

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**SOĞUK BASINÇ KAYNAK İŞLEMİNDE ÇOKLU İŞLEM
PARAMETRELERİNİN MİKRO YAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İSTATİSTİKSEL
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜVEN YÜCEL

DENİZLİ, OCAK - 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI



SOĞUK BASINÇ KAYNAK İŞLEMİNDE ÇOKLU İŞLEM
PARAMETRELERİNİN MİKRO YAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İSTATİSTİKSEL
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜVEN YÜCEL

DENİZLİ, OCAK - 2023

Bu tez çalışması 2021FEBE027 kodlu “Soğuk Basınç Kaynak İşleminde Çoklu İşlem Parametrelerinin Mikro Yapı ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkilerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi” isimli yüksek lisans tez projesi kapsamında Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’nce maddi olarak desteklemiştir. ERBAKIR A.Ş. tarafından ERB-ARGE-0037 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

GÜVEN YÜCEL

ÖZET

SOĞUK BASINÇ KAYNAK İŞLEMİNDE ÇOKLU İŞLEM PARAMETRELERİNİN MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İSTATİSTİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜVEN YÜCEL

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AHMET MURAT PİNAR)

(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ VOLKAN ONAR)

DENİZLİ, OCAK - 2023

Bu çalışmada saf bakır çubukların (Cu-ETP, Çap Ø8 mm) soğuk basınç kaynağı ile birleştirilmesinde iki farklı vuruş sayısı (4 ve 12), vuruş süresi (0 ve 5sn) ve kaynak basıncı (4 ve 6 bar) için çoklu kalite karakteristikleri istatistiksel olarak araştırılmıştır. Taguchi'nin L8 ortogonal dizisi esas alınarak gerçekleştirilen direnç , çap, mikro sertlik ve çekme (Rm-MPa) mukavemeti deney sonuçları varyans ve regresyon analizi ile değerlendirilmiştir.

Mikro sertlik incelemelerine göre, İlk üç bölgede (KB1, KB2 ve KB3) regresyon analizi ve ANOVA'ya göre anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. KB4, KB5 ve KB6 için faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin sertlik üzerindeki etkileri sırasıyla %99,92, %99,93 ve %99,71'lik belirleme katsayısında modellenmiştir ve oldukça tatminkardır. KB4, KB5 ve KB6 için optimum sertlik değeri vuruş sayısının birinci (A=4), vuruş süresinin ikinci (B=5sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) sırasıyla 96, 90.1 ve 84.1 HV olarak elde edilmiştir.

Çekme dayanımı incelemelerine göre, faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri %99,84'lük belirleme katsayısında yüksek doğrulukta modellenmiştir. Optimum çekme dayanımı vuruş sayısının birinci (A=4), vuruş süresinin birinci (B=0 sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) 233,6 MPa olarak elde edilmiştir.

Elektriksel direnç analizlerine göre, faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin direnç üzerindeki etkileri %99,99'lük belirleme katsayısında modellenmiştir ve mükemmele yakındır. En düşük direnç değeri vuruş sayısının birinci (A=4) vuruş süresinin ikinci (B=5sn) ve kaynak basıncının birinci seviyesinde (C= 4 bar) 49,13 $\mu\Omega$ olarak belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Metal şekillendirme, soğuk basınçlı kaynak, Cu-Cu birleştirme, Cu-Cu alın altına soğuk basınçlı kaynak, deformasyon oranı, bakır alaşımlarının soğuk basınçlı kaynağı, difüzyon kaynağı

ABSTRACT

STATISTICAL ASSESSMENT OF MULTI PROCESS PARAMETERS' EFFECTS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE COLD PRESSURE WELDING PROCESS

MSC THESIS
GÜVEN YÜCEL

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. AHMET MURAT PİNAR)

(CO-SUPERVISOR:PH.D VOLKAN ONAR)

DENİZLİ, JANUARY 2023

In this study, multiple quality characteristics for two different numbers of upsets (4 and 12), welding time (0 and 5s), and welding pressure (4 and 6 bar) were statistically researched in the joining of pure copper rods (Cu-ETP, Diameter Ø8 mm). Resistance, diameter, microhardness, and tensile (Rm-MPa) strength test results based on Taguchi's L8 orthogonal array were evaluated by variance and regression analysis.

According to microhardness examinations, no significant results were obtained according to regression analysis and ANOVA in the first three regions (KB1, KB2, and KB3). For KB4, KB5, and KB6, the effects of the main and binary interactions of factors on hardness were modeled at coefficients of determination of 99.92%, 99.93%, and 99.71%, respectively, and were quite satisfactory. The optimum hardness values for KB4, KB5, and KB6 were obtained as 96, 90.1, and 84.1 HV at the first level of upset number (A=4), second welding time (B=5sec), and welding pressure (C=6 bar) respectively.

According to the tensile strength studies, the effects of the main and binary interactions of the factors on the tensile strength were modeled with high accuracy at a determination coefficient of 99.84%. The optimum tensile strength was obtained as 233.6 MPa at the first level of impact number (A=4), first impact time (B=0 sec), and second level of welding pressure (C=6 bar).

According to the electrical resistance analysis, the effects of the main and binary interactions of the factors on the resistance were modeled at a coefficient of determination of 99.99% and were close to perfect. The lowest resistance value was determined as 49.13 $\mu\Omega$ at the first level (A=4) of the number of upsets (A=4), the second (B=5sec) of the welding time, and the first level of the welding pressure (C=4 bar).

KEYWORDS: Metal forming, cold pressure welding, Cu-Cu joints, Cu-Cu cold butt pressure welding, deformation ratio, cold pressure welding of copper alloys, diffusion bonding

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
3. KAVRAMSAL TEMELLER	17
3.1 Bakır ve Alaşımları	17
3.2 Bakır ve Alaşımlarına Uygulanan Kaynak Yöntemleri.....	18
3.2.1 Sıcak basınçlı dirençli kaynak metodu	18
3.2.2 Soğuk basınçlı kaynak metodu	20
3.3 Taguchi Metodu	22
4. MALZEME METOD	23
4.1 Kaynak Malzemesinin Kimyasal Uygunluğunun Ölçülmesi	24
4.2 Soğuk Basınçlı Kaynak İşlemi	25
4.2.1 Soğuk Kaynak Makinesi Özellikleri.....	25
4.3 Kaynak Bölgesinin Direnç Değişiminin Ölçülmesi	31
4.4 Kaynak Bölgesi Çap Değişiminin Ölçülmesi.....	34
4.5 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak Mikro Sertlik Değişiminin Ölçülmesi	35
4.6 Kaynak Bölgesi Çekme (R _m -MPa) Mukavemetinin Ölçülmesi	43
4.7 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin Ölçülmesi (Optik mikroskop ve FESEM analizlerinin yapılması)	49
4.7.1 Optik Mikroskop ile İç Yapı Görüntüsü Alma	52
4.7.2 FESEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile İç Yapı Görüntüsü Alma	53
5. DENEYSEL BULGULAR VE İSTATİSTİKSEL ANALİZ	54
5.1 Mikro Sertlik Analizleri	55
5.1.1 İlk Üç Bölgeye Ait Deneysel Sonuçlar	56
5.1.2 KB4, KB5 ve KB6'ya ait Deneysel Sonuçlar ve İstatistiksel Analizler.....	57
5.1.3 KB4, KB5 ve KB6 için varyans analizi (ANOVA).....	58
5.1.4 KB4, KB5 ve KB6 için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi	60
5.1.5 Mikro Sertliğe ait Regresyon Analizi	64
5.1.6 KB4, KB5 ve KB6 için Doğrulama Analizleri	66
5.2 Elektriksel Direnç Analizleri.....	66
5.2.1 Elektriksel Direnç için ANOVA.....	68
5.2.2 Elektriksel Direnç için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi	69

5.2.3	Elektriksel Dirence ait Regresyon Analizi.....	70
5.2.4	Elektriksel Dirence ait Doğrulama Analizleri	71
5.3	Kaynak Bölgesinin Çap Değişime ait Analizler.....	71
5.3.1	Çap Değişimi için ANOVA.....	73
5.3.2	Çap Değişimi için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi .	74
5.3.3	Çap Değişimine ait Regresyon Analizi.....	75
5.3.4	Çap Değişimine ait Doğrulama Analizleri.....	75
5.4	Çekme Dayanımı Analizleri	76
5.4.1	Çekme Dayanımı için ANOVA.....	77
5.4.2	Çekme Dayanımına ait Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi	78
5.4.3	Çekme Dayanımına ait Regresyon Analizi.....	80
5.4.4	Çekme Dayanımına ait Doğrulama Analizleri.....	80
5.5	Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin Analizi.....	81
6.	TARTIŞMA.....	96
6.1	Kaynak Bölgesi Direnç Değişiminin İncelenmesi	96
6.2	Kaynak Bölgesi Çap Değişiminin İncelenmesi.....	97
6.3	Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak Mikro Sertlik Değişiminin İncelenmesi	97
6.4	Kaynak Bölgesi Çekme (Rm-MPa) Mukavemetinin İncelenmesi	99
6.5	Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin İncelenmesi (Optik mikroskop ve FESEM analizlerinin yapılması)	99
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	101
7.1	Kaynak Bölgesinin Direnç Değişimine ait Sonuçlar.....	101
7.2	Kaynak Bölgesi Çap Değişimine ait Sonuçlar	102
7.3	Kaynak Sertliğine ait Sonuçlar	102
7.4	Çekme Dayanımına ait Sonuçlar	104
7.5	İç Yapıya ait Sonuçlar	104
7.6	Öneriler.....	105
8.	KAYNAKLAR.....	106
9.	ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.3.1: Taguchi metodunun uygulama adımları (Pinar 2013), (Pinar 2016), (Pinar 2020).....	22
Şekil 4.2.1: Soğuk Kaynak Makinesi.....	25
Şekil 4.2.1.1: Soğuk Basınçlı Kaynak Makinesi Sabitleme Pabuçları ve Kaynak Çeneleri	27
Şekil 4.2.1.2: Soğuk Basınçlı Kaynak Makinesi Hava Şartlandırıcısı.....	28
Şekil 4.2.1.3: Soğuk Basınçlı Kaynak Yapımının İşlem Sırası-1 a) Makine boş pozisyonda bakır yükleme işlemi b) Makine yükleme pozisyonuna getirilerek malzemelerin yanlardan sürülme işlemi.....	29
Şekil 4.2.1.4: Soğuk Basınçlı Kaynak Yapımının İşlem Sırası-2 a) Makine kaynak yapmaya başlamış ve ilk vuruş tamamlanmış halinin görüntüsü b) Makine kaynak yapmaya başlamış ve 6 vuruş tamamlanmış halinin görüntüsü.....	29
Şekil 4.2.1.5: Soğuk Basınçlı Kaynak İşlemi Yapılan Malzeme	30
Şekil 4.2.1.6: Farklı Hava Basınçlarında Malzemeye Uygulanan Maks. Kuvvet (kaynak süresi=0ms)	30
Şekil 4.3.1: Direnç Ölçüm Cihazı (RESISTOMAT® 2304) (Burster 2022)....	32
Şekil 4.3.2: Direnç Ölçüm Bölgesi ve Ölçüm Şekli	32
Şekil 4.4.1: Mitutoyo, 0-25 mm, 103-137.....	34
Şekil 4.4.2: Malzeme çap ölçümünün sembolik gösterimi	34
Şekil 4.5.1: Struers CitoPress-1 Kaba Kesme Makinesi.....	35
Şekil 4.5.2: Termoplastik Akirlik Reçine	36
Şekil 4.5.3: Struers CitoPress-1 Sıcak Kalıplama Cihazı	36
Şekil 4.5.4: Struers CitoPress-1 Sıcak Kalıplama Cihaz Parametreleri	36
Şekil 4.5.5: Farklı Kum Seviyesine Sahip Zımparalar.....	37
Şekil 4.5.6: Struers Labapol-5 Zımpara ve Parlatma Makinesi	37
Şekil 4.5.7: Emcotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı.....	38
Şekil 4.5.8: Emcotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı ile yapılan örnek sertlik ölçümü.....	38
Şekil 4.5.9: a) Nikon SMZ 745T Mikroskop b) Nikon Eclipse LV150 Mikroskop	39
Şekil 4.5.10: Sıcak kalıba alınmış ve mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği (1 numara, kaynak bölgesine dik olarak yatay bir doğrultuda ilerleyen örnek sertlik ölçümü, 2 numara, tespit edilen kaynak bölgesinden paralel ilerleyerek alınan ölçümler ve 3 numara ise kaynak çapağıdır.).....	42
Şekil 4.5.11: Sıcak kalıba alınmış ve mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği-1X	42
Şekil 4.5.12: Mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği-50X	42
Şekil 4.6.1: Solidworks Programı Kullanılarak Tasarımı Yapılan Çekme Test Çenesi.....	43
Şekil 4.6.2: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Solidworks Programı Kullanılarak Tasarımı Yapılan Çekme Test Çenesi ve Çekme Numunesi	45
Şekil 4.6.3: Mazak Quick Turn Smart 200 Tezgâhı (Mazak 2022).....	46
Şekil 4.6.4: Çekme Testi Deney Numuneleri	47

Şekil 4.6.5: Çekme Testi Deney Numunesi ve Test Çenesi.....	47
Şekil 4.6.6: Marestek 30kN çekme cihazı.....	47
Şekil 4.6.7: Çekme numunesinin a) kopma bölgesinin değişimi-1, b) kopma bölgesinin değişimi-2, c) kopma bölgesinin değişimi-3, d) kopma bölgesinin değişimi-4.....	48
Şekil 4.7.1: Struers CitoPress-1 Kaba Kesme Makinesi	49
Şekil 4.7.2: Termoplastik Akrilik Reçine	50
Şekil 4.7.3: Struers Labapol-5 Sıcak Kalıplama Cihazı.....	50
Şekil 4.7.4: Struers Labapol-5 Sıcak Kalıplama Cihaz Parametreleri	50
Şekil 4.7.5: Farklı Kum Seviyesine Sahip Zımparalar.....	51
Şekil 4.7.6: Struers Labapol-5 Zımpara ve Parlatma Makinesi	51
Şekil 4.7.7: Dağlamanın Yapıldığı Çeker Ocak (Er-Bakır)	52
Şekil 4.7.1.1: Nikon Eclipse LV150 Mikroskop.....	52
Şekil 4.7.2.1: FESEM (İltam-Paü) (FESEM 2022)	53
Şekil 5.1: Faktör ve etkileşimlerin lineer grafik yöntemiyle ortogonal dizinin sütunlarına aktarılması	54
Şekil 5.1.1: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi	55
Şekil 5.1.2: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi	55
Şekil 5.1.4.1: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB4)	61
Şekil 5.1.4.2: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB4).....	61
Şekil 5.1.4.3: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB5)	62
Şekil 5.1.4.4: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB5).....	62
Şekil 5.1.4.5: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB6)	63
Şekil 5.1.4.6: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB6).....	63
Şekil 5.1.5.1: <i>KB4</i> için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	64
Şekil 5.1.5.2: <i>KB5</i> için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	65
Şekil 5.1.5.3: <i>KB6</i> için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	65
Şekil 5.2.1: Deney Numarasına Göre Direnç ($\mu\Omega$) Değişimi	67
Şekil 5.2.2.1: Direnç Değişimindeki Ana Etki Grafiği	69
Şekil 5.2.2.2: Direnç Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği.....	70
Şekil 5.2.3.1: Direnç değişiminde deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	71
Şekil 5.3.1: Deney Numarasına Göre Ortalama Çap Değişimi.....	72
Şekil 5.3.2.1: Çap Değişimindeki Ana Etki Grafiği	74
Şekil 5.3.2.2: Çap Değişiminde Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği	74
Şekil 5.3.3.1: Çap Değişimi için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması	75
Şekil 5.4.1: Çekme numunelerinin a) Çekme deneyi öncesindeki görüntüsü, b) Çekme deneyi yapıldıktan sonraki görüntüsü ve kopma noktaları	76
Şekil 5.4.2: Çekme testinden çıkan numunelerin ortalama değişim grafiği	77
Şekil 5.4.2.1: Çekme Mukavemeti Değişimindeki Ana Etki Grafiği - R_m (MPa)	79

Şekil 5.4.2.2: Çekme Mukavemet Değişiminde Parametreye Bağlı Ana Etkileşimli Grafiği.....	79
Şekil 5.4.3.1: Çekme testinden çıkan numuneler ve tahminlerin karşılaştırılması	80
Şekil 5.5.1: a) Cu-ETP malzemenin 200X büyütmedeki kaynaklı iç yapı görüntüsü, b) Cu-ETP malzemenin 500X büyütmedeki kaynaklı iç yapı görüntüsü.....	81
Şekil 5.5.2: a) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-1. Bölge, b) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-2. Bölge, c) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-3. Bölge, d) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-4. Bölge, e) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-5. Bölge, f) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-6. Bölge	81
Şekil 5.5.3: a) 1.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, b) 2.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, c) 3.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, d) 4.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, e) 5.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, f) 6.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, g)7.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, h) 8.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı	82
Şekil 5.5.4: 2. Deney-KB1-1500X (En İyi Çekme Mukavemet Değeri)	84
Şekil 5.5.5: 3. Deney-KB1-1500X (En Kötü Çekme Mukavemet Değeri)	84
Şekil 5.5.6: 5.Deney-KB1-1500X (En Düşük Sertlik).....	85
Şekil 5.5.7: 6. Deney-KB1-1500X (En Yüksek Sertlik).....	85
Şekil 5.5.8: 8. Deney-KB1-1500X (En Yüksek Direnç).....	86
Şekil 5.5.9: a) 2. Deney-KB1-5000X (En İyi Çekme Mukavemet Değeri), b) 3. Deney-KB1-5000X (En Kötü Çekme Mukavemet Değeri), c) 5. Deney-KB1-5000X (En Düşük Sertlik), d) 6. Deney-KB1-5000X (En Yüksek Sertlik), e) 8. Deney-KB1-5000X (En Yüksek Direnç)	86
Şekil 5.5.10: 3. Deney-KB2-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	87
Şekil 5.5.11: 6. Deney-KB2-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	87
Şekil 5.5.12: 8. Deney-KB2-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)	88
Şekil 5.5.13: a) 3. Deney-KB2-5000X (En Düşük Sertlik Değeri), b) 6. Deney-KB2-5000X (En Düşük Sertlik Değeri), c) 8. Deney-KB2-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri).....	88
Şekil 5.5.14: 4. Deney-KB3-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)	89
Şekil 5.5.15: 7. Deney-KB3-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	89
Şekil 5.5.16: a) 4. Deney-KB3-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deney-KB3-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)	90
Şekil 5.5.17: 4. Deney-KB4-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)	90
Şekil 5.5.18: 8. Deney-KB4-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	91
Şekil 5.5.19: a) 4. Deney-KB4-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 8. Deney-KB4-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)	91
Şekil 5.5.20: 4. Deney-KB5-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)	92
Şekil 5.5.21: 7. Deney-KB5-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	93
Şekil 5.5.22: a) 4. Deney-KB5-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deney-KB5-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)	93
Şekil 5.5.23: 4.Deney-KB6-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)	94
Şekil 5.5.24: 7. Deney-KB6-1500X (En Düşük Sertlik Değeri).....	94
Şekil 5.5.25: a) 4. Deney-KB6-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deney-KB6-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)	95
Şekil 5.5.26: a) Cu-ETP-1000X, b) Cu-ETP-5000X	95
Şekil 6.1.1: a) Deney Numarasına Göre Direnç ($\mu\Omega$) Değişimi, b) Deney Numarasına Göre Ortalama Çap Değişimi	96

Şekil 6.3.1: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi	98
Şekil 6.5.1: a) 3.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, b) 4.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı	99
Şekil 6.5.2: a) Cu-ETP-5000X, b) 2.Deney-KB1-5000X	100

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.2.1.1: Soğuk Basınçlı Kaynak Makinesi Özellikleri (Pwm 2022).....	26
Tablo 4.2.1.2: Basınca Göre Yüklerin Dağılımları (kN)	31
Tablo 4.2.1.3: Soğuk Kaynak İşlem Adımları ve Etkilediği Bölgeler	31
Tablo 4.3.1: Direnç Ölçüm Cihazının Özellikleri (RESISTOMAT® 2304) (Burster 2022)	33
Tablo 4.5.1: Emcotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı teknik özellikleri (Struers 2012).....	39
Tablo 4.5.2: a) Nikon SMZ 745T Mikroskop Teknik Özellikleri (Nikon 2022)	40
Tablo 4.5.3: b) Nikon Eclipse LV150 Mikroskop Teknik Özellikleri (Nikon 2022)	41
Tablo 4.6.1: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Numune Ölçülerinin Belirlenmesi	44
Tablo 4.6.2: Mazak Quick Turn Smart 200 Tezgâh Özellikleri (Mazak 2022)	46
Tablo 4.7.2.1: FESEM Teknik Özellikleri (FESEM 2022)	53
Tablo 4.7.2.2: FESEM ile Görüntü Alınan Bölgeler	53
Tablo 5.1: İşlem parametreleri ve bunlara ait seviyeler	54
Tablo 5.1.1: Mikro sertlik değişimlerinin 6 bölgeye ayrılarak oluşturulan değer dağılımı	56
Tablo 5.1.1.1: İlk üç bölgeye ($KB1$, $KB2$ ve $KB3$) ait sertlik sonuçları.....	56
Tablo 5.1.2.1: $KB4$ 'e ait deney sonuçları (H_{KB4}), tahminler (P_{KB4}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB4})$) ve güven aralığı (CI_{KB4}) değerleri.....	57
Tablo 5.1.2.2: $KB5$ 'e ait deney sonuçları, (H_{KB5}), tahminler (P_{KB5}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB5})$) ve güven aralığı (CI_{KB5}) değerleri.....	57
Tablo 5.1.2.3: $KB6$ 'ya ait deney sonuçları(H_{KB6}), tahminler (P_{KB6}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB6})$) ve güven aralığı (CI_{KB6}) değerleri.....	58
Tablo 5.1.3.1: $KB4$ için ANOVA.....	59
Tablo 5.1.3.2: $KB5$ için ANOVA.....	59
Tablo 5.1.3.3: $KB6$ için ANOVA.....	60
Tablo 5.2.1: Direnç Ölçümü Yapılan Numunelerin Tablosu ($\mu\Omega$).....	67
Tablo 5.2.2: Dirence ait deney sonuçları (E_R), tahminler (P_{E_R}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{E_R})$) ve güven aralığı (CI_{E_R}) değerleri.....	68
Tablo 5.2.1.1: Elektriksel Direnç için ANOVA.....	68
Tablo 5.3.1: Çap Ölçümü Yapılan Numunelerin Tablosu (mm)	72
Tablo 5.3.2: Çap değişimine ait deney sonuçları (Ort. Çap(mm)), tahminler (P - \emptyset), tahminlere ait standart hata ($Se(P-\emptyset)$) ve güven aralığı (CI_{\emptyset}) değerleri.....	73
Tablo 5.3.1.1: Çap değişiminin etkiler için ANOVA	73
Tablo 5.4.1: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Testi Sonuçları.....	76
Tablo 5.4.2: Çekme dayanımına ait deney sonuçları (T_S), tahminler (P_{T_S}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{T_S})$) ve güven aralığı (CI_{T_S}) değerleri	77
Tablo 5.4.1.1: Çekme Dayanımı için ANOVA.....	78
Tablo 5.5.1: Kaynak Bölgesindeki Kalınlık Değişimi(mikron).....	83

SEMBOL LİSTESİ

<i>H</i>	:	Ölçüm Sonuçları
<i>P</i>	:	Tahminler
<i>Se</i>	:	Tahminlere Ait Standart Hata
<i>CI</i>	:	Güven Aralığı

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yaparken pek çok test metodu denenmiştir. Bu çalışmada en zorlanılan test metodu çekme test metodudur. Bu test metodunda numune hazırlama ve çene tasarımı gibi birçok zorlukla karşılaşmıştır. Yapılan ön testlerde çekme çenelerinin test numunelerini kaçırdığı tespit edilmiş ve bunun üzerine çene tasarımı yapılmak zorunda kalınmıştır. Ayrıca çekme numunelerinin çok hassas bir şekilde, yüksek devirli CNC torna tezgahında işlenmesi gerekmektedir. Numunelerin işleneceği tezgahın çok yoğun olması nedeniyle test numunelerinin işlenme alınması zaman almıştır. Numuneler teslim alındıktan sonra ise çekme testini yapacağımız makine bozulmuş ve makinenin probleminin çözülebilmesi üç ay sürmüştür.

Bu çalışma yapılırken pek çok zorlukla karşılaşmıştır ancak çevremdeki insanlar (ailem, danışman hocalarım, yöneticilerim, iş arkadaşlarım ve firmamız ile çalışan tedarikçi firmalar) sayesinde zorluklarla takım olarak mücadele edilmiştir. Yine bu değerli insanlar, tez çalışmam ile ilgili beni cesaretlendirerek ellerinden gelen yardımı esirgememişlerdir. Çalışmanın bu seviyeye getirilme sürecinde bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Murat PİNAR' a, Dr. Öğr. Üyesi Volkan Onar' a araştırmanın her bir aşamasında görüşleriyle beni destekleyen, samimiyetini her zaman hissettiren ve beni doğru yönde yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Arzum IŞITAN' a, desteğini ve yardımlarını hiç esirgemeyen ERBAKIR A.Ş. şirketi ve çalışanlarına, deney numunelerinin işlenmesi konusunda yardımını esirgemeyen AKAN KARDEŞLER LTD. ŞTİ.' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamda desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Bakır; fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılan metaldir. Elektrik ve elektronik, ulaşım, uzay ve havacılık, inşaat, turizm, askeri ve diğer sanayi alanlarında yaygın olarak tüketimi yapılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ve hayat standartlarının konforun değişimiyle birlikte bakıra olan ihtiyaç da artmıştır ve artmaya da devam etmektedir. İhtiyacın karşılanması doğrultusunda alüminyum, fiber optik ve bazı iletkenlik özelliği iyi olan metaller bakır alternatifi olarak kullanılmaktadır. Fakat bakır endüstriyel metaller arasında elektrik iletkenliği en iyi olan metaldir. Bakır, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğiyle birlikte çok iyi şekillendirilebilmesi ve göreceli korozyon direncinin yüksek olması nedeniyle iletken tel çekme sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir.

Önerilen çalışmayla, soğuk basınç kaynak yöntemi ile birleştirilen telin fiziksel ve mekanik davranışlarının incelenmesi; soğuk basınç kaynağı için optimum parametrelerin belirlenmesi; nihai üründe müşterinin talep ettiği elektriksel iletkenlik, birim ağırlık, mekanik mukavemet, % uzama ve yüzey kalite beklentisini düşürmeden kaynak ile üretim sağlayarak nihai ürün metrajında artış sağlanması ve böylelikle lojistik maliyetlerinde azalış sağlanması; iş gücü kaybının azalması ve operasyonel verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Aboudi ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, özel olarak geliştirilen ve imal edilen preste AISI304L / Zirkaloy-4 malzeme çifti ile bakır altlık kullanılarak farklı sıcaklıklarda difüzyon kaynağı yapılmıştır. Yük, kaynak süresi, argon gazı parametreleri sabit tutularak sıcaklık değişimi ile ara katman, kaynak malzemeleri arasındaki mikro yapı ve sertlik değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre 1173K, 1223K, 1273K, 1293K, 1323K sıcaklıkları arasında en iyi özelliklere sahip sonucun 1223K de yapılan deney olduğu belirlenmiştir.

Akça ve Gürsel'in (2016) yaptığı bu derleme makale çalışmasında, difüzyon kaynağında ara tabakanın etkisini ve önemini araştırmak. Alüminyum alaşımlarının kaynağında, metallerin kaynağında veya bakır metal çiftinin kaynağı gibi farklı kombinasyonlarında kaynak ara yüzeyinde kırılğan bir intermetalik katman oluşabildiği belirtilmiştir. Bu intermetaliklerin oluşumunu en aza indirmek için, literatür araştırmalarına göre çoğunlukla ince bir Ti, Ag, Cu ve Ni tabakası kullanılmaktadır. Bu derleme makalede en iyi ara katman malzemesinin yüksek termal iletkenlik özelliği sebebiyle Cu olduğu literatür taraması ile saptanmıştır. Ayrıca ara katman kullanılmadan da kaynak yapılabileceği belirtilmiştir.

Anık ve Vural'ın (1993) Özel Kaynak Yöntemleri adlı araştırma çalışmasında soğuk basınç kaynağı sonucunda malzeme üzerindeki gevrek örtü tabakasının yırtılacağı, iç temas ile kontak noktalarında serbest kalan bölgelere çevre atmosfer gaz atomlarının toplanmayacağı ve serbest kalan yüzeylerin birbirine temas ettiği noktada atomlar arası bağların daha kuvvetli olacağı belirtilmiştir.

Aydın ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Ti-6Al-4V / Cu-ETP (99.99%) olan iki farklı malzemenin farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde kaynak yapılması sonucundaki kaynak bölgesinde oluşturduğu etkilerin SEM analizi, mikro sertlik ve özel kesme testi ile ilişkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda düzgün kaynak parametrelerinin kullanılmaması durumunda difüzyon kaynağının verimsiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Deneyler arasında en yüksek difüzyon oranının 2171 N yükte 890 °C sıcaklıkta 60 dakikada olduğu tespit edilmiştir.

Bay (1979) tarafından yapılan çalışmada, soğuk basınç kaynağı ile çok sayıda ve çeşitli metal kombinasyonlarının olduğu bir çok çalışma yapılmıştır. Soğuk basınç kaynağı esnasında, iki metal arasında birleştirme elde etmek için iki metalin deformasyonu gereklidir. Çalışmada, belirli bir kritik yüzey genişlemesine kadar birleştirme elde edilemediği, belirli bir kritik değerin üzerinde metal kombinasyonuna bağlı olarak bağ gücünün hızla arttığı tespit edilmiştir.

Chandan ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Cu50Zr50 / Cu50Zr50 malzeme çifti üzerinde yapılan deneylerde farklı sıcaklıklar ve farklı basınç değerlerinde FEM analizi kullanılarak zamana bağlı stres değişimleri ile sürünme davranışları incelenmiştir. Bu analizlerde, sıcaklık veya gerilimdeki bir artışla, kararlı durum ve sürünme hızının da arttığı belirtilmiştir. Ayrıca sıcaklığa bağlı olarak sürünme oranının grafiği oluşturulmuş ve bu grafiğe göre 500K sıcaklığında sürünme davranışında ciddi bir artış olduğu saptanmıştır.

Chen ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada, Cu-Ag malzeme çifti ile yapılan kaynak çalışmasında 3 farklı basınç (50MPa, 100MPa, 150MPa) değerindeki difüzyon bağı üzerindeki moleküler dinamik simülasyonları yapılmıştır. Ara yüzey bölgesinin kalınlığı ile stres arasında kuvvetli bir ilişki tespit edilmiştir. 50 MPa ve 100 MPa olan basınç değerlerinde neredeyse hiç difüzyon işlemi gerçekleşmiyorken 150 MPa değerinde ara yüzey oluşumu gözlemlenmiştir. Stres değeri ne kadar fazla ise ara yüzey kalınlığı da artış göstermektedir. Ara yüzey bölgesinin, difüzyon bağlanması sırasında yüksek sıcaklık ve yüksek stres altında amorf hale geldiği gözlemlenmiştir.

Chen ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada, Al / Cu malzeme çiftinin farklı sıcaklıklar difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda kaynak bölgesinde meydana gelen yüzey pürüzlülük, çekme mukavemeti ve difüzyon miktarı değişimleri ortaya konulmuştur. Bu çalışmaya göre sıcaklığın çok önemli olduğu belirtilmiş ve 600K altında belirgin difüzyon olmadığı 600K üzerinde ara yüzey katmanının belirginleştiği belirtilmiştir.

Christian ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada, CW004A (2.0060) 99.90% / Cu, 0.04% O malzeme çifti ile yapılan kaynakların yüzey temizliğinin kesme mukavemeti üzerindeki etkileri ve çekem-basma deneyi üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Çekme-basma deney numuneleri DIN 50125'e göre hazırlanmış çapı Ø6 mm ve 30° açı ile 2-3 mm çapa düşürülmüştür. Bu test 5kN yükte, 0,025 mm/s hızda ve farklı gazların olduğu ortamlarda yapılmıştır. Bu çevre gazların kohezyon katsayısı üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Hava, su ve KCl çözeltilerinde ve argon gazının olduğu ortamda yapılan kaynaklardan en yüksek çekme ve uzama değerlerin argon gazının olduğu ortam olarak ispatlanmıştır. Oksijen ile temasın olduğu açık havada yapılan deneyde ise en başarısız kaynak mukavemetinin olduğu ortaya konulmuştur.

Danut ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, alın altına yapılan soğuk kaynak işlemi incelenmiştir. Soğuk kaynak yapılan metallerin plastik deformasyonu, gerinim ve sertlikleri incelenmiştir. Bu incelemede malzemenin kaynak sonrası sertleştiği tespit edilmiş ve bu durum gerinim-sertlik korelasyonu ile %4 hata ortalamasında matematiksel olarak ortaya koyulmuştur.

Donelan (1959) tarafından yapılan çalışmada, soğuk basınç kaynağı ve direnç kaynağı ile alüminyum numunelerin birleştirilmesi yapılmış ve bağlantıların mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, saf alüminyumun direnç kaynağında %50 verimlilik saptanırken, soğuk basınç kaynağı ile %98 verimlilik sağlandığı tespit edilmiştir.

Ebbert ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada, bakır numuneleri birleştirmek için soğuk basınçlı kaynak kullanılmıştır. Elektrokimyasal ECUF işlemleriyle oksit indirgemesinin, tüm indirgeme oranları aralığında soğuk kaynak mukavemetini artırabileceği gösterilmiştir.

Efe (2000) tarafından yapılan çalışmada, bakır tel çekme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve birbirine alternatif olan soğuk basınç kaynağı ve direnç kaynağı yöntemlerinin teknolojik ve ekonomik açıdan kıyaslaması yapılmıştır. Çalışmada %99,9 saflıkta 8 mm çapında filmaşın ve bu filmaşında soğuk tel çekme yöntemi ile üretilmiş çeşitli çaplarda bakır elektrolitik tel kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kopma mukavemetinin tel çapı artışı ile direnç kaynağına göre soğuk basınç kaynağında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Soğuk basınç kaynağı yöntemiyle birleştirilen numunelerin mekanik davranışlarının hiç kaynak yapılmamış numune ile yakın olduğunu gözlemlemiştir.

Gietzelt ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada, özel olarak geliştirilen ve imal edilen vakumlu, rezistanslı hidrolik preste soğuk kaynak yapılan st37 (S235JR), AISI 304 (1.4301), Crofer 22 APU (1.4760), Hastelloy C-22 (2.4602), OF copper, Discup C3/80, Titanium malzemenin, sıcaklığın, yatak basıncının, kaynak süresinin ve tasarımın kafes yapısı, sıcaklı genleşmesi sonucu iç yapıdaki değişimleri incelenmiştir. Tane büyümesinin sorun olmayacağı durumlarda yüksek sıcaklıklarda kaynak işlemi yapılması durumunda difüzyon oranında artış olduğu saptanmıştır. Ayrıca uzun difüzyon sürelerinde bir miktar basınç artış önerilmektedir.

Görtan ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, sonlu elemanlar metodu ile EN AW-6082 T6 / C10 (1.03031) malzeme çifti kalıptan geçirilerek soğuk ekstrüzyon metodu kullanılarak kaynak simülasyonu yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile sıcaklığın malzeme akışı üzerindeki etkileri, yüzey genişlemesi ve eklem yüzeyindeki temas normal gerilmesi alüminyum ve çelik malzemelerin birlikte ekstrüzyonu sırasında termo-mekanik olarak birleştirilmesi incelenmiştir. Ayrıca ekstrüzyon kalıbı tasarımında üç farklı kalıp açısı (2α), 30° , 45° ve 60° kullanılmıştır. Bu kalıp açısının plastik gerinim ve kalıp açılma açısındaki bu değişimlerin iş parçası sıcaklığına etkileri, alüminyum ve çelik numuneler arasındaki temas yüzeyleri boyunca yüzey genişlemesi ve temas normal gerilmesi FE-simülasyonları kullanılarak araştırılmış ve tahmin edilen farklılıklar sunulmuştur. Parça ve kalıp geometrilerinin temas gerilmeleri üzerinde önemli etkileri vardır. Gerinim seviyesinde kanal açısı arttıkça belirgin bir düşüş gözlemlenir. Ayrıca makaleye göre temas ara yüzlerinin kaynağında toplam plastik şekil değiştirme en önemli parametredir.

Hongjian ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, Cu / Au, Au / Ag malzeme çiftleri üzerinde yapılan FEM analizi sonucunda soğuk kaynak üzerinde hız, sıcaklık ve boyut etkisi araştırılmıştır. Hızlar: 5m/s – 20 m/s, sıcaklık: 150-750 K arasında bilgisayar destekli analiz programı ile 6 farklı simülasyon yapılmıştır. Bu analizlerde zamana bağlı stres değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre yapı kararlılık değişimi ile kaynak hızı arasında doğru orantılı ilişki olduğu belirtilmiş. Kaynak bölgesi çapı ile uzama davranışında doğru orantı olduğu belirtilmiş. Sıcaklık artışı ile mukavemette azalma olduğu belirtilmiş. Farklı kafes oryantasyonuna sahip malzemelerin kaynağında aynı kafes oryantasyonuna sahip malzemelere göre daha kararsız yapıların ortaya çıktığı belirtilmiştir. Dört (Au-Ag, Au-Cu, Cu-Ag ve Cu-Cu)

kaynak çiftinin performansları incelendiğinde Au-Ag çiftinin daha iyi mekanik özellikler sergilediği belirtilmiştir.

Huang ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, özel olarak geliştirilen ve imal edilen preste soğuk kaynak yapılan Ø8 Cu-OFC (%99,999) / Ø8 Cu-OFC (%99,999) malzeme çiftinin, sıcak kaynak ile birleştirilen yine aynı OFC (%99,999) / Ø8 Cu-OFC (%99,999) malzeme çiftinin kaynak sonrası içyapı, çekme testi, doku değerlemesi, mikro sertlik ve iletkenlik değişimleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda soğuk kaynak tekniği ile yapılan kaynakta tanelerde kırılmalar meydana gelerek tane yönelmeleri olduğu saptanmış, sıcak kaynak metodunda ise sıcaklık kaynaklı difüzyon miktarında artış ve tane yönelmesi olduğu ve rekristalizasyon olduğu saptanmıştır. Sıcak kaynak ile birleştirilen malzeme çiftinde ana malzemeye göre mukavemet artışı olduğu saptanmış ayrıca iletkenlik değerinin ana malzemeye yaklaştığı saptanmıştır.

Iordachescu ve diğ. (2002) tarafından yapılan çalışmada, Ø10X40 Al (99,5%) / Ø10X40 Al (99,5%) malzeme çiftinin, özel imalat hidrolik pres kullanılarak, 200kN yükü soğuk kaynak yapılması sırasında, kaynak bölgesindeki ve tutma bölgesindeki değişimlerin FEM analizi ile belirli çıkarımlar yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmaya göre yapılan sonlu elemanlar modeli ile yığıma sırasında oluşan deformasyon tanımlanabilmektedir.

Iordachescu ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, Ø10X35 Al (99,5%) / Ø10X35 Al (99,5%) malzeme çiftinin, özel imalat hidrolik pres kullanılarak, 63kN yükü soğuk kaynak yapılması sırasında, kaynak bölgesindeki ve tutma bölgesindeki değişimlerin FEM analizi kullanılarak kaynak bölgesindeki değişimler ile ilgili çekme testi ve TEM incelemesi yapılarak model ile ilgili çıkarımlar sayesinde en az deformasyon ile kaynak yapılması hedeflenmiştir. Kaynak işleminde, kaynak çeneleri arasındaki mesafenin kaynak sonundaki mesafe ile farkı alınarak ilk mesafeye oranı ile elde edilen deformasyon sonuca göre en yüksek mukavemet değerinin deformasyonun en yüksek deneyde olduğu gözlemlenmiştir.

Iordachescu ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, Al çubuk (99,5) / Al çubuk (99,5) malzeme çiftinin üçüncü dereceden polinom regresyon denklemi ile FEM analizi ile gerilim/gerinim eğrisi çıkarılmıştır. Ayrıca %4 hata ile sertliğe karşı gerinim

denklemleri çıkarılmıştır. Bu analizler 0,75 deformasyon oranındaki sertlik korelasyonu FEA ile incelenmiş, Fem analizi için COSMOS/M2.5 programı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri ISO 6507/2'ye göre HV0,5 olarak yapılmıştır. Aynı zamanda farklı deformasyon oranları sonucundaki sertlik değişimleri incelenmiştir. Yapılan doğrulama analizleri ile FEA ile bulunan sonucun test sonuçları ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Kunda ve diğ. (1978) Tarafında yapılan çalışmada, soğuk basınçlı kaynak metodunda malzemeler oda sıcaklığında basınç altında kaynaklanırlar ve oda sıcaklığında gerçekleşen bu işlemin diğer kaynak tekniklerinden üstün yanları ortam sıcaklığının düşük olması sayesinde ikincil ve üçüncül fazların oluşmaması, termal hataların olmaması ve malzemelerin sıcaklık nedeniyle yumuşama durumunun olmamasıdır. Ancak bu teknikte herhangi iki malzeme birbirine bastırıldığında, genellikle birbirlerine kaynaklanamazlar. Bunun temel nedeni, malzemelerin yüzeyinde bir oksit tabakası bulunmasıdır. Bununla birlikte soğuk kaynak tekniğinde birleştirilecek malzemelerin plastik deformasyona uğrayabilme kabiliyetlerinin de gelişmiş olması beklenmektedir. Çünkü bu teknikte birleştirilecek malzemeler kalıcı plastik deformasyona uğrar ve birleşme sağlanır.

