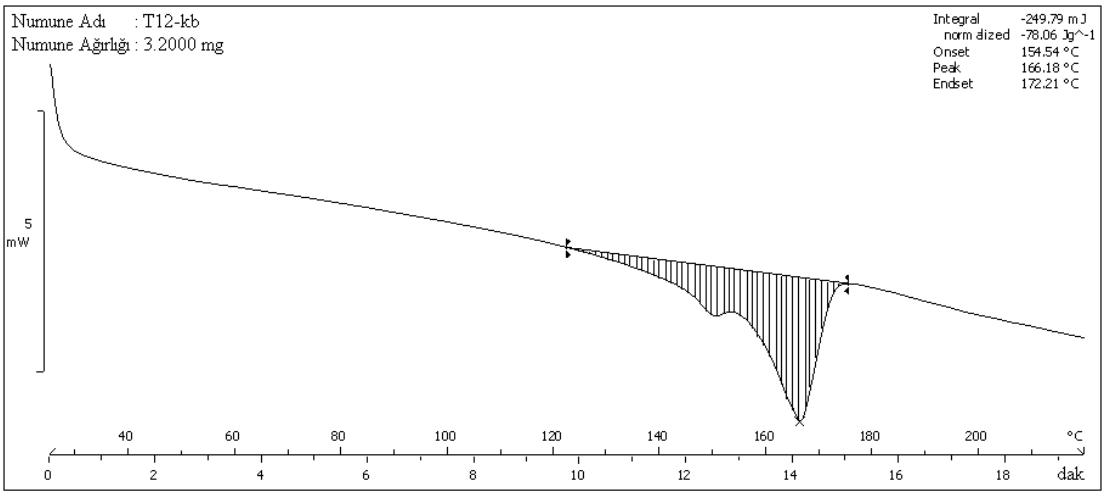
Şekil A.52: T9-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



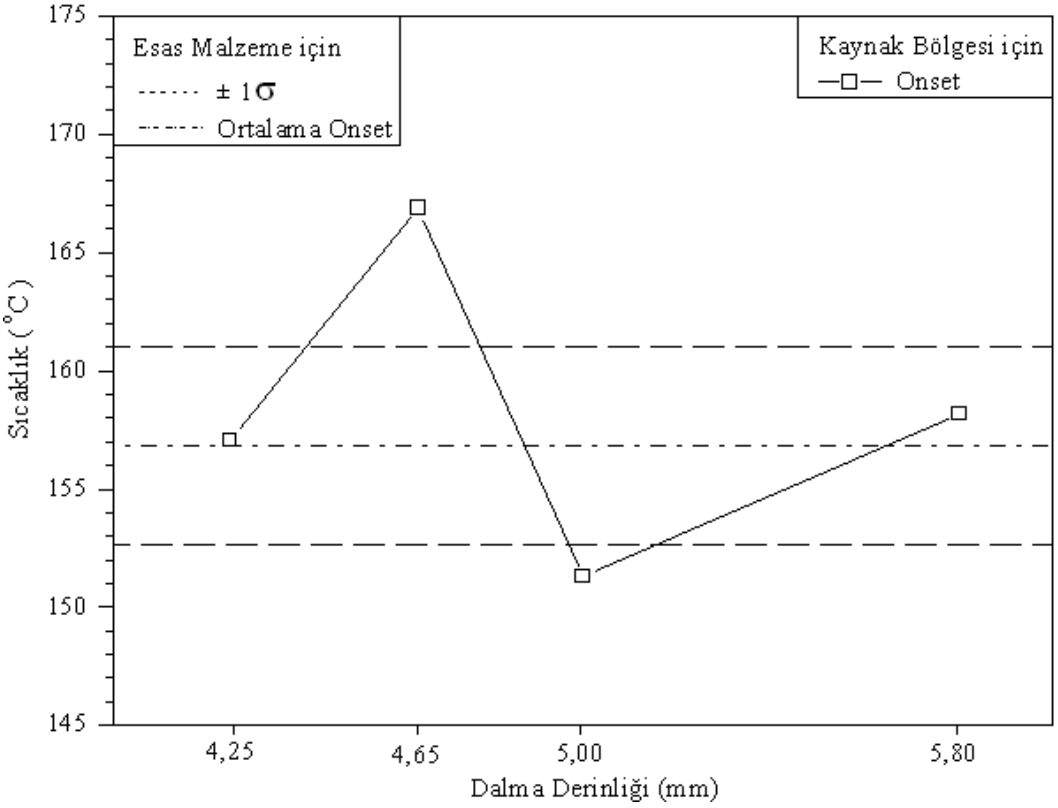
Şekil A.53: T10-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



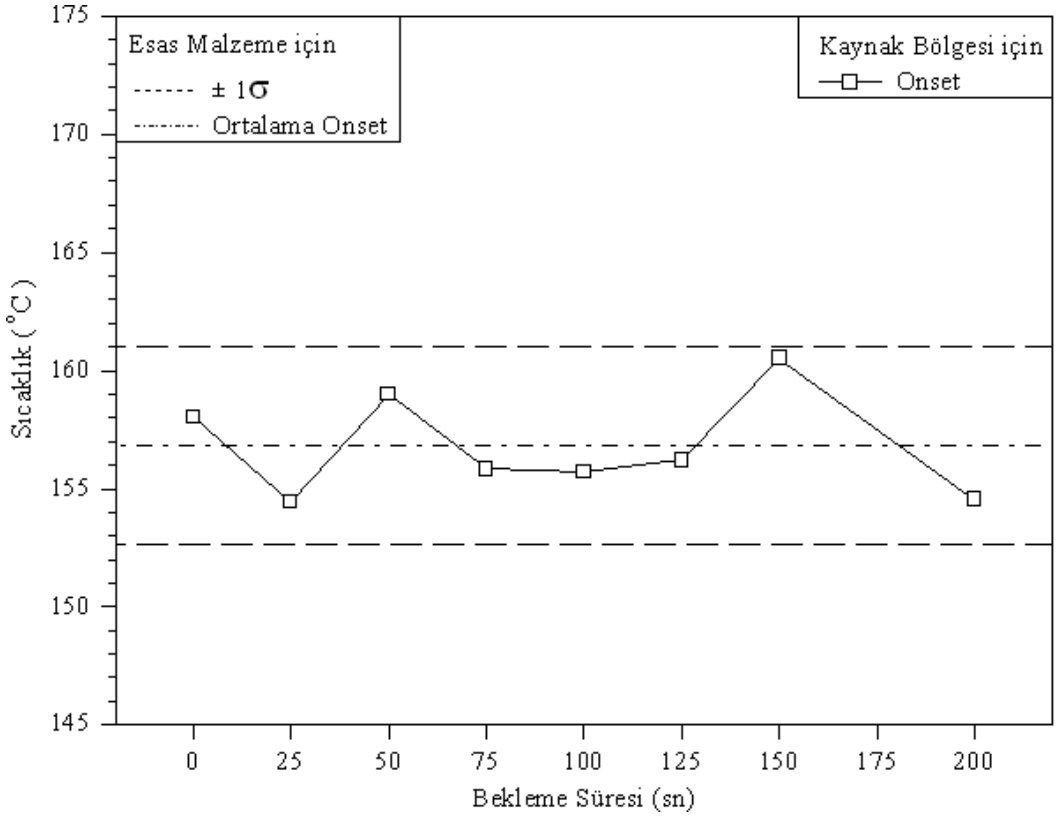
Şekil A.54: T11-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



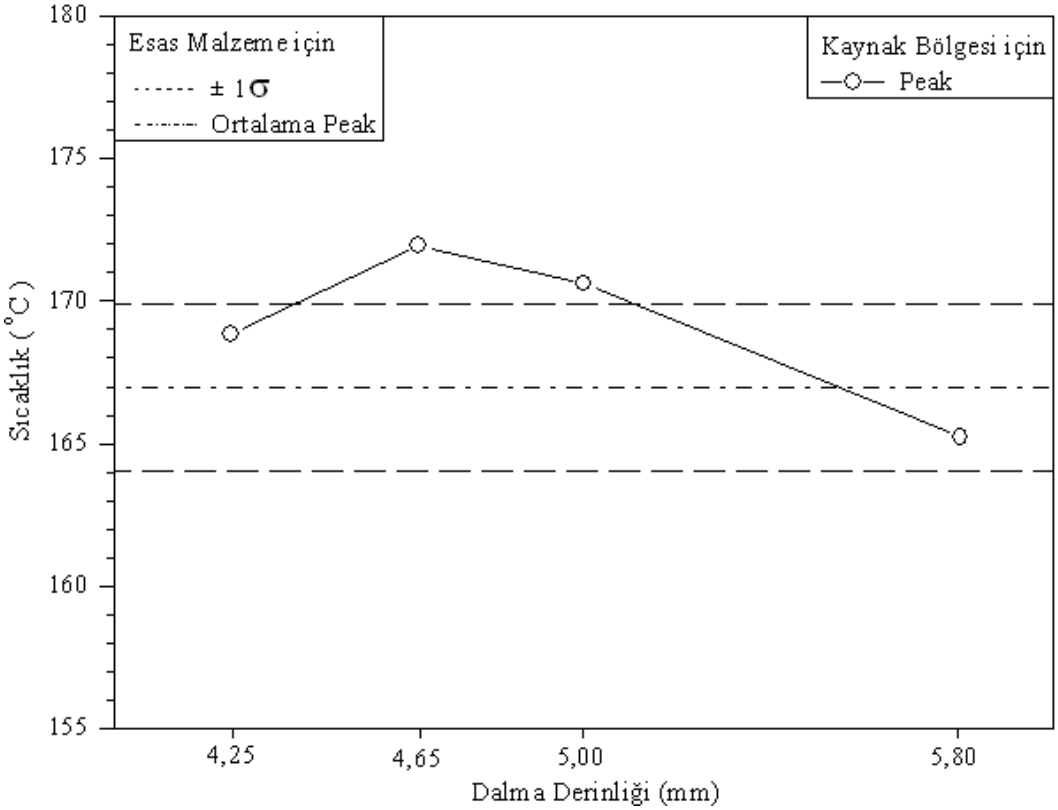
Şekil A.55: T12-kb için birim zamanda ısıtıcıdan çekilen ısının, sıcaklık ve zaman ile değişimi



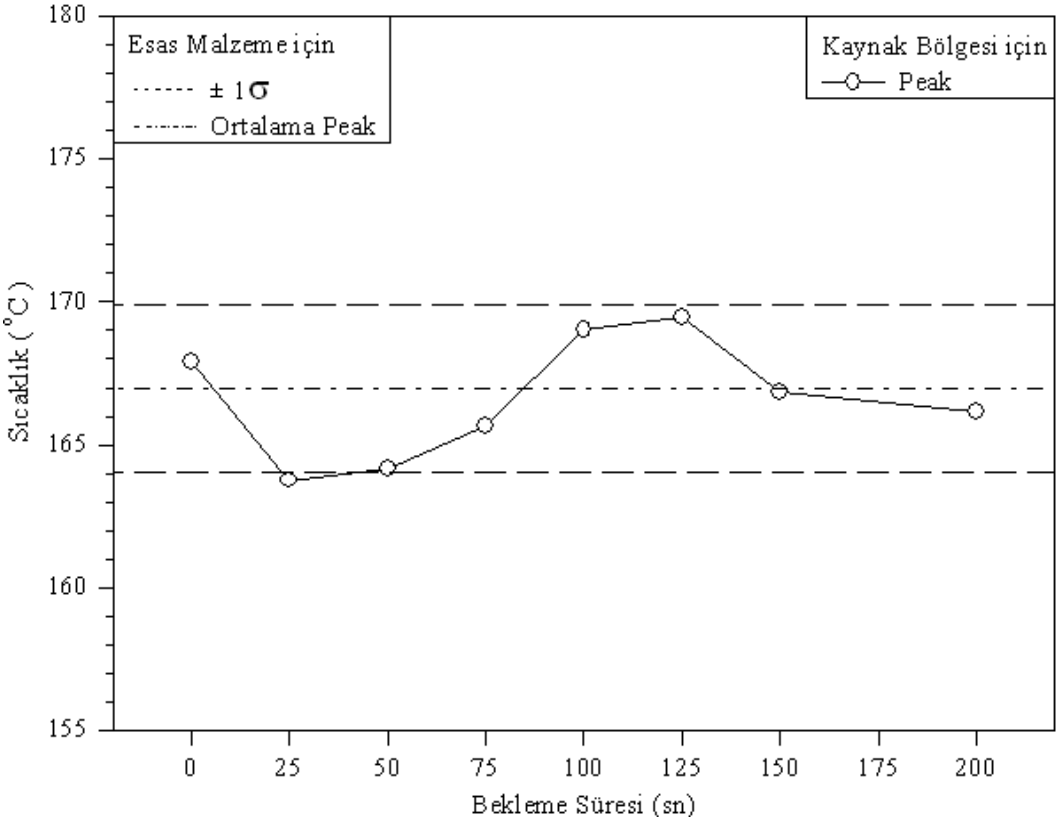
Şekil A.56: Dalma derinliği ile onset sıcaklık değerinin değişimi



