

133431

**PATLAMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE BAKIR - PASLANMAZ ÇELİK
MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEYİN
MEKANİK-MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ahmet DURGUTLU

**DOKTORA TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2003

ANKARA

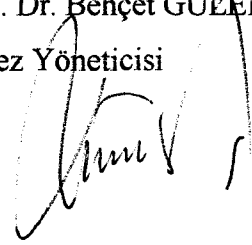
133431

**T.C. YÖKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Ahmet DURGUTLU tarafından hazırlanan PATLAMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE BAKIR-PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEYİN MEKANİK-MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC

Tez Yöneticisi



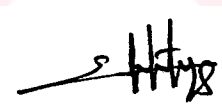
Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fehim FINDIK

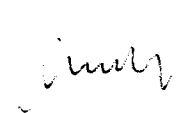


Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

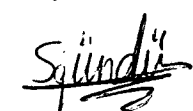
Üye : Doç. Dr. Cemil ÇETİNKAYA



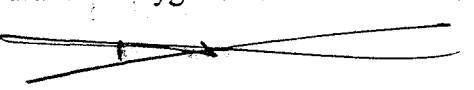
Üye : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC



Üye : Yrd. Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ



Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KATIHAL KAYNAK TEKNİKLERİ	4
2.1. Sürtünme Kaynağı.....	4
2.1.1. Sürtünme kaynağı mekanizması	5
2.1.2. Sürtünme kaynağı çeşitleri.....	6
2.1.3. Sürtünme kaynağı parametreleri	8
2.1.4. Sürtünme kaynağının avantaj ve sınırlılıkları	9
2.2. Difüzyon Kaynağı	9
2.2.1. Difüzyon kaynağı mekanizması	10
2.2.2. Difüzyon kaynağına tesir eden faktörler	11
2.2.3. Difüzyon kaynağı avantaj ve sınırlılıkları	12
2.3. Ultrasonik Kaynak.....	13
2.3.1. Ultrasonik kaynağın mekanizması	13
2.3.2. Ultrasonik kaynağına tesir eden faktörler	14
2.3.3. Ultrasonik kaynağın avantaj ve sınırlılıkları	14

2.4. Patlama Kaynağı	15
3. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ	16
3.1. Patlamalı Kaynağın Mekanizması	17
3.2. Patlamalı Kaynağın Geometrisi	21
3.3. Patlamalı Kaynak Parametreleri	21
3.4. Patlamalı Kaynak İşleminin Aşamaları	25
3.4.1. Patlayıcının patlaması	25
3.4.2. Üst parçanın hızlanması ve çarpışma	27
3.4.3. Fıskırma ve kaynak oluşumu	29
3.5. Birleştirme Arayüzeyi	31
3.5.1. Dalga genişliği	32
3.6. Birleştirilecek Malzemeler ve Özellikleri	32
3.6.1. Birleştirilecek malzemelerin boyutları	37
3.7. Patlamalı Kaynak Uygulamalarının Avantaj ve Sınırlılıkları	37
3.8. Patlayıcılar	39
3.8.1. Patlayıcı seçiminde dikkat edilecek özellikler	42
3.8.2. Türkiye'de üretilen patlayıcı maddeler ve kullanma yerleri	42
3.9. Uygulama Alanları	44
3.9.1. Levha kaplama	44
3.9.2. Farklı metallerin birleştirilmesi	46
3.9.3. Silindirik yüzeylerin kaynağı ve kaplanması	47
3.10. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Kaynak Kabiliyetleri	49
3.10.1. Paslanmaz çelik ve kaynak kabiliyeti	49
3.10.2. Bakır ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti	51

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	53
4.1. Malzeme.....	53
4.1.1. Birleştirilen malzemeler.....	53
4.1.2. Patlayıcı.....	54
4.1.3. Altlık	54
4.2. Deneylerin Yapılışı	55
4.2.1. Patlayıcının hazırlanması	56
4.2.2. Birleştirilecek malzemelerin hazırlanması	56
4.2.3. Birleştirme düzeneğinin hazırlanması.....	56
4.2.4. Birleştirme işlemi.....	57
4.2.5. Mikroyapı incelemesi.....	58
4.2.6. Mikrosertlik incelemesi	58
4.2.7. Çekme - Makaslama deneyi.....	59
4.2.8. Eğme deneyi.....	60
4.2.9. Isıl işlem.....	60
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	61
5.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma	62
5.2. Sertlik Sonuçları ve Tartışma.....	83
5.3. Çekme-Makaslama Deney Sonuçları ve Tartışma.....	94
5.4. Eğme Deney Sonuçları ve Tartışma.....	97
5.5. Isıl İşlem Sonuçları ve Tartışma	99
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ.....	115

**PATLAMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE BAKIR - PASLANMAZ ÇELİK
MALZEMELERİNİN BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEYİN
MEKANİK-MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

Ahmet DURGUTLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ARALIK 2003**

ÖZET

Bu çalışmada, bakır ve paslanmaz çelik levhaların, farklı oranlarda patlayıcı miktarı ve ara boşluk mesafeleri kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilebilirlikleri araştırılmıştır. Patlama kaynağı ile bakır ve paslanmaz çelik malzemelerin iyi birleşme özellikleri sergileyerek birleştirilebildiği deneysel çalışmalar sonunda tespit edilmiştir. Birleşme ara yüzeyinde intermetalik bileşenler oluşmamıştır. Patlayıcı oranının ve ara boşluk mesafesinin arttığında, doğrusal biçimdeki birleşme ara yüzeyinin dalgalı bir birleşme ara yüzeyi haline dönüştüğü görülmüştür. Patlayıcı oranının ve ara boşluk mesafesinin artışıyla beraber, oluşan dalgaların boylarında ve genliklerinde bir artış olmuştur. Çarpışmadan kaynaklanan deformasyondan dolayı levhaların birleşme ara yüzeyleri ve dış yüzeylerindeki sertlik değerlerinde bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesinin artması ile beraber oluşan dalgalanmadan dolayı birleşme yüzey alanının arttığı ve çekme – makaslama testlerinde ayrılmaların oluşmadığı belirlenmiştir. Birleştirilmiş numunelere uygulanan farklı çaplardaki eğme testleri sonucunda, birleşme ara yüzeyinde herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Birleştirilen levhalara uygulanan SEM-EDS analizlerinden, birleşme ara yüzeyinde difüzyonun oluşmadığı fakat farklı sürelerde yapılan ısı işlemler ile difüzyonun oluşabileceği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 710

Anahtar Kelimeler : Patlama kaynağı, Bakır-paslanmaz çelik, Patlayıcı oranı, Araboşluk mesafesi.

Sayfa Adedi : 115

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC



**BONDING OF COPPER AND STAINLESS STEEL BY USING EXPLOSION
WELDING AND INVESTIGATION OF MECHANICAL-MICROSTRUCTURAL
PROPERTIES OF INTERFACE**

(Ph. D Thesis)

Ahmet DURGUTLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DECEMBER 2003**

ABSTRACT

In this study, bonding ability of copper and steel with explosion welding was investigated using different ratios of explosive and different stand-off distance. Experimental studies showed out that, copper and stainless steel can be bonded with a good quality of bonding properties with explosion welding. In the bonding interface, intermetallics were not formed. It was observed that, when explosive ratio and stand-off distance were increased smooth bonding interface was transformed to a wavy bonding interface. As the ratio of explosive and stand-off distance increase, the amplitude and wavelength of wave were increased. It was found that, hardness of bonding interface and outer face of plates were increased because of deformation that was originating from impact the effect. Total interface area increased as a result of wavy interface which was caused by increased explosive ratio and stand-off distance. In additio, wavy interfaces did not seperate after tensile-shearing test. Bending tests applied on bonded samples had different diameters indicated that interfaces of the bonded samples have not any defect. Scanning Electron Microscopy EDS analyses showed that diffusion did not take place between bonding plates, however, diffusion was observed after annealing of the bonded samples for different times.

Science Code : 710

**Key Words : Explosion welding, Copper-stainless steel, Explosive ratio,
Stand-off distance**

Page Number : 115

Adviser : Asist. Prof. Dr. Behçet GÜLENC



TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi, literatür araştırması, deney şartlarının tespitinde yardımlarını ve yakın ilgilerini esirgemeyen ve tez çalışması devam ederken kaybettiğim değerli bilim adamı, danışmanım Prof. Dr. Kutsal TÜLBENTÇİ'ye şükranlarımı sunar rahmetle anarım. Yine tez çalışmalarımın tüm safhalarında yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ'e sonsuz şükranlarımı sunar teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında değerli fikir ve katkılarından yararlandığım tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr Cemil ÇETİNKAYA ve Yrd. Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin deneysel çalışmalarında imkanlarından faydalandığım MKE Genel Müdürlüğüne ve Barutsan A.Ş. Kalite Kontrol birimi personeline, Türk Traktör Fabrikası Müdürlüğüne ve Mekanik Testler laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda bölümdeki tüm imkanları bana sunan Bölüm Başkanı Prof. Dr. Mehmet TÜRKER başta olmak üzere G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü akademik ve idari personeline, yine tez çalışmalarımın tüm safhalarında beni yalnız bırakmayan Yrd. Doç. Dr. Mustafa ACARER ve Arş.Gör. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürler ederim. Tez yazımı esnasında yardım ve fikirlerini esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Hasan OKUYUCU, Arş. Gör. Kubilay KARACİF ve oda arkadaşım Arş. Gör. Tayfun FINDIK'a teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi destekleriyle bu günlere gelmemi sağlayan annem ve babama, çalışmalarım boyunca beni destekleyen eşim ve oğluma şükranlarımı sunarım.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Patlayıcılar ve Gurney enerji değerleri	29
Çizelge 3.2. Patlama ile kaynaklanabilen metal ve alaşımları.....	33
Çizelge 3.3. Türkiye'de üretilen patlayıcı maddeler ve özellikleri	43
Çizelge 4.1. Paslanmaz çelik levha kimyasal bileşimi	54
Çizelge 4.2. Elbar 5'in bileşimi	54
Çizelge 4.3. Elbar 5'in teknik özellikleri.....	54
Çizelge 4.4. Birleştirme işleminde kullanılan parametreler	55
Çizelge 5.1. Patlayıcı miktarları ve üst parça son hızları.....	61
Çizelge 5.2. -0,5t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri.....	84
Çizelge 5.3. -t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri.....	86
Çizelge 5.4. -2t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri.....	88
Çizelge 5.5. -3t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri.....	90
Çizelge 5.6. Birleştirilen numunelerde bakır levhanın çekme dayanımı sonuçları	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı mekanizması	5
Şekil 2.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametre değişim grafiği	7
Şekil 2.3. Volan tahrikli sürtünme kaynağı parametre değişim grafiği	7
Şekil 3.1. Patlama kaynağı şematik gösterimi	16
Şekil 3.2. Arayüzeydeki dalga oluşumunun şematik görüntüsü	19
Şekil 3.3. Patlamalı kaynak işlemi geometrileri	21
Şekil 3.4. Patlamalı kaynak işlem parametreleri şematik gösterimi	22
Şekil 3.5. Üst parçanın hızlanması ve patlama bölgesinin şematik görünümü	26
Şekil 3.6. Patlama kaynağı mekanizması şematik görüntüsü	27
Şekil 3.7. Kaynak esnasında çarpışma noktasında jet oluşumu	30
Şekil 3.8. Patlayıcıların patlatılmasında kullanılan fûnye	41
Şekil 3.9. Tüplerin patlamayla kaplanması	47
Şekil 3.10. Patlama ile bindirme ve alın kaynağı	48
Şekil 4.1. Paralel levha birleştirme geometrisi deney düzeneği	53
Şekil 4.2. Hazırlanan birleştirme düzeneği şematik resmi	57
Şekil 4.3. Hazırlanan mikroyapı numunesi şematik gösterimi	58
Şekil 4.4. Çekme - Makaslama deney numuneleri şematik görünüşü	60
Şekil 5.1. -0,5t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği	84
Şekil 5.2. -t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği	86
Şekil 5.3. -2t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği	88

Şekil 5.4. -3t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği	90
Şekil 5.5. Birleştirilen numunelerde bakır levha çekme dayanımı sonuçları grafiği	96
Şekil 5.6. Isıl işlemsiz bakır levhadan alınan element analizi sonucu.....	99
Şekil 5.7. Isıl işlemsiz paslanmaz çelik levhadan alınan element analizi sonucu.....	100
Şekil 5.8. 32 saat fırında bekletilen ve bakır tarafından alınan element analizi sonucu.....	102
Şekil 5.9. 32 saat fırında bekletilen ve paslanmaz çelik tarafından alınan element analizi sonucu.....	103



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Patlamalı kaynak arayüzeyi	18
Resim 3.2. Patlama kaynağında oluşan tipik dalgalı arayüzey görüntüsü	31
Resim 4.1. Patlama anından bir görüntü.....	58
Resim 5.1. Ara boşluk mesafesi -0,5t- olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri	63
Resim 5.2. Ara boşluk mesafesi -t- olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri	64
Resim 5.3. Ara boşluk mesafesi -2t- olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri	65
Resim 5.4. Ara boşluk mesafesi -3t- olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri	66
Resim 5.5. Ara boşluk mesafesi -0,5t- olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen ara yüzey görüntüleri	70
Resim 5.6. Ara boşluk mesafesi -t- olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen ara yüzey görüntüleri	71
Resim 5.7. Ara boşluk mesafesi -2t- olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen ara yüzey görüntüleri	72
Resim 5.8. Ara boşluk mesafesi -3t- olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen ara yüzey görüntüleri	73
Resim 5.9. -0,5t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri	77
Resim 5.10. -t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri	78
Resim 5.11. -2t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri	79
Resim 5.12. -3t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri	80
Resim 5.13. Farklı çaplarda eğilmiş olan numunelere ait görüntüler	97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
s	Ara boşluk mesafesi
α	Eğimli birleştirme başlangıç açısı
R	Patlayıcı oranı
V_d	Patlayıcının patlama hızı
V_p	Üst parçanın çarpma hızı
Q	Çarpışma açısı
V_c	Kaynak hızı (çarpışma noktası hızı)
T_m	Metal ergime sıcaklığı
t	Levha kalınlığı
m	Üst parçanın kütlesi
c	Patlayıcının kütlesi

1. GİRİŞ

Son dönemlerde gelişen teknoloji ile birlikte endüstriyel düzeyde kullanılan malzemelerin günümüzün ihtiyaçlarına cevap verememesi veya arzulanan özellikleri karşılayamaması araştırmacıları yeni malzeme oluşumları yada kombinasyonları konusunda araştırmaya sevk etmiştir. Gerçekleştirilen incelemeler ve araştırmalar sonucunda elde edilen yeni malzeme gruplarını işleme ve birleştirmeye yönelik çalışmalar buna paralel olarak gelişmiş ve bu doğrultuda malzemelerin özelliklerini değiştirmeden birbirleriyle birleştirilme gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Kaynak; aynı özellikteki yada birbirine yakın özellikteki iki metalik veya termoplastik parçayı belirli bir ısı veya basınç yada her ikisini birlikte kullanarak ilave telli veya ilave telsiz, sökülemeyecek şekilde birleştirme işlemidir. Metallerin kaynak yöntemleri uygulanan enerjinin türü ve şiddetine göre ergitme kaynağı yada basınç kaynağı olarak sınıflandırılabilir. Ark ergitme kaynak yöntemlerinde malzeme sadece ark sıcaklığının etkisiyle bölgesel olarak ilave kaynak metali ile birlikte ergitilip birleştirilir. Elektrik ark kaynaklarında kaynak için gerekli olan ısı elektrik arkı tarafından sağlanır. Elektrik ark kaynak yöntemlerinde koruyucu toz, örtü ve gaz kullanılan tel, kaynak edilen parçaların bileşimi, kaynak geometrisi ve kaynak metali kimyasal bileşimine etki eden faktörlerdir (1).

Demir ve alaşımlarının ark kaynağı işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemler manuel ark, gazaltı (MIG-MAG-TIG) ve tozaltı ark kaynağı yöntemleridir. Ergitmeli ark kaynaklarında, yöntemin karakterine bağlı olarak kaynak metali ve ITAB'nin özellikleri de değişiklikler göstermektedir. Kaynak metali ve ITAB'deki değişikliklerden dolayı kaynaklı malzemelerin mekanik özellikleri etkilenmektedir. Kaynak metalinde oluşan tanelerin yönü, büyüklüğü ve yapısı yine kaynaklı bölgenin özelliklerinde değişimlere sebep olmaktadır (2,3).

Metal malzemelerin özelliklerini kaybetmeden birleştirilebilmeleri ve sadece benzer değil farklı özelliklerdeki malzemelerin birbirleriyle birleştirilmeleri geleneksel

olarak bilinen ergitmeli kaynak yöntemlerinden farklı bir birleştirme yöntemi olan katı hal kaynak yöntemleri ile mümkün olabilmektedir.

Katı hal kaynak tekniklerinden olan patlamalı kaynak tekniği, sürtünme kaynağı, ultrasonik kaynak ve difüzyon kaynağı gibi katı hal kaynak tekniklerinden daha sonra keşfedilmiştir. Patlamalı kaynak tekniği bilimsel olarak fark edilmesine rağmen 1950'li yıllara kadar potansiyel olarak ticari anlamda düşünülmemiştir (4).

Birleştirilecek metaller arasında bir katı hal bağının gerçekleşebilmesi için temel şartlar; metallerin yüzeylerinin temiz olması ve bunların birbirine atomsal seviyede yaklaştırılabilmesidir. Bu yaklaştırma esnasında atomlar arası kuvvetler önemli rol oynamakta ve toplam enerjinin en az olduğu atomlar arası uzaklıkta çekme ve itme kuvvetleri dengelenmektedir (5).

Araştırmalar sonucunda patlamalı kaynak tekniğinde bir çok pratik faydalar olduğu ortaya çıkmış ve bu konuda çeşitli araştırma ve geliştirme programları başlatılmıştır. Yapılan ilk araştırmalar patlamalı kaynak işleminin üretime yönelik uygunluğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte bu kaynak yönteminin zaman ve maddi yatırım açısından olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Farklı ergime noktalarına ve farklı sertliklere sahip aynı zamanda ısıl genleşmeleri büyük farklılıklar arz eden metal kombinasyonlarıyla çalışıldığında arzu edilen dayanıma sahip kaynaklı birleştirmelerin elde edilmesiyle endüstrinin bu kaynak yöntemine olan ilgisinin arttığı görülmüştür. Bu kaynak yöntemi üzerine yapılan ilk çalışmalar küçük ve düz levhaların kaplanmalarını kapsamalarına rağmen daha sonraki gelişmeler tüplerin ve eğimli yüzeylerin kaplanması ile boruların uç kaynaklarını ve geçiş bağlantılarının kaynağını içermektedir (4).

Bütün kaynak yöntemlerinde olduğu gibi patlamalı kaynak yönteminde de birleşmenin kalitesini etkileyen bir çok kaynak parametresi mevcuttur. Bunlar; ara boşluk mesafesi (s), eğimli birleştirme geometrilerinde başlangıç açısı (paralel düzenlemelerde bu değer $\alpha=0$) (α), patlayıcı oranı (patlayıcı kütlesinin üst parça kütlesine oranı) (R), patlayıcının patlama hızı (V_d), üst parçanın çarpma hızı (V_p),

Çarpışma açısı (Q), kaynak hızı (arpışma noktası hızı) (V_c), altlık ve birleştirilecek malzemelerin özellikleri olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada patlamalı kaynak yöntemi parametrelerinden en önemlileri olan ara boşluk mesafesi (s) ve patlayıcı oranının (R) birleşmeye olan etkilerini araştırmak amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel alışmalar sonucunda elde edilen birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.



2. KATI HAL KAYNAK TEKNİKLERİ

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstride kullanılan malzemelerin günümüz ihtiyaçlarına cevap verememesi yada arzu edilen özellikleri karşılayamaması araştırmacıları yeni malzeme oluşumları veya kombinasyonları konusunda araştırmaya sevk etmiştir. Ergitmeli kaynak yöntemlerinde metal malzemeler, ark sıcaklığının etkisiyle bölgesel olarak ek kaynak metali ile birlikte ergitilip birleştirilirler. Bu yöntemlerde, kaynak yöntemine ve parametrelerine bağlı olarak kaynak metali ve ITAB'nin (Isı Tesiri Altındaki Bölge) özelliklerinde olan bir çok metalurjik değişimin yanında kaynak metali alanı ve ITAB genişliği de değişime uğramaktadır. Meydana gelen bu değişiklikten dolayı kaynaklı bölgenin mekanik özellikleri etkilenmektedir. Aynı şekilde kaynak metalindeki tanelerin yönü, büyüklüğü ve yapısı mekanik özelliklerde değişmelere sebep olmaktadır. Metallerin, özelliklerini kaybetmeden birleştirilmesi ve sadece benzer değil farklı malzemelerin birbirleriyle birleştirilmeleri, geleneksel kaynak yöntemlerinden farklı olan, katı hal kaynak yöntemleri ile mümkün olabilmektedir. Endüstride en çok kullanılan katı hal kaynak teknikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Sürtünme Kaynağı
- Difüzyon Kaynağı
- Ultrasonik Kaynak
- Patlama Kaynağı

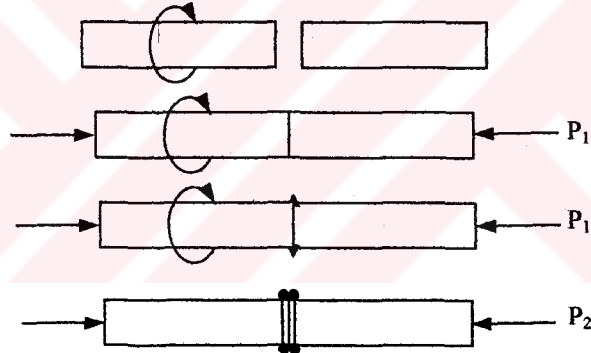
2.1. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, biri sabit diğeri dönel harekete sahip iki parçanın ara yüzeylerinin sürtünmesi ile elde edilen ısıdan yararlanarak, eksenel basınç altında birleştirildiği bir katı hal kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağında kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler eksenel basınç altında kalır. Sürtünme süresi plastik deformasyon sıcaklığı oluşuncaya kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme yapılarak durdurulur ve eksenel basınç yaklaşık iki kat artırılarak yığılma oluşturulur. Normal

şartlar altında arayüzey ergimez. Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük çoğunluğunu dairesel kesitli çubukların yada boruların kaynağı oluşturur (6-8).

2.1.1. Sürtünme kaynağı mekanizması

Sürtünme kaynağı mekanizmaları farklı araştırmacılar tarafından açıklanmaya çalışılmıştır. Sürtünme kaynağı genel olarak dört aşamada gerçekleştirilir (Şekil 2.1). Birinci aşamada, parçalardan biri sabit diğeri dairesel harekete sahip olacak şekilde aynı ekseninde bağlanır. İkinci aşamada, iki parçanın aksenal basınç altında (P_1) yüzey teması sağlanır. Üçüncü aşamada, sürtünme hareketi ile oluşan ısı sayesinde arayüzeyde plastik deformasyon ve şişme meydana getirilir. Dördüncü aşamada ise dönme hareketi durdurularak yığma basıncı (P_2) uygulanır.



Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı mekanizması

Sürtünme kaynağında bir ergime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin darlığı ve kaynağın çevresinde plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığı en belirgin özellikleri teşkil eder. Uygun malzeme seçimi, kaynak dizaynı, sürtünme süresi, sürtünme basınç kuvveti, devir sayısı, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi gibi kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak kalitesi artırılabilir (9).

Sürtünme kaynağında kaliteli bir bağlantının oluşması şu şekilde açıklanabilir (10);

1. Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğeri tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.

2. Sürtünme kaynağı sırasında kaynak inklüzyonlarının büyük bir kısmı elimine edilir.
3. Bağlantı bölgesi hızlı bölgesel ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir.
4. Hızlı bölgesel ısıtma ve ayrıca kaynak bölgesine yakın soğuk bölgelerin ısıyı hızlı bir şekilde çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşmaktadır.

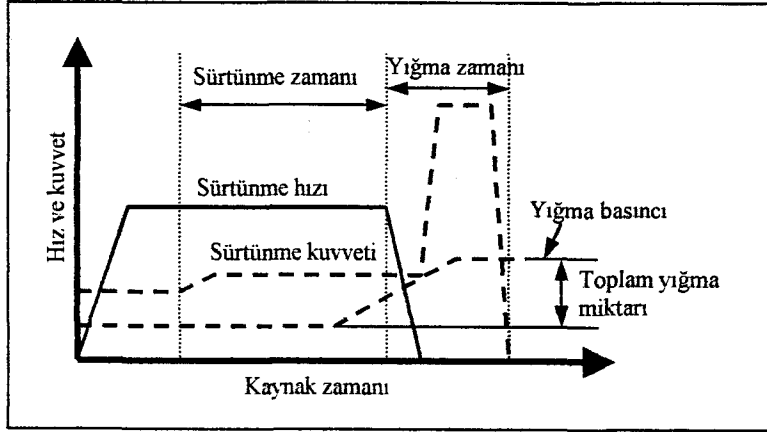
Sürtünme kaynağının uygulama alanları; makine imalatı ve hidrolik endüstrisi, havacılık ve uzay sanayii, otomotiv endüstrisi, takım endüstrisi, elektronik, elektrik ve kimya endüstrisi olarak sıralanabilir (11).

2.1.2. Sürtünme kaynağı çeşitleri

Kaynak bölgesinin yeterli ısıya ulaşması sonucu ortaya çıkan frenleme sistemi ve gerekli mekanik enerjiyi sağlayan donanım değişikliği, sürtünme kaynağı çeşitlerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Genel olarak iki tür sürtünme kaynağı çeşidi vardır. Bunlar; sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ve volan tahrikli sürtünme kaynağıdır (11).

a- Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı

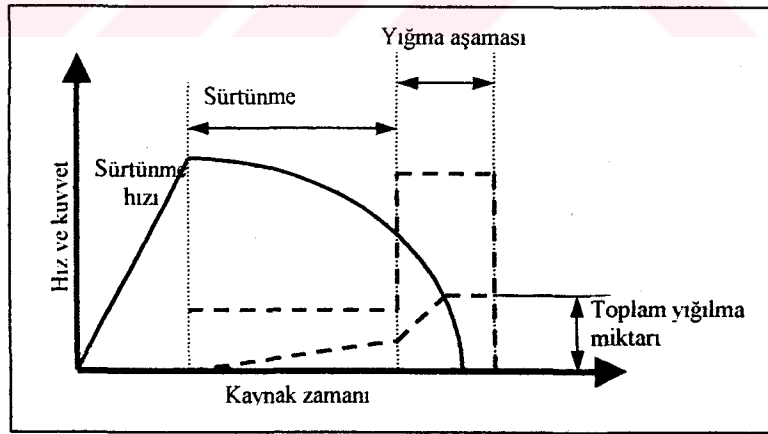
Bu kaynak tekniğinde parçalardan biri dairesel harekete sahip bir motor ünitesine tutturulur diğeri ise aynı ekseninde sabitlenir. Motor daha önceden belirlenen devir sayısında döndürülür ve sabit parçaya düşük bir eksenel basınç kuvveti uygulanarak iki parça ara yüzeyinde temas sağlanır. Arayüzeyde plastik deformasyon için gerekli ısıya ulaşıncaya kadar işlem devam eder. Sonra dönen parça ani frenleme ile durdurulur ve ara yüzeyde yeterince plastik deformasyon oluşturmak için yığma basıncı uygulanarak işlem tamamlanır. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının zamana bağlı parametre değişim grafiği Şekil 2.2’de verilmiştir (7, 11).



Şekil 2.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametre değişim grafiği

b- Volan tahrikli sürtünme kaynağı

Bu kaynak tekniği aynı zamanda atalet kaynağı olarak ta adlandırılmaktadır. Bu yöntemde parçalardan biri sabit diğeri ise üzerinde volan bağlı olan hareketli aynaya bağlanır. Volan tahrikli sürtünme kaynağının zamana bağlı parametre değişim grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir (7, 11).



Şekil 2.3. Volan tahrikli sürtünme kaynağı parametre değişim grafiği

Sürtünme kaynağı için gerekli olan enerji, volanlı ayna önceden belirlenen çevresel hızda ivmelendirilerek depolanır. Böylece mekanik enerji volanda toplanmış olur. Daha sonra bir aksenal basınç kuvveti yardımıyla iki parçanın teması sağlanır. Bu

eksenel basınç arayüzeyde birleşme için gerekli olan deformasyon oluşuncaya kadar arttırılarak uygulanır. Bu süreç içerisinde volanın kazanmış olduğu çevresel hız sürtünme ve sürtünme basıncının etkisi ile azalarak durur. Dönme hareketi bitmeden önce veya sonra parçalara yığma basınç kuvveti uygulanarak işlem tamamlanır.

2.1.3. Sürtünme kaynağı parametreleri

Sürtünme kaynağında kontrol edilmesi gereken parametreler; çevresel hız, sürtünme basınç kuvveti, sürtünme süresi, yığma basınç kuvveti, yığma süresi olarak sıralanabilmektedir. Bunların dışında birleştirilecek olan malzemenin özellikleri de kaynak kalitesini etkilemektedir (11).

Çevresel hız; Malzemenin ısınmasında ve ısının tesiri altındaki bölgenin genişliğinde etkili olmaktadır. Yüksek çevresel hız, yüksek arayüzey sıcaklığı üretirken düşük çevresel hız yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler.

Sürtünme basınç kuvveti; temas eden arayüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve arayüzeyde dengeli bir ısıtma sağlayabilecek düzeyde olmalıdır.

Sürtünme ve yığma süresi; sürtünme süresi, parça yüzeylerindeki olası kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastiklik için dengeli bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Yığma süresi ise, malzeme çifti arayüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için uygulanan kuvvetin süresidir.

Yığma basınç kuvveti; yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlı olarak değişir. Yüksek tutulduğunda aşırı sıcak şekillendirmeye, düşük tutulduğunda yetersiz kaynaklanmaya sebep olur. Yığma basınç kuvveti sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır.

2.1.4. Sürtünme kaynağının avantaj ve sınırlılıkları

Her kaynak yönteminin olduğu gibi sürtünme kaynağının da diğer kaynak yöntemlerine göre bazı üstünlükleri ve sınırlılıkları vardır. Bu özelliklerden önemli olan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir (11, 12).

- Özel bir yüzey temizleme işlemine gerek yoktur. Birleştirilecek parçalar testere veya makas ile kesilse bile bu yüzeyler ek bir temizleme işlemi görmeksizin kaynatılabilirler.
- Dolgu metali, dekapan ve koruyucu gaze gerek yoktur. Kaynak işleminde sıçrama veya kıvılcım oluşmaz.
- Sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak işlemi olduğundan ergime ve katılaşmadan doğan hatalar oluşmaz. Gaz boşlukları, segregasyon ve curuf kalıntıları gibi olumsuzluklar meydana gelmez.
- Benzer ve farklı özellikteki metaller kolaylıkla kaynatılabilir.

Sürtünme kaynağının uygulanmasının sınırlılıklarından bazıları ise şöylece sıralanabilir;

- Birleştirilecek parçalardan en az birisi kendi ekseninde dönebilen simetrik şekle sahip olmalıdır. Büyük kesitli parçalarda ısıtmanın homojen olmamasından dolayı kaynaklanabilme zordur.
- Sac plakaların birleştirilmesi ve açısal birleştirmeler bu işlemin normalinde sınırlıdır.
- Birleştirilecek parçalardan en az birisi kaynak koşullarında plastik deformasyona uğrayabilmelidir, aksi halde bu yöntemle birleştirilemez.

2.2. Difüzyon Kaynağı

Katı hal kaynak yöntemi olan difüzyon kaynağının çok eski bir geçmişi ve yaygın bir kullanım alanı vardır. Difüzyon kaynağı; birleştirilmek üzere eşleştirilmiş iki

yüzeyin, malzemelerin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, plastik akmaya sebep olmayacak bir basınçta, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan bir kaynak yöntemidir (13).

Bu kaynak yöntemi, aralarında seramik ve kompozitlerinde yer aldığı, birbirleriyle birleştirilmeleri diğer kaynak yöntemleri ile mümkün olmayan demir ve demir dışı alaşımların birleştirilmesini mümkün hale getirmiştir (14).

2.2.1. Difüzyon kaynağı mekanizması

Günümüze kadar difüzyon kaynağı hakkında bir çok mekanizma ileri sürülmüştür. Şimdiye kadar açıklanan mekanizmaların ortak noktaları ışığında difüzyon kaynağı mekanizmasını aşağıdaki şekilde genelleştirmek mümkündür (13).

- a-) Yük altında plastik deformasyon
- b-) Sürünme deformasyonu
- c-) Difüzyon
- d-) Yeniden kristalleşme ve tane sınır göçü

Difüzyon kaynağında birleştirilecek yüzeylerin birbirleri ile teması sağlanıp, kaynak için gerekli sıcaklık ve zamana ulaşılması ile yüzeyler arasındaki temas alanı artar. Kaynağın ilk aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır. Bu esnada birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. Bu aşamadan sonra difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Birçok gözenek tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur ve birleşme yerinden tane içine geçerek tane içinde oluşur. Son olarak, birleşmenin tamamlandığı ve malzemeler arasındaki atomik bağın gerçekleştiği aşama oluşur. Bu aşamada gözenekler hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir (15-17).

Difüzyon kaynağının kullanım alanları genel mühendislik, havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, nükleer sanayiler ve elektronik sanayi olarak sıralanabilir (16).

2.2.2. Difüzyon kaynağına tesir eden faktörler

Her kaynak yönteminde olduğu gibi difüzyon kaynağında da birçok faktör etkili olmaktadır. Bu faktörler; sıcaklık, basınç, zaman, birleşme yüzeyi pürüzlülüğü, kaynak atmosferi olarak sıralanabilir. Ayrıca malzemelerin tane boyutu, kristal yapısı, atom yarı çapı, yeniden kristalleşme sıcaklığı, yüzey enerjileri, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklı yada aynı olması da difüzyon kaynağına etkili olmaktadır. Difüzyon kaynağına etki eden kaynak şartları kısaca aşağıdaki gibi açıklanabilir (13,15).

Kaynak sıcaklığı; difüzyon kaynağının en önemli parametresidir. Difüzyon mekanizmaları ve sürünme doğrudan sıcaklığa bağlıdır. Artan sıcaklıkla beraber malzemelerin akma gerilmeleri azaldığından, hem ilk deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri 0.5-0.8 Tm kadardır. Buradaki Tm metalin ergime sıcaklığıdır.

Kaynak basıncı; uygulanacak basınç parçalarda makro deformasyon oluşturmayacak seviyede olmalıdır. Birleştirilecek yüzeylerde ilk temasın sağlanması ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturmada basınç gereklidir. Uygulanan basınç ile yüzey pürüzlerinin plastik akışı kolaylaşırken yüzeyde çözünemeyen oksit filmleri kırılarak iki yüzey arasında atom akışı sağlanır.

Kaynak süresi; difüzyon kaynağında sıcaklık ve basınçtan sonra en önemli parametre kaynak süresidir. Süre, sıcaklık ve basınca bağlı bir etkidir. Sıcaklık ve basınç artırılarak süre kısaltılabilir.

Yüzey şartları; yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde oluşan oksitler ve yüzey artıkları kaynak kalitesini olumsuz etkilemektedirler. Bu şartlar genellikle difüzyon kaynağının ilk aşamasında etkili olmaktadır. Bu pürüzler kaynayacak iki yüzeyin birbirine tam

temasını engeller ve dolayısıyla yüzey yüzeye temasın süresini uzatmış olur. Difüzyon kaynağında uzun dalga boylu pürüzler, çok yönlü basınç ve uzun zaman gerektirir. İyi bir kaynağın oluşmasına engel, genellikle oksit tabakalarıdır.

Kaynak ortamı; Difüzyon kaynağı esnasında en önemli problem yüzeylerin oksitlenmesidir. Birleşmenin daha iyi olması için kaynak işlemi koruyucu atmosfer altında yapılmalıdır. Koruyucu atmosfer olarak vakum veya indirgeyici ortam kullanılır.

2.2.3. Difüzyon kaynağı avantaj ve sınırlılıkları

Difüzyon kaynağının, uygulamada bir çok avantaj sağladığı yönleri vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (13,15,18).