Kundu ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal kompozisyonu verilen Ø15X30 cpTi / Ø15X30 304ss malzeme çiftinin, 300 µ bakır ara katman kullanılarak, özel imalat hidrolik pres ile, vakumlu ortamda, 3MPa yükte, 850-950 °C sıcaklıklarda ve 1,5 saatte soğuk kaynak yapılması ile kaynak bölgesindeki değişimlerin çekme testi ve iç yapıdaki değişimleri incelenmiştir. Kaynak bölgesi bölgesindeki bağ oluşumları gözlemlenmiştir. Bu bağ oluşumlarının mukavemet üzerindeki etkileri sorgulanmıştır. 850 ve 900 °C birleşme sıcaklığında her iki difüzyon ara yüzeyinde de intermetalik olduğu gözlenmiş ancak 950 °C bağlanma sıcaklığında, difüzyon ara yüzlerinde Fe–Cu–Ti ve Cu–Ti intermetalikleri oluşmadığı saptanmıştır. En iyi difüzyon 900 °C' de olduğu belirlenmiş bağlanma mukavemetinin yaklaşık olarak 318MPa olduğu tespit edilmiştir. 850 °C gibi daha düşük bir birleştirme sıcaklığında, birleşme yüzeylerinde bağ kuvvetinin de zayıf olduğu saptanmıştır.

Latypov ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, herhangi bir fiziksel deney yapılmaksızın soğuk basınçlı kaynak işlemlerinin matematiksel olarak

incelemesi yapılmış ve temel soğuk kaynak olasılığı, ek ısıtma olmaksızın termodinamik kavrama merkezlerinin oluşumu koşuluyla sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca deformasyon artışının etkisi altında kaynak bağlantı mukavemetinin artması, temas bölgesine giren ve kavrama merkezleri oluşturan dislokasyon miktarının artması ile ilgili olduğu belirtilmiştir.

Li ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal kompozisyonu verilen Ø30X30 cp-Ti / Ø30X30 321ss malzeme çiftinin, 10 µ Nb/Cu/Ni ara katmanları kullanılarak, özel imalat hidrolik pres ile, vakumlu ortamda, 300MPa yükte, 850-950 °C sıcaklıklarda ve 15-60 dakika kaynak süresinde soğuk kaynak yapılması ile kaynak bölgesindeki değişimlerin çekme testi ve iç yapıdaki değişimleri incelenmiştir. Kullanılan ara katmanların bağ oluşumları ve bu oluşumların çekme mukavemeti üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak en uygun kaynağın 850 °C sıcaklığında, 30-45 dakikada elde edildiği ve çekme mukavemeti de yaklaşık olarak 300 MPa olarak gözlemlenmiştir.

Lilleby ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada, ciddi şekilde plastik olarak deforme olmuş alüminyumun soğuk basınçlı kaynağı (CPW) incelenmiştir. İlk olarak ticari saf alüminyum hadde kalıbı içerisinde presleme yapılarak birleştirilmiştir. Soğuk basınçlı kaynak ile birleştirilen malzeme kaynak bölgesi ve bu bölgeden 1 mm mesafelerle ±7 mm olarak 1kg yük ile sertlik ölçümleri yapılmış daha sonra çentik ve gerilme testi kullanılarak mukavemeti ve akış özellikleri kontrol edilmiştir. Homojen bir kayma oluştuğu için bu özelliklerin tamamen korunduğu gözlemlenmiştir.

Loginov ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Ø8 Cu / Ø8 Cu malzeme çiftinin, RAPID 2D yazılımı kullanılarak kaynak sistemi analiz edilmiştir. Analiz ve deneyler sonucunda soğuk kaynak yapılması ile kaynak bölgesindeki değişimlerin içyapıdaki değişimleri ve mikro sertlikteki değişimleri incelenmiştir. Kaynak bölgesinin en yüksek sertlik ve dolayısı ile mukavemete değerine sahip, 900 MPa üzerinde çekme mukavemetinde olduğu saptanmıştır.

Mahendran ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada, 50X50X5 Cu (Bakır alaşımı) / 50X50X5 AZ31B (Mg alaşımı) malzeme çiftinin, özel bir hidrolik pres kullanılarak farklı sıcaklık, basınç ve kaynak süresinde difüzyon kaynağı yapılmıştır. Bu parametre göre, difüzyon katman kalınlığı, ara yüz sertliği, kesme mukavemeti ve

bağ mukavemeti değişimlerinin ANOVA metodu kullanılarak istatistiksel olarak analizi yapılmıştır. Bu etkiler arasında kuvvetli bir ilişki saptanmıştır. Bu çalışmada 8, 12 ve 16 MPa basınç altında ve 425-525 °C arası farklı sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylere göre en yüksek çekme mukavemeti 480 °C sıcaklığında, 50 dakika ve 16 MPa basınç ile yapılan numunede elde edilmiştir. Basıncın çekme mukavemeti üzerinde kuvvetli etkisi olduğu anlaşılmaktadır.

Mazaheri ve diğ. (2021) tarafından yapılan bu araştırmada, 7,3 mm kalınlığındaki ticari saf bakırın (malzeme kaynak öncesi 1 saat 650 derecede tavlansmıştır.) mikro yapısı, sertliği ve çekme davranışı üzerindeki ön haddeleme ve daldırılmış sürtünme karıştırma işleminin etkileri farklı ezilme oranları (%0, %60) ve farklı kaynak devirleri (400 RPM, 600 RPM, 800 RPM) kullanılarak değerlendirilmiştir. %0-400, %60-400, %60-600 ve %0-800 ezilme oranlarında ve devirlerde kaynağı yapılan numunelerin karıştırılan kaynak bölgesinde boşluklar ve oyuklar tespit edilmiştir. %0-400 ve %60-800 parametreleri ile yapılan numunelerde ise herhangi bir boşluk ya da oyuk tespit edilememiştir. %60-800 numunede, ön gerinin nedeniyle dönüş hızını artırarak ısı girişiindeki artışa rağmen, ortalama sertlik %0-600 numuneden yaklaşık 5 HV daha yüksek olduğu ölçülmüştür (92,2 HV - 87,1 HV). Ayrıca %0 ezilme oranına sahip bakır numune ile %0 -600 parametrelerindeki numunenin sertlik değerleri kıyaslandığında tane boyutunun daha düşük olması sebebiyle (sırasıyla 215 MPa ve 277 MPa) mukavemet artışı gözlenmiştir.

Mümin ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada, soğuk basınçlı kaynak ile ilgili çalışmalar analiz edilmiş ve uygulama alanları ile ilgili bulgular paylaşılmıştır. Ayrıca bu yayında bağ oluşumu, kaynak kalıpları, yüzey hazırlama, yüzey pürüzlülüğünün etkileri ve kısaca değinilmiştir. Bu çalışmadaki araştırmalar sonucunda, kaynaktan önceki yüzey pürüzlülüğü çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Metalin ve oksit filminin bağıl sertliği ve oksitin mekanik özellikleri kaynak dayanımı üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca temiz metal yüzeylerin temas ettiği noktalarda bazı bağıl kayma mesafesi kaynak için gerekli olduğu gözlemlenmiştir.

Nishikawa ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, JISH4000 A1050P H24, 99.63 wt. % Al / JISH3100 C1100P 1/4H, 99.97 % Cu malzeme çiftinin basınçlı soğuk kaynak sonrası farklı sıcaklıklarda tavlansması ile ara yüzeydeki mikro yapının çekme üzerindeki etkileri SEM, SEM-EDX, SEM-EBSD, çekme testi ve mikro sertlik

ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Yayına göre intermetalik bileşik katmanlarının büyümesi difüzyona bağlıdır. Ayrıca yayında difüzyonun enerji değeri de hesaplanmıştır. İntermetalik bileşik kalınlığının 4,3 µm değerinin üzerine çıktığında Al-CuAl₂ sınırında kırıklar oluştuğu ortaya konulmuştur.

Olıa ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, 100X15X 1 mm (AL1050) / 100X 15X0,5 mm (Ag 99,9%) malzeme çiftinin, özel olarak geliştirilen ve imal edilen 86CrMoV7 çelikten yapılan Ø67 mm çapındaki hadde topları ile soğuk kaynak işlem hızının 9 cm/sn. olduğu presli hadde makinesinde basınçlı soğuk kaynak yapılmıştır. Kaynak öncesi yüzeyler aseton ve CH₃C(O)CH₃ ile temizlenmiş ve oksit tabakasını almak için fırçalanmıştır. Kaynak bölgesinde değişimler 400 °C de tavlansak SEM ile iç yapıları incelenmiştir. Ayrıca bu sıcaklıkta bekleme süresine göre sertliğin değişim grafiğı verilmiştir. Bu deneyler ile şekil faktörünün varyasyonları ve limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylere göre şekil faktörünün değişimi azaldığında ve sabit bir sınıra ulaştığında, soğuk kaynağın gerçekleştirileceğı elde edilmiştir. Al ve Ag kaynağında şekil faktörü 0.1630 ve 0.1217 değerleri aralığında olması tavsiye edilmektedir. Ayrıca ara faz oluşumlarını önlemek için tavlama süresinin 3 saatın altında tutulması önerilmiştir.

Pereira ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, Ø4,3nm Au (Teorik) / Ø4,3nm Ag (Teorik), Ø4,3nm Au (Teorik) / Ø4,3nm Au (Teorik) malzeme çiftlerinin, bilgisayar programında simülasyonu yapılarak kaynaklanabilme etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Ayrıca % gerinim ile gerilme arasındaki ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada temel çıktı olarak, farklı malzemelerle ve farklı geometrilere soğuk kaynak yapılabileceğı gösterilmektedir.

Peter ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, soğuk basınçlı kaynak yönteminin alüminyum ve çelik çiftinin birleştirilmesinde kullanmak için uygun maliyetli bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, kaynak öncesi ısıl işlem (590°C’de 5 saat) uygulanmış Ø41,5 mmX15 mm (EN AW6082 – 3.2315) alüminyum parça ile (535°C’de 1,5 saat ısıl işlem uygulanmış) Ø41,5 mmX15 mm (C15 – 1.0401) çelik parça özel bir pres yardımıyla birleştirilmiştir. Bu kaynak metodunda oluşan bağ mekanizması, mikro çekme deneyi, SEM iç yapı görüntüleri ve oksijen oranlarına göre araştırılmıştır. Ara yüz boyunca bağlantı kuvvetinin arttığı ortaya koyulmuştur. Soğuk

kaynak yapıldığı bölgeler arasında inter-metalik faz oluşumu olmaksızın kovalent bağ oluşumu ortaya konmuştur.

Samouhos ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 200 μ Cu (99,9%) ince şimler ile, özel imalat cıvata bağlantılı sıkma sistemi kullanılarak, vakumlu ortamda (5×10^2 mbar), 750-1000 °C arası sıcaklık ve 20-90 dakika kaynak süresi parametreleri altında yapılan difüzyon kaynağının mekanik özellikler (çekme testi, mikro sertlik) ve iç yapı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Kaynak bölgesinde değişimler SEM-EBSD analizi ile incelenmiştir. İç yapıyı görüntülemek için NH₄OH ve H₂O₂ çözeltisi ile dağlanmış. Bu çalışmaya göre çekme mukavemet değeri sıcaklık artışı ile doğru orantılı olup 850 °C üzerindeki sıcaklıklarda uzama davranışı da doğru orantılı olarak değişmektedir.

Sato ve diğ. (2002) tarafından yapılan çalışmada , alüminyum alaşımları AL-1050 ve AL-5083 malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirmesi ve birleştirilen bölgede tane boyutunun sertlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kaynak yönteminde 3'er adet farklı parametrede test numuneleri hazırlanmıştır. Bu parametrelerde 4 farklı devir (250 RPM, 320 RPM, 800 RPM, 1600 RPM) ve 2 farklı ilerleme (2,2 mm, 5,9 mm) belirlenmiştir. Sertliğin, AL-1050 alaşımının kaynak bölgesindeki tane boyutuyla ilişkili olduğu hatta karekökünün tersi ile doğrusal olarak arttığı tespit edilmiştir. AL-5083 alaşımında ise kaynak bölgesi sertlik ve tane boyutu arasındaki ilişki, çok sayıda ince parçacık içerdiği ve yer değiştirme hareketini engellediği için Hall_/Petch eğrisine göre belirlenmiştir.

Shimatsu ve Uomoto (2010) tarafından yapılan çalışmada, difüzyon katsayılarına sahip 14 ince metal filmler kullanılmıştır. Bu filmler Al, Au, Ag, Cu, Si, Co, Ni, Pt, Ti, Ru, Fe, Cr, Mo ve Ta olarak seçilmiştir. Bu deneylerde kalınlığı 20 nm olan her bir eş malzeme çiftleri kullanılmış. Soğuk kaynak işlemi ultra yüksek vakumda manyetron katot kullanılarak yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde kaynak bölgesindeki TEM analizi ile dislokasyon yığılmaları incelenmiş, yüzey enerji ölçümü, tane sınır difüzyon katsayısı ve yüzey kirlilik etkisi gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmaya göre oda sıcaklığında ince nanokristal metal filmler ile atomik difüzyon bağlanmasında yararlı bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Stroiman ve Mitrukov (2002) tarafından yapılan çalışmada, sanayinin canlanması, kaynak teknolojilerinin birçok uygulama alanı içindeki talepte artış sebebi ile alüminyum ve bakırın soğuk basınç kaynak parametreleri incelenmiştir. Soğuk basınç kaynağının sünek malzemelerin en etkili birleştirme yöntemlerinden biri olduğu ifade edilmiştir.

Tan ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, Cu (99,9%) / Cu (99,9%) malzeme Alkan-tiyolün kullanılarak 350-400°C sıcaklığında, 200kPa basınçta yüksek vakumlu ortamda kaynak yapılmıştır. Bu kaynağın difüzyon kalitesinin kontak yüzey açısının zamana bağlı değişimi, kaynak yüzeyinin oksidasyon etkisi ve bağlama enerjisinin değişimleri incelenmiştir. Yayına göre uygulanan metotlar ile yüzey pasivizasyonunda başarı sağlandığı belirtilmiştir. Yüzey bağlanma açısından da 1 saate kadar hızlı bir artış olmuş 1-2 saat arasında açı değişimi azalmış 2-3 saat arasında ise açının değişmediği görülmektedir.

Topic ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada, 100 mm×300 mm×1 mm ölçülerinde 1 saat ısıtma işlemi görmüş (500°C, 520°C) alüminyum AA1050 ve AA6016 levhaları, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Ortalama tane boyutu sırasıyla 20µm ile 30µm arasında değişen alüminyum levhalar, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve kaynak bölgesinin mikro yapısı ve mekanik özellikleri SEM analizi (SEM görüntüleri 500nm, 2µm, 30µm ve 100µm olarak alınmış ve kıyaslamalar yapılmıştır.) ve mikro sertlik ölçümleri (mikro sertlik ölçümleri HV0,05 olarak yapılmıştır.) yapılarak incelenmiştir. Sonuç olarak kaynak bölgesinde, kaynak işlemi öncesi yapılan ısıtma işlem etkilerinin kaynak sonrasındaki tane büyüklüğü ve mikro sertlik üzerindeki etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir.

Toshio ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal kompozisyonu verilen Ø14 Al / Ø14 Cu malzeme çiftinin, özel imalat hidrolik pres kullanılarak, farklı yüklerde, farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda soğuk kaynak yapılması sırasında, kaynak bölgesindeki ve tutma bölgesindeki değişimlerin çekme testi, sertlik ölçümü ve iç yapıdaki değişimleri incelenmiştir. Kaynak bölgesi üç katmanlı intermetalik bölge olarak ayrılmış en yüksek sertlik katmanının 2. Bölge olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sıcaklığının difüzyon kaynağı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Düşük kaynak süresinde, çekme mukavemeti sıcaklık, zaman ve basınçla birlikte artış gösterdiği gözlemlenmiştir. İntermetalik bölgenin sıcaklıkla birlikte doğru orantılı olarak

arttığı gözlenmiştir. Ayrıca en yüksek çekme mukavemeti değerinin 540 °C, 0,5 kg/mm², 10 dakikada olduğu gözlemlenmiştir.

Travessa ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada, Ø10X5 (Al₂O₃ A-1000 sinterlenmiş toz) / Ø10X5 (AISI 304) malzemeler 600-1000°C sıcaklığında, 15MPa basınçta yüksek vakumlu ortamda 60-180 dakika kaynak yapılmıştır. Bu kaynak ile ilgili değerlendirmeler kesme testi, iç yapı analizi ve FEM analizi kullanılarak yapılmıştır. Difüzyon kaynak sıcaklığının değişimi ile kesme mukavemeti üzerindeki etkileri ve iç yapıdaki etkileri FEM analizi de yapılarak değerlendirilmiştir. İç yapı görüntüleri SEM ile alınmıştır. Yayındaki analiz ve test sonuçlarına göre Ti/Mo ve Ti/Cu ara katmanlarının kullanımıyla kesme mukavemetlerinde sırasıyla %35 ve %210 artış sağlandığı belirtilmektedir.

Varmazyar ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, dökme alüminyum ve magnezyum numuneler, bakır ara katmanı olmadan, bakır ara katman, farklı kaynak süresi ve farklı ara katman kalınlığı gibi parametreler ile difüzyon bağlama işlemi kullanılarak birleştirilmiştir. Sonuçlar, ara tabakanın kullanılmasından bağımsız olarak, daha uzun bekletmede daha yüksek difüzyon değerlerinin meydana geldiğini göstermiştir. Tutma süresini artırarak, ara katman olmayan bağlanma durumunda alüminyum ve magnezyum arasındaki difüzyon katmanının ortalama genişliği 37'den 58 mikrometreye yükseldi. Tutma süresinin artması, birbirine benzemeyen iki metalin birbirine daha fazla difüzyonuna neden olduğu ve eksik veya zayıf bağlanma olasılığının azaldığı iddia edilebilir. Numunenin her iki tarafında en yüksek difüzyon tabakası genişliği, ara tabakanın en yüksek gerilmesi ile en yüksek tutma süresine sahip olan 90,0.6 (yayın içerisindeki numune numarası) numaralı deney numunesinde gözlenmiştir. Bakır ara tabakasının geriliminin artırılması, bakır tabaka ile iç atomlar arasındaki yüzey atomlarının enerjisini artırarak hattın difüzyonunu yükselttiği gözlenmiştir. Bu gözlemlere ulaşmak için kesme testi, iç yapı analizi (SEM, SEM-EDS) ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Wagener ve Haats (1994) tarafından yapılan çalışmada, soğuk basınçlı kaynak ile farklı metallerin birleştirilerek bimetallik iş parçaları üretilmiştir. Bu metot iki farklı malzemeyi birleştirip bimetallik iş parçası yapmanın en iyi yöntemi olarak sunulmuştur.

Wozniak (2009) tarafından yapılan çalışmada, Al (HB = 23) / Cu (HB = 82) olan iki farklı malzemenin rampalı 30-50 mm/s hızlarda, yüzey hazırlama uygulanarak ve uygulanmayarak (farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde), farklı kalıp açılarında (0° ve 16°), ≤630kN yükünde hidrolik pres kullanılarak kaynak yapılması sonucundaki kaynak bölgesinde oluşturduğu etkilerin FEM, mikro sertlik, büküm 90° testi ve çekme testi ile ilişkisi incelenmiştir. Bu incelemede kaynak yapılacak yüzeylerin temizliğinin önemi vurgulanmıştır. Ayrıca soğuk basınçlı kaynak ile birleştirilecek malzemeler sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerinim değerlerinin saptanabileceği belirtilmiştir. Kalıp açısının 16° olması durumunda kaynak oluşumu için gereken yükün düştüğü tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlüğünün azalması ile difüzyon miktarında artış olduğu saptanmıştır.

Yanni ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Cu (99.9%) / 1060 Al (99.6%) malzeme çifti için (numunelerin her deney için kimyasal kompozisyonu çıkarılmıştır.) farklı teknikler kullanılarak (patlama kaynağı, soğuk basınçlı kaynak, katı-sıvı döküm) kaynakları yapılmıştır. Bu teknikler için iç yapı incelemesi, çekme mukavemeti, kesme mukavemeti, sertlik ve direnç ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler birbirleri ile kıyaslanarak tabloda sunulmuştur. Soğuk basınçlı kaynak ara yüzünde, belirgin bir metalürjik reaksiyon olmaksızın bir testere dişi yapısı ile bir mikrokilitleme etkisi oluşturduğu belirtilmiştir. Katı-sıvı döküm ile yapılan kaynak metodunun bağlanma yüzeylerinin düz ve pürüzsüz şekilde bağlanması sebebi ile zayıf kesme mukavemeti ve elektrik iletkenliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Patlayıcı kaynak metodu ile yapılan kaynağın üç kaynak metodu içerisinde en yüksek performansa sahip olduğu belirtilmiştir.

Soğuk basınç kaynağı olarak bilinmekte olan soğuk kaynak, oda sıcaklığındaki sıcaklıklarda iki malzemeyi birleştirmek için kullanılan bir metottur. Bu metotta parçaları birleştirmek için yüksek basınç kullanılır. Bu sebeple bu işleme bilimsel olarak katı hal difüzyonu denilmektedir. Ayrıca iki malzemenin soğuk kaynak yapılabilmesi için belirlenen bir ön hazırlık işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Hazırlık işleminde metallerin üst oksit veya bariyer tabakasının çıkarılacağı şekilde temizlenmesi önemlidir (Zhang ve diğ. 1992).

Zhang ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Cu50Zr50 / Cu50Zr50 malzeme çifti üzerinde yapılan dört ana deney sonucunun FEM analizi kullanılarak

mukavemet oranları araştırılmıştır. Bu analizlerde zamana bağlı stres değeri kaynak, kaynak süresi ve geri açılma olarak üç ana bölge için incelenmiştir. Yapılan tüm deneylerde geri açılma bölgesinde diğer bölgelere göre en yüksek stres olduğu gözlenmiştir. Kaynak hızındaki artışın plastik deformasyonun büyümesine sebep olduğu belirtilmiş. Sıcaklık ile kaynak mukavemeti arasında ciddi bir ilişki olmadığı belirtilmiştir. Analiz sonucuna göre en düşükten en yüksek mukavemete sahip olan deneyler sırasıyla 4<3<1<2 olduğu ortaya konulmuştur.

Zhilyaev ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Cu / Al ve Ni / Cu malzeme çiftleri için (numunelerin her deney için kimyasal kompozisyonu çıkarılmıştır.) “MECAMAQ DE80 Tipo 80” hidrolik presi kullanılarak kaynak süresi 18 saat, kaynak hızı 3 mm/s ve oda sıcaklığında soğuk basınç kaynağı yapılmıştır. Bu çalışmaya göre Cu-Al ve Ni-Cu'nun ECAP ile soğuk kaynaklanması, intermetalik parçacıkların (Cu-Al) ve katı çözeltilerin oluşumuna (Ni-Cu) yol açar. Ancak geleneksel kaynaktan farklı olarak bu sert ve kırılgan parçacıklar, kaynağın mekanik özelliklerini düşürmez. Parçacıkların nanometrik boyutu ve ara yüzey boyunca dağılımları nedeniyle, kaynak alanını güçlendiren kompozit malzeme görevi görürler. Bu güçlenme sadece intermetaliklerin, katı çözeltilerin ve matrisin birleşik sertliğinden değil, aynı zamanda parçacıkların dislokasyonlar üzerindeki sınırlayıcı etkisinden de meydana gelir. Sonuçlara ulaşmak için mikro sertlik ölçümü, EDX iç yapı analizi ve EBSD analizleri kullanılmıştır.

Zhou ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, bir Cu-Cu nano yatak-nano kovan montaj sürecini ve Cu-Cu monte edilmiş yapının soğuk kaynağının mekanik performansı üzerindeki sıcaklık etkisini incelenmiş. Gerilim zamanı tepkileri, her iki bileşenin de küçük yüklemeler yoluyla başarılı bir şekilde bağlandığını göstermiştir. Araştırmadan elde edilen sonuçlar, bir nano yatak ve nano kovanın soğuk kaynağının nano ölçekte yeni bir mekanik yapı oluşturmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Daha sonra, kırılmaya kadar germek için uzunluk yönü boyunca sürekli çekme hızı uygulandı. Ayrıca nano yatağın iç çapının mekanik performansı etkilediği görülmüştür. Soğuk kaynak sırasında nispeten daha az miktarda düzensiz yapıların oluşması nedeniyle, kombinasyonun mekanik mukavemeti ve kaynak stresi, sıcaklık yükseldikçe gözle görülür şekilde azaldığı gözlenmiştir. Yayına göre daha yüksek bir yükleme hızı, soğuk kaynak hızı arttıkça kinetik enerjideki artışa atfedilen, daha

düzensiz yapılara sahip bir bileşimin ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada bilgisayar destekli program ile simülasyonu yapılmış ve sonuçlara bu simülasyon üzerinden ulaşılmıştır.

Zuruzi ve diğ. (1999) tarafından yapılan bu araştırmada, sabit 450°C sıcaklıkta farklı kaynak bekleme sürelerinde (30, 45, 60, 75, 90 dakika) AL-6061 malzemesi kullanılarak, özel olarak imal edilmiş ve içerisine hava basılmış preste, yüzey pürüzlülüğünün difüzyon bağı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu etkiler iç yapı görüntüleri ve çekme testi yapılarak değerlendirilmiştir. Test numunelerinde kaynak öncesi yüzeylerde 2 farklı kumtaşı (P180, P1000) kullanılmıştır. Bu kumtaşı ile verilen pürüzlerde sonrasında yapılan kaynak numunelerinin iç yapı analizi ve çekme testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda yüzey pürüzlülüğü ile difüzyon arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu saptanmıştır. Difüzyon işleminin en verimli gerçekleştiği numune P180, 60 dakika bekleme süresi olduğu gösterilmiştir. P1000 kumtaşı ile yapılan yüzey pürüzlülüğünde ise en iyi difüzyon değerinin 75 dakikada gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

3. KAVRAMSAL TEMELLER

3.1 Bakır ve Alaşımları

Gümüştten sonra en iyi ikinci iletken olan bakır, ısı-elektrik iletimini yanında üretim kolaylığı, doğada bulunma kapasitesi vb. sebeplerle en fazla tercih edilen metallere dendir. Bakır doğada doğrudan kullanılabilir şekilde bulunan nadir metallere dendir. Ayrıca bakır kolay şekil alabilmesi sayesinde yüksek deformasyon oranlarında şekilde değişim kapasitesine sahiptir. Bu sayede endüstri ihtiyacına hızlı ve daha düşük maliyet ile cevap verebilmektedir. Ekonomik olan bakır aynı zamanda tam olarak en saf hali ile geri dönüştürebilmektedir.

Birçok avantaja sahip olan bakır, farklı metaller ile kullanılarak mekanik ve kimyasal kapasitelerinde ciddi artışlar yapılabilir. Bakır tel endüstrisini örnek verecek olursak, bakır magnezyum alaşımının çekme mukavemetinde saf bakıra göre ciddi bir avantaj sağladığı bilinmektedir. Hatta gümüş (Ag) ve kalay (Sn) gibi metallerle de alaşımı yapılarak demir yolu havai hatlarda kullanılmaktadır. Bu metaller sayesinde sürtünme direnci, mukavemet kazancında yüksek performanslar elde edilmektedir.

Bakır ve alaşımlarının kaynağı ise aşağıda belirtilen özelliklerinden dolayı özel bir öneme sahiptir (Uslularhadde 2022).

Yüksek kapasitelide ısı iletkenliği,

Yüksek kapasitelide genleşme,

Sıvı halde iken gazları emme eğilimi nedeniyle gözenek oluşumu.

Bakır ve alaşımlarını aşağıdaki şekilde listeleyebiliriz (Uslularhadde 2022);

- Saf bakır (minimum 99.3% bakır içerir),
- Yüksek bakırlı alaşımlar (en fazla 5% alaşım elementi içerebilir)
- Bakır-çinko alaşımları (Pirinç ya da sarı, en fazla 40% çinko içerebilir)
- Bakır-kalay alaşımları (Fosfor bronz, en fazla 10% kalay ve 0.2% fosfor içerir)

- Bakır-alüminyum alaşımları (Alüminyum bronz, en fazla 10% alüminyum içerir)
- Bakır-silis alaşımları (Silis bronz, en fazla 3% Si içerir)
- Bakır-nikel alaşımları (en fazla 30% nikel içerir)
- Bakır-çinko-nikel alaşımları (en fazla 7% çinko ve 18% nikel içerir)
- Özel alaşımlar (spesifik bir özelliği geliştirmek için alaşımlanmış malzemeler)

3.2 Bakır ve Alaşımlarına Uygulanan Kaynak Yöntemleri

Bakır ve bakır alaşımlarının çeşitli kaynak metotları vardır. Örneğin oksijeni giderilmiş bakır bir malzeme gazaltı, TIG veya karbon-ark gibi yöntemler ile kaynatılabilir ancak bu metotlar hem zaman almakta hem de kaynak yapan personele bağlı olarak kaynak kalitesinde ciddi değişimlere açık metotlardır. Ayrıca gazaltı, TIG karbon-ark gibi yöntemler kaynak bölgesinde çizgisel bir bağlantı oluşturduğu için çekme prosesinde sorunlar oluşturması muhtemeldir.

Bizim incelediğimiz endüstride kullanılan iki temel metot vardır. Bu metotların tercih edilme sebebi ise üretim hattındaki zaman kayıplarını engellemek, tam alan kaynak oluşumu sağlamak ve bu sayede çekme prosesindeki kopmaları engellemek olarak sıralayabiliriz. Aşağıda bu iki metot yazılmıştır.

Sıcak basınçlı dirençli kaynak metodu

Soğuk basınçlı kaynak metodu

3.2.1 Sıcak basınçlı dirençli kaynak metodu

Otomotiv sektörü, uzay ve uçak teknolojileri, çelik yapılar, çelik eşya imalatı, hassas cihazların imalatı, elektroteknik, boru üretimi, makine sektörü gibi birçok alanda kullanılan ince malzeme kalınlığına sahip metal malzemelerin kaynağında yaşanan problemler, kaynak tiplerinin metot ve teknolojik olarak gelişimini sağlamıştır. İnce kesitli malzemelerde yüksek ısı altında kaldıklarında kalıcı şekil değişimi gerçekleşir. Bu nedenle kaynak işlemi minimum sıcaklıkta ve en kısa sürede

gerçekleştirilmelidir. Kaynaklı bağlantıların hızlı ve en az deformasyonla gerçekleştirilmesi, ekonomiklik, doğru üretim ve mukavemet gibi parametrelerin stabil ve istenilen değerlerde çıkması için önemli iki parametredir. Bu ve vb. durumlar elektrik direnç kaynağının seçilme nedenleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Uslularhadde 2022).

Elektrik direnç kaynağı, hızlı olması sebebiyle seri imalatta tercih edilen bir kaynak metodudur. Kaynak işlemi, kaynak makinasına malzeme yüklendikten sonra ayak pedalı vb. başlatıcı elemanlara basılarak çalıştırılır. Bu işlem operatör tarafından çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilir. Elektrik direnç kaynağı, iletken parçalardan geçirilen akımın ile iş parçasının gösterdiği dirençten dolayı ısınması ile yapılan birleştirmedir. İş parçaları kısmi olarak ergitilir ve daha sonra akım kesilerek iş parçalarına itme basıncı uygulanır. Bu basınç altında iş parçaları soğutulur ve kaynak işlemi tamamlanmış olur. Bu yöntemler ile yapılan kaynak işlemlerinin genel adı elektrik direnç kaynağıdır (Uslularhadde 2022).

Elektrik dirençli kaynak yöntemleri verimli ve az kirlilik yaratan yöntemler olarak bilinmektedir. Gaz altı kaynağı, ark kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme gibi diğer termik birleştirme yöntemlerine göre elektrik dirençli kaynak metodu ile yapılan kaynaklarda kaynak başına düşen işçilik masrafı çok düşüktür. Ancak direnç kaynak makinelerinin ilk yatırım maliyetleri diğer kaynak makinelerine göre kıyaslandığında daha pahalı olabilmektedir (Uslularhadde 2022).

Dirençli kaynak metodunda açığa çıkan ısının bir kısmı kondüksiyon ve/veya radyasyon yolu ile kaybolur. Malzemenin direnç değerinin düşük olması durumunda, gerekli duyulan kaynak ısını üretebilmek için daha fazla akıma ihtiyaç olacaktır. Bu gerekli akım transformatörden sağlanır. İş parçasını tutma kuvveti, akımı ileten elektrotlar ile birbirine bağlı olup bu sayede iş parçasına akımı iletebilir. İş parçaları hidrolik, pnömatik veya mekanik sistemler ile tutulur ve yine benzer sistemler ile birbirine itme kuvveti uygulatılarak kaynak yaptırılır.

Bu yöntemde alın altına birleştirilen malzemelere elektriksel direnç uygulayıp aynı zamanda malzemelere kaynak yönünde itme kuvveti uygulanmaktadır. Uygulanan direnç malzemelerde ısı oluşturarak ergimesine sebep olur ve itme kuvveti

ile yüzeyler birleşerek kaynak oluşturmaktadır. Bu kaynak metodu ile tam yüzey alanı birleşmesi sağlanmaktadır (Uslularhadde 2022).

Elektrik direnç kaynağı sektör ihtiyaçlarına göre metot olarak değişiklik göstermektedir. Aşağıda sektör ihtiyacına göre farklı tipteki elektriksel direnç kaynakları verilmiştir (Uslularhadde 2022).

- Nokta (punta) direnç kaynağı
- Kabartılı nokta kaynağı
- Dikiş direnç kaynağı
- Direnç alın kaynağı

3.2.2 Soğuk basınçlı kaynak metodu

Soğuk kaynak metodu 18. Yüzyılda bulunan eski bir metottur. Zamanla teknolojinin gelişmesi ve ihtiyaçların ortaya çıkması ile gelişen bir teknoloji olup genellikle yumuşak ve karbon içermeyen metallerde kullanılmaktadır. Bu kaynak aynı zamanda difüzyon kaynağı olarak da geçmektedir. Çünkü soğuk kaynak sırasında atomlar arasında bir difüzyon işlemi gerçekleştiği düşünülmektedir.

Bu metotta alın altına birleştirilen malzemelere ısı vb. dış etkiler olmadan kuvvet uygulanmaktadır. Bu kuvvet sayesinde malzemeler birbirine yüzey alanı boyunca kaynamaktadır.

Bu metotta genel olarak kaynak yapılacak parçalarda sertlik değeri ne kadar düşükse ortam sıcaklığında kaynak oluşumu için gerekli deformasyon değeri ve kuvvet o kadar düşük olması beklenmektedir. Bu kaynak metodunda, iş parçalarının kaynaktan etkilenen bölgeleri deformasyona uğramakta ve bu bölgeler pekleşme sebebiyle sertleşmektedir.

Soğuk basınç kaynağı, daha çok özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özel uygulamalarda kullanılan malzemeler genellikle altın, alüminyum, bakır gibi yüksek saflıkta düşük sertlikte olan malzemelerin kaynağının yanı sıra pirinç, çinko, gümüş ve gümüş alaşımları, nikel gibi diğer pek çok alaşımlar da soğuk kaynak prosesi

kullanılabilmektedir. Ayrıca kaplamalı bakır tellerin (gümüş, kalay, nikel kaplı) kaynak prosesinde de bu yöntem kullanılabilmektedir (Pwm 2022).

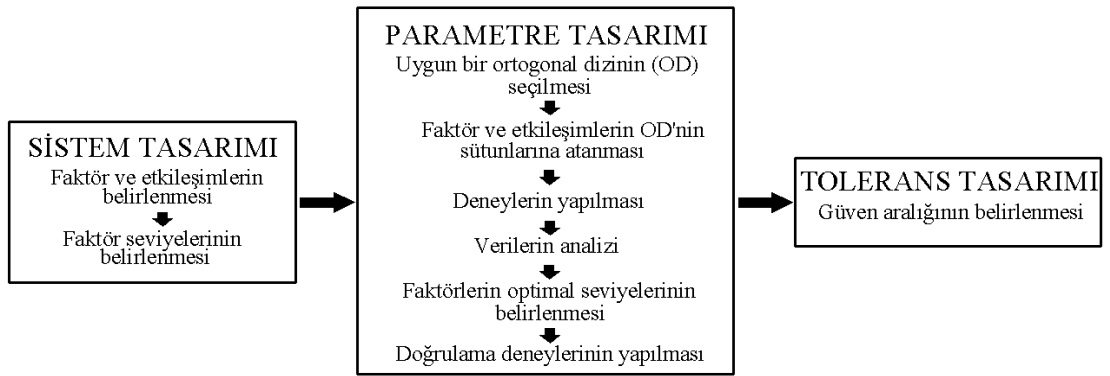
Soğuk basınçlı kaynak prosesi karbon içeriği olmayan yumuşak demirlerde de kullanılabilmektedir (Pwm 2022).

Bakır ve alüminyum gibi farklı metalleri birleştirmek için kullanılan direnç kaynağı, sürtünme kaynağı ya da alev kaynağı gibi bilinen yöntemlerde, kaynak bölgesinde mukavemetli bir kaynak oluşamayacaktır. Bu problemin temel nedeni, metallerin bu kaynak metodu sırasında arayüzlerinin arasında kalan oksitler ve havadan kaynaklanır. Soğuk basınçlı kaynak metodunda ise oksitler ve hava dışarıya itilir ve malzemelerde herhangi bir ısınma oluşmadığı için yalnızca ortam ısılarında görülebilecek metalurjik değişimler gerçekleşebilir. (Pwm 2022).

Soğuk basınçlı kaynak metodunda kaynak bölgesinin kalitesi çok iyidir çünkü dirençli tavlama ve diğer kaynak metotlarının aksine kaynak bölgesinde işlenmiş gibi bir yapı elde edilir. Bu yöntem ile de uygun olmayan özellikler sergileyen farklı bir bölge oluşmaz ve sıcaklık oluşmadığı için malzemedeki sıcaklıktan etkilenmiş karasız yapılar oluşmaz (Pwm 2022).

3.3 Taguchi Metodu

Sunulan çalışmada, Taguchi istatistiksel tasarım ve analiz metodu Minitab yazılımıyla kullanılmıştır. Taguchi yönteminin, kompleks matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duymaması, çok az sayıda deneyle gerçekleştirilebilmesi ve işlem parametrelerinin optimum seviyelerinin kolaylıkla belirlenmesinden ötürü endüstriyel ve bilimsel çalışmalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Pinar ve diğ. 2013), (Pinar ve diğ. 2016), (Pinar ve diğ. 2020). Metot sistem, parametre ve tolerans tasarımı olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.4.1).



Şekil 3.3.1: Taguchi metodunun uygulama adımları (Pinar 2013), (Pinar 2016), (Pinar 2020).

Sistem tasarımı, kalite karakteristiğini etkileyen faktörlerin ve bunlara ait seviyelerin belirlendiği kısımdır ve bu alandaki teknik bilgi ve tecrübeye ihtiyaç duyulmaktadır. Parametre tasarımı, Taguchi metodunun en detaylı ve önemli kısmıdır. Burada, faktörlere ait optimum seviyeler belirlenmekte; bu seviyelerdeki bağımlı değişken (cevap) tahmin edilmekte ve yine bu seviyelerdeki doğrulama testleri gerçekleştirilmektedir. Tolerans tasarımında, belli güven seviyesinde, tahmin edilen cevabın alt ve üst sınırları yani belirlenmektedir. Son olarak, doğrulama deneylerine ait ortalama, bu aralığın içerisindeyse, metot sistemin optimizasyonunu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği kabul edilmektedir (Pinar ve diğ. 2013), (Pinar ve diğ. 2016), (Pinar ve diğ. 2020).

4. MALZEME METOD

Soğuk basınçlı kaynak yapılan malzemelerin vuruş sayısı, kaynak süresi ve kaynak basıncı parametrelerinin değiştirilmesi sonucunda kaynak bölgesi üzerindeki etkileri araştırmak için bazı deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneylerdeki amaç endüstride bakırda oluşabilecek kalite kusurlarını önleyecek şekilde kaynak makinesinin optimum çalışma bölgesini belirlemek ve bu sayede malzeme kopmalarını azaltarak üretime katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu işlem sayesinde makinenin yataklarında oluşan aşınmalar deformasyonlar vb. makine yedek parça, sarf parçalarının ömründe artış olması beklenmektedir.

Bu etkilerin sonuçlarını görmek için yapılan incelemeler aşağıda verilmiştir.

- Kaynak Numunelerinin Ölçülmesi
- Kaynak Bölgesi Direnç Değişiminin Ölçülmesi
- Kaynak Bölgesi Çap Değişiminin Ölçülmesi
- Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak Mikro Sertlik Değişiminin Ölçülmesi
- Kaynak Bölgesi Çekme (Rm-MPa) Mukavemetinin Ölçülmesi
- Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin Ölçülmesi (Optik mikroskop ve FESEM analizlerinin yapılması)

4.1 Kaynak Malzemesinin Kimyasal Uygunluğunun Ölçülmesi

İlk olarak kaynağın yapılacağı filmaşından kimyasal kompozisyonun tayini için numune alınarak Şekil 4.1.1’ de gösterilen AMETEK SPECTROBLUE Kimyasal İçerik Tayin Cihazı ile malzemenin kimyasal içeriği tespit edilir.



Şekil 4.1.1: AMETEK SPECTROBLUE Kimyasal İçerik Tayin Cihazı

Tablo 4.1.1: BS EN 1977 Cu-ETP1 (CW003A) Kimyasal İçeriği

	Kimyasal İçerik													
	Cu	Se	Te	Bi	Se+Te+Bi	Sb	As	Fe	S	Ag	Cd	P	Si	Toplam
	min	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
ASTM B 49	99,90	2	2	1.0	3	4	5	10	15	25				65
BS EN 1977 Cu-ETP1 (CW003A)		2*2	2*2	2*2	3	4 1*	5*1	10*3	15	25	..*1	..*1	..*3	65
Sonuçlar	99,974	0,6	0,5	0,5	1,6	0,6	0,3	1,2	3,9	6,7	0,1	0,2		15,1

*1 : (As+Cd+Cr+Mn+P+Sb) max 15 ppm

*2 : (Bi+Se+Te) max 3 ppm

*3 : (Co+Fe+Ni+Si+Sn+Zn) max 20 ppm

Tablo 4.1.1’de verilen kimyasal içeriğin ASTM B49 ‘a göre uygun çıkmasından sonrasında malzemeler soğuk kaynak yapılmak üzere kaynak makinesine götürülür.