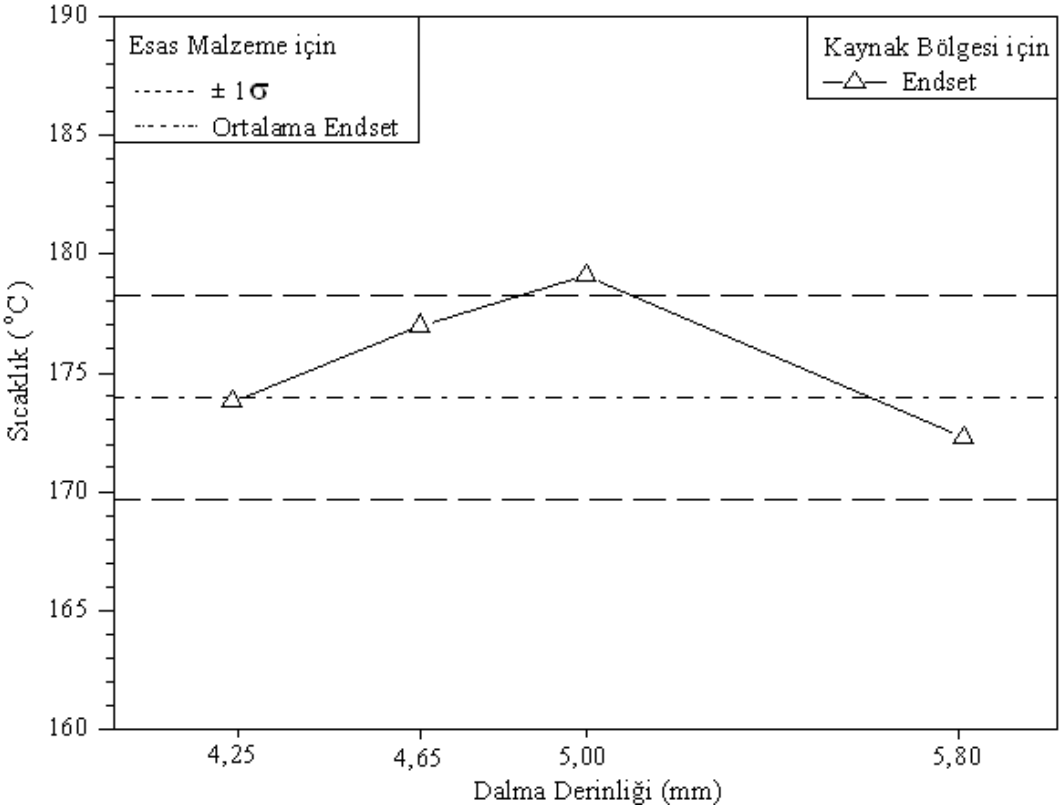
Şekil A.57: Bekleme süresi ile onset sıcaklık değerinin değişimi



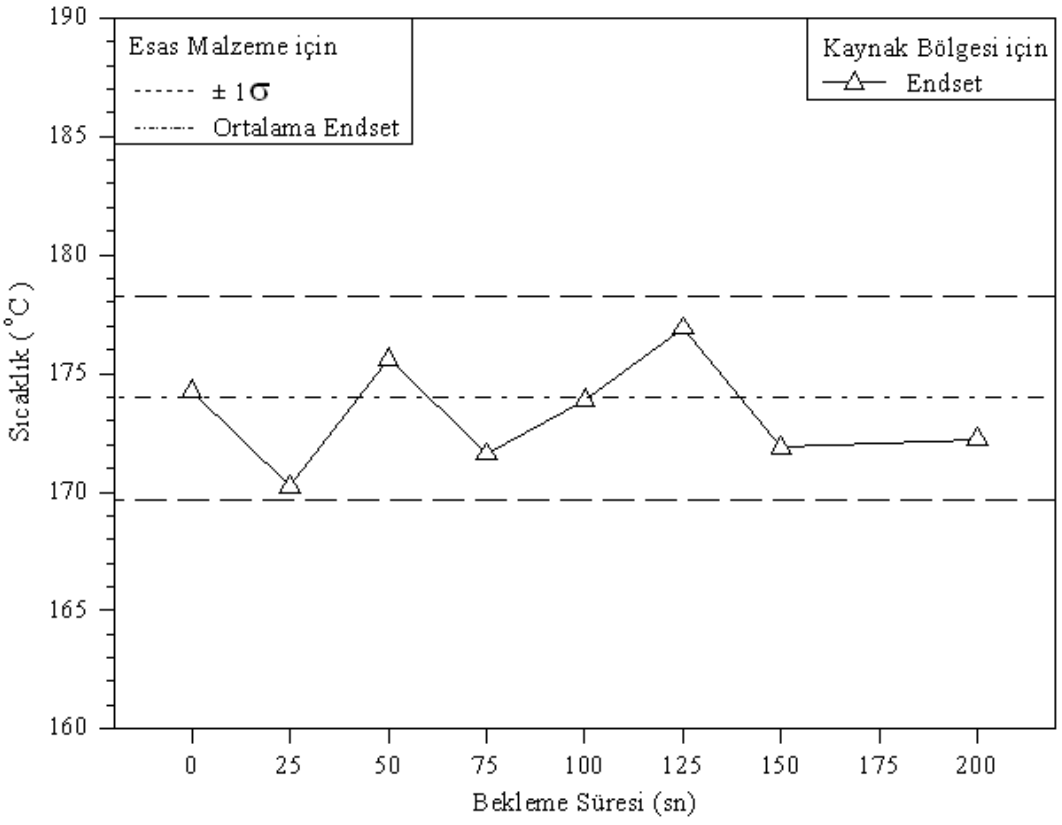
Şekil A.58: Dalma derinliği ile peak sıcaklık değerinin değişimi



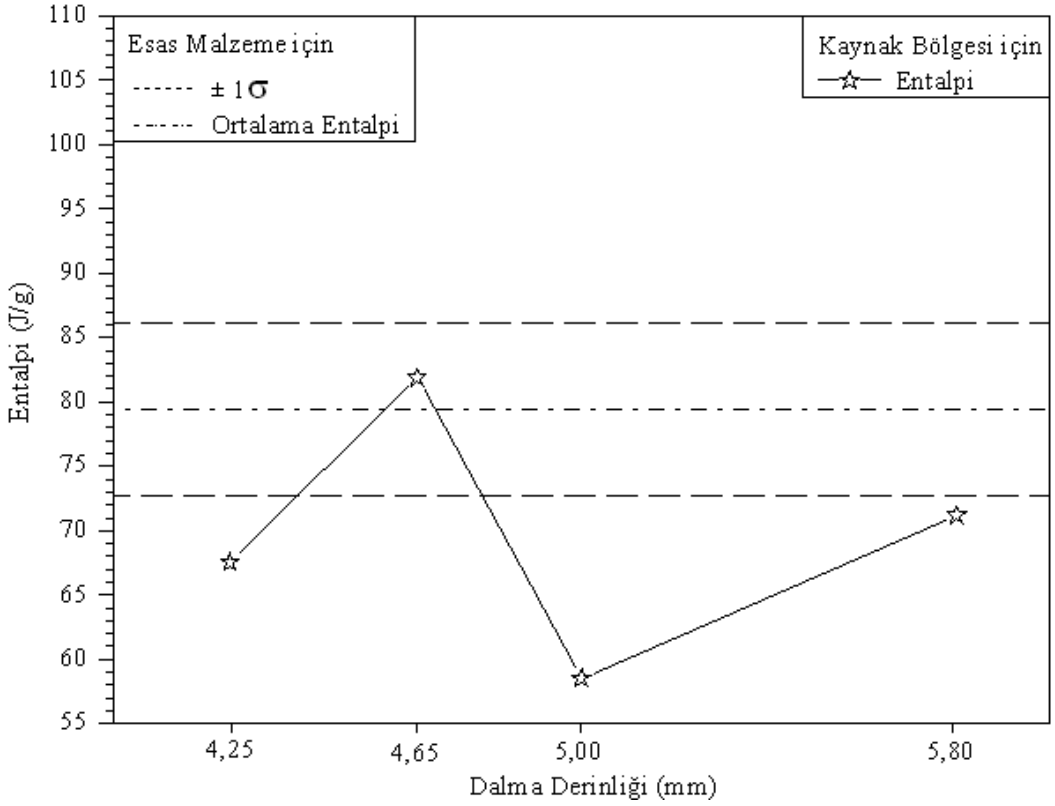
Şekil A.59: Bekleme süresi ile peak sıcaklık değerinin değişimi



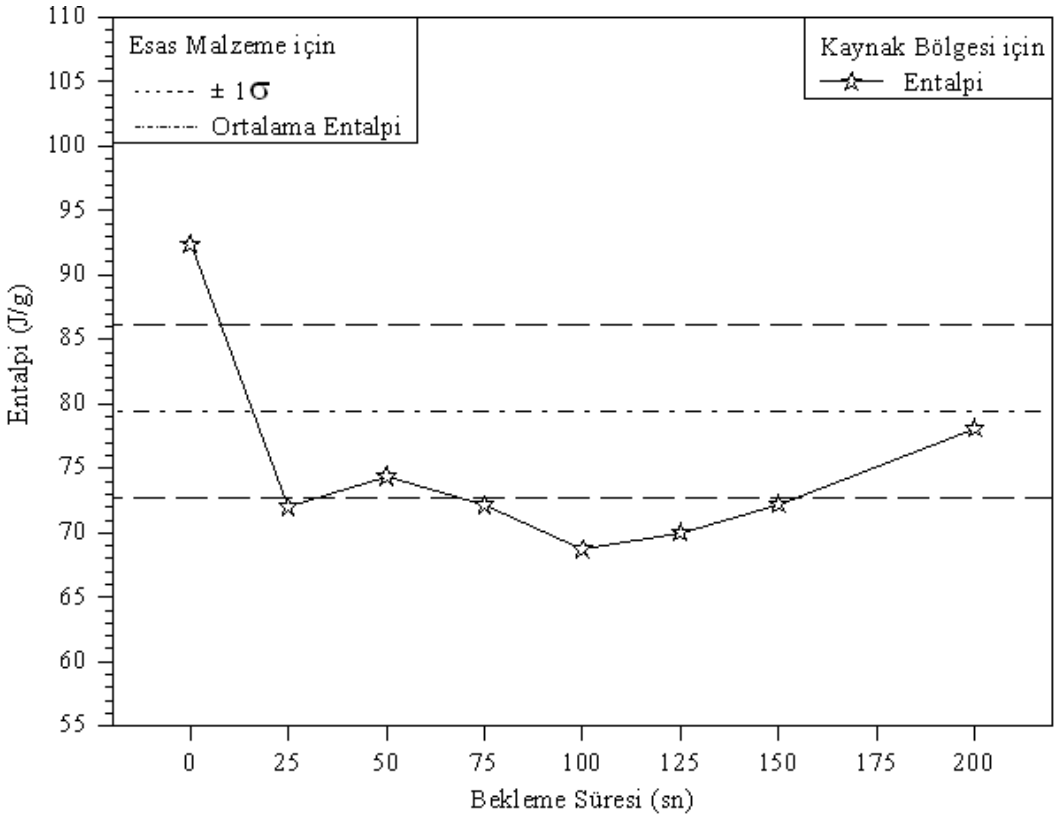
Şekil A.60: Dalma derinliği ile endset sıcaklık değerinin değişimi



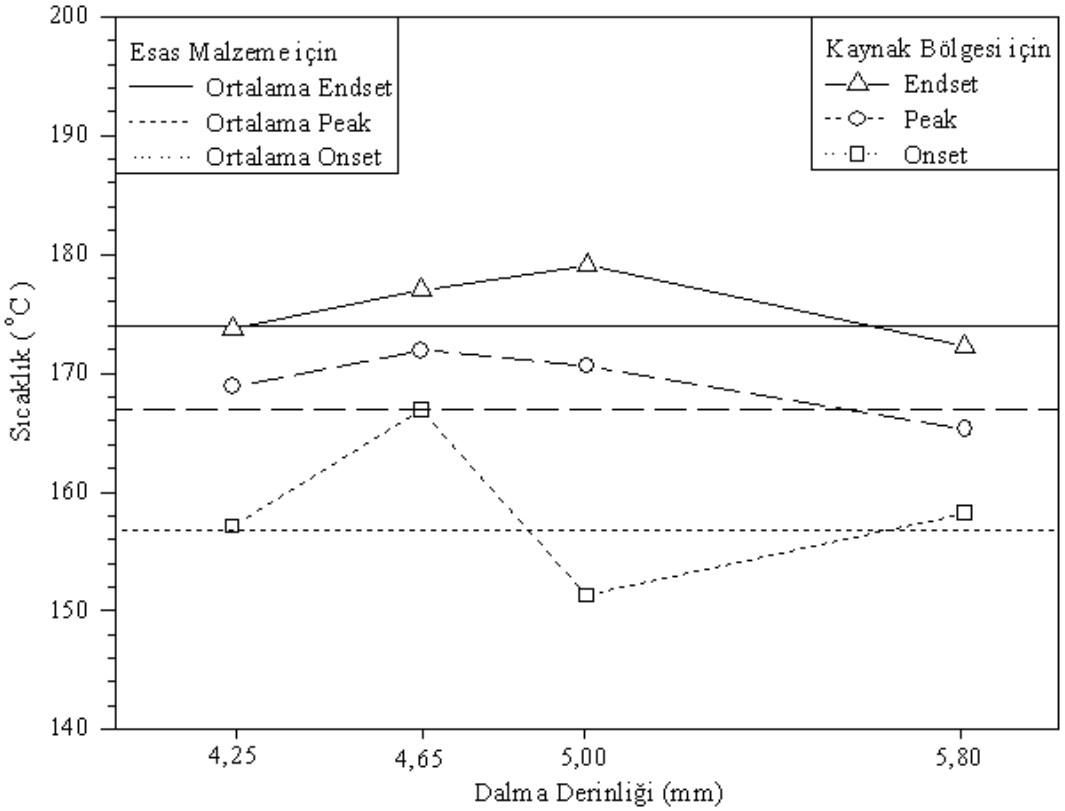
Şekil A.61: Bekleme süresi ile endset sıcaklık değerinin değişimi