- Bazı kaynak yöntemlerinde görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları bu teknikte görülmez. Metalurjik açıdan uyumsuz, birbirinden farklı iki metal veya bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
- Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Karmaşık şekilli bağlantılar gerçekleştirilebilir.
- Seramik ve kompozitlerin diğer malzemelerle birleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntem olup, seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı, mümkün olan tek kaynak yöntemidir.

Difüzyon kaynağının uygulamadaki sınırlılıkları ise, aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Bu yöntemde özel ortam ve aparatlara gerek olduğundan pahalı olabilmektedir. Birleştirme ara yüzeyinde kırılma eğilimine sebep olan metaller arası bileşikler ve bazen ara fazların oluşma ihtimali vardır.

2.3. Ultrasonik Kaynak

Ultrasonik kaynak, özellikleri aynı veya farklı olan malzemelerin bindirme biçiminde birleştirilmesinde kullanılan bir katı hal kaynak yöntemi olup, malzemelerin titreşim ve basınç etkileri altında birleştirilmesi olarak tarif edilebilir. Parçalar, hava veya hidrolik basınç altında ve saniyede yaklaşık olarak 20000 titreşim yapabilen çeneler arasında ısı enerjisi verilmeksizin soğuk basınç yöntemi ile birleştirilirler. Bu kaynak yönteminde koruyucu toz, pasta gibi temizleme maddelerine ve kaynak dikişine katkıda bulunacak ilave tele ihtiyaç yoktur. Birleştirilecek parçalar plastik şekil değiştirme sonucu kaynak edilmiş olur. Birleşme alanında plastik şekil değişikliği sonucu bir miktar ısı meydana gelse de bu ısı parçalarda herhangi bir fiziksel şekil değişimine sebep olmaz. Malzemelerin metalurjik birleşmesi ark, ergime ve ergiyik geçişi olmaksızın yapılmış olur. Bu kaynak yönteminde elektriksel olarak üretilen titreşimin mekanik enerjiye dönüştürülmesinden faydalanılmaktadır (19).

2.3.1. Ultrasonik kaynağın mekanizması

Katı hal kaynaklarında en önemli engeller, parçaların yüzeyindeki oksit tabakaları ile yüzeylerin pürüzlülüğü ve dalgalılığıdır. Bu yüzey filmleri yok edildiğinde parçalar arası metalik bağ çok az bir basınçla veya deformasyonla meydana gelebilmektedir. İyi bir bağ oluşumu için yüzeylerin birbirine çok iyi teması gereklidir. Ultrasonik kaynak işlemi, malzemenin akma sınırına yakın bir kuvvetle sıkıştırılmış olan parçalardan ultrasonik titreşim geçirmekle gerçekleşmektedir. Kaynak bağlantısı görülebilir bir ergime meydana gelmeden sadece % 5 plastik deformasyonla meydana gelmektedir. Birleştirme işleminde basınç ve titreşim aynı anda uygulanmaktadır. Parçaların temas yüzeylerinin pürüzlülüğü ile sürtünme enerjisi ısıya dönüşerek bu bölgede malzeme, sıvılaşmaya oldukça yaklaşmaktadır. Bu esnada oksit ve benzeri tabakalar da titreşimle beraber parçalanarak metalik bağ oluşmakta ve neticede parçanın çekme mukavemetine eşit ve aynı özelliklere sahip bir bağ elde edilmektedir (19,20).

Ultrasonik kaynağın uygulama alanları, mikro elektronik endüstrisi, güç termokupullerinin birleştirilmeleri, ambalaj endüstrisi olarak sıralanabilir (21).

2.3.2. Ultrasonik kaynağa tesir eden faktörler

Ultrasonik kaynak işlemine etki eden faktörler; ultrasonik güç, baskı kuvveti, kaynak zamanı olarak sıralanabilir (22).

Ultrasonik güç; gerekli güç miktarı kaynak edilecek malzemenin özellikleri ve kalınlığıyla beraber değişir. Genel olarak sert malzemeler aynı kalınlıktaki yumuşak malzemelerden daha fazla güç gerektirirler. Malzemenin kalınlığının artması ile de güç ihtiyacı artmaktadır.

Baskı kuvveti; malzemenin özelliklerine, kalınlığına, bağlantının geometrisine ve ultrasoniğin güç seviyesine bağlıdır. Aşırı olan kuvvet gereksiz yüzey tahribatına yol açabilir. Yetersiz olan baskı kuvveti ise kaynak ağzının kaymasına ve dolayısıyla yüzey hasarına, aşırı ısınmaya ve zayıf kaynak dikişine sebep olur.

Kaynak zamanı; kaynak zamanının kaynak mukavemetine etkisi, artan süre ile birlikte mukavemette bir artış olması şeklinde görülmektedir. Ancak mukavemetteki bu artış belirli bir süreden sonra sabit kalmakta veya yorulma çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır. Optimum kaynak zamanı genellikle kaynak şartlarına bağlıdır ve birkaç saniyeden daha azdır.

2.3.3. Ultrasonik kaynağın avantaj ve sınırlılıkları

Ultrasonik kaynağın, uygulamada bir çok avantaj sağladığı yönleri vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (20,22,23);

- Çok ince malzemeler kaynatılabildiği gibi, ince malzemeler ile kalın malzemeler birbirleriyle kaynatılabilirler. Özel olarak temizleme işlemine gerek duyulmaz.

- Farklı metallerin birleştirilmesine imkan sağlar. İlave malzemeye, toza veya koruyucu atmosfere gerek yoktur.
- Metaller ergime ısısının altındaki bir sıcaklıkta kaynatılırlar. Kaynak işlemi ekonomik olarak gerçekleştirilebilir.

Ultrasonik kaynağın uygulamadaki sınırlılıkları ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Birleştirmeler bindirme şeklinde olmalıdır, alın birleştirmeler yapılamaz. İnce kesitli numunelerde kaynak ucunun ayarlanması gerekir. Genellikle demir dışı alaşımlarda daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

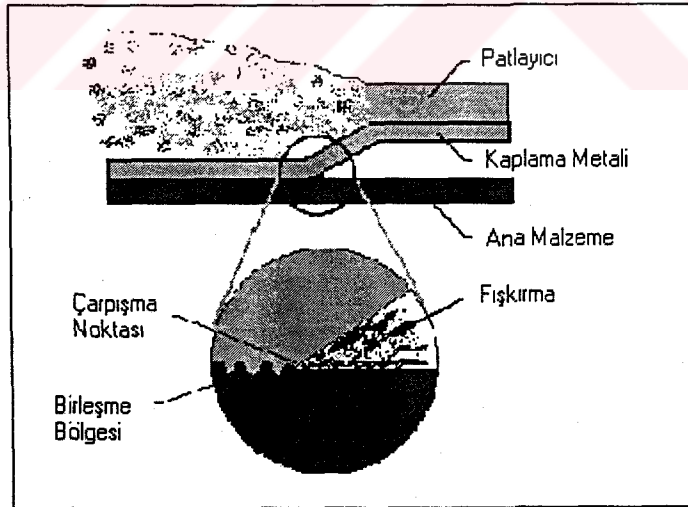
2.4. Patlama Kaynağı

Patlama kaynağı, iki metali birleştirmek için patlayıcıların patlama enerjisinden istifade edilerek yapılan bir tür kaynak işlemidir. Patlama, parçaların yüksek bir hıza ulaşarak eğimli çarpışmaları esnasında metalurjik bir birleşme sağlar.

Tez çalışmasının konusu olan bu kaynak yöntemi, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ

Patlamalı birleştirme olarak ta bilinen patlama kaynağı, iki metal arasında yüksek hızdaki eğimli çarpışma sonucu meydana gelir. Patlama kaynağı; patlayıcı ile elde edilen yüksek basınç yardımıyla iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Metal yüzeylerin çarpışması sonucu yeterli bir çarpışma enerjisi meydana geldiğinde, bu yüzeyler oluşan ilk temaslarını birbirleri üzerinde bir akış sergileyerek devam ettirirler ve sonuçta bir katı hal birleşmesi meydana gelir. Bu işlem, dışarıdan herhangi bir ısı verilmediği için soğuk teknik olarak tanımlanmasına rağmen işlemin dinamiğinden dolayı kaynak ara yüzeyinde bölgesel yüksek sıcaklıklar oluşabilir. Burada patlayıcının infilakı ile birlikte ısı meydana gelmesine rağmen, metal parçalarda ısı transferi için gerekli zaman yoktur ve metallerde ısı akışı sezilemez. Bu işlemdeki ısı ve akış, esas malzemenin dayanımına eşit veya daha yüksek bir dayanıma sahip arayüzey birleşmesi sağlar (24-27). Şekil 3.1.'de patlama kaynağı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Patlama kaynağı şematik gösterimi

Buradaki eğimli çarpışma çok önemlidir. Eğimli çarpışma metal yüzeylerinde bir tabakanın metal jeti şeklinde, çarpışma arayüzeyinden uzaklaşmasına neden olur. Çarpışma esnasında yüzeyden metal jeti şeklinde fıskıran bu tabakanın kalınlığı

genellikle 0,05mm.'den daha azdır. Bu metal jeti dışarı atılırken aynı zamanda çarpışan metal yüzeyinin temizliğini de gerçekleştirmektedir. Metal yüzeyinde bulunan oksit, yağ gibi kaynak için zararlı etkiler oluşan jet ile birlikte dışarı atılmaktadır (28,29).

Sonuç olarak temiz metal yüzeyleri, patlayıcı tarafından oluşturulan yüksek basınç altında sıkıştırılır. İki malzemenin atomlarının toplam enerjisi birbirine yaklaştıkça azalır ve bir çekici veya bağlayıcı kuvvet ortaya çıkar, bu yüzden malzemeler arasında atomik boyutta bir birleşme meydana gelir. Atomik boyuttaki bu birleşme tüm arayüzey boyunca ilk çarpışma noktasından itibaren ilerler ve malzemeler arasında birleşme gerçekleşmiş olur (25,30).

Patlama kaynağı ilk olarak I. Dünya savaşı sırasında bombalardan kopan küçük parçaların çevresindeki metal yapılara yapışmasıyla dikkat çekmiştir. Ancak bu konu ile ilgili 1944 yılına kadar herhangi bir yayın bulunmamaktadır. Patlamalı kaynak yönteminin ticari olarak kullanımıyla ilgili ilk patent 1962 yılında yayınlanmıştır (25,31).

Patlamalı kaynağın benzer ve farklı metallerin birleştirilmesinde kullanılması gibi bir çok faydalı özellikleri vardır. Geleneksel kaynak yöntemleri ile farklı özellikteki malzemelerin farklı metalurjik özelliklerinden dolayı birleştirilmeleri uygun olmaya bilir. Bu kaynak yöntemi ısının yokluğu nedeniyle ergime kaynağı, lehimleme veya sıcak haddeleme işlemlerindeki metalurjik karakteristiklerin çoğunu göstermez. Bu kaynak yöntemi, aynı özellikteki iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılabilir olmasına rağmen bu yöntemin en büyük ticari potansiyeli korozyon dayanımının amaçlandığı kaplamalı metallerin üretimi ve farklı metallerin birleştirilmesi için kullanılabilir olmasıdır (32-35).

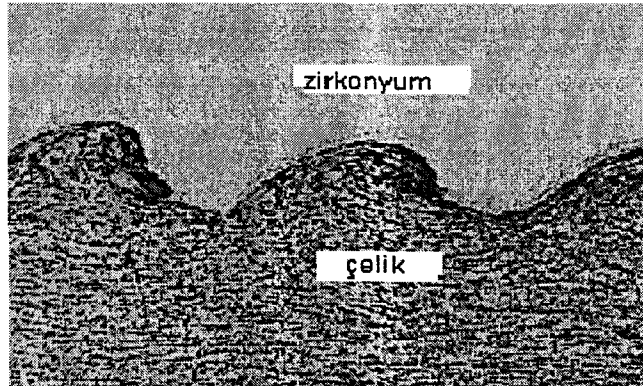
3.1. Patlamalı Kaynağın Mekanizması

Patlamalı kaynak işlemi metalik levhaların yüksek hızda eğimli çarpışmasını sağlayacak patlayıcıların kullanımına bağlıdır. Eğimli bir çarpışmanın sonucu olarak

metal yüzeylerinde metalurjik birleşme sağlayan bu mekanizma tam olarak belirlenememiştir. Bu konu ile ilgili yapılan araştırmaların bir çoğu fişkıma çarpışması olarak bilinen birleşme için gerekli temel şartın eğimli çarpışma olduğunu göstermektedir. Çarpışma fişkıması, çok yüksek hızlarda çarpışan levhalar arasından dışarıya çıkmaya zorlanan ve çarpışmanın ucunda şekillenen metalin fişkıması için kontrol edilen levha hızı, basınç, çarpışma açısı ve çarpışma noktası hızının bulunduğu eğimli bir çarpışma olarak tanımlanır (36-39).

Patlamalı kaynak işleminde fişkıma, yüzey filmlerini parçalayarak ortadan kaldıran bir mekanizmadır. Eğimli çarpışma boyunca fişkıma, metal yüzeyinin temizlenmesine sebep olacak şekilde oluşur. Çarpışma noktasında temiz metal yüzeyleri patlamanın etkisi ile oluşan yüksek basınçla yakın temasa zorlanır. Patlamalı kaynak işlemi iki aşama halinde düşünülebilir. Birincisi, fişkıma yüzey tabakalarını parçalar ve temizler. İkincisi, yüksek basınç atomlar arası kuvvetlerin birleşme arayüzeyi oluşturabileceği konum olan yakın temas için metal yüzeyleri zorlar (36,40-42).

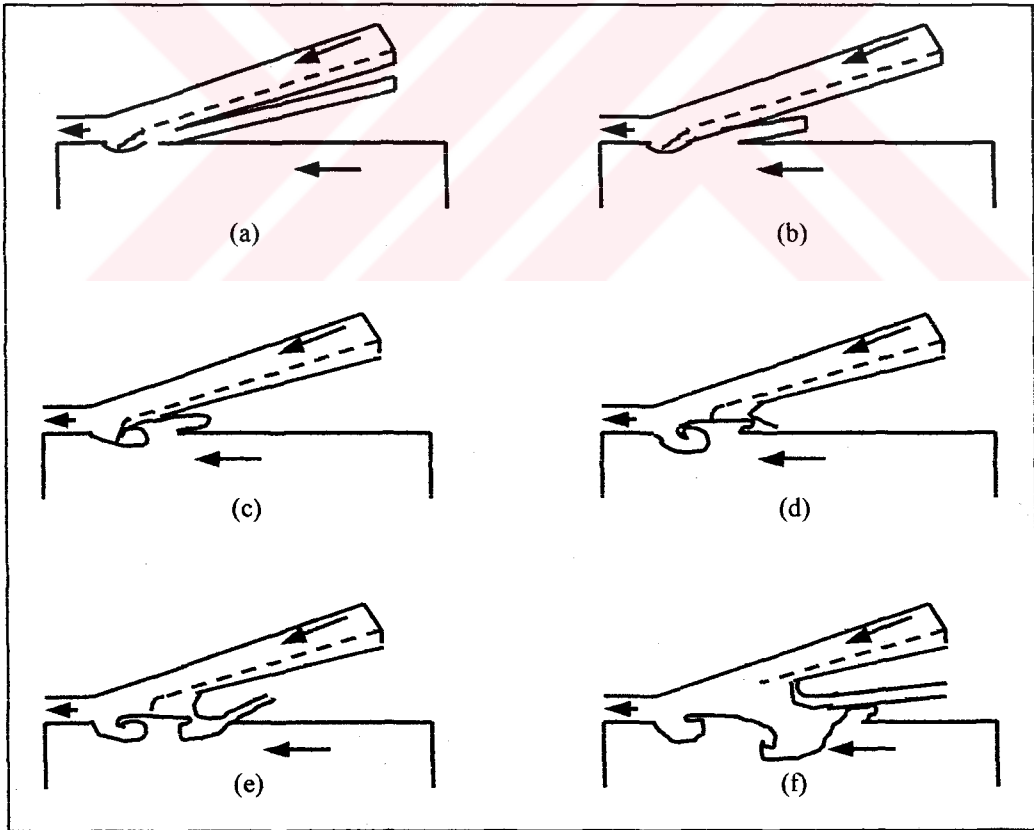
Patlamalı kaynak işleminde bütün parametreler uygun biçimde kontrol edildiğinde Resim 3.1’de gösterilen dalgalı bir kaynak arayüzeyi elde edilir. Patlamalı kaynak arayüzeyinin dalgalı görüntüsü patlamalı kaynağın tek karakteristiğidir. Kaynak arayüzeyinin bu ilginç görüntüsü patlamalı kaynağa olan ilgiyi teşvik etmektedir.



Resim 3.1. Patlamalı kaynak arayüzeyi

Kaynaklanmış yüzeylerin karakteristiklerini ve özelliklerini anlamak için bir akışkanın davranışını anlamak gereklidir. Patlamalı kaynakta birleşme anında iki metal bir akışkan gibi hareket etmektedir. Böyle bir hareketin sonucunda arayüzeyde meydana gelen dalgalı yapının oluşumu için bir çok mekanizma ileri sürülmüştür (43).

Dalga yapısının formasyonunu kontrol eden mekanizmanın detaylı analizi oldukça karmaşık ve zordur. Dalga modelinin gelişimi boyunca olan fiziki bir yaklaşım aşağıda Şekil 3.2’de gösterilen tanıtımdan elde edilebilir. Bu şematik tanıtım adım adım kaynak arayüzeyindeki dalga oluşumunun gelişimini göstermektedir. Bahrani ve arkadaşları (44), tarafından önerilen bu yaklaşım ve mekanizma bir çok araştırmacı tarafından doğru olduğuna inanılan ve kabul edilen bir yaklaşımdır.



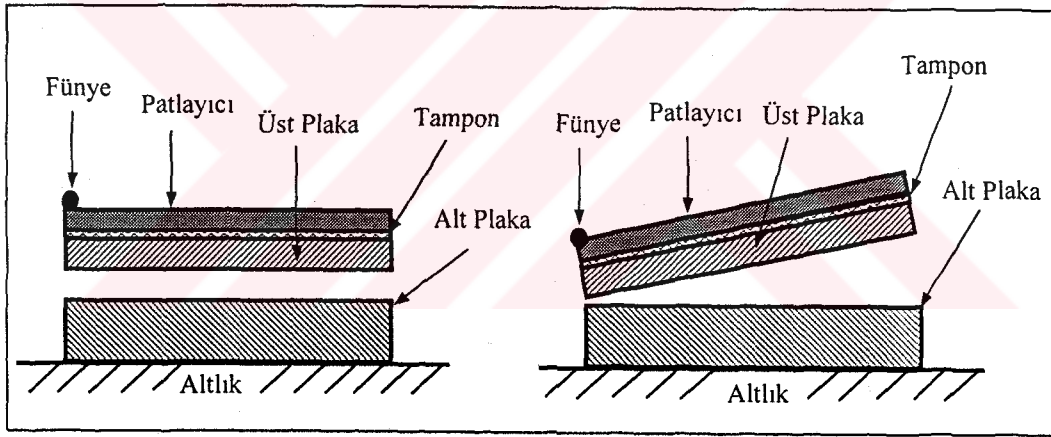
Şekil 3.2. Arayüzeydeki dalga oluşumunun şematik görüntüsü

Şekil 3.2.a, üst levha fişkırmalarının momentumundan kaynaklanan alt levhanın deformasyonunun kombinasyonunu göstermektedir. Üst levha fişkırmalarının momentumu, ileri fişkırmaların oluşturduğu alt levha yüzeyinin kesilmesiyle birlikte ilk noktaya göre alt levhanın öne doğru hızıyla bağlantı kurar. Sonuç olarak çarpma noktasının başında bir tepe oluşur. Bu tepe Şekil 3.2.b’de gösterildiği gibi ileri fişkırmayı, üst levha fişkırmalarının yukarısına doğru saptırır ve sonunda Şekil 3.2.c’de görüldüğü gibi ileri fişkırmaların önünü tıkar. Bazen üst levha fişkırmaları dalganın tepesine çarptığında kuyruğun yükselmesini sağlayan tepenin parçasını keser. Hapsolmuş olan ileri fişkırmaların tepenin gerisinde bir girdap oluşturur. Burada, tutsak olan fişkırmaların kinetik enerjisinin dağılmasıyla muhtemelen yüksek sıcaklıklar oluşur ve bu, bölgesel ergime ve faz değişimiyle sonuçlanabilir. İleri fişkırmaların önü tıklandığında yığılma noktası Şekil 3.2.d’de gösterildiği gibi dalganın tepesinde baştan sona gezinir ve yığılma noktasıyla birleşen yüksek basınç bir sonraki gövdenin oluşması için tepeyi sıkıştırır ve genişler. Şekil 3.2.e’de görüldüğü gibi tepe, aşağı doğru harekete devam ettiği için yığılma noktası tepenin ileriye doğru meylini azaltır ve sonuç olarak ileri fişkırmalar, fişkırmalar ile tepenin eğimli kenarı arasındaki eğimin artan açısından dolayı artacaktır ve aynı zamanda ileri fişkırmaların hızı azalacaktır. İleri fişkırmaların tepenin meyline doğru azaldığı için ikinci bir yığılma noktası bir sonraki girdaba sebep olan gövde altındaki boşluğa girer. Birinci dalga gövdesi altında oluşan girdabın yanında oluşan ileri fişkırmalar birinci dalganın uç tarafını süpürür ve Şekil 3.2.f’de gösterildiği gibi bir sonraki tepenin oluşumunu başlatır. Bu mekanizma ikinci ve daha sonraki dalgaların oluşumunu sağlayacak şekilde devam eder (40,44).

Abe akihisa (45,46), patlamalı kaynakta arayüzeyde dalga oluşum mekanizmasının nümerik analizi üzerine çalışmalar yapmıştır. Vardığı sonuçlar, dalga oluşumu ve deformasyon işleminin diğer öne sürülen mekanizmalar ile paralellik olduğunu göstermiştir.

3.2. Patlamalı Kaynağın Geometrisi

Patlamalı kaynak işleminin çoğunlukla kullanılan temel iki geometrik şekli vardır. Bunlar açılı (eğimli) birleştirme ve paralel levha birleştirmeleridir. Açılı birleştirme genellikle çok küçük boyutlu plaka şeklindeki parçalarda, boru ve tüp birleştirmelerinde kullanılır. Patlamalı kaynak işleminde çoğu kez silindirik ve daha geniş düz yüzeylerin kaynaklı birleştirmeleri için paralel levha birleştirme geometrileri kullanılır. Ayrıca üst levhanın deformasyona uğramasını engellemek için gerekirse üst levha ile patlayıcı arasına koruyucu bir tampon tabaka konulabilir. Bu tampon tabaka kullanılacak patlayıcıya bağlı olarak kauçuk yada ince bir tabaka plastik olabilir (29,40,47,48). Şekil 3.3.'te patlamalı kaynak işlemi temel geometrileri verilmiştir.

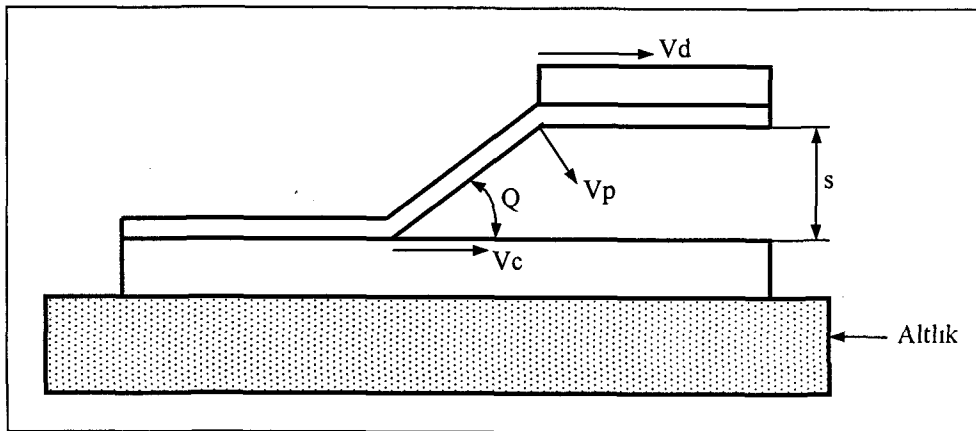


Şekil 3.3. Patlamalı kaynak işlemi geometrileri.

3.3. Patlamalı Kaynak Parametreleri

Patlamalı kaynak işleminde kaliteli bir birleştirme elde edebilmek için kaynak işlemini kontrol altında tutabilecek parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Birleşme işleminde arayüzeyi ve kaynak kalitesini etkileyen bazı önemli kaynak parametreleri; ara boşluk mesafesi (s), eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı (paralel düzenlemeler için bu değer $\alpha = 0$ dir) (α), patlayıcı oranı (patlayıcı kütlesinin üst levha kütlesine oranı) (R), patlayıcının patlama hızı (V_d), üst levhanın çarpma hızı (V_p), çarpışma açısı (Q), kaynak hızı (çarpışma noktası hızı) (V_c) ve altlık

olarak sıralanabilir (49,50). Şekil 3.4.'te patlamalı kaynak işlemi parametreleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Patlamalı kaynak işlem parametreleri şematik gösterimi

Yukarıda sıralanan patlamalı kaynak parametrelerinin birleşmeye olan etkileri aşağıda olduğu gibi açıklanabilir.

a-) Araboşluk mesafesi; bu kaynak parametresi paralel düzenlemeler kullanıldığında geçerlidir. Paralel kaynak düzenlemesinde alt ve üst levha arasındaki boşluk, çarpışan levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının en az yarısından büyük olmalıdır. Üst levha, patlama basıncı ile oluşan bir şok dalgası ve yine patlama ile oluşan gazın genleşmesiyle hızlandırılır. Alt ve üst levha arasındaki boşluk mesafesi yeterince geniş ise üst levha ulaşabileceği maksimum hıza ulaşabilir (29,43,49).

Paralel geometriler için araboşluk mesafesi yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir; (t; üst levha veya kaplama levhasının kalınlığı)

a-) $t/3 < s < 2t/3$

b-) $t/2 < s < t$

c-) $2t/3 < s < 2t$

b-) Başlangıç açısı; paralel geometriler kullanıldığı zaman başlangıç açısının değeri sıfır (0) dır. Patlamalı kaynak işleminde açılı geometriler kullanıldığı durumlarda bu parametre önem kazanır. Başlangıç açısı kaynak oluşumuna izin verecek değerde olmalıdır. Bu, üst levhanın son hıza ulaşmasına izin verecek kadar iki levha arasında bir boşluk mesafesiyle ve eğimli çarpışmayı sağlayacak bir açıyla alakalıdır. Başlangıç açısı genellikle 5^0 - 25^0 arası bir değerde olmalıdır (29).

c-) Patlayıcı oranı; patlayıcı oranı üst levhanın ağırlığıyla doğrudan alakalıdır. Bu oran üst parçanın belirli bir hıza ve çarpışma açısına ulaşmasına izin verecek değerde olmalıdır. Patlayıcı oranı, birleştirilecek malzemelerin mekanik özelliklerine ve yüzey durumlarına göre de değişiklikler arz etmektedir. Patlayıcı oranı yaklaşık olarak üst parçanın ağırlığının 1-3 katı değerinde olabilmektedir (29,49).

d-) Patlayıcının patlama hızı; patlayıcıların patlama hızı, 125 mm çapında ve 1000 mm boyundaki bir PVC tüp içindeki patlama hızlarıdır. Patlamalı birleştirmeler için genellikle 2500-3500 m/s patlama hızına sahip patlayıcılar kullanılmaktadır. Patlama hızı yüksek patlayıcıların kullanılması durumunda çarpışan levhalarda oluşan yüksek basınç, yansıyan bir gerilme dalgası üretebilmekte ve bu da parçaların tekrar ayrılmasına neden olabilmektedir. Patlama hızı düşük patlayıcıların kullanılmasında ise üst parçanın yeterince hızlanamaması durumu ile karşılaşılabilir. Kullanılan patlayıcıların patlama hızları patlayıcı oranı ile de doğrudan ilgilidir (29,49,51).

e-) Üst levhanın çarpma hızı; kullanılan patlayıcının patlama hızı ve enerjisiyle ilişkilidir. Çarpma hızının artmasıyla beraber ara yüzeyde oluşan dalgaların genliğinde de bir artış görülür. Bu esnada bazı metallerde, oluşan dalgaların uç noktalarında tutsak olan fişkırmadan dolayı ergime görülebilmektedir. Bazı durumlarda tamamen ergimeden kaçınmak için, daha düşük çarpışma hızında düz bir arayüzey oluşturmak tercih edilebilir. Genellikle üst levha çarpma hızlarının 1000 m/s'nin üzerinde olması istenir (43,49).

f-) Çarpışma açısı; metalurjik birleşmenin oluşumuna izin verecek seviyede olmalıdır. Bu açının değeri, kullanılan parçaların yüzey durumlarına da bağlıdır. Bu değer fişkırmının gerçekleşebilmesine izin verebilmelidir. Nikel-çelik, titanyum-çelik birleştirmeleri için bu açı değeri minimum 4° - 7° arası olması istenir (43,49). Birçok araştırmacı tarafından kabul edilen çarpışma açısının değeri 5° - 25° arası bir değerdir (29).

g-) Kaynak hızı; çarpışma noktası hızı olarak ta bilinen kaynak hızı, patlayıcının patlama hızına eşit değerdedir. Dolayısıyla patlayıcının patlama hızının yüksek veya alçak olduğu durumlarda karşılaşılan olaylar, kaynak hızının yüksek veya düşük olduğu durumlarla paralellik göstermektedir. Bunun yanı sıra, kaynak hızı belirli bir değer altına düşerse kaynak arayüzeyi düz olur ve birleşmemiş kısımlar meydana gelebilir. Artan kaynak hızıyla beraber tutsak fişkırmının (dışarıya çıkamayan fişkırmı) hacmi artar. Bunun nedeni çarpışma noktasının fişkırmının önüne geçip büyük bir parçasını hapsedmesidir. Hapsedilmiş olan fişkırmı, dalga oluşumunu engelleyen bir etki göstermektedir. Böylece kaynak arayüzeyinde ergimiş tabakanın sürekliliği söz konusu olmaktadır. Fişkırmının hapsedilmesinden dolayı oluşan yüksek sıcaklık ve ergime metaller arası gevrek, kırılgan bir yapı oluşturur. Orta seviyedeki kaynak hızlarında fişkırmı davranışı düzenlidir. Arayüzeyde sabit dalga oluşumu ve maksimum birleşme dayanımı elde edilebilir (49,52,53).

h-) Altlık; normalde altlığın kaynak kalitesine etkisi olmadığı görülebilir. Ancak uygulamada birleştirilen parçalara hasar verecek etkiye sahip olduğu ve parçaların distorsiyon miktarına etki ettiği görülmüştür. Blazynski (43), eğer altlık alt levhanın alt kenarı ile temas etmiyorsa yada altlık yansıtıcı bir özelliğe sahip ise gerilme dalgasının alt levha ile altlık arasında yükseldiğini ve birleşmiş olan levhaları ayırmaya meyilli olacağını ifade etmiştir. Yani altlık ile alt parça birbirine tam olarak temas etmelidir. Yine Blazynski (43), çelik altlık kullanılabileceği gibi kum altlık üzerinde de patlama ile birleştirme işlemleri yapılabileceğini ifade etmiştir. Otto ve Carpenter (54), geniş ölçekli çelik levhaların kurşunla kaplanmasında patlamayla sıkıştırılmış kum altlık kullandıklarını ifade etmişlerdir.

Yukarıda açıklanan kaynak parametrelerinin yanı sıra birleştirilecek olan parçaların yüzey durumlarının da kaynak kalitesine etkili olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Pürüzlü yüzeyler ile elde edilen kaynağın kalitesi, pürüzsüz yüzey ile elde edilen kaynağa göre daha kötü olmaktadır. Düz olmayan ve yüzeyi pürüzlü olan parçaların kaynağı esnasında oluşan fişkırmaya arayüzeydeki oksit ve yağ tabakasını ortamdaki uzaklaştıramayabilir. Böylece birleşme arayüzeyinde oksit tabakaları veya birleşmemiş alanlar meydana gelebilir. Düz ve pürüzsüz bir yüzey kullanmanın faydası yağ, su ve oksit tabakası gibi yüzey filmlerinin fişkırmaya arayüzeyden kolayca atılmasıdır. Eğer ideal kalitede bir birleşme elde edilmek isteniyorsa kaynaklanacak yüzeyler mümkün olduğu kadar düz ve pürüzsüz olmalıdır. Kabul edilebilir bir kaynak kalitesi 3µm'lik veya daha aşağı bir yüzey durumu ile elde edilebilir (17,29,55,56).

3.4. Patlamalı Kaynak İşleminin Aşamaları

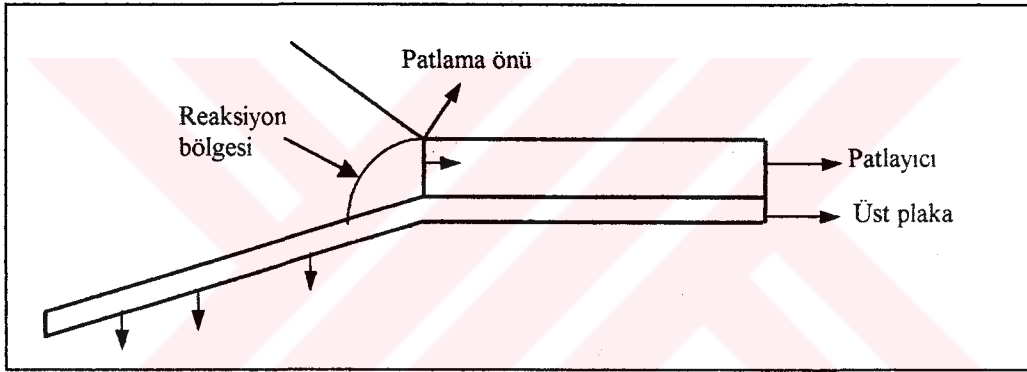
Patlamalı kaynak işlemi, aşağıda başlıklar halinde verilen üç aşamada gerçekleştirilir.

3.4.1. Patlayıcının patlaması

Patlama kaynağı işlemi esnasında önemli sayılabilecek büyüklükte titreşim ve gürültü meydana gelebilir. Bundan dolayı bu birleştirme işlemi genellikle yerleşim yerlerinden yeterince uzak olan arazilerde veya özel olarak tasarlanmış patlama odalarında ya da vakum odalarında gerçekleştirilmektedir. Patlama ile birleştirme işlemi yapan kişi veya kişiler kendilerini şarapnel parçalarından ya da yüksek orandaki gürültüden korumak amacıyla gerekli tedbirleri almaları gerekmektedir (28,57).

Patlayıcılar birleştirme işlemi için bir enerji kaynağıdır. Patlayıcılar patlama esnasında özel bir şekilde enerjilerini serbest bırakırlar. Bu yüzden ilk olarak anlaşılması gereken, patlayıcıların patlama esnasında enerjilerini üst parça veya kaplama parçası üzerine nasıl bıraktıklarıdır. Metallerin birleştirilmesi için çoğu

zaman toz yada tanecik şeklinde olan tipik amonyumnitrat kullanılır. Amonyumnitrat içine patlayıcının patlama duyarlılığını artırmak ve homojenlik sağlamak için bazı karışımlar katılarak harmanlanırlar. Bu karışımlar, patlayıcının patlama hızını arttırmakla birlikte patlayıcıya, patlama basıncı ve bu basıncın sürekliliğini sağlama özelliği verirler. Patlamalı birleştirmelerde kullanılan patlayıcının patlaması sürekli (adım adım ilerleyen) bir olaydır. Bu olay fûnye diye bilinen ilk patlayıcıda başlar ve patlamamış patlayıcıya doğru patlama hızı olarak bilinen bir hızda ilerler. Aşağıda Şekil 3.5’de görüldüğü gibi patlama bölgesinin patlama önünde oluşan reaksiyon bölgesinde ilerleyen yüksek basınç, kimyasal reaksiyon sonucu oluşan yüksek bir şok dalgasından meydana gelir (28,58).