4.2 Soğuk Basıncılı Kaynak İşlemi

4.1’deki malzeme ölçüm işleminden sonra Şekil 4.2.1’de verilen makine kullanılarak Ø8 mm çapındaki Cu-ETP bakırların kaynakları yapılmıştır.



Şekil 4.2.1: Soğuk Kaynak Makinesi

4.2.1 Soğuk Kaynak Makinesi Özellikleri

EP500, elektro-pnömatik, bağımsız bir çubuk kaynak makinesidir. Malzemenin sertliğine bağlı olarak 5.00-12.50 mm (bakır), 5.00-15.00 mm (alüminyum) aralığında tel veya şerit biçimindeki çoğu demir dışı metale soğuk kaynak yapar. EP500, pnömatik sistemi gerekli kaynak sırasından geçiren ve sistemi arızalara karşı izleyen gelişmiş, kullanıcı dostu programlanabilir bir kontrolör (PLC) ile donatılmıştır (Pwm 2022).

Bu ağır hizmet tipi makine pnömatik olarak çalıştırılır ve basınçlı hava kaynağı ve 100 ila 240 volt arasında tek fazlı bir elektrik kaynağı gerektirir. EP500 ile hidrolik kullanılmaz. Kaynak işleminde, bir pnömatik silindir düzenlemesi aracılığıyla kavrama ve yığılma hareketleri üzerinde bağımsız kontrol ile eş eksenli itme tekniği

uygulanır. Kaynak çapaklarının giderilmesi için sisteme tam otomatik sıyırma entegre edilmiştir. (Pwm 2022).

Tablo 4.2.1.1: Soğuk Basıncılı Kaynak Makinesi Özellikleri (Pwm 2022).

Soğuk Kaynak Makinesi Özellikleri	
Makine Tanımı:	EP500
Makine Markası:	PWM
Makine Kontrolü:	Elektro-pnömatik
Makine Kapasitesi	
Bakır	5 mm - 12.50mm (.197" - .492")
Alüminyum	5 mm - 15.00mm (.197" - .590")
Makine Boyutları	
Makine Ölçüleri:	L1430 x W970 x H1240 mm (56" x 38" x 49")
Net Ağırlık:	960kg (2,120lbs)
Brüt Ağırlık:	1160kg (2,560lbs)

EP500, demir dışı, dairesel ve profil kesitli çubukların uçtan uca alın kaynağını yapmak ve tel çekme ve çubuk kırma işlemlerinde yardımcı bir ekipman parçası olarak yerini almak için tasarlanmıştır. Temel ilke, karşılıklı tellerin veya çubukların uçlarını bir çift ayrık kalıpta kavramak ve bunları malzemenin akma gerilimi aşılanaya kadar yoğun aksenal basınç altında bir araya getirmektir. Bu basınç, tek tip bir kaynak oluşana kadar (5-10 kez) tekrarlanır. Bu ardışık basınçlar tarafından üretilen birleşme, başarılı bir kaynağı engelleyebilecek olan çubukların uçlarındaki daha önce oksitlenmiş alanların kaynak bölgesinden çıkan metalin radyal akışında ortadan kaldırılacağı şekildedir. Bu şekilde oluşturulan bağ, malzemeyi yeniden oksitleyecek ve temel malzemeye eşit güçte olan hava girişini engeller. Kaynak bölgesinden ekstrüde edilen malzeme, kaynağın çevresinde düzensiz bir metal çapağı oluşturur ve malzeme sabitken kalıp setlerinden biri malzemeyi tutarken diğeri kaynak üzerinden geçirilerek çapak kırma işlemi gerçekleştirilir.

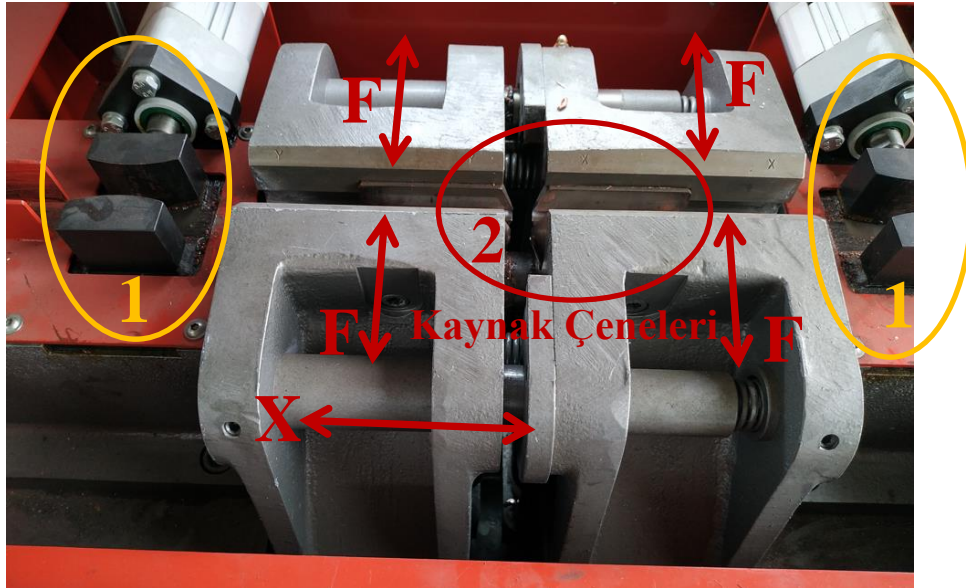
Temel süreç, aşağıdaki işlem döngüsünü içerir:

- Yükleme işlemi
- Kavrama işlemi
- Kaynak işlemi
- Malzeme yığılmasının kırması işlemi
- Kavrama işlemi
- Boşaltma işlemi

Makine sisteminin çalışması programlanabilir kontrolör (PLC) tarafından kontrol edilir. Makine, her iş parçası için bir çift pnömatik piston kullanılarak çalıştırılan tutucu içerir. Bunların amacı, kavrama kolları geri çekilirken iş parçalarını tutmak ve böylece kaynak düzgün şekilde oluşturulmadan önce ayrılma eğilimlerini önlemektir (Pwm 2022).

Soğuk basınçlı kaynağın yapılacağı makinenin uç çalışma bölgeleri incelenmiş ve bu gözlemler sonucunda çenelerin kaynak sırasında 3 bar basınçta tam kapanmadığı gözlenmiştir. Yine bu uç deneylerde makinenin regülatörü üretici firma tarafından sabitlenmiştir ve 6 bar üstüne çıkışa izin vermemektedir. Ayrıca makine en fazla 12 vuruş sayısına ve 5 sıyırma sayısına izin vermektedir.

Kimyasal içeriği Tablo 4.1.1' de verilen filmaşinden yaklaşık olarak 50cm uzunluğunda ve 64 adet parça kesilerek bakır numuneler Tablo 4.2.1' de özellikleri verilen PWM marka elektro-pnömatik olarak çalışan EP500 makinesinde kaynak yapılmıştır. Soğuk basınçlı kaynak sayısı Tablo 4.1' de verilen tabloya göre hazırlanarak 8 adet farklı numuneden istatistiksel olarak sonuç alabilmek için ve ürün tüketimini minimumda tutmak için her deneyden 5 er adet numune hazırlanmış ve toplamda 40 adet soğuk basınçlı kaynak numunesi yapılmıştır.



Şekil 4.2.1.1: Soğuk Basınçlı Kaynak Makinesi Sabitleme Pabuçları ve Kaynak Çeneleri

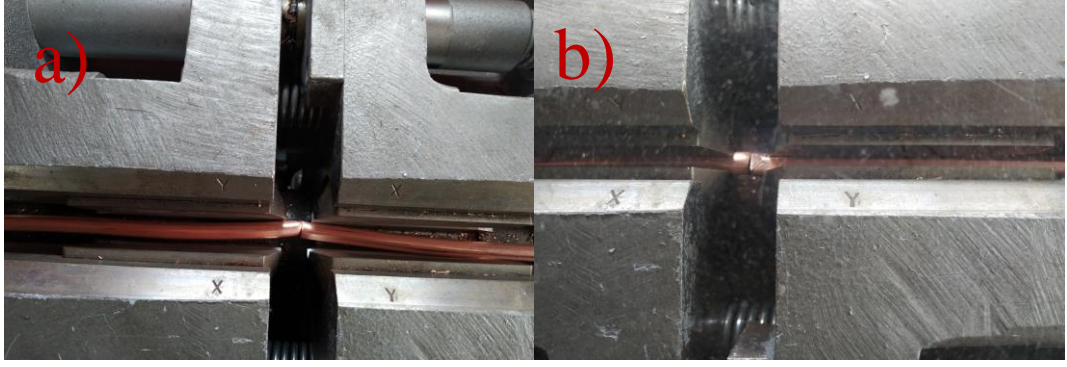
Yukarıda Şekil 4.2.1.1' de 1 numara ile gösterilen görüntüdeki pnömatik piston kullanılarak yapılan sabitleme pabuçları, makinenin solundan ve sağından sürülen

malzemeleri, kaynak çeneleri devreye girmeden önce sabitleyerek pozisyonunun değişmemesini sağlamaktadır. Yukarıda Şekil 4.2.1.1’de 2 numara ile gösterilen görüntüdeki kaynak çeneleri yine pnömatik piston kullanılarak F kuvveti ile sıkma yönünde malzemeye basınç uygulamaktadır, X yönünde başka bir pnömatik piston ile birbirine doğru iterek malzemeler arasında difüzyon bağı oluşmasını sağlamaktadır. X yönünde itme stroğu bittikten sonra makine belirli bir süre bekler. Bu süre kaynak süresi olarak geçmektedir. Daha sonra 1 numaralı sabitleme pabuçları malzemeyi tekrar sabitler ve F kuvveti ortadan kalkarak kaynak çeneleri açılır ve çeneler X yönünde başlangıç pozisyonuna geri döner. Bu tanımlamalar soğuk basınçlı kaynak prosesinde 1 vuruş olarak geçmektedir. Makinede PLC kontrollü ekrandan seçilen vuruş sayısı kadar makine döngüyü yapmaktadır.



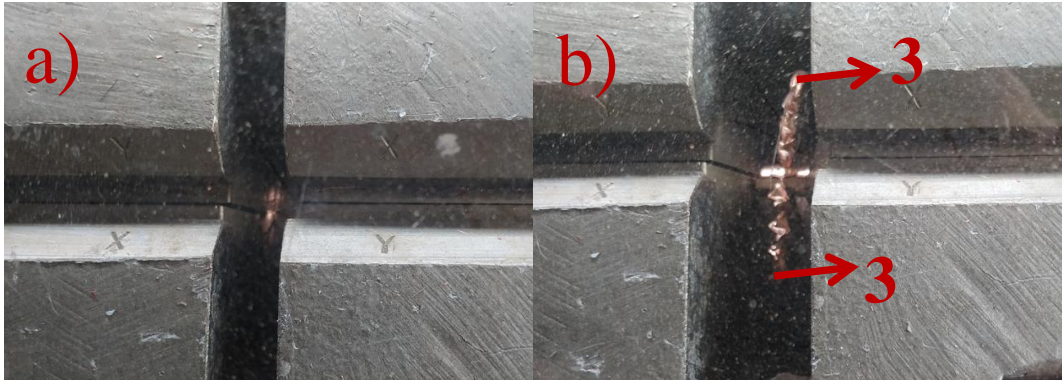
Şekil 4.2.1.2: Soğuk Basınçlı Kaynak Makinesi Hava Şartlandırıcısı

Kaynak basıncı ise Şekil 4.2.1.2’ de gösterilen hava şartlandırıcı grubu (filtre-regülatör grubu) ile 0,3 bar ile 7 bar arasında basınç ayarı yapılabilmektedir, ancak makine imalatçısı basıncı 4 bar altında çalışmayacak şekilde tasarlamıştır. Bu tasarımın nedenleri araştırılmış ve makine kontrollü olarak 3 barda çalışacak şekilde pnömatik olarak tahrik edilmiştir. Yapılan denemede kaynak çenelerinin X yönünde pozisyonunu tamamlayamadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak makinenin sağlıklı bir şekilde soğuk basınçlı kaynak yapması için gerek basınç değerinin minimum 4 bar olması gerekmektedir.



Şekil 4.2.1.3: Soğuk Basınçlı Kaynak Yapımının İşlem Sırası-1 a) Makine boş pozisyonda bakır yükleme işlemi b) Makine yükleme pozisyonuna getirilerek malzemelerin yanlardan sürülme işlemi

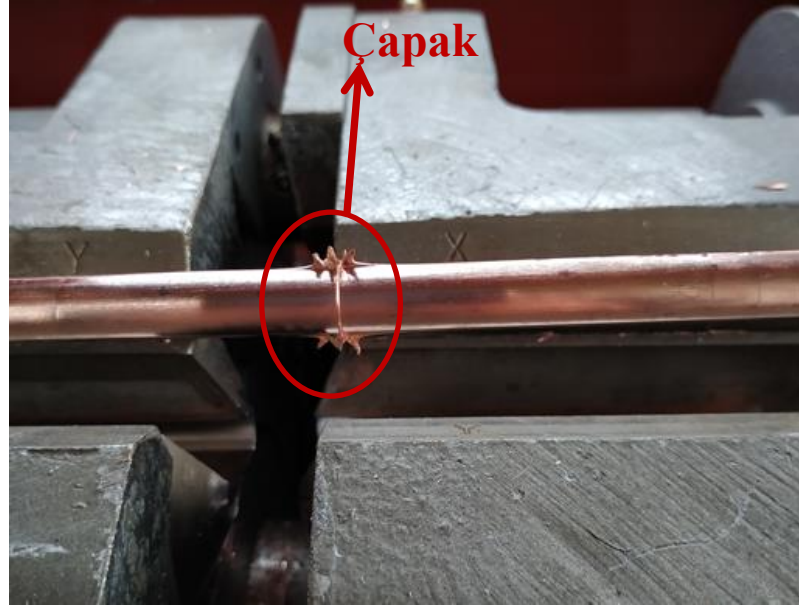
Yukarıda Şekil 4.2.1.3’ de b) ile gösterilen görüntüde 50cm kesilen bakır malzemeler makinenin solundan ve sağından sürülerek uç noktaları çene açıklıklarının yaklaşık olarak ortasında olacak şekilde yüklenmiştir. Daha sonra Şekil 4.2.1.1’ de 1 numara ile gösterilen görüntüdeki pnömomatik piston kullanılarak yapılan sabitleme pabuçları malzemeyi tutarak pozisyonunun değişmemesini sağlamış ve makinede kaynak işlemi başlatılmıştır.



Şekil 4.2.1.4: Soğuk Basınçlı Kaynak Yapımının İşlem Sırası-2 a) Makine kaynak yapmaya başlamış ve ilk vuruş tamamlanmış halinin görüntüsü b) Makine kaynak yapmaya başlamış ve 6 vuruş tamamlanmış halinin görüntüsü

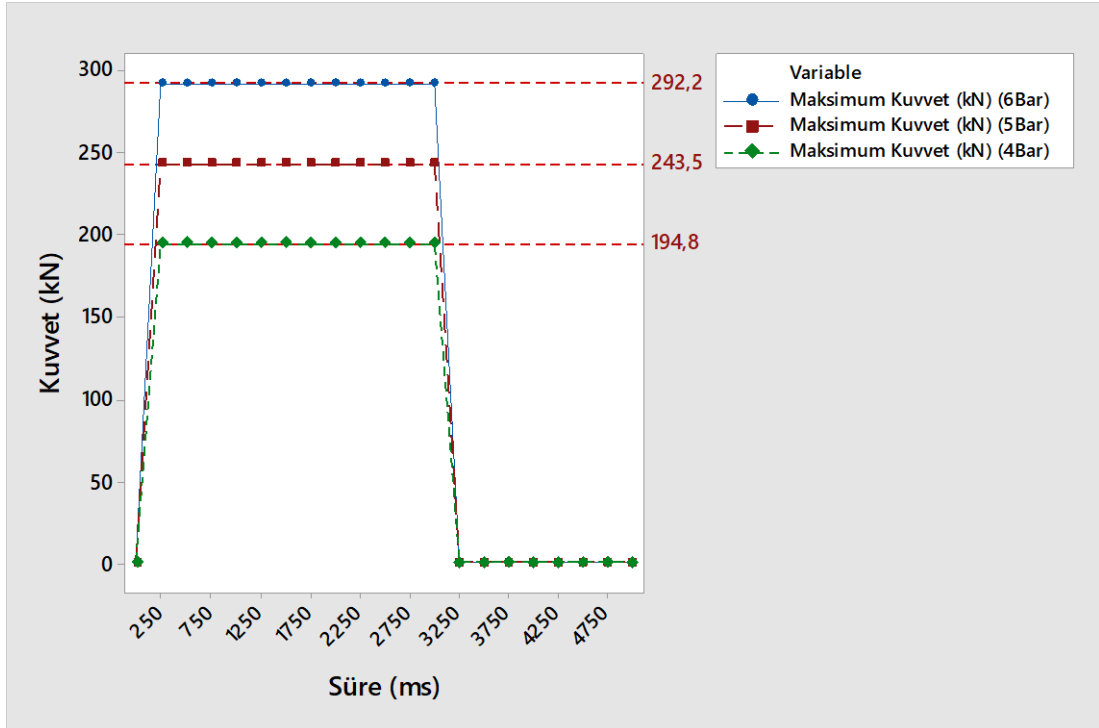
Yukarıda Şekil 4.2.1.4’ de a) ile gösterilen görüntüde makine kaynak işlemine başlatıldıktan sonraki ilk vuruş olup Şekil 4.2.1.4’ de b) ile gösterilen görüntüde ise 6 vuruşun tamamlandığı görünmektedir.

Yukarıda Şekil 4.2.1.4’ de b) ile gösterilen 3 numaralı görüntüde ise kaynak sonrasında oluşan malzeme yığılmaları görülmektedir. Kaynak sırasında birbiri içerisine difüzyon yapılmaya zorlanan fazla malzemeler yığılma şeklinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2.1.5: Soğuk Basıncılı Kaynak İşlemi Yapılan Malzeme

Set edilen vuruş sayısı tamamlandıktan sonra en son vuruşta malzeme yığılmasını kırmak için kaynak çenelerinden birisi sabit tutularak diğer çene ise düşük F kuvveti ile malzeme üzerinde kaydırılarak yüzeyde sıyırma işlemi yapılmaktadır. Bu sistem de diğerleri gibi plc kontrolü ile otomatik olarak yapılmaktadır. Bu kırma işleminden sonra kalan kaynak çapağının Şekil 4.2.1.5' te gösterilmektedir.



Şekil 4.2.1.6: Farklı Hava Basıncılarında Malzemeye Uygulanan Maks. Kuvvet (kaynak süresi=0ms)

Tablo 4.2.1.2: Basınca Göre Yüklerin Dağılımları (kN)

Basınca Göre Yük Dağılımları					
4 Bar (kN)		5 Bar (kN)		6 Bar (kN)	
1-Sabitlenme Pabuçları	0,79	1-Sabitlenme Pabuçları	0,98	1-Sabitlenme Pabuçları	1,18
F-Yönünde Sıkma Kuvveti	43,64	F-Yönünde Sıkma Kuvveti	54,55	F-Yönünde Sıkma Kuvveti	65,45
X-Yönünde Kaynak Kuvveti	194,78	X-Yönünde Kaynak Kuvveti	243,48	X-Yönünde Kaynak Kuvveti	292,18

Tablo 4.2.1.3: Soğuk Kaynak İşlem Adımları ve Etkilediği Bölgeler

İşlem Sırası	İşlem Tanımı	Etki Parametresi	Etki Parametre Tanımı
1	Makinenin koruma kapaklarını kapatılması	-	-
2	Makinenin malzeme yükleme pozisyonuna alınması	-	-
3	Malzemelerin çenelere yükleme işlemi	-	-
4	Sabitlenme pabuçlarının kapatılması	C	Kaynak basıncı
5	Makinenin çalıştırılması	C	Kaynak basıncı
6	Kaynak çenelerinin F yönünde sıkma kuvveti ile kapanması	C	Kaynak basıncı
7	Sabitlenme pabuçlarının açılması	-	-
8	Kaynak çenelerinin X yönünde kapanması	C	Kaynak basıncı
9	Belirlenen kaynak süresi boyunca bekleme	B	Vuruş süresi
10	Sabitlenme pabuçlarının kapatılması	C	Kaynak basıncı
11	Kaynak çenelerinin F yönünde açılması	-	-
12	Kaynak çenelerinin X yönünde açılması	-	-
13	Bu döngünün tekrar sayısı	A	Vuruş sayısı
14	Malzeme yığılmasının kırılması	C	Kaynak basıncı

4.3 Kaynak Bölgesinin Direnç Değişiminin Ölçülmesi

Bu ölçümde hedeflenen, iç yapıdaki tanelerin soğuk basınçlı kaynak etkisi ile küçülmesi ve bu tane küçülmesinin direnç üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Direnç ölçümleri 24 °C sıcaklıkta, kaynak çenelerinin bittiği bölge olan 167 mm' den daha dar tutularak kaynak bölgesi tam ortada kalacak şekilde çeneler arası mesafe 150 mm ve 70 saniye beklendikten sonra Şekil 4.3.1' de görüleceği gibi ölçülen değer referans alınmıştır.

Ölçümler Şekil 4.3.1’de görülen ve Tablo 4.3.1’de özellikleri verilen resistomat cihazı ile yapılmıştır.

Referans değer olarak aynı filmaşın paletinden alınan bakır kaynaksız numune aynı ölçüm parametreleri kullanılarak referans alınmıştır. Bu ölçülen değer, kaynaksız Cu-ETP için $50 \mu\Omega$ ’ dur.



Şekil 4.3.1: Direnç Ölçüm Cihazı (RESISTOMAT® 2304) (Burster 2022)



Şekil 4.3.2: Direnç Ölçüm Bölgesi ve Ölçüm Şekli

Tablo 4.3.1: Direnç Ölçüm Cihazının Özellikleri (RESISTOMAT® 2304) (Burster 2022)

RESISTOMAT® 2304 ÜRÜN BİLGİLERİ	
Model	2304
Ölçüm aralığı	200.000 $\mu\Omega$
	2.00000 m Ω
	20.0000 m Ω
	200.000 m Ω
	2.00000 Ω
	20.0000 Ω
	200.000 Ω
	2.00000 k Ω
	20.0000 k Ω
Çözünürlük	0.001 $\mu\Omega$
	0.01 $\mu\Omega$
	0.1 $\mu\Omega$
	1 $\mu\Omega$
	10 $\mu\Omega$
	0.1 m Ω
	1 m Ω
	10 m Ω
	0.1 Ω
Ölçüm doğruluğu	≤ 0.01 % rdg.
Ölçüm ekranı	200 000 sayılar
Otomatik sıcaklık telafisi	Evet
Karşılaştırıcı	Evet
Ara yüzler	RS232
	RS485
	IEEE488
	USB (opsiyon)
	Ethernet (opsiyon)
Belirli özellikler	Otomatik ölçüm aralığı seçimi
	Termal e.m.f kompanzasyonu ile gelecek odaklı ölçüm yöntemi. Dahili referans değerleriyle sürekli karşılaştırmalar sayesinde yüksek kararlılık.
	Akım düzenlemesi voltajsız sonuç verir, bobinlerin soğutma eğrileri hesaplanır.
	İstatistiklerle mutlak veya bağıl limit sınıflandırması için akım ayar girişi ölçümü, ölçüm problemlerinin kalibrasyonu için çubuk ekranı, direnç belirleme ve diğer birçok fonksiyon.

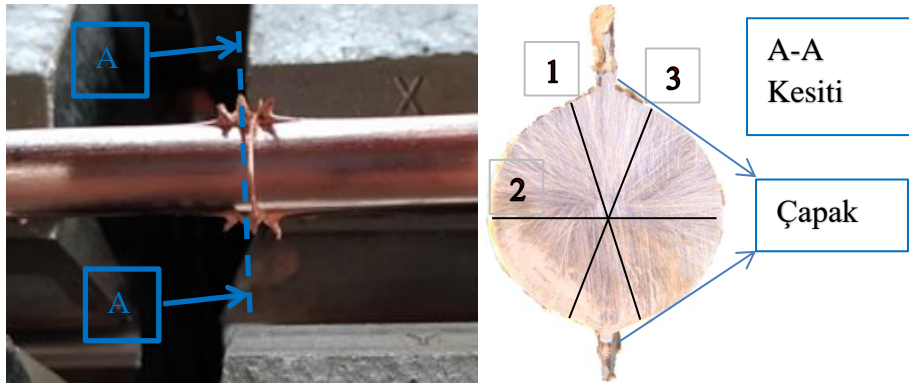
4.4 Kaynak Bölgesi Çap Değişiminin Ölçülmesi

Soğuk basınçlı kaynak etkisi ile çap artışının olduğu gözlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda parametre değişimleri ile çap değişimleri arasındaki ilişki ortaya konulmak istenmiştir. Ölçümler Mitutoyo marka, 0-25 mm aralıklı, 103-137 ürün kodlu Şekil 4.4.1’ de gösterilen mikrometre kullanılarak yapılmıştır.

Kaynak sonrası, kaynak bölgesinde oluşan çap değişimlerinin ölçümleri Şekil 4.4.2’de görüldüğü gibi 3 farklı noktadan alınmıştır.



Şekil 4.4.1: Mitutoyo, 0-25 mm, 103-137



Şekil 4.4.2: Malzeme çap ölçümünün sembolik gösterimi

4.5 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak Mikro Sertlik Değişiminin Ölçülmesi

Numunelerin bakalite alınabilmesi için öncelikle istenilen boyutlarda kesilmesi gerekmektedir. Bunun için Erbakır A.Ş. firmasında Ar-Ge Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.5.1’ de tesiste kurulu görseli verilen kaba kesme cihazı kullanılmaktadır. Döner disk ve su soğutma sayesinde incelenmek istenilen bölge kesilerek bakalite almaya uygun boyutlara getirilmiştir.



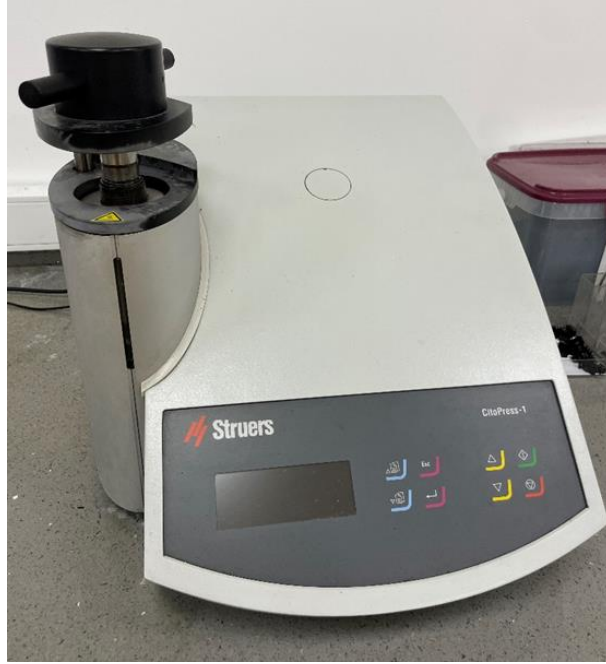
Şekil 4.5.1: Struers CitoPress-1 Kaba Kesme Makinesi

Kaynak bölgesi uçta kalacak şekilde 30 mm uzunluğunda kesilerek sıcak kalıplamaya uygun hale getirilen numuneler cihaza yerleştirilmiştir. Üzerine Şekil 4.5.2’ de gösterilen termoplastik akrilik reçine tozu konularak Şekil 4.5.3’ deki cihaza uygun parametrelerde çalıştırılarak sıcak kalıplama işlemi yapılmıştır.

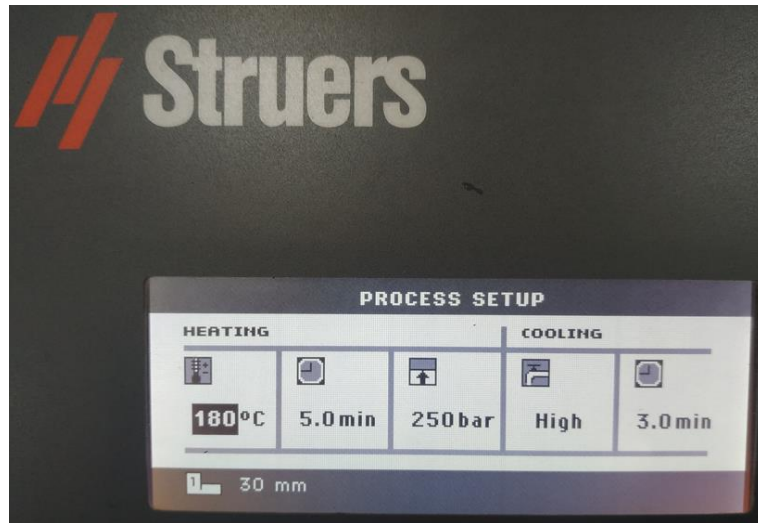
Sıcak kalıplama işlemi Şekil 4.5.4’ de gösterildiği gibi 180°C’ de 250 bar basınç uygulanarak 5 dakika boyunca ısıtılmakta daha sonra 3 dakika soğutulmaktadır. Her bir numunenin sıcak kalıplama işlemi 8 dakika sürmektedir.



Şekil 4.5.2: Termoplastik Akrilik Reçine

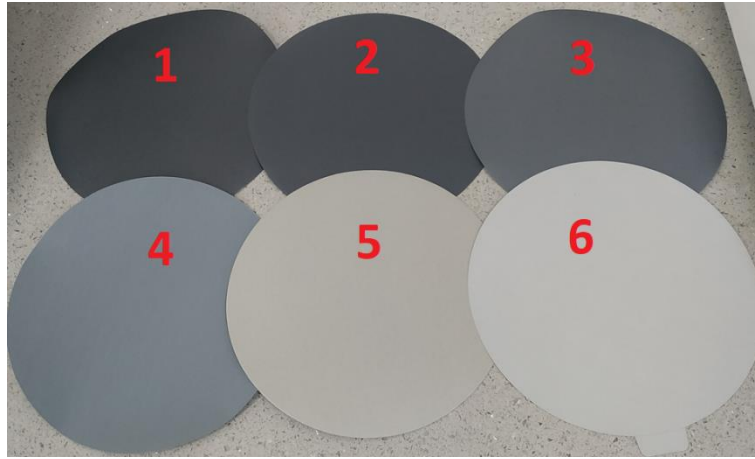


Şekil 4.5.3: Struers CitoPress-1 Sıcak Kalıplama Cihazı



Şekil 4.5.4: Struers CitoPress-1 Sıcak Kalıplama Cihaz Parametreleri

Sıcak kalıptan çıkan numuneler Şekil 4.5.6'daki cihaz ile numunenin tam ortasını inceleyebilecek şekilde 15 dakika 320 kum ile zımpara yapılarak 3,5-4 mm arasında alından zımpara yapılmıştır. Daha sonra diğer zımparalama ve parlatma işlemine alınmıştır. Zımpara işleminde farklı kum seviyesine sahip zımparalar Şekil 4.5.5' de gösterildiği şekilde sırasıyla 320, 500, 800, 1200, 2000, 4000 SiC kum zımparalar kullanılmıştır. Zımpara işlemi 3 dakika boyunca tekrarlanmıştır. Mikro sertlik ölçümü için 4000 kum yeterli görüntü kalitesini oluşturmuştur. Sertlik ölçümü için yapılan toplam zımpara işlem süresi numune başına 30 dakikadır. Bu zımpara ve parlatma işlemleri Erbakır A.Ş. firmasında Ar-Ge Laboratuvarında bulunan, Şekil 4.5.6' da gösterilen cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 4.5.5: Farklı Kum Seviyesine Sahip Zımparalar



Şekil 4.5.6: Struers Labapol-5 Zımpara ve Parlatma Makinesi

Bakalite alınmış, zımparalanmış ve parlatılmış numunelerin ölçümleri Şekil 4.5.7' de gösterilen mikro sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Her numune için ölçüm noktaları arasında 0,5 mm mesafe ile HV1 yükü uygulanarak ortalama 60 adet ölçüm alınmıştır.



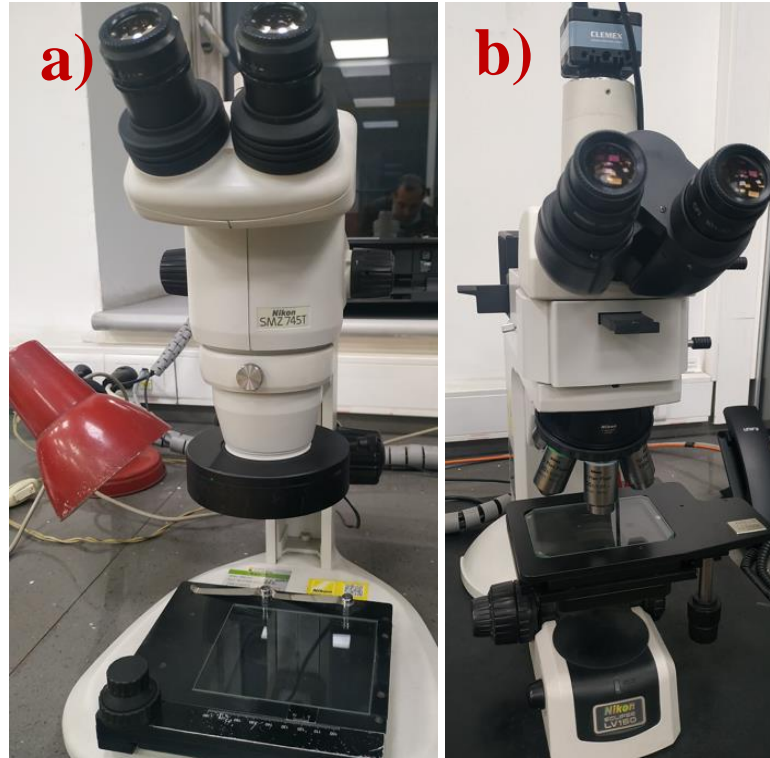
Şekil 4.5.7: Emtotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı



Şekil 4.5.8: Emtotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı ile yapılan örnek sertlik ölçümü

Tablo 4.5.1: Emcotest DuraScan mikro sertlik ölçüm cihazı teknik özellikleri (Struers 2012)

Test yük aralığı	0.098 N – 98.1 N (0.01 – 10 kgf)
Yükleme mekanizması	Dead weights (0.01 – 0.05 kgf)
Yük hücresi	(0.1 – 10 kgf)
Mevcut test yöntemleri	Vickers HV0.01-HV10, Knoop HK0.01-HK2
Standartlara uygunluğu	Vickers: EN ISO 6507, ASTM E384, JIS Z 2244, Knoop: EN ISO 4545, ASTM E384, JIS Z 2251
Değerlendirme kamerası	½" high res CMOS 1.3 mpix
Genel bakış kamerası	½" high res 1.3 mpix
Aydınlatma kaynağı	LED
Odak	Otomatik
Sertlik değerlendirmesi	Motorlu
Test kafası hareketi (Z)	Motorlu
Test kafası çözünürlüğü (Z)	5 nm
Test örs yükseklik ayarı	Sabit
Maksimum numune yüksekliği / dikey kapasite	260 mm
Boğaz derinliği	Yok
Taban plakası malzemesi	Granit (DuraScan-50/-70/-80), Alüminyum (DuraScan-10/-20)
Güç kaynağı	110-230 V / 50-60 Hz
Çalışma koşulları	23 +/-5°C, 40-70% bağıl nem
Boyutlar Y x G x D [mm]	670-690 x 505-680 x 420-450
Ağırlık	68-96 kg (150-211 lbs)



Şekil 4.5.9: a) Nikon SMZ 745T Mikroskop b) Nikon Eclipse LV150 Mikroskop

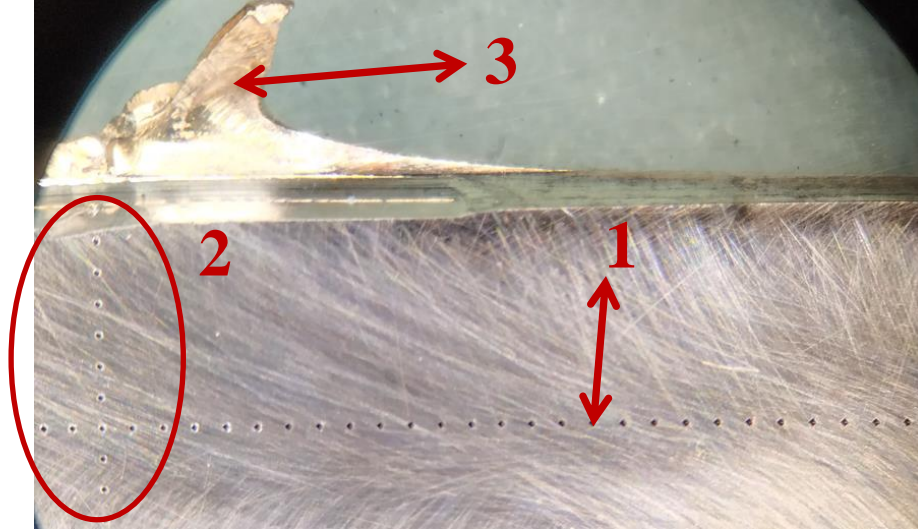
Tablo 4.5.2: a) Nikon SMZ 745T Mikroskop Teknik Özellikleri (Nikon 2022)

Optik Sistem	Greenough optik sistemi
Toplam Büyütme:	3.35-300x (kullanılan oküler ve ilave objektif kullanımına göre değişmektedir.)
Dikey Tüp	Entegre C-mount 0.55x büyütmeli lens (F.N. 11), 2/3 " veya daha küçük CCD sensör boyutlarına uygun
Gözlem Tüpü	Fix tip
Eğim	45°
Gözler arası mesafe ayarı	52-75 mm
Okülerler (Diyoptri Ayarı)	C-W 10xB (F.N. 22), C-W 15x (F.N. 16), C-W 20x (F.N. 12.5), C-W 30x (F.N. 7)
Zoom Aralığı	0.67-5x
Zoom oranı	7.5:1
İlave objektifler	G-AL 0.5x (W.D. 211 mm), G-AL 0.7x (W.D. 150 mm), G-AL 1.5x (W.D. 61 mm), G-AL 2x (W.D. 43.5 mm)
Çalışma Mesafesi	115 mm
Ağırlık	1.55 kg (SMZ745), 1.8 kg (SMZ745T)

Tablo 4.5.3: b) Nikon Eclipse LV150 Mikroskop Teknik Özellikleri (Nikon 2022)

Ana ünite	Maksimum numune yüksekliği: 38 mm (LVNU5AI U5AI burunluk ve LV-S32 3x2 sahne / LV-S64 6x4 sahne ile kullanıldığında)
	* 73 mm, tek kolonlu yükseltici ile kullanıldığında, kısma, kaba ve ince ayar düğmeleri için 12V50W dahili güç kaynağı
	Sol: kaba ve ince ayar / Sağ: ince ayar, 40 mm strok Kaba ayar: 14 mm/dönüş (tork ayarlı, odaklama mekanizması ile)
	İnce ayar: 0,1 mm/dönüş (1 µm/derecelendirme) Sahne montaj delik aralıkları: 70 x 94 (4-M4 vida ile sabitlenir)
Mercek yeri	C-N6 ESD Altılı Burunluk ESD LV-NU5 Evrensel Beşli Burunluk ESD LV-NBD5 BD Beşli Burunluk ESD LV-NU5I Akıllı Evrensel Beşli Burunluk ESD
Episkopik aydınlatıcı	LV-UEPI-N
	LV-LH50PC 12V50W Ön Merkezli Lamba Evi Parlak/karanlık alan anahtarı ve bağlantılı diyafram durdurma (merkezlenebilir), alan diyaframı (merkezlenebilir) ø 25 mm filtre (NCB11, ND16, ND4), polarizör/analizör, plaka, uyarı ışığı dengeleyici; gürültü sonlandırıcı ile donatılmış
	LV-UEPI2
	LV-LH50PC 12V50W Ön Merkezli Lamba yuvası HG ön merkezli fiber aydınlatıcı: C-HGFIE (ışık ayarlı) *seçenek Parlak/karanlık alan anahtarı ve bağlantılı diyafram durdurma (ortalanabilir), alan diyaframı (ortalanabilir), aydınlık alan, karanlık alan ve epi-floresan anahtarı ø 25 mm filtre (NCB11, ND16, ND4), polarizör/analizör, λ plakası, uyarı ışığı dengeleyiciyi kabul eder; gürültü sonlandırıcı ile donatılmış
Mercek tüpleri	LV-TI3 trinoküler mercek tüpü ESD (Düzeltilmiş görüntü, FOV: 22/25)
	LV-TT2 TT2 eğilebilir trinoküler mercek tüpü (Kurulmuş görüntü, FOV: 22/25)
	C-TB dürbün tüpü (Ters görüntü, FOV: 22)
	P-TB Binoküler Tüp (Ters görüntü, FOV: 22)
	P-TT2 Trinoküler Tüp (Ters görüntü, FOV: 22)
Aşamalar	LV-S32 3x2 kademe (Strok: 75 x 50 mm, cam plakalı) ESD uyumlu
	LV-S64 6x4 kademe (Strok: cam plakalı 150 x 100 mm) ESD uyumlu
	LV-S6 6x6 kademe (Strok: 150 x 150 mm) ESD uyumlu
Göz mercekleri	CFI mercek serisi
Objektif lensler	Endüstriyel Mikroskop CFI60-2/CFI60 optik sistem Objektif lens serisi: Gözlem yöntemine göre kombinasyonlar
ESD performans	0,2 saniye içinde 1000 ila 10V. (belirli aksesuarlar hariç)
	Güç Tüketimi:
	1.2A/75W
Ağırlık	Yaklaşık 8.6kg

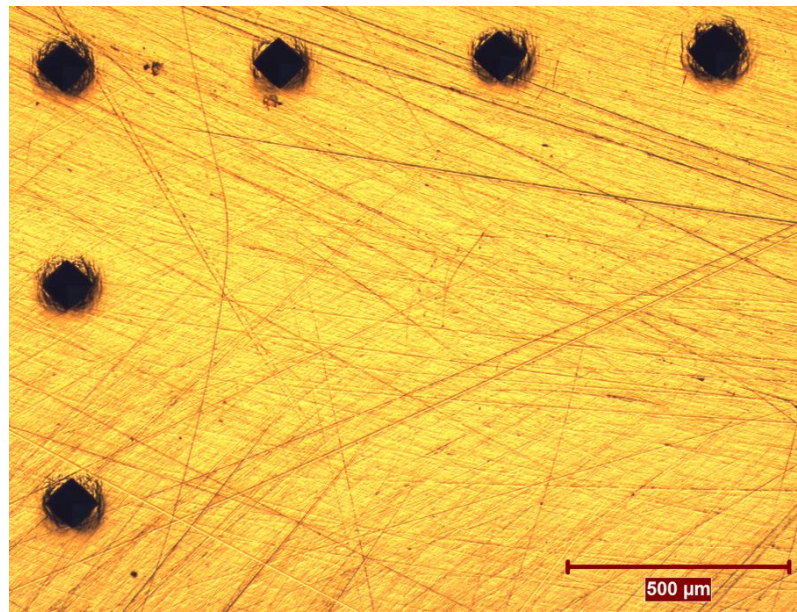
Mikro sertlik ölçümleri, Şekil 4.5.10' da gösterildiği şekilde malzemenin ortasından 0,5 mm mesafelerle ilerleyerek HV1 yükü uygulanarak yapılmıştır. Ayrıca kaynak bölgesine gelindiğinde kaynak bölgesine paralel şekilde dışa doğru 0,5 mm ilerleyerek mikro sertlik ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.5.10: Sıcak kalıba alınmış ve mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği (1 numara, kaynak bölgesine dik olarak yatay bir doğrultuda ilerleyen örnek sertlik ölçümü, 2 numara, tespit edilen kaynak bölgesinden paralel ilerleyerek alınan ölçümler ve 3 numara ise kaynak çapağıdır.)