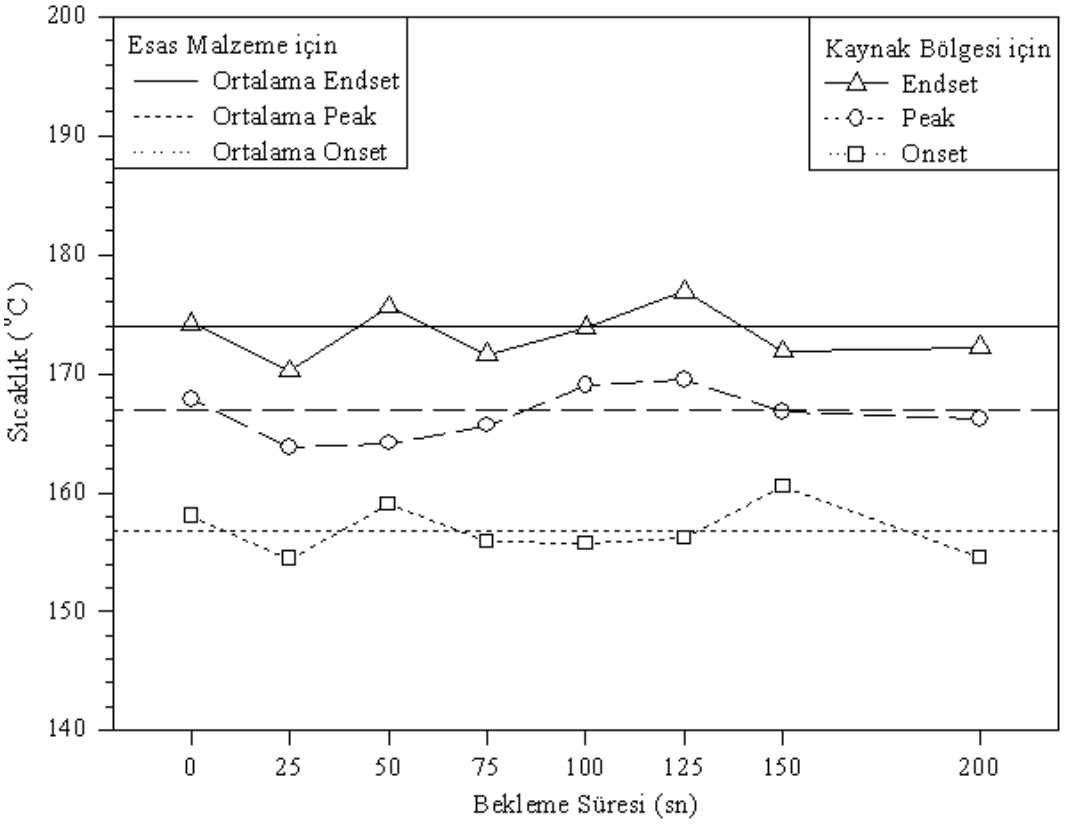
Şekil A.62: Dalma derinliği ile entalpi değerinin değişimi



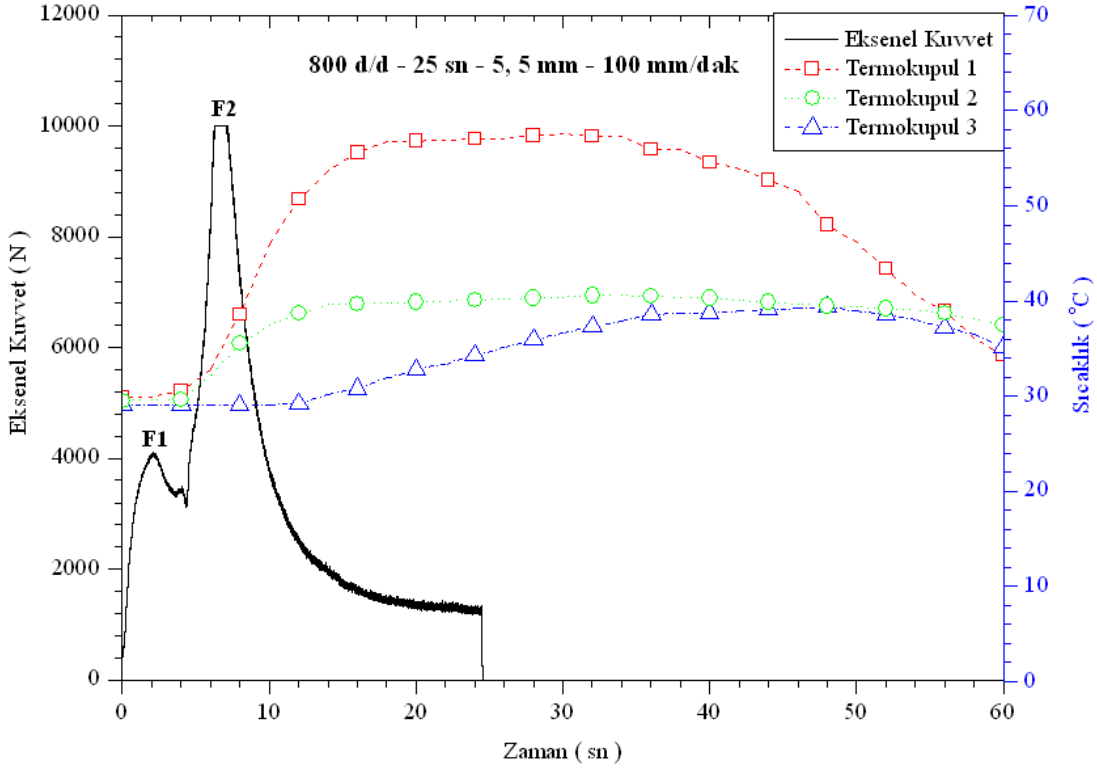
Şekil A.63: Bekleme süresi ile entalpi değerinin değişimi



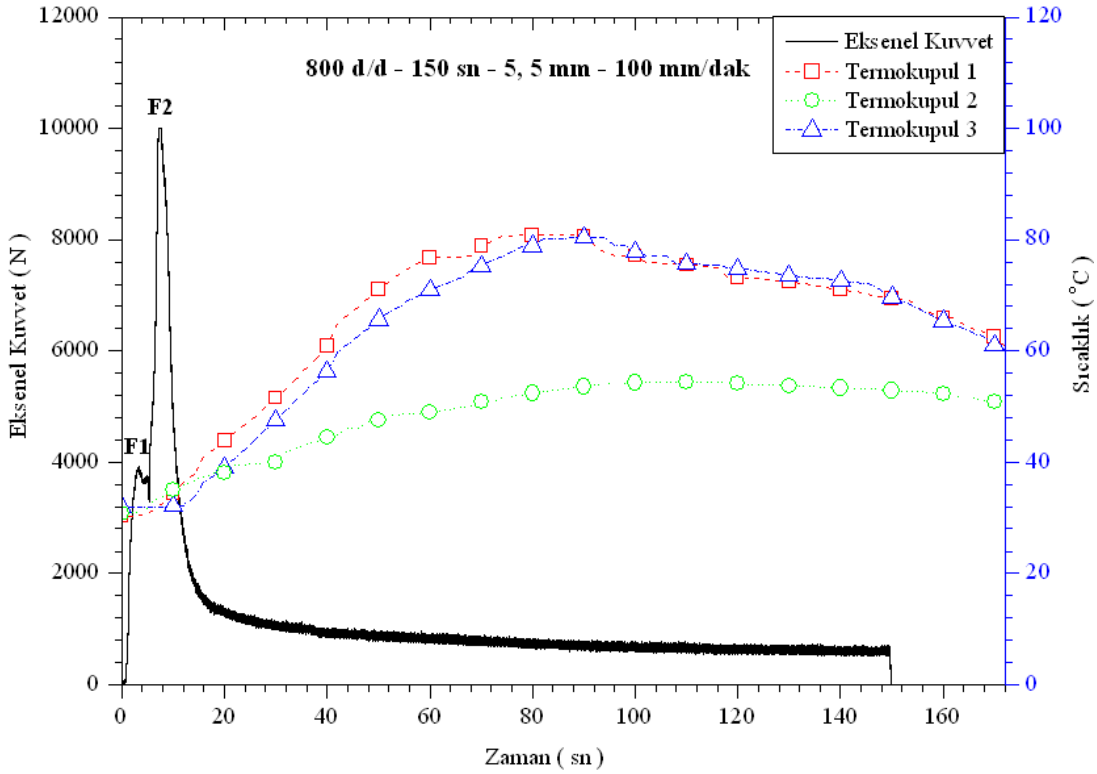
Şekil A.64: Dalma derinliği ile onset, peak ve endset sıcaklık değerlerinin değişimi



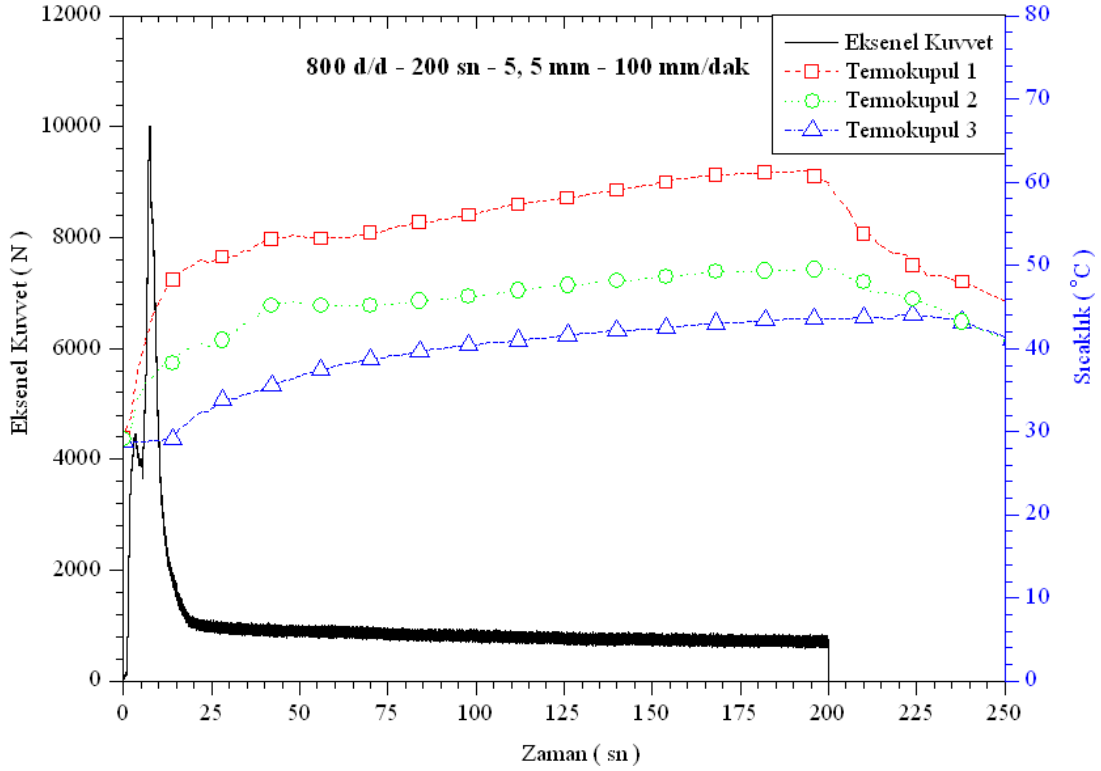
Şekil A.65: Bekleme süresi ile onset, peak ve endset sıcaklık değerlerinin değişimi



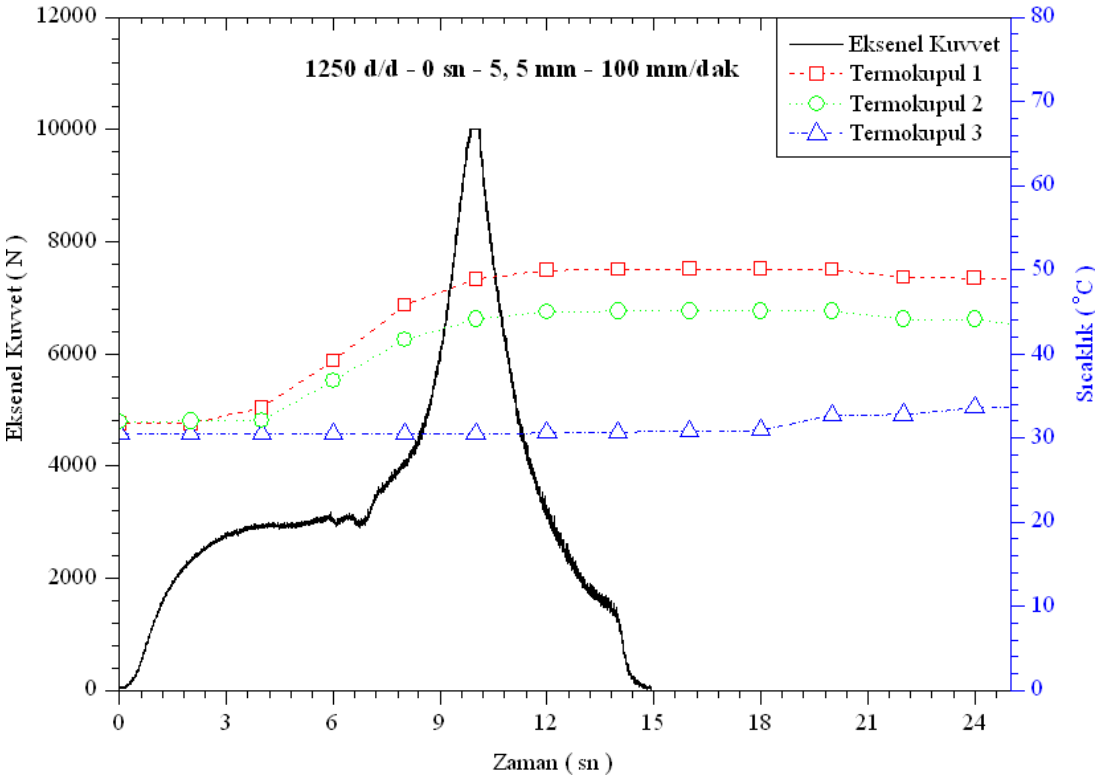
Şekil A.66: 800 d/d ve 25 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