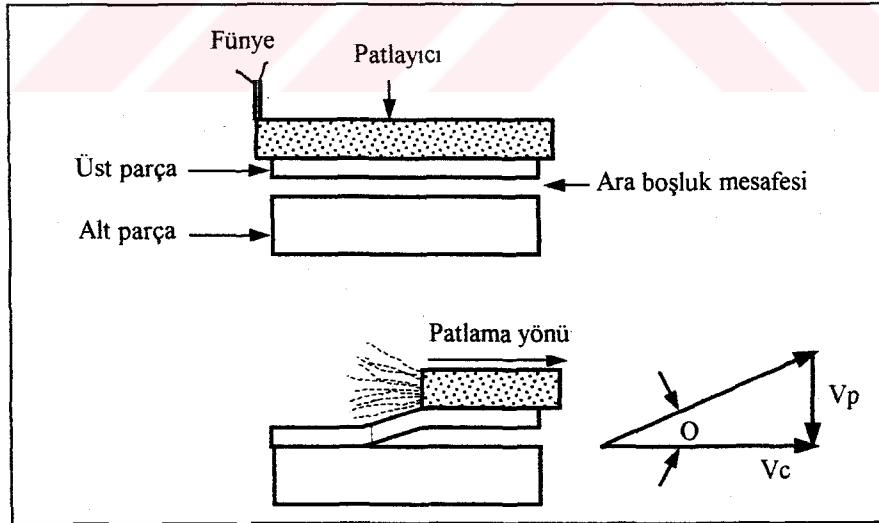
Şekil 3.5. Üst parçanın hızlanması ve patlama bölgesinin şematik görünümü.

İdeal bir patlayıcıda reaksiyon hemen hemen anlık bir sürede tamamlanır. Bu yüzden reaksiyon bölgesi son derece kısadır (genellikle 1 mm den küçük). Bununla birlikte ideal olmayan bir patlayıcıda reaksiyon bölgesi çok daha uzundur (5-25 mm), çünkü reaksiyonun bitmesi çok daha uzun süre alır. Dolayısıyla ideal olmayan bir patlayıcının reaksiyon bölgesindeki basınç, başlangıç şok dalgasından çok daha düşük olmasına rağmen bu basıncın süresi çok daha uzundur. Bu süre zarfında bu bölgede oluşan yüksek basınç gazları üst parçayı hızlandırmak için itme kuvveti oluştururlar. Reaksiyon bölgesinin gerisinde oldukça düşük basınçlı genleşme gazlarından oluşan bir bölge daha vardır. Bu bölgede oluşan çok düşük basınç, üst parçanın hızlanmasına çok az derecede katkıda bulunur. Her tip patlayıcının sahip olduğu tipik patlama hızı, basınç ve süre faktörleri vardır. Bu etkenler patlayıcının

verilen bir yoğunluğu ve kalınlığı için özgül hız, basınç ve süreyi tahmin etmede kullanılabilirler. Kaynak için kullanılan, ideal olmayan patlayıcıların çoğunlukla 2500-3500 m/s hızlarında patlaması istenir. Yüksek hızlarda patlama sonuçlarında üst parçanın zarar görme ihtimali söz konusu olmaktadır. Ayrıca kaynak için ideal olmayan patlayıcılarda bununla birlikte başlangıç noktasının yakınındaki bölgeler ve patlama kaynağı çarpışma önündeki üst parçada oluşan ön şok dalgasından dolayı patlama öncesi basma gibi faktörler sabit olmayan patlamaya sebep olabilir ve bu da kaynak kalitesinde düzensizliğe neden olur (25,28).

3.4.2. Üst parçanın hızlanması ve çarpışma

Birleştirme için patlayıcı, üst parçanın üzerine serili bir şekilde yerleştirilir ve patlama önü teğetsel bir biçimde üst parçanın uzunluğu boyunca ilerleyecek şekilde patlatılır. Patlama sonucunda patlayıcı üst parçaya uygun bir şekilde itme gücü verir. Böylece aşağıda Şekil 3.6'da görüldüğü gibi üst parçanın son eğilme açısına (Q) ve hızına (V_p) ulaşmasını sağlar (28).



Şekil 3.6. Patlama kaynağı mekanizması şematik görüntüsü

Üst parçanın hızlanması, patlayıcının patlaması sonucu oluşan patlama bölgesinin iki ayrı kısmından kaynaklanır. Birincisi, patlayıcıdaki patlama anındaki şok önünün etkisidir. Bu etki, üst parçaya bir yüksek basınç şok dalgası verir. Oluşan bu şok

dalgası üst parçanın yüzeylerinde ileri geri hareket eder ve parçayı sarsar. Böylece üst parçanın çabukça ilk aşamada hızlanmasını sağlar. Bu şok dalgasının etkisi hızlıca yok olur ve sadece üst parçanın toplam eğilme açısının ve hızının %80'ine ulaşmasını sağlar. Şok dalgasının etkisi yok olmaya başladıkça, bir sonraki bölge olan reaksiyon bölgesindeki genişleyen yüksek basınçlı gazlar devreye girer ve birleştirme işleminin tamamlandığı andaki son açı ve hız elde edilene kadar düzenli bir şekilde üst parçayı hızlandırmaya devam eder. Reaksiyon bölgesinde oluşan bu etki ve ilk şokun katkısı üst parçaya iletilen toplam itmeyi oluşturur (28,47,53).

Birleştirme için ideal bir patlayıcıda yaklaşık tüm hızlanma, oluşan şok dalgasının yüksek basıncından ve çok az bir kısmı da devam eden reaksiyon bölgesinden ileri gelir (28).

Birleştirme işlemlerinde genellikle yüksek patlama hızlı patlayıcıların kullanılmasından sakınılmalıdır. Çünkü üst levhanın alt levhaya çarpmasından dolayı oluşan çok yüksek basınç, yansıyan bir gerilme dalgası oluşturabilir. Bu yansıma da üst levhanın kalınlığının yapraksı bir şekilde ayrılmasına yol açabilir. Üst parçanın hızı Gurney tarafından hazırlanan denklem ile hesaplanabilmektedir ve bu denkleme Gurney denklemi denilmektedir. Bu denkleme göre her bir patlayıcının kendine özgü bir patlama karakteristiği ve patlama enerjisi vardır. Yine her bir patlayıcının Gurney tarafından hesaplanan patlama karakteristiği ve patlama enerjisine göre bir sabit değeri vardır. Bu değere de Gurney enerjisi denilmektedir (49).

Aşağıda eşitlik 3.1.de Gurney denklemi ve Çizelge 3.1.'de ise bazı patlayıcıların Gurney tarafından hesaplanan sabit enerji değerleri verilmiştir (25,49).

$$V_p^2 = 2E \frac{3}{\left[1 + 5\left(\frac{m}{c}\right) + 4\left(\frac{m^2}{c^2}\right)\right]} \quad [3.1]$$

Bu denklemde;

V_p = Üst parçanın hızı

m = Üst parçanın kütlesi

$2E$ = Gurney enerjisi

c = Patlayıcının kütlesi

Çizelge 3.1. Patlayıcılar ve gurney enerji değerleri

Patlayıcı	Patlama hızı (m/s)	Patlayıcı yoğunluğu (g/cm ³)	Gurney enerjisi $\sqrt{2E}$
Detasheet 'D'	7200	1,40	2700
Pentolite	7470	1,66	3170
TNT	6700	1,56	3100
Anfo(%6 fuel oil)	2540	0,82	1600
Trimonite	3000	1,1	1240

Üst parça hızlanarak alt parça ile aralarında olan boşluk mesafesi kadar yol kat eder ve alt parça ile çarpışır. Bu çarpışma esnasında üst parça ile alt parça arasında Şekil 3.6.'de görüldüğü gibi bir son eğilme (çarpışma) açısı meydana gelir. Bu açı yaklaşık olarak aşağıda Eşitlik 3.2.deki denklem ile hesaplanabilir.

$$V_p = 2V_c \sin\left(\frac{Q}{2}\right) \quad [3.2]$$

Bu denklemde;

V_p = Üst parçanın hızı

V_c = Çarpışma noktası hızı

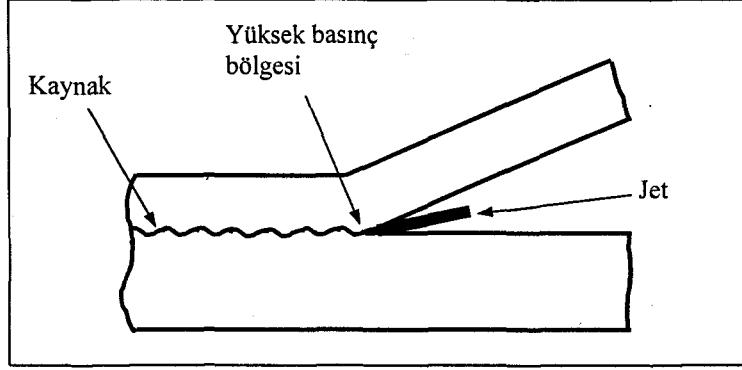
Q = Çarpışma açısı

Çarpışma noktası hızı (V_c) aynı zamanda patlayıcının patlama hızına(V_d) eşit değerdedir. Yukarıda Eşitlik 3.2. deki denklemde herhangi iki değişken bilindiği zaman üçüncü değişken rahatlıkla hesaplanabilmektedir (58).

3.4.3. Fıskırma ve kaynak oluşumu

Alt ve üst parçanın çarpışması esnasında gerekli olan basınç, basınç şoku ve gerekli çarpışma açısı elde edildiğinde birleştirilen iki malzemenin yüzeyleri çarpışma noktasına doğru harekete geçer. Bu esnada çarpışmanın açısal geometrisinden dolayı, çarpışma noktasındaki bu yüzeyler aşırı kayma akışıyla akım yönlerini ters

çevirmeye ve ince parmak benzeri püskürtme (fişkırtma) şeklinde ilerleyen çarpışma noktasının önünde dışarı çıkmaya zorlanır (Şekil 3.7) (58-60).



Şekil 3.7. Kaynak esnasında çarpışma noktasında jet oluşumu

Birleşme işlemi esnasında metal yüzeylerinde oluşan bu fişkırtma çok ince bir tabakanın hareketinden meydana gelir. Bu tabakanın kalınlığı genellikle 0,05mm.den daha azdır (28).

Aşırı yüksek hidrodinamik basınç altında kaynaklanan her iki malzemenin karışımından oluşan bu fişkırtma aşırı derecede yüksek bir ısıya sahip olur. Çarpışma esnasında oluşan fişkırtmanın çoğu buradaki ısıyla birlikte kaynak ara yüzeyinden çok az veya hiçbir etki bırakmayarak dışarı atılır. Bu, büyük öneme sahip olan fişkırtmanın yüzey temizleme etkisi olarak ta düşünülebilir. Tipik olarak bu etki katı hal reaksiyonlarını engelleyen oksit ve diğer kirleri içeren tabakayı birleşme bölgesinden uzaklaştırır. Bu durum kaynak arayüzeyinde belirli bir zaman devam eden çarpışmanın önemli kalıcı basıncı altında iki metalin doğrudan kaynaklanmasına veya birleşmesine imkan sağlar. Kaynak arayüzeyinde oluşan ve kalıcı olan bu basınç, kaynak oluşumu veya birleşme esnasında kaynaklanan malzemeleri ayırmaya çalışan herhangi bir gerilme yada gerilme dalgasına karşı tepkide bulunur (29,64-66).

Patlamalı kaynaktaki birleşme, atomik boyuttaki çekme kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Birleşme sıcaklığının düşük olmasından dolayı arayüzeyde difüzyon

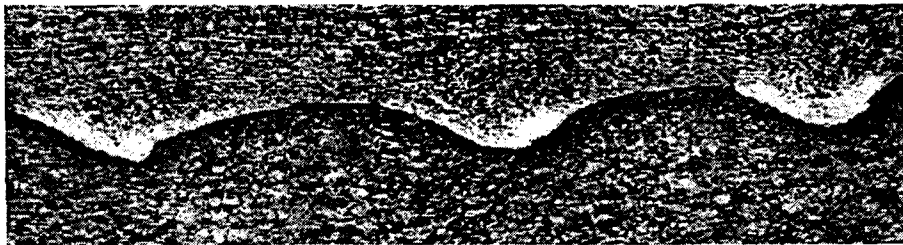
olayı gerçekleştirememektedir. Metalurjik olarak, birleşmiş olan arayüzey yüksek enerjili bir tane sınırına çok benzemektedir. Arayüzey dalgalarının oluşumu esnasındaki soğuk deformasyon nedeni ile birleşme bölgesi sertliğinde artış görülmektedir (29).

3.5. Birleştirme Arayüzeyi

Patlama kaynağının gerçekleştirilmesinde birleştirme karakteristikleri kaynağın kalitesinde özel bir öneme sahiptir. Patlama kaynağı uygun olarak gerçekleştirildiğinde esas olarak bir katı hal birleştirme işlemidir. Bu işlemde, ısıya bağlı diğer kaynak işlemlerinde olduğu gibi dayanımı azaltan ısının tesiri altında kalan bölge oluşmamaktadır.

Patlama kaynağında şekil olarak iki tür kaynak arayüzeyi oluşturulabilir. Bunlardan birincisi, çarpışma ve fişırma şartlarının düşük limitlerde olduğu durumlarda oluşan düz veya doğru çizgi arayüzeyidir. Bu tür şartlardan tipik olarak çoğu durumda kaçınılır. Çünkü kaynak sırasında çarpışma şartlarındaki veya kaynak parametrelerindeki az miktarda düşüş kaynaklanmayı durdurabilir ve kaynaklanmamış bölge oluşmasına sebep olabilir (58,61-63).

Çoğu durumda, patlama kaynağı arayüzeyi bu kaynağa mahsus tipik bir dalgalı görüntüye sahip olur (Resim 3.2).



Resim 3.2. Patlama kaynağında oluşan tipik dalgalı arayüzey görüntüsü

Bu dalganın oluşumu, çarpışma noktası ve kaynak arayüzeyindeki iki metalin bölgesel dinamik basıncının bir sonucudur. Buradaki basma kuvveti kaynak

arayüzeyini teorik çizginin altına ve üstüne doğru düzensizleştiren metallerin bölgesel olarak akmasına sebep olur. Dalga şeklinin büyüklüğü veya küçüklüğü kaynak şartlarını belirlemede kullanılan kaynak sonrası bir karakteristiktir. Bir patlama kaynağında arayüzeyde oluşan dalganın boyu ve genişliği, birleştirilecek parçalar ile kullanılan patlayıcının özelliklerine bağlıdır (25,28).

3.5.1. Dalga genişliği

Patlama kaynağı arayüzeyinde oluşan dalgaların genişliğini tahmin etmek oldukça zordur. Oluşan dalgaların görünüşleri çeşitli birçok faktörlere bağlıdır. Birleştirilecek iki malzemenin bağlı akma karakteristikleri, patlama kaynağı işleminin çarpışma noktası hızı, patlayıcının özelliği ve çarpışma açısı veya ara boşluk mesafesi bu faktörlerden önemli olanlarıdır (25,28,58).

Dalga genişliğinin ve uzunluğunun kontrol edilmesi patlama kaynağının çeşitli parametrelerini kontrol etmede oldukça önemlidir. Çünkü;

- Dalga büyüklüğü bölgesel akmanın miktarını ve patlama kaynağı arayüzeyindeki ve bu arayüzeyin yanındaki bölgedeki iş sertleşmesi hakkında bilgi verir.
- Aşırı çarpışma enerjileri ve dalga büyüklükleri kaynak arayüzeyinde ve arayüzeyin yanındaki bölgede kalıcı ısı etkileriyle birlikte oluşan dalganın önünde ve arkasında birleşmenin özelliklerini etkileyebilecek büyük ergimiş bölgelerin oluşumuna neden olabilir.
- Dalga büyüklüğü özel alaşımlarda (yüksek dayanımlı, Ni esaslı ve Ti alaşımları gibi) kaynak arayüzeyinin bitişinde bölgesel kayma hataları veya kırılma oluşumunda oldukça önemli bir etkiye sahiptir.

3.6. Birleştirilecek Malzemeler ve Özellikleri

Patlama kaynağı hemen hemen her bileşimdeki metallerin birleştirilmesi işleminde etkili olarak kullanılmaktadır. Sadece parçaların patlama esnasındaki hızlı deformasyona dayanabilmesi için yeterli derecede elastiklik ve kırılma tokluğu

Bazı yazarlar tarafından küçük ölçekli deneylerde bazı ek malzeme kombinasyonlarının olduğu ifade edilmektedir (43). Bunlar;

Alüminyum	-	Al-Zn-Mg alaşımları
Alüminyum	-	Maraging çeliği
Kobalt	-	Orta karbonlu çelik
Bakır	-	Duralüminyum
Bakır	-	Niobyum
Bakır	-	Sanadyum
Platinyum	-	Titanyum
Hadfield çeliği-		Orta karbonlu çelik
Zırh levhası	-	Orta karbonlu çelik

Süneklik, ergime ve katılaşma noktası, her iki bileşenden birinin kalınlığı ve yoğunluğu kaynaklanabilirliği belirleyen faktörlerdir. Birleştirme işlemi boyunca çatlak oluşumundan kaçınmak için birleştirilen malzemelerin yeterli derecede yukarıda belirtilen elastiklik ve kırılma tokluğu dayanımlarına sahip olması gerekmektedir. Arzu edilen bir kompozitin bileşenlerinden birisi diğerine göre gevrek olduğu durumda, uygulamada bu bileşenin alt levha olarak kullanılması daha uygundur. Ayrıca bileşenlerin benzer yoğunlukta olmaları da önerilmektedir. Yoğunluğun önemi çarpışma noktasının etrafında malzemenin verdiği karşılıktan ileri gelir. Çarpışma noktasındaki basınç akma dayanımına göre çok yüksek ise malzemeler çarpışma noktasının etrafında bir akışkan gibi hareket eder ve çarpışma noktasından uzaklaşır. Bileşenler benzer yoğunlukta olduklarında kaynak ara yüzeyi simetrik dalga oluşumu gösterir (49).

Patlama kaynağı, aynı tip ve özellikteki metallerin birleştirilmesinde uygun olduğu gibi, farklı özellik ve yoğunlukta farklı ergime noktalarına sahip metallerde ve de farklı yorulma dayanımı sergileyen metallerin birleştirilmesi işleminde rahatlıkla kullanılabilir. Bu yöntem çoğu kez korozyona dirençli alaşımlarda, karbonlu veya alaşımlı çeliklerin birleştirilmesinde kullanılır (28).

Patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak benzer ve farklı metallerin birleştirilmeleri üzerine yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır;

Richman et al. (35,67), çeliğe patlama ile kaynaklanan NiTi alaşımının kavitasyon erozyonunu incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada, eşit atomik kompozisyonda iki NiTi alaşımı olan martenzitik NiTi – çelik ve östenitik NiTi – çelik birleştirmeleri yapmışlardır. Birleştirmelere sertlik, yüzey mikroyapısı gibi incelemeler ve ayrıca ısıtma işlem uygulamaları yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonunda, martenzitik NiTi alaşımına ısıtma işlemin etkisi belirsiz iken östenitik NiTi alaşımının erozyon direncini koruduğu gözlenmiştir.

Hokamoto et al. [68,69], pirinç, paslanmaz çelik ve maraging çeliği, alüminyum, titanyum ve bakır malzemelerini kullanarak birleştirmişler ve elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerini çekme deneyi ile ölçerek tespit etmişlerdir. Birleştirme işlemlerinden önce yapılan çekme deneylerinde bakır 348 MPa, alüminyum 145 MPa (yaşlandırmadan sonra 88 MPa), paslanmaz çelik 1003 MPa, maraging çeliği 2216 MPa, titanyum (yaşlandırmadan sonra) 591 MPa dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Birleştirme işlemlerinden sonra yapılan deneylerde ise çekme dayanımları bakır – pirinç 387 MPa, alüminyum – paslanmaz çelik 585 MPa, 614 MPa, bakır – paslanmaz çelik 642 MPa, alüminyum – maraging çeliği 1245 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen kompozitlerin birçoğunun beklendiği gibi yüksek bir çekme dayanımı gösterdiğini ve daha sünek bileşenin etkisinden dolayı süneklikte bir artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Gulbin et al. (70), patlamalı kaynaktan sonra haddeleme yapılarak üretilen termo bimetallerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerinde berilyum, bronz, titanyum, alüminyum malzemelerini kullanarak bunları patlama ile birleştirmişler ve bu birleşmelerin haddelemeden sonra mikrosertlik, çekme dayanımı, tokluk, eğme, burulma deneylerini yapmışlardır. Yaptıkları incelemelerde arayüzeyde mikrosertlik değerlerinde çarpmadan dolayı bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma ile manyetik ve manyetik olmayan termo bimetallerin patlamalı kaynak ve ardından haddeleme ile üretilebileceğini belirlemişlerdir.

Zimmerly et al. (71), yapmış oldukları çalışmada, Ni – Ti alaşımının düşük karbonlu çeliğe patlamalı kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilebildiğini göstermişlerdir. Bu çalışmada hem Ni – Ti alaşımında hemde düşük karbonlu çelikte çekme testinde hasar olduğu ve birleşme ara yüzeyinde böyle bir hasar görülmediği için hangi arayüzeyin (dalgalı – düz) daha dayanıklı olduğu belirlenememiştir. Ayrıca bu çalışma patlamalı kaynağın kavitasyon hasarına karşı Ni – Ti alaşımlı ince levhaların diğer metallere birleştirilmesi için uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Truetnev et al. (72), alüminyumun titanyum, çelik ve nikel patlamalı kaynağının kalitesinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre alüminyum – titanyum'un kaynaklanabilirliğinin alüminyum – çelik ve alüminyum – nikelden daha iyi olduğu gözlenmiştir. Titanyum, çelik ve nikelin temas bölgesinde sertliğin iç bölgelerden daha fazla olduğu vurgulanmış ve bu da çarpışma boyunca metalin yüzey tabakasının çalışma sertleşmesiyle ilişkili olduğu ancak bu ilişkinin alüminyuma uygulanamaz olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, arayüzeyde oluşan ergimiş bölgenin (intermetalik bileşenin) sertliğinin iki metalin sert olanından daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Johnson (73), nikel-krom alaşımlı tüple yine nikel-krom alaşımlı tapayı patlama kaynağı yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak kalitesinde oksit filminin etkisini incelemek amacıyla penetrant sıvı testi uygulamışlardır. Ayrıca birleşmede sızıntının olup olmadığını belirlemek ve birleşmenin dayanımını tespit etmek için su basıncı ve makaslama deneyleri yapılmıştır. Penetrant sıvı testi sonuçları tamamen birleşme olduğunu göstermiştir. Basıncı su ile yapılan deneyde birleşmenin sızdırmaz ve ayrıca sertlik incelemesinde arayüzeye yakın bölgelerde sertlikte bir artış olduğu görülmüştür. Makaslama testi deneyinde elde edilen değerler patlamalı kaynakla güçlü bağlantılar olduğunu göstermiştir.

Livne ve Munitz (74), farklı parametreler kullanarak çelik ve bakır plakaları birleştirmişler ve birleşme arayüzeyinde metalografik incelemelerde bulunmuşlardır. Araştırmacıların yapmış oldukları incelemeler sonuçlarında çelik ve bakır plakaların birbirleriyle rahatlıkla birleştirilebildiklerini belirtmişlerdir. Yine araştırmacıların belirttiklerine göre, çelik ve bakır plakalar arasında düzenli bir dalga oluştuğu ve arayüzeyde metaller arası bileşiklerin oluşmadığı gözlenmiştir. Araştırmacılar, patlayıcı miktarının ve ara boşluk mesafesinin artmasıyla beraber arayüzeyde oluşan dalgaların boylarında ve enlerinde bir takım farklılıkların gözlemlendiğini yapmış oldukları çalışmalar sonucunda belirtmişlerdir.

3.6.1. Birleştirilecek malzemelerin boyutları

Patlama kaynağı çok küçük ebatlardaki parçaların birbirleri ile birleştirilmelerine uygun olduğu kadar hayli geniş ebatlara sahip parçalarında birleştirilebilmelerine imkan sağlamaktadır. Aynı zamanda çok ince ve kalın sayılabilecek parçalarında birleştirilebilmeleri mümkündür. Bu yöntem ile elektronik sanayiinde kullanılan 0,5 mm² genişlikteki parçalar ve kaplamada kullanılan 65 m² ebatlarındaki parçalar birleştirilebilmektedir (28,75).

Diğer bir kaynakta ise (33) 90-120 m² genişlikteki parçaların birleştirilebildiği belirtilmektedir.

Kaplanan metalin kalınlığı 0,025 mm ile 100 mm arasında değişirken, esas metalin kalınlığı ise 0,025 mm ile 1 m arasında değişebilmektedir (28).

3.7. Patlamalı Kaynak Uygulamalarının Avantaj ve Sınırlılıkları

Her kaynak yönteminin olduğu gibi patlamalı kaynak yönteminin de bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu özellikler patlamalı kaynak yönteminin tercih edilip edilmemesinde önemli rol oynarlar. Bu yöntemin avantajları maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir (33,49).

- Geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen farklı metallerin kaynağı bu yöntemle yapılabilir.
- Kaynak bölgesi en az ana malzemenin dayanımı kadar bir dayanıma sahiptir ve en zor çalışma gerilmelerine karşı mukavemet gösterebilir.
- Bu yöntemle elde edilen ısı değıştirciler herhangi bir sızıntı olmaksızın en zor koşullarda çalışabilme yeteneğine sahiptir.
- Soğuk işlem olduğu için karbonun difüzyonu olmaksızın metalurjik bir sınır form elde edilebilir.
- Soğuk işlem olduğundan birleştirilen malzemelerin özelliklerinde dikkate değer bir değışim olmaz.
- Nükleer reaktörler gibi insan sağlığına zararlı çalışma ortamlarında uzaktan işlem kontrolü ile birleşme sağlanabilir.
- Ergime sıcaklığı yüksek olan alaşımlar daha düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerle birleştirilebilir.
- Tamir bakım masraflarını azaltıcı bir birleşme olanağı sunar.
- Birleşme anındaki fişkırmadan dolayı yüzeyinde oksit tabakası bulunan metallerin birleştirilmesi de mümkündür.
- Diğer birleştirme işlemlerinde olduğu gibi özel ekipmanlara gerek duyulmaz.
- Birleştirme için gerekli olan patlayıcılar düşük bir fiyatla temin edilebilir.

Patlamalı birleştirmenin yukarıda sıralanan olumlu özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Bu birleştirme işlemi aşırı derecede gürültülü ve patlayıcılardan dolayı tehlikeli olması nedeniyle boş alanlarda – arazide yapılması uygun olur.
- Gevrek malzemeler işlem esnasındaki plastik deformasyon ve darbeden dolayı kırıldıkları için birleştirilemez.

3.8. Patlayıcılar

Patlayıcılar katı, sıvı ve gaz halde bulunabilir. Kimyasal reaksiyon hızına bağlı olarak ideal ve ideal olmayan patlayıcılar olmak üzere iki genel kategoriye ayrılırlar. Çoğunlukla kaynak için ideal olmayan patlayıcılar sınıfındaki patlayıcılar kullanılır. Bu patlayıcılar askeri veya silah sanayiinde kullanılan yüksek hızlı patlayıcılar kadar hassas değildirler ve fiziksel durumlarından dolayı kolayca patlatılamazlar. İdeal patlayıcılar patlama ile metallerin şekillendirilmesi ve birleştirilmesinden ziyade silah ve roketlerde kullanılırlar (28,36,37).

İdeal olmayan patlayıcılar, ilk ve ikincil patlayıcılar olarak ikiye ayrılır. Patlamalı metal şekillendirmesi için enerji kaynağı olarak ikincil patlayıcılar kullanılır. İkincil patlayıcılar ilk patlayıcılardan daha fazla patlama enerjisine sahiptir. Fakat daha az hassastırlar ve sadece ani şokla patlatılabilir (37).

Katı haldeki yüksek patlayıcının patlaması boyunca patlama dalgası başlangıç noktasından patlayıcı boyunca hareket ederek katı haldeki patlayıcıyı milimetre kare başına milyonlarca kg'lık ani bir basınçla aynı hacimdeki gaz kütlesine dönüştürür ve büyük miktarlarda ısı açığa çıkar. Bu yüksek sıcaklığın genleşmesi yapıcı yada yıkıcı amaçlar için kullanılabilen enerjiyi sağlar. Farklı tip patlayıcılar birim kütle başına farklı enerji miktarları açığa çıkartırlar. Patlayıcının patlama özelliği kompozisyonuna, parçacık boyut dağılımına, dökme veya paketlenme yoğunluğuna, nem içeriğine ve bazı durumlarda da kullanım ömrüne bağlıdır. Aşağıda patlamalı kaynak ve patlama ile şekillendirmede kullanılan bazı patlayıcılar ve özellikleri verilmiştir (49).

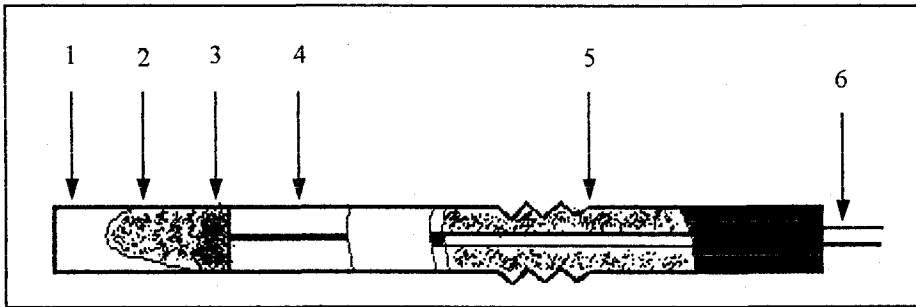
1. TNT (Trinitrotulence): Askeri bir patlayıcıdır ve diğer toz patlayıcıların ölçümünde kullanılır. 7000 m/s'lik patlama hızına sahiptir. Suda çok az çözünebilir ve nem geçirmez ambalaj olmaksızın su altı çalışmaları için kullanılabilir. Patladığında zehirli gaz açığa çıkarttığı için kapalı alanlarda kullanılmamalıdır. Hassas olmamasından dolayı çok güçlü bir patlayıcı kapsüle gerek duyulur.

2. RDX (Cyclotrimethylene-Trinitramine) : Saf RDX 204°C'de erir ve 1.816 g/cm³ yoğunluktadır. Daha yüksek yoğunlukta döküm yada presleme ile elde edilebilir. Diğer patlayıcılarla bir miktarda kombinasyon halinde kullanılabilir. Higroskopik değildir ve suda çok az çözünür. Saf halde ıslak olarak yüklenebilir ve patlama hızı yaklaşık olarak 8382 m/s'dir.
3. PETN (Pentaerythritol-Tetranitrate): Saf PETN 141,3 °C'de erir ve 1,765 g/cm³'lük bir yoğunluğa sahiptir. RDX gibi PTEN'de higroskopik değildir ve suda çok az çözünür. Diğer patlayıcılarla kombinasyon halinde kullanılabilir. Ticari olarak levha halinde bulunur. Mükemmel bir depolama ömrü vardır fakat kuru halde tutulmalıdır. Su altı patlamaları için kullanılabilir ve patlama hızı yaklaşık olarak 8290 m/s'dir.
4. C3-C4 Kompozisyonu: İstenilen şekle elle modellenen plastik patlayıcılardır. C3 %77 RDX ve %23 mononitrotluene içeren patlayıcı ve plastik yapıcı (yumuşatıcı) karışımıdır. 1,60 g/cm³ yoğunluklu sarımsı bir macundur. Çarpma için RDX'den daha az hassastır ve TNT hassasiyetine eşittir. Patlama hızı yaklaşık 7620 m/s' olup çok az higroskopiktir fakat gücü sudan etkilenmez. C3 kompoziti aşırı derecede zehirlidir. C4 kompoziti çarpma için C3'den daha az hassasiyettedir ve yaklaşık 8046 m/s'lik bir patlama hızına sahiptir. C3'den daha iyi bir depolama ömrüne sahip olup higroskopik olmayıp zehirli değildir. Bundan dolayı da özel önlemlere gerek duyulmaz. Elle herhangi bir şekle göre şekillendirilebilir fakat geniş ebatlarda şeklini korumak için taşıyıcıya ihtiyaç duyulur.
5. Anfo (Amonyumnitrat-%6 fuel oil): Anfo, fuel oil ve amonyumnitrat'tan oluşan bir karışımdır. Teorik olarak oksijen dengesi için fuel-oil miktarı %5,7'dir. Ancak genelde %6 kullanılır. Patlama hızı yaklaşık olarak 3500 m/s dir. Anfo fazla miktarlarda kullanım için betoniye mikserlerinde karıştırılır. Küçük miktarlarda ise plastik bir kap içerisinde elle karıştırılır. Eğer karışımdan sonra

patlayıcı kapalı ortamda tutulmazsa fuel-oil buharlaşır. Bu nedenle anfonun 24 saat içerisinde tüketilmesi gerekir.

Silah ve askeri sanayiide kullanılan barutun patlatılması bir alevin temasıyla sağlanabilir. Patlama ile birleştirme işleminde patlamaya karşı hassas olmayan patlayıcılar kullanıldığından bu patlayıcılar kolayca patlatılamazlar. Bu tür patlayıcılar, daha hassas patlama özelliklerine sahip olan ve kapsül yada fûnye olarak bilinen patlayıcılar yardımıyla patlatılmaktadırlar. Bu patlayıcı maddelerin patlatılmasında, alev ile birlikte kuvvetli bir darbe veya basınca gerek vardır. Bu görevi de tüp şeklindeki fûnye yerine getirmektedir.

Fûnye, içinde az miktarda ve çok kolaylıkla patlayabilen bir madde bulundurur. Fûnyeden beklenen kendisinin bir iş görmesi değil, sadece birlikte bulunduğu patlayıcıyı patlatmaktır. Tüp şeklindeki fûnyede patlayıcı madde olarak TNT veya benzeri bir bileşim kullanılır. Bu bileşimi patlata bilmek için tüpün üst kısmında patlamaya daha duyarlı patlayıcı madde bulunur. Bunlar civa fûlminatı (HgCNO_2), gümüş fûlminat (AgCNO_2), kurşun asidi ($\text{Pb}(\text{N}_3)_2$), gümüş asidi (AgN_3) gibi çok kuvvetli patlayıcı maddelerdir. Bunlar her türlü vurma, ezilme, şekil değiştirme veya ısınma gibi dış etkenler altında kolayca patlamaması için metalik tüp içine konulmuştur (Şekil 3.8.) (49).



Şekil 3.8. Patlayıcıların patlatılmasında kullanılan fûnye

Şekil 3.8’de kesiti görülen fûnye aşağıdaki bölümlerden oluşmuştur;

1. Görünen kısım alüminyumdan oluşan silindirik bir kabuktur.
2. Ana şarj, fûnyeye gücü veren yüksek hassasiyetteki patlayıcı.

3. Birinci şarj, aleve duyarlı madde.
4. İstenen gecikme zamanı, bir alüminyum tüp (gecikme elemanı) ile sağlanır.
5. Fünye aynı zamanda tüpün bir kısmını sudan koruyacak olan lastik koruyucu tıpa ile kıvrımlı bir şekilde sıkıştırılmıştır.
6. Serbest ucu su sızdırmaz şekilde tıkalı, belirlenen uzunlukta olan tüp.

3.8.1. Patlayıcı seçiminde dikkat edilecek özellikler

Metallerin birleştirilmesi ve şekillendirilmesi için kullanılacak olan patlayıcıda aranan özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (35,36);

- Taşıma ve yerleştirme işlemi boyunca güvenli olmalıdır.
- Açığa çıkan enerji sürekli olmalıdır.
- Bir taşıyıcıda patlayıcıyı kaplamaya gerek olmaksızın şeklini koruyabilmelidir. Çünkü patlayıcının parçalanması şok dalgasının düzenini bozar ve metalik malzemeye zarar verebilir.
- Patlayıcılar uzun süre depolarda bozulmaksızın muhafaza edilebilmelidir. Ayrıca en az dört saate kadar güneş ışığında bozulmamalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.
- Piyasada rahatça bulunabilmelidir.
- Özel saklama yada yükleme gereksinimi olmamalıdır.
- Patlayıcı kapsülle su altında kolaylıkla patlayabilmelidir.

3.8.2. Türkiye’de üretilen patlayıcı maddeler ve kullanma yerleri

Türkiye’de patlayıcı maddeler, Makine Kimya Endüstrisi Kurumunun (MKE) Elmadağ patlayıcı maddeler fabrikasında (Barutsan A.Ş.) değişik amaçlar için kullanılmak üzere çeşitli tiplerde üretilmektedirler. MKE fabrikalarında üretilen patlayıcı maddeler genellikle 25-30 mm çapında ve 100-200 mm uzunluğunda silindirik halinde piyasaya sürülmektedirler. Kartuş veya lokum ismi verilen dinamitler 2,5 kg’lık karton kutular veya 25-30 kg’lık tahta sandıklar içinde alıcılara teslim

edilmektedirler. Toz patlayıcılar ise 25 kg'lık çuvallar halinde üretilmektedirler. Açık işletme ve taş ocakları için daha büyük boyutlarda üretimde yapılmaktadır.