Şekil 4.5.11: Sıcak kalıba alınmış ve mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği-1X



Şekil 4.5.12: Mikro sertlik ölçümü yapılmış numune örneği-50X

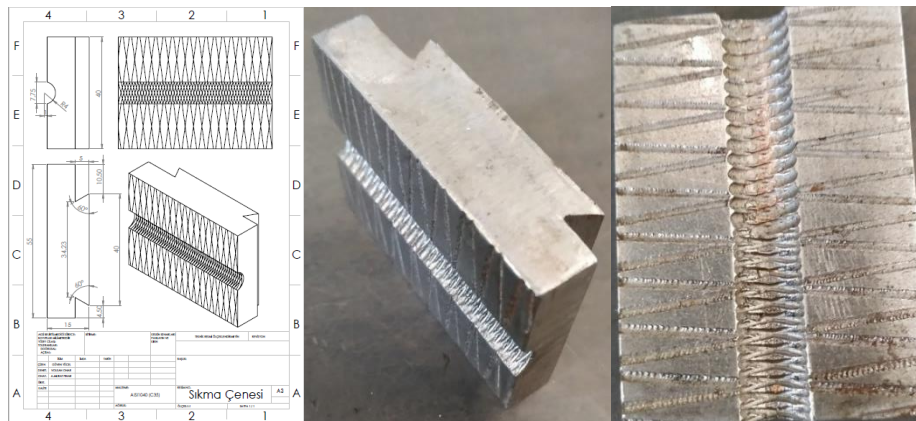
Şekil 4.5.10 ve Şekil 4.5.11’ de gösterilen görüntüler Şekil 4.5.9’ da a) ile gösterilen Nikon SMZ 745T mikroskop ile alınmıştır.

Şekil 4.5.12’ de gösterilen görüntü Şekil 4.5.9’ da b) ile gösterilen Nikon Eclipse LV150 mikroskop ile alınmıştır.

Her numuneden yaklaşık olarak 60 adet ölçüm alınmış ve 8 adet farklı parametreler ile üretilen numunelerin mikro sertlik değişimleri incelenmiştir. Toplamda 480 adet ölçüm yapılan mikro sertlik ölçümlerine göre ana etki grafiği çizilmiş ve istatistiki analizler deneysel buğular ve istatistiksel analiz bölümde paylaşılmıştır.

4.6 Kaynak Bölgesi Çekme (R_m -MPa) Mukavemetinin Ölçülmesi

Soğuk basınçlı kaynak bölgesinin mukavemet ve uzama davranışlarını incelemek için çekme testleri yapılması düşünülmüştür. İlk olarak standart çekme testleri yapılmıştır. 254 mm boyunda kaynaklı numune Şekil 4.6.6’ daki çekme test cihazı kullanılarak 20 mm/dakika hızda yapılmıştır. Ancak yapılan çekme testlerinde kopmalar, 167 mm’ den oluşan soğuk basınçlı kaynağın herhangi bir yerinden kopmamaktadır. Bu sebeple çekme testinin numune boyu 100 mm olarak belirlenmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Yapılan bu denemelerde çenelerin numuneyi kaçırdığı tespit edilmiştir. Bu sebeple Şekil 4.6.1’ de gösterilen çekme test çenesinin imalatı Ç1040 malzemeden yapılmıştır.

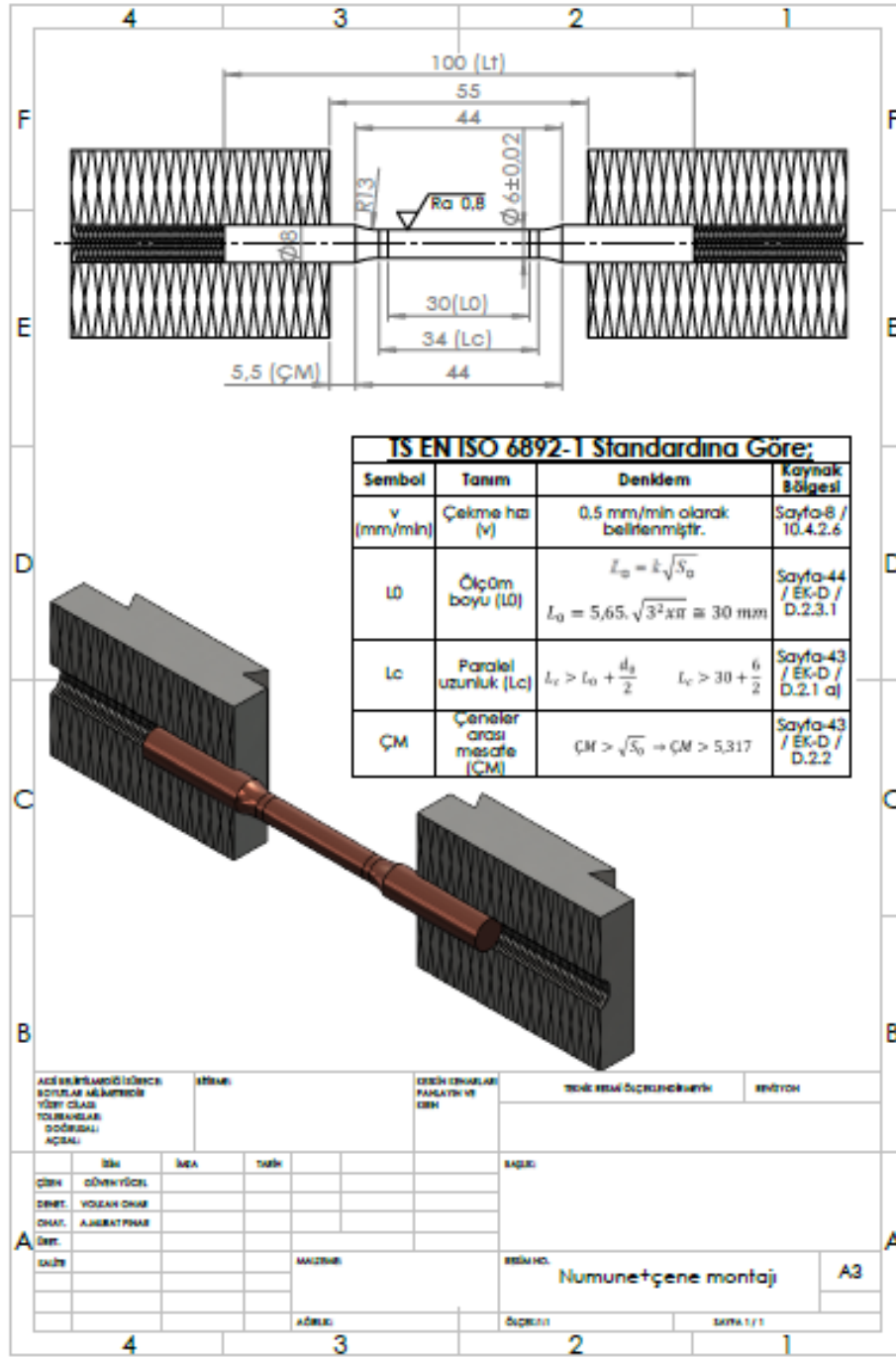


Şekil 4.6.1: Solidworks Programı Kullanılarak Tasarımı Yapılan Çekme Test Çenesi

İmalatı tamamlanan Şekil 4.6.1' deki çeneler ile 5 mm/dakika hızda denemeler yapılmış ancak kopmanın çenelerin hemen bitişinde olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple deneyler geçersiz sayılarak TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme numunesinin hesapları yapılmıştır. Tasarlanan çekme numunesi Şekil 4.6.2' de gösterilmektedir.

Tablo 4.6.1: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Numune Ölçülerinin Belirlenmesi

TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre			
Sembol	Tanım	Denklem	Kaynak Bölgesi
v (mm/dak)	Çekme hızı (v)	0,5 mm/dakika olarak belirlenmiştir.	Sayfa-8/10.4.2.6
L_0	Ölçüm Boyu	$L_0 = k \times \sqrt{S_0}$ $L_0 = 5,65 \times \sqrt{3x\pi}$ $L_0 \cong 30 \text{ mm}$	Sayfa-44/EK-D/D.2.3.1
L_c	Paralel uzunluk	$L_c > L_c + \frac{d_0}{2}$ $L_c > 30 + 3$	Sayfa-43/EK-D/D.2.1/a)
ÇM	Çeneler arası mesafe (ÇM)	$\text{ÇM} > \sqrt{s_0} - \text{ÇM} > 5,317$	Sayfa-43/EK-D/D.2.2



Şekil 4.6.2: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Solidworks Programı Kullanılarak Tasarımı Yapılan Çekme Test Çenesi ve Çekme Numunesi

Şekil 4.6.2’ deki tasarımı yapılan çekme numuneleri kaynatıldıktan sonra kaynak bölgesi tam ortada kalacak şekilde 100 mm boyunda kesilerek Şekil 4.6.3’ de gösterilen ve Tablo 4.6.2’deki teknik özelliklere sahip Mazak Quick Turn Smart 200 tezgâhında istenilen ölçülerde işlenmiştir.



Şekil 4.6.3: Mazak Quick Turn Smart 200 Tezgâhı (Mazak 2022)

Tablo 4.6.2: Mazak Quick Turn Smart 200 Tezgâh Özellikleri (Mazak 2022)

Özellikler		Yatak Uzunluğu- 500U mm
Kapasite	Maksimum Salınım	660 mm / 26.00 in
	Maksimum İşleme Çapı	350 mm / 14.000 in
	Maksimum Mil Çalışma Kapasitesi	65 mm / 2.6 in
	Maksimum İşleme Uzunluğu	541 mm / 21.035 in
Ana Mil	Ayna Boyutu	8 in
	Maksimum Devir	5000 rpm
	Motor Gücü (30 dakika değerlemesi)	15 kw / 20.0 hp
Taret (Üst)	Takım Sayısı	12
Besleme Eksenleri	Hareket Mesafesi (X Ekseni)	195 mm / 7.75 in
	Hareket Mesafesi (Z Ekseni)	560 mm / 22.00 in

Kaynak numuneleri Akan Kardeşler Ltd. Şti.'nin makine parkurundaki Şekil 4.6.3'te gösterilen ve Tablo 4.6.2'de teknik özellikleri verilen tezgaha firma yetkilileri tarafından işlenmiştir. Talaşlı imalat işleminde finiş takımı kullanılmıştır. Kullanılan finiş takımının malzemesi pcd ve uç geometrisi olarak düşük radius (0,1), düşük uç açısı olan kesici kullanılmıştır. Seçilen takım, işlem sırasında yüzey kalitesini arttırmak ve titreşim eğilimini en aza indirecek şekilde seçilmiştir.

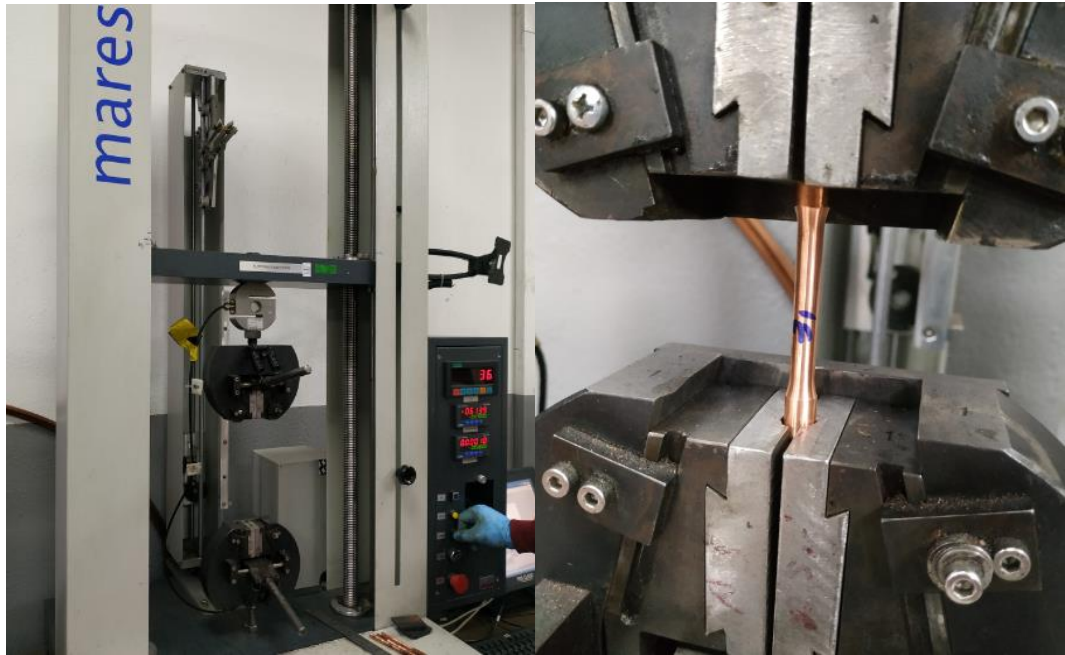


Şekil 4.6.4: Çekme Testi Deney Numuneleri

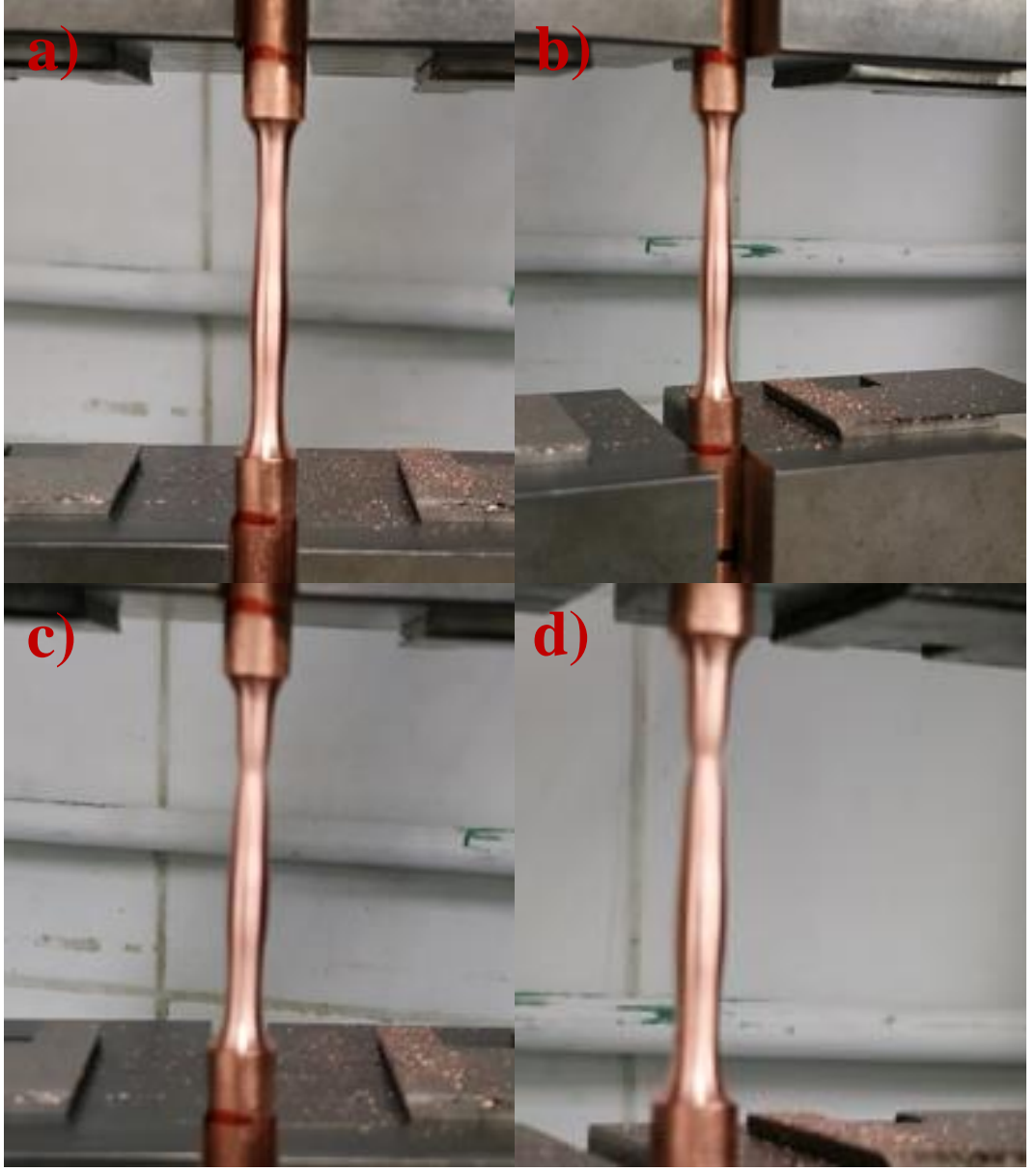


Şekil 4.6.5: Çekme Testi Deney Numunesi ve Test Çenesi

Şekil 4.6.4' de gösterilen işlenmiş numuneler çekme deneyi için Erbakır A.Ş. sürekli döküm tesisi içinde Contirod Laboratuvarında bulunan Şekil 4.6.6'da görseli verilen Marestek' in 30 kN' luk çekme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.6.6: Marestek 30kN çekme cihazı



Şekil 4.6.7: Çekme numunesinin a) kopma bölgesinin değişimi-1, b) kopma bölgesinin değişimi-2, c) kopma bölgesinin değişimi-3, d) kopma bölgesinin değişimi-4

4.7 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin Ölçülmesi (Optik mikroskop ve FESEM analizlerinin yapılması)

Numunelerin bakalite alınabilmesi için öncelikle istenilen boyutlarda kesilmesi gerekmektedir. Bunun için Erbakır A.Ş. firmasını Ar-Ge Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.7.1’ de tesiste kurulu görseli verilen kaba kesme cihazı kullanılmaktadır. Döner disk ve su soğutma sayesinde incelenmek istenilen bölge kesilerek bakalite almaya uygun boyutlara getirilmiştir.



Şekil 4.7.1: Struers CitoPress-1 Kaba Kesme Makinesi

Kaynak bölgesi uçta kalacak şekilde 30 mm uzunluğunda kesilerek sıcak kalıplamaya uygun hale getirilen numuneler cihaza yerleştirilmiştir. Üzerine Şekil 4.7.2’ de gösterilen termoplastik akrilik reçine tozu konularak Şekil 4.7.3’ deki cihaza uygun parametrelerde çalıştırılarak sıcak kalıplama işlemi yapılmıştır.

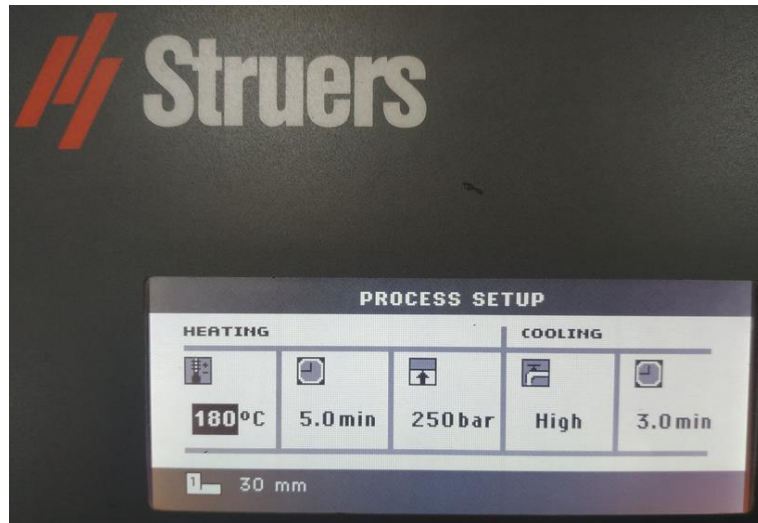
Sıcak kalıplama işlemi Şekil 4.7.4’ de gösterildiği gibi 180°C’ de 250 bar basınç uygulanarak 5 dakika boyunca ısıtılmakta daha sonra 3 dakika soğutulmaktadır. Her bir numunenin sıcak kalıplama işlemi 8 dakika sürmektedir.



Şekil 4.7.2: Termoplastik Akrilik Reçine

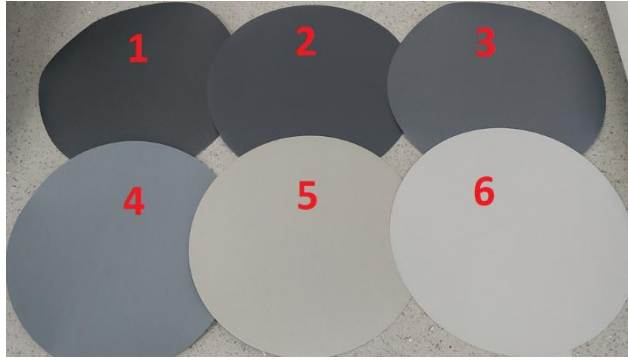


Şekil 4.7.3: Struers Labapol-5 Sıcak Kalıplama Cihazı



Şekil 4.7.4: Struers Labapol-5 Sıcak Kalıplama Cihaz Parametreleri

Sıcak kalıptan çıkan numuneler Şekil 4.7.6'daki cihaz ile numunenin tam ortasını inceleyebilecek şekilde 15 dakika 320 kum ile zımpara yapılarak 3,5-4 mm arasında alından zımpara yapılmıştır. Daha sonra diğer zımparalama ve parlatma işlemine alınmıştır. Zımpara işleminde farklı kum seviyesine sahip zımparalar Şekil 4.7.5' de gösterildiği şekilde sırasıyla 320, 500, 800, 1200, 2000, 4000 SiC kum zımparalar kullanılmıştır. Zımpara işlemi 3 dakika boyunca tekrarlanmıştır. Mikro sertlik ölçümü için 4000 kum yeterli görüntü kalitesini oluşturmuştur. Sertlik ölçümü için yapılan toplam zımpara işlem süresi numune başına 30 dakikadır. Bu zımpara ve parlatma işlemleri Erbakır A.Ş. firmasında Ar-Ge Laboratuvarında bulunan, Şekil 4.7.6' da gösterilen cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 4.7.5: Farklı Kum Seviyesine Sahip Zımparalar



Şekil 4.7.6: Struers Labapol-5 Zımpara ve Parlatma Makinesi

Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin iç yapıdan görüntülerini alabilmek için dağlama işlemi yapılması gerekmektedir. Dağlama işlemi için HCL: %37 ve FeCl₃: %40,9 karışım oranı olan asit numune yüzeyinde 100 saniye bekletildikten sonra saf su ile yüzey temizlenmiş sonrasında alkol kullanılmış ve

kurutulmuştur. Dağlama işlemi Er-Bakır'da Şekil 4.7.7'de verilen çeker ocakta yapılmış ve bütün isg kurallarına uyulmuştur.



Şekil 4.7.7: Dağlamanın Yapıldığı Çeker Ocak (Er-Bakır)

4.7.1 Optik Mikroskop ile İç Yapı Görüntüsü Alma



Şekil 4.7.1.1: Nikon Eclipse LV150 Mikroskop

Numuneden Tablo 4.5.3'te teknik özellikleri verilen Şekil 4.7.1.1'deki mikroskoplar kullanılarak 328,44µm aralıklarla ölçümler alınmış ve kaynak bölgesinden dik olarak tek yöne uzaklaşarak iç yapı görüntülerinin fotoğrafları çekilmiştir.

4.7.2 FESEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile İç Yapı Görüntüsü Alma

İç yapı görüntüleri almadan önce numuneler Şekil 4.7.3'teki cihaz ile iletken bakalite alınmıştır. İstatistiki sonuç olarak en iyi ve en kötü sonuçlara sahip bölgeler için SEM görüntülerinin alınmasına karar verilmiştir. Bakalite alınan numunelerin istatistiki olarak karar verilen bölgelerinin kaynak bölgesinden uzaklıkları kumpas ile ölçülerek markalama kalem ile işaretlenmiştir. Daha sonra ölçümler Şekil 4.7.9'daki Üniversitemiz bünyesindeki İLTAM'da gerçekleştirilmiştir. FESEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı ile 1500X ve 5000X büyütmelerinde iç yapı görüntüleri alınmıştır. Ayrıca EDS analizi ile 5000X'de alan taraması yapılmış ve atom konsantrasyonlarının ölçümleri de alınmıştır. Ölçümü alınan bölgeler ve deney numaraları Tablo 4.7.2.2' de verilmiştir.



Şekil 4.7.2.1: FESEM (İltam-Paü) (FESEM 2022)

Tablo 4.7.2.1: FESEM Teknik Özellikleri (FESEM 2022)

FESEM Teknik Özellikleri	
Elektron Tabancası:	Schottky Field-Emission
Büyütme Oranı:	12 – 1000000 x
Hızlandırma Gerilimi:	0,02 – 30 kV
Vakum Sistemi:	Yüksek Vakum Modu (HV) ($\leq 10^{-6}$ mbar)
Değişken Basınç Modu (VP):	0,01 – 1,33 mbar

Tablo 4.7.2.2: FESEM ile Görüntü Alınan Bölgeler

Deney Nu.	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	KB6	KB5	KB4	KB3	KB2	KB1
				12mm	8mm	5mm	2,5mm	0,5mm	0mm (Kaynak Bölgesi)
1	4	0	4					X	X
2	4	0	6						
3	4	5	4					X	X
4	4	5	6	X	X	X	X		X
5	12	0	4						X
6	12	0	6					X	X
7	12	5	4	X	X		X		
8	12	5	6						X

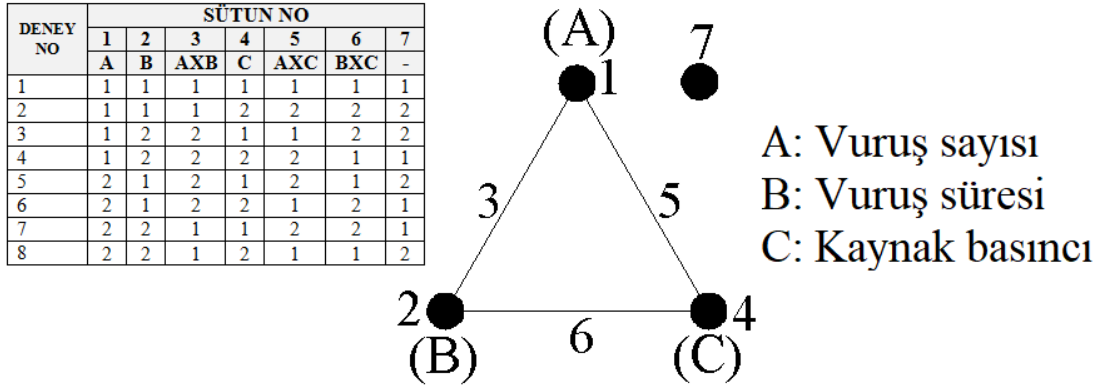
5. DENEYSEL BULGULAR VE İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Çalışmada, soğuk basınç kaynağı ile birleştirilmiş bakır tellerdeki işlem parametrelerinin ve bunlara ait etkileşimlerin mikro sertlik, çekme dayanımı ve elektriksel direnç üzerindeki etkileri Taguchi metodu ve regresyon analizi ile araştırılmıştır. Tablo 5.1’de işlem parametrelerine ait detaylar verilmiştir.

Tablo 5.1: İşlem parametreleri ve bunlara ait seviyeler

Faktörler	Seviyeler	
	1	2
Vuruş sayısı (A)	4	12
Vuruş süresi (B), sn	0	5
Kaynak basıncı (C), bar	4	6

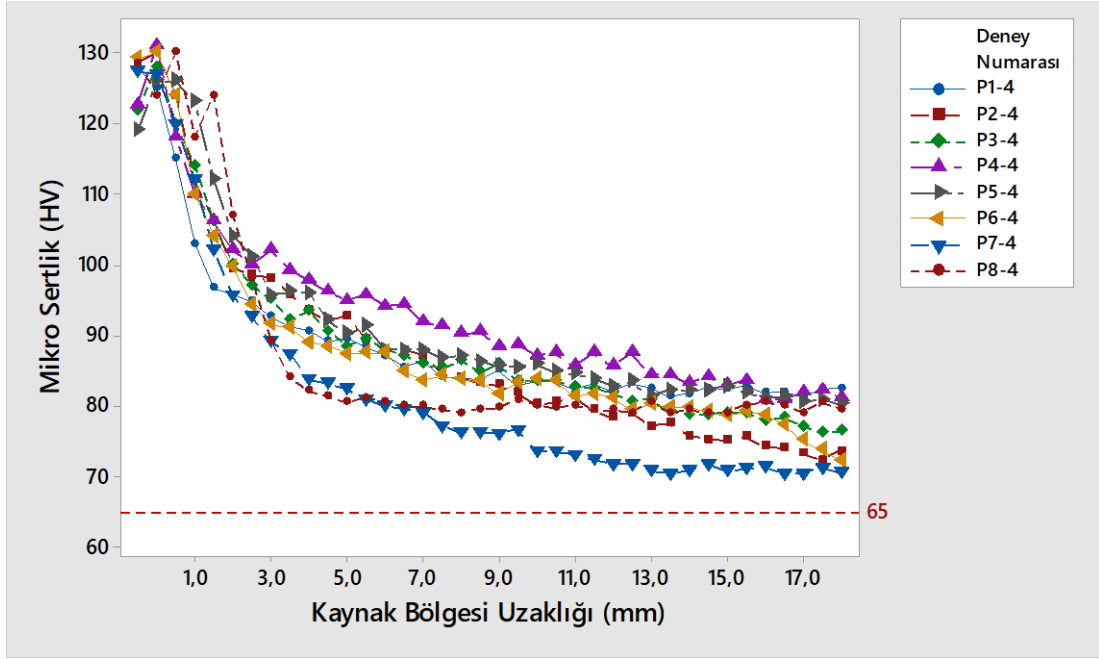
Deneylerde 7 sütun ve 8 satırdan oluşan 7 serbestlik dereceli L8’lik OD seçilmiştir (bkz. Şekil 5.1) Bu dizi aynı zamanda deney planını oluşturmakta ve dizideki 8 satır, parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri ifade etmektedir. Dizinin sütunlarına da faktör ve etkileşimler atanmaktadır. Şekil 5.1’de lineer grafik yöntemi kullanılarak elde edilen atanma işlemi görülmektedir. Burada üçgenin köşelerindeki noktalar faktörleri ve bunları birleştiren çizgilerde etkileşimleri ifade etmektedir. Buna göre, dizideki birinci sütun vuruş sayısına, ikinci sütun vuruş süresine, dördüncü sütun kaynak basıncına ve geri kalanlar da ikili etkileşimlere atanmıştır.



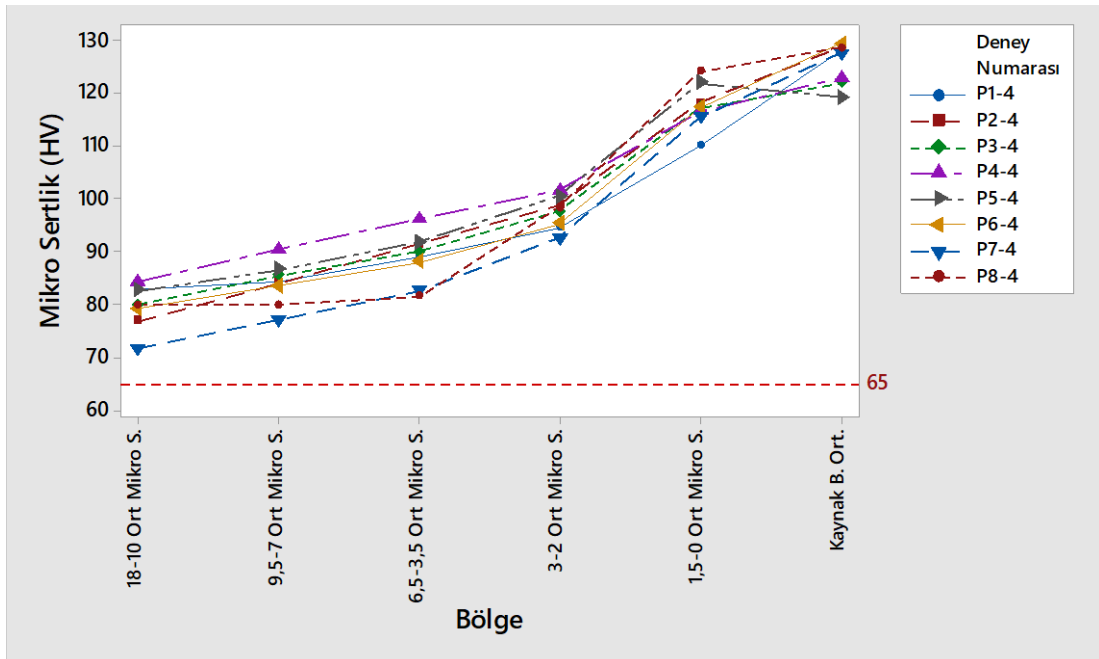
Şekil 5.1: Faktör ve etkileşimlerin lineer grafik yöntemiyle ortogonal dizinin sütunlarına aktarılması

5.1 Mikro Sertlik Analizleri

Kaynak bölgesi 6 farklı bölgeye ayrılmış ve her bir bölge için L8 ortogonal dizi esas alınarak gerçekleştirilen ölçümler varyans ve regresyon analizi ile değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1.1: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi



Şekil 5.1.2: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi

Şekil 5.1.1’ de gösterilen grafikte sertlik ölçümleri bölgesel olarak belirlenmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınarak Şekil 5.1.2’deki grafik çizilmiştir. Kaynak bölgesi ve bu bölgeden 18 mm uzaklıktaki değerler 6 parçaya ayrılarak incelemesi yapılmıştır.

Tablo 5.1.1: Mikro sertlik değişimlerinin 6 bölgeye ayrılarak oluşturulan değer dağılımı

Kaynak Nu.	KB6	KB5	KB4	KB3	KB2	KB1
	18-10 Ort Mikro S.	9,5-7 Ort Mikro S.	6,5-3,5 Ort Mikro S.	3-2 Ort Mikro S.	1,5-0 Ort Mikro S.	Kaynak B. Ort.
Cu-ETP	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
1	82,4	84,3	88,7	94,3	109,9	127,8
2	76,6	83,9	91,3	98,7	118,0	128,7
3	79,7	85,3	89,8	97,3	117,0	121,8
4	84,1	90,1	96,0	101,3	116,3	122,7
5	81,8	86,5	91,6	100,2	121,8	119,0
6	79,1	83,3	87,9	95,1	117,0	129,2
7	71,5	76,9	82,4	92,4	115,3	127,3
8	79,6	79,7	81,3	98,0	124,0	128,5

5.1.1 İlk Üç Bölgeye Ait Deneysel Sonuçlar

KB1, *KB2* ve *KB3*’e ait sertlik sonuçları Tablo 5.3’ün 5, 6 ve 7. sütunlarında sırasıyla verilmektedir.

Tablo 5.1.1.1: İlk üç bölgeye (*KB1*, *KB2* ve *KB3*) ait sertlik sonuçları

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	H_{KB1}	H_{KB2}	H_{KB3}
1	4	0	4	127,8	109,9	94,3
2	4	0	6	128,7	118	98,7
3	4	5	4	121,8	117	97,3
4	4	5	6	122,7	116,3	101,3
5	12	0	4	119	121,8	100,2
6	12	0	6	129,2	117	95,1
7	12	5	4	127,3	115,3	92,4
8	12	5	6	128,5	124	98

Buna göre *KB1*’de maksimum sertlik vuruş sayısının ikinci ($A=12$), vuruş süresinin birinci ($B=0$ sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde ($C=6$ bar) 129,2 HV olarak elde edilmiştir. Ayrıca ortalama 125,6 HV’lik ortalama sertlik değeri gözlemlenmiştir. *KB2*’de maksimum sertlik $A=12$, $B=5$ ve $C=6$ seviyelerinde 124 HV

olarak elde edilmiş ve ortalama 117,4 HV'lik sertlik gözlemlenmiştir. Son olarak KB3' de A=4, B=5sn ve C=6 bar seviyelerinde 101,3 HV'lik maksimum sertlik elde edilmiş ve bu bölgede ortalama 97,2 HV'lik sertlik değerine ulaşılmıştır. %95 güven aralığında yapılan istatistiksel değerlendirmelerde hiçbir faktör ve etkileşimin anlamlı olmadığı elde edilmiştir. Buna ek olarak regresyon analizlerinde de çok düşük belirleme katsayıları gözlemlenmiştir.

5.1.2 KB4, KB5 ve KB6'ya ait Deneysel Sonuçlar ve İstatistiksel Analizler

Tablo 5.1.2.1'de 4. kaynak bölgesi (KB4), Tablo 5.1.2.2'de 5. kaynak Bölgesi (KB5) ve Tablo 5.1.2.3'te 6. kaynak bölgesine (KB6) ait deney sonuçları, tahminler, tahminlere ait standart hata ve güven aralığı değerleri sırasıyla verilmiştir.

Tablo 5.1.2.1: KB4'e ait deney sonuçları (H_{KB4}), tahminler (P_{KB4}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB4})$) ve güven aralığı (CI_{KB4}) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	H_{KB4}	P_{KB4}	$Se(P_{KB4})$	CI_{KB4}
1	4	0	4	88,7	88,575	0,330719	84,37282 - 92,77718
2	4	0	6	91,3	91,425	0,330719	87,22282 - 95,62718
3	4	5	4	89,8	89,925	0,330719	85,72282 - 94,12718
4	4	5	6	96,0	95,875	0,330719	91,67282 - 100,0772
5	12	0	4	91,6	91,725	0,330719	87,52282 - 95,92718
6	12	0	6	87,9	87,775	0,330719	83,57282 - 91,97718
7	12	5	4	82,4	82,275	0,330719	78,07282 - 86,47718
8	12	5	6	81,3	81,425	0,330719	77,22282 - 85,62718

Tablo 5.1.2.2: KB5'e ait deney sonuçları, (H_{KB5}), tahminler (P_{KB5}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB5})$) ve güven aralığı (CI_{KB5}) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	H_{KB5}	P_{KB5}	$Se(P_{KB5})$	CI_{KB5}
1	4	0	4	84,3	84,4	0,264575	81,0383 - 87,7617
2	4	0	6	83,9	83,8	0,264575	80,4383 - 87,1617
3	4	5	4	85,3	85,2	0,264575	81,8383 - 88,5617
4	4	5	6	90,1	90,2	0,264575	86,8383 - 93,5617
5	12	0	4	86,5	86,4	0,264575	83,0383 - 89,7617
6	12	0	6	83,3	83,4	0,264575	80,0383 - 86,7617
7	12	5	4	76,9	77,0	0,264575	73,6383 - 80,3617
8	12	5	6	79,7	79,6	0,264575	76,2383 - 82,9617

Tablo 5.1.2.3: *KB6*'ya ait deney sonuçları (H_{KB6}), tahminler (P_{KB6}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{KB6})$) ve güven aralığı (CI_{KB6}) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	H_{KB6}	P_{KB6}	$Se(P_{KB6})$	CI_{KB6}
1	4	0	4	82,4	82,475	0,198431	79,95369-84,99631
2	4	0	6	76,6	76,525	0,198431	74,00369-79,04631
3	4	5	4	79,7	79,625	0,198431	77,10369-82,14631
4	4	5	6	84,1	84,175	0,198431	81,65369-86,69631
5	12	0	4	81,8	81,725	0,198431	79,20369-84,24631
6	12	0	6	79,1	79,175	0,198431	76,65369-81,69631
7	12	5	4	71,5	71,575	0,198431	69,05369-74,09631
8	12	5	6	79,6	79,525	0,198431	77,00369-82,04631

5.1.3 KB4, KB5 ve KB6 için varyans analizi (ANOVA)

ANOVA işlem parametrelerinin ve bunlara ait etkileşimlerin kalite karakteristiği üzerinde etkili olup olmadıklarını ve anlamlılık seviyelerini belirlemektedir. Buna göre tablonun üçüncü sütununda her bir işlem parametresi için F değerleri (varyansın/hatanın varyansına oranı) verilmiştir. İlgili işlem parametresine ait F değeri F -tablo değeri ile karşılaştırılır. Şayet bu değer tablo değerinden büyük ise anlamlı kabul edilmektedir. F -tablo değeri belli bir güven seviyesinde ilgili faktör veya etkileşimin serbestlik derecesi ve hatanın serbestlik derecesi dikkate alınarak ilgili tablolardan belirlenmektedir. Buna göre, bizim sistemimizde tüm faktör ve etkileşimler için F -tablo değeri 161 olarak belirlenmiştir. Ayrıca tablonun son sütununda her bir işlem parametresinin sertlik üzerindeki etki oranı verilmiştir. *KB4*, *KB5* ve *KB6*'ya ait ANOVA sonuçları Tablo 5.1.3.1, 5.1.3.2 ve 5.1.3.3'te sırasıyla verilmiştir.