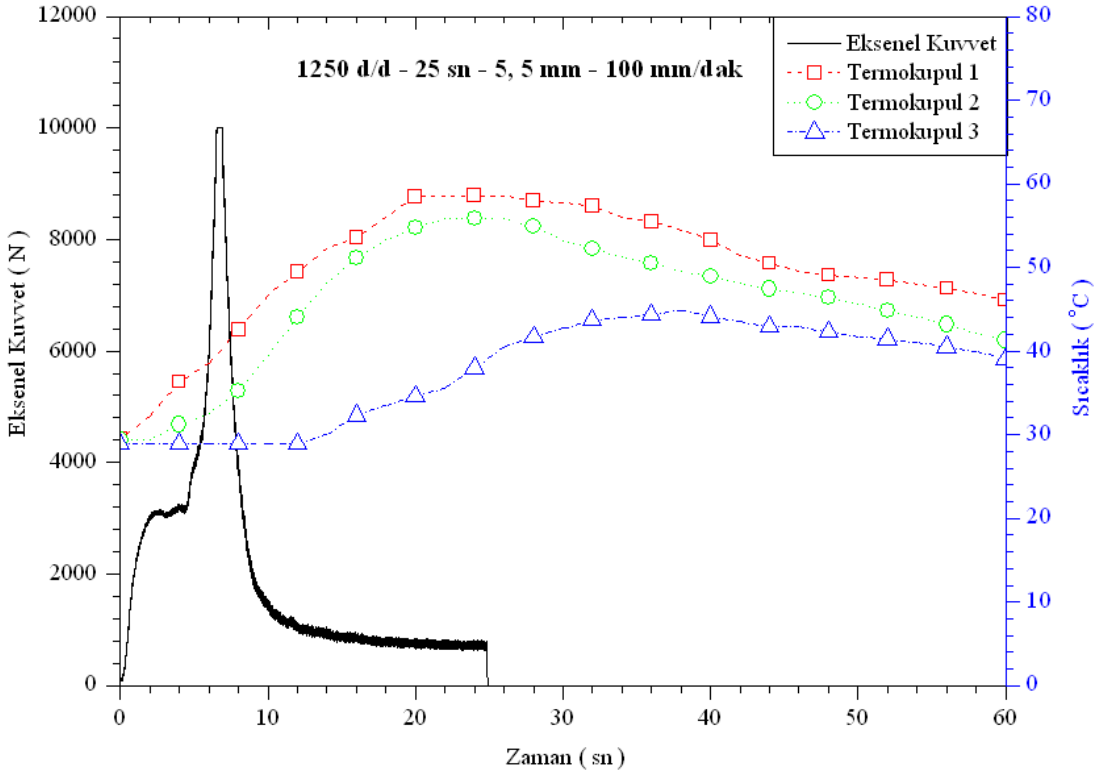
Şekil A.67: 800 d/d ve 150 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



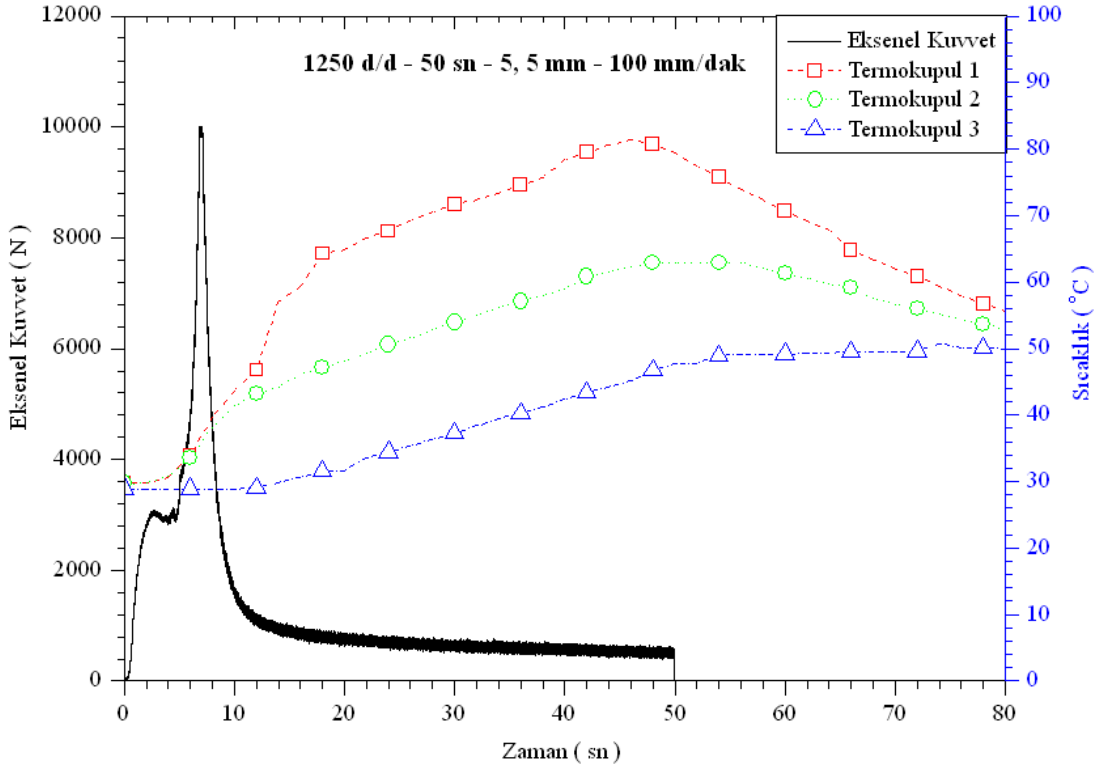
Şekil A.68: 800 d/d ve 200 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



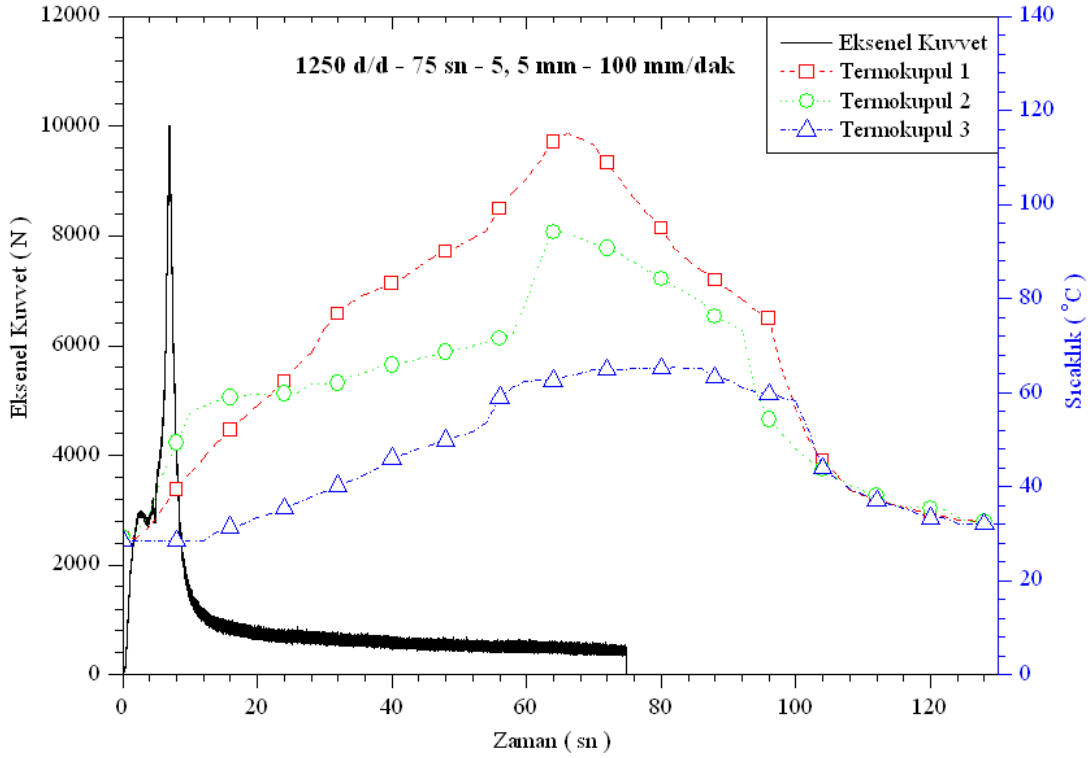
Şekil A.69: 1250 d/d ve 0 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



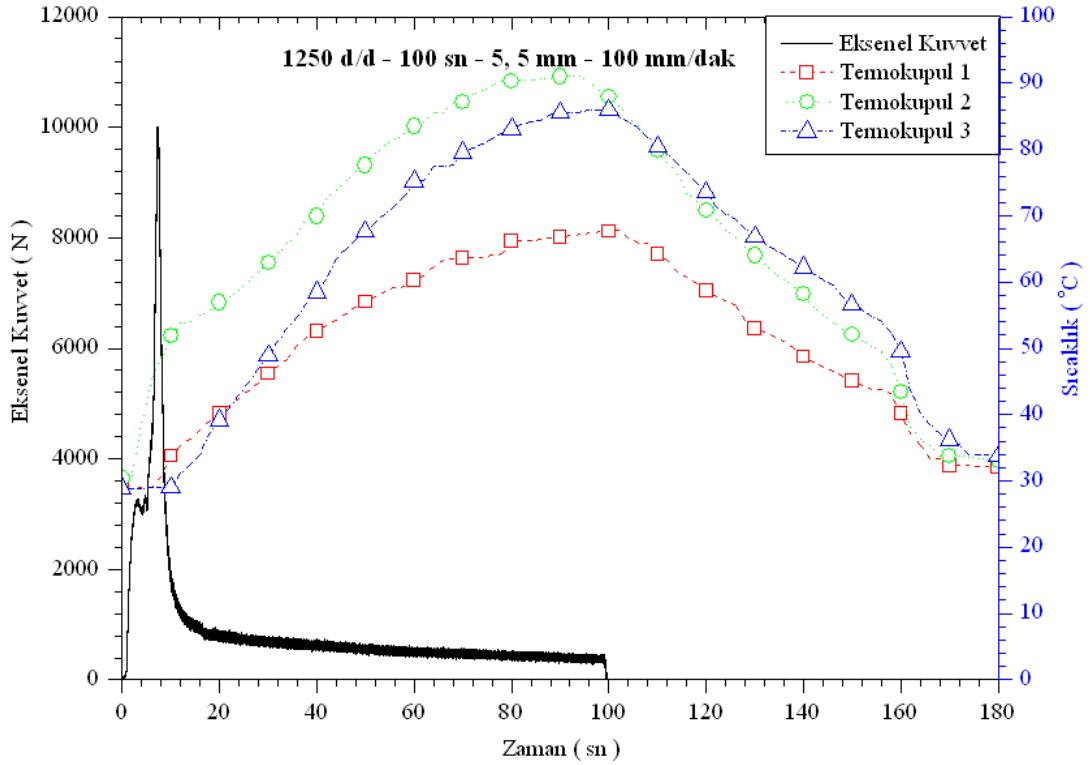
Şekil A.70: 1250 d/d ve 25 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



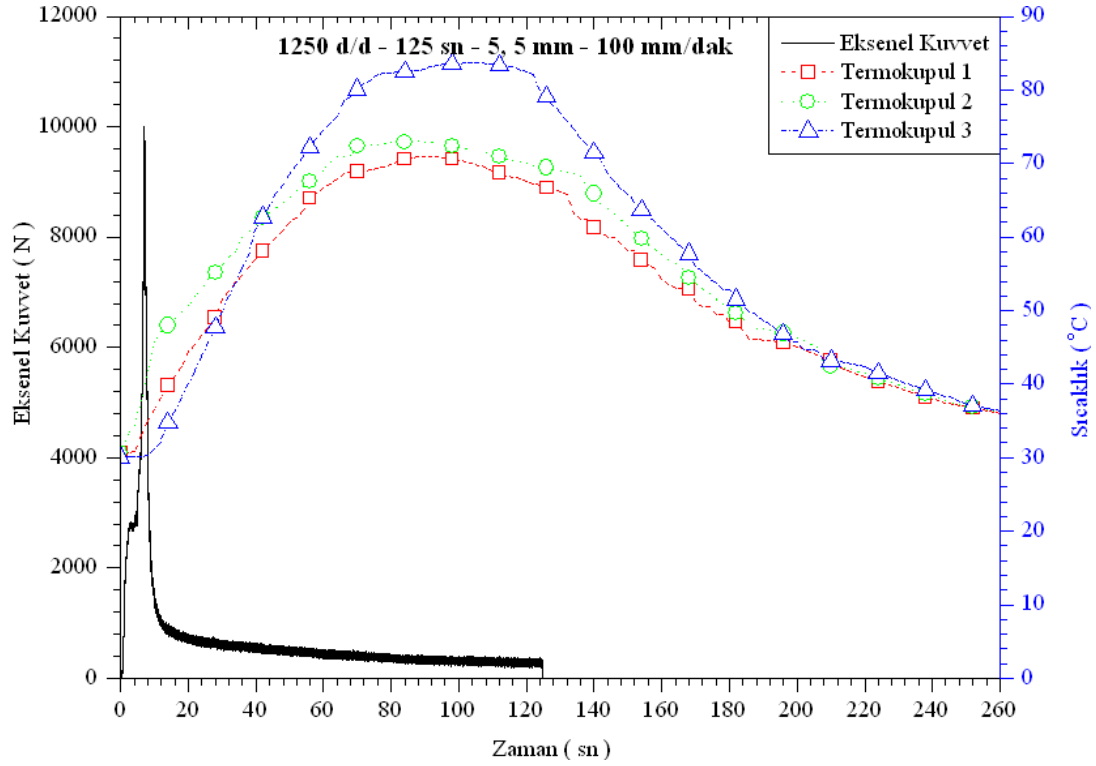
Şekil A.71: 1250 d/d ve 50 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