Ülkemizde patlayıcılar genellikle çok sert kayaların parçalanmasında, taş ocaklarında ve maden kömürü ocaklarında kullanılmaktadırlar. Tüketicinin değişik şartlarda kullanacakları patlayıcı maddeleri birbirinden ayırt edebilmesi için bunların farklı renkteki ambalajlara sarılması uluslar arası anlaşmalarla standartlaştırılmıştır. Çizelge 3.3.'te ülkemizde üretilen bazı patlayıcı maddeler verilmektedir (49).

Çizelge 3.3. Türkiye'de üretilen patlayıcı maddeler ve özellikleri

Tipi	İsmi	Patlama hızı m/sn
Gom Dinamitler	Gom I	7900
	Gom II	7600
	Gom II-A	7200
	Kara Gom II-A	7025
Jelatin Dinamitler	Jelatin	7025
	Kara Jelatin	6975
	Jelatin-A	6375
	Jelatin-B	6300
	Amon Jelatin-A	6375
	Amon Jelatin-E	6250
	Kara Amon Jelatin-E	6200
	Jelatinit	6225
	Kara Jelatinit	6175
	Gamzit	6175
	Kara Gamzit	6175
Yarı Jelatin ve Toz Dinamitler	Grizutin Klorür-I	5260
	Grizutin Roş	6150
	Grizutin Roş-I	5800
	Grizutin Kuş	4425
	Grizutin Kuş-I	4300
Toz Dinamitler	Elmonit-I	4900
	Elmonit-II	4950
	Elbar	4200
Barut	Kara Barut	400

Patlamalı kaynak yöntemi ile ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalarda ve patentlerde kullanılan patlayıcılar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

Hokamoto et al. [68], alüminyum alaşımlarını paslanmaz çeliğe patlamalı birleştirmede amonyum nitrat esaslı toz patlayıcı kullanmışlardır. Mamalis et al. (76),

titanyum-nikel patlamalı birleştirmesinde içerisinde %78 amonyum nitrat, %20 trinitrotuluen ve %2 dinitrotuluen bulunan Poxit 4 adlı patlayıcı kullanmışlardır. Bement (77), alüminyum alaşımları, bakır ve titanyumun birbirleriyle patlamalı birleştirmelerinde Ribbon RDX patlayıcısını kullanmıştır. Otto ve Carpenter (54), elik levhayı kurşunla patlama ile kaplamada %40 jelatinit dinamit ve amonyum nitrat fuel-oil (anfo) karışımı kullanmışlardır. Bhalla ve Williams (78), elik tel takviyeli alüminyum kompoziti üretiminde trimonite tozu kullanmışlardır. Büyük çoğunluğunu nitrik ester'in oluşturduğu (SEP) plastik patlayıcısı Nishida et al. (79,80), tarafından kullanılmıştır. Hokamoto et al. (81), metal esaslı kompozit üretiminde patlayıcı olarak amonyum nitrat kullanmışlardır. Johnson (73), ısı değiştiricilere tıpanın patlamalı kaynağında Nitroguanidin patlayıcısını kullanmışlardır. Truetnev et al. (72), alüminyumun titanyum, elik ve nikele patlamalı kaynakla birleştirilmesinde amonyum nitrat ve amonit 6ZhV karışımı toz patlayıcı kullanmışlardır. Zimmerly et al. (71), amonyum nitrat %6 fuel-oil (anfo) toz patlayıcısını kullanmışlardır. Livne ve Munitz (74), demir ve elik levhaların birleştirilmesinde trinitrotuluen ve amonyum nitrat karışımı toz patlayıcı kullanmışlardır.

3.9. Uygulama Alanları

Patlamalı kaynak işleminin günümüz endüstrisinde bir çok uygulama alanı mevcuttur. Bu uygulama alanlarından başlıcaları aşağıda belirtilmektedir.

3.9.1. Levha kaplama

Günümüzde ticari olarak levha kaplamasına büyük önem verildiği bilinmektedir. Patlamalı kaynağın gelişimine kadar levha kaplama işlemi sadece sıcak haddeleme yada diğer kaynak işlemleriyle mümkün olmuştur. Sıcak haddeleme işlemi de temel olarak bir basınç kaynağıdır. Tek malzeme yerine kaplanmış levha kullanımının nedeni, düşük maliyette korozyon direnci, arttırılmış ısı transfer karakteristikleri, düşük maliyette kabul edilebilir dayanım ya da rijitlik, geliştirilmiş elektriksel özellikler veya daha iyi aşınma ve erozyon direncidir. Bazı kimyasal işlem

tesislerinde ısı transferini geliştirmek veya kimyasal etkilenmeyi engellemek için nikel, paslanmaz elik, titanyum, tantalyum gibi kazanların imalatında pahalı metalleri kullanmak gerekebilmektedir. Bu tip malzemelerden yapılacak olan büyük ebatlardaki kap yada kazanlar için bu malzemelerin fiyatları tek başlarına pahalı olacaktır. Böyle kap ve kazanların üretiminde levha kalınlığı maliyetinin yanı sıra kaynaklı bağlantı yapımı da ek bir maliyet gerektirmektedir. Böyle durumlarda patlama ile kaplanmış levha kullanımı oldukça ekonomik olmaktadır. Günümüzde çok geniş kap ve kazanlar patlama ile kaplanmış levhalardan üretilmektedir. Örneğın; Amerika'da bir firma aromatik asitlerin üretiminde kullanılan kazanlar için titanyum kaplı elik levhalar üretmiştir. Böyle bir kazan, 7 m. boyunda ve 2,44 m. apında ve 2 mm'lik titanyum kaplı 22 mm'lik SA 516-70 elik levhadan üretilmiştir. Bu firma yine kazan yapımında kullanılmak üzere 2,44 m. apında 18,3 m. uzunluğunda bakır-elik kaplamasını patlama ile üretmiştir (49,56,82-84).

Son yıllarda kimyasal kazanlar ve ısı değiştiriciler için kaplanmış levhalar önemli bir yapı malzemesi olmuştur. Kap, kazan imalatında kaplanmış levhaların kullanımı, karbonlu çelikler gibi ucuz genel yapı malzemeleri ile paslanmaz elik, titanyum, bakır gibi yüksek korozyon ve ısı iletim özellikli malzemelerin kombinasyonunu içerir. 1960'ların başında patlamalı kaynakla kaplı levhaların ticari olarak elde edilmesinden önce kaplanmış levha üretimi, ergitme kaynağı veya sıcak haddeleme ile birleştirilerek yapılmaktaydı. Bu yüksek sıcaklık işlemleri hem malzeme ölçüsü hem de malzeme kombinasyonu ile sınırlıydı. Patlamalı kaynak hem elde edilebilir kaplanmış levhaların kalitesini, hem de ölçü genişliğini arttırmıştır. Paslanmaz elik en geniş kaplama malzemesi olarak kullanılmasına rağmen, titanyum, alüminyum, bakır, zirkonyum gibi daha değişik malzemeler de artan bir uygulama alanı bulmuştur. Kaplanmış levhalar, kaplanmamış yapı malzemeleri için kullanılanlara benzer işlemler kullanılarak kesilebilmekte ve biimlendirilebilmektedirler (27,49,85,86).

Kaplanmış levha kullanımı basınçlı kaplar, ısı değiştiriciler ve tüp levhaların yanı sıra aşağıda sıralanan alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (49).

- Yüksek sıcaklıkta kullanımlar için kimyasal fabrikalarda asidin taşınmasında bakır kaplı paslanmaz çelik buhar kazanları.
- Su ve nükleer atık taşıyıcıları. (Bakır kaplı paslanmaz çelik ve nikel kaplı orta karbonlu çelik)
- İyi termal özelliklere, tokluk ve iyi bir görüntüye sahip yemek pişirme kapları. (Paslanmaz çelikle kaplı bakır ve/veya orta karbonlu çelik)
- Çift sertlikte zırhlı levha. (Yumuşak çelik yada alüminyumla birleştirilmiş zırhlı levha)
- Klorid iyonları içeren atık su ıslahı için kazanlar. (Titanyum kaplı orta karbonlu çelik)

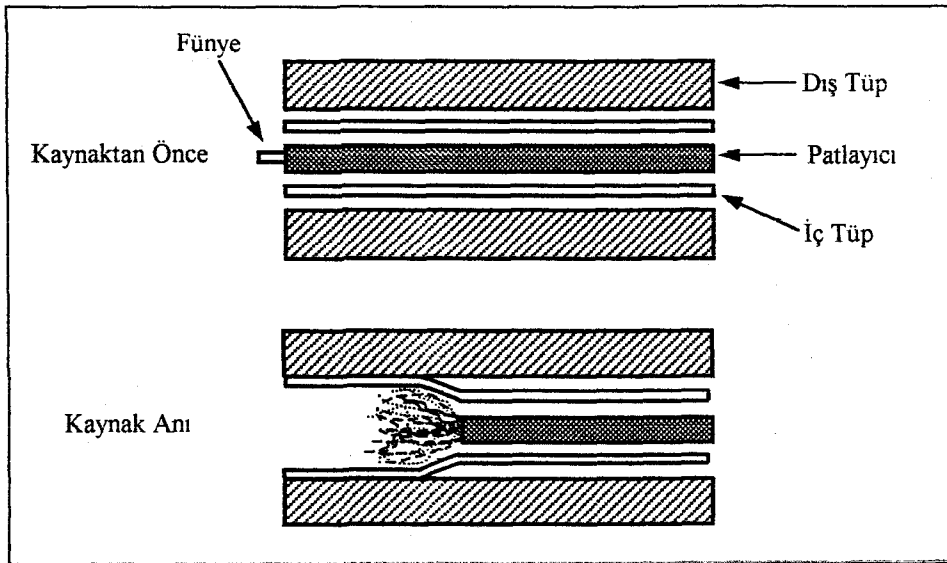
3.9.2. Farklı metallerin birleştirilmesi

Birbirine zıt iki metal arasında birleştirme kaynağı yapmak çok zor veya bazen imkansızdır. Yapılabilenler ise çok az dayanıklılık ve sağlamlık gösterir. Patlamalı kaynakla yapılmış birleştirmeler bu probleme çözüm sağlamaktadır. Patlamalı kaynağın belki de en büyük avantajı diğer yöntemler ile kaynağı güç yada imkansız olan metallerin yaklaşık tüm kombinasyonları arasında metalurjik birleşme sağlayabilmesidir. Özel kullanımlar, elektrik kontakları, yüksek elektriksel davranış, genellikle tek malzemede bulunamayan yüksek aşınma direnci ve düşük maliyet içeren özelliklerin bir kombinasyonuna gerek duyar. Patlamalı kaynakla bu tip özelliklere sahip birleşmeler rahatlıkla elde edilebilmektedir. Küçük patlayıcı şarjların taşınabilmesinden dolayı bir çok bağlantı fabrika ortamlarından ziyade uygun herhangi bir yerde de yapılabilmektedir. Alüminyum, bakır ve çelik elektrik sistemlerinde en çok kullanılan metallerdir. Her birinin özelliğinden dolayı da bunların birbirleriyle birleştirilmesi gereği duyulmaktadır. Bu tip bağlantılar yüksek amperde minimum güç kaybının olması ve kullanım esnasında aşırı ısınmadan sakınılması gereken yerlerde oldukça sağlam olmalıdır. Patlamalı kaynakla birleştirilen paslanmaz çelik-bakır levhalardan elde edilen bağlantılar etkili şekilde elektrik iletkenliği sağlamaktadır (49,87,88).

3.9.3. Silindirik yüzeylerin kaynağı ve kaplanması

Silindirik yüzeylerin patlamayla kaplanması bu yöntemin ilk gelişme alanlarından birisidir. Bu yöntem başlangıçta korozyon direncine sahip olması istenen buharlı elektrik santrallerinde nozullara uygulanmıştır. Bakır, alüminyum, çelik yada diğer kompozit malzemeli içi boş silindirlerde, örs görevini üstlenecek olan bir dış silindir kullanılarak iç yüzey kaplama veya içerdeki tüpün bozulmasını engellemek için içe yerleştirilecek dolu bir çubuk kullanılarak dış yüzey kaplama üretilmiştir (49,89).

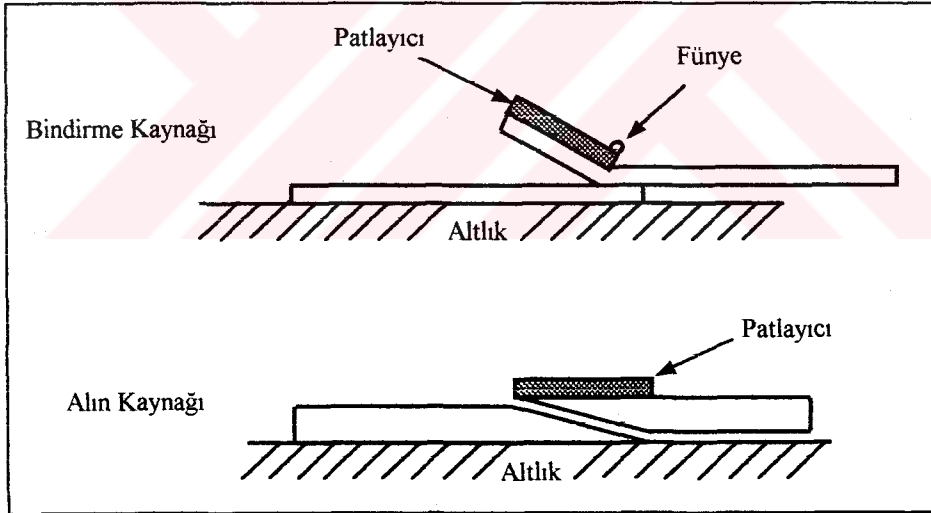
Silindirik yüzeylerin patlamayla kaplanmasında kullanılan üç değişik sistem vardır. Bunlardan birincisinde patlayıcı iç tüpün içine yerleştirilir ve gerek duyulursa dış tüp bir destek vazifesi görececek olan bir silindire dışardan desteklenir. Bu desteklemenin amacı altlık olarak düşünülebilir. Eğer tekrar gerek duyulursa dış tüpün destek silindire kaynağını engellemek için araya bir tampon tabaka konulabilir. Şekil 3.9'da iç tüpün dış tüpe kaplanması şematik olarak gösterilmiştir. Paralel bir kaynak düzeneğinde olduğu gibi hem iç hem de dış tüp kaplamada, sıkıştırıcı dalga hızından daha az patlama hızlı bir patlayıcı kullanmak gerekmektedir. Böylece patlayıcının kararlı bir şekilde patlaması sağlanmaktadır.



Şekil 3.9. Tüplerin patlamayla kaplanması

Diğer bir tüp kaplama sistemi de dış kaplamadır. Bu sistemde patlayıcı dış tüpü çevreleyen silindirik bir formdadır. Burada iç tüp deformasyonunu engellemek için tüp, içten altlık görevini görecektir bir destekleyiciyle desteklenmelidir. Başka bir kaplama sisteminde ise iç ve dış tüp arasında bir miktar araboşluk mesafesi kalması şartıyla iç tüpün içine, dış tüpün dışına patlayıcı yerleştirilir. Bu sistem uygun patlayıcı kullanıldığı takdirde ideal bir düzenleme olarak gösterilebilir (49).

Patlamalı kaynağın esas uygulama alanı düz levha kaplama ve silindirik yüzeylerin kaplanmasıdır. Genellikle patlamalı kaynak karmaşık şekilli parçalara uygulanmaz. Bununla birlikte düz levha kaplama ve silindirik yüzeylerin kaplanması dışında patlamalı kaynağın değişik uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Genellikle bindirme kaynağı esasına dayanan bu uygulamalar Şekil 3.10'da şematik olarak gösterilmiştir (56).



Şekil 3.10. Patlama ile bindirme ve alın kaynağı

3.10. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Kaynak Kabiliyetleri

Tez çalışmasının konusu olan patlamalı kaynak yöntemi ile paslanmaz çelik ve bakır malzemeler birleştirilmişlerdir. Kullanılan bu malzemelerin kaynak kabiliyetleri hakkında aşağıda kısaca bilgi verilmektedir.

3.10.1. Paslanmaz çelik ve kaynak kabiliyeti

Çağımız endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çeliklerin her geçen gün kullanım alanlarının genişlemesinin ana nedeni korozyon ortamlarda mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir. Farklı özelliklerde bulunabilen ve kolaylıkla şekillendirilebilen bu çeliklerin geliştirilmiş kaynak yöntemleri ile başarılı bir şekilde kaynak edilebilmeleri de uygulama alanlarını daha da yaygınlaştırmaktadır (90).

Yüksek korozyon direnci ve yüksek akma direncine sahip olan paslanmaz çelik malzemeler kimya sanayii, sağlık sektörü ve mutfak sanayii gibi bir çok alanda kullanıma sahiptir.

Paslanmaz çelik malzemeler ısı iletim katsayıları bakımından karbonlu çeliklerden oldukça farklıdır. Örneğin; ferritik - kromlu paslanmaz çeliklerin ısı iletim katsayıları karbonlu çeliklerinkinin yaklaşık yarısı kadardır. Östenitik krom - nikelli paslanmaz çeliklerinki ise daha düşük olup karbonlu çeliklerin üçte biri kadardır. Bu da kaynak yapılan bölgede sıcaklığın daha uzun süre kalacağını göstermekte olup kaynak bölgesinde bazı zorlukların ortaya çıkmasına neden olacaktır. Aynı zamanda östenitik paslanmaz çelikler karbonlu çeliklerden yaklaşık % 50 daha fazla genleşme katsayılarına sahiptirler. Bu fiziksel özelliklerinden dolayı paslanmaz çeliklerin kaynağında karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme olayı oluşmakta ve kaynak dikişinin soğuması esnasında bu bölgede oluşan şiddetli iç gerilmeler çatlama tehlikesine yol açabilmektedir (91, 92).

Paslanmaz eliklerin kaynakla birleştirilmelerinde fiziksel özelliklerini dikkate almak gereklidir. Fiziksel zelliklerin yanı sıra bir dizi metalurjik etken de paslanmaz çeliklerin kaynağında önemli rol oynamaktadır. Paslanmaz eliklerin ergitmeli kaynaklarında yapıda oluşan delta ferrit fazı, taneler arası korozyon ve sigma fazı malzemelerin sıcak çatlama eēilimini arttırdığı, metaller arası gevrek bir yapı meydana getirdiēi, eliēin uzama, büzülme ve çentik darbe dayanımını dřrdēęi için istenmeyen oluşumlardır. Bu oluşumların meydana gelmesi paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedirler.

Paslanmaz eliklerde kaynak aēızlarının özenle hazırlanması kaynaēın kalitesinin n şartlarındandır. Paslanmaz eliklerin yüzeylerinde bir kromoksit filmi oluřtuēundan oksijenle kesilmesi mümkün deēildir. Dolayısıyla paslanmaz eliēi kesmek için mekanik kesme veya plazma kesme gibi yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Isıl kesmeler kaynak aēızlarında yapısal deēiřimlere neden olacaēından kesilen kenarların özenle taşlanması gerekmektedir. Kullanılan taşın başka metaller üzerinde kullanılmamış olmasına da dikkat edilmelidir. Birleştirilecek olan parçaların kaynak aēızları ve kenarları kaynak işleminden önce oksit, yaē, gres ve diēer kötü etkenlerden iyice temizlenmelidir.

Paslanmaz elikler ark kaynak yöntemlerinin büyük bir bölümü ile rahatlıkla kaynak edilebilmekte olup başlıca kullanılan yöntemler örtülü elektrod ile ark kaynaēı, MIG, TIG, plazma, zl tellerle ark kaynaēı ve tozaltı ark kaynaēı olarak sıralanabilir (91).

Kaynak işleminden sonra östenitik paslanmaz çeliklere de bir gerilme giderme tavlaması uygulanabilir. Tav sıcaklığı genelde 800-925 C arasında seçilir. Bu tav işlemi sadece karbür çökelmesi ve sigma fazı oluşumu tehlikesi olmayan (% 9'dan daha az nikel içeren) stenitik paslanmaz çeliklere uygulanabilir (91, 93).

Paslanmaz elikler oldukça sık kullanılan ve kaynakla birleştirilen bir elik grubudur. Bu tür çeliklerin kaynaēında metalurjik bir çok etkenin rol oynamasının yanı sıra konstrüksiyon bazında da bir takım önlemler almak gerekmektedir.

3.10.2. Bakır ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti

Bakır, alaşımsız şartlarda ve diğer metallerle alaşımlarında yaygın olarak kullanıldığı için önemli bir mühendislik metalidir. Alaşımsız yapıda olağan üstü özellikler kombinasyonuna sahiptir. Bu özellikler bakırı elektrik endüstrisinin esas malzemesi haline getirmiştir. Bu özelliklerden bazıları yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci, yeterli çekme dayanımı, ısı iletkenliği, kontrol edilebilen tavlama özellikleri ve genel lehimleme ve birleştirme özellikleridir. Diğer metallerle oluşturulan prinç ve bronzun geniş çeşitliliği de alaşımlandırılan bakırı pek çok mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez hale getirmektedir (94).

Bakır malzemelerin yüksek ısı iletkenliği, yüksek ısıl genleşmeleri ve sıvı halinde gazları absorbe etmesi özelliklerinden dolayı kaynak kabiliyetleri kötü olup kaynak işlemleri özel bir dikkat gerektirir.

Saf bakır 1083 °C'de ergir ve bu sıcaklıkta katılaşma sırasında kısmen çıkan gazları eritir ve bu gazlar geride kalan metalin gözenekliliğine sebep olur. Bakır ısıyı ve elektriği en iyi ileten metallerden biridir, aynı zamanda kimyasal olarak oksijenle çabuk reaksiyona girer. En saf olarak üretilebilen ve satılan metaldir. Elektrolitik bakır %99 saflıktadır ve %0,05 bakır-oksit bakır içinde ötektik olarak dağılır. Kaynak yapılırken aslında çok yumuşak olan malzeme bakır-oksitlerin tane sınırlarına göçü nedeniyle sünekliğini kaybeder. 700 °C'nin üstünde karbon monoksit ve hidrojen absorpsiyonu bakır oksidi ile reaksiyon sonucu karbondioksit ve su buharı meydana getirip iç çatlama ve gevrekleşme meydana getirerek bakırın kaynağını güçleştirir (95).

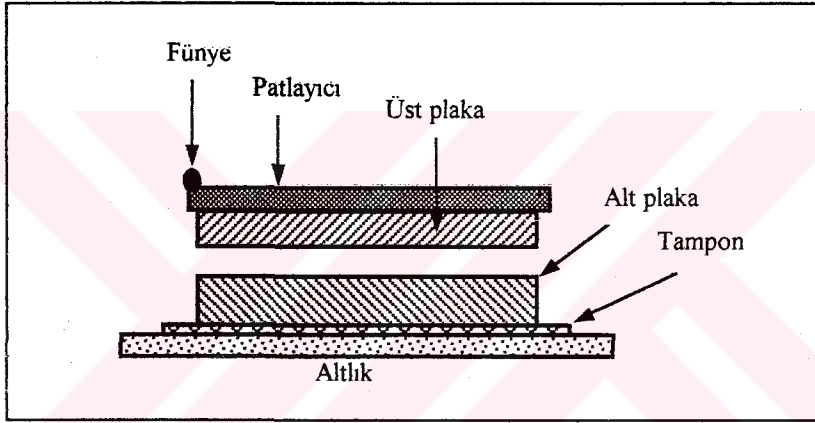
Küçük miktarlarda silis, fosfor veya diğer oksit gidericilerin bakıra eklenmesiyle oksijeni giderilmiş bakır elde edilir. Oksijeni giderilmiş bakırların kaynağı daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Oksijen giderici elementler, oksijenin bakırla birleşerek tane sınırlarında bakır-oksit oluşumunu engellerler.

Bakırın oksijene olan eğilimi kaynağı zorlaştıran bir çok karakteristiktir sadece biridir. Bakır, çeliğe göre daha düşük sıcaklıklarda ergimesine rağmen, belli miktardaki bakırın elektrik arkı ile ergitmek aynı boyutta çeliği ergitmekten daha zordur. Bu, bakırın yüksek termik iletkenliğe sahip olmasının bir sonucudur. Bakırın kaynak yaparken, kaynak bölgesine yakın bölgeler ısıyı verildiği hızda çeker. Yakındaki metal, yeteri kadar ısınmadan kaynak bölgesi ergime noktasına ulaşmaz. Bakırın yüksek ısı iletkenliği, kaynak yaparken ön ısıtmanın yapılmasını gerektirir. Bakır malzemeler aynı zamanda çeliklerden daha yüksek termik genleşme katsayısına sahiptir. Bu da bakırın ısıtılırken çok genleşeceği ve soğurken de çok çekeceği anlamına gelir ki bu, kaynak işlemini gerçekleştiren operatörlerin sürekli karşılaştıkları kaynak çatlağı probleminin önemini gösterir. Kaynak işleminden sonra dikişin çekişlenmesi kaynak dikişinde ve çevresindeki gerilmeleri azaltıcı etki yaparak çatlak oluşmasını engelleyebilir (95,96).

Bakır alaşımlarının kaynağa uygunluğu çeşitli olup alaşım cinsine ve özelliklerine bağlıdır. Bakır alaşımlarının kaynağında bilinen ergitme kaynak yöntemleri kullanılabilir. Fakat günümüzde uygulanan yöntemlerin başında TIG ve MIG kaynak yöntemleri gelmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada patlamalı kaynak işlemi parametrelerinin en önemlisi sayılan ara boşluk mesafesi (s) ve patlayıcı oranının (R) birleştirilebilirliğe etkisini araştırmak amacıyla bakır ve paslanmaz çelik malzemeler birleştirilmişlerdir. Deneyler sırasında patlamalı kaynak yöntemi geometrilerinden olan paralel levha birleştirme geometrisi kullanılmış ve kaynak parametrelerinin birleşme arayüzey ve metalurjik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Aşağıda Şekil 4.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan paralel levha birleştirme geometrisi düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Paralel levha birleştirme geometrisi deney düzeneği

4.1. Malzeme

4.1.1. Birleştirilen malzemeler

Deneylerde bakır ve paslanmaz çelik birleştirmelerinde kullanılan ve kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de verilen 200x200x1,5 mm ebatlarında, 400 HV sertlik değerine sahip paslanmaz çelik ile 200x200x2 mm ebatlarında, 113 HV sertlik değerine sahip % 99,98 saflığında temin edilen bakır levhalar kullanılmışlardır.

Çizelge 4.1. Paslanmaz çelik levha kimyasal bileşimi

Element	Fe	Ni	Cr	Mn	Si	Cu
% Ağırlık	69,58	9,78	17,99	1,46	0,299	0,312

4.1.2. Patlayıcı

Deneylerde MKE'ye bağlı Barutsan A.Ş.'nin üretmiş olduğu Amonyumnitrat esaslı Elbar 5 kodlu toz patlayıcı ve fûnye (kapsül) kullanılmıştır. Kullanılan Elbar 5 kodlu patlayıcının bileşimi Çizelge 4.2'de ve teknik özellikleri de Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Elbar 5'in bileşimi

Malzeme adı	Miktarı
Amonyumnitrat	% 92
Motorin	% 5 en az.
TNT	% 3 en az

Çizelge 4.3. Elbar 5'in teknik özellikleri

Dökme yoğunluğu	0,75 g / cm ³
Kurşun blok testi	400 cm ³ / 10g, en az
Patlama hızı	3500 m / sn, en az

Kullanılan Elbar 5 kodlu toz patlayıcının patlama hassasiyetinin düşük olmasından dolayı fûnye ile toz patlayıcı arasında daha hassas bir patlayıcı olan yine Barutsan A.Ş.'nin üretmiş olduğu bir miktar (10 g) jelatinit dinamit kullanılmıştır.

4.1.3. Altlık

Deneysel çalışmada patlama ile birleştirme işlemleri 1500x2000x150 mm ebatlarında, kum havuz içerisine yerleştirilmiş çelik tabla üzerinde gerçekleştirilmiştir. Birleştirme işlemi esnasında levhaların, altlığın akustik özelliğinden zarar görüp ayrılmasını ve geri fırlamayı engellemek amacıyla alt levha ile altlık arasında 5 mm kalınlığında lastik bir tabaka kullanılmıştır.

4.2. Deneylerin Yapılışı

Deneylerde, ara boşluk mesafesinin ve patlayıcı oranının birleşmeye olan etkilerini görmek amacıyla bu iki parametre ile farklı şartlarda birleştirmeler yapılmıştır. Ara boşluk mesafesi üst parça kalınlığı ile ve patlayıcı oranı ise üst parçanın ağırlığıyla orantılıdır. Birleştirme işlemlerinde üst parça olarak 1,5 mm kalınlığında (t), 480 g ağırlığında (m) olan paslanmaz çelik levha seçilmiş ve parametreler bu levhaya göre belirlenmiştir.

Birleştirme işlemleri, dört farklı ara boşluk mesafesinde ve her bir ara boşluk mesafesinde beş ayrı patlayıcı oranı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4'de numune numaralarına göre birleştirme işleminde kullanılan parametreler belirtilmektedir. Her bir parametreden 3 adet olmak üzere toplam 60 adet birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. Birleştirme işleminde kullanılan parametreler

Numune no	Ara boşluk mesafesi (s)mm	Patlayıcı oranı (R)	Patlayıcı miktarı (m x R)g
1	0,5 t	1,2	580
2		1,5	720
3		2	960
4		2,5	1200
5		3	1440
6	t	1,2	580
7		1,5	720
8		2	960
9		2,5	1200
10		3	1440
11	2 t	1,2	580
12		1,5	720
13		2	960
14		2,5	1200
15		3	1440
16	3 t	1,2	580
17		1,5	720
18		2	960
19		2,5	1200
20		3	1440

4.2.1. Patlayıcının hazırlanması

Birleştirme işlemleri için patlayıcılar, Makine Kimya Endüstrisi'ne bağlı Barutsan A.Ş. laboratuvarlarında hazırlanmıştır. Amonyum nitrat içerisine % 5 motorin ve % 3 TNT ilave edilerek plastik bir kap içerisinde iyice harmanlanmış ve Elbar 5 adı verilen karışım patlamaya hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan toz patlayıcı Çizelge 4.4' de belirtilen miktarlarda 210 x 210 x 40 mm ebatlarındaki karton kutular içerisine konulmuştur. Toz patlayıcının kutunun her tarafında eşit miktarda olmasına dikkat edilmiştir. Patlama işlemini başlatacak olan fûnye' ye yaklaşık 10 g ağırlığında Jelatinit dinamit yapıştırılmış ve fûnye hazırlanan patlayıcı kutunun bir kenarına yerleştirilmiştir. Daha sonra kutunun kapağı kapatılarak bantla yapıştırılmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir.

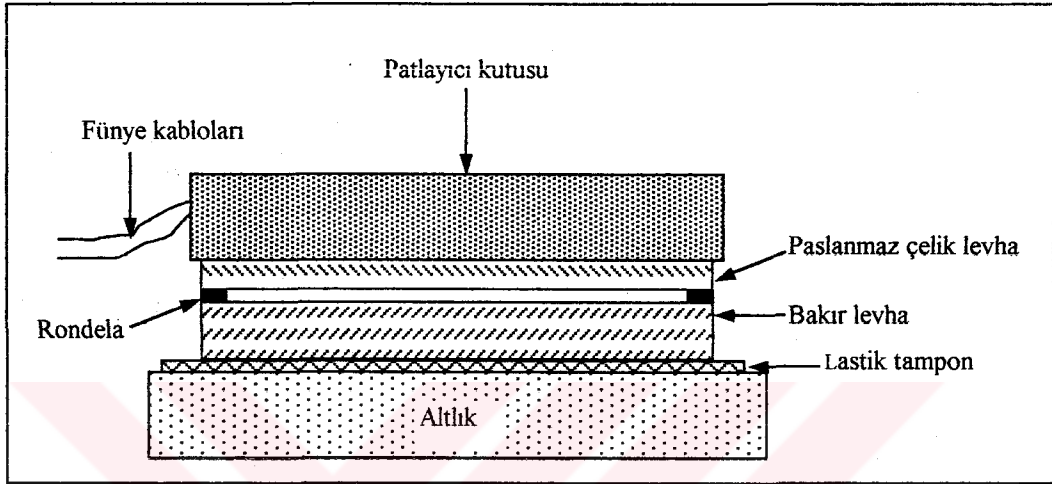
4.2.2. Birleştirilecek malzemelerin hazırlanması

Birleştirilecek olan bakır ve paslanmaz çelik levhalar öncelikle 200x200 mm ölçülerinde giyotin makasla kesilmişlerdir. Paslanmaz çelik levhanın bir yüzeyi plastik bir bant ile kaplı olduğundan bu levhaların yüzeylerine ayrıca bir temizlik işlemi uygulanmamış, bantın levha üzerinden sökülmesi yeterli olmuştur. Bakır levhaların yüzeyleri döner tel fırçalar yardımıyla fırçalanmış yüzeyinde bulunan oksit ve yağ gibi birleşme işlemine mani olacak etkenlerden temizlenmiştir. Ayrıca alt levha olarak kullanılacak olan bakır levhaların altlıkla tüm yüzeyinin tam temasını sağlamak için düzgün olmasına dikkat edilmiştir.

4.2.3. Birleştirme düzeneğinin hazırlanması

Patlatma ile birleştirme işlemlerini gerçekleştirmek için Şekil 4.1'de gösterilen paralel levha geometrisi düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenlemede alt parça olarak seçilen bakır levha, altlığın üzerine yerleştirilmiş ve altlık ile tüm yüzeyinin temas etmesi sağlamıştır. Daha sonra alt levha ile üst levha arasında Çizelge 4.4'de belirtilen ara boşluk mesafesini sağlamak amacıyla, bakır levhanın dört köşesine, gerekli kalınlıklarda metal rondelalar konulmuş ve paslanmaz çelik levha bu

rondelaların üzerine yerleştirilmiştir. Böylece istenilen ara boşluk mesafesi farklı rondela kalınlıklarıyla ayarlanmıştır. Hazırlanan düzeneğin üzerine daha önceden hazır olan patlayıcı kutuları yerleştirilmiş ve düzeneğe birleştirme işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Hazırlanan birleştirme düzeneği şematik resmi

4.2.4. Birleştirme işlemi

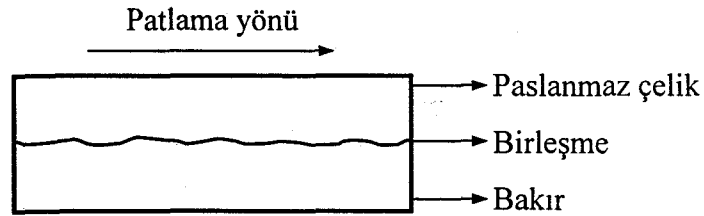
Birleştirme işlemleri, MKE Barutsan A.Ş. 'nin patlayıcı deneme alanlarında yaklaşık 75 m mesafedeki bir siperin arkasından elektrikli manyetonun çevrilmesiyle hazırlanan düzeneklerin patlatılması sonucu gerçekleştirilmiştir. Patlatma işlemi esnasında levhaların, altlığın akustik özelliğinden etkilenip ayrılmasını ve geri fırlamayı engellemek amacıyla her bir patlatmada alt parça ile altlık arasına yaklaşık 5 mm kalınlığında bir lastik tampon konulmuş ve birleştirme işlemleri bu şekilde tamamlanmıştır. Resim 4.1'de patlama anından bir görüntü görülmektedir.