Buna göre *KB4* için vuruş sayısı, vuruş sayısı-vuruş süresi, vuruş süresi-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin sertlik üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %38,76'lık oranla vuruş sayısının sertlik üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla vuruş sayısı-vuruş süresi (%35,41) ve vuruş sayısı-kaynak basıncı (%14,04) etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir. *KB5* ve *KB6*'da benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. İki bölgede de vuruş sayısı, vuruş sayısı-vuruş süresi, ve vuruş süresi-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin anlamlı olduğu elde edilmiştir. *KB5*'te en anlamlı işlem parametresi vuruş sayısı-vuruş süresi etkileşimi (%45,58) olup bu parametreyi vuruş sayısı (%32,40) ve vuruş süresi-kaynak basıncı (%13,74) faktör ve etkileşimleri

izlemektedir. Buna karşın, KB6’da vuruş süresi-kaynak basıncının %51,37’lik oranla sertliği domine ettiği bu parametreyi vuruş sayısı-vuruş süresi (%24,83) ve vuruş sayısı (%13,59) işlem parametreleri izlemektedir.

Tablo 5.1.3.1: KB4 için ANOVA

Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	63,845	63,845	510,76	38,76
Vuruş süresi (B)	1	12,500	12,5	100	7,59
Kaynak basıncı (C)	1	2	2	16	1,21
AxB	1	58,32	58,32	466,56	35,41
AxC	1	23,12	23,12	184,96	14,04
BxC	1	4,805	4,805	38,44	2,92
Hata	1	0,125	0,125		0,08
Toplam	7	164,715			100

DF: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, V: Varyans, P: Yüzdellik dağılım

Tablo 5.1.3.2: KB5 için ANOVA

Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	36,98	36,98	462,25	32,40
Vuruş süresi (B)	1	4,5	4,5	56,25	3,94
Kaynak basıncı (C)	1	2	2	25	1,75
AxB	1	52,02	52,02	650,25	45,58
AxC	1	2,88	2,88	36	2,52
BxC	1	15,68	15,68	196	13,74
Hata	1	0,08	0,08		0,07
Toplam	7	114,14			100

DF: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, V: Varyans, P: Yüzdellik dağılım

Tablo 5.1.3.3: KB6 için ANOVA

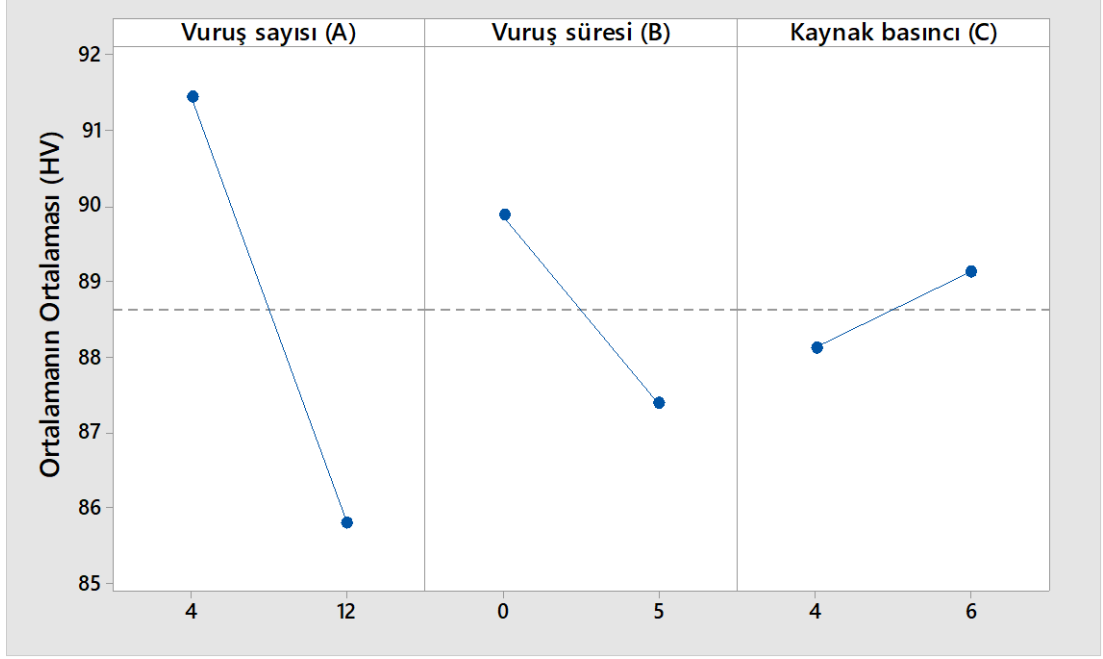
Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	14,58	14,58	324	13,59
Vuruş süresi (B)	1	3,125	3,125	69,44	2,91
Kaynak basıncı (C)	1	2	2	44,44	1,86
AxB	1	26,645	26,645	592,11	24,83
AxC	1	5,78	5,78	128,44	5,39
BxC	1	55,125	55,125	1225	51,37
Hata	1	0,045	0,045		0,04
Toplam	7	107,3			100

DF: Serbestlik derecesi, *SS*: Kareler toplamı, *V*: Varyans, *P*: Yüzdellik dağılım

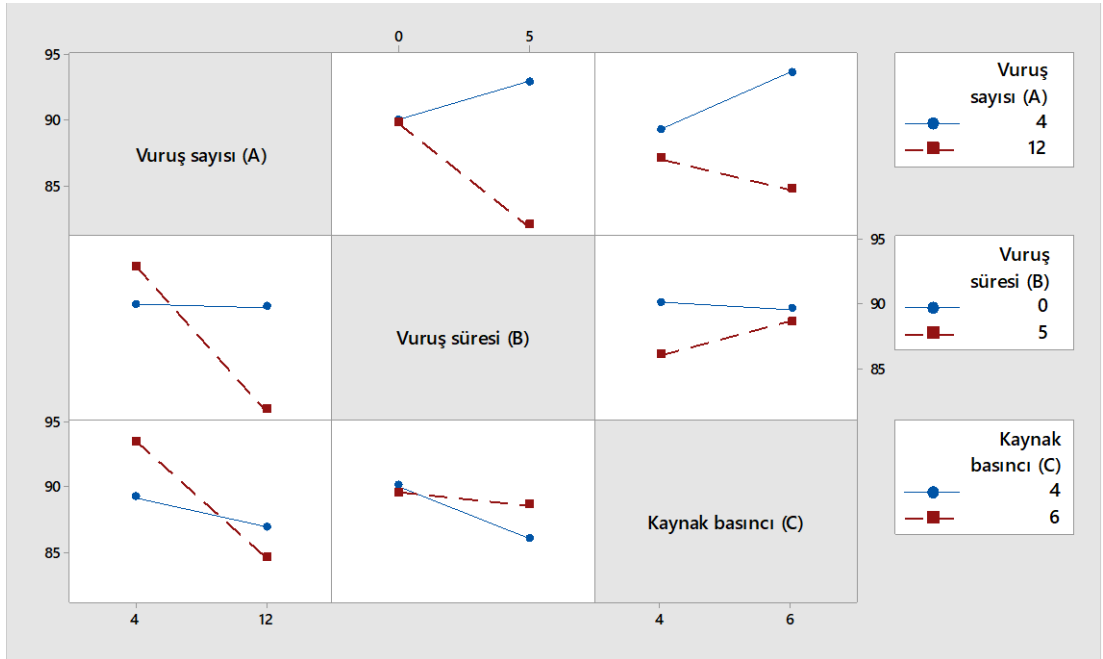
5.1.4 KB4, KB5 ve KB6 için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi

Faktörlere ait optimum seviyeler Varyans analizi, ana etkiler ve etkileşim grafikleri kullanılarak elde edilmektedir.

Şekil 5.1.4.1 ve 5.1.4.1’de *KB4*’e ait ana etkiler ve etkileşim grafikleri sırasıyla verilmiştir. Buna göre sertliğin vuruş sayısı ile ters orantılı olarak değiştiği ve 4’lük vuruş sayısında daha yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı açıktır. Şekil 5.1.4.1’de vuruş sayısı-vuruş süresi grafiğini incelersek, 4’lük vuruş sayısı için 5 saniyelik vuruş süresinde daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Son olarak, vuruş-sayısı-kaynak basıncı etkileşiminde 4’lük vuruş süresi için 6 barlık kaynak basıncında sertliğin dramatik olarak arttığı görülmektedir. Bu durum ana etkiler grafiğinde vuruş süresi için tezat bir durum oluşturmakla birlikte vuruş süresinin ANOVA’ (Tablo 5.1.3.1) göre anlamlı olmamasından dolayı dikkate alınmamıştır. Böylelikle *KB4* için optimum seviyeler vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin ikinci ($B=5sn$) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde ($C=6$ bar) 96 HV olarak elde edilmiştir (Tablo 5.1.2.1).



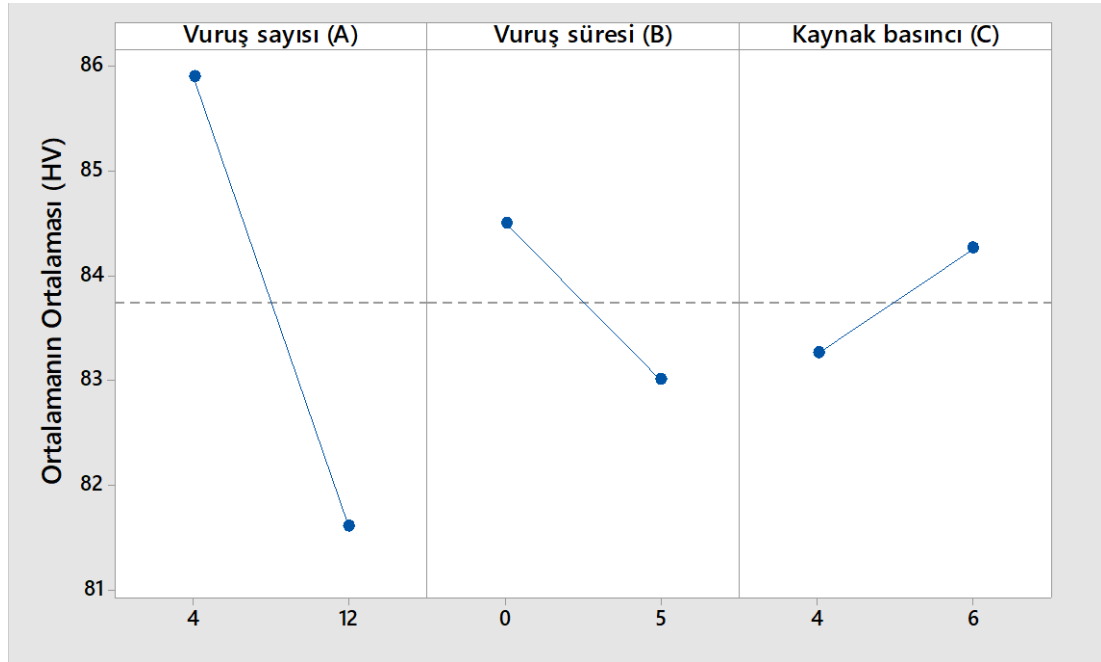
Şekil 5.1.4.1: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB4)



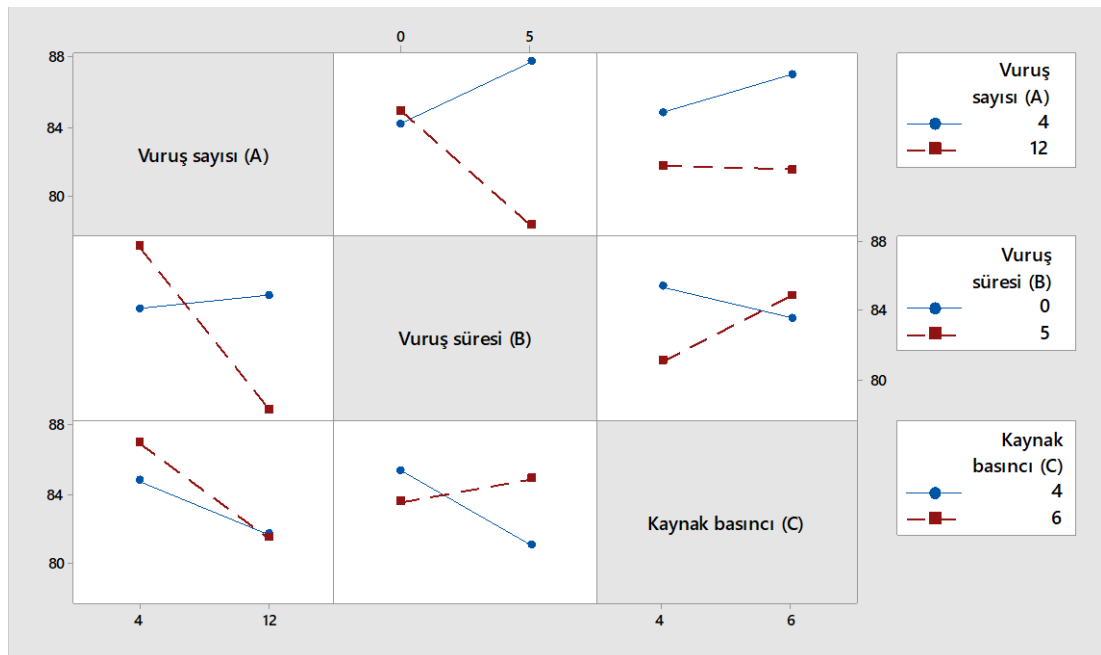
Şekil 5.1.4.2: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB4)

Şekil 5.1.4.1 ve 5.1.4.1'de KB5'e ait ana etkiler ve etkileşim grafikleri sırasıyla verilmiştir. Ana etkiler grafiğinde 4'lük vuruş sayısında sertlikte anlamlı bir artış gözlemlenmektedir. Vuruş süresi ve kaynak basıncı faktörleri anlamlı olmadığı için bunlara ait seviyeler etkileşim grafikleri ile belirlenmiştir. Vuruş sayısı-vuruş süresi etkileşiminde 4'lük vuruş sayısı ve 5sn'lik vuruş süresinde en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği açıktır. Vuruş süresi-kaynak basıncı etkileşimini incelediğimizde 5'lik vuruş süresi için 6 barlık kaynak basıncında daha yüksek sertlik

değerleri elde edilmiştir. Buna göre, *KB5* için optimum sertlik değeri vuruş sayısının birinci ($A=4$) vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde ($C=6$ bar) 90,1 HV olarak elde edilmiştir (bkz. Tablo 5.1.2.2).



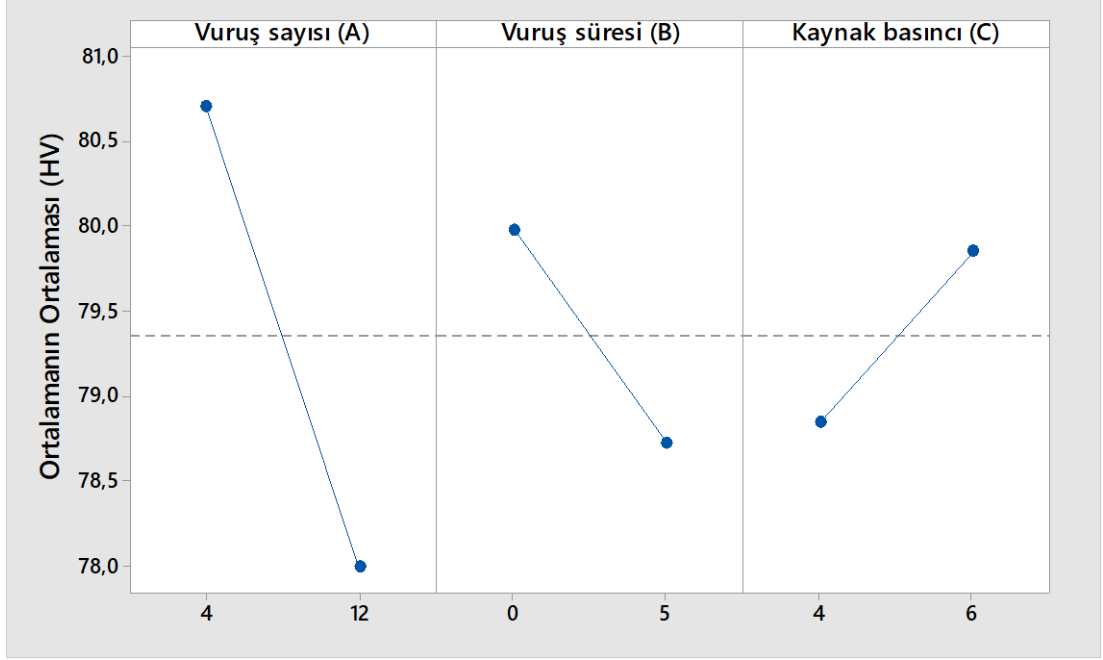
Şekil 5.1.4.3: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB5)



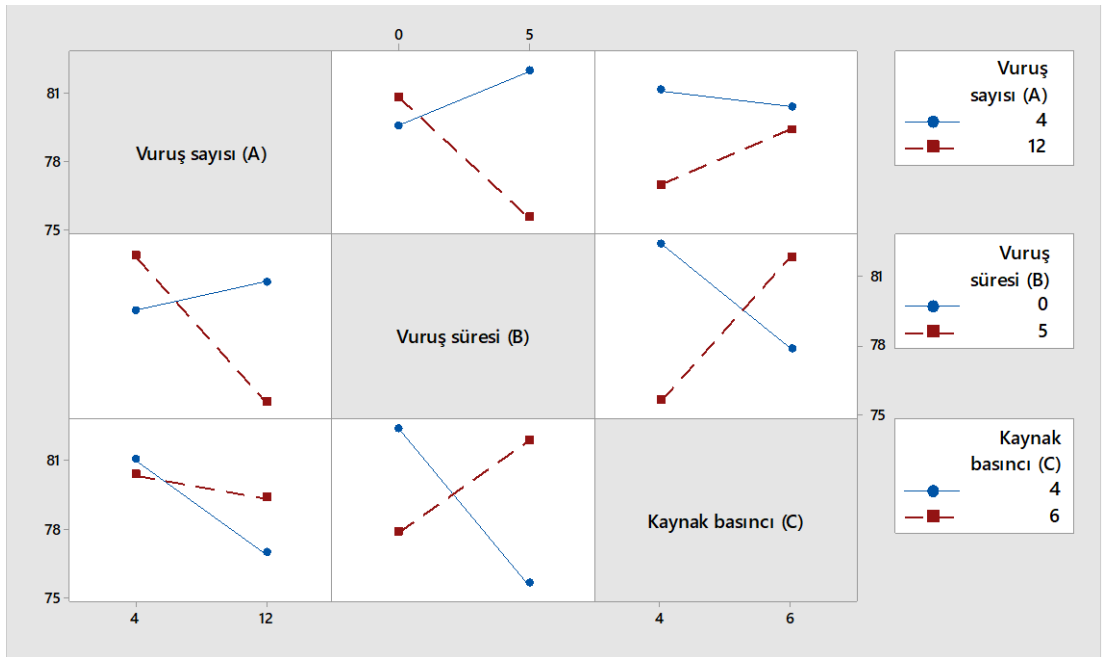
Şekil 5.1.4.4: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB5)

Şekil 5.1.4.1 ve 5.1.4.2'de *KB6*'ye ait ana etkiler ve etkileşim grafikleri sırasıyla verilmiştir. Buna göre, ana etkiler grafiğine göre, sertliğin vuruş sayısı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Bir başka deyişle birinci seviyede ($A=4$) daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.1.4.2'da AxB etkileşimi incelediğinde,

vuruş sayısının birinci seviyesi için vuruş süresinin ikinci seviyesinde ($B=5$ sn) daha yüksek sertliklerin elde edildiği gözlemlenmektedir. Aynı grafiğe göre, vuruş süresinin ikinci seviyesi için kaynak basıncının ikinci seviyesinin ($C=6$ bar) alınması gerektiği görülmektedir. Buna göre optimum sertliğin vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde ($C=6$ bar) 84,1 HV olarak elde edilmiştir (bkz. Tablo 5.1.2.3). Ana etkiler grafiği de bu durumu desteklemektedir.



Şekil 5.1.4.5: Mikro Sertlik Değişimindeki Ana Etki Grafiği (KB6)



Şekil 5.1.4.6: Mikro Sertlik Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği (KB6)

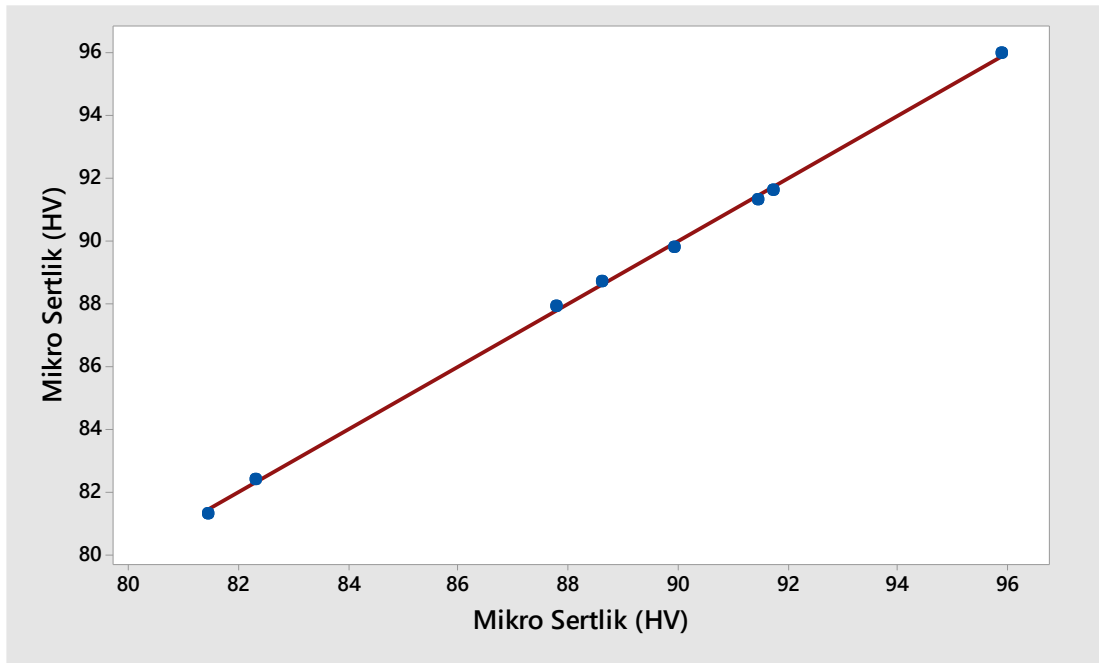
5.1.5 Mikro Sertliğe ait Regresyon Analizi

KB4, *KB5* ve *KB6* için faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin sertlik üzerindeki etkileri sırasıyla %99,92, %99,93 ve %99,71'lik belirleme katsayısında modellenmiştir (Eş 1-3) ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 5.1.5.1-5.1.5.3).

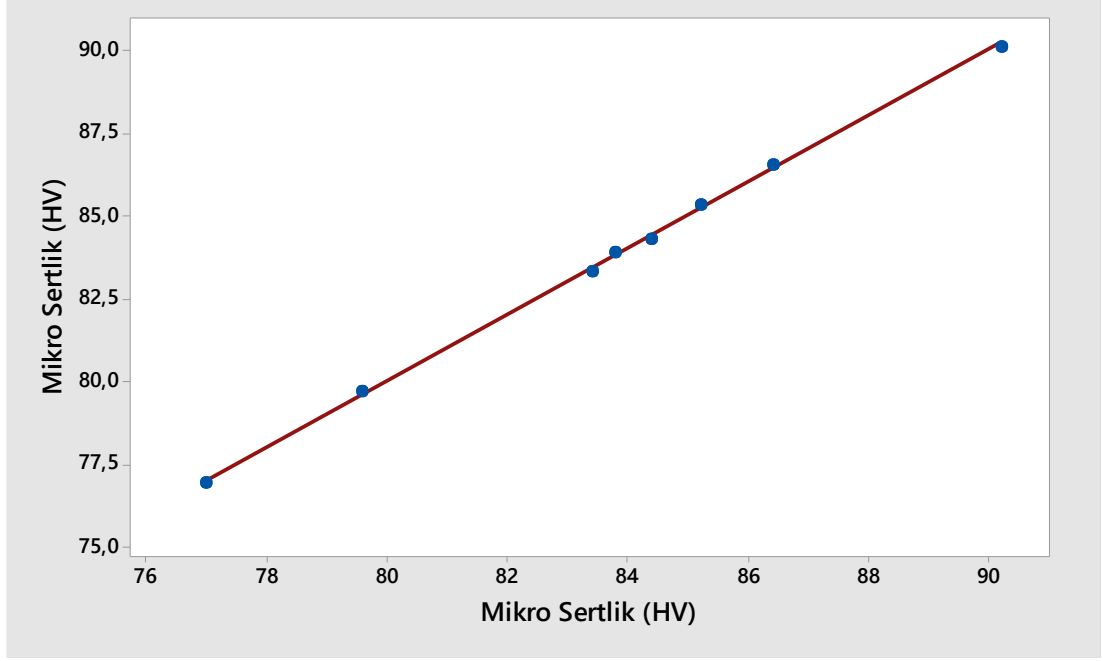
$$H_{KB4} = 74,5 + 2,094 A + 0,1 B + 3,125 C - 0,27 AxB - 0,425 AxC + 0,31 BxC \quad (1)$$

$$H_{KB5} = 82,2 + 0,85 A - 1,06 B + 0,3 C - 0,255 AxB - 0,15 AxC + 0,56 BxC \quad (2)$$

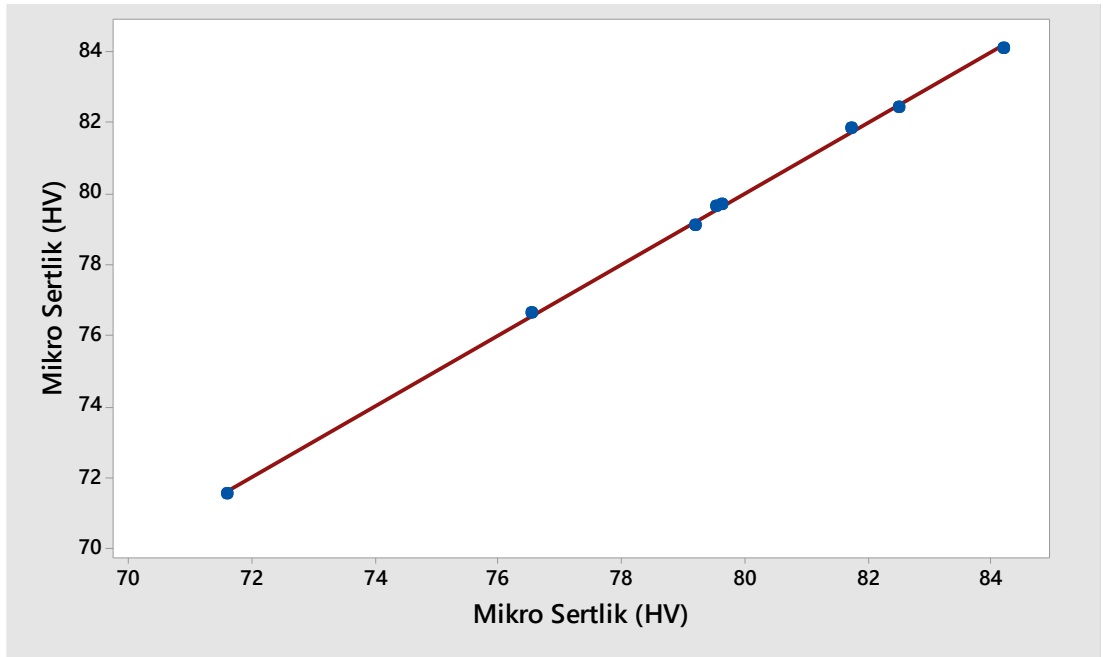
$$H_{KB6} = 98,15 - 0,9438 A - 4,04 B - 3,825 C - 0,1825 AxB + 0,2125 AxC + 1,05 BxC \quad (3)$$



Şekil 5.1.5.1: *KB4* için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 5.1.5.2: KB5 için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 5.1.5.3: KB6 için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

Tablo 5.1.2.1-3'ün 6 ve 7 ve 8. sütunlarında regresyon eşitliği ile elde edilen her bir deney için tahmin edilmiş analiz sonuçları (P_{KB4} , P_{KB5} ve P_{KB6}), standart hata değerleri ($Se(P_{KB4})$, $Se(P_{KB5})$ ve $Se(P_{KB6})$) ve güven aralıkları (CI_{KB4} , CI_{KB5} ve CI_{KB6}) sırasıyla verilmiştir. Belirsizlik analizi, doğrulama testlerine ait ortalama sonucun belirlenen güven aralığında olup olmasını dolayısıyla yapılan istatistiki değerlendirmenin

yeterli doğrulukta olup olmadığını incelemektedir. Aşağıda CI 'nin hesaplanması verilmiştir.

$$CI = P_i \pm t_{\alpha/2, n-(k+1)} \cdot Se(P_i) \quad (4)$$

Burada P_i i. teste ait tahmin edilen analiz sonucu, α anlamlılık seviyesi (0,05), n analiz sayısı (8) k regresyon denklemindeki tahminci sayısı (6), $Se(P_i)$ ith. tahmin edilen analizin standart hatasıdır.

5.1.6 KB4, KB5 ve KB6 için Doğrulama Analizleri

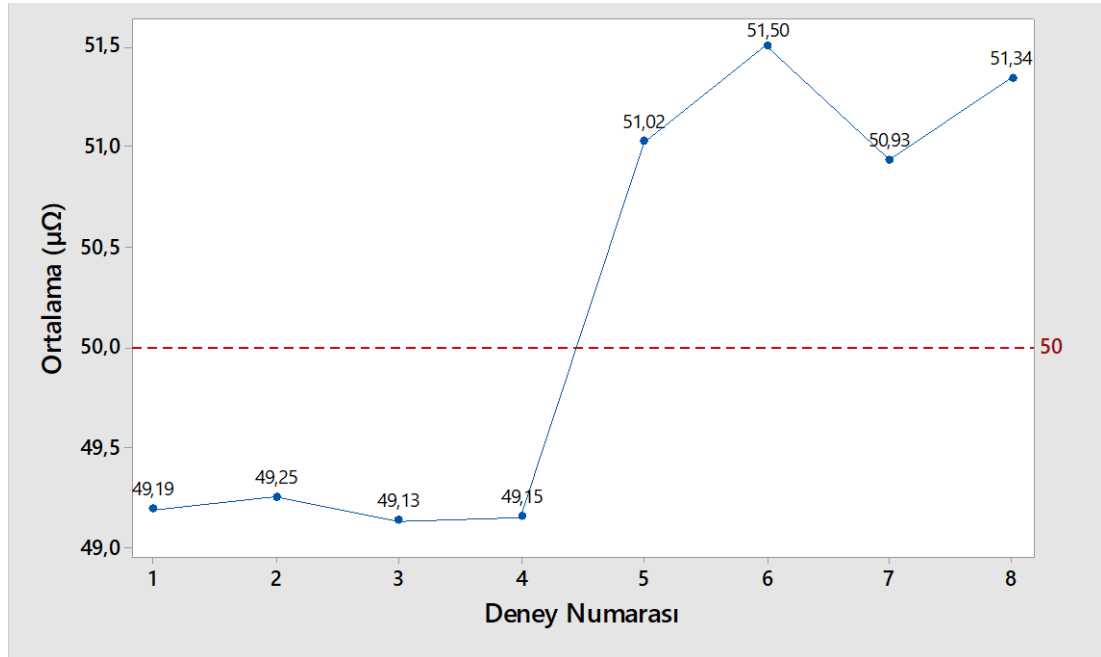
$KB4$, $KB5$ ve $KB6$ için optimum sertliğin elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının ikinci ($C=6$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama analizi (C_{KB4} , C_{KB5} , C_{KB6} ,) gerçekleştirilmiş ve sırasıyla ortalama 96,1, 90,3 ve 84,2 HV'lik sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 5.1.3.1-5.1.3.3: $91,67282 < C_{KB4} = 96,1 < 100,0772$, Tablo 5.1.2.2: $86,8383 < C_{KB5} = 90,3 < 93,561$; Tablo 5.1.2.3: $81,65369 < C_{KB6} = 84,2 < 86,69631$)

5.2 Elektriksel Direnç Analizleri

Direnç ölçümüne ait yapılan ölçümlerden çıkan sonuçlar Tablo 5.2.1'de verilmiştir. Bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve bu ortalamalar ile Şekil 5.2.1'deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 5.2.1: Direnç Ölçümü Yapılan Numunelerin Tablosu ($\mu\Omega$)

Deney Nu.	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	Numune 1 ($\mu\Omega$)	Numune 2 ($\mu\Omega$)	Numune 3 ($\mu\Omega$)	Numune 4 ($\mu\Omega$)	Ortalama ($\mu\Omega$)
1	4	0	4	49,44	49,32	49,13	48,87	49,19
2	4	0	6	49,20	49,26	49,33	49,19	49,25
3	4	5	4	49,25	48,93	48,99	49,34	49,13
4	4	5	6	49,18	49,19	49,10	49,14	49,15
5	12	0	4	50,76	51,44	50,87	50,99	51,02
6	12	0	6	51,53	51,50	51,46	51,49	51,50
7	12	5	4	51,08	51,31	50,66	50,68	50,93
8	12	5	6	51,36	51,10	51,57	51,32	51,34
CU-ETP/Filmaşın				50,05	49,82	50,02	50,05	49,82



Şekil 5.2.1: Deney Numarasına Göre Direnç ($\mu\Omega$) Değişimi

Tablo 5.2.2’de elektriksel dirence ait deney sonuçları, tahminler, tahminlere ait standart hata ve güven aralığı değerleri sırasıyla verilmiştir.

Tablo 5.2.2: Dirence ait deney sonuçları (E_R), tahminler (P_{ER}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{ER})$) ve güven aralığı (CI_{ER}) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	E_R	P_{ER}	$Se(P_{ER})$	CI_{ER}
1	4	0	4	49,19	49,18625	0,009922	49,06018-49,31232
2	4	0	6	49,25	49,25375	0,009922	49,12768-49,37982
3	4	5	4	49,13	49,13375	0,009922	49,00768-49,25982
4	4	5	6	49,15	49,14625	0,009922	49,02018-49,27232
5	12	0	4	51,02	51,02375	0,009922	50,89768-51,14982
6	12	0	6	51,5	51,49625	0,009922	51,37018-51,62232
7	12	5	4	50,93	50,92625	0,009922	50,80018-51,05232
8	12	5	6	51,34	51,34375	0,009922	51,21768-51,46982

5.2.1 Elektriksel Direnç için ANOVA

Tablo 5.2.1.1’de elektriksel direnç için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları verilmiştir. Bu sistem için F_{tablo} değeri 161 olarak belirlenmiştir. Buna göre, vuruş sayısı, vuruş süresi, kaynak basıncı, vuruş sayısı-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin elektriksel direnç üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %97,33’lük oranla vuruş sayısının elektriksel direnci domine ettiği ve bunu sırasıyla kaynak basıncı (%1,41) ve vuruş sayısı-kaynak basıncı (%0,98) ve vuruş süresi (%0,25) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.

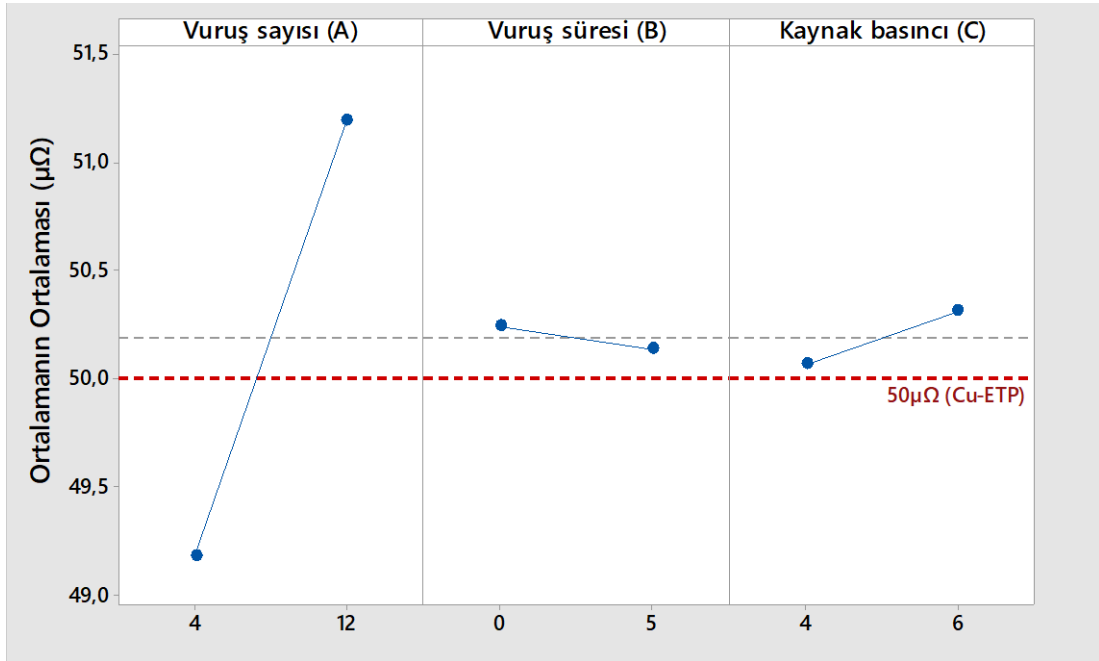
Tablo 5.2.1.1: Elektriksel Direnç için ANOVA

Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	8,14061	8,14061	72361,00	97,33
Vuruş süresi (B)	1	0,02101	0,02101	186,78	0,25
Kaynak basıncı (C)	1	0,11761	0,11761	1045,44	1,41
AxB	1	0,00101	0,00101	9,00	0,01
AxC	1	0,08201	0,08201	729,00	0,98
BxC	1	0,00151	0,00151	13,44	0,02
Hata	1	0,00011	0,00011		0,00
Toplam	7	8,36389			100

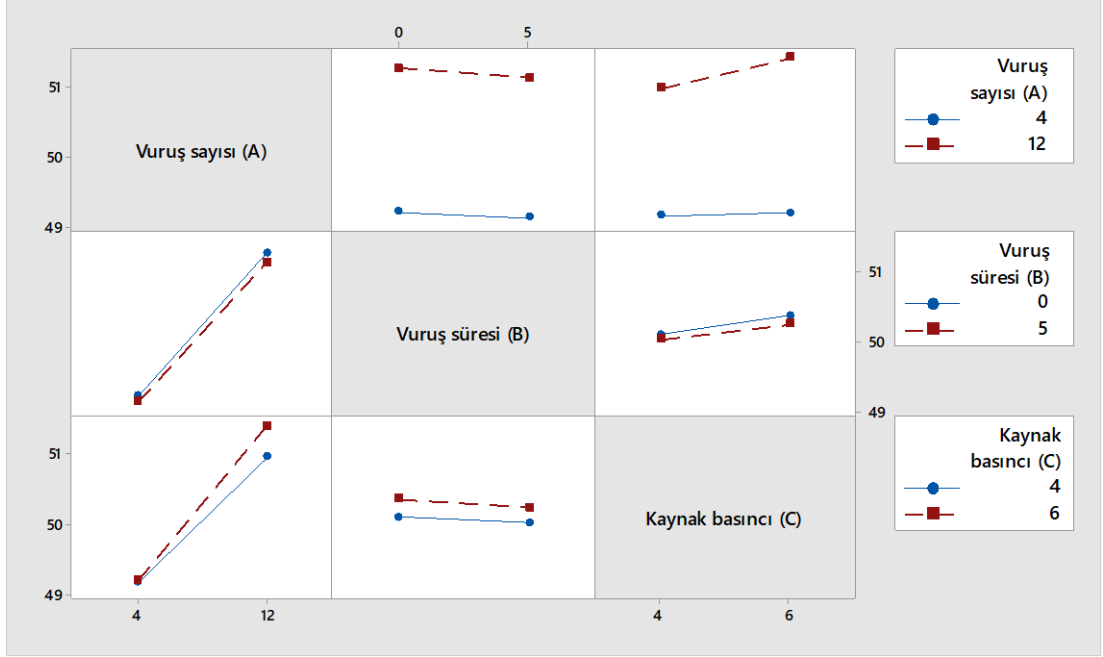
DF: Serbestlik derecesi, *SS:* Kareler toplamı, *V:* Varyans, *P:* Yüzdelik dağılım

5.2.2 Elektriksel Direnç için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi

Faktörlere ait optimum seviyeler Varyans analizi, ana etkiler grafiği (Şekil 5.2.1) kullanılarak elde edilmektedir. Ana etkiler grafiğine göre ANOVA ile paralel olarak 4'lük vuruş sayısında direnç değerinde aşırı bir düşüş elde edilmiştir. Yine aynı grafikten, vuruş süresinin dirençle ters kaynak basıncı ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük direnç değeri vuruş sayısının birinci (A=4) vuruş süresinin ikinci (B=5sn) ve kaynak basıncının birinci seviyesinde (C= 4 bar) $49,13 \mu\Omega$ olarak belirlenmiştir (Tablo 5.2.2'de 3 no'lu test).