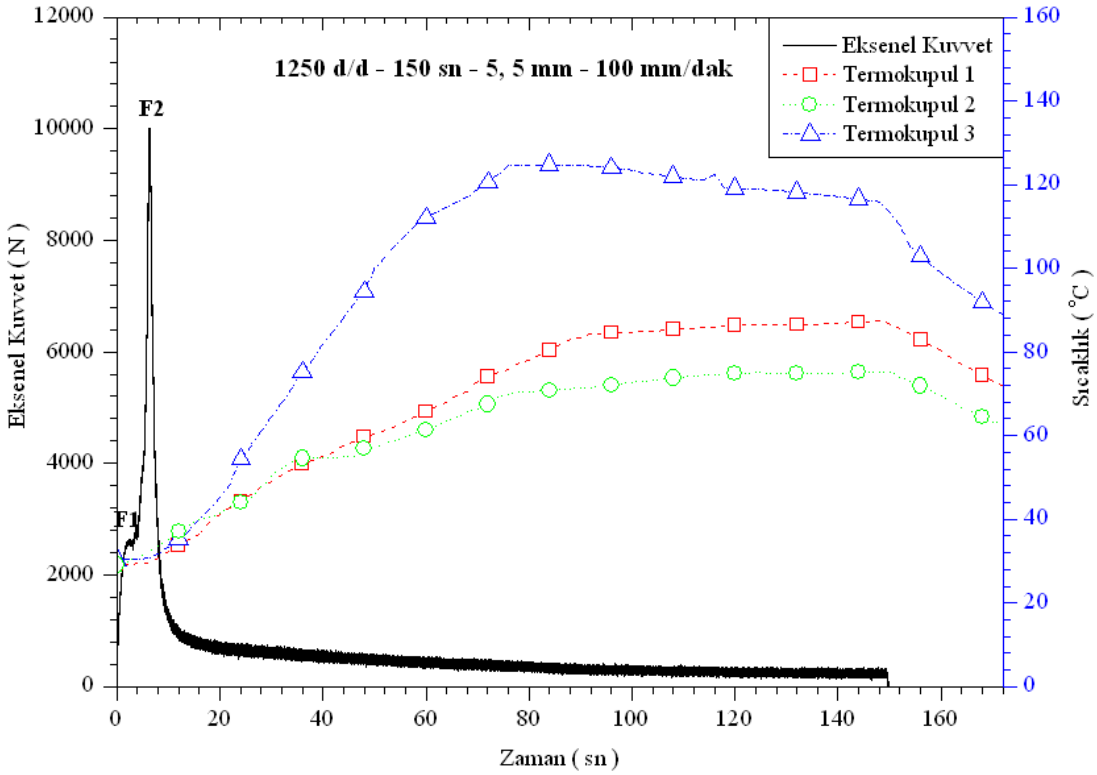
Şekil A.72: 1250 d/d ve 75 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



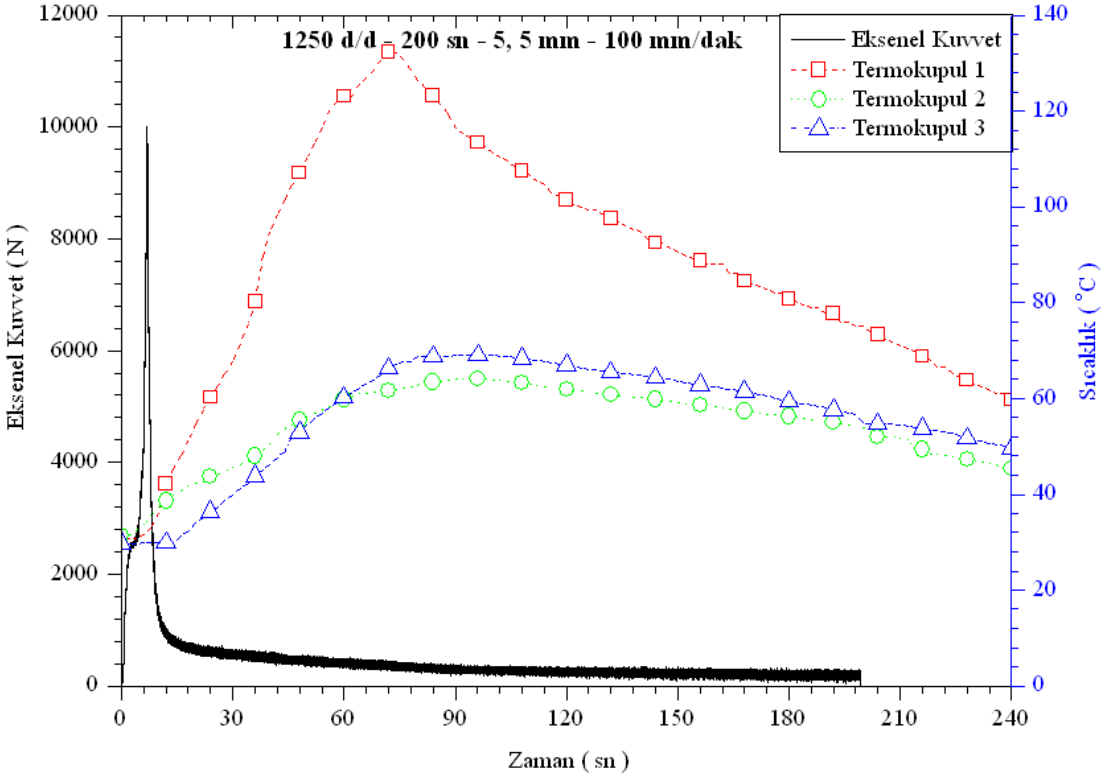
Şekil A.73: 1250 d/d ve 100 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



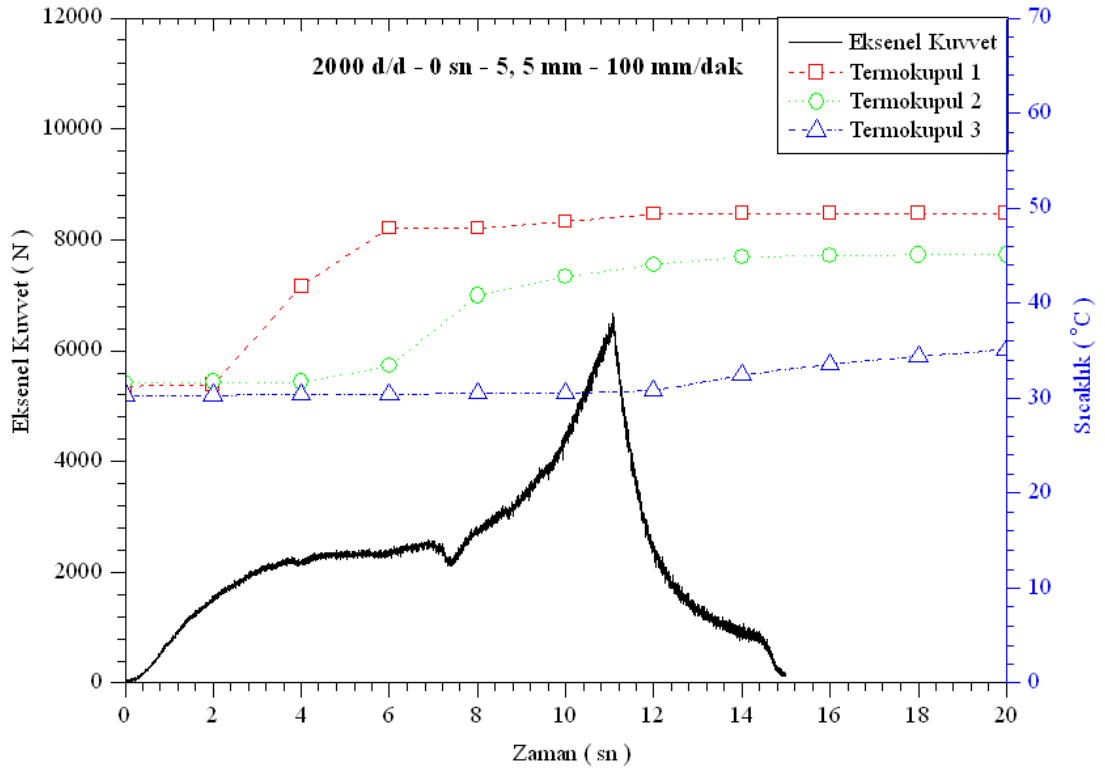
Şekil A.74: 1250 d/d ve 125 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



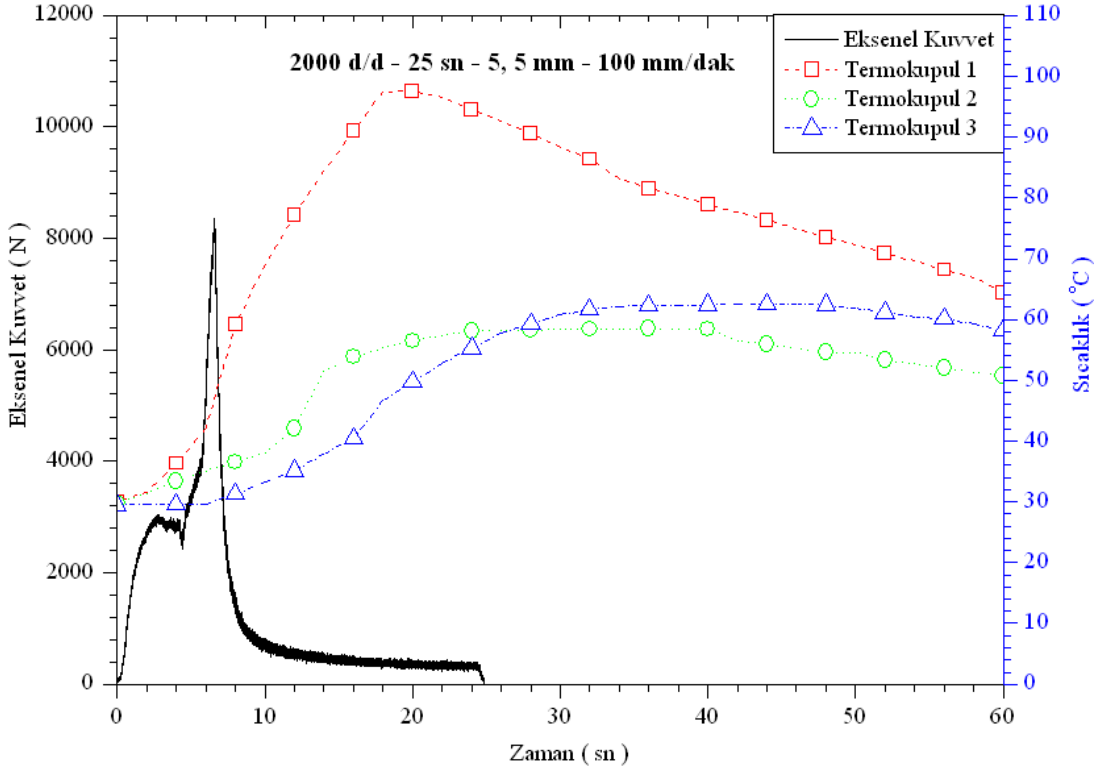
Şekil A.75: 1250 d/d ve 150 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



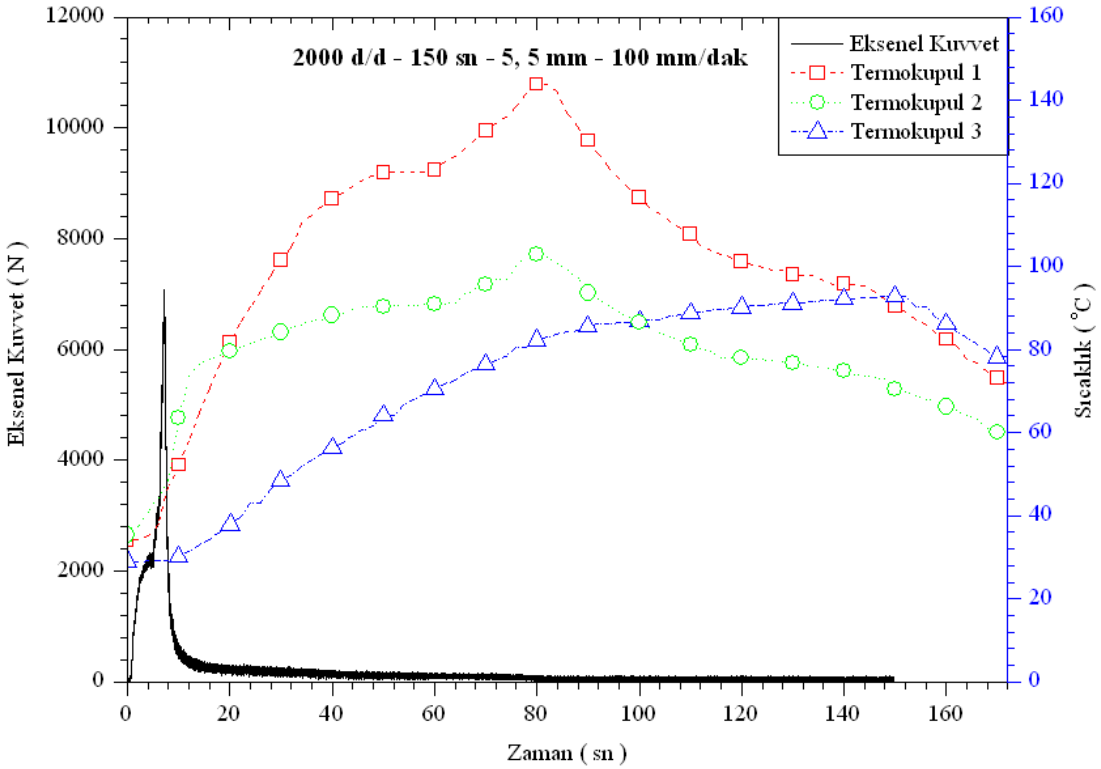
Şekil A.76: 1250 d/d ve 200 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



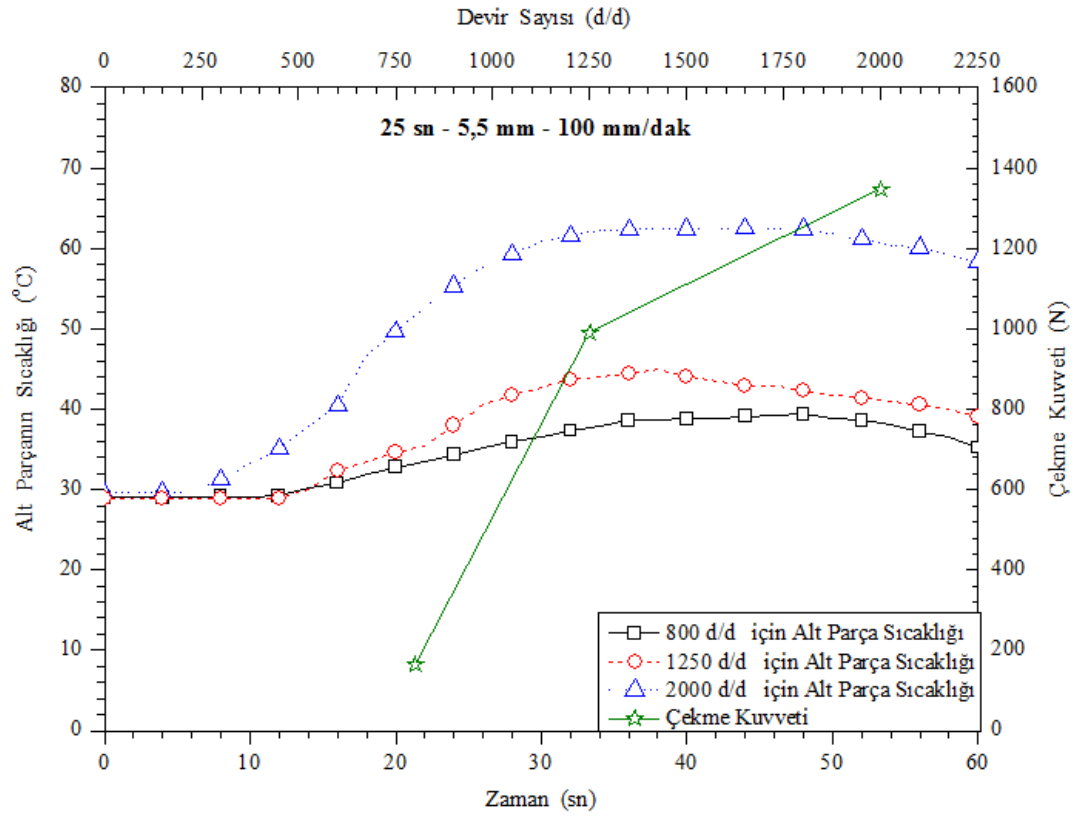
Şekil A.77: 2000 d/d ve 0 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