Resim 4.1. Patlama anından bir görüntü

4.2.5. Mikroyapı incelemesi

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen levhalardan, farklı patlayıcı oranı ve farklı ara boşluk mesafesi nedeni ile birleşme arayüzeyinde meydana gelmesi beklenen değişiklikleri görmek amacıyla her birleştirmeden mikroyapı numuneleri hazırlanmıştır. Yaklaşık 20 mm uzunluğunda olan bu numunelerin, arayüzeyde oluşması muhtemel olan dalgalanmayı tespit etmek amacıyla incelenecek olan yüzeylerinin (20 mm olan yüzey) patlama yönüne paralel olmasına dikkat edilmiştir. Aşağıda Şekil 4.3'de hazırlanan mikroyapı numunesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Hazırlanan mikroyapı numunesi şematik gösterimi

İncelenecek olan yüzeyin metalografik işlemler için ince olmasından dolayı (3,5 mm) numuneler bakalite gömülmüş ve sırasıyla 180'den 1200 numaraya kadar SiC su zımparaları ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler parlatma

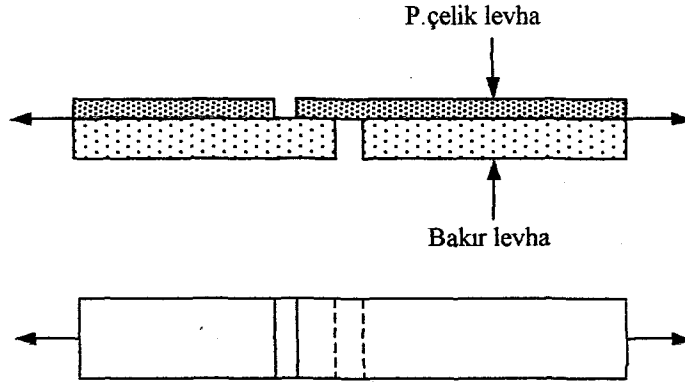
cihazında 3 μ m'luk elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Mikroyapı numuneleri 20 ml HCL, 4 g Cu SO₄ ve 20 ml su bileşiminden oluşan dağlama solüsyonuyla dağlanmış ve daha sonra ultrasonik temizleme cihazında temizlenmiştir. Hazırlanan numuneler optik mikroskop ve SEM (tarama elektron mikroskobu) cihazlarında incelenerek gerekli yerlerden fotoğraflar alınmıştır.

4.2.6. Mikrosertlik incelemesi

Patlama ile birleştirilen levhaların birleşme arayüzeyinde yüksek hızdaki çarpışmadan dolayı meydana gelen sertlik değerlerindeki değişiklikleri görmek amacıyla numunelerde Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm işlemlerinde Zwick marka mikrosertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik değerleri, mikroyapı incelemeleri için hazırlanan ve bakalite gömülü olan numunelerin birleşme arayüzeylerinden dışa doğru 300 g yük kullanılarak alınmıştır. Ölçümlerde her iki malzemeden de (paslanmaz çelik, bakır) arayüzeye 150, 800 ve 1350 μ m mesafelerden 5'er adet olmak üzere sertlik değerleri alınarak bu değerlerin ortalamaları alınmıştır.

4.2.7. Çekme-Makaslama deneyi

Deneyisel çalışmalarda patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerden patlama yönüne paralel olacak şekilde ASTM D 3165-95'e göre numuneler hazırlanmıştır. Her birleştirme parametresi için üç adet numune çıkartılmış ve deneye tabi tutulmuştur. Çekme - Makaslama testi Instron 1185 model çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme - Makaslama test numunelerinin şematik görünüşü Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Çekme - Makaslama deney numuneleri şematik görünüşü

4.2.8. Eğme deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerden patlama yönüne paralel olacak şekilde metalik levhaların eğme deneylerine uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, Instron 1185 model çekme cihazında, 0,5 mm/dk ilerleme hızında 180° ye kadar eğilmişlerdir. Hazırlanan numunelerin genişlikleri 25 mm ve eğme çapı 20 mm olarak seçilmiştir. Eğme işlemleri, birleştirilen levhaların değişik çalışma şartlarında kullanılabileceği düşünülerek standart dışı olarak farklı çaplarda da yapılmıştır. Deneylerde her farklı birleştirme parametresi için üç numune teste tabi tutulmuştur. Eğme işlemi uygulanan numunelerin birleşme ara yüzlerinde ayrılma olup olmadığını görmek amacıyla numuneler gözle kontrol edilmişlerdir.

4.2.9. Isıl işlem

Patlamalı kaynak tekniği ile birleştirilen parçaların ısı ortamlarında kullanıldıklarında parçalar arasında gerçekleşebilecek olan difüzyon oluşumunu tespit etmek amacıyla bir grup dalgalı birleşme arayüzüne sahip deney numunelerine ısı işlem uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler bakır malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında 300°C 'de 8, 16, 24 ve 32 saat fırında bekletilmiş ve zamana bağlı olarak birleştirmeler arasında oluşması muhtemel olan difüzyonlar incelenmiştir. Difüzyon incelemeleri SEM cihazında element analizi yapılarak gerçekleştirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Patlamalı kaynak yöntemi ile bakır - paslanmaz çelik malzemelerin birleştirilmesi ve metalurjik özelliklerinin incelenmesi konulu bu çalışmada, farklı parametreler dahilinde birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmelere, çeşitli mekanik ve metalurjik testler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Deneyssel çalışmada kullanılan paralel kaynak düzenlemelerinde alt ve üst levha arasındaki boşluk çarpışan levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Patlama ile birleştirme işleminde üst levha, patlama şiddetiyle beraber hızlanmakta ve alt levhaya belirli bir hızda çarpmaktadır. Bu hızlanmanın miktarı, kullanılan patlayıcı, patlayıcı oranı ve üst levhanın kütlesine göre değişiklik göstermektedir.

Deneyssel çalışmada birleştirme işlemlerinde kullanılan patlayıcı ve patlayıcı oranına göre üst levhanın hızı (V_p), teorik olarak Eşitlik 3.1.'deki formüle göre hesaplanmış ve aşağıda Çizelge 5.1.'de verilmiştir. Hesaplama işleminde formülde bulunan 2E değeri, Çizelge 3.1.'de verilen %6 fuel oil içeren Anfo'nun Gurney enerji değeri seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Patlayıcı miktarları ve üst levha son hızları

Patlayıcı Oranı (R)	Patlayıcı Kütlesi (c) gr	Üst Levha Kütlesi (m) gr	Üst Levha Hızı (V_p) m/sn
1,2	576	480	983
1,5	720	480	1120
2	960	480	1306
2,5	1200	480	1453
3	1440	480	1571

Kullanılan patlayıcı oranına göre değişiklik gösteren üst levhanın hızı Çizelge 5.1.'de görülmektedir. Patlayıcı oranının artmasıyla beraber, bu artışa bağlı olarak üst levhanın hızı da 983 m/sn'den 1571 m/sn'ye yükselmektedir.

Literatürde (29,49), patlayıcı oranının üst levhanın ağırlığıyla doğrudan ilgili olduğu ve bu oranın üst parçanın belirli bir hıza ve çarpışma açısına ulaşmasına izin verecek değerde olması gerektiği belirtilmektedir.

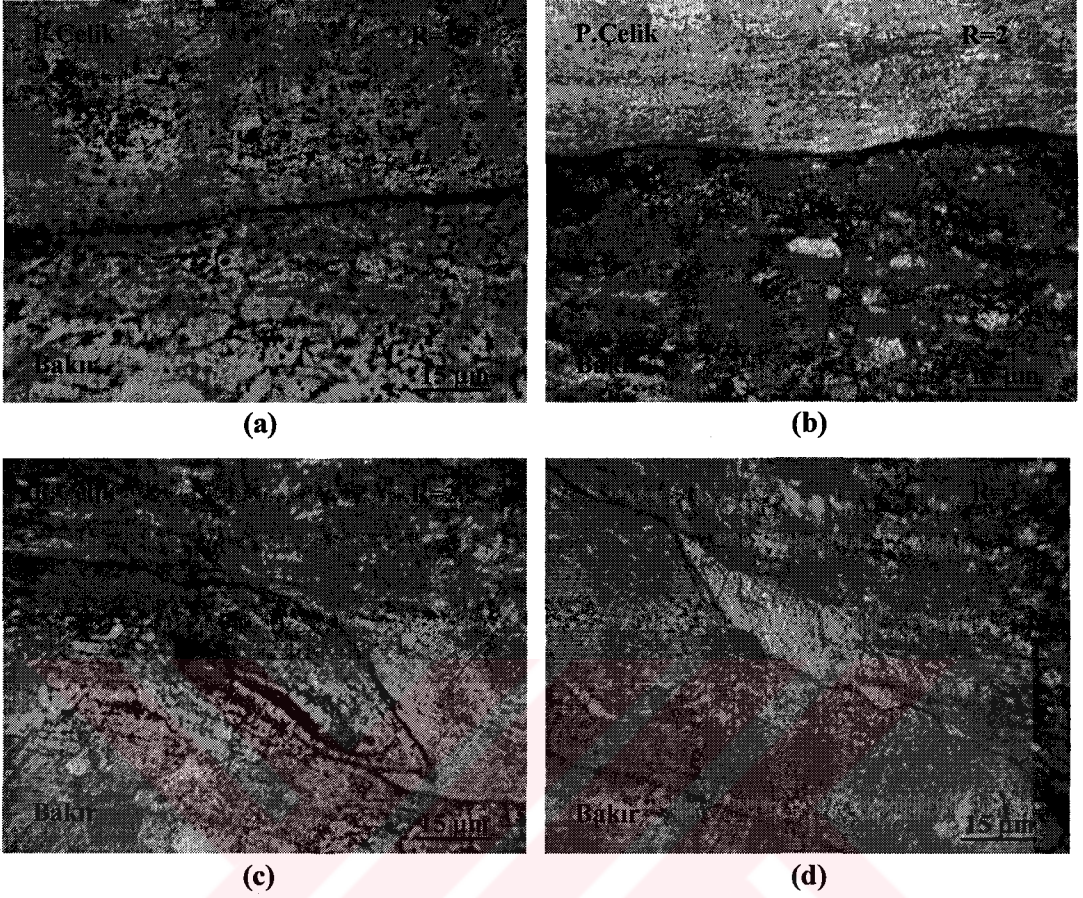
Acarer (49), üst levhanın çarpma hızının kullanılan patlayıcının patlama hızı ve enerjisi ile ilişkili olduğunu ve sağlıklı birleştirmeler elde edebilmek için üst levhanın çarpma hızının 1000 m/sn'den yüksek olması gerektiğini belirtmektedir.

Bu çalışmada, patlayıcı oranı 1,2 olarak seçilen birleştirme işlemlerinde üst levhanın hızı 983 m/sn olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen birleştirme işlemlerinde, Çizelge 4.4'de belirtilen dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı oranının 1,2 olarak belirlendiği numunelerde üst levha çarpma hızı yeterli gelmediğinden iyi bir birleşme sağlanamamıştır. Seçilen bu patlayıcı oranından elde edilen birleştirmeler el ile uygulanan çok az bir zorlama karşısında ayrılmışlardır. Bu sebepten dolayı patlayıcı oranının 1,2 olduğu deney numunelerine gerekli testler uygulanamamıştır.

Patlayıcı oranının 1,5, 2, 2,5 ve 3 olarak seçildiği ve dört farklı ara boşluk mesafesine (0,5t, t, 2t, 3t) sahip birleştirmelere ait deney sonuçları aşağıda sırası ile verilmektedir.

5.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma

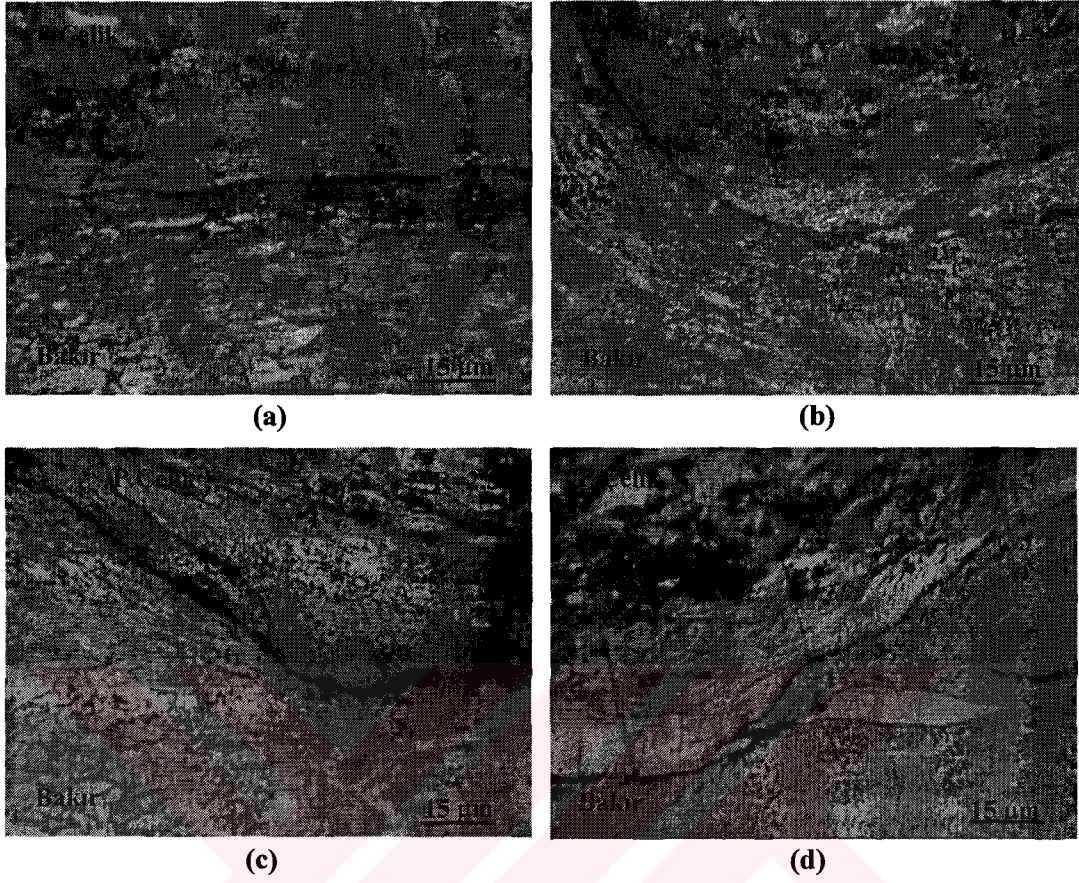
Gerçekleştirilen deneylerde farklı patlayıcı oranlarında, ara boşluk mesafesinin -0,5t- olarak belirlendiği birleştirmelerden elde edilen birleşme arayüzeyi mikroyapı fotoğrafları aşağıda Resim 5.1'de verilmiştir.



Resim 5.1. Ara boşluk mesafesi - 0,5t - olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri

Resim 5.1'deki mikroyapı fotoğraflarından görüldüğü gibi, patlayıcı oranının 1,5 ve ara boşluk mesafesinin 0,5t olduğu birleştirme numunesinde (a) arayüzey düze yakın bir görünüm sergilemektedir. Patlayıcı oranının artmasıyla beraber düze yakın olan bu görüntünün dalgalı bir hal aldığı görülmektedir. Patlayıcı oranının 2 olduğu numunede (b), dalgalanmanın belirgin bir şekilde başladığı görülmektedir. Patlayıcı oranının 2,5 olduğu (c) numunesinde ise aynı büyütme oranı olmasına rağmen dalgalanma neticesinde oluşan bir tepecik ve dalganın ucunun katlanması ancak görülebilmektedir. Yine aynı büyütme oranı olmasına rağmen patlayıcı oranının en yüksek olduğu (R=3) numune olan (d) numunesinde, bakır tarafında oluşan bir dalgalanmanın sadece uç kısmı görülmektedir.

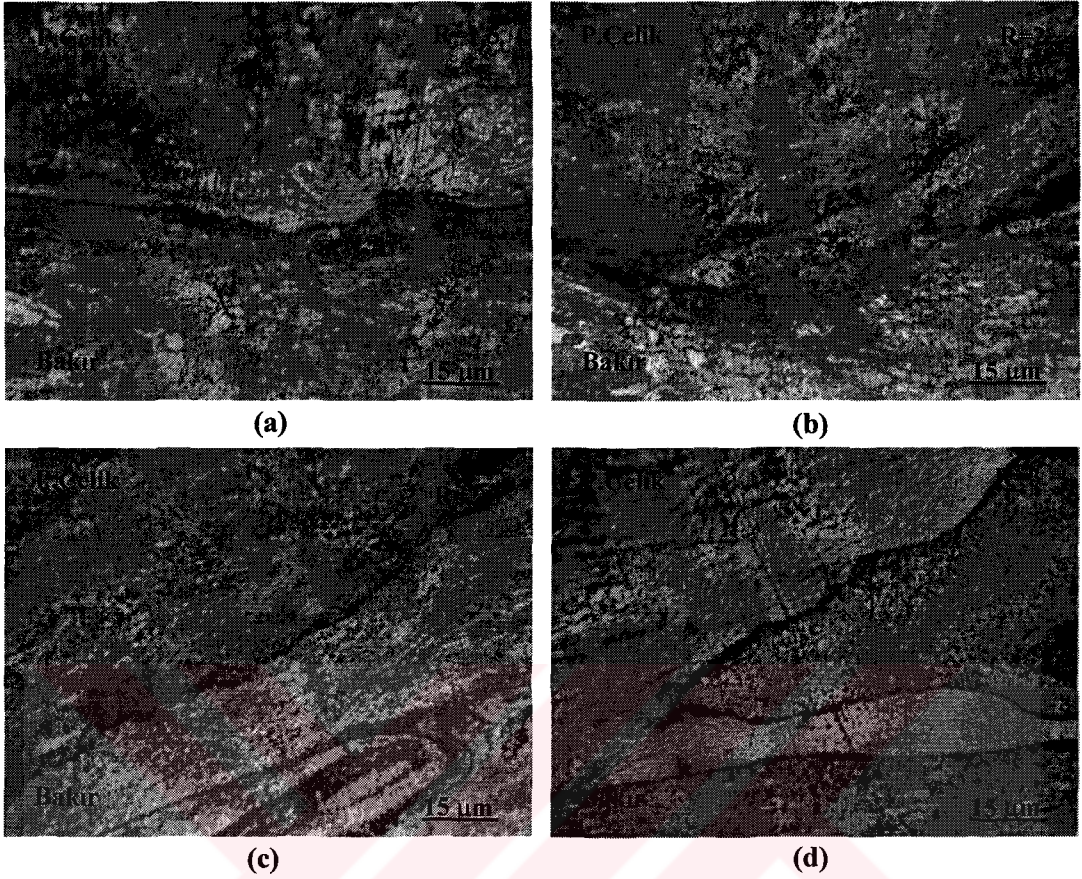
Resim 5.2'de - t - ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin birleşme arayüzeyinden alınan mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.



Resim 5.2. Ara boşluk mesafesi -t- olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri

Yukarıda yer alan optik mikroskop görüntüleri de yaklaşık olarak Resim 5.1 ile benzerlikler göstermektedir. Burada, patlayıcı oranı 1,5 olan numunede (a) çok az bir dalgalanma göze çarpmaktadır. Patlayıcı oranının 2 olduğu numunede ise (b) aynı büyütme oranı olmasına rağmen oluşan dalgalanmanın veya girdabın çok küçük bir bölümü görülebilmektedir. Patlayıcı oranının artmasıyla beraber t ara boşluk mesafesinde oluşan dalgalanma açık bir şekilde görülmektedir. Burada bakırın dalgalanma ile katlanması (c) ve katlanan kısmın paslanmaz çelik malzemede oluşan dalganın bir parçasını içine hapsetmesi (d) net bir şekilde görülmektedir. Yine Resim 5.2'de büyütme oranlarının tüm görüntülerde aynı olmasına rağmen, patlayıcı oranının artmasıyla beraber dalgalanmanın boyutlarının da artması sebebi ile sadece oluşan dalgalanın küçük bir bölümü görülebilmektedir.

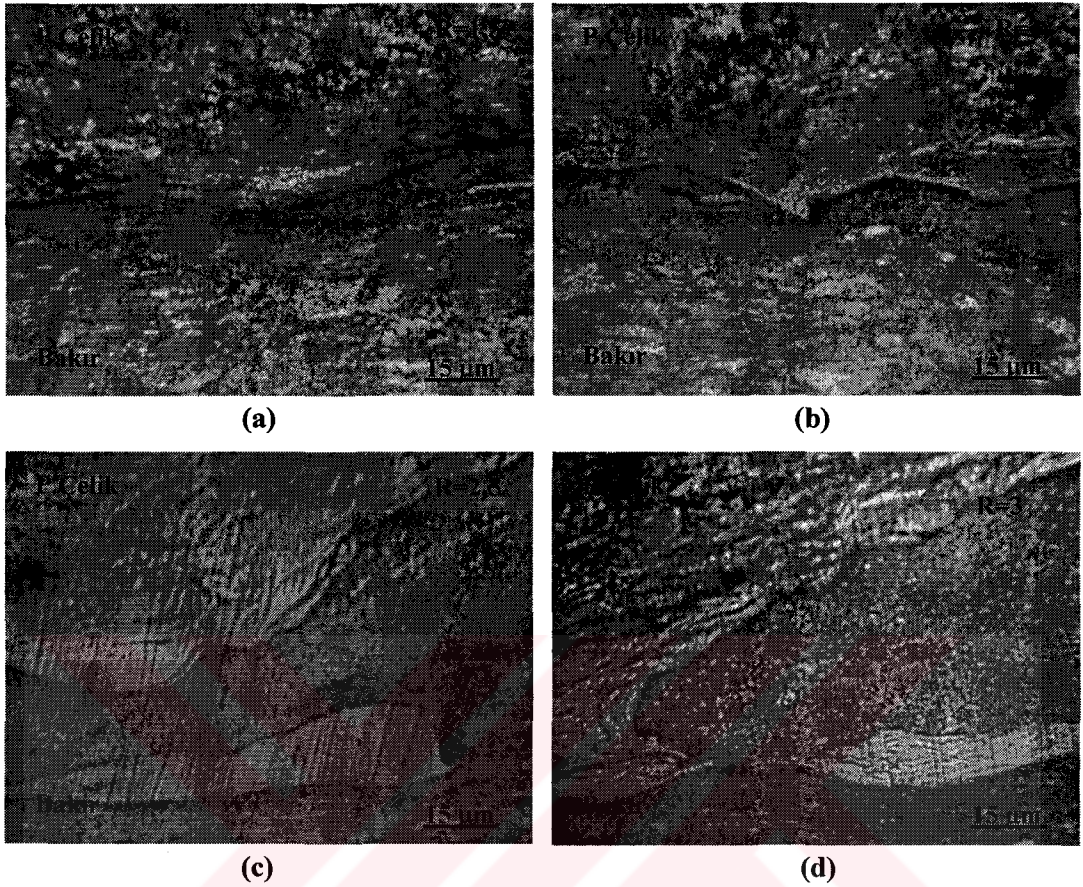
Aşağıda Resim 5.3'de -2t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.



Resim 5.3. Ara boşluk mesafesi - 2t - olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri

2t ara boşluk mesafesinde patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi aynı ara boşluk mesafesi olmasına rağmen patlayıcı oranının artması ile beraber arayüzeyde oluşan dalgalanmanın boyutları da artmaktadır. Resim 5.3 a'da görülen mikroyapı fotoğrafı en düşük patlayıcı oranı olan numune olmasına rağmen, ara boşluk mesafesi bir önceki birleştirmelere rağmen fazla olması sebebi ile azda olsa bir dalgalanma meydana gelmiştir. Sabit ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının artması ile beraber meydana gelen dalgalanmanın boyutları da artmaktadır. Yine aynı büyütme oranı olmasına rağmen oluşan dalgalanmanın boyutlarındaki artış nedeni ile fotoğraf karelerinde, dalgalanmanın sadece uç kısımları görülebilmektedir (Resim 5.3 b, c, d).

Deneysel çalışmada en yüksek ara boşluk mesafesi olan -3t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin arayüzey mikroyapı görüntüleri Resim 5.4'de görülmektedir.



Resim 5.4. Ara boşluk mesafesi - 3t - olan ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait birleşme arayüzeyi görüntüleri

Ara boşluk mesafesinin en yüksek olduğu birleştirme numunelerinin yukarıda görülen arayüzey mikroyapı görüntülerine bakıldığında diğerlerinden azda olsa farklı olduğu göze çarpmaktadır. Bu birleştirmede en düşük patlayıcı oranı olan ($R=1,5$) numunede dahi (a) patlamalı kaynağın tipik birleşme ara yüzey görünümü olan dalgalanma açıkça görülmektedir. Yine sabit ara boşluk mesafesi olmasına rağmen patlayıcı oranının artmasıyla beraber meydana gelen dalgalanmanın boyutlarının da arttığı ve dalga uçlarının da katlanarak bakır malzeme ile paslanmaz çelik malzemenin kenetlendiği yukarıda b, c ve d'de görülmektedir. Patlayıcı oranının artması ile beraber birleşme arayüzeyinde meydana gelen dalgalanmadaki boyut artışı, mikroyapı görüntülerinin aynı büyütme oranlarında olmasına rağmen sadece dalga uçlarının görünümüne neden olmuştur.

Patlamalı kaynağın uygulanması sırasında, kullanılan parametreler, birleştirme kalitesine oldukça fazla etki etmektedir. Patlama kaynağında kullanılan parametreler uygun bir biçimde seçilirse bu yöntem, esas olarak bir katı hal birleştirme yöntemidir. İşlemin gerçekleştirilmesi esnasında birleşme arayüzeyinde dayanımı azaltıcı etkilere sahip olan ergime veya arayüzeye yakın bölgelerde ısının tesiri altında kalan bölge oluşmamaktadır.

Patlama ile birleştirme işlemlerinde kullanılan parametreler uygun seçilmediği takdirde birleşme kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Patlayıcı oranının yüksek seçildiği durumlarda alt ve üst plakalar arasında meydana gelen fişkırmaya birleşme arayüzeyinden dışarı atılamayacak ve arayüzeyde kalacaktır. Arayüzeyde kalan bu fişkırmaya birleşmenin her tarafta gerçekleşmesini engelleyerek, arayüzeyde ergimiş bir tabakanın kalmasına ve levha yüzeylerinde bulunan oksit ve kirliliklerin dışarıya atılamamasına neden olabilmektedir.

Literatürde (52,53), hapsolmuş olan fişkırmayın dalga oluşumunu engellediği ve kaynak arayüzeyinde ergimiş tabakanın sürekliliğine sebep olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda fişkırmayın hapsolmesinden dolayı oluşan yüksek sıcaklık ve ergime metaller arası gevrek, kırılgan bir yapı oluşturduğu belirtilerek, orta seviyedeki kaynak hızlarında fişkırmaya davranışının düzenliliği ve sabit dalga oluşumunun gerçekleştiği vurgulanmıştır.

Yukarıda gösterilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında birleşme arayüzeyinde fişkırmaya hapsolmesinin gerçekleşmediği ve arayüzeyde ergimiş bir tabakanın oluşmadığı görülmektedir. Yine mikroyapı görüntülerinde, dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı oranının artması ile beraber arayüzeyde oluşan dalgalanmanın boyutlarının da arttığı görülmektedir. Patlayıcı oranının en düşük olduğu ($R=1,5$) birleştirme numuneleri mikroyapılarında görüldüğü gibi, birleşme arayüzeyi hemen hemen düz bir haldedir. Yine patlayıcı oranının sabit, fakat ara boşluk mesafesinin artması ile düz haldeki ara yüzeyin azda olsa dalgalı bir hal aldığı yukarıdaki resimlerde patlayıcı oranının 1,5 olduğu mikroyapılarda görülmektedir (Resim 5.1 - 5.4).

Ara boşluk mesafesinin 0.5t ve patlayıcı oranının 2 olduğu numune olan Resim 5.1-b'de mikroyapı fotoğrafı görülen numunenin ara yüzeyi yaklaşık olarak düz bir hal almışken aynı patlayıcı oranına sahip farklı ara boşluk mesafesindeki numunelerde dalgalanma açık bir şekilde görülmektedir (Resim 5.2-b, 5.3-b, 5.4-b). Burada patlayıcı oranının 2, ara boşluk mesafesinin 0,5t olduğu birleştirmede üst parçanın dalga oluşturmak için gerekli hıza ulaşacak mesafe bulamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ara boşluk mesafesinin 0,5t'den yüksek olduğu numunelerde aynı patlayıcı oranında dahi ($R=2$) patlayıcının etkisi ile hızlanan üst parça gerekli hıza ulaşabilmiş ve ara yüzeyde olağan bir dalgalanma gerçekleşmiştir.

Acarer (49) çelik-çelik birleştirmesi üzerine yaptığı çalışmada, paralel kaynak düzenlemelerinde alt ve üst levha arasındaki boşluğun çarpışan levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının en az yarısından fazla olması gerektiğini belirtmiştir.

Yine yukarıdaki mikroyapı fotoğraflarında görüldüğü üzere, dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı oranlarının 2,5 ve 3 olduğu numunelerde, dalgalanma neticesinde mekanik bir kilitlenmenin oluşumu göze çarpmaktadır. Bu mekanik kilitlenme birleştirilen numunelerin hem dayanımını hem de birleşme yüzey alanını arttırmaktadır.

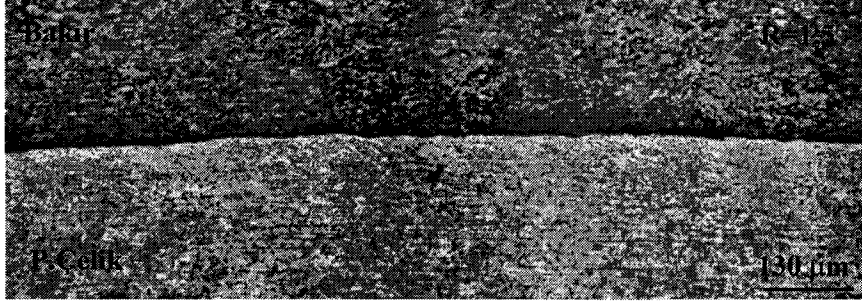
Deneysel çalışmadaki bakır-paslanmaz çelik birleştirmelerinde patlayıcı oranının yüksek olduğu numunelerde dahi birleşme arayüzeyinde herhangi bir ergime bandına rastlanmamıştır. Blazynski (43), yüksek çarpışma hızlarında yani patlayıcı oranının yüksek olduğu durumlarda, oluşan dalgalanmanın uç noktalarında, tutsak olan fişkırmadan ve bu fişkırmadan dolayı ergime görülebileceğini belirtmektedir. Yine Crossland (56), birleşme ara yüzeyinde tutsak olarak kalan fişkırmadan yüksek kinetik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesinden kaynaklanan ergime çukurcuklarının varlığını ve bu ergime çukurcuklarının metaller arası bileşik olduğunu ifade etmektedir. Acarer (49), çelik-çelik birleşmesi üzerine yaptığı çalışmada, patlamalı birleştirmede dalgalı yapıda ara yüzeyde ergime bandının oluştuğunu belirtmektedir.

Bu çalışmada birleşme ara yüzeyinde herhangi bir ergime çukurcuğu veya ergime bandına rastlanmamasının sebebi, bakır malzemenin ara yüzeyde oluşan ısıyı tipik özelliğinden dolayı çok çabuk dağıtması veya birleşme ara yüzeyinde bölgesel yüksek sıcaklıkların oluşamaması olarak düşünülmektedir.

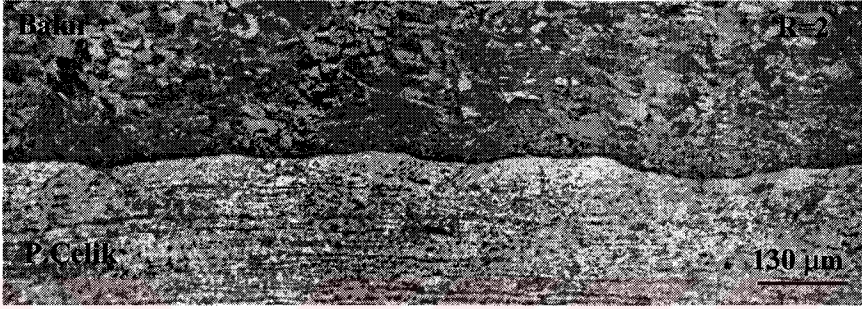
Livne ve Munitz (74), farklı parametreler kullanarak gerçekleştirdiği çelik-bakır birleşmesinde ara yüzeyde düzenli bir dalga oluştuğu ve metaller arası bileşiklerin yada ergime bandlarının oluşmadığı belirtilmektedir. Araştırmacıların belirttikleri bu sonuçlar bizim gerçekleştirmiş olduğumuz deney sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Genel olarak patlayıcı oranı arttığında dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcının patlama enerjisinden dolayı levhaların çarpışma hızı, dolayısıyla çarpışma basıncı artmaktadır. Bu basıncın artması ile beraber ara yüzeyde oluşan deformasyon miktarı artış göstermekte ve oluşan dalgaların boyutları da artmaktadır (Resim 5.1 - 5.4).

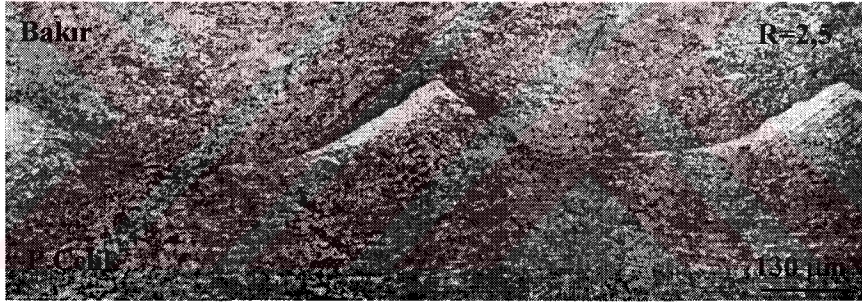
Patlayıcı oranının artması ile birlikte, artan patlayıcı miktarının patlama enerjisinin fazlalığından dolayı dört farklı ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftlerinin ara yüzeyinde oluşan dalgalanmadaki farklılıklar Resim 5.5 - 5.8'de mikroyapı fotoğraflarında gösterilmektedir. Bu görüntüler optik mikroskopta en düşük büyütme oranı kullanılarak birbirini takip eden bölgelerin seri halde fotoğraflarının alınması ve daha sonra bu fotoğrafların bir araya getirilmesi ile elde edilmişlerdir.