Şekil 5.2.2.1: Direnç Değişimindeki Ana Etki Grafiği

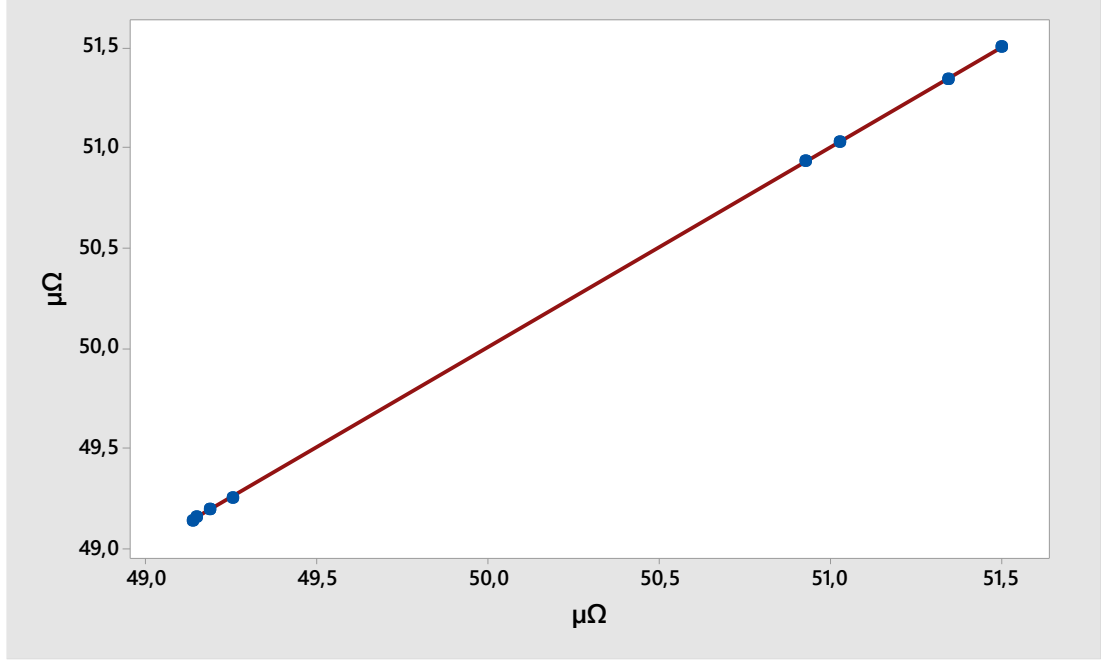


Şekil 5.2.2.2: Direnç Değişimindeki Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği

5.2.3 Elektriksel Dirence ait Regresyon Analizi

Faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri %99,99'lük belirleme katsayısında modellenmiştir (Eş 5) ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 5.2.3.1).

$$R = 48,5375 + 0,12844 A + 0,016 B - 0,0675 C - 0,001125 Ax B + 0,025313 Ax C - 0,0055 Bx C \quad (5)$$



Şekil 5.2.3.1: Direnç değişiminde deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

5.2.4 Elektriksel Dirence ait Doğrulama Analizleri

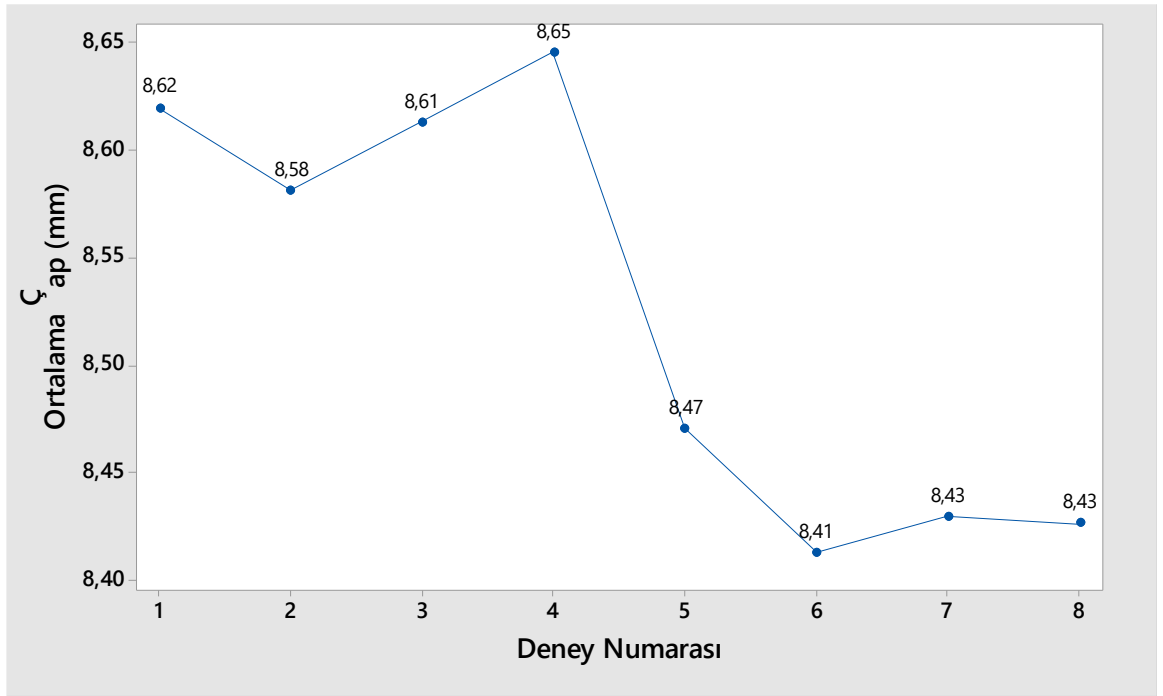
Optimum elektriksel direncin elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının birinci ($C=4$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama $49,15 \mu\Omega$ 'luk direnç değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir (Bkz. Tablo 5.2.2: $49,00768 < C_{ER} = 49,15 < 49,25982$)

5.3 Kaynak Bölgesinin Çap Değişime ait Analizler

Her bir deney numunesi için 12 adet ölçüm alınmış, ölçüm sonuçları Tablo 5.3.1'de verilmiş ve bu ölçüm ortalamalarının deney numaralarına göre değişimlerini incelemek için Şekil 5.3.1' deki grafik oluşturulmuştur.

Tablo 5.3.1: Çap Ölçümü Yapılan Numunelerin Tablosu (mm)

Deney Nu.	Numune 1			Numune 2			Numune 3			Numune 4		
	Ö1	Ö2	Ö3	Ö1	Ö2	Ö3	Ö1	Ö2	Ö3	Ö1	Ö2	Ö3
1	8,60	8,80	8,55	8,60	8,70	8,50	8,53	8,72	8,43	8,65	8,80	8,55
2	8,45	8,70	8,55	8,50	8,70	8,55	8,45	8,72	8,51	8,61	8,81	8,42
3	8,54	8,87	8,56	8,53	8,80	8,51	8,59	8,78	8,45	8,50	8,72	8,50
4	8,75	8,80	8,55	8,49	8,80	8,70	8,60	8,68	8,59	8,61	8,79	8,38
5	8,53	8,64	8,38	8,45	8,50	8,78	8,40	8,55	8,30	8,30	8,48	8,33
6	8,30	8,57	8,39	8,44	8,53	8,39	8,41	8,51	8,35	8,28	8,44	8,34
7	8,32	8,57	8,28	8,30	8,47	8,23	8,42	8,55	8,38	8,54	8,64	8,45
8	8,35	8,52	8,36	8,55	8,58	8,40	8,33	8,47	8,35	8,36	8,59	8,25



Şekil 5.3.1: Deney Numarasına Göre Ortalama Çap Değişimi

Tablo 5.3.2: Çap değişimine ait deney sonuçları (Ort. Çap(mm)), tahminler (P-Ø), tahminlere ait standart hata (Se(P-Ø)) ve güven aralığı (CI_Ø) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	Ort. Çap (mm)	P-Ø	Se(P-Ø)	CI _Ø
1	4	0	4	8,62	8,6171	0,0055	8,547-8,6871
2	4	0	6	8,58	8,5829	0,0055	8,5129-8,653
3	4	5	4	8,61	8,6146	0,0055	8,5445-8,6846
4	4	5	6	8,65	8,6429	0,0055	8,5729-8,713
5	12	0	4	8,47	8,4721	0,0055	8,402-8,5421
6	12	0	6	8,41	8,4104	0,0055	8,3404-8,4805
7	12	5	4	8,43	8,4271	0,0055	8,357-8,4971
8	12	5	6	8,43	8,4279	0,0055	8,3579-8,498

5.3.1 Çap Değişimi için ANOVA

Tablo 5.3.1.1’de çap değişimi için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları verilmiştir. Bu sistem için F_{tablo} değeri 161 olarak belirlenmiştir. Buna göre, vuruş sayısı, vuruş süresi, kaynak basıncı, vuruş sayısı-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin elektriksel direnç üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %94,27’lik oranla vuruş sayısının çap artışı domine ettiği ve bunu sırasıyla vuruş süresi-kaynak basıncı (%2,84), kaynak basıncı (%0,98) ve vuruş süresi (%0,81) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.

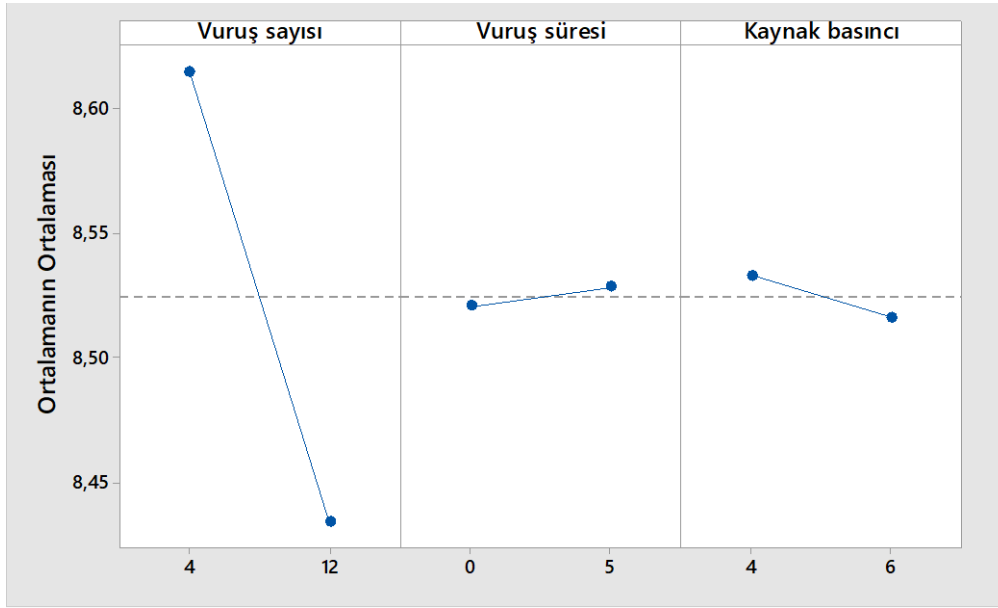
Tablo 5.3.1.1: Çap değişiminin etkiler için ANOVA

Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	0,0648	0,0648	1866,24	94,27
Vuruş süresi (B)	1	0,000113	0,000113	3,24	0,16
Kaynak basıncı (C)	1	0,000556	0,000556	16	0,81
AxB	1	0,000903	0,000903	26,01	1,31
AxC	1	0,000378	0,000378	10,89	0,55
BxC	1	0,001953	0,001953	56,25	2,84
Hata	1	0,000035	0,000035		0,05
Toplam	7	0,068737			100,00

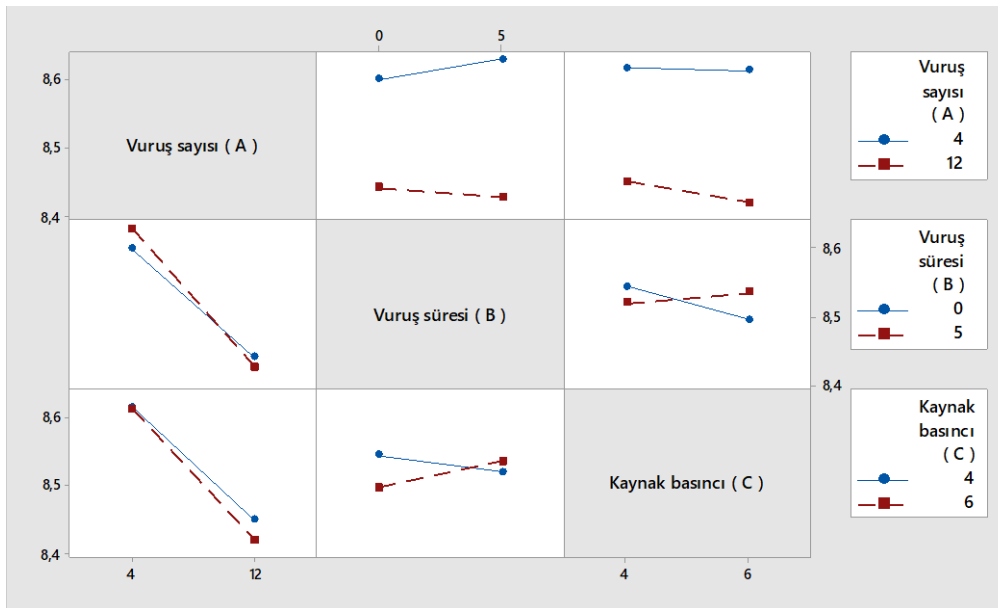
DF: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, V: Varyans, P: Yüzdellik dağılım

5.3.2 Çap Değişimi için Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi

Faktörlere ait optimum seviyeler Varyans analizi, ana etkiler grafiği (Şekil 5.3.2.1) kullanılarak elde edilmektedir. Ana etkiler grafiğine göre ANOVA ile paralel olarak 12'lik vuruş sayısında çap değerinde aşırı bir düşüş elde edilmiştir. Yine aynı grafikten, vuruş süresinin çap değişimi ile doğru, kaynak basıncı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük çap değeri vuruş sayısının altıncı (A=12) vuruş süresinin ikinci (B=0sn) ve kaynak basıncının birinci seviyesinde (C= 6 bar) 8,41 mm olarak belirlenmiştir (Tablo 5.3.2'de 6 no'lu test).



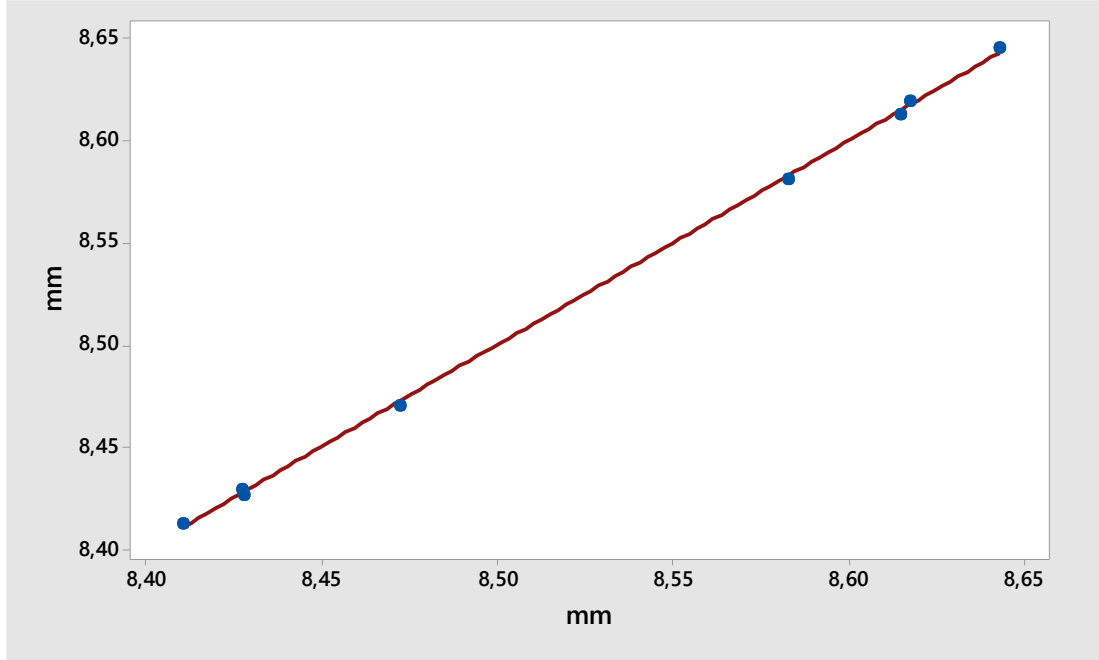
Şekil 5.3.2.1: Çap Değişimindeki Ana Etki Grafiği



Şekil 5.3.2.2: Çap Değişiminde Parametreye Bağlı Ana Etkileşim Grafiği

5.3.3 Çap Değişimine ait Regresyon Analizi

Faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çap değişimi üzerindeki etkileri %99,95'lik belirleme katsayısında modellenmiştir (Eş 6) ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 5.3.3.1).



Şekil 5.3.3.1: Çap Değişimi için deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

$$\begin{aligned} \varnothing = & 8,7304 - 0,01125 A - 0,02125 B - 0,01021 C - 0,001062 Ax B - 0,001719 Ax C \\ & + 0,006250 Bx C \end{aligned} \quad (6)$$

5.3.4 Çap Değişimine ait Doğrulama Analizleri

Optimum çap değişiminin elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=12$), vuruş süresinin birinci ($B=0$ sn) ve kaynak basıncının ikinci ($C=6$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama 8,42 mm'lik çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir (Bkz Tablo 5.3.2: $8,3404 < C_{\varnothing} = 8,42 < 8,4805$).

5.4 Çekme Dayanımı Analizleri

Aşağıda Tablo 5.4.1’ de verilen çekme deneyi sonuçları istatistiksel olarak incelenmiş ve Tablo 5.4.2’de çekme dayanımına ait deney sonuçları, tahminler, tahminlere ait standart hata ve güven aralığı değerleri sırasıyla verilmiştir.

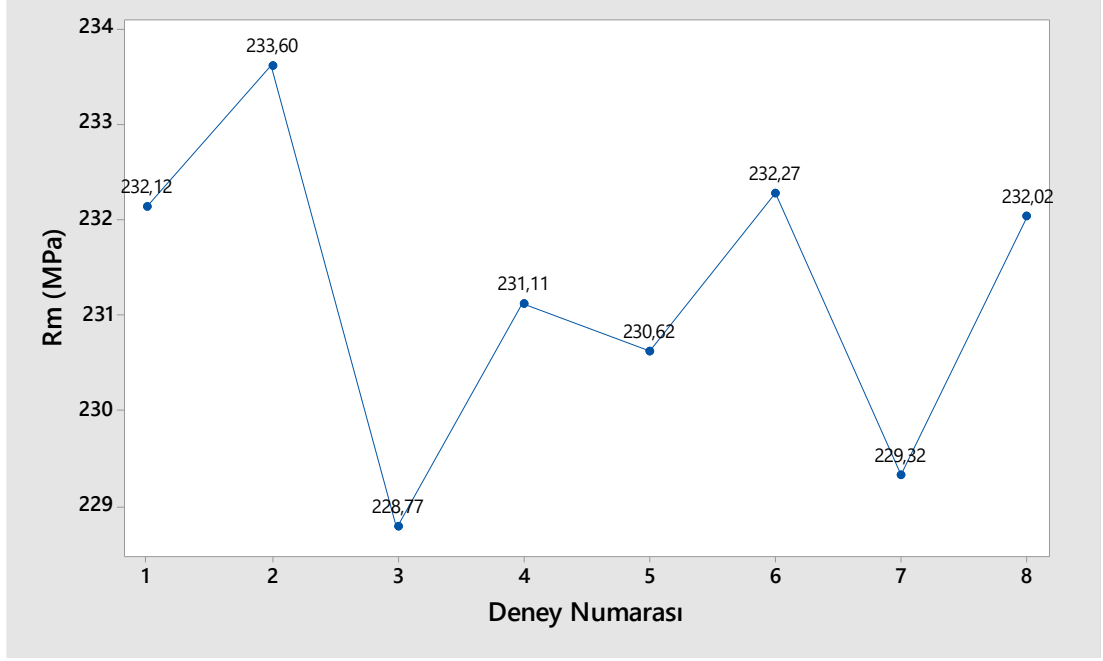
Tablo 5.4.1: TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Testi Sonuçları

Numune	Maks. Muk. Rm-1 (MPa)	Maks. Muk. Rm-2 (MPa)	Maks. Muk. Rm-3 (MPa)	Maks. Muk. Rm-Ort. (MPa)
1	232,57	232,47	231,33	232,12
2	233,60	235,40	231,80	233,60
3	228,66	228,90	228,77	228,77
4	230,61	230,45	232,27	231,11
5	230,74	230,46	230,67	230,62
6	232,27	232,27	232,27	232,27
7	229,45	229,28	229,21	229,32
8	231,92	232,13	232,02	232,02



Şekil 5.4.1: Çekme numunelerinin a) Çekme deneyi öncesindeki görüntüsü, b) Çekme deneyi yapıldıktan sonraki görüntüsü ve kopma noktaları

Şekil 5.4.1’de verilen çekme numunelerinin kopma bölgeleri incelenmiş ve kopma noktalarının kaynaktan yaklaşık olarak aynı uzaklıkta olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4.2: Çekme testinden çıkan numunelerin ortalama değişim grafiği

Tablo 5.4.2: Çekme dayanımına ait deney sonuçları (T_s), tahminler (P_{Ts}), tahminlere ait standart hata ($Se(P_{Ts})$) ve güven aralığı (CI_{Ts}) değerleri

Test no	Vuruş sayısı (A)	Vuruş süresi (B)	Kaynak basıncı (C)	T_s	P_{Ts}	$Se(P_{Ts})$	CI_{Ts}
1	4	0	4	232,12	232,1431	0,061036	231,3675-232,9186
2	4	0	6	233,60	233,5769	0,061036	232,8014-234,3525
3	4	5	4	228,77	228,7433	0,061036	227,9677-229,5188
4	4	5	6	231,11	231,1327	0,061036	230,3572-231,9083
5	12	0	4	230,62	230,5934	0,061036	229,8178-231,3689
6	12	0	6	232,27	232,2891	0,061036	231,5135-233,0646
7	12	5	4	229,32	229,3447	0,061036	228,5692-230,1203
8	12	5	6	232,02	231,996	0,061036	231,2205-232,7716

5.4.1 Çekme Dayanımı için ANOVA

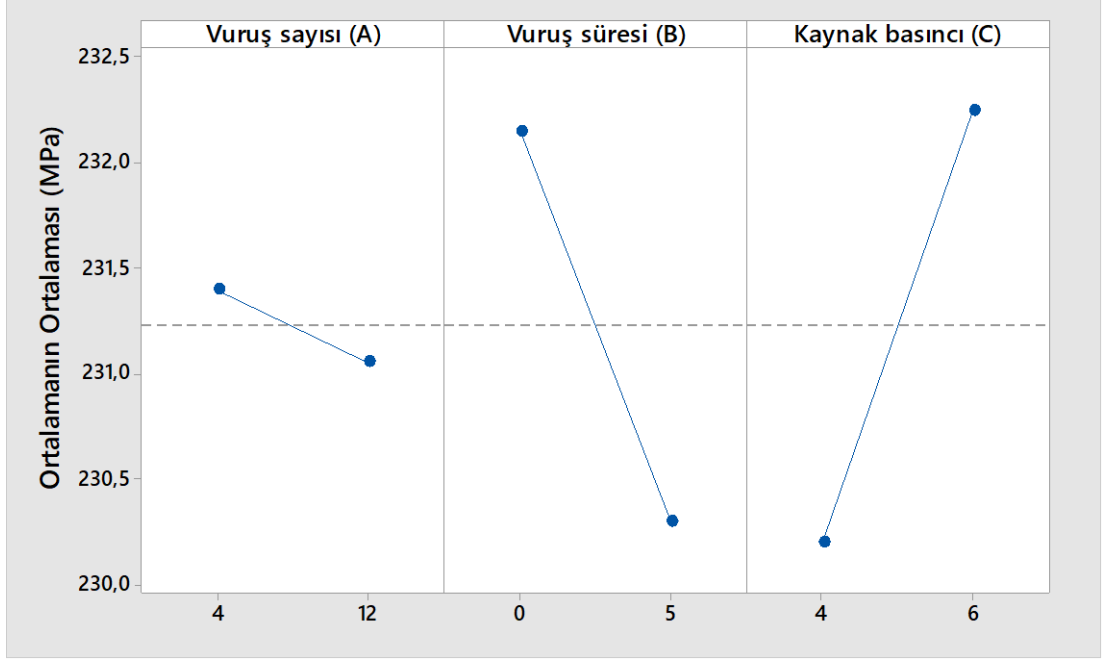
Tablo 5.4.1.1'de Çekme mukavemeti için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları verilmiştir. Buna göre vuruş süresi, kaynak basıncı ve vuruş sayısı-vuruş süresi faktör ve etkileşimlerinin çekme mukavemeti üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %45,83'lık oranla kaynak basıncının çekme dayanımı üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla vuruş süresi (%37,45) ve vuruş sayısı-vuruş süresi (%14,04) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.

Tablo 5.4.1.1: Çekme Dayanımı için ANOVA

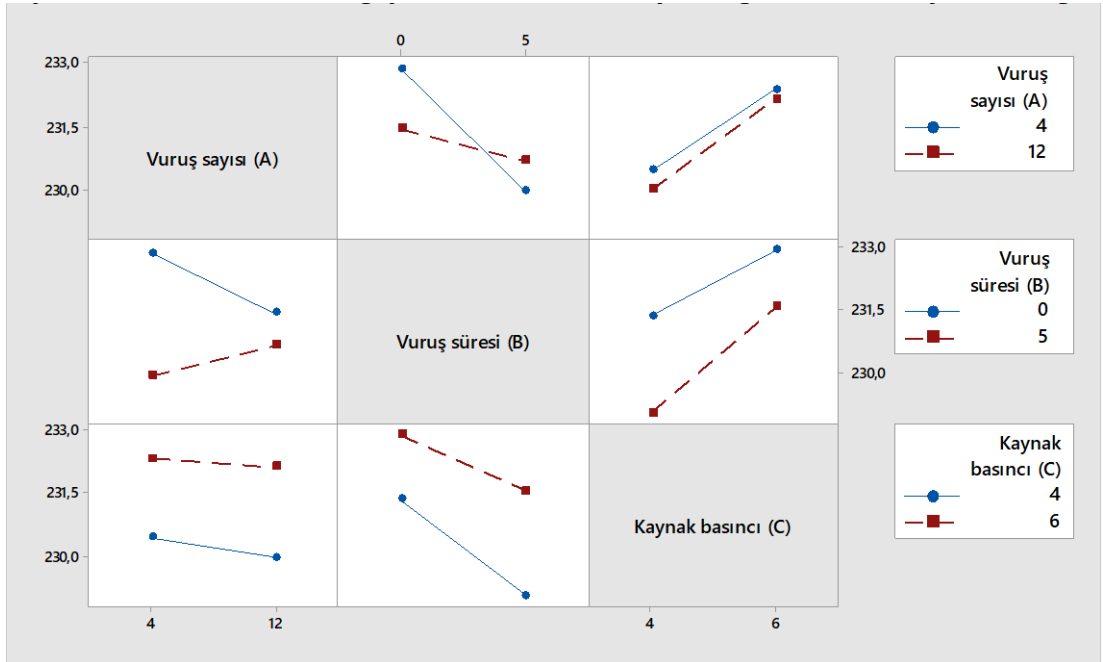
Kaynak	DF	SS	V	F	P
Vuruş sayısı (A)	1	0,2356	0,23556	55,33	1,29
Vuruş süresi (B)	1	6,8185	6,81851	1601,49	37,45
Kaynak basıncı (C)	1	8,3443	8,34429	1959,86	45,83
AxB	1	2,3138	2,31376	543,44	12,71
AxC	1	0,0343	0,03428	8,05	0,19
BxC	1	0,4566	0,45660	107,24	2,51
Hata	1	0,0043	0,00426		0,02
Toplam	7	18,2073			100
<i>DF</i> : Serbestlik derecesi, <i>SS</i> : Kareler toplamı, <i>V</i> : Varyans, <i>P</i> : Yüzdeler dağılım					

5.4.2 Çekme Dayanımına ait Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi

Faktörlere ait optimum seviyeler Varyans analizi, ana etkiler ve etkileşim grafikleri kullanılarak elde edilmektedir. Şekil 5.4.2.1 ve 5.4.2.2 çekme dayanımına ait ana etkiler ve etkileşim grafikleri sırasıyla verilmiştir. Ana etkiler grafiğinde çekme dayanımı vuruş süresi ile ters ve kaynak basıncı ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Vuruş sayısına ait optimum seviye ANOVA’da vuruş sayısı anlamlı olmadığı için etkileşim grafiğiyle belirlenmiştir. Bu grafikte de vuruş sayısının 4 ve vuruş süresinin 0 sn olduğu kombinasyonda çekme dayanımında dramatik bir artış olduğu açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, optimum çekme dayanımı vuruş süresinin birinci (A=4), vuruş süresinin birinci (B=0 sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) 233,6 MPa olarak elde edilmiştir (Tablo 5.4.2’de 2 no’lu test).



Şekil 5.4.2.1: Çekme Mukavemeti Değişimindeki Ana Etki Grafiği - Rm (MPa)

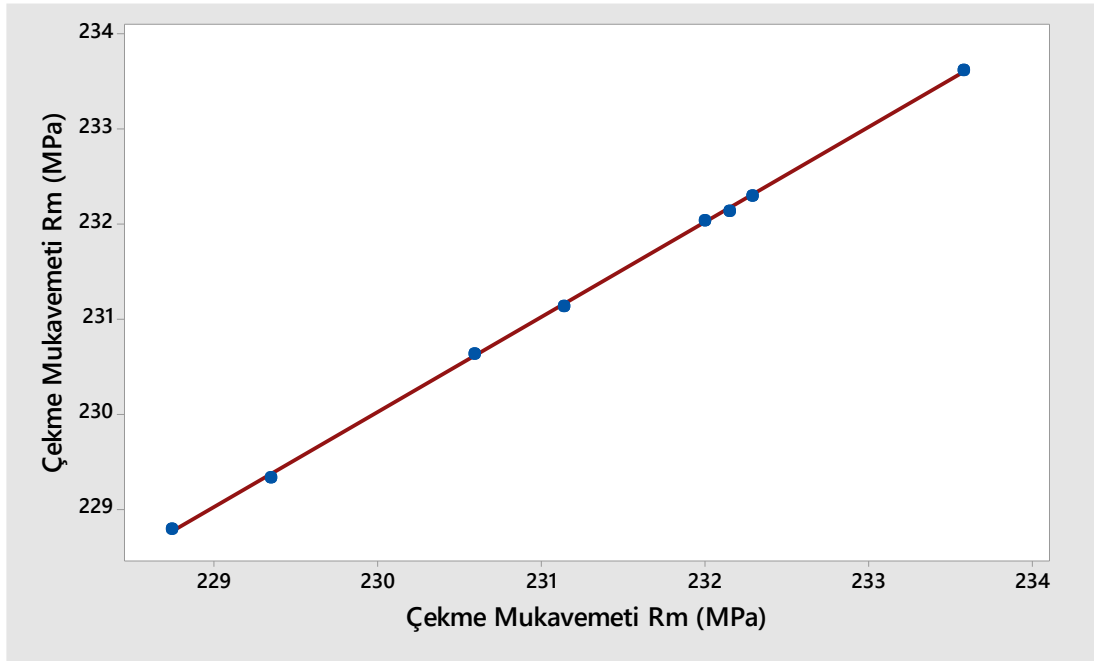


Şekil 5.4.2.2: Çekme Mukavemet Değişiminde Parametreye Bağlı Ana Etkileşimli Grafiği

5.4.3 Çekme Dayanımına ait Regresyon Analizi

Faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri %99,84'lük belirleme katsayısında modellenmiştir (Eş 7) ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir (Şekil 5.22).

$$T_s = 230,312 - 0,2592 A - 1,2773 B + 0,6515 C + 0,05378 AxB + 0,01636 AxC + 0,09556 BxC \quad (7)$$

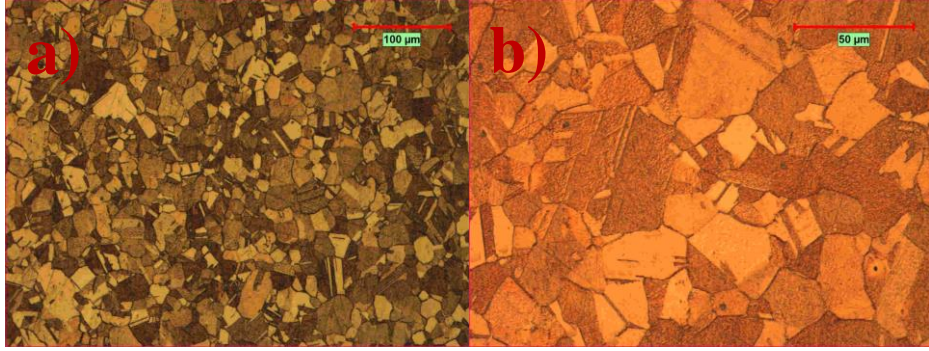


Şekil 5.4.3.1: Çekme testinden çıkan numuneler ve tahminlerin karşılaştırılması

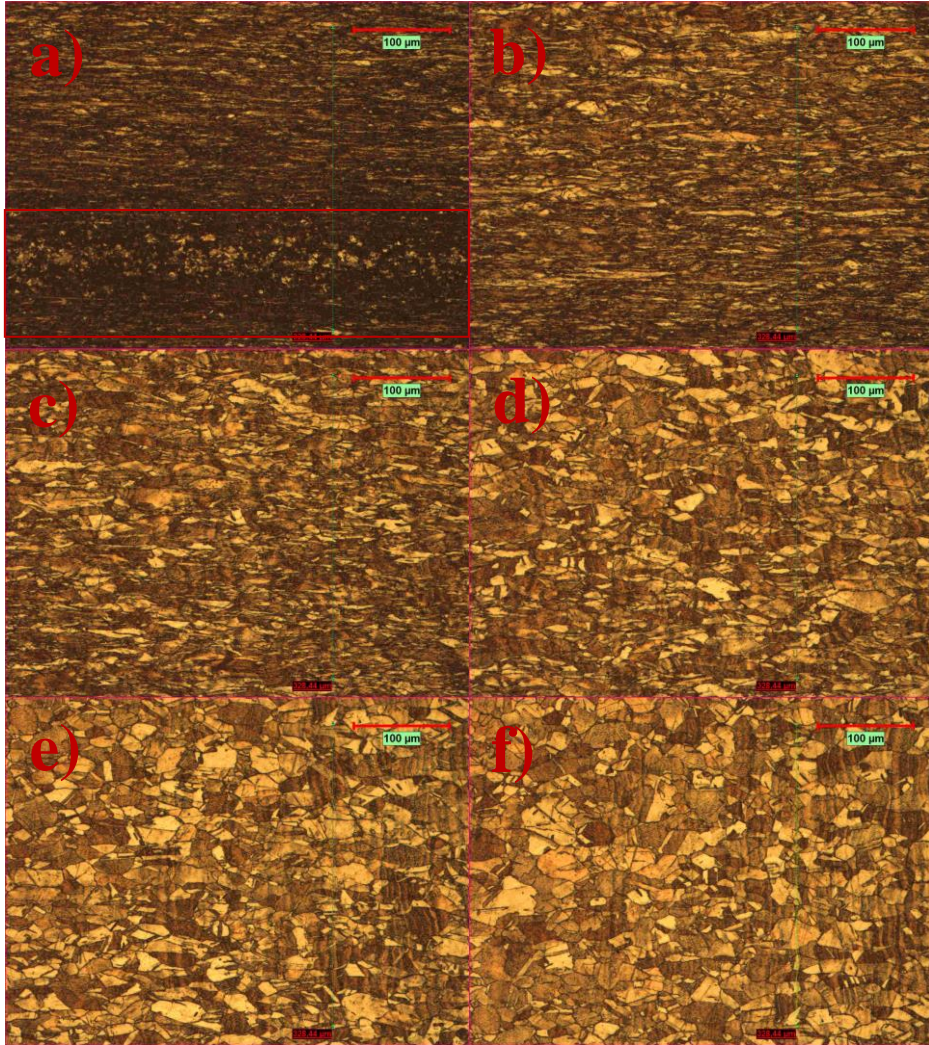
5.4.4 Çekme Dayanımına ait Doğrulama Analizleri

Optimum çekme dayanımının elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin birinci ($B=0$ sn) ve kaynak basıncının ikinci ($C=6$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama 233,72 MPa'lık çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir (Bkz Tablo 5.4.2: $232,8014 < C_{T_s} = 233,72 < 234,3525$).

5.5 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin Analizi

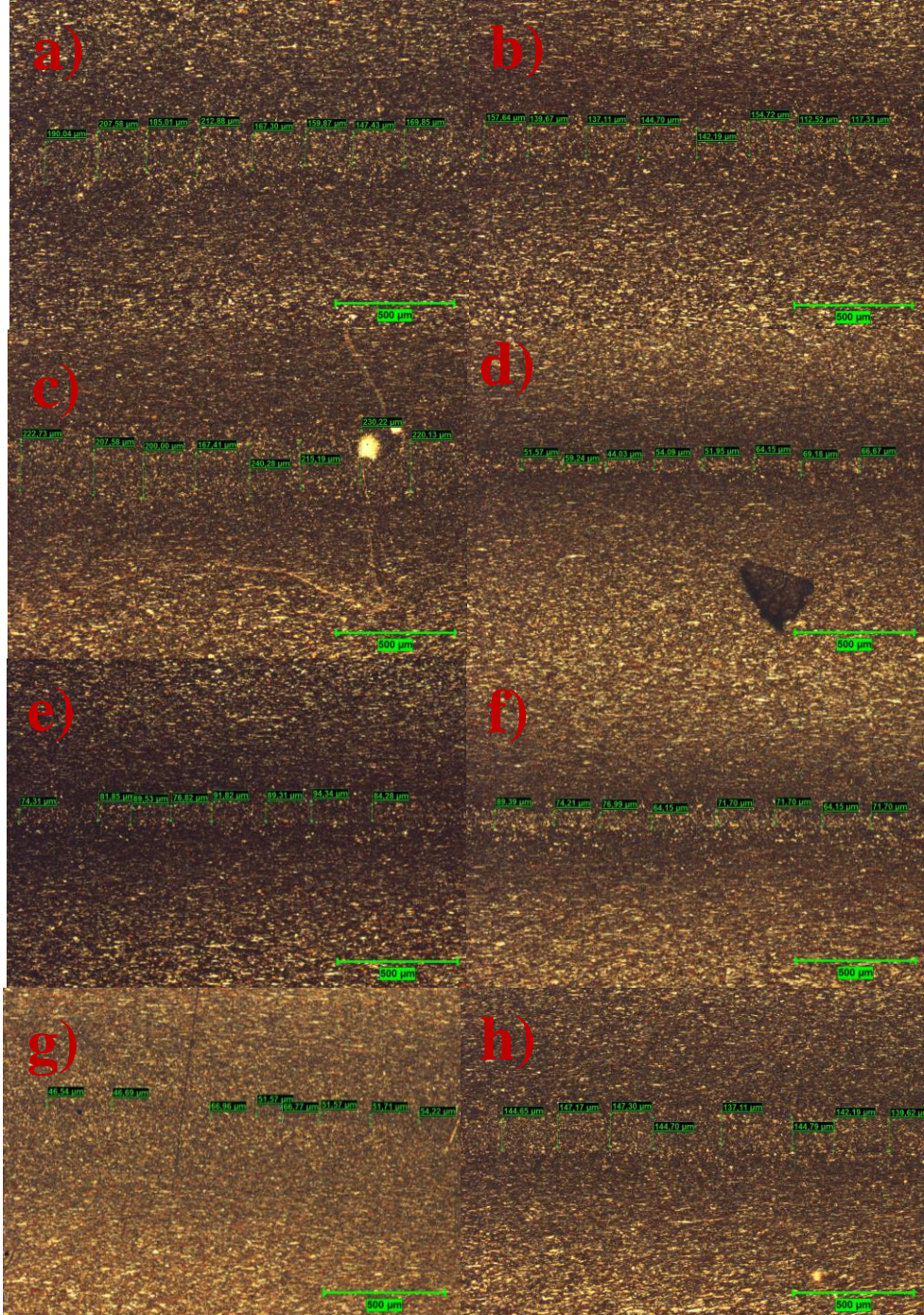


Şekil 5.5.1: a) Cu-ETP malzemenin 200X büyütmedeki kaynaksız iç yapı görüntüsü, b) Cu-ETP malzemenin 500X büyütmedeki kaynaksız iç yapı görüntüsü



Şekil 5.5.2: a) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-1. Bölge, b) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-2. Bölge, c) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-3. Bölge, d) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-4. Bölge, e) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-5. Bölge, f) 1.Deney-200X deki kaynak bölgesi-6. Bölge

Yapılan deneylerden alınan 1 numaralı numunenin iç yapı incelemesi yapılmıştır. Yapılan incelemede tanelerin kaynak bölgesine yaklaştıkça boyutlarında küçülmelere ve basınç yönüne dik olarak uzama davranışları sergilediği gözlemlenmiştir.