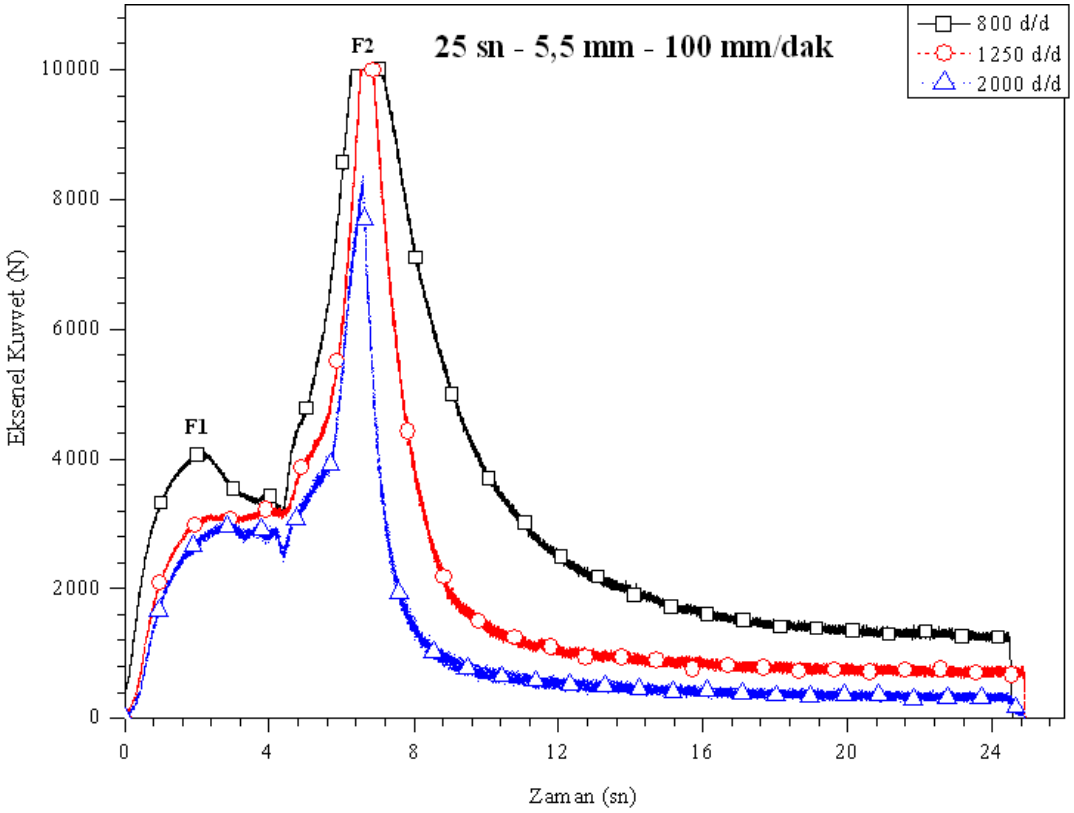
Şekil A.78: 2000 d/d ve 25 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



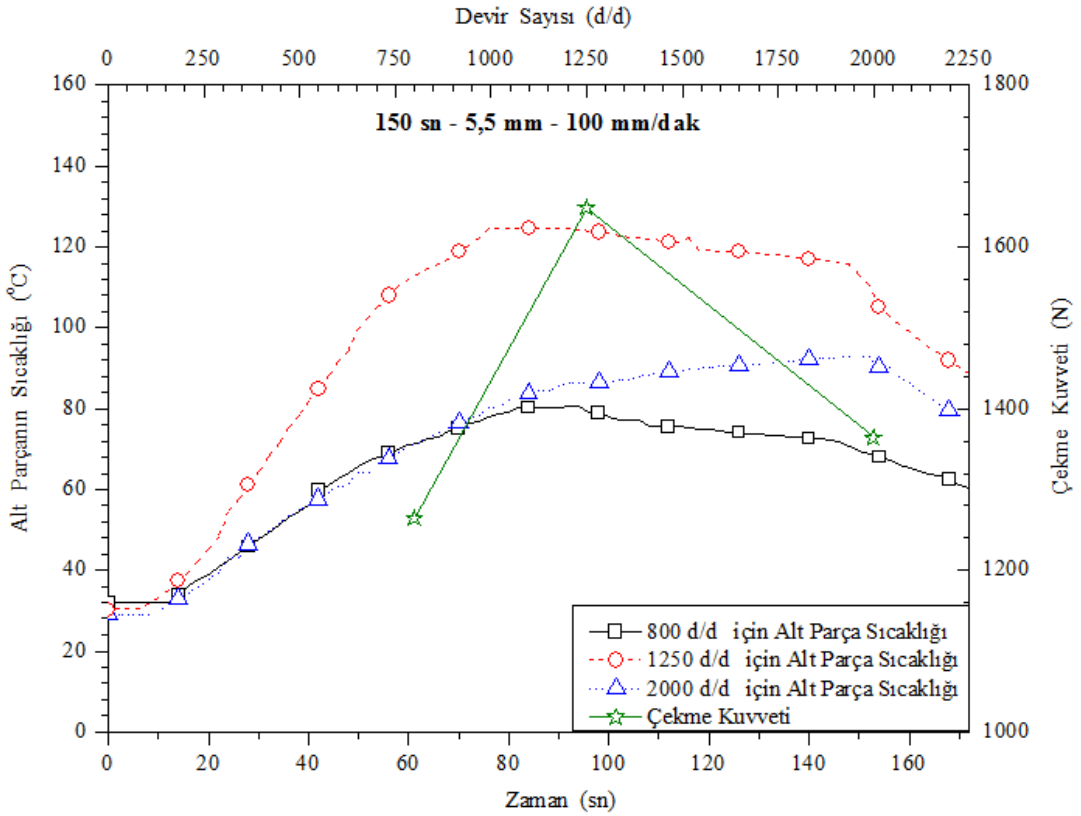
Şekil A.79: 2000 d/d ve 150 sn için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



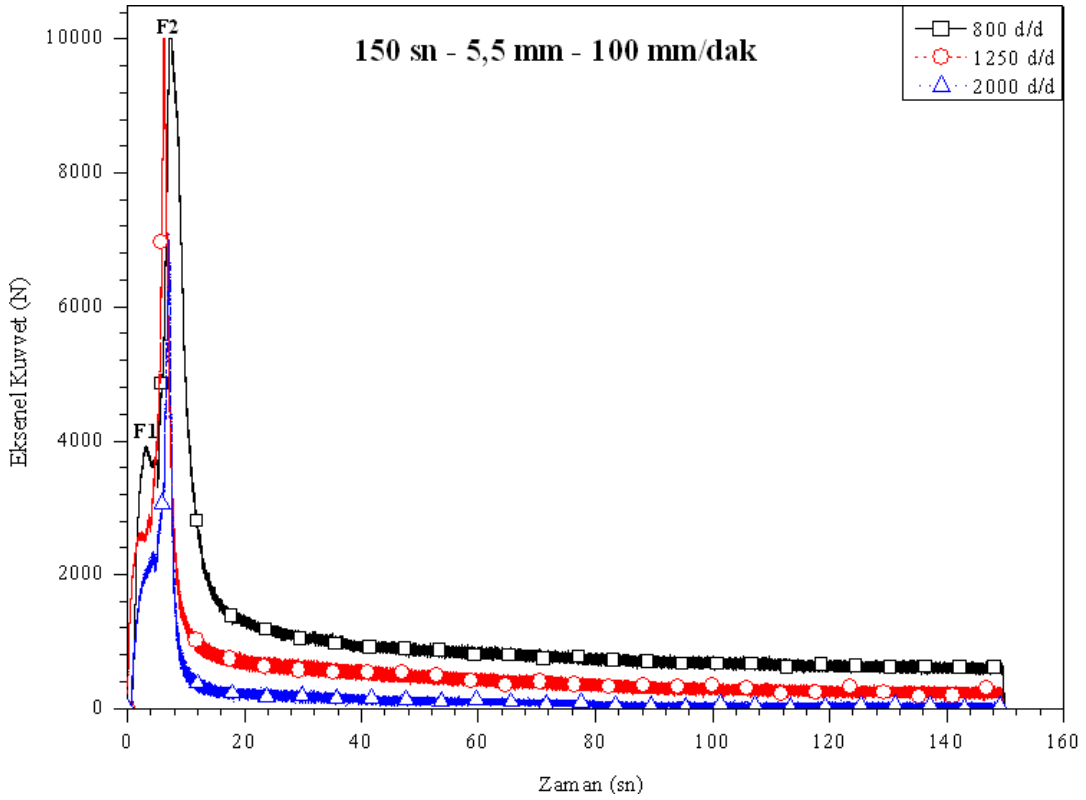
Şekil A.80: 25 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise devir sayısı ile değişimi



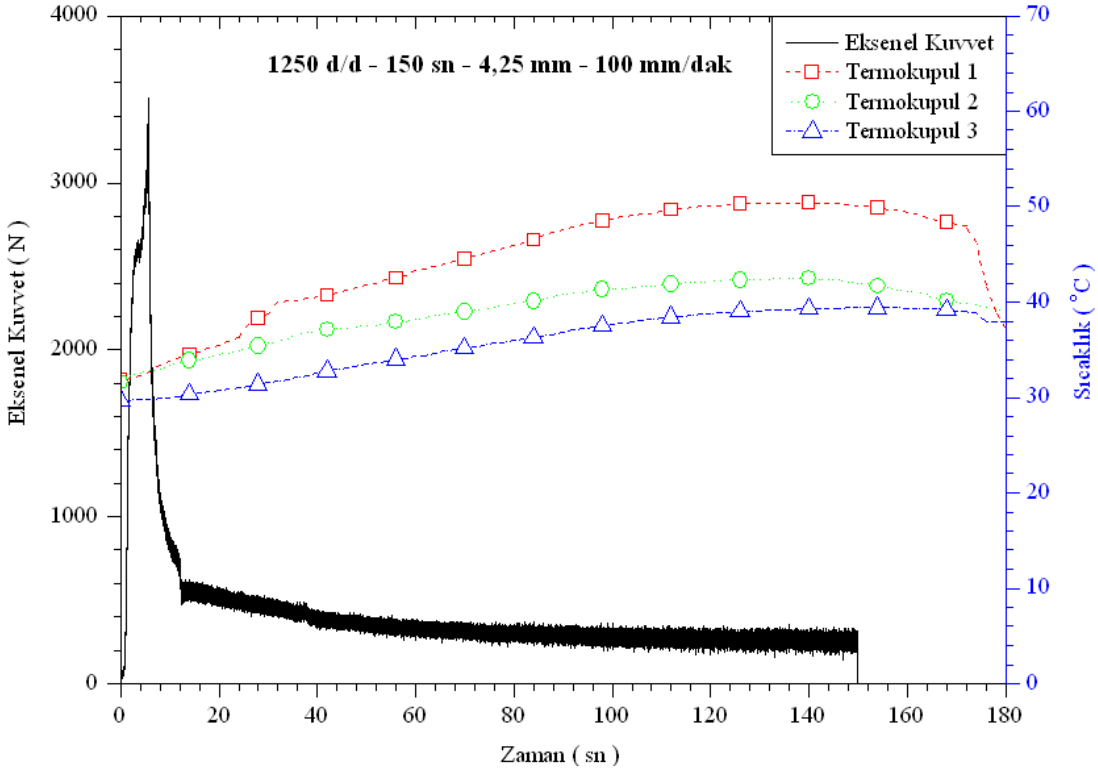
Şekil A.81: 25 sn için farklı devir sayılarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi