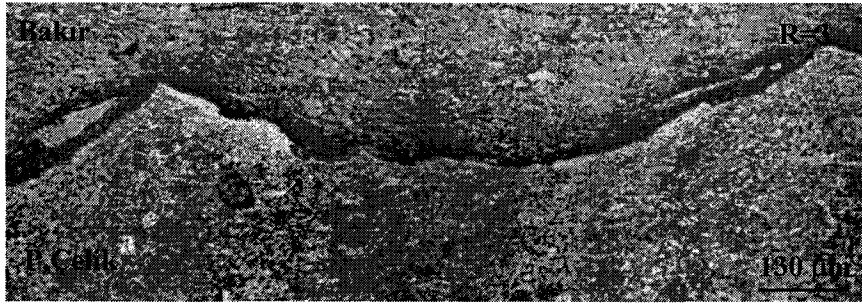
(a)



(b)

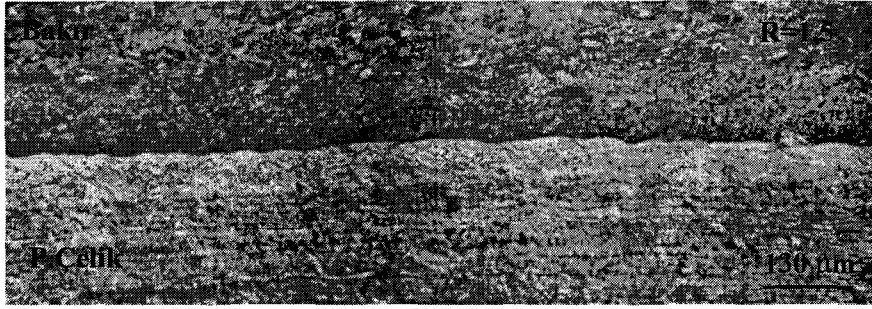


(c)



(d)

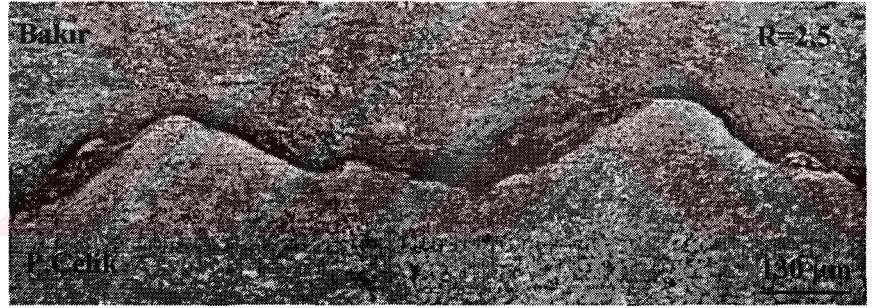
Resim 5.5. Ara boşluk mesafesi -0,5t- olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen arayüzey görüntüleri



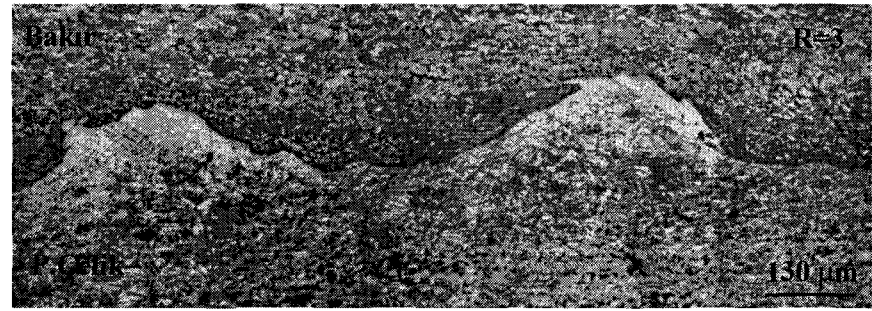
(a)



(b)

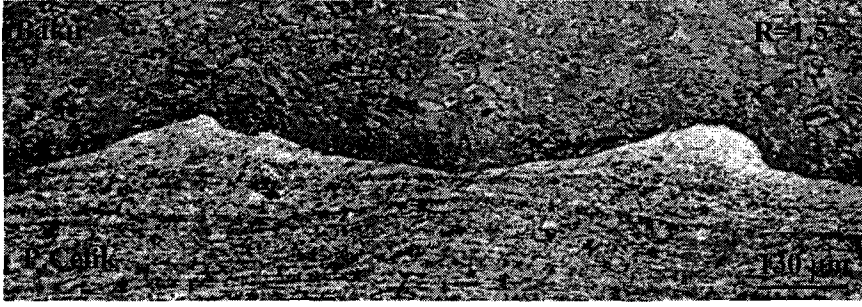


(c)

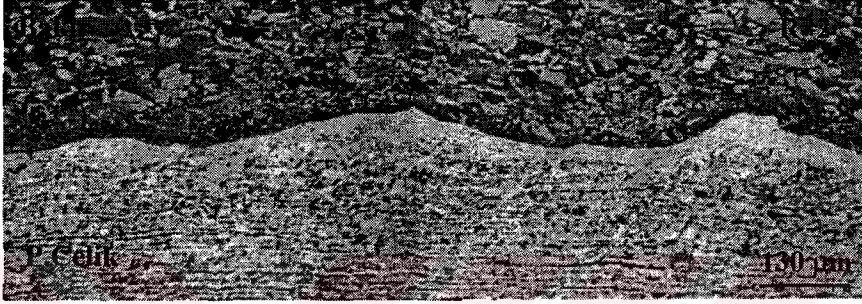


(d)

Resim 5.6. Ara boşluk mesafesi - t - olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen arayüzey görüntüleri



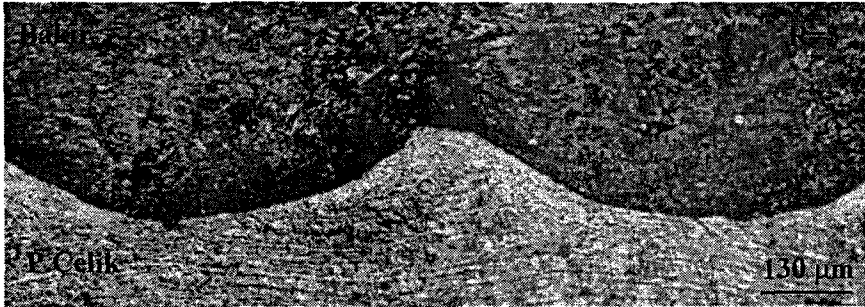
(a)



(b)

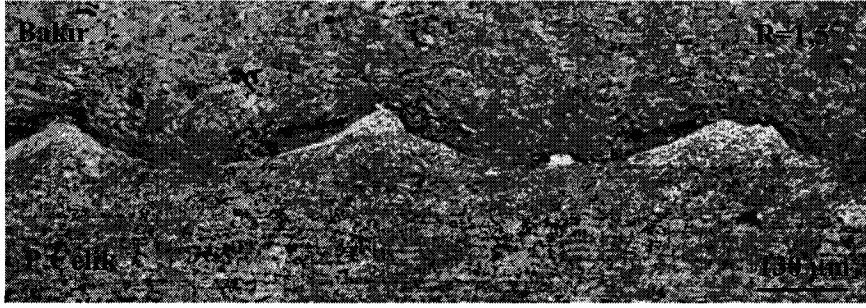


(c)

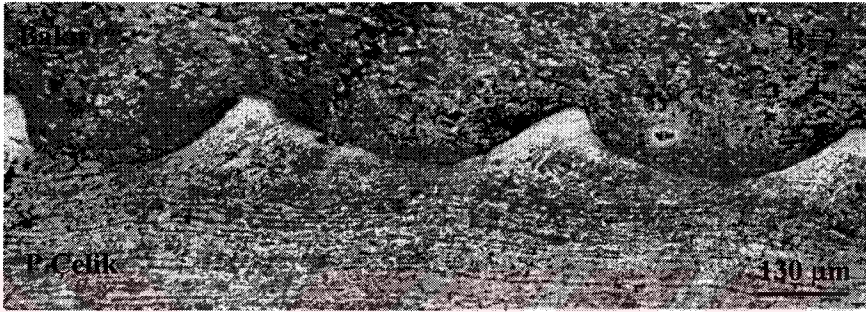


(d)

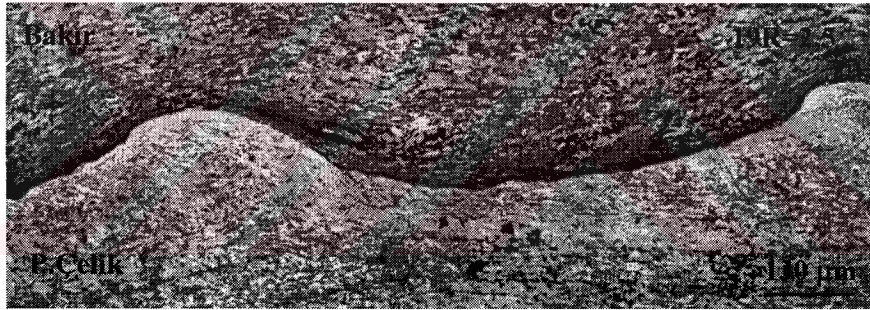
Resim 5.7. Ara boşluk mesafesi - 2t - olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen arayüzey görüntüleri



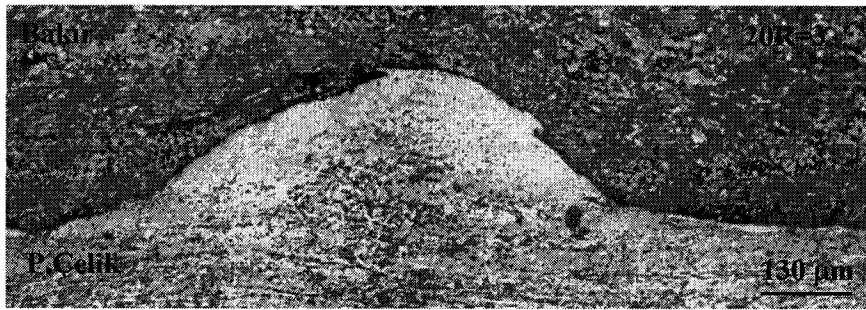
(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 5.8. Ara boşluk mesafesi - 3t - olan numunelerde patlayıcı oranına göre değişen ara yüzey görüntüleri

Resim 5.5'de görülen -0,5t- (0,75 mm) ara boşluk mesafesindeki numunelerin mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında, aynı ara boşluk mesafesine sahip olmalarına rağmen artan patlayıcı oranıyla beraber birleşme ara yüzeylerindeki değişim açıkça görülebilmektedir. Patlayıcı oranının 1,5 olduğu numune olan 2.numunenin ara yüzeyi dalgasız bir halde iken, patlayıcı oranının 2'ye yükseltildiği numune ara yüzeyinde ise dalga oluşumu başlamıştır. 0,5t ara boşluk mesafesinde dahi patlayıcı oranının 2,5 ve 3 olduğu birleştirmelerde, patlama kaynağının tipik birleşme ara yüzey görünümü olan dalgalı yapı oluşabilmektedir.

Ara boşluk mesafesinin küçük seçilmesi durumlarında bile, patlayıcı oranının yani, patlayıcı miktarının artırılması sayesinde dalgalı bir birleşme ara yüzeyi elde edilebilmektedir. Patlayıcı miktarının artması ile birlikte patlayıcının patlama enerjisinin de artması sayesinde üst parça yeterince hızlanabilmekte ve dalgalı bir ara yüzey oluşumu sağlanabilmektedir (Resim 5.5).

Resim 5.6'daki -t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin ara yüzey görüntülerinden de anlaşıldığı üzere dalga oluşumu, patlayıcı oranı ile doğrudan ilgilidir. Bu şekilde, ara boşluk mesafesinin üst parça kalınlığına çıkartılmasıyla beraber (1,5 mm) en düşük patlayıcı oranında bile hissedilebilir bir dalgalanma oluşumu görülebilmektedir (Resim 5.6-a). Bu da üst parçanın, artan ara boşluk mesafesi ile beraber dar olan ara boşluğa nazaran daha çok hızlandığını veya dalga oluşturabilecek bir hıza ulaşabildiğini göstermektedir.

Yine Resim 5.6'da, sabit ara boşluk mesafesi olmasına rağmen patlayıcı oranının artması ile beraber, ara yüzeyde oluşan dalgalanma oranında da artış olduğu görülmektedir. Patlayıcı oranının 2,5 ve 3 olduğu birleştirmelerde ara yüzey, dalgalanma boyutları farklı olmak üzere klasik patlama kaynağı birleşme ara yüzeyi görünümüne sahip olmaktadır (Resim 5.6-c, d).

Resim 5.7'de 2t (3 mm) ara boşluk mesafesine sahip numunelerin farklı patlayıcı oranlarındaki birleşme ara yüzey mikroyapıları görülmektedir. Burada ara boşluk mesafesinin artmasıyla beraber en düşük patlayıcı oranında dahi birleşme ara

yüzeyinde dalga oluşumu gerçekleşmiştir. Buna sebep olarak ara boşluk mesafesinin yeterli olması gösterilebilir. Patlayıcının patlamasıyla beraber üst parça dalga oluşumunu sağlayabilecek hıza ulaşabilmiş ve dalga oluşumu gerçekleşmiştir. Bu resimdeki optik mikroyapı görüntülerini $0,5t$ ve t ara boşluk mesafesinde aynı patlayıcı oranına sahip numunelerin görüntülerinden ayıran en önemli farklılık meydana gelen dalgalanmanın boylarında ve genliklerinde olan artıştır.

Resim 5.8'deki optik mikroskop görüntülerinde ise birleştirilen numunelerin tamamında dalgalanmanın meydana geldiği görülebilmektedir. Ara boşluk mesafesinin $3t$ (4,5mm) olarak belirlendiği bu birleştirmelerde, oluşan dalgalanmaların düzenli bir şekilde meydana geldiği, her bir dalgacığın diğerine çok benzer bir hal aldığı, yine oluşan dalga boylarının ve genliklerinin birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Bu resimdeki birleşme arayüzey görüntülerini, $0,5t$, t , $2t$ ara boşluk mesafesinde aynı patlayıcı oranlarına sahip resimlerden ayıran en belirgin özellik ise, oluşan dalgaların genliklerinin öncekilere nazaran oldukça fazla oluşudur. Buna sebep olarak da artan ara boşluk mesafesi düşünülmektedir.

Genel olarak yukarıdaki birleşme ara yüzeyinde farklı dalga oluşumlarının gösterildiği optik mikroskop görüntülerine bakıldığında patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesi değerlerinin değişimiyle beraber, ara yüzeyin de buna bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Aynı ara boşluk mesafesine sahip birleştirmelerde, patlayıcı oranının artmasıyla beraber düz haldeki birleşme ara yüzeyi, dalgalı bir hal almaktadır. Aynı patlayıcı oranına sahip birleştirmelerde ise, ara boşluk mesafesinin artmasıyla beraber meydana gelen dalgaların genliklerinde bir artış olmaktadır.

Literatürde (58, 61), patlama kaynağında şekil olarak iki tür ara yüzey olduğu, bunlardan birincisinin çarpışma ve fışkıрма şartlarının düşük limitlerde olduğu durumlarda düz veya doğru çizgi ara yüzeyi, diğerinin ise parametrelerin normal değerlerde olduğu durumdaki dalgalı ara yüzey olduğu belirtilmektedir. Ayrıca araştırmacılar, düşük limitlerde elde edilen ara yüzeyden çoğu durumda kaçınıldığını bunun da sebebinin, kaynak sırasında çarpışma şartlarındaki veya kaynak parametrelerindeki az miktarda düşüşün kaynaklanmayı durdurabileceğini ve

kaynaklanmamış bölge oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Bu sebeplerden dolayı birleşme ara yüzeylerinin dalgalı bir hal alması istenmektedir. Ayrıca dalgalı haldeki birleşme ara yüzeyi, iki levhanın birleşme yüzey alanını da artırmakta ve bununla beraber mukavemet özelliklerinde de olumlu etki yapmaktadır.

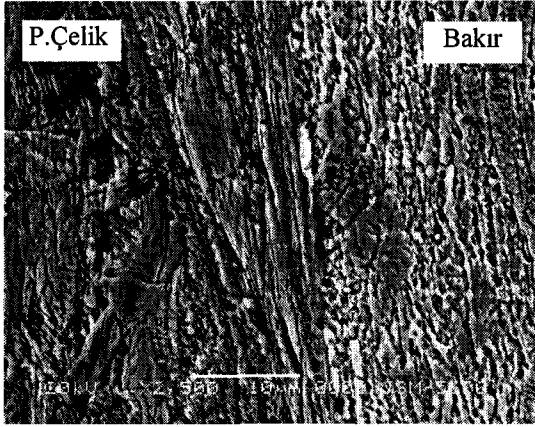
Livne ve Munitz (74), çelik - bakır birleştirmesi üzerine yaptıkları bir çalışmada patlayıcı miktarının ve ara boşluk mesafesinin artmasıyla beraber ara yüzeyde oluşan dalgaların boylarında ve enlerinde bir takım farklılıkların gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Yine Balasubramanian et al. (50), artan ara boşluk mesafelerinin dalga genliğine artış yönünde etkisini ifade etmişlerdir.

Patterson ise (25), düz bir birleşme ara yüzeyinden, dalgalı bir ara yüzeye geçmek için patlayıcı miktarının ve ara boşluk mesafesinin artırılması gerektiğini belirtmektedir.

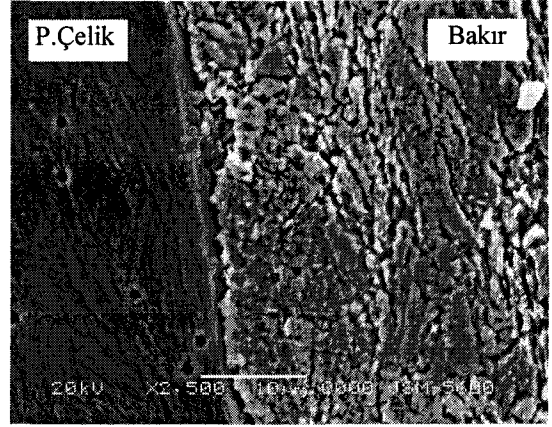
Yapılan bu çalışmada bulunan sonuçlar, literatürde verilen bilgiler ile uyumluluk göstermekte olup, bulguların doğruluğu desteklenmektedir.

Resim 5.5 - 5.8'de gösterilen birleşme ara yüzey görüntülerinde daha geniş bir alan görülmekte olmasına rağmen burada da ergime bandı gibi bir oluşum görülmemektedir. Bu da birleşme ara yüzeyinde intermetalik bir bölgenin oluşmadığını göstermektedir. Paslanmaz çelik'ten bakır'a direk bir geçiş olup ara yüzeyde herhangi bir farklı geçiş bölgesi oluşmamaktadır. Livne ve Munitz (74), farklı parametreler kullanarak çelik - bakır birleştirmesi üzerine yaptıkları bir çalışmada, birleşme ara yüzeyinde ergime bandı veya intermetalik bileşiklerin oluşmadığını belirtmişlerdir.

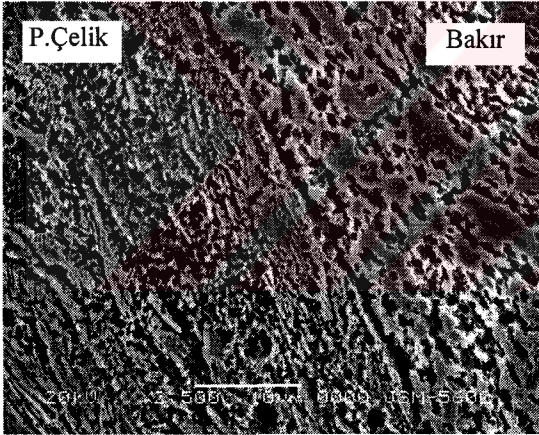
Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin birleşme ara yüzeylerine daha yüksek büyütmelede bakmak ve ara yüzeydeki oluşumları görmek amacıyla SEM ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiş ve bu mikroyapı fotoğrafları Resim 5.9 - 5.12'de verilmiştir.



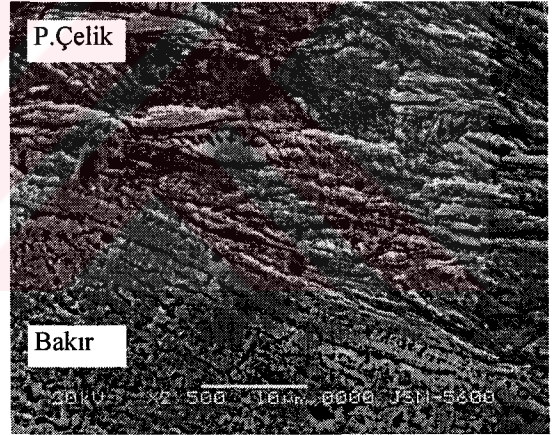
R= 1,5



R= 2

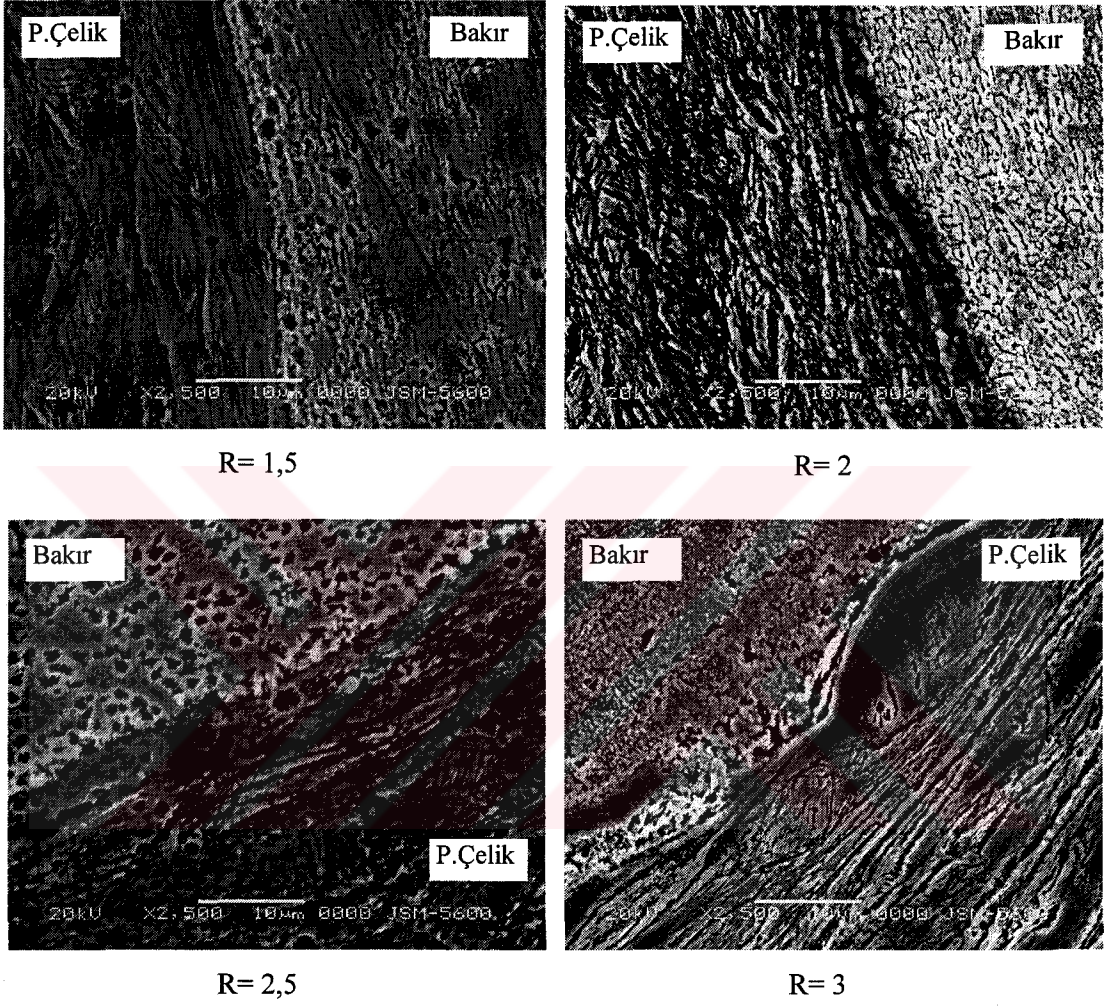


R= 2,5

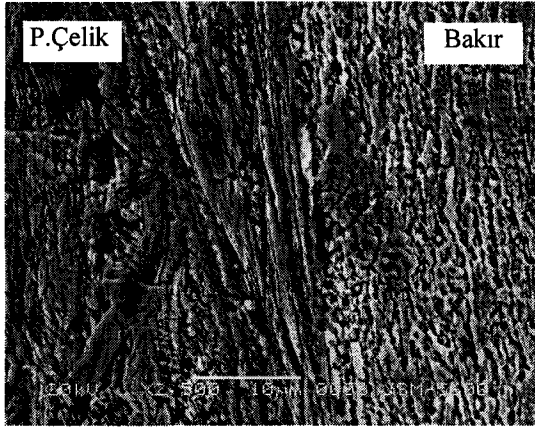


R= 3

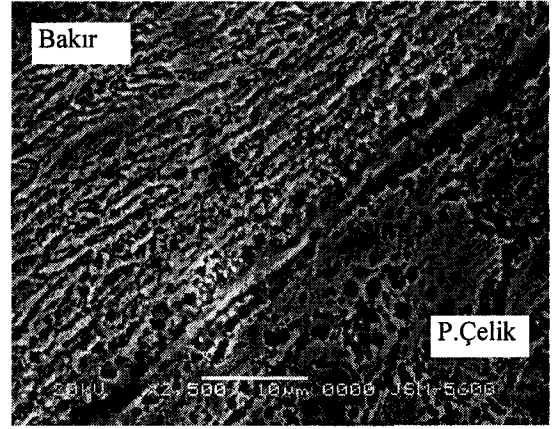
Resim 5.9. -0,5t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri



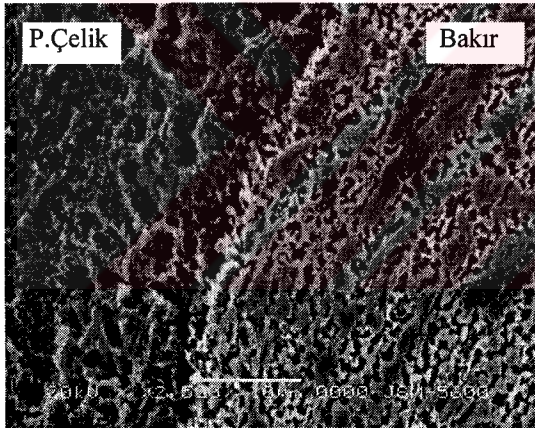
Resim 5.10. -t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri



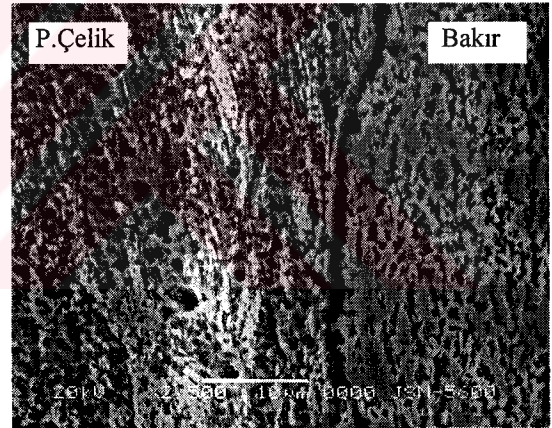
R= 1,5



R= 2

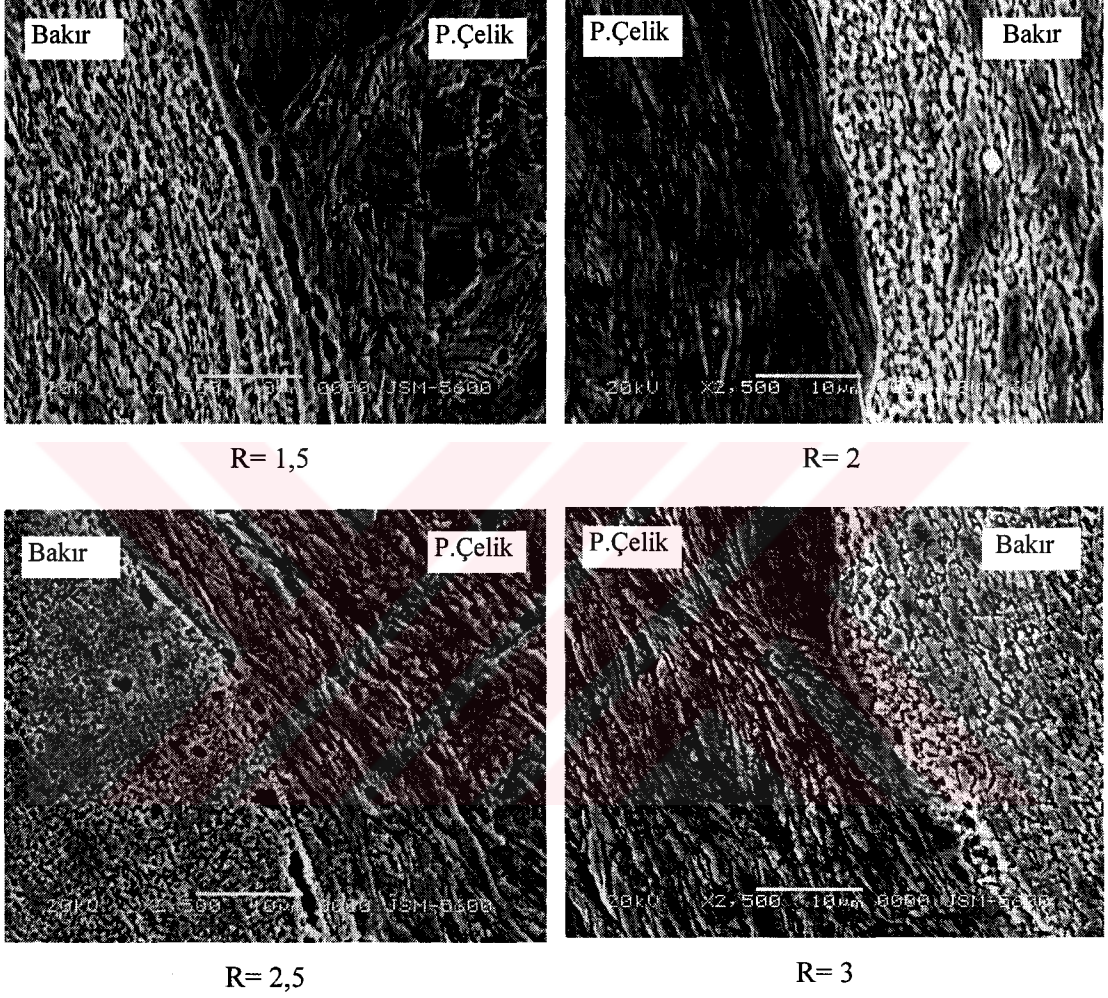


R= 2,5



R= 3

Resim 5.11. -2t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri



Resim 5.12. -3t- ara boşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri

Yukarıda, Resim 5.9 - 5.12'de verilen farklı ara boşluk mesafeleri ve farklı patlayıcı oranlarında birleştirilen numunelerin SEM görüntülerine bakıldığında bütün numunelerin ara yüzeyinde tam bir birleşmenin olduğu görülebilmektedir. Yine, optik mikroskop görüntülerinde olduğu gibi SEM mikroyapı görüntülerinde de birleşme ara yüzeyinde bir ergime bandının olmayışı görülmektedir. Bu da bakır-paslanmaz çelik patlamalı birleştirmelerinde birleşme ara yüzeyinde ergime bandının olmayışını göstermektedir. Burada ergime bandının olmayışının sebebi, bölgesel yüksek sıcaklıkların oluşmaması ve bakırın ara yüzeyde oluşan ısıyı çok hızlı dağıtmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Birleşme bölgesinde ergime bandının olmayışı yada ara yüzeyde intermetalik bir bölgenin oluşmaması birleşmenin güvenilirliği açısından olumlu olduğu bilinmektedir.

Yukarıdaki bütün mikroyapı görüntülerinde bazı siyah noktacıklar görülmektedir. Bunlar paslanmaz çelik ve bakır malzemeyi aynı anda dağlama zorluğundan kaynaklanan dağlama hatasından meydana gelmektedir.

Acarer (49), farklı parametreler kullanarak gerçekleştirdiği çelik-çelik birleşmesi üzerine yaptığı bir çalışmada, ara yüzeyde oluşan intermetalik bileşenlerin birleşmenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini belirtmektedir.

Ayrıca Zimmerly et al. (71), birleşme ara yüzeyinde oluşan intermetalik bileşenlerin gevrek olduğunu ve birleşme için böyle bir ara yüzeyin zararlı olduğunu vurgulamışlardır. Yine araştırmacılar, kaynak ara yüzeyinde oluşan metaller arası bileşiklerin varlığının gevrekliği başlattığı ve aynı zamanda sünekliği azalttığını ifade etmişlerdir.

Patlamalı kaynak işlemi şekil bakımından haddelemeyi hatırlatmaktadır. Haddeleme işleminde taneler hadde yönünde deforme olup uzamaktadırlar. Patlamalı kaynak işleminde de birleşme ara yüzeyinde, tanelerin deforme olduğu ve patlama yönünde uzadığı Resim 5.9 - 5.12'deki SEM mikroyapı görüntülerinden görülebilmektedir.

Patlamalı kaynak işlemi her ne kadar bir anda gerçekleşiyor gibi görünse de bu işlem aslında bir zaman dilimi içerisinde olmaktadır. Birleşme işlemi bir uçtan başlamakta ve bir zaman aralığı içerisinde diğer uca doğru ilerlemektedir. Birleştirilecek olan iki levha belirli bir hızda birbirlerine doğru yaklaşmakta ve çarpışmaktadırlar. Bu çarpışma esnasında, birleşme ara yüzeyine yakın olan taneler çarpışmanın da etkisi ile deforme olup birleşme yönünde uzamaktadırlar.

Meydana gelen bu deformasyon birleşme ara yüzeyinde bütün şartlarda oluşmaktadır. Birleşme ara yüzeyi düz yada dalgalı olduğu durumlarda ara yüzeydeki deformasyon oranı da değişiklik göstermektedir. Birleşme ara yüzeyinin düz olduğu durumlarda oluşan deformasyon miktarı daha az ve ara yüzeyin dalgalı bir hal aldığı durumlardaki deformasyon miktarı daha fazladır. Birleşme ara yüzeyinde oluşan bu soğuk deformasyon esnasında, birleştirilen malzemelerin ara yüzeye yakın bölgelerdeki sertlik değerlerinde de değişiklikler söz konusudur. Bu değişimler, bu çalışmadaki sertlik deneyleri sonuçlarında da görülmektedir.

Literatürde birleşme ara yüzeyinde oluşan bu deformasyon hakkında fazlaca bir yorum yapılmamakla beraber mikroyapı görüntülerinden birleşme ara yüzeyindeki tanelerin birleşme yönünde uzadığı ve bu deformasyon izinin ara yüzeyden uzaklaştıkça azaldığı görülebilmektedir. Acarer (49), birleşme ara yüzeyindeki tanelerin birleşme doğrultusunda uzadığını ve bunun da sebebinin ara yüzeyde oluşan plastik deformasyonun bir sonucu olduğunu rapor etmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile, daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında bir paralellik olduğu gözlenmiştir.

5.2. Sertlik Sonuçları ve Tartışma

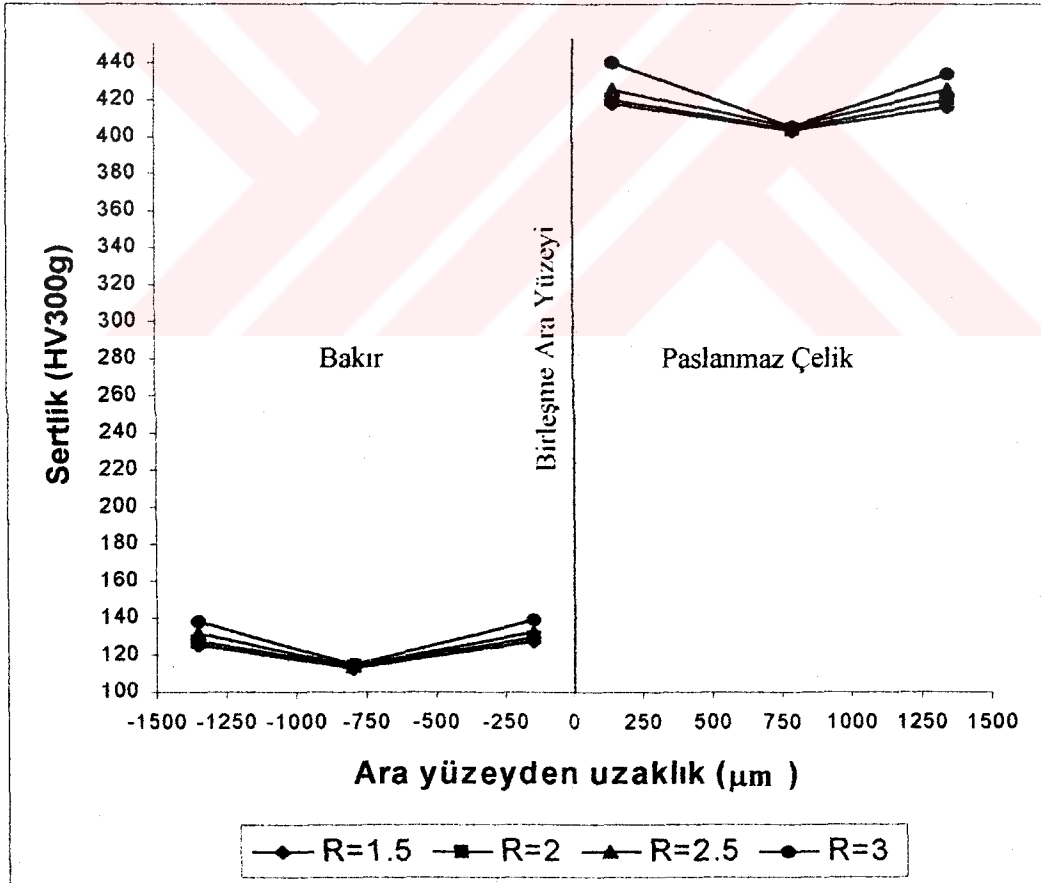
Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen levhaların birleşme ara yüzeyindeki sertlik değişimlerini görmek amacıyla mikrosertlik cinsinden 300 g yük kullanılarak değerler alınmıştır. Dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı oranının 1,2 olarak belirlendiği numunelerde üst parça yeterince hızlanmadığı için birleşme gerçekleşmemiş ve bu numünelere ait sertlik değerleri tespit edilememiştir. Sertlikler birleşme ara yüzeyinden itibaren her iki malzemedен de (bakır-paslanmaz çelik) 150, 800 ve 1350 μm mesafelerden ölçülmüştür.