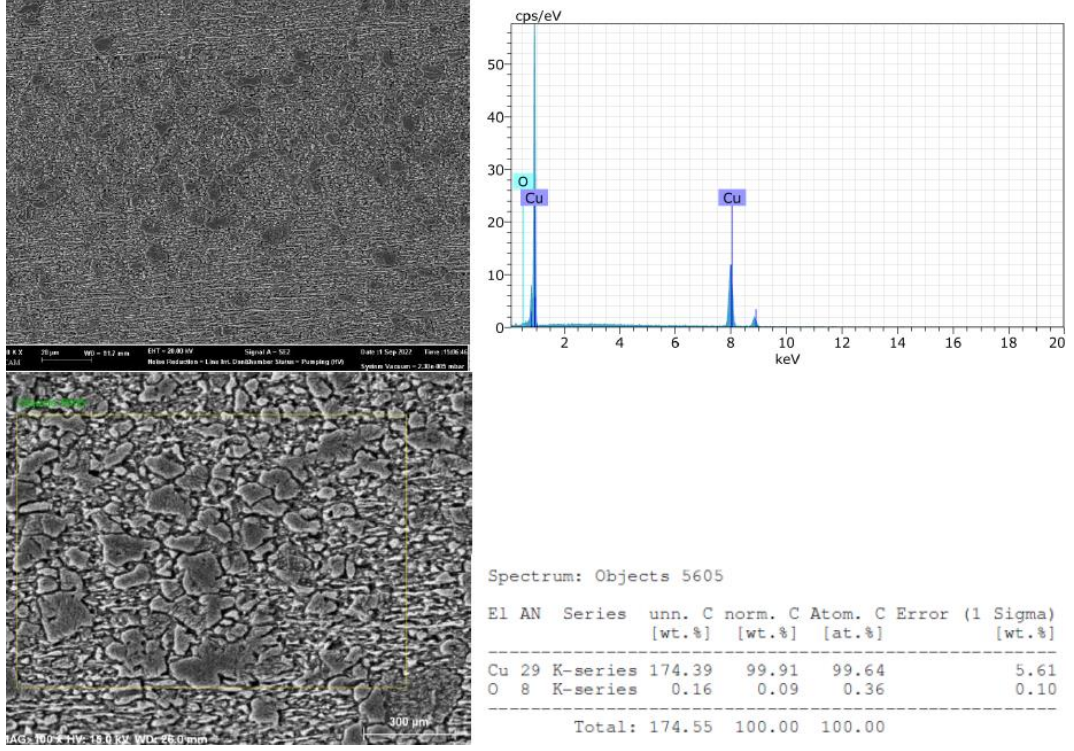
Şekil 5.5.3: a) 1.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, b) 2.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, c) 3.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, d) 4.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, e) 5.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, f) 6.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, g)7.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, h) 8.Deney-50X-Kaynak Kalınlığı

Numuneler 50X büyütülerek mikroskop ile kaynak bölgelerindeki kalınlık değişimleri incelenmiştir. Örnek olarak aşağıda 3 numaralı deney ile 4 numaralı deneydeki kaynak kalınlıklarının değerleri verilmiştir. Aşağıdaki değerlere göre 3. Deneyin ölçüm ortalaması 213 mikron iken 4. Deneyin sonucu ise 58 mikron gelmektedir. İstatistiksel olarak bir anlam ve ilişki tespit edilememesine rağmen deneylerin kaynak kalınlıklarının değiştiği tespit edilmiştir.

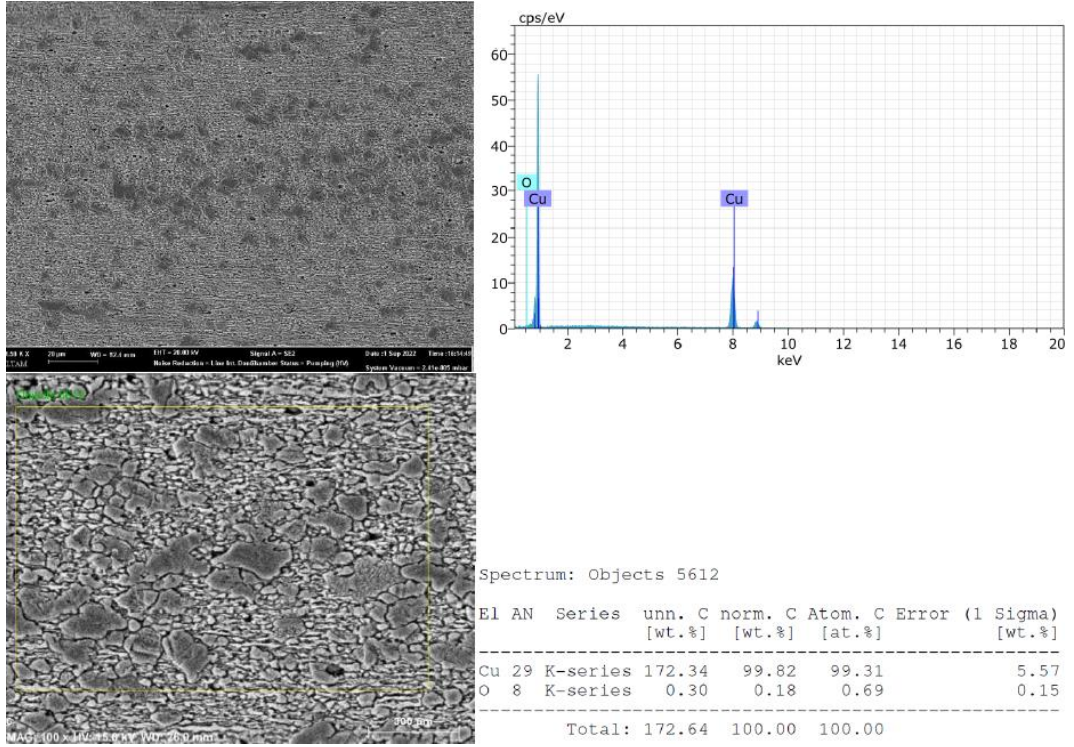
Aşağıdaki Tablo 5.5.1’ de de gösterildiği gibi her bir deney numunesinde alınan kaynak kalınlık ölçümleri farklı sonuçlar vermektedir. Bu durumda optik mikroskop ile alınan ölçümlerde istatistiki olarak analiz edilmiş ancak anlamlı sonuçlar yakalanamamıştır. Bu durumda değişim ana etkisinin kaynak uçlarının olduğu düşünölmektedir.

Tablo 5.5.1: Kaynak Bölgesindeki Kalınlık Değişimi(mikron)

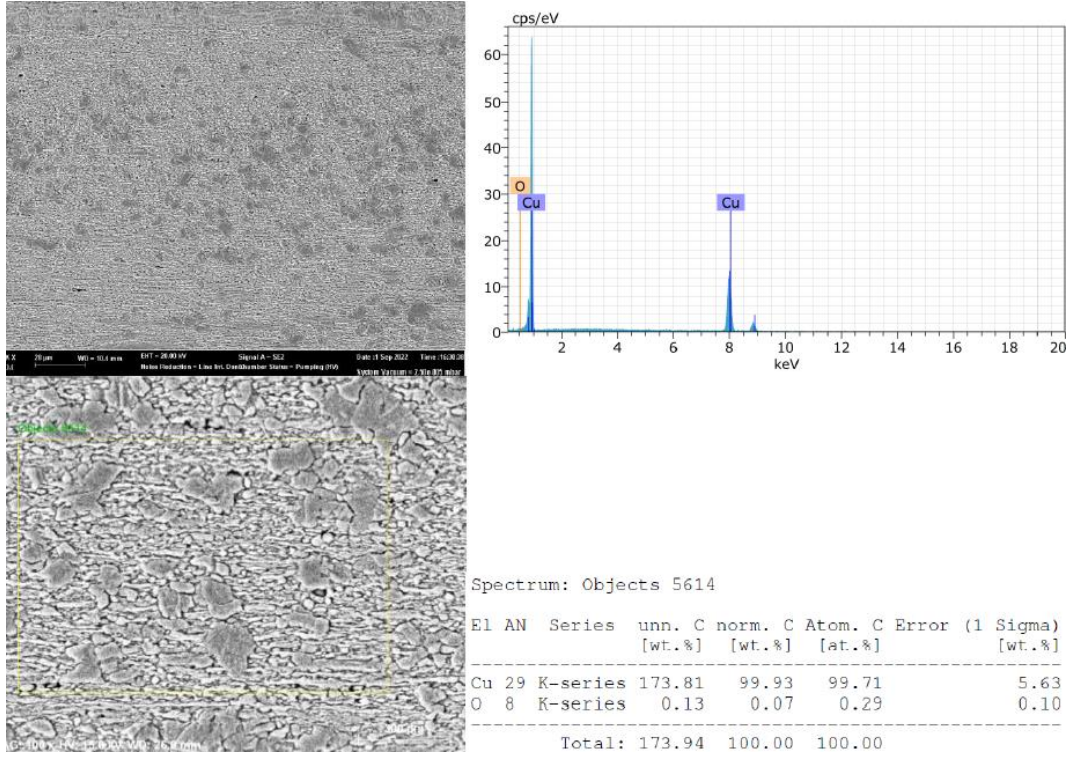
Deney Nu.	Vuruş sayısı	Vuruş süresi	Kaynak basıncı	Ort. Kalınlık (mikron)
1	4	0	4	180,0
2	4	0	6	138,2
3	4	5	4	212,9
4	4	5	6	57,6
5	12	0	4	85,3
6	12	0	6	73,0
7	12	5	4	54,5
8	12	5	6	143,4



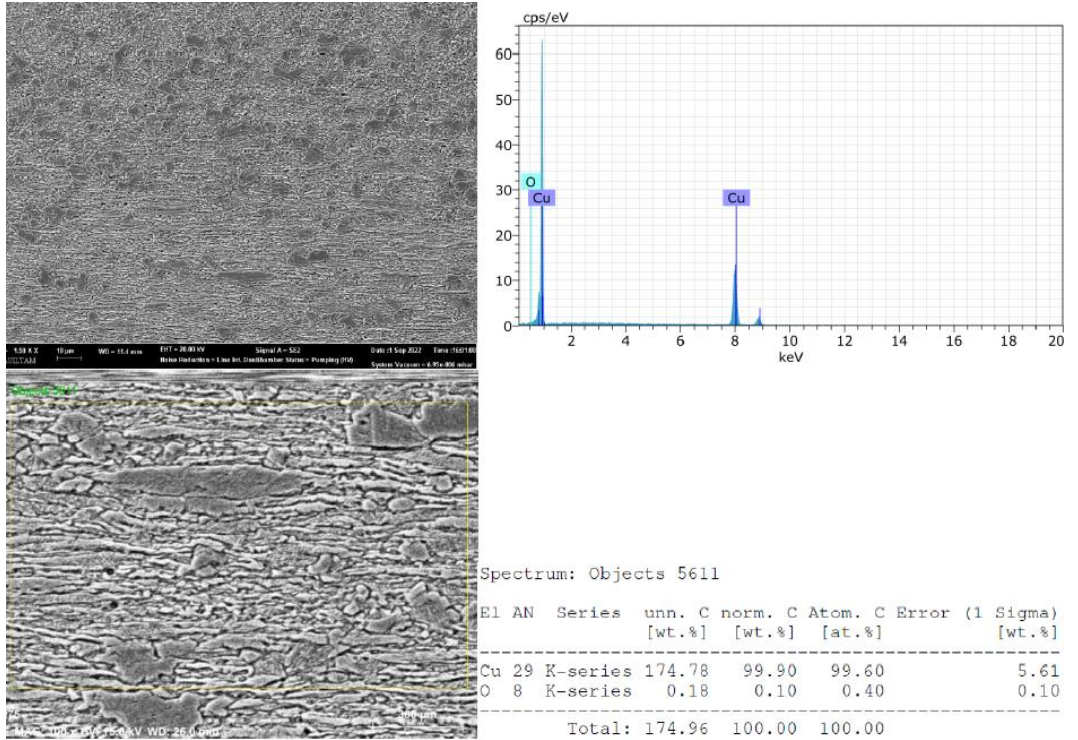
Şekil 5.5.4: 2. Deney-KB1-1500X (En İyi Çekme Mukavemet Değeri)



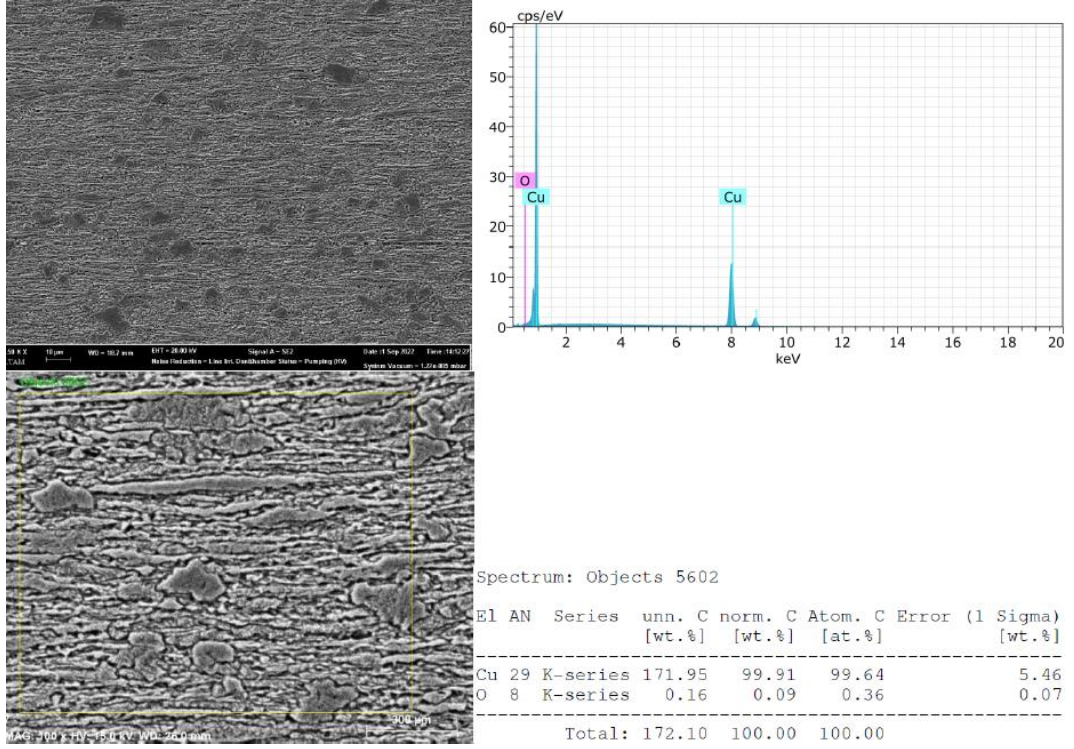
Şekil 5.5.5: 3. Deney-KB1-1500X (En Kötü Çekme Mukavemet Değeri)



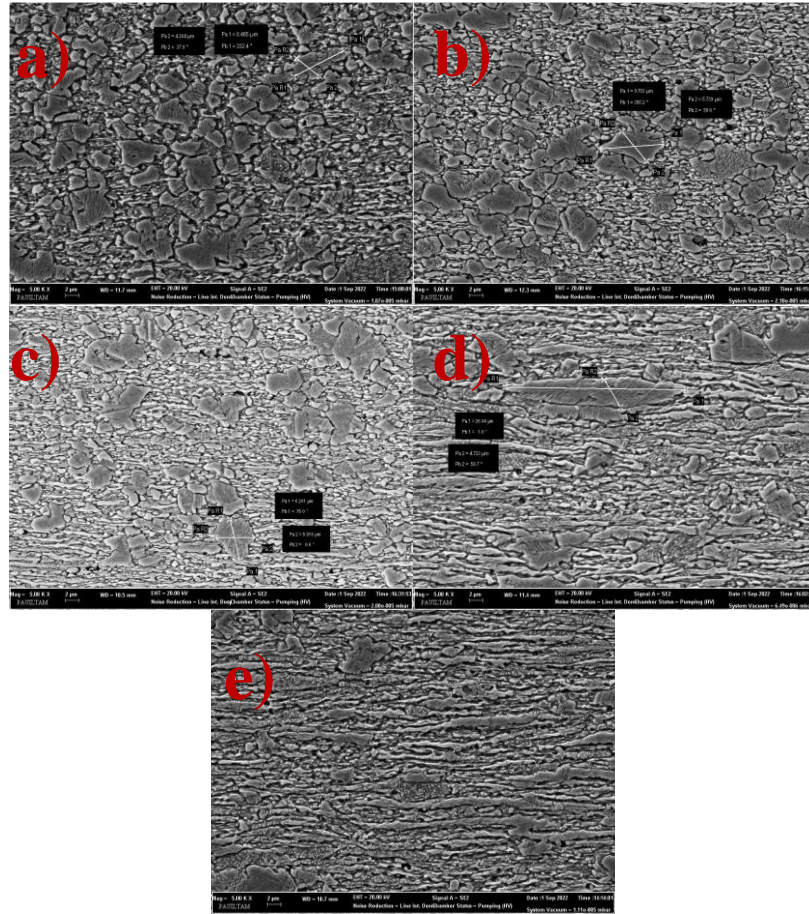
Şekil 5.5.6: 5.Deney-KB1-1500X (En Düşük Sertlik)



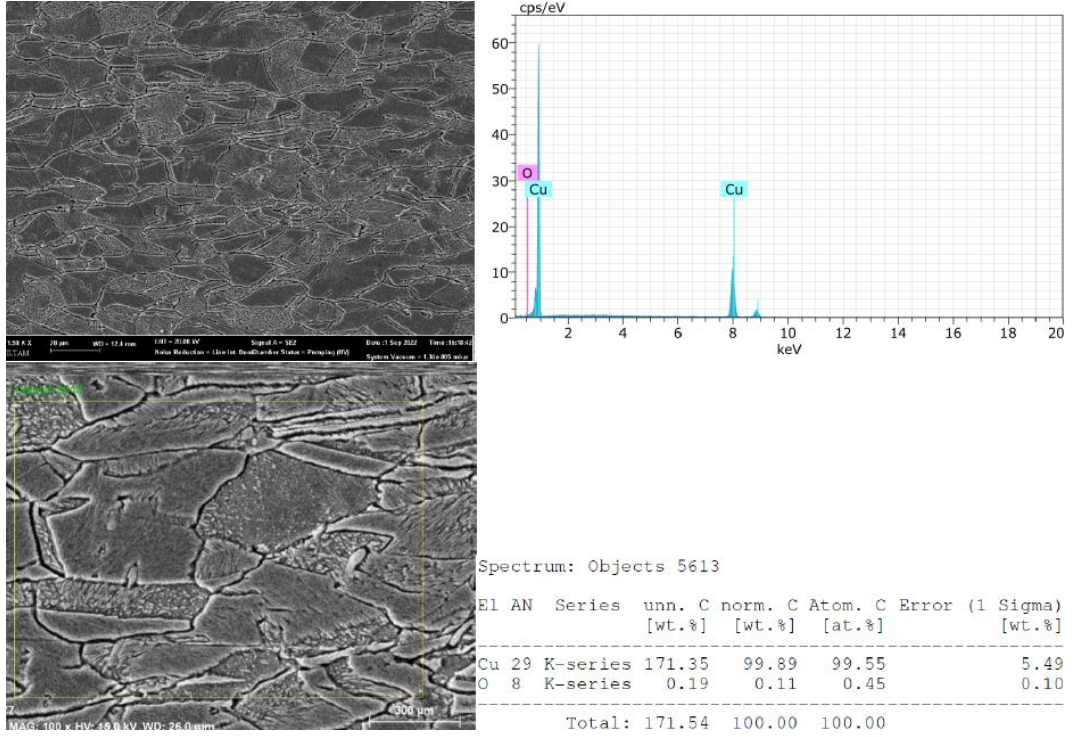
Şekil 5.5.7: 6. Deney-KB1-1500X (En Yüksek Sertlik)



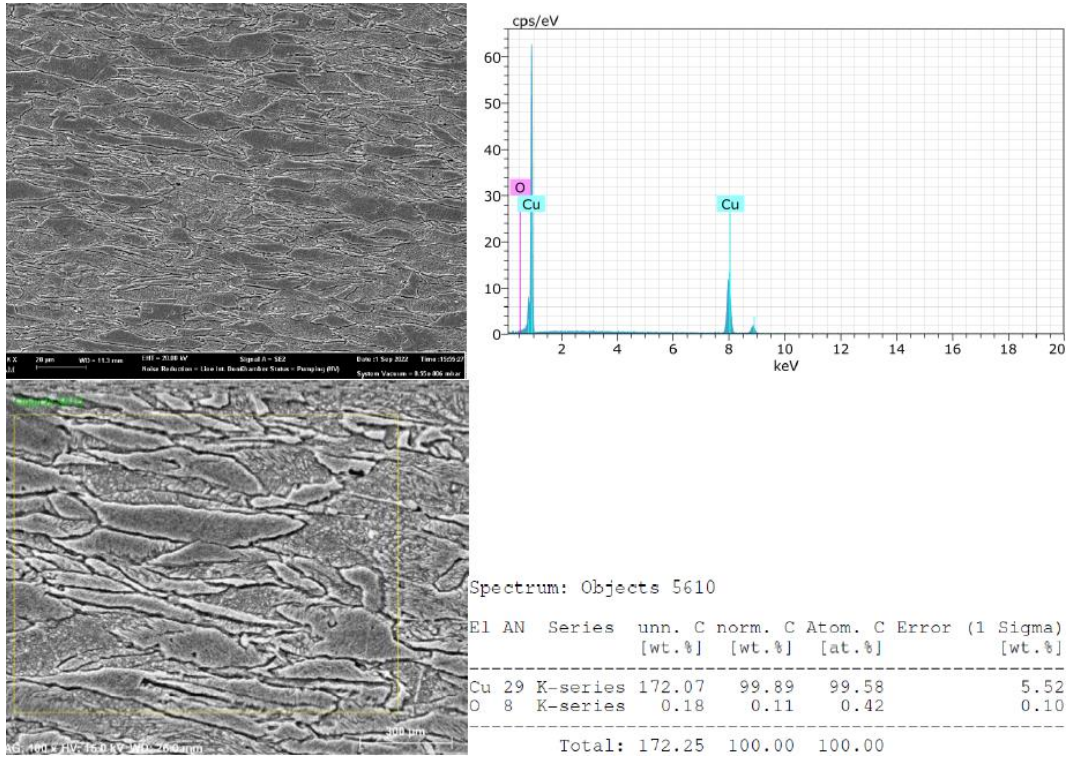
Şekil 5.5.8: 8. Deneysel-KB1-1500X (En Yüksek Direnç)



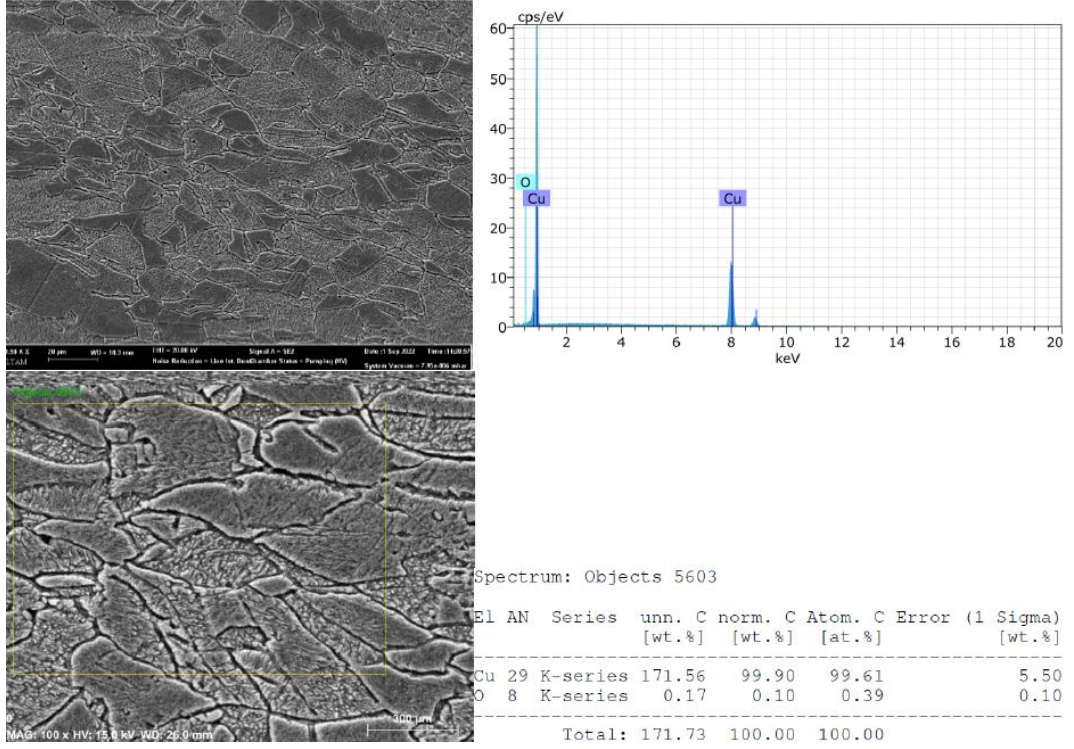
Şekil 5.5.9: a) 2. Deneysel-KB1-5000X (En İyi Çekme Mukavemet Değeri), b) 3. Deneysel-KB1-5000X (En Kötü Çekme Mukavemet Değeri), c) 5. Deneysel-KB1-5000X (En Düşük Sertlik), d) 6. Deneysel-KB1-5000X (En Yüksek Sertlik), e) 8. Deneysel-KB1-5000X (En Yüksek Direnç)



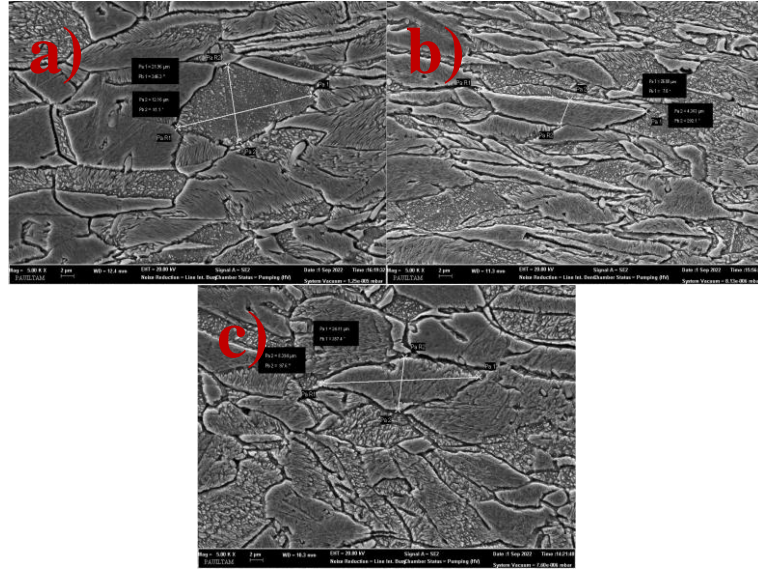
Şekil 5.5.10: 3. Deney-KB2-1500X (En Düşük Sertlik Değeri)



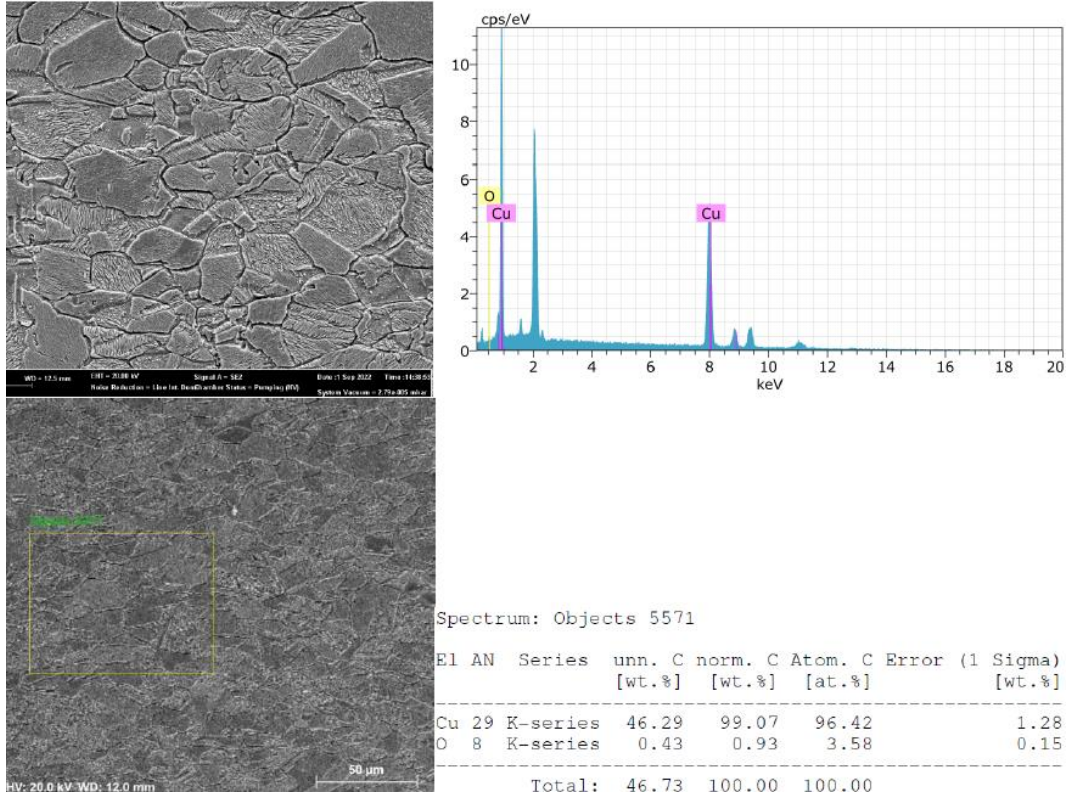
Şekil 5.5.11: 6. Deney-KB2-1500X (En Düşük Sertlik Değeri)



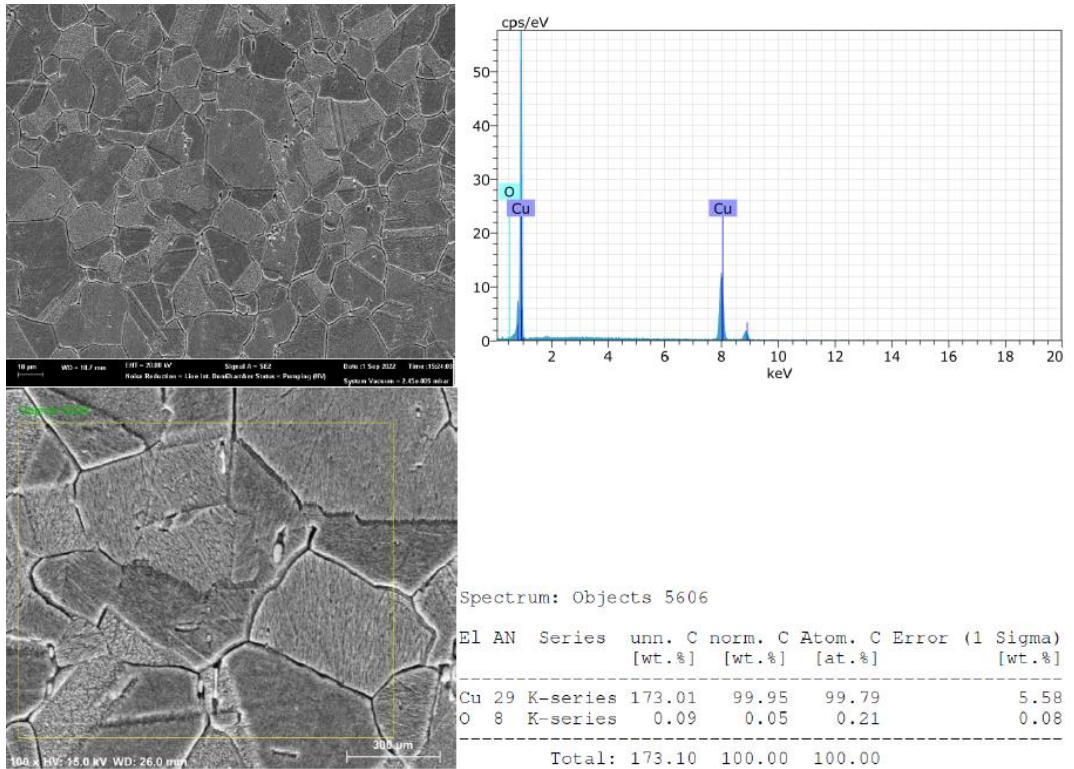
Şekil 5.5.12: 8. Deneysel KB2-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)



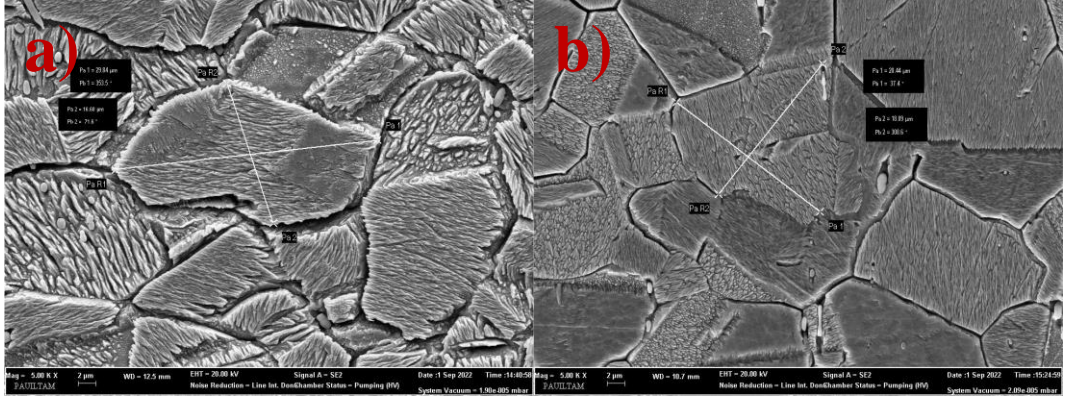
Şekil 5.5.13: a) 3. Deneysel KB2-5000X (En Düşük Sertlik Değeri), b) 6. Deneysel KB2-5000X (En Düşük Sertlik Değeri), c) 8. Deneysel KB2-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri)



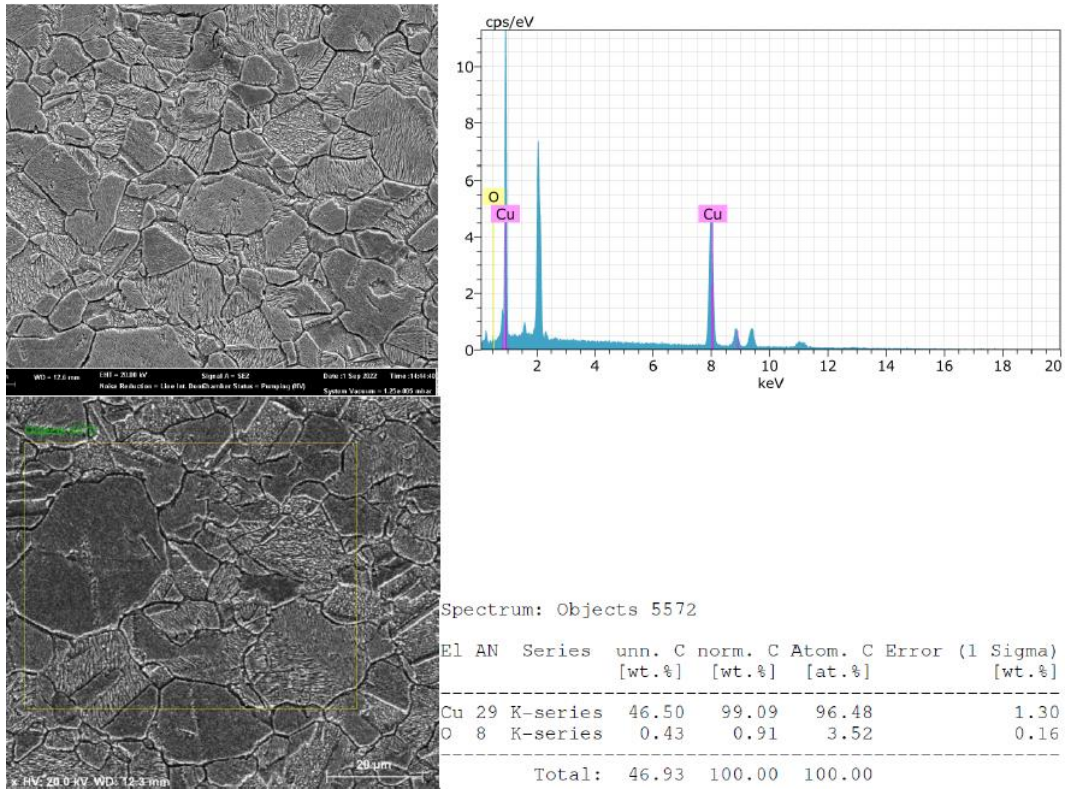
Şekil 5.5.14: 4. Deney-KB3-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)



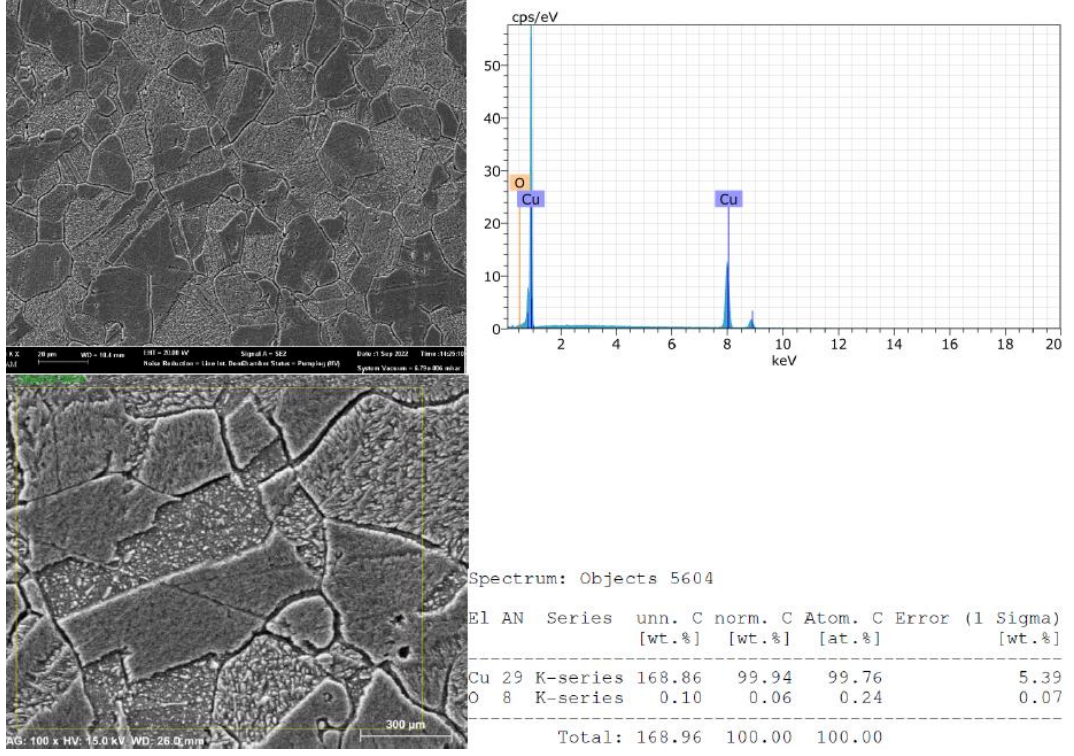
Şekil 5.5.15: 7. Deney-KB3-1500X (En Düşük Sertlik Değeri)



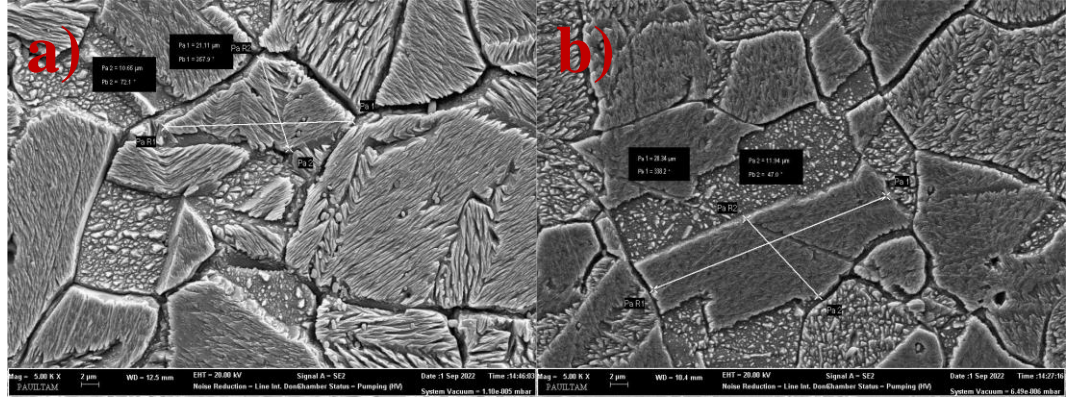
Şekil 5.5.16: a) 4. Deneysel-KB3-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deneysel-KB3-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)