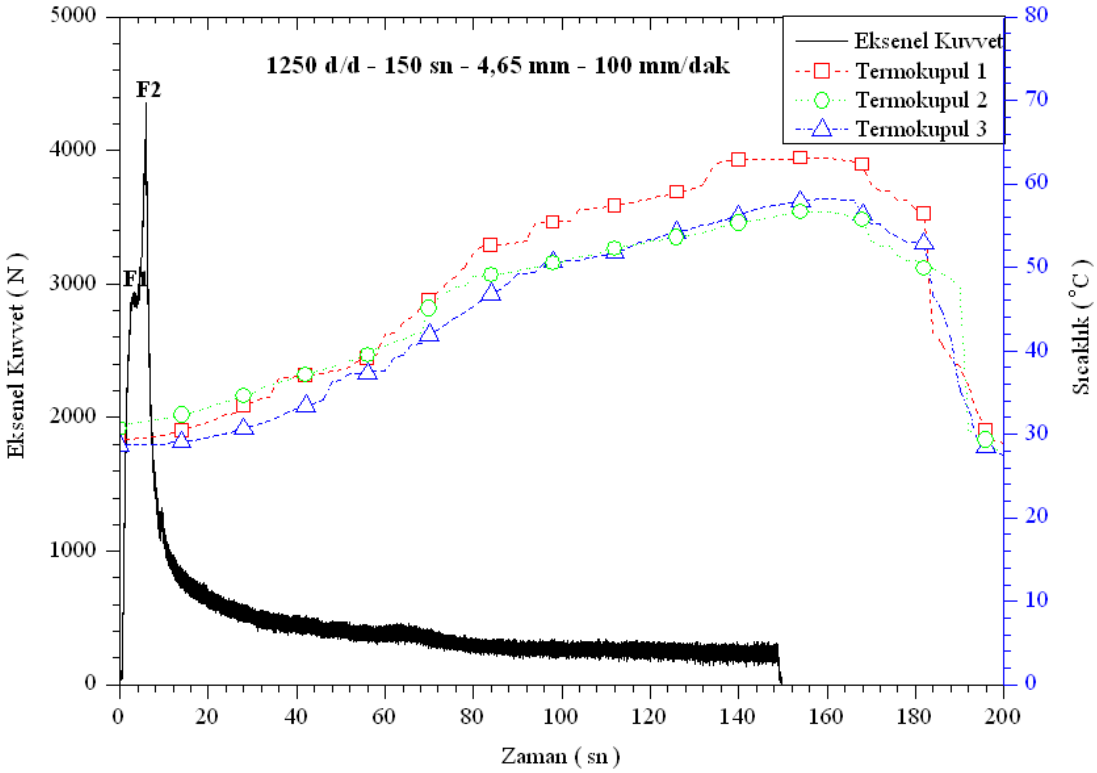
Şekil A.82: 150 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise devir sayısı ile değişimi



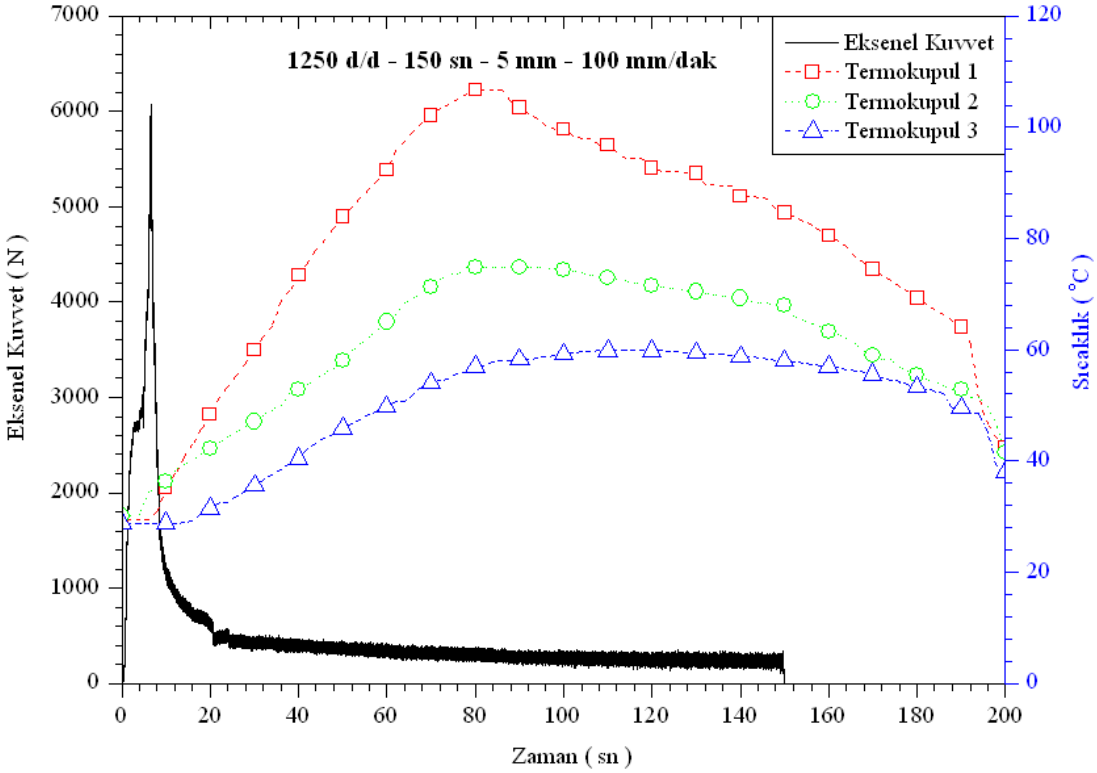
Şekil A.83: 150 sn için farklı devir sayılarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi



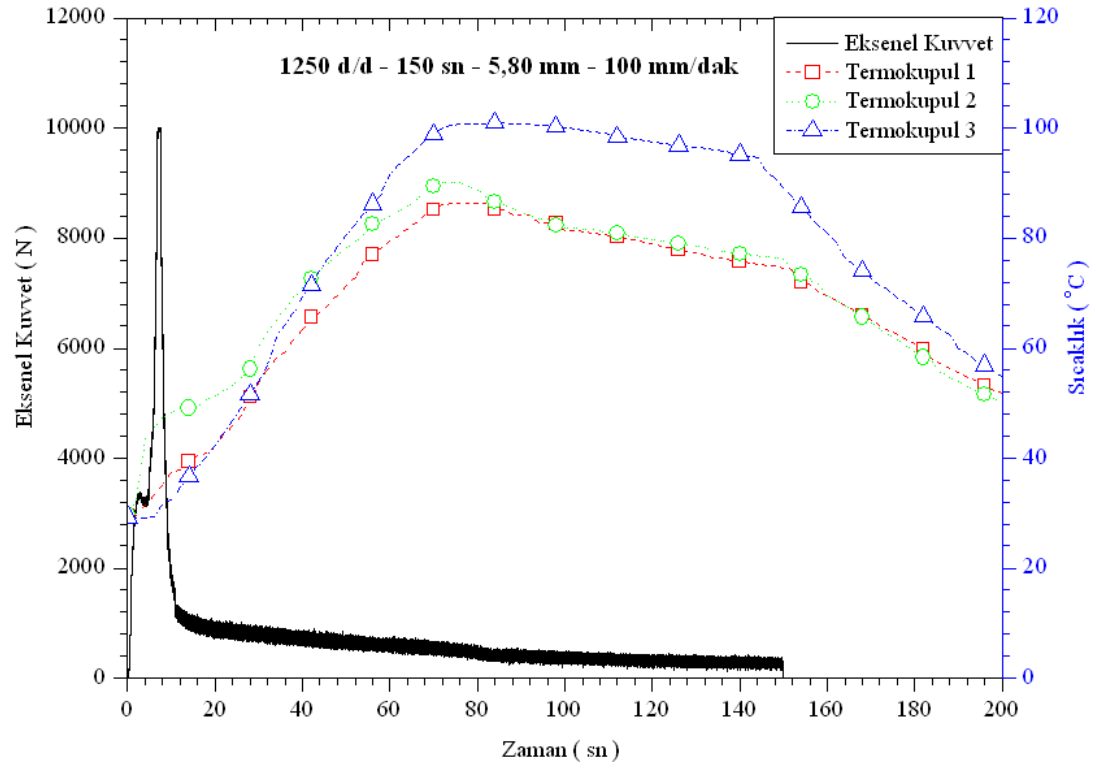
Şekil A.84: 1250 d/d ve 4,25 mm için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



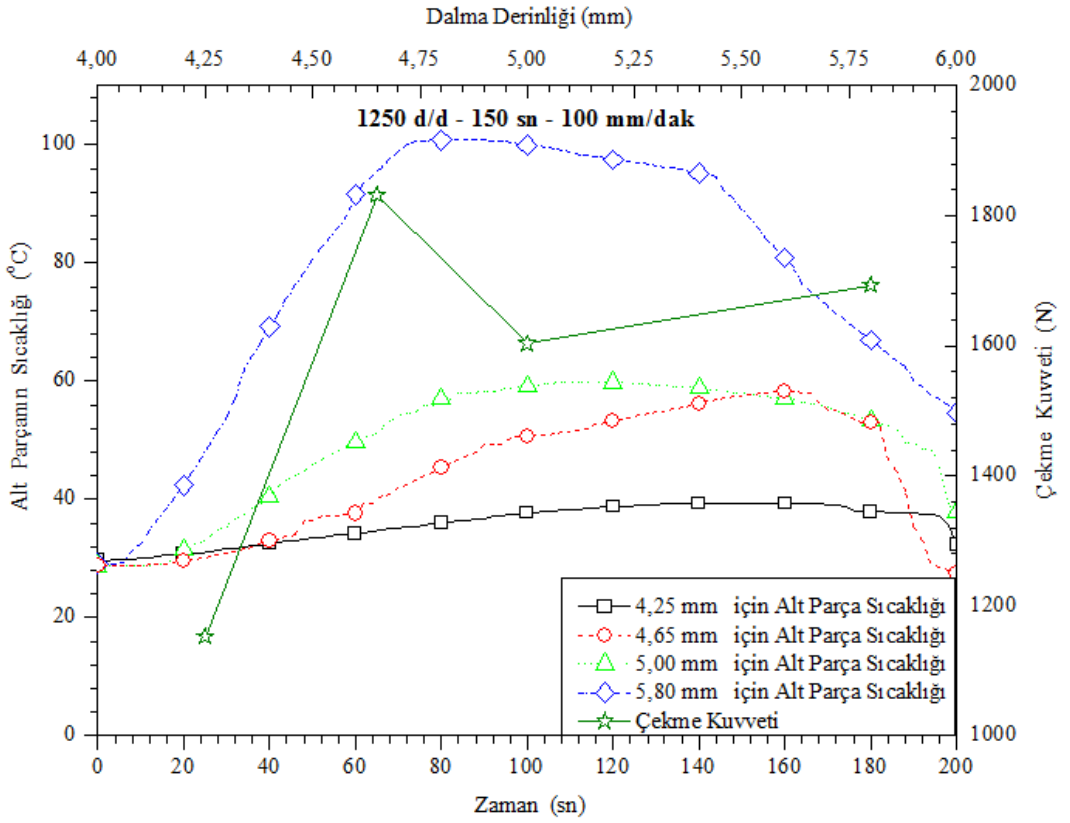
Şekil A.85: 1250 d/d ve 4,65 mm için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



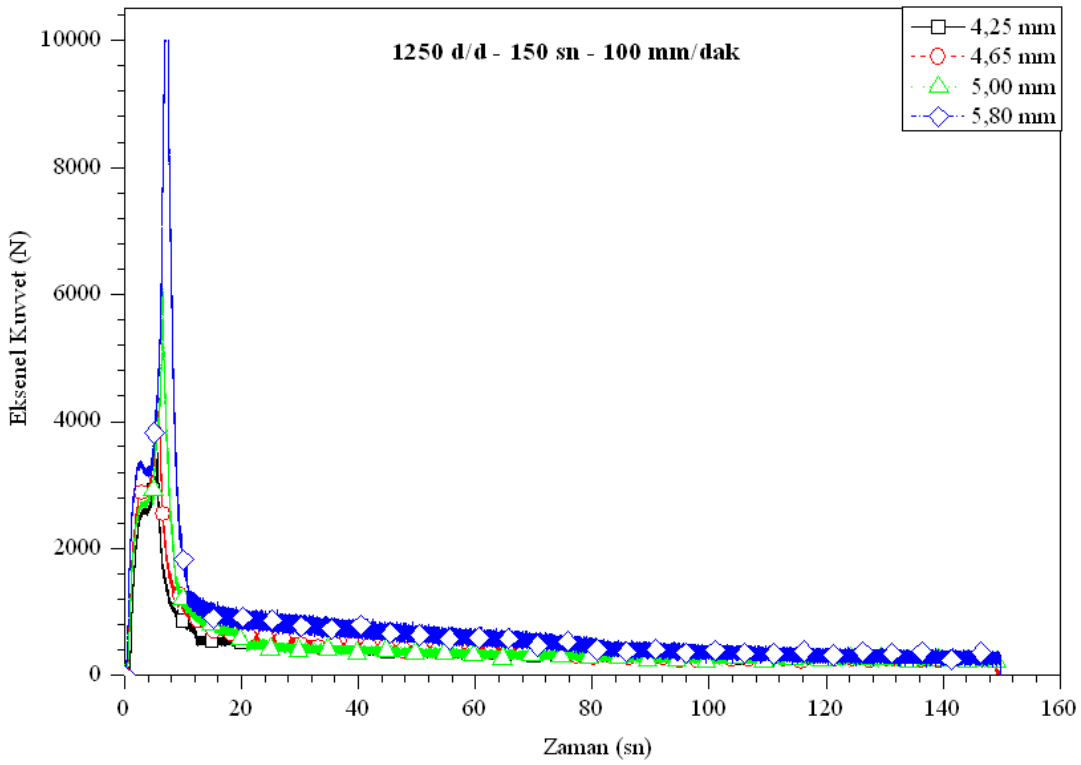
Şekil A.86: 1250 d/d ve 5 mm için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