Sertlik değerlerinin ölçülmesinde tam birleşme çizgisinden sertliklerin alınmamasının sebebi, sertlik ölçülen ucun her iki malzemeye de aynı anda temas etmesini önlemek ve yanıltıcı bir değer elde etmemek içindir. Bu sebepten dolayı birleşme ara yüzeyine yaklaşık olarak 150 μm mesafeden sertlikler alınmıştır. 1350 μm mesafesi ise sertlik ölçülen ucun 1,5 mm kalınlığı olan levhanın dışına taşmasını önlemek amacıyla seçilmiştir.

Dört farklı ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranına sahip birleştirmelerden elde edilen sertlik değerleri aşağıda Çizelge 5.2 - 5.5'de tablo olarak, Şekil 5.1 - 5.4'da ise grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2. -0,5t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri

Numune No	Malzemeler	Levha Sertliği (HV)	Metal Çifti Sertliği (HV300g)		
			Ara Yüzeyden Uzaklık (μm)		
			150	800	1350
2 (R=1,5)	Paslanmaz Çelik	400	417	403	415
	Bakır	113	127	113	125
3 (R=2)	Paslanmaz Çelik	400	420	403	419
	Bakır	113	129	114	127
4 (R=2,5)	Paslanmaz Çelik	400	425	405	425
	Bakır	113	133	114	132
5 (R=3)	Paslanmaz Çelik	400	439	405	433
	Bakır	113	139	115	138

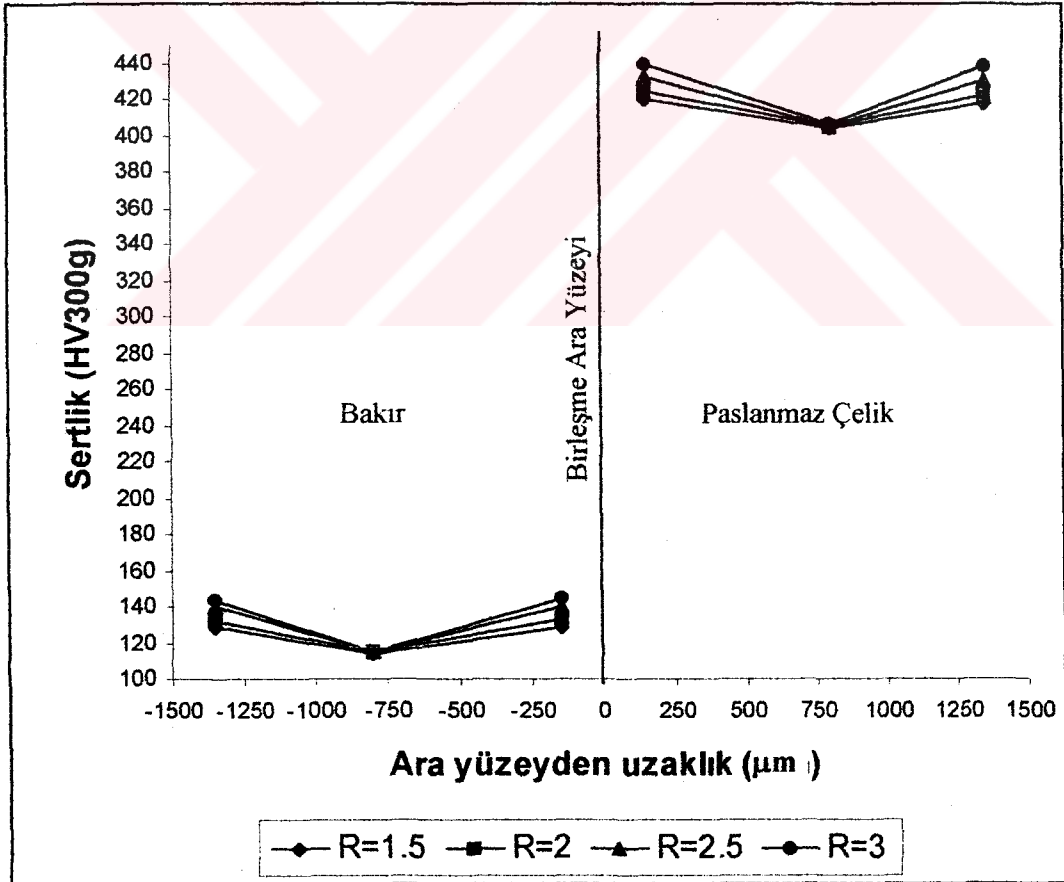


Şekil 5.1. -0,5t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.1'de -0,5t- ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerdeki sertlik değişimleri görülmektedir. Patlayıcı oranının $R=1,5$ olduğu 2 numaralı numunede paslanmaz çelik levhanın sertliği 400 HV olan ilk sertliğinden, birleşme ara yüzeyine en yakın bölgede (150 μm) 417 HV değerine ulaşmıştır. Paslanmaz çelik levhanın sertliği birleşme ara yüzeyine 800 μm mesafede, yani yaklaşık olarak levha kalınlığının orta kısmında ilk sertliğine yakın bir değer gösterirken (403 HV) birleşme ara yüzeyine 1350 μm mesafede yani dış yüzeyde 415 HV değerine ulaşmıştır. Patlamalı kaynak işleminde levhaların çarpışarak kaynaklanmasından dolayı birleşme ara yüzeyinde bir deformasyon sertleşmesi gerçekleşmektedir. Bu sebepten dolayı birleşme ara yüzeyine yakın bölgelerde levhaların sertliğinde bir artış söz konusu olmaktadır. Paslanmaz çelik levhanın orta kısmındaki sertlik değerinde önemli bir artış gözükmemektedir. Buradaki sertlik değeri levhanın ilk sertlik değeri olan 400 HV değerine çok yakındır. Birleşme ara yüzeyinde oluşan deformasyon sertleşmesi levhanın orta kısmında etkili olamamıştır. Paslanmaz çelik levhanın birleşme ara yüzeyinden yaklaşık olarak 1350 μm mesafe levhanın dış yüzeyine çok yakın olup buradaki sertliği ifade etmektedir. Paslanmaz çelik levhanın dış yüzeyi patlayıcı ile direkt temas halinde olup patlama esnasındaki şok'tan etkilendiğinden burada da bir deformasyon sertleşmesi gerçekleşmiş ve sertlik değerinde bir artış görülmüştür. Bakır levhada ise sertlik 113 HV olan ilk sertliğinden 150 μm mesafede 127 HV değerine, 1350 μm mesafede (yaklaşık dış yüzey) 125 HV değerine ulaşmış ve levhanın orta kısmı ilk sertliğini muhafaza ederek 113 HV değerinde kalmıştır. Bakır levhanın birleşme ara yüzeyi ve buraya yakın olan bölgedeki sertlik artışı çarpışma esnasındaki deformasyondan kaynaklanmaktadır. Dış yüzeydeki sertlik artışı ise, çarpışma basıncının etkisi ile beraber alt levhanın altlık ile çarpışmasından ileri gelmektedir. Yine aynı ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranıyla beraber sertlik değerleri de artış göstermektedir. Patlayıcı oranının en yüksek olduğu ($R=3$) 5 numaralı birleştirmede paslanmaz çelik levhanın sertliği 150 μm mesafede 439 HV, 1350 μm mesafede 433 HV olurken, bakır levhanın sertliği 150 μm mesafede 139 HV, 1350 μm mesafede 138 HV değerlerinde olmuştur.

Çizelge 5.3. - t - Ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri

Numune No	Malzemeler	Levha Sertliği (HV)	Metal Çifti Sertliği (HV300g)		
			Ara Yüzeyden Uzaklık (μm)		
			150	800	1350
7 (R=1,5)	Paslanmaz Çelik	400	420	404	418
	Bakır	113	129	114	129
8 (R=2)	Paslanmaz Çelik	400	425	405	423
	Bakır	113	133	115	132
9 (R=2,5)	Paslanmaz Çelik	400	433	405	430
	Bakır	113	140	115	140
10 (R=3)	Paslanmaz Çelik	400	440	406	438
	Bakır	113	145	115	143



Şekil 5.2. - t - Ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği

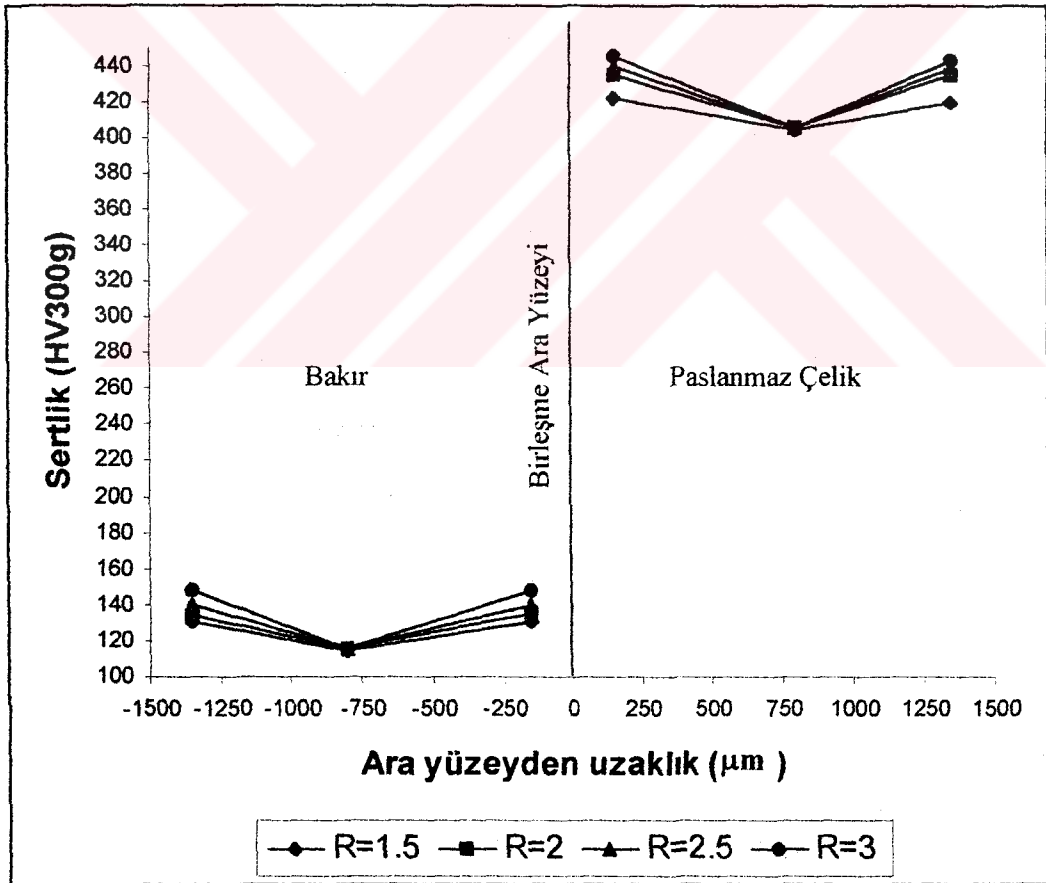
Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2'de - t - ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerdeki sertlik değişimleri görülmektedir. Ara boşluk mesafesinin 1,5 mm olduğu ve dört farklı patlayıcı oranında birleştirilen numunelerde de patlayıcı oranının artması ile beraber birleştirilen levhaların sertlik değerlerinde de artmalar görülmüştür. Bu ara boşluk mesafesinde en düşük patlayıcı oranı $R=1,5$ olan 7 numaralı numunede paslanmaz çelik levhanın sertliği birleşme ara yüzeyine 150 μm mesafede 420 HV olurken 1350 μm mesafede 418 HV olmuştur. Yine birleştirilen levhanın orta kısmı yaklaşık olarak ilk sertliğini muhafaza etmiş ve 404 HV değerinde kalmıştır. Aynı patlayıcı oranında bakır levha ise sertlik, birleşme ara yüzeyine 150 μm mesafede 129 HV, 1350 μm mesafede yine 129 HV olmuştur. Bu malzemede de levhanın orta kısmı çarpışma esnasında gerçekleşen deformasyon sertleşmesinden etkilenmemiş ve ilk sertliğini muhafaza etmiştir. Yine aynı ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının artması ile beraber levhaların çarpışma şiddetleri arttığından sertlik değerleri de buna bağlı olarak artış göstermektedir.

Aynı ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının en fazla olduğu ($R=3$) numune olan 10 numaralı numunede paslanmaz çelik levhada birleşme ara yüzeyinde sertlik 440 HV değerini bulurken levhanın orta kısmı ilk sertliğini yaklaşık olarak korumuştur. Dış yüzeyde ise sertlik değeri 438 HV değerine ulaşmıştır.

Yine aynı patlayıcı oranında ($R=3$) bakır levhada da sertlikler birleşme ara yüzeyinden dışa doğru paslanmaz çelik levha da olduğu gibi değişiklik göstermektedir. Birleşme ara yüzeyine 150 μm mesafede sertlik değeri 145 HV olurken 1350 μm mesafede bu değer 143 HV değerine ulaşmıştır. Bu patlayıcı oranında bakır levhanın da orta kısmı deformasyon sertleşmesinden etkilenmeyerek ilk sertliğini yaklaşık olarak muhafaza etmiştir (115 HV).

Çizelge 5.4. -2t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri

Numune No	Malzemeler	Levha Sertliği (HV)	Metal Çifti Sertliği (HV300g)		
			Ara Yüzeyden Uzaklık (μm)		
			150	800	1350
12 (R=1,5)	Paslanmaz Çelik	400	422	404	420
	Bakır	113	130	114	130
13 (R=2)	Paslanmaz Çelik	400	435	404	435
	Bakır	113	135	114	134
14 (R=2,5)	Paslanmaz Çelik	400	440	405	438
	Bakır	113	140	115	140
15 (R=3)	Paslanmaz Çelik	400	445	405	443
	Bakır	113	148	115	148



Şekil 5.3. -2t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği

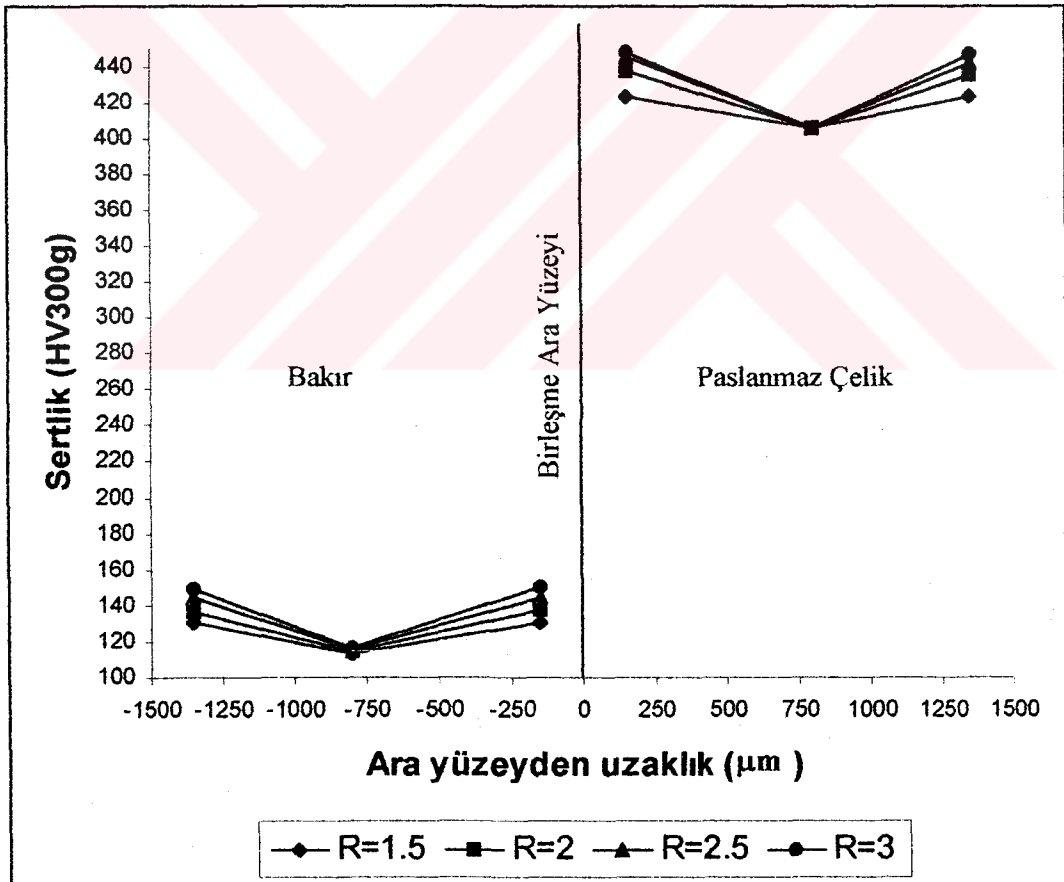
Çizelge 5.4 ve Şekil 5.3'de - 2t - ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerdeki birleşme ara yüzeyinden dışa doğru oluşan sertlik değişimleri görülmektedir. Ara boşluk mesafesinin 2t (3 mm) olduğu birleştirmelerde de patlayıcı oranının artmasına paralel olarak birleşme ara yüzeyi ve dış yüzeylerde oluşan soğuk deformasyon oranı ile beraber sertlik değerleri de artış göstermektedir. Bu ara boşluk mesafesinde birleşme sağlanan numunelerde en düşük patlayıcı oranı olan ($R=1,5$) 12 numaralı numunede paslanmaz çelik levha, birleşme ara yüzeyine en yakın bölgede 422 HV değerine ulaşırken dış yüzeyde patlayıcının patlaması esnasındaki şok ile 420 HV değerine ulaşmıştır. Yine bu ara boşluk mesafesinde en düşük patlayıcı oranında paslanmaz çelik levhanın orta kısmındaki sertlikte fazla bir artış oluşmamış sertlik 400 HV'den 404 HV değerine çıkmıştır. Buna paralel olarak bakır levha da, birleşme ara yüzeyine en yakın mesafede (150 μm) 130 HV sertlik değerine ulaşırken dış yüzeyde de yine 130 HV sertlik tespit edilmiştir. Bakır levhada da birleşme ara yüzeyi ve dış yüzey arasında kalan orta kısımda da sertlikte bir artış görülmemiş olup 114 HV sertlik değeri ölçülmüştür.

2t ara boşluk mesafesinde de, önceki farklı ara boşluk mesafelerinde olduğu gibi patlayıcı oranıyla beraber üst parçanın çarpışma hızı artmakta ve bu hıza bağlı olarak birleşme ara yüzeyinde ve dış yüzeydeki deformasyon miktarı artmaktadır. Artan deformasyon miktarı ile beraber sertlik değerlerinde de artmalar görülmektedir. Bu ara boşluk mesafesinde ara yüzey ve dış yüzeydeki sertlik değeri artışları önceki ara boşluk mesafelerine nazaran biraz daha fazla artış göstermektedir. Bunun sebebi, bu ara boşluk mesafesinde üst levhanın öncekilere nazaran biraz daha fazla hızlanmış olması olarak düşünülmektedir. Üst levhanın hızlanmasıyla beraber oluşan deformasyon sertleşmesi artmakta ve sertlik değeri yükselmektedir.

En yüksek patlayıcı oranında birleştirilen 15 numaralı numunede paslanmaz çelik, birleşme ara yüzeyinde 445 HV, dış yüzeyde 443 HV sertlik değeri gösterirken bakır levha, birleşme ara yüzeyinde ve dış yüzeyde 148 HV sertlik değeri göstermiştir.

Çizelge 5.5. -3t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen levha ve metal çiftleri sertlik değerleri

Numune No	Malzemeler	Levha Sertliği (HV)	Metal Çifti Sertliği (HV300g)		
			Ara Yüzeyden Uzaklık (μm)		
			150	800	1350
17 (R=1,5)	Paslanmaz Çelik	400	423	405	423
	Bakır	113	130	113	131
18 (R=2)	Paslanmaz Çelik	400	437	405	435
	Bakır	113	137	114	136
19 (R=2,5)	Paslanmaz Çelik	400	445	406	442
	Bakır	113	145	115	145
20 (R=3)	Paslanmaz Çelik	400	448	406	447
	Bakır	113	150	116	149



Şekil 5.4. -3t- Ara boşluk mesafesinde birleştirilen metal çiftleri sertlik grafiği

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.4'de - 3t - ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerdeki birleşme ara yüzeyinden dışa doğru oluşan sertlik değişimleri görülmektedir. Bu ara boşluk mesafesinde, birleştirilen levhaların ara yüzeyinde ve dış yüzeyinde oluşan sertlik artışları diğerlerine nazaran biraz daha fazla olmuştur. Bu birleştirmelerdeki sertlik artışlarının sebebi üst parçanın hızının diğer ara boşluk mesafelerine nazaran daha fazla olmasındandır. Bu ara boşluk mesafesi, üst parçanın yeterince hızlanabilmesi için yeterli gelmiştir. 3t ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri de bunu doğrulamaktadır. Bu ara boşluk mesafesinde birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntülerine bakılacak olursa (Resim 5.4, 5.8, 5.12) meydana gelen dalgalanma miktarlarının diğerlerinden oldukça fazla olduğu görülmektedir. Dalgalanma miktarının fazla olması deformasyon miktarı ile alakalı olduğundan bu ara boşluk mesafesindeki sertlik artışları buna bağlanabilmektedir.

3t ara boşluk mesafesinde en düşük patlayıcı oranında birleştirilen 17 numaralı birleştirmelerde paslanmaz çelik levha, ara yüzeye en yakın mesafede ve dış yüzeyde 400 HV sertlik değerinden 423 HV sertlik değerine yükselmiş levha kalınlığının orta kısmında bu sertlik 405 HV değerinde kalmıştır. Aynı patlayıcı oranında bakır levha, birleşme ara yüzeyinde 130 HV, dış yüzeyde ise 131 HV sertlik değeri göstermiştir. Bakır levha kalınlığının orta kısmındaki sertlik ise 113 HV sertliğinde kalmıştır.

En yüksek patlayıcı oranında birleştirilen numune olan 20 numaralı numunede paslanmaz çelik levhanın sertliği 400 HV'den birleşme ara yüzeyinde 448 HV değerine dış yüzeyde ise 447 HV değerine ulaşmıştır. Yine levha kalınlığının ortasına rastlayan, birleşme ara yüzeyinden 800 µm mesafedeki sertlik değeri çok fazla bir değişim göstermeyerek 406 HV değerinde kalmıştır. Bu patlayıcı oranında bakır levhada ise, ara yüzeydeki sertlik 150 HV, dış yüzeydeki sertlik ise 149 HV değerine ulaşmıştır. Levha kalınlığının ortasında ise sertlik birleşme anındaki deformasyondan fazlaca etkilenmeyerek bakır levhanın ilk sertliği olan 113 HV değerinden 116 HV değerine çıkmıştır.

Genel olarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş levhaların birleşme ara yüzeylerinde ve dış yüzeylerinde patlayıcının patlaması ile oluşan şok dalgası ve yüksek hızdaki çarpışma nedeni ile bir sertlik artışı meydana gelmektedir. Bu sertlik artışı patlayıcı oranı ile doğru orantılı olmaktadır. Aynı ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının arttırılması ile birleşme ara yüzeyi ve dış yüzeydeki sertlik değerleri artış göstermektedir. Meydana gelen sertlikteki bu artış, ara boşluk mesafesi ile de değişiklik göstermektedir. Ara boşluk mesafesinin düşük olduğu durumlarda (Üst parça kalınlığının yarısı gibi) patlayıcının patlama etkisi ile hızlanan üst parça, yeterli hıza ulaşmak için yeterince yol kat edememekte ve alt parça ile yeterli bir hızda çarpışmamaktadır. Bu nedenle birleştirilen levhaların ara yüzeylerinde ve dış yüzeylerinde düşük çarpışma hızından dolayı fazlaca bir deformasyon sertleşmesi meydana gelmemektedir.

Literatürde (29,43,49), paralel kaynak düzenlemelerinde alt ve üst levha arasındaki boşluğun, çarpışan levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının en az yarısından büyük olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca alt ve üst levha arasındaki boşluk mesafesi yeterince geniş ise üst levhanın ulaşabileceği maksimum hıza ulaşabileceği ifade edilmektedir.

Birleştirilen levhaların ara yüzeyi ve dış yüzeyinde meydana gelen sertlik artışı levhaların sadece yüzeylerinde oluşmaktadır. Birleştirilen levhaların iç kısımları bu sertlik artışından fazlaca etkilenmemektedir. Şekil 5.1 - 5.4'deki sertlik grafiklerinden de görüldüğü gibi birleştirilen levhalar orta kısımlarında ilk sertliklerini yaklaşık olarak muhafaza etmektedirler.

Ara boşluk mesafesinin sabit olduğu durumlarda patlayıcı oranı, dolayısıyla patlayıcı miktarı arttırıldığında patlayıcının patlama enerjisi artmakta ve üst levhaya daha yüksek bir hız kazandırabilmektedir. Üst levhanın daha yüksek bir hız kazanması ise alt levha ile çarpışma hızını arttırmaktadır. Alt levha ile yüksek hızda çarpışan üst levha, birleştirilen malzemelerin yüzeylerindeki soğuk deformasyon miktarını arttırarak levhaların yüzeylerinin sertlik değerlerini yükseltmektedir.

Resim 5.9 - 5.12'de verilen SEM mikroyapı görüntülerinde de levhaların birleşme ara yüzeylerinde meydana gelen deformasyon izleri görülebilmektedir. Birleştirilen levhaların birleşme yüzeylerindeki tanelerinde meydana gelen bu deformasyon sebebiyle, sertlik değerleri artış göstermektedir.

Truetnev et al. (72), titanyum, çelik ve nikel birleşmesi üzerine yaptıkları bir araştırmada levhaların dış yüzeylerindeki sertliğin iç bölgelerden daha fazla olduğunu vurgulamışlar ve bunun da çarpışma boyunca metalin yüzey tabakasının deformasyon sertleşmesi ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Gulbin et al. (70), berilyum, bronz, titanyum ve alüminyum malzemelerini patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Bu birleştirmelerin birleşme ara yüzeyinde yaptıkları incelemelerde çarpışmadan dolayı sertlik değerlerinde bir artışın olduğunu ifade etmişlerdir.

Literatürde belirtilen sonuçlar, deneysel çalışmamızda bulunan sonuçlar ile paralellik göstermekte olup, bu çalışmadaki sonuçlar desteklenmektedir.

5.3. Çekme - Makaslama Deney Sonuçları ve Tartışma

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş deney numunelerine ait çekme makaslama deney sonuçları Çizelge 5.6'da Tablo ve Şekil 5.5'de grafik olarak verilmiştir. Yine dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı oranının (R) 1,2 olduğu numunelerde birleşme gerçekleşmediğinden bu numunelere ait çekme makaslama deney sonuçları tespit edilememiştir.

Bakır ve paslanmaz çelik levhalara uygulanan çekme deneyleri sonucunda deneylerde kullanılan bakır levhanın çekme dayanımının 360 MPa ve paslanmaz çelik levhanın ise 870 Mpa olduğu tespit edilmiştir.

ASTM D 3165-95'e göre yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda birleştirmelerin hiçbirinde birleşme arayüzeylerinde sıyrılma gerçekleşmemiş ve birleştirilen parçalarda ayrılma gözlenmemiştir. Deneyler sonucunda bütün kopmalar bakır levhada gerçekleşmiş, paslanmaz çelik levha ise bu çekme deneylerinden etkilenmemiştir. Ayrılmanın birleşme arayüzeyinden olmayıp bakır levhanın kopması neticesinde olması, gerçekleştirilen bütün birleştirmelerin güvenilir ve standartlar dahilinde olduğunu göstermektedir.

Gerçekleştirilen çekme - makaslama deney sonuçlarına göre bakır levhanın da çekme dayanımının bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bu artış patlamalı kaynak esnasında levhaların yüksek hızlarda birbirleri ile çarpışması neticesinde meydana gelen deformasyondan kaynaklandığına bağlanmıştır. Yüksek hızdaki bu çarpışma nedeniyle oluşan deformasyon sertleşmesi, aynı zamanda birleştirilen metal çiftlerinin sertliklerinde de artışa neden olmuştur (Şekil 5.1 - 5.4).

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, bütün ara boşluk mesafelerinde patlayıcı oranının artması ile beraber bakır malzemenin de kopma dayanımının arttığı görülmektedir. -0,5t- ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının 1,5 olduğu numunelerde bakır levhanın kopma dayanımı 370 MPa iken patlayıcı oranının artması ile beraber bu değer 373, 375 ve 379 MPa olmuştur.

Ara boşluk mesafesinin -t- (1,5 mm) olduğu birleştirmelerde, patlayıcı oranının 1,5 olduğu numunelerde bakırın çekme dayanımı 372 MPa olurken patlayıcı oranının 3 olduğu numunelerde bu değer 385 MPa olarak tespit edilmiştir.

Ara boşluk mesafesinin -2 t- olarak belirlendiği birleştirme numunelerinde de, patlayıcı oranının artması ile beraber bakır levhanın kopma dayanımı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu ara boşluk mesafesinde patlayıcı oranının 1,5 olduğu birleştirmelerde bakır levhanın kopma dayanımı 375 MPa elde edilirken patlayıcı oranının 3 olması ile beraber bu değer 390 MPa olarak belirlenmiştir.

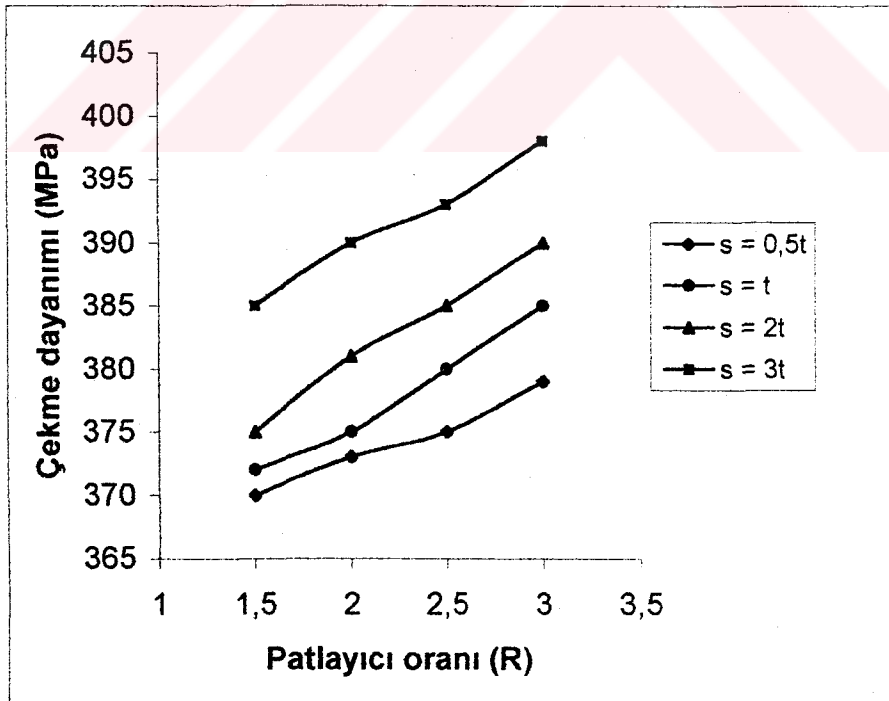
-3 t- ara boşluk mesafesinde ise bakır levhanın kopma dayanımı yine patlayıcı oranının artması ile beraber artış göstererek 385 MPa değerinden 398 MPa değerine ulaşmıştır.

Bakır - paslanmaz çelik birleştirmelerin ara yüzeyinde mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi (Resim 5.9 - 5.12) intermetalik bileşenler oluşmamaktadır. Bu sebeple patlayıcı oranının artması intermetalik bileşenlerin oluşmasına sebep olmamakta ve dalgalı bir birleşme ara yüzeyi meydana getirmektedir. Dalgalı ara yüzeyin meydana gelmesi ise birleştirilen levhalar arasında birleşme yüzey alanını veya temas alanını arttırmakta olup aynı zamanda Resim 5.1-5.4'deki mikroyapılardan görüldüğü gibi mekanik kilitlenme oluşumunu sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı yüksek patlayıcı oranlarında da çekme - makaslama testleri esnasında birleşme arayüzeylerinden ayrılımlar görülmemiştir.

Acarer (49), gerçekleştirdiği çelik-çelik birleştirmesinde patlayıcı oranının artması ara yüzeyde intermetalik bileşenlerin oluşmasına sebep olduğunu ve bu intermetalik bileşenlerin de malzemenin dayanımını azalttığını belirtmektedir.

Çizelge 5.6. Birleştirilen numunelerde bakır levhanın çekme dayanımı sonuçları

Numune no	Araboşluk mesafesi (s) mm	Patlayıcı oranı (R)	-Cu- Çekme dayanımı MPa
2	0,5 t	1,5	370
3		2	373
4		2,5	375
5		3	379
7	t	1,5	372
8		2	375
9		2,5	380
10		3	385
12	2 t	1,5	375
13		2	381
14		2,5	385
15		3	390
17	3 t	1,5	385
18		2	390
19		2,5	393
20		3	398

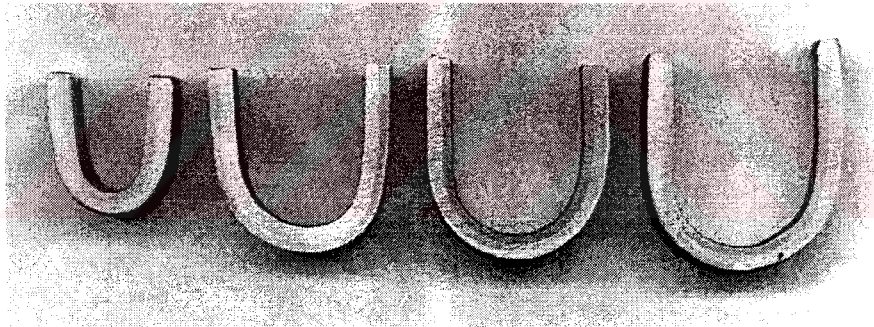


Şekil 5.5. Birleştirilen numunelerde bakır levha çekme dayanımı sonuçları grafiği

5.4. Eğme Deney Sonuçları ve Tartışma

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş bakır - paslanmaz çelik birleştirmelerine uygulanan değişik çaplardaki eğme deneyleri sonucunda, birleştirmelerin hiç birinde ayrılma, yırtılma veya çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Elde edilen bu sonuçlar, patlamalı kaynak yöntemi ile bakır - paslanmaz çelik levhaların sağlıklı bir şekilde birleştirilebileceğini göstermektedir.

Endüstride, birleştirilen levhaların çeşitli çalışma şartlarında farklı oranlarda eğilip bükülmeleri göz önüne alınarak bir grup numuneye standart dışı olarak eğme işlemleri farklı çaplarda ve 180^0 ye kadar yapılmıştır. Değişik çaplarda eğme işlemi uygulanan numunelere ait bir grup makro fotoğraf aşağıda Resim 5.13'de gösterilmiştir.



Resim 5.13. Farklı çaplarda eğilmiş olan numunelere ait görüntüler

Deneyler esnasında kullanılan birleştirme parametrelerinin en düşük olarak belirlendiği numunelerde bile eğme işlemi esnasında ayrılmanın görülmemesi elde edilen birleştirmelerin sağlamlığını ve güvenilirliğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen birleştirmelerin hiç birinde (Yüksek patlayıcı oranlarında dahi) mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü üzere (Resim 5.1 - 5.4), birleşme ara yüzeyinde intermetalik bileşenler oluşmamıştır. Literatürde (74), bakır - paslanmaz çelik üzerine yapılan çalışmalarda birleşme ara yüzeyinde böyle bir yapının meydana gelmediği belirtilmektedir.