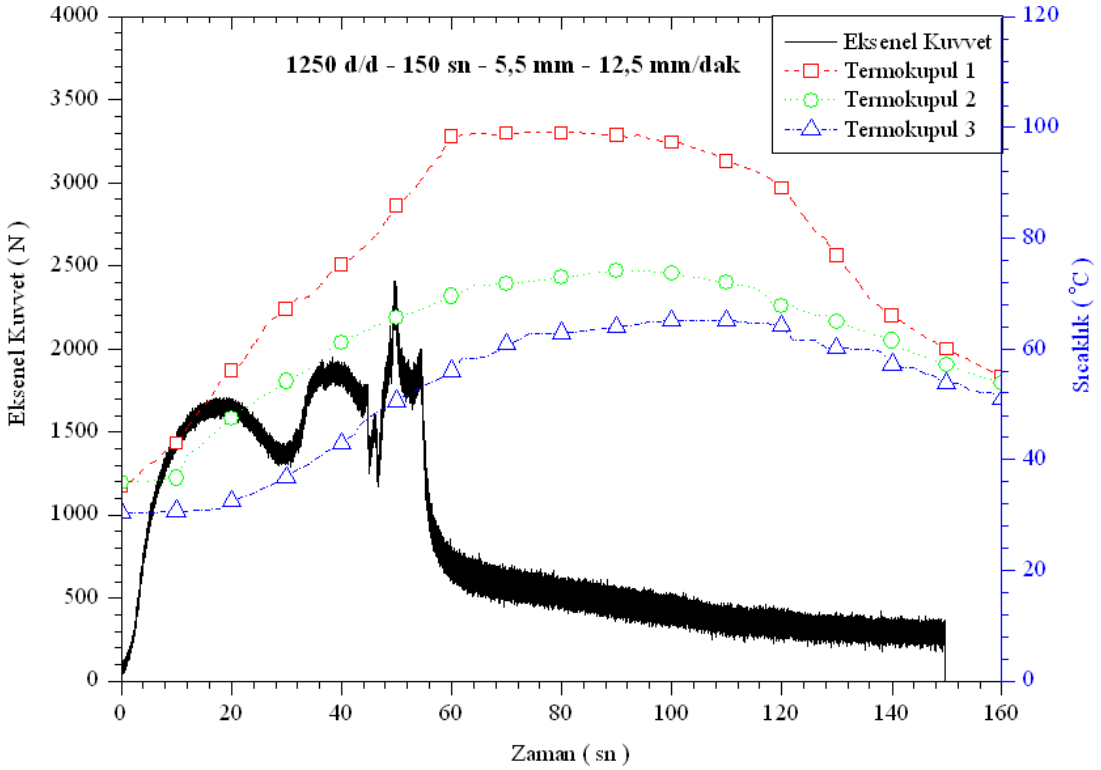
Şekil A.87: 1250 d/d ve 5,8 mm için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



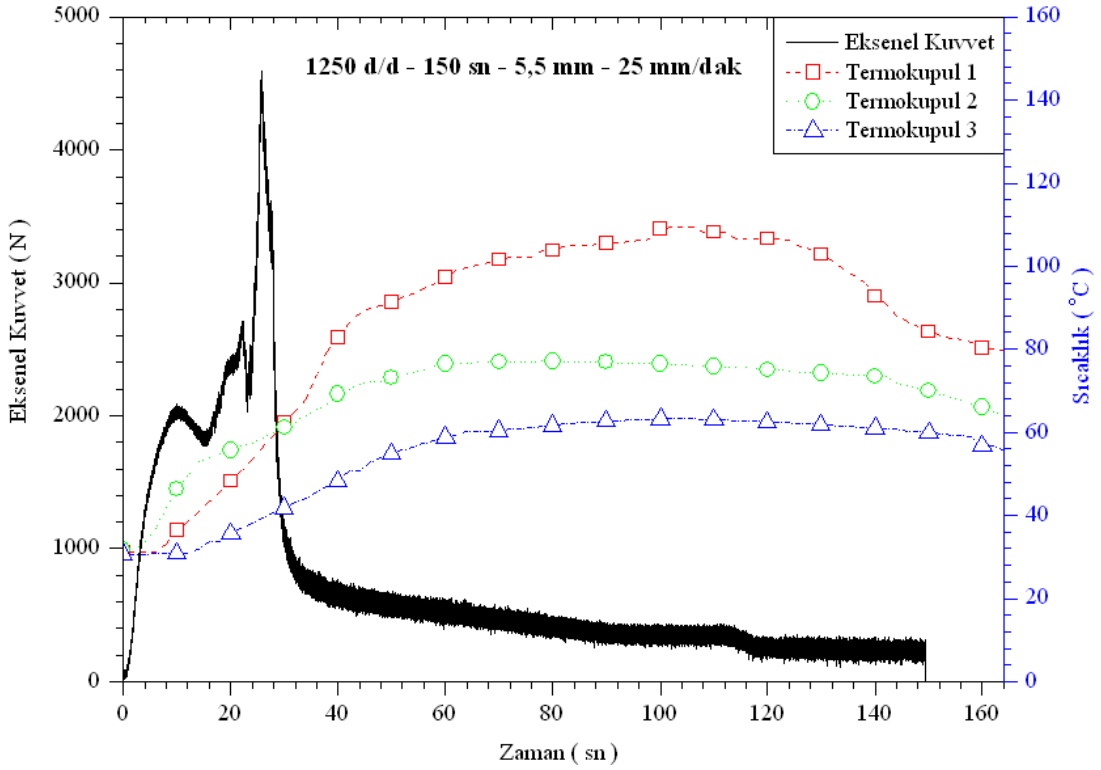
Şekil A.88: 1250 d/d devir sayısı; 150 sn bekleme süresi; 100 mm/dak dalma hızı için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise dalma derinliği ile değişimi



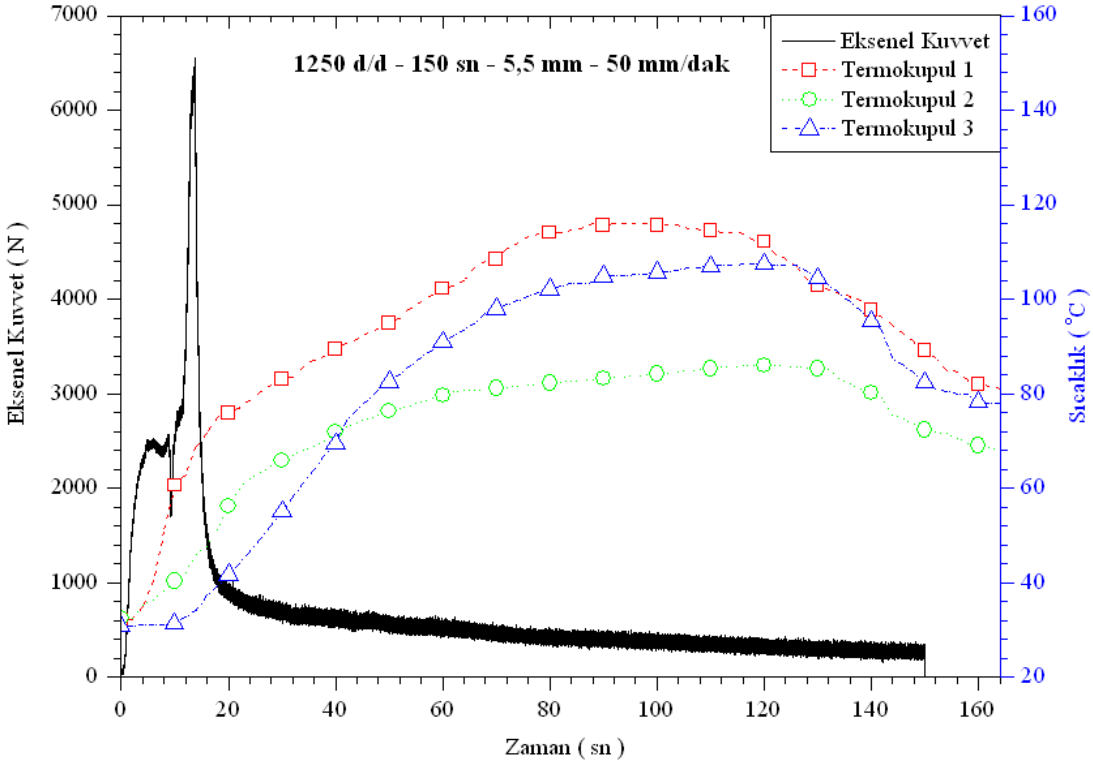
Şekil A.89: 1250 d/d için farklı dalma derinliklerinde eksenel kuvvetin zaman ile değişimi



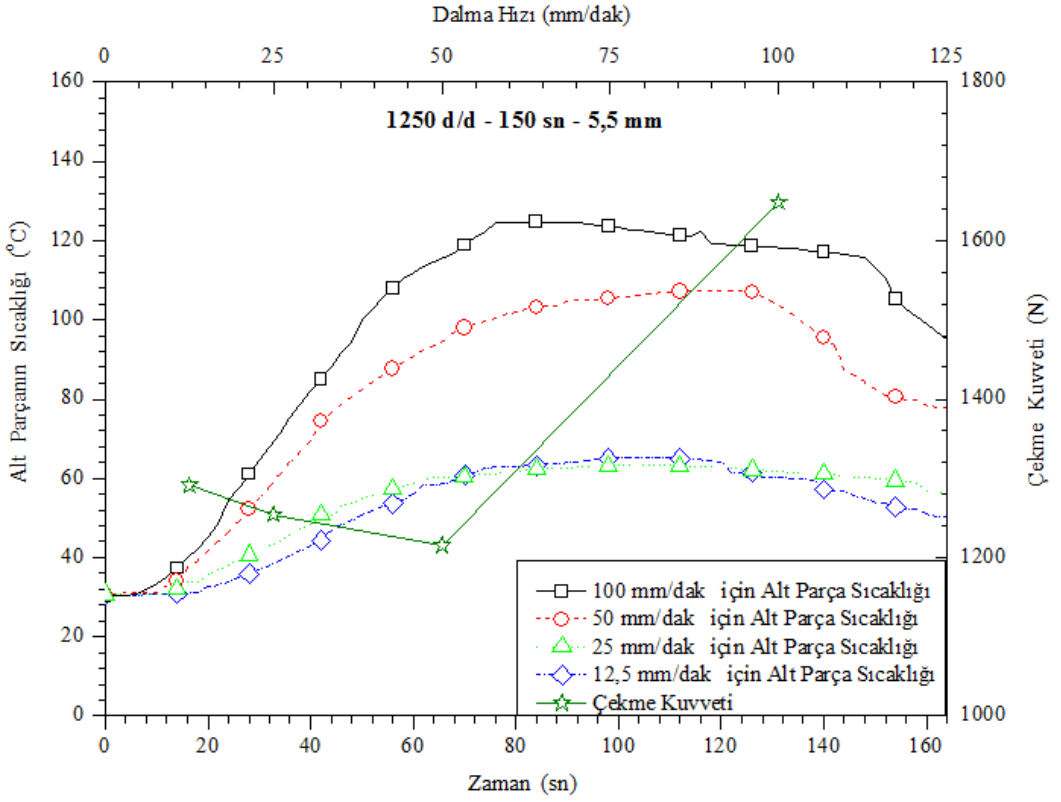
Şekil A.90: 1250 d/d ve 12,5 mm/dak için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



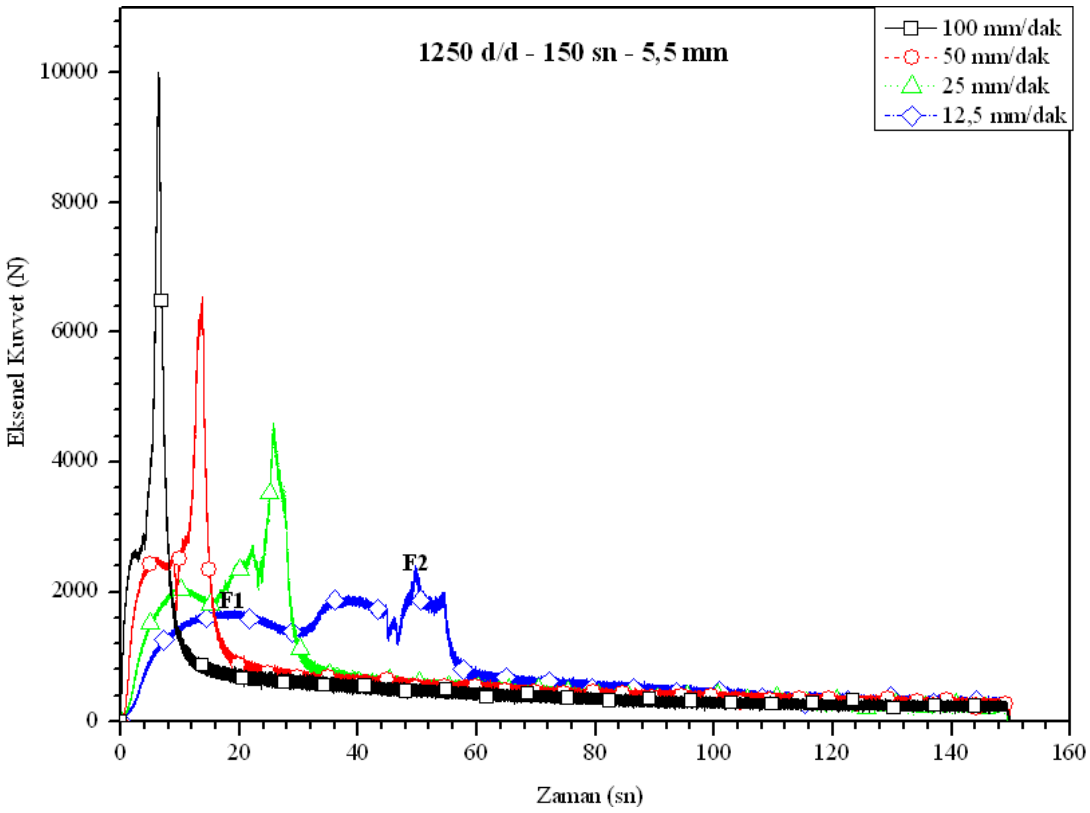
Şekil A.91: 1250 d/d ve 25 mm/dak için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



Şekil A.92: 1250 d/d ve 50 mm/dak için eksenel kuvvet ve sıcaklığın zaman ile değişimi



Şekil A.93: 1250 d/d devir sayısı; 150 sn bekleme süresi; 5,5 mm dalma derinliği için alt parça (termokupul 3) sıcaklıklarının zaman ile, çekme kuvvetinin ise dalma hızı ile değişimi



Şekil A.94: 1250 d/d için farklı dalma hızlarında eksenel kuvvetin zaman ile değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Hendek/Sakarya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Hendek'te, lise öğrenimini Sakarya Teknik Endüstri Meslek Lisesinde, Makina Bölümünde, bölüm birincisi, okul ikincisi olarak tamamladı. 1994 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında bölüm ikincisi ve Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nin Dil ve İnkılap Tarihi Bölümü bünyesinde 1 yıl süresince İngilizce hazırlık eğitimi aldı. 1999-2001 yılları arasında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2000 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta olup, evli ve bir çocuk babasıdır.

Doktora çalışması 2007-2008 yılları arasında bir yıl süreyle, 2007/043 no'lu BAP (Bilimsel Araştırmalar Projesi) kapsamında Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğü tarafından desteklendi.