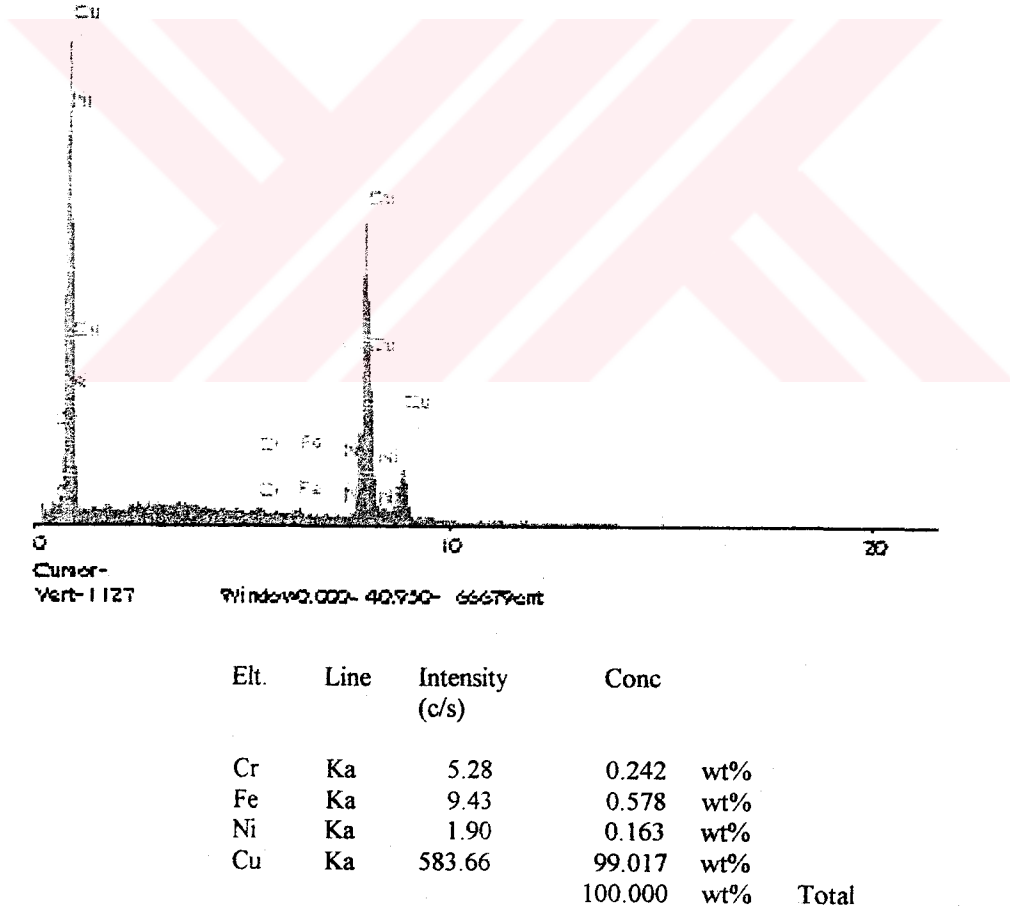
Acarer (49) patlamalı kaynak yöntemi ile gerçekleştirmiş olduğu çelik - çelik birleştirmelerine uyguladığı eğme deneyleri sonucunda, birleşme ara yüzeyinde intermetalik bileşenlerin oluştuğu numunelerin ayrıldığını belirtmiştir.

Bakır - paslanmaz çelik birleştirmelerinin birleşme ara yüzeyinde yüksek patlayıcı oranlarında bile intermetalik bileşenlerin oluşmaması eğme deneyleri sırasında levhaların ayrılmamasına bir etken olmuştur. Ara yüzeyde meydana gelen intermetalik bileşenler sert ve kırılgan olduklarından birleştirilen levhalara uygulanan herhangi bir deformasyon esnasında levhaların ayrılmasını kolaylaştırmaktadır.

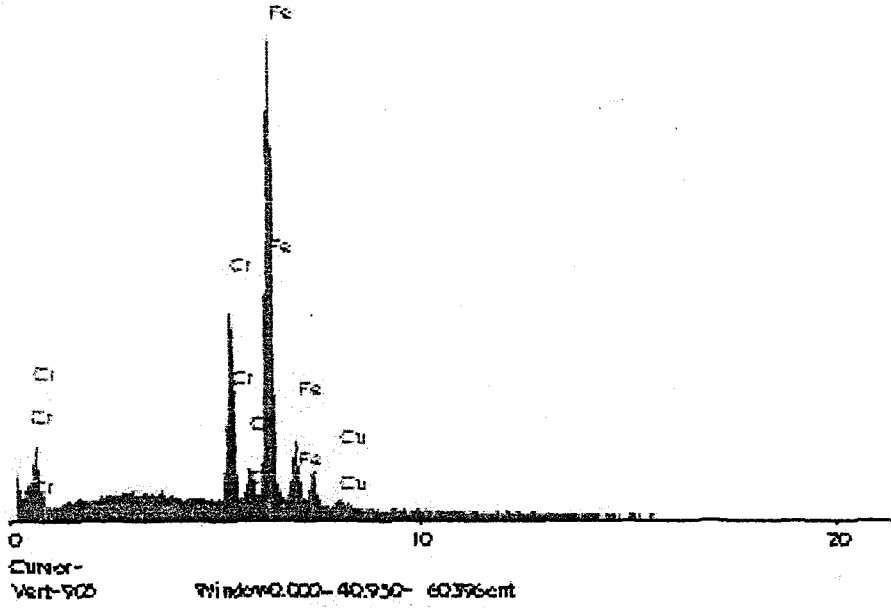
-ASTM A 263-94a - standardında, eğme deneyi sonucunda üç numuneden en az iki tanesinin %50'den fazla ayrılma göstermemesi gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışmadaki eğme deneylerinden elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen birleştirmelerin standartlar dahilinde olduğunu göstermektedir.

5.5. Isıl İşlem Sonuçları ve Tartışma

Patlamalı kaynak yönteminde, bilindiği gibi düz ve dalgalı birleşme arayüzeyi olmak üzere iki tür birleşme arayüzeyi oluşmaktadır. Genellikle düz birleşme arayüzeylerinde birleşmeyen bölgelerin kalması ihtimali ile çoğunlukla dalgalı birleşme arayüzeyine sahip birleşmeler tercih edilmektedir. Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen ve dalgalı birleşme arayüzeyine sahip numunelerden öncelikle ısıtma işlemine tabi tutulmamış halde iken SEM cihazı ile birleşme arayüzeyine 8 μ m mesafeden bakır ve paslanmaz çelik levhalardan EDS analizi alınmıştır. Birleştirilmiş bu levhalardan alınan element analizleri Şekil 5.6 ve 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Isıl işlemsiz bakır levhadan alınan element analizi sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	
Cr	Ka	300.25	18.720	wt%
Fe	Ka	716.55	74.157	wt%
Ni	Ka	44.22	6.742	wt%
Cu	Ka	7.36	0.381	wt%
			100.000	wt% Total

Şekil 5.7. Isıl işlemsiz paslanmaz çelik levhadan alınan element analizi sonucu

Yukarıda verilen element analizi sonuçlarına bakıldığında bakır levha % 99.017 ağırlık oranında bakır içermekte olup bu sonuç yaklaşık olarak saf bakır olarak değerlendirilebilir. Bununla beraber Şekil 5.6'da verilen sonuçlarda, bakır malzeme içerisinde ihmal edilebilecek kadar çok küçük değerlerde Fe, Cr ve Ni elementlerine rastlanmaktadır.

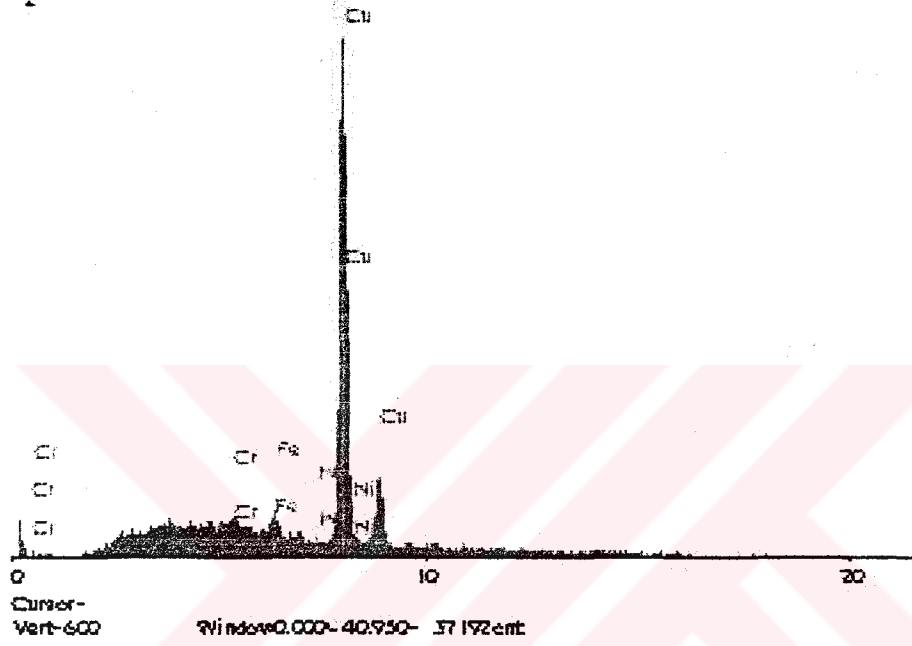
Şekil 5.7'de verilen paslanmaz çelik malzemeye ait olan element analizi ise tipik bir östenitik paslanmaz çelik bileşimini içermektedir. Burada paslanmaz çelik levha içerisinde % 0.381 ağırlık oranında bakır elementinin varlığı dikkat çekmektedir. Bu değer deneysel çalışmalar bölümünde Çizelge 4.1'de verilen paslanmaz çelik levhaya ait kimyasal bileşim tablosundaki bakır oranına çok yakın değerdedir.

Yukarıdaki sonuçlara göre belirtilen mesafede (8 μm), patlamalı kaynak işlemi esnasında ne bakır malzemeden paslanmaz çelik levhaya, nede paslanmaz çelik malzemeden bakır levhaya difüzyon olmamıştır. Bu sonuca göre, patlamalı kaynak yönteminde difüzyonsuz bir birleşmenin gerçekleştiği söylenebilir.

Literatürde de [29], patlamalı kaynak yöntemindeki birleşmenin atomik boyuttaki çekme kuvvetlerinden meydana geldiği ve birleşme sıcaklığının düşük olmasından dolayı ara yüzeyde difüzyon olayının gerçekleşmediği belirtilmektedir.

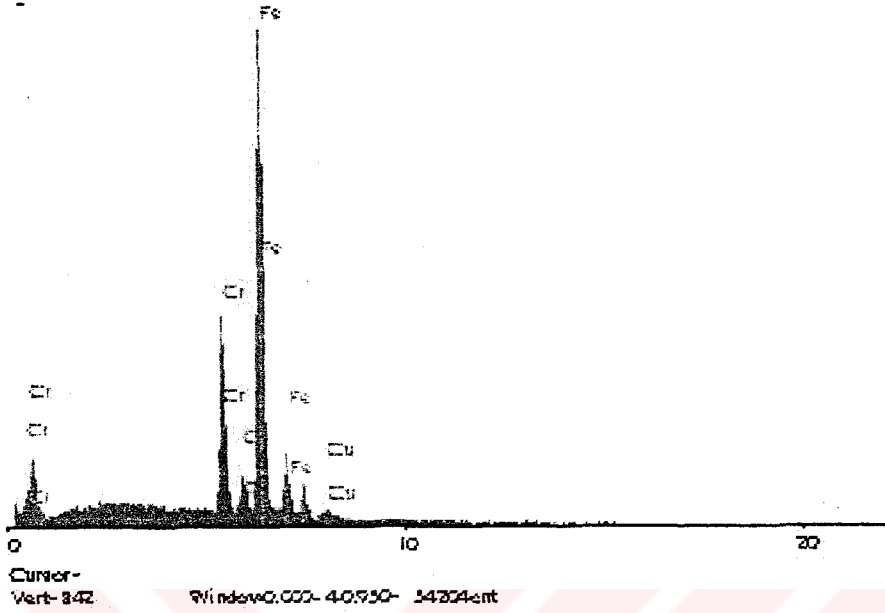
Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen bakır-paslanmaz çelik levhaların ısı ortamlarında kullanıldıklarında birleşme ara yüzeyinde difüzyon olup olmadığını tespit etmek amacı ile bir grup numuneye ısı işlem uygulanmıştır. Bu numuneler deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi bakır malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında 300 °C'de 8,16,24 ve 32 saat olmak üzere dört farklı sürede ısı işlem fırınında bekletilmişlerdir. İşletme şartlarında, sıvı yada gaz tanklarında kullanılan bu levhalar yaklaşık olarak 300 °C sıcaklığa maruz kaldıklarından ısı işlem sıcaklığı olarak bu sıcaklık tercih edilmiştir.

Isıl işlem sonucunda 8, 16 ve 24 saat fırında bekletilen numunelerin birleşme ara yüzeylerinde bir difüzyon gerçekleşmediği yapılan element analizi sonucunda tespit edilmiştir. Belirtilen sürelerde difüzyonun gerçekleşmemesi seçilen sıcaklığın düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı sıcaklıkta 32 saatlik bir bekleme sonucunda birleşme ara yüzeyinde yine aynı mesafede çok az bir difüzyonun gerçekleştiği yapılan element analizi sonuçlarından görülmüştür. Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen ve 32 saat fırında bekletilen numunelerin birleşme ara yüzeylerinden alınan element analizi sonuçları Şekil 5.8 ve 5.9'de verilmiştir.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	
Cr	Ka	7.85	0.521	wt%
Fe	Ka	19.00	1.410	wt%
Ni	Ka	3.27	0.293	wt%
Cu	Ka	565.43	97.775	wt%
			100.000	wt% Total

Şekil 5.8. 32 saat fırında bekletilen ve bakır tarafından alınan element analizi sonucu.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	
Cr	Ka	224.80	17.914	wt%
Fe	Ka	685.47	73.195	wt%
Ni	Ka	44.86	7.165	wt%
Cu	Ka	8.78	1.726	wt%
			100.000	wt% Total

Şekil 5.9. 32 saat fırında bekletilen ve paslanmaz çelik tarafından alınan element analizi sonucu.

Yukarıda verilen ısıtılmış işlem yapılmış numunelerin element analizi sonuçlarından görüldüğü üzere, belirtilen süre bakır malzemeden paslanmaz çelik levhaya ve paslanmaz çelik malzemeden bakır levhaya çok az bir difüzyonun gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Şekil 5.8'de verilen element analizinde bakır levha tarafında birleşme ara yüzeyine 8 µm mesafede % 1.410 ağırlık oranında Fe, % 0.521 ağırlık oranında Cr ve % 0.293 ağırlık oranında Ni elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu değerlerin çok düşük seviyelerde olmasına rağmen, birleşme ara yüzeyinde bir difüzyonun varlığından söz edilebilir.

Şekil 5.9'de verilen paslanmaz çelik levha tarafındaki element analizi sonuçlarından da birleşme ara yüzeyine 8 µm mesafede % 1.726 ağırlık oranında bakırın varlığı görülmektedir. Bu değer patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş paslanmaz çelik malzemenin ısıtılmış haldeki bakır içeriğinden bir miktar daha fazladır. Bu sonuca göre de, azda olsa bakır elementinin paslanmaz çelik levha içine difüzyonundan söz edilebilmektedir.

Deneysel çalışmalarda seçilen sıcaklık değeri daha yüksek seviyelere çıkartıldığında aynı sürelerde daha fazla difüzyonun gerçekleşebileceği düşünülmektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlara göre patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen bakır - paslanmaz çelik levhaların ısıtılmış ortamlarda kullanıldıklarında, birleşme ara yüzeyinde oluşan difüzyonun atomik boyuttaki çekim kuvvetine ve mekanik kilitlemeye bir destek olabileceği, bunun sonucu olarak ta birleştirilmiş olan levhaların ayrılmasını engelleyici bir etki oluşturabileceği söylenebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Paslanmaz çelik ile bakır levhaların farklı patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesi kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirildiği ve mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Patlayıcı oranının 1,2 olduğu birleştirmelerde dört farklı ara boşluk mesafesinde de patlayıcı miktarı az olduğundan üst levha yeterince hızlanamamış ve iyi bir birleşme sağlanamamıştır.
2. Alışılmış kaynak yöntemleri ile sağlıklı bir şekilde birleştirilemeyen farklı ergime derecelerine sahip paslanmaz çelik ile bakır malzemeler uygun parametreler dahilinde MKE üretimi olan Elbar 5 kodlu toz patlayıcı kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile problemsiz bir şekilde birleştirilebilmektedirler.
3. Patlamalı kaynak yöntemlerinde çelik altlık kullanılıyor ise birleştirilen levhaların altlığın yansıtma özelliğinden etkilenip ayrılmasını engellemek amacıyla altlık ile alt parça arasında plastik bir tampon kullanılmalıdır.
4. Ara boşluk mesafesinin artması ile beraber düşük patlayıcı oranlarında bile, üst levhanın yeterince hızlanabileceği mesafe sağlandığından patlamalı kaynak yönteminin tipik birleşme ara yüzey görünümü olan dalgalı bir ara yüzey elde edilebilmektedir.
5. Patlamalı kaynak yönteminde kullanılan patlayıcı oranının ve özellikle ara boşluk mesafesinin artması ile yüksek çarpışma hızına ve basıncına neden olduğundan elde edilen birleştirmelerin ara yüzeylerinde meydana gelen dalgaların boy ve genliklerinde artış görülmektedir.
6. Artan patlayıcı oranına bağlı olarak birleştirilmiş levhaların özellikle birleşme ara yüzeyine yakın bölgeleri ve dış yüzeylerindeki sertlik değerlerinde yüksek hızdaki çarpışma nedeni ile oluşan deformasyondan dolayı artışlar meydana gelmektedir.

7. Artan patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesi ile beraber birleşme arayüzeyinde dalga oluşumu nedeni ile birleşme yüzey alanı artmış ve çekme-makaslama testleri sonucunda arayüzeyden ayrılmaların oluşmadığı tespit edilmiştir.
8. Numunelere uygulanan farklı çaplardaki eğme deneyleri sonucunda malzeme ve birleşme ara yüzeylerinde yırtılma, çatlama ve ayrılma gibi herhangi bir hataya rastlanmamıştır.
9. Birleştirilen levhalara uygulanan SEM çalışmaları neticesinde bakır levhanın yüksek ısı iletkenliği nedeni ile birleşme ara yüzeyinde herhangi bir ergime veya ergime çukurcukları tespit edilememiştir.
10. Birleştirilmiş numunelere uygulanan element analizi sonuçlarında birleşme ara yüzeyinde difüzyon oluşumuna rastlanmamıştır.
11. Uygulanan farklı sürelerdeki ısı ışımlar sonucunda birleşme ara yüzeylerinde difüzyon oluşumlarına rastlanılmıştır.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ışığında bu konuda bundan sonra yapılacak olan araştırmalar için şu öneriler yapılabilir:

1. Farklı patlayıcı türleri kullanılarak bu patlayıcıların birleştirmeye olan etkileri incelenebilir.
2. Patlamalı kaynak yöntemi ile ikiden fazla levha birleştirilerek kompozit malzeme üretimi üzerine değişik çalışmalar yapılabilir.
3. Alışılmış kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen değişik malzeme türlerinin patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir.
4. Farklı özelliğe sahip altlık malzemeleri kullanılarak altlığın birleştirmeye olan etkileri incelenebilir.
5. Daha geniş boyutlardaki levhaların birbirleri ile birleştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.

6. Patlama kaynağı yöntemi ile titanyum gibi hafif ve korozyona dayanıklı metallerin başka metallerle birleştirilebilirlikleri üzerine çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- 1- Yükler, A.İ., "Kaynak Metali", *M..T.E.F. Matbaası*, Metal Eğitimi Bölümü, İstanbul, (1): 1-2 (1992).
- 2- Durgutlu, A., Gülenç, B., Tülbentçi, K., "Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi", *Türk Mühendislik ve evre Bilimleri Dergisi*, 23 (4): 251-259 (1999).
- 3- Gülenç, B., "MİG-MAG Kaynağında Koruyucu Gaz Karışımının Kaynak Metalinin Mekanik zelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, *G..F.B.E.*, Ankara, Mayıs, (1995).
- 4- Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Third Edition, *Addison-Wesley*, New York, 809-810 (1997).
- 5- Groover, M.P., "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems", *Prentice-Hall*, New Jersey, 756-757 (1996).
- 6- Tlbenti, K., Yılmaz, M., "Farklı Takım eliklerinin Katı hal Kaynağı", *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, İT*, İstanbul, 303-314 (1989).
- 7- Elmer, J.V., Kautz, D.D., "Fundamentals of Friction Welding", *ASM Handbook*, 6: 150-155 (1993).
- 8- Spindler, D.E., "What Industry Needs to Know About Friction Welding", *Welding Journal*, 37-42 (May 1994).
- 9- Ateş, H., Kurt, A., Trker, M., "Sürtünme Kaynağı", *Makine Mhendisleri Odası Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi*, Ankara, 125-132 (1999).
- 10- Darby, L.G., "Developments in Friction Welding Monitoring", *CME Welding Spplement*, 37-39 (1982).
- 11- SchillingsTsang, E.G., Rocky Flats, G., "Friction Welding", *ASM Handbook*, 6: 315-317 (1993).
- 12- Stotler, T., "Procedure Development and Practice Considerations for Inertia and Direct-drive Friction Welding", *ASM Handbook*, 6: 888-892 (1993).
- 13- Kurt, A., "Toz Metalden retilen Bronz Yatağın Dşk Karbonlu eliğe Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi", *Fırat niv. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, Elazığ, (1996).
- 14- Spanswick, O.S., "Diffusion Bonding – Engineering Applications", *Production Engineer*, 45-46, (April 1989).

- 15- Murray, W., Mahoney and Cliff, C., "Fundamentals of Diffusion Bonding", *ASM Handbook*, 6: 156-159 (1993).
- 16- Owczarski, W.A., Paulonis, D.F., "Application of Diffusion Welding in The USA", *Welding Journal*, 6: 22-33 (1981).
- 17- Anık, S., "Kaynak Tekniği El Kitabı", *Gedik Holding Yayını*, İst., 1-20 (1991).
- 18- Dunkerton, S.B., "Procedure Development and Practice Considerations for Diffusion Welding", *ASM Handbook*, 6: 883-887 (1993).
- 19- Tülbentçi, K. (Çeviri), "Ultrasonik Titreşimler Yardımıyla Kaynak", *Oerlikon Kaynak Tekniği, İskender Matbaası*, İstanbul, 61-70 (1970).
- 20- Şimşek, M., "Modern Kaynak Usulleri", *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, (1986).
- 21- Devine, J., "Ultrasonic Welding", *ASM Handbook*, 6: 324-327 (1993).
- 22- Committee, "Ultrasonic Welding", *Welding Handbook, AWS*, 3: 279-310 (1980).
- 23- Devine, J., "Procedure Development and Practice Considerations for Ultrasonic Welding", *ASM Handbook*, 6: 893-895 (1993).
- 24- Committee, "Explosion Welding", *Welding Handbook, AWS*, 3: 264-278, (1980).
- 25- Patterson, R.A., "Fundamentals of Explosion Welding", *ASM Handbook*, 6: 160-164 (1993).
- 26- Richard, L.L., "Welding and Welding Technology", *McGraw-Hill*, New York, 280-284 (1973).
- 27- Gupta, R., C. and Kainth, G.,S., "Swinging Wake Mechanism For Interface Wave Generation in Explosive Welding of Metals", *Transactions of the ASME*, 57: 514-521 (1990).
- 28- Banker, J.G., Edvard, G.R., "Explosion Welding" *ASM Handbook*, 6: 303-305 (1993).
- 29- Nobili, A., "Explosion Bonding Process", *Nobelclad Technical Bulletin*, NT 200, Rivesaltes Plant, France. (www.dynamicmaterials.com/clad/docs/HTML/nobelclad_technical_bulletin_nt200.htm).
- 30- Onaran, K., Erman, B., "Malzemelerin Yapı ve Özellikleri", *İTÜ Matbaası*, İstanbul, 1: (1993).

- 31-Li, Y., Hashimoto, H., Sakedai, E., at all, "Morphology and Structure of Various Phases at The Bonding Interface of Al/Steel Formed By Explosive Welding", *Journal of Electron Microscopy*, 49: 5-16, (2000).
- 32-Davies, A.C., "The Science and Practice of welding", *Cambridge University Press*, Cambridge, 2: 247-250 (1989).
- 33-Kleven, S., "Ultrasonic Inspection of Explosion Welded Titanium Clad Plate", *Materials Evaluation*, 557-560 (1996).
- 34-Gao, W., Gu, L., Sui, Y., Ma, D.; "Bonding Interface of Titanium/Steel Clad Plate by Explosion", *Rare Metal Materials and Engineering*, 22 (2): (1993).
- 35-Richman, R.H.; Rao, A.S, Hodgson, D. E. , "Cavitation Erosion of Two NiTi Alloys" , *Wear*, 157: 401-407 (1992).
- 36-Ezra, A.A., "Principles and Practice of Explosive Metakworking", *Industrial Newspapers Limited, John Adams House*, London, (1973).
- 37-Cowan, G., R., Bergmann, O., R. and Holtzman, A., H., "Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosive-Clad Metals", *Metallurgical Transactions*, 2: 3145-3155 (1971).
- 38-Yang, Y., Xinming, Z., Zhenghua, L., Qingyun, L., "Adiabatic Shear Band on The Titanium Side in the Ti / Mild Steel Explosive Cladding Interface", *Acta mater.*, 44 (2): 561-565 (1996).
- 39-Yang, Y., Wang, Z.M., Zhang, S.R., "Some Metallurgical Behaviours of Adiabatic Shear Band on Ti Side in the Ti/Mild Steel Explosive Cladding Interface", *Rare Metal Materials and Engineering*, 26: 13-17 (1997).
- 40-James, F.K., Hay, D.R., "A Mechanizm of Explosive Bonding" *Metallurgical Transactions*, 2: 1953-1958 (1971).
- 41-Reid, S.R., "A Discussion of The Mechanism of Interface Wave Generation In Explosive Welding", *Int. Journal of Mechanical Science*, 6: 399-413 (1974).
- 42-Yang, Y., Li, Z.H., Lu, P.C., at all, "A Temperature Distribution Model of Explosive Cladding Interface and Its Application", *Rare Metal Materials and Engineering*, 29 (3): 161-163 (2000).
- 43-Blazynski, T.Z., "Explosive Welding, Forming and Compaction", *Elsevier Science Pub., Applied Science*, NewYork, 402-404 (1983).
- 44-Bahrani, A.S., Black, T.J., Crosland, B., "The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding", *Proc. Roy. Soc.*, 296: 123-136 (1967).

- 45- Akihisa, A, "Numerical Study of The Mechanism of Wavy Interface Generation in Explosive Welding", *JSME International Journal*, Fluids and Thermal Engineering, 40 (3): 395-401 (1997).
- 46- Akihisa, A., "Numerical Simulation of the Plastic Flow Field Near the Bonding Surface of Explosive Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 85: 162-165 (1999).
- 47- Demirkol, M., Aran, A., "Patlamalı Kaynak Yöntemi", *II.Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, İTÜ*, İstanbul, 142-151 (1989).
- 48- Zhou, Hairong; Zhou, Bangxin, "Study of Microstructure in Explosive Welded Joints Between Zr-4 and 1Cr18Ni9Ti", *Nuclear Power Engineering*, 18 (1): 61-64 (1997).
- 49- Acarer, M., "Patlamalı Kaynak İşlem Parametrelerinin Birleşmeye Etkisi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 50-110 (2001).
- 50- Balasubramanian, V.; Rathinasabapathi, M.; Raghukandan, K. "Modelling of Process Parameters in Explosive Cladding of Mildsteel and Aluminium", *Journal of Materials Processing Technology*, 63 (1-3): 83-88 (1997).
- 51- Andrew, D.A., at all, "Modern Welding", *The Goodheart-Willcox Company, Inc.*, USA, 35-473 (1992).
- 52- Lancaster, J.F., "Metallurgy of Welding", *Abington Publishing, Cambridge*, V 6: 25-50 (1999).
- 53- Wronka, B., "The Influence of Base Plate Thickness and Anvil on The Characteristics of Explosive Welded Joints", *INSIGHT*, 41 (6): 383-387 (1999).
- 54- Otto, H.E., Carpenter, S.H., "Explosive Cladding of Large Steel Plates With Lead", *Welding Journal*, 467-473 (1972).
- 55- Brasher, D.G., Butter, D.J., "Explosive welding: principles and potentials", *Advanced Materials & Processes*, 147 (3): (1995).
- 56- Bernard Crossland, "Explosive Welding of Metals and Its Application", *Clarendon Press*, Oxford, 233-234 (1982).
- 57- Patterson, R. A., "Materials Processing Theory and Practices", *Elsevier Science Publishers*, 10-45 (1989).
- 58- Vonne, D.L., "Procedure Development and Process Considerations for Explosion Welding", *ASM Handbook*, 6: 896-900 (1993).

- 59- Xia, Changqing; Jin, Zhanpeng; " Evolution of Microstructure and Diffusion Paths in The Molybdenum-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment", *Materials Science&Engineering*, 158: 235-239 (1992).
- 60- Lucien F. Trueb., "Microstructural Effects of Heat Treatment on the bond Interface of explosively welded Metals" *Metallurgical Transactions*, 2: 145-153 (1971).
- 61- Yuheng, L., Deming S., and Tuncer, M.K., "Explosion Bonding of Dissimilar Materials for Fabricating APS Front End Components—Analysis of Metallurgical and Mechanical Properties and UHV Applications", www.aps.anl.gov/techpub/lnotes/l237. June, (1994).
- 62- Jaramillo, D., Szecket, A. and Inal, O.T., "On the Transition from a Waveless to a Wavy Interface in Explosive Welding" *Materials Science and Engineering*, 2: 217-222 (1987).
- 63- Cowan, O., R. and Holtzman A.H., "Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding", *Journal of Applied Physics*, 34: 928-939 (1963).
- 64- Reid, S., R. and Sherif, N.H.S., "Prediction of The Wavelength of Interface Waves in Symmetric Explosive Welding", *Journal Mechanical Engineering Science*, 18 (2): 87-96 (1976).
- 65- Zlateva, G., Dafinova, R., "Structure of Bonding Zone Explosively Welded Austenitic and Ferrite-Perlitic Steel", *Practical Metallography*, 34 (3): 127-137 (1997).
- 66- Chen, Liangshan; Zhao, Tiemin; Si, Chongyao; Chen, Huaining; "Mechanizm of Improving Fatigue Limit of 16Mn Steel Weld by Explosion Shock Wave Treatment" , *Chinese Journal of Materials Research*, 8 (3): 233-236 (1994).
- 67- Richman, R.H.; Rao, A.S.; Kung, D., "Cavitation Erosion of NiTi Explosively Welded to Steel", *Wear*, 181-183 (1): 80-85 (1995).
- 68- Hokamoto, K., Izuma, T., Fujita, M., "New Explosive Welding Technique to Weld Aluminium and Stanless Steel Plates Using a Stanless Steel Intermediate Plate", *Metallurgical Transactions A*, 24A: 2289-2297 (1993).
- 69- Hokamoto, Kazuyuki; Chiba, Akira; Nishida, Minoru; Fujita, Masahiro; "Experimental Conditions for Fabrication of Multilayered Metal Base Composite Made by Single Shot Explosive Welding Technique", *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 12 (3): (1994).
- 70- Gulbin, V.N., Kobelev, A.G., Borissov, D.E., "Thermobimetals Mechanical Properties Produced by Explosive Welding With Rolling", *Journal de Physique* 4: 49-54 (1997).

- 71- Zimmerly, C.A.; Inal, O.T.; Richman, R.H., " Explosive Welding of a Near-Equiatomic Nickel-Titanium Alloy to Low-Carbon Steel", *Materials Science & Engineering A; Structural Materials*, A188 (1-2): 251-254 (1994).
- 72- Truetnev, V.V., et all., "Comparative Assessment of The Quality of The Explosive Joining of Aluminum to Titanium, Steel and Nickel", *Svar. Proiz.*, 7: 19-21 (1973).
- 73- Johnson, W.R., "Explosive Welding Plugs Into Heat Exchanger Tubes", *Welding Journal*, 22-32 (May 1971).
- 74- Livne, Z., Munitz, A., "Characterization of Explosively Bonded Iron and Copper Plates", *Journal of Materials Science*, 22: 1495-1500 (1987).
- 75- Wayne, R. Johnson, "Explosive Welding", *Welding Journal*, 22-28 (May 1971).
- 76- Mamalis, A.G., Szalay, A., Vaxevanidis, N.M., Pantelis, D.I., "Macroscopic and Microscopic Phenomena of Nickel/Titanium Shape-memory Bimetallic Strips Fabricated By Explosive Cladding and Rolling", *Materials Science and Engineering A*, 188: 267-275 (1994).
- 77- Bement, L.J., "Explosion Seam Welding", *Welding Journal*, 147-154 (June 1973).
- 78- Bhalla, A.K. and Williams, J.D., "Production of Stainless Steel Wire Reinforced Aluminium Composite sheet by Explosive Compaction", *Journal of Material Science*, 12: 522-530 (1977).
- 79- Nishida, M., Chiba, A., Honda, Y., Hirazumi, J., Horikiri, K., "Elektron Microscopy Studies of Bonding Interface in Explosively Welded Ti/Steel Clads", *ISIJ International*, 35 (2): 217-219 (1995).
- 80- Nishida, M., Chiba, A., Morizona, Y., Matsumoto, M., Murakami, T., Inoue, A., "Formation of Nonequilibrium Phases at Collision Interface in an Explosion Welded Ti/Ni Clad", *Materials Transactions, JIM*, 36: 1338-1343 (1995).
- 81- Hokamoto, K., Chiba, A., Fujita, M., Izuma, T., "Single Shot Explosive Welding Technique for Fabrication of multilayered Metal Base composites – effect of welding Parameters Leading to Optimum Bonding Condition", *Composites Engineering*, 5: 1069-1079 (1995).
- 82- Xia, C., Jin, Z., "Examination of The Diffusion path in a Niobium-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment", *Materials Science and Engineering A Structural Materials*, A221 (1-2): 173-178 (1996).
- 83- Howard, B. C., "Explosive Welding", *Modern Welding Technology*, AWS, 222-223 (1981).

- 84- Izuma, T., Hokamoto, K., Fujita, M., Niwatsukino, T; "Improvement of the Bonding Strength of Al/Cu Transition Joint Made by Single-Shot Explosive Welding Technique Using Cu Intermediate Plate", *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 12 (1): 77-81 (1994).
- 85- Mamalis, A.G., Vaxevanidis, N.M., Szalay, A., Prohaszka, J., "Fabrication of Aluminum-Copper Bimetallic by Explosive Cladding and Rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, 44: 99-117 (1994).
- 86- Petrovic, S., Kosec, L., Matesa, B., at all, "Industrial cladding of Stainless Steel to Low Carbon Steel by Explosion", *Journal of Mechanical Engineering*, 44: 397-406 (1995).
- 87- Gerland, M., Presles, H.N., Guin, J.P., Bertheau, D., "Explosive Cladding of a Thin Ni-Film to an Aluminium Alloy", *Materials Science and Engineering A*, 280 (2): 311-319 (2000).
- 88- Ma, D.K., Zhou, J.B., "Deformability of The Interface of Explosive Welded Titanium Clad Steel Plate", *Rare Metal Materials and Engineering*, 28: 26-29 (1999).
- 89- Bedroud, Y., El-Sobky, H., Blazynski, T.Z., "Implosive Welding of Mono-and Bimetallic arrays of rods", *Metals Technology*, 12: 21-25 (1976).
- 90- Tlbenti, K., "Paslanmaz eliklerin Kaynağı", *Bhler Kaynak Dünyası*, İstanbul, 11: 6-10 (1985).
- 91- Arslanbenzer, E., "304 Kalite Paslanmaz eliğin 1020 Karbon eliğine Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi", *G.. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 10-50 (2000).
- 92- Klk, F., "stenitik Paslanmaz eliklerin Kaynağında Kaynak Yönteminin Isı Tesiri Altında Kalan Bölgeye Etkisinin İncelenmesi", *G.. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 10-50 (2000).
- 93- Kaluç, E., "stenitik Krom-Nikelli Paslanmaz eliklerin Kaynağı", *Gedik Kaynak Dünyası*, İstanbul, 15-21 (1990).
- 94- Erdoğan, M., "Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve zellikleri - Demir Dışı Alaşımlar", *Nobel Yayın Dağıtım*, 2: 393-394 (2001).
- 95- Oğuz, B., "Demir Dışı Metaller Kaynağı, Metalurji - Uygulama", *Oerlikon Yayını*, İstanbul, 45-80 (1990).
- 96- Cavcar, M.M., "Bakır ve Bakır Alaşımların Kaynağı", *Kaynakça, Oerlikon Ark Magazin Eki*, İstanbul, 2: 1-8 (1996).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet DURGUTLU, 1971 yılında Bilecik'in Gölpazarı ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gölpazarı'nda, lise öğrenimini ise İstanbul - Kartal Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1989 yılında buradan mezun oldu ve aynı yıl Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal İşleri Bölümüne öğrenci olarak girdi. 1993 yılında bu Fakülteden mezun oldu ve 1994 yılında aynı Fakültede Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.

1997 yılında Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayan Ahmet DURGUTLU halen Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'ndeki görevine devam etmekte olup evli ve bir çocuk babasıdır.