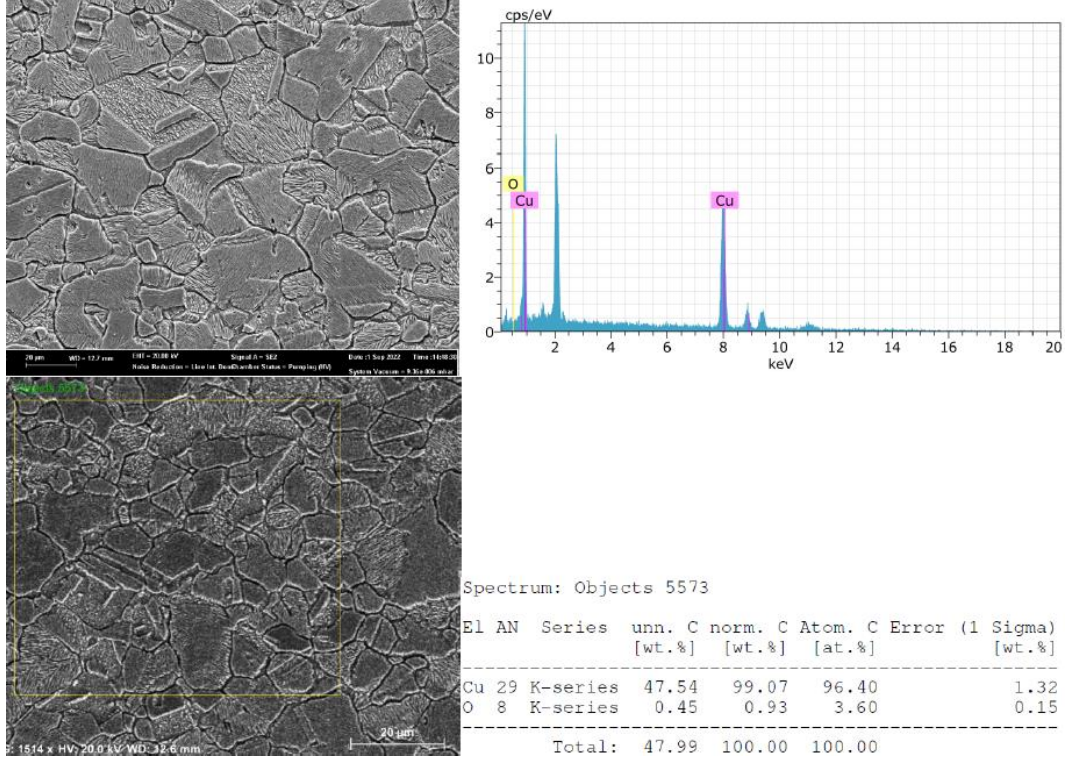
Şekil 5.5.17: 4. Deneysel-KB4-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)



Şekil 5.5.18: 8. Deney-KB4-1500X (En Düşük Sertlik Değeri)

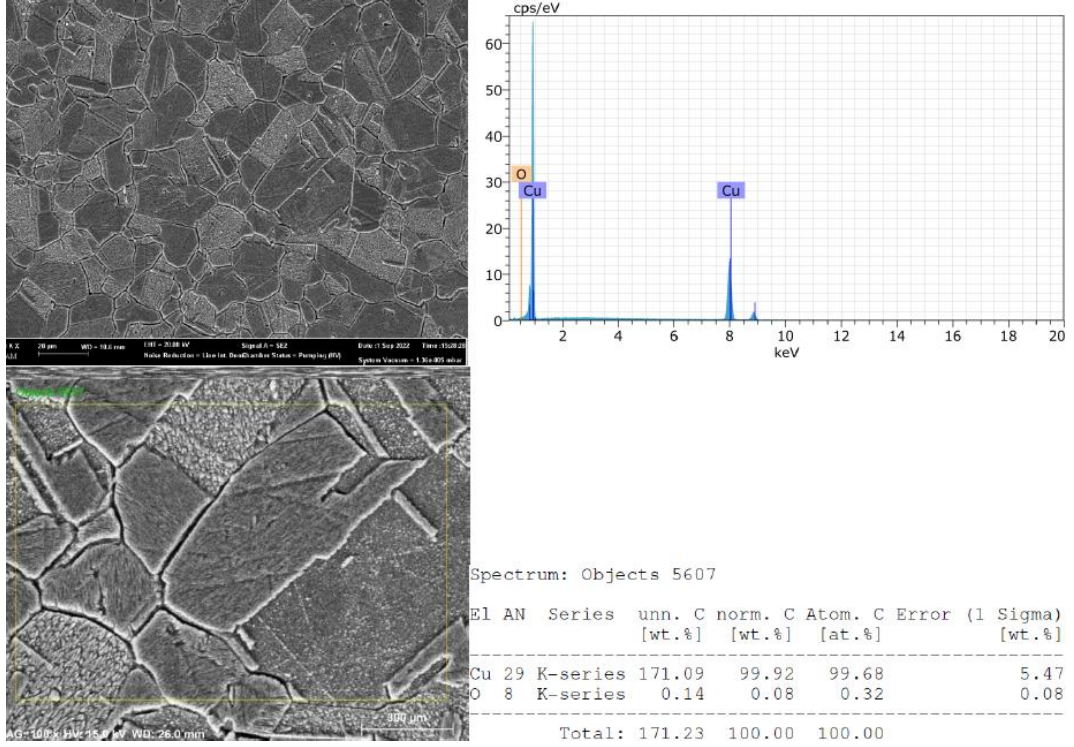


Şekil 5.5.19: a) 4. Deney-KB4-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 8. Deney-KB4-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)

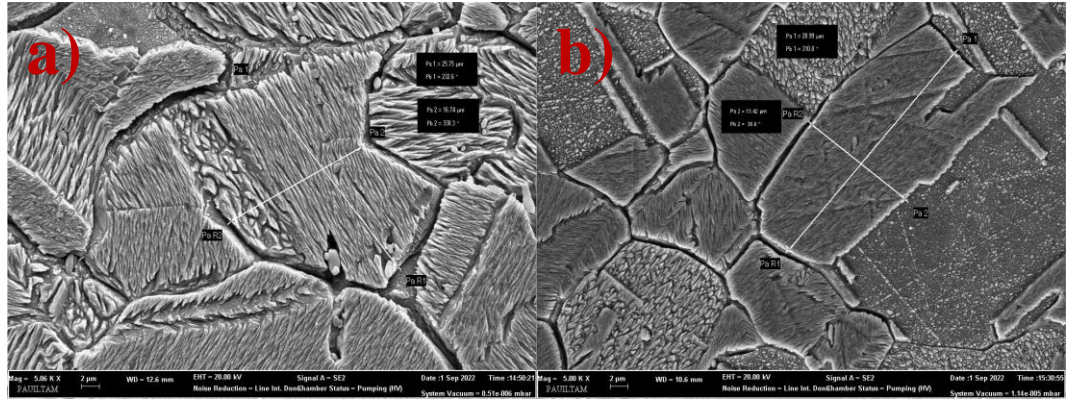


Şekil 5.5.20: 4. Deneş-KB5-1500X (En Yüksek Sertlik Değeri)

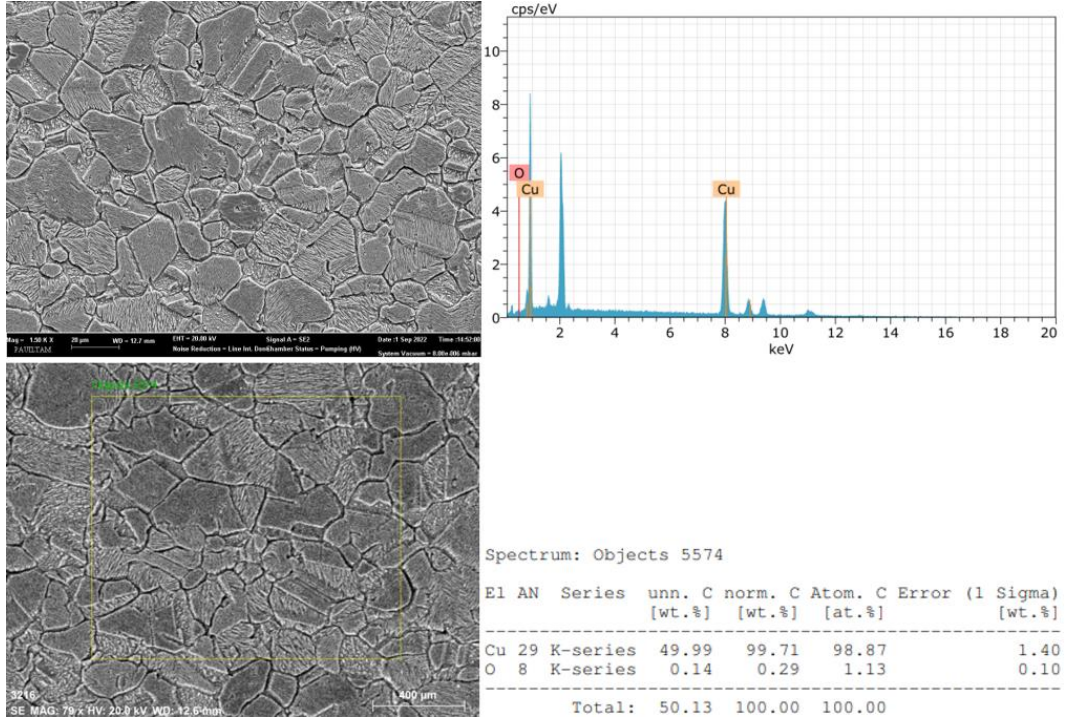
Şekil 5.5.20: a) 2. Deneş-KB1-5000X (En İyi Çekme Mukavemet Değeri), b) 3. Deneş-KB1-5000X (En Kötü Çekme Mukavemet Değeri), c) 5. Deneş-KB1-5000X (En Düşük Sertlik), d) 6. Deneş-KB1-5000X (En Yüksek Sertlik), e) 8. Deneş-KB1-5000X (En Yüksek Direnç)” ve “Şekil 5.48: a) Cu-ETP-1000X, b) Cu-ETP-5000X” incelendiğinde yaklaşık olarak 8 kat oranında küçüldüğü düşünölmektedir. Ayrıca tanelerde yüzey basıncına dik yönde yassılaşma oluştuğu gözlemlenmiştir. Tane yapısındaki bu küçölmeler ile mikro sertlik kazanımı, kaynak bölgesinde civarında mukavemet kazancı olduğu görölmektedir.



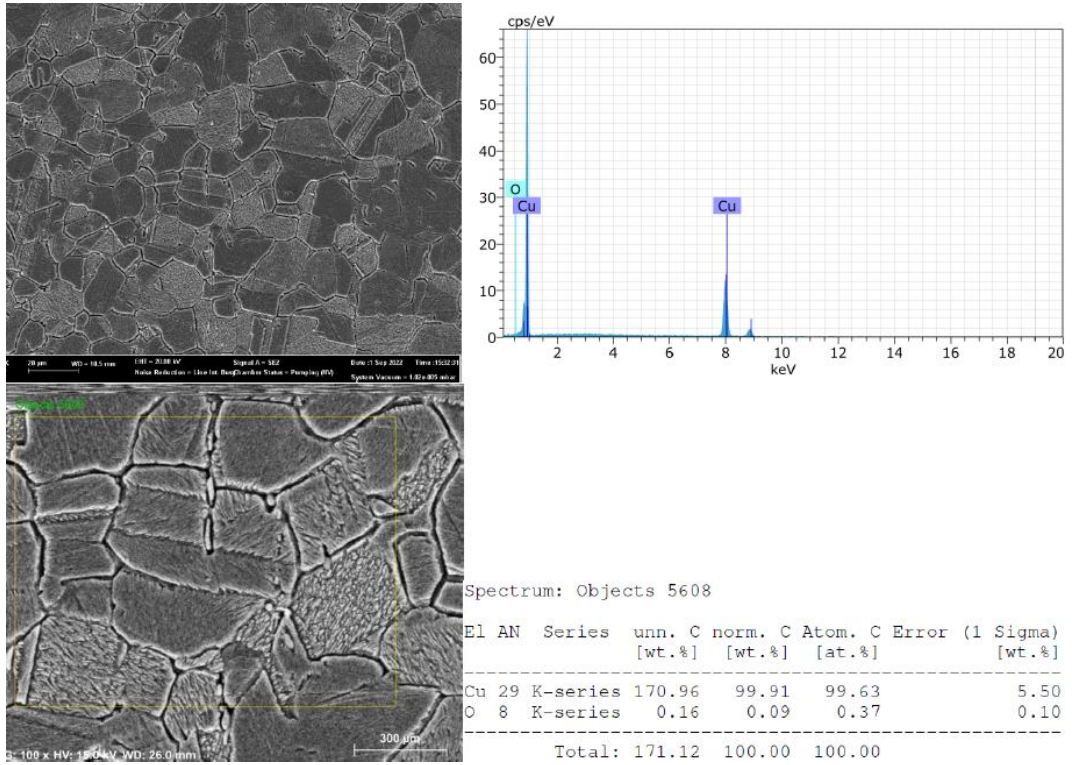
Şekil 5.5.21: 7. Deney-KB5-1500X (En Düşük Sertlik Değeri)



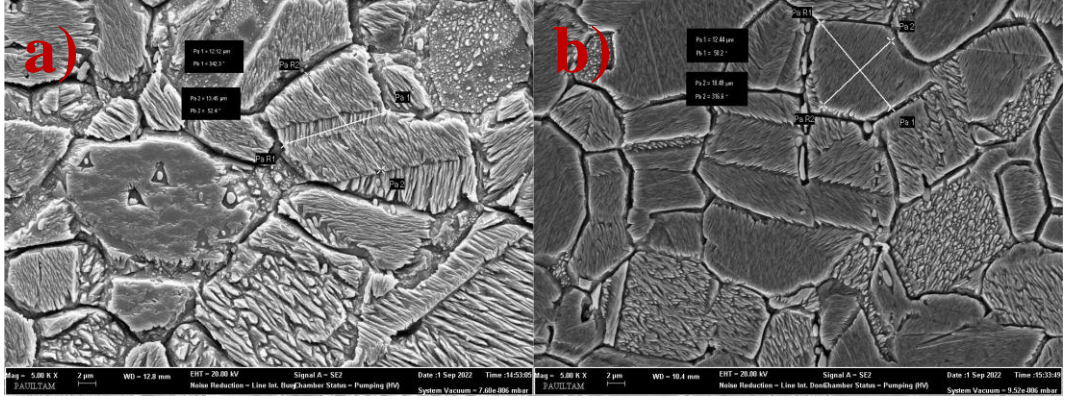
Şekil 5.5.22: a) 4. Deney-KB5-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deney-KB5-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)



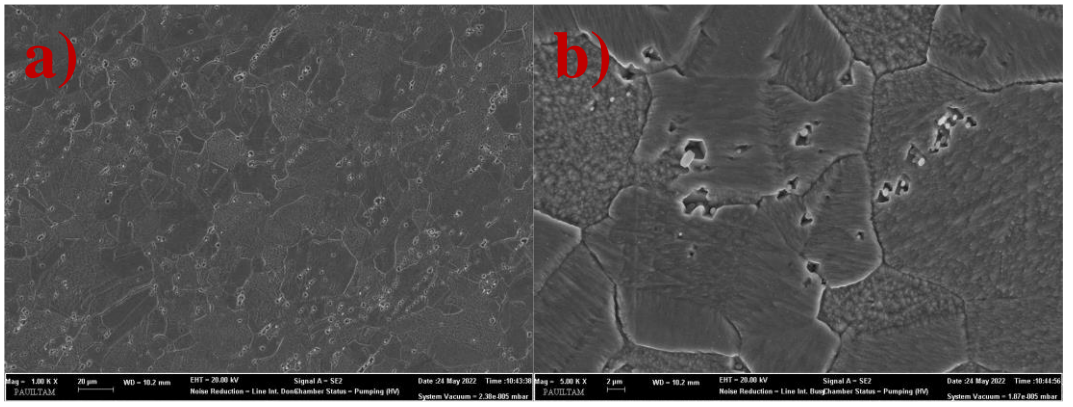
Şekil 5.5.23: 4. Deneý-KB6-1500X (En Y¼ksek Sertlik Deęeri)



Şekil 5.5.24: 7. Deneý-KB6-1500X (En D¼ş¼k Sertlik Deęeri)



Şekil 5.5.25: a) 4. Deney-KB6-5000X (En Yüksek Sertlik Değeri), b) 7. Deney-KB6-5000X (En Düşük Sertlik Değeri)



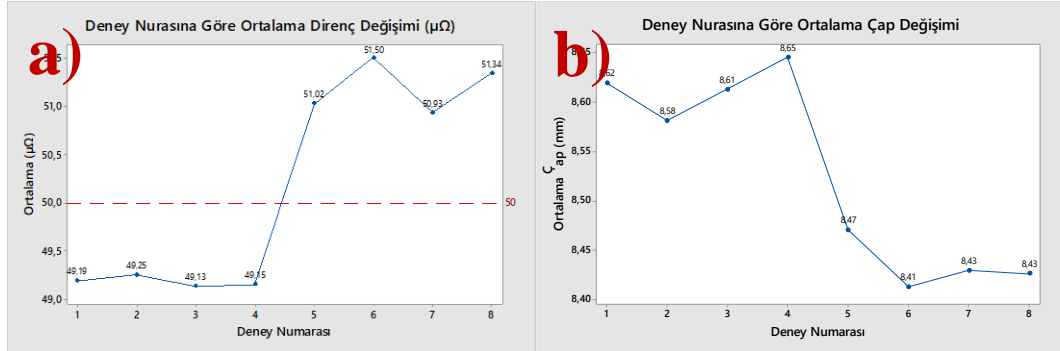
Şekil 5.5.26: a) Cu-ETP-1000X, b) Cu-ETP-5000X

6. TARTIŞMA

6.1 Kaynak Bölgesi Direnç Değişiminin İncelenmesi

Bu incelemede farklı proseslerde de kullanılan soğuk basınçlı kaynak metodunun nihai ürünlerde uygulanması sonucunda, üründeki direnç değişiminin etkileri incelenmiştir. Bu direnç değişiminin sebebi malzeme direnç formülü dikkate alınarak incelendiğinde, yapılan analizlerde kaynak bölgesindeki çaptaki artış ile ciddi bir ilişkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca tane yapısındaki küçülmeler kaynaklı da direnç ölçümünde bir miktar değişim olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, direnç değişiminin formülde de (8) belirtildiği gibi iletkenin boyu (L) ve öz direnci (R_0) sabit tutulduğunda, malzeme çap dolayısıyla kesit (S) artışı ile ters orantılı bilinmektedir. İletkenin boyu ve öz direnci sabit tutulduğunda, malzeme çap artışı ile direncin düşük ölçüldüğü gözlemlenmiştir. (bkz. Şekil 6.1.1)



Şekil 6.1.1: a) Deneysel Numarasına Göre Direnç (µΩ) Değişimi, b) Deneysel Numarasına Göre Ortalama Çap Değişimi

$$R = R_0 \cdot \frac{L}{S} \quad (8)$$

6.2 Kaynak Bölgesi Çap Değişiminin İncelenmesi

Bu incelemede kaynak bölgesindeki çap değişiminin, ilk haddeye girişinde oluşacağı şekilde değişimi ve gerinim etkileri düşünülmüştür. Ayrıca olası takılmaların oluşması durumunda, tel yolunda ve telde oluşacak ani yük artışı vb. kaynaklı kopmaların oluşabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple çaptaki artış dikkate alınarak incelenmiştir.

Yukarıda direnç değişimi kısmındaki tartışmada da açıklandığı gibi çap, direnç faktörünün en kuvvetli belirleyicisi olarak görülmektedir. Şekil 6.1.1'de gösterildiği gibi çap artışı ile direnç düşmekte ve çap düşümü ile direnç artmaktadır. Direnç ve çap arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir.

Çap, 5. bölümde ana etki grafiğinde de görüldüğü gibi ve Tablo 5.3.1.1'de çap değişimi için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre %94,27'lik oranla vuruş sayısının çap artışı domine ettiği görülmüştür. Çap vuruş sayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bu değişimin nedeni ise vuruş sayısı artışı ile oluşan kaynak çapağının artması ve bunun sonucunda düşük vuruş sayısında çapın yüksek çıktığı düşünülmektedir.

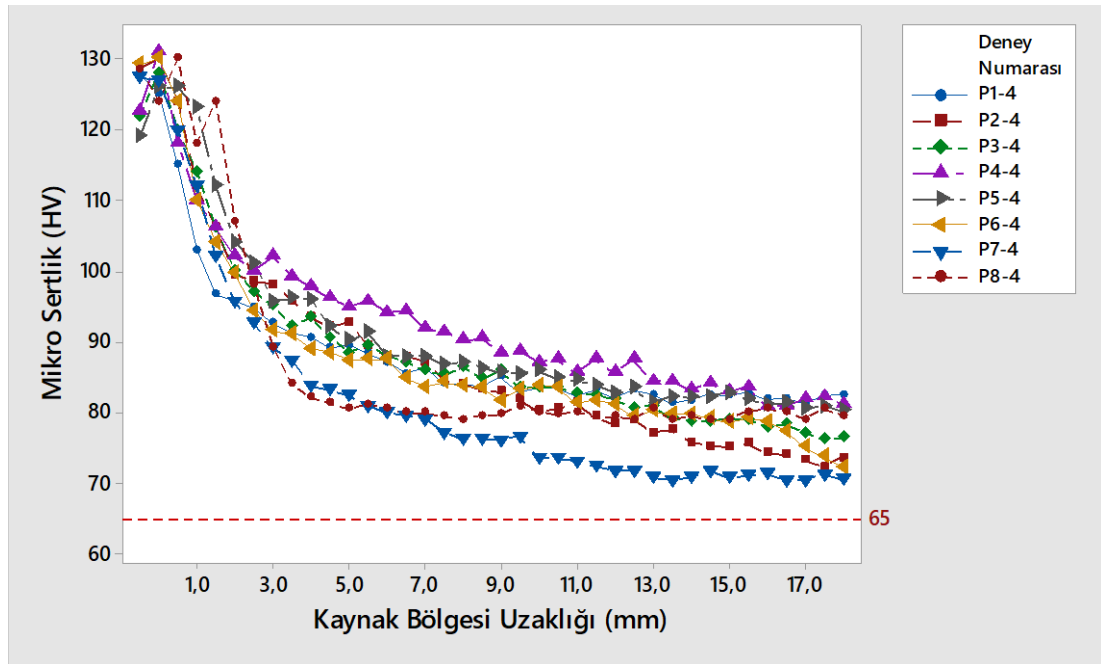
6.3 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak Mikro Sertlik Değişiminin İncelenmesi

Bu incelemede soğuk basınçlı kaynak metodu ile birleştirilen malzemelerde pekleşme kaynaklı sertlik artışı olmaktadır. Bu sertlik değişimleri incelendiğinde, sertleşmenin bir miktarının makinenin sıkma çenesi kaynaklı olduğu gözlemlenmiş ancak kaynak bölgesine doğru yaklaştıkça, malzemenin sertlik artışının difüzyon kaynağı etkisi ve pekleşme ile hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek sertliğin difüzyon kaynak bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. İstatistiki olarak ana etkileri incelemek için malzeme sertlik değişimleri bölgelere ayrılmıştır. Bu incelemeler sonucunda kaynak bölgesinden başlayarak ilk üç bölgede (KB1, KB2, KB3) istatistiki olarak anlamlı sonuçlara ulaşılamamış olmakla beraber son üç bölgede (KB4, KB5, KB6) ise istatistiki olarak güçlü bir ilişki saptanmıştır. Bu güçlü ilişki değişiminde ise KB4 noktasında vuruş sayısının en büyük etkiye sahip olduğu saptanmış bu sebeple pekleşme kaynaklı etkilerin olduğu düşünülmektedir. Kaynak

bölgesinden uzaklaştıkça, örneğin KB5 noktasında ise vuruş sayısı ve vuruş süresinin ikili etkisi olduğu gözlemlenmiştir. KB6 noktasında ise vuruş sayısı etkisi daha da azalarak yerini kaynak basıncı ve vuruş süresi etkilerine bıraktığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre KB6 dışındaki bölgelerde pekleşme kaynaklı sertlik artışları olmakta ve kaynak bölgesine yaklaştıkça bu etkiler kaynaklı sertliklerde artış olmaktadır.

Sertlik artışlarını incelemedeki amacımız ise bu değişimlerin optimum noktasını tespit edip kalıptan geçirilmesi sırasında oluşacak yükler karşısındaki mikro sertlik değerlerinin prosese sorun yaratmayacak şekilde parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, optimum çalışma seviyesinin belirlenmesi sayesinde, aşırı yük veya fazla çevrim sayısı sebebiyle belirli sürelerde aşınan parçaların ömründe artış beklenmektedir. Yani makine ve yedek parça ömründe artış beklenmektedir.



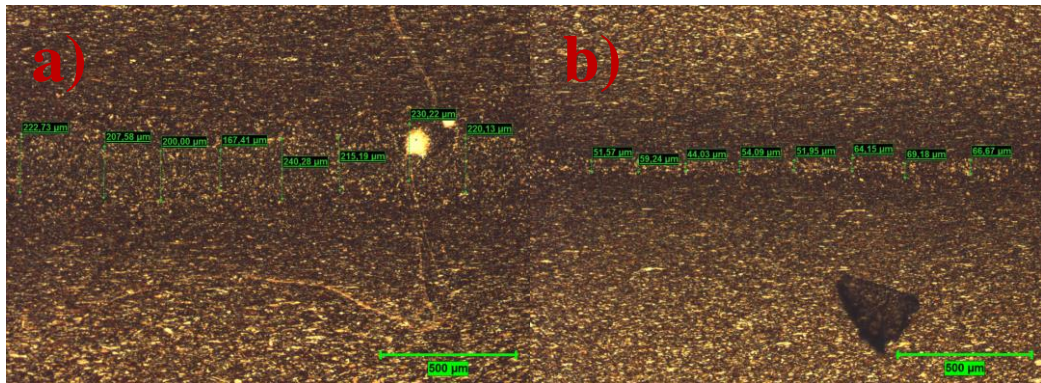
Şekil 6.3.1: Kaynak Bölgesinden Uzaklığa Göre Mikro Sertlik Değişimi

6.4 Kaynak Bölgesi Çekme (Rm-MPa) Mukavemetinin İncelenmesi

Bu çalışmada TS EN ISO 6892-1 standardına göre çizilen teknik resme göre torna yapılan deney numunelerine çekme testi yapılmıştır. Test sonuçlarının birbirine yakın çıkmasına rağmen istatistiki olarak sırasıyla vuruş süresi, kaynak basıncı ve vuruş sayısı*vuruş süresi faktörlerinin anlamlı etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu etki sonuçları bize vuruş sayısının etkili olduğu ilk üç bölgede (KB1, KB2, KB3) sertlik/mukavemet artışı kaynaklı kopma olmadığını göstermektedir. Yani çekme deney setinde malzemenin sünek bir malzeme olması nedeniyle, sertlik artışı kaynaklı KB1, KB2 ve KB3 bölgelerinde çekme mukavemetin artışı ile kopma beklenmemektedir. Kopmalar sertliğin en düşük olduğu bölgelerden olmaktadır. Hazırlanan deney tasarımına göre bu bölgeler KB4 ve KB5 bölgeleridir.

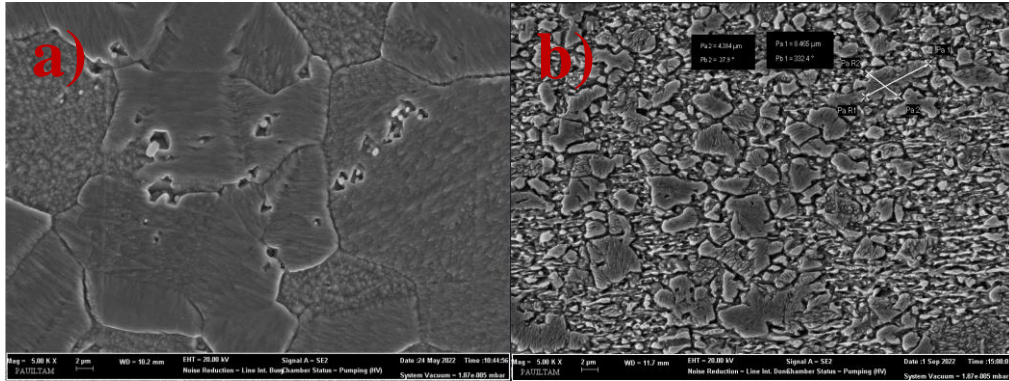
6.5 Kaynak Bölgesi ve Uzaklığa Bağlı Olarak İç Yapı Değişiminin İncelenmesi (Optik mikroskop ve FESEM analizlerinin yapılması)

Numunelerin 50X büyütülerek mikroskop ile kaynak bölgelerindeki kalınlık değişimleri incelenmiştir. Örnek olarak aşağıda 3 numaralı deney ile 4 numaralı deneydeki kaynak kalınlıklarının değerleri verilmiştir. Aşağıdaki değerlere göre 3. Deneyin ölçüm ortalaması 213 mikron iken 4. Deneyin sonucu ise 58 mikron gelmektedir. Deneylerin kaynak kalınlıklarının değiştiği tespit edilmiştir. Tablo 6.3'te de gösterildiği gibi her bir deney numunesinde alınan kaynak kalınlık ölçümleri farklı sonuçlar vermektedir. Bu durumda optik mikroskop ile alınan ölçümlerde ana etkisinin kaynak uçlarının olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.5.1: a) 3. Deney-50X-Kaynak Kalınlığı, b) 4. Deney-50X-Kaynak Kalınlığı

Numunelerin 1500X ve 5000X büyütülerek Sem cihazında iç yapıdaki deney sonuçları incelendiğinde soğuk basınçlı kaynak etkileriyle kaynak bölgesinde tane büyüklüklerinin yaklaşık olarak 8 kat oranında küçüldüğü düşünülmektedir (bkz. Şekil 6.5.2). Ayrıca tanelerde yüzey basıncına dik yönde yassılaşıma olduğu gözlemlenmiştir. Bu yassılaşımanın nedeninin ise difüzyon işlemine zorlanan malzemenin tane yapılarının kuvvet kaynaklı ve birleştirme kuvvetine dik yönde uzayarak kırıldığı düşünülmektedir.



Şekil 6.5.2: a) Cu-ETP-5000X, b) 2.Deney-KB1-5000X

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışmasında, soğuk basınç kaynağı ile birleştirilmiş bakır tellerdeki işlem parametrelerinin (Vuruş sayısı, vuruş süresi ve kaynak basıncı) ve bunlara ait etkileşimlerin mikro sertlik, çekme dayanımı ve elektriksel direnç üzerindeki etkileri Taguchi metodu ve regresyon analizi ile araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

7.1 Kaynak Bölgesinin Direnç Değişimine ait Sonuçlar

- ANOVA'ya göre, vuruş sayısı, vuruş süresi, kaynak basıncı, vuruş sayısı-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin elektriksel direnç üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. 97,33%'lük oranla vuruş sayısının elektriksel direnci domine ettiği ve bunu sırasıyla kaynak basıncı (%1,41) ve vuruş sayısı-kaynak basıncı (%0,98) ve vuruş süresi (%0,25) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.
- Regresyon analizine göre, faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin direnç üzerindeki etkileri %99,99'lük belirleme katsayısında modellenmiştir ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu grafiklerle de doğrulanmıştır
- En düşük direnç değeri vuruş sayısının birinci ($A=4$) vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının birinci seviyesinde ($C=4$ bar) $49,13 \mu\Omega$ olarak belirlenmiştir.
- Optimum elektriksel direncin elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin ikinci ($B=5$ sn) ve kaynak basıncının birinci ($C=4$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama $49,15 \mu\Omega$ 'luk direnç değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir.

7.2 Kaynak Bölgesi Çap Değişimine ait Sonuçlar

- ANOVA'ya göre, vuruş sayısı, vuruş süresi, kaynak basıncı, vuruş sayısı-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin çap değişimi üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %94,27'lik oranla vuruş sayısının çap artışını domine ettiği ve bunu sırasıyla vuruş süresi-kaynak basıncı (%2,84), kaynak basıncı (%0,98) ve vuruş süresi (%0,81) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.
- Sonuç olarak 12'lik vuruş sayısında çap değerinde aşırı bir düşüş elde edilmiştir. Vuruş süresinin çap değişimi ile doğru, kaynak basıncı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük çap değeri vuruş sayısının altıncı (A=12) vuruş süresinin ikinci (B=0sn) ve kaynak basıncının birinci seviyesinde (C= 6 bar) 8,41 mm olarak belirlenmiştir.
- Regresyon analizine göre faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çap değişimi üzerindeki etkileri %99,95'lik belirleme katsayısında modellenmiştir ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.
- Optimum çap değişiminin elde edildiği vuruş sayısının birinci (A=12), vuruş süresinin birinci (B=0 sn) ve kaynak basıncının ikinci (C=6 bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama 8,42 mm'lik çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir.

7.3 Kaynak Sertliğine ait Sonuçlar

- İlk üç bölgede (KB1, KB2 ve KB3) Regresyon analizi ve ANOVA'ya göre anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. KB1'de maksimum sertlik vuruş sayısının birinci (A=12), vuruş süresinin birinci (B=0 sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) 129,2 HV olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca ortalama 125,6 HV' lik ortalama sertlik değeri elde edilmiştir. KB2'de maksimum sertlik A=12, B=0 ve C=4 seviyelerinde 121,8 HV olarak elde edilmiş ve ortalama 117,4 HV' lik sertlik gözlemlenmiştir. Son olarak KB3' de A=4,

B=5sn ve C=6 bar seviyelerinde 101,3 HV' lik maksimum sertlik elde edilmiş ve bu bölgede ortalama 97,2 HV' lik sertlik değerine ulaşılmıştır.

- ANOVA' ya göre, KB4 için vuruş sayısı, vuruş sayısı-vuruş süresi, vuruş süresi-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin sertlik üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %38,76'lık oranla vuruş sayısının sertlik üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla vuruş sayısı-vuruş süresi (%35,41) ve vuruş sayısı-kaynak basıncı (%14,04) etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir. KB5 ve KB6'da benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. İki bölgede de vuruş sayısı, vuruş sayısı-vuruş süresi ve vuruş süresi-kaynak basıncı faktör ve etkileşimlerinin anlamlı olduğu elde edilmiştir. KB5'te en anlamlı işlem parametresi vuruş sayısı-vuruş süresi etkileşimi (%45,58) olup bu parametreyi vuruş sayısı (%32,40) ve vuruş süresi-kaynak basıncı (%13,74) faktör ve etkileşimleri izlemektedir. Buna karşın, KB6'da vuruş süresi-kaynak basıncının %51,37'lik oranla sertliği domine ettiği bu parametreyi vuruş sayısı-vuruş süresi (%24,83) ve vuruş sayısı (%13,59) işlem parametreleri izlemektedir.
- Regresyon analizine göre, KB4, KB5 ve KB6 için faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin sertlik üzerindeki etkileri sırasıyla %99,92, %99,93 ve %99,71'lik belirleme katsayısında modellenmiştir ve oldukça tatminkardır. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu grafiklerle doğrulanmıştır.
- KB4 için optimum seviyeler vuruş sayısının birinci (A=4), vuruş süresinin ikinci (B=5sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) 96 HV olarak elde edilmiştir
- KB5 için optimum sertlik değeri vuruş sayısının birinci (A=4) vuruş süresinin ikinci (B=5 sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde (C=6 bar) 90,1 HV olarak elde edilmiştir
- KB4, KB5 ve KB6 için optimum sertliğin elde edildiği vuruş sayısının birinci (A=4), vuruş süresinin ikinci (B=5 sn) ve kaynak basıncının ikinci (C=6 bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama analizi gerçekleştirilmiş ve sırasıyla ortalama 96,1, 90,3 ve 84,2 HV' lik sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir

7.4 Çekme Dayanımına ait Sonuçlar

- ANOVA' ya göre, vuruş süresi, kaynak basıncı ve vuruş sayısı-vuruş süresi faktör ve etkileşimlerinin çekme mukavemeti üzerinde anlamlı oldukları görülmektedir. %45,83'lük oranla kaynak basıncının çekme dayanımı üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla vuruş süresi (%37,45) ve vuruş sayısı-vuruş süresi (%14,04) faktör ve etkileşimlerinin izlediği elde edilmiştir.
- Regresyon analizine göre, faktörlerin ana ve ikili etkileşimlerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri %99,84'lük belirleme katsayısında modellenmiştir. Buna ek olarak, bu bölgelere ait regresyon eşitliğinden elde edilen tahmin sonuçları ile analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu grafikte de desteklenmiştir.
- Optimum çekme dayanımı vuruş süresinin birinci ($A=4$), vuruş süresinin birinci ($B=0$ sn) ve kaynak basıncının ikinci seviyesinde ($C=6$ bar) 233,6 MPa olarak elde edilmiştir
- Optimum çekme dayanımının elde edildiği vuruş sayısının birinci ($A=4$), vuruş süresinin birinci ($B=0$ sn) ve kaynak basıncının ikinci ($C=6$ bar) seviyelerinde üçer adet doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve ortalama 233,72 MPa'lık çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerin hesaplanan güven aralıkları içinde olduğu görülmektedir.

7.5 İç Yapıya ait Sonuçlar

- Numunelerin 1500X ve 5000X büyütülerek Sem cihazında iç yapıdaki deney sonuçları incelendiğinde soğuk basınçlı kaynak etkileriyle kaynak bölgesinde tane büyüklüklerinin yaklaşık olarak 8 kat oranında küçüldüğü düşünülmektedir (Şekil 6.5.2). Ayrıca tanelerde yüzey basıncına dik yönde yassılaşıma olduğu gözlemlenmiştir. Bu yassılaşımanın nedeninin ise difüzyon işlemine zorlanan malzemenin tane yapılarının kuvvet kaynaklı ve birleştirme kuvvetine dik yönde uzayarak kırıldığı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen istatistiksel analizler ve yapılan SEM analizleri neticesinde elde edilen çıkarımlar ışığında aşağıdaki öneriler yapılabilir:

7.6 Öneriler

- Soğuk basınçlı kaynak prosesinde yaptığımız farklı parametre deneylerinde üç farklı değişken ile çalışılmıştır. Ayrıca bu parametrelerden de yalnızca uç noktalarda çalışma yapılmıştır. Deneylerde parametre sayıları atılarak sonuçlar değerlendirilebilir.
- Malzemenin kaynağının yapıldığı yüzeylerde herhangi bir değişim etkisi incelenmemiştir. Kaynak yüzeylerinin kaynak performansın etkisi üzerinde incelemeler yapılabilir.
- Yine bu çalışmada sadece Cu-ETP malzemesi ile çalışılmıştır. Prosesteki parametre değişimlerinin, malzemenin değiştirilmesi sonucundaki etkileri araştırılabilir. Örnek olarak CuMg0,2/CuMg0,2, OFC/OFC veya CuMg0,2/OFC kaynak denemeleri yapılabilir ve bunların özellikleri incelenebilir.
- Ayrıca Sem-EBSD analizi kullanılarak parametre değişimindeki tane sayılarındaki değişimler daha detaylı analiz edilebilir ve matematiksel olarak daha kolay kıyaslanabilir. Kaynak noktalarındaki tane yönelmeleri incelenerek kaynak noktasının en fazla deformasyona zorlandığı nokta saptanabilir.
- İlerleyen dönemde FEA analizi yardımı ile gerçeğe yakın sonuçlar yakalanıp farklı proseslere uyarlanarak optimum parametre değerleri çıkartılabilir.

8. KAYNAKLAR

Aboudi, D., Lebaili, S., Taouinet, M. and Zollinger, J., “Microstructure evolution of diffusion welded 304L/Zircaloy 4 with copper interlayer”, *Materials & Design*, 116, 386–394. doi:10.1016/j.matdes, (2016).

Akca, E., Gürsel, A., “The importance of interlayers in diffusion welding”, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, doi: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v3i2.54>, (2016).

Anık S., Vural M., “Özel Kaynak Yöntemleri (Sürtünme, Soğuk Basınç, Dar Aralık, Patlamalı ve Difüzyon Kaynağı ve Yapıştırma)”, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, (1993)

Aydın, K., Kaya, Y. and Kahraman, N., “Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper”, *Materials & Design*, 37, 356–368. doi:10.1016/j.matdes.(2012).

Bay, N., “Cold Pressure Welding”, *The Mechanisms Governing Bonding. Journal of Engineering for Industry*, 101(2), 121. doi:10.1115/1.3439484, (1979).

Burster, [RESISTOMAT® 2304], (Mayıs, 2022), <https://www.burster.com/en/measure-test-devices/microohm-and-milliohmmeter/p/detail/resistomatr-2304>, (2022).

Chandan, S., Krishna, C., K., Ganesh K., Natraj Y., “Creep behavior of polycrystalline Al (metal)-Cu50Zr50 (metallic glass) cold welds”, *Materials Today: Proceedings*, S2214785320370449, doi:10.1016/j.matpr.2020.09.334, (2020).

Chen, S. D., Soh, A. K. and Ke, F. J., "Molecular dynamics modeling of diffusion bonding", *Scripta Materialia*, 52(11), 1135–1140. doi:10.1016/j.scriptamat.2005.02.004, (2005).

Chen, S., Ke, F., Zhou, M. and Bai, Y., “Atomistic investigation of the effects of temperature and surface roughness on diffusion bonding between Cu and Al”, *Acta Materialia*, 55(9), 3169–3175, doi:10.1016/j.actamat, (2006).

Christian, S., H., Christoph, E., Dmytro, R., Werner, H., Guido, G., Jurgen, M., H., “Investigation of Cold Pressure Welding: Cohesion Coefficient of Copper”, *Key Engineering Materials*, 651-653(), 1421–1426. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.1421, (2015).

Danut, I., Mihaela, I., Jaime, P., R., José Luis, O., M., Manuel, B., L., “Strain-Hardness Correlation in Aluminium Butt Cold Welded Joints”, *Safety and reliability of welded components in energy and processing industry (International conference)*, ISBN 978-3-85125-019-0, (2008).

Donelan, J.A., *Industrial Practice In Cold Pressure Welding*, *British Welding Fnl.*,5-12, (1959).

Ebbert, C., Schmidt, H. C., Rodman, D., Nürnberger, F., Homberg, W., Maier, H. J. and Grundmeier, G., “Joining with electrochemical support (ECUF): Cold pressure welding of copper”, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10), 2179–2187, doi:10.1016/j.jmatprotec, (2014).

Efe A., “Bakır Tellerin Soğuk Basınç ve Direnç Kaynağı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2000).

FESEM, [FESEM Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu], (Mayıs, 2022), <http://iltam.pau.edu.tr/ cihazlar/feSEM.html>, (2022).

Gietzelt, T., Toth, V. and Huell, A., “Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure”, *Joining Technologies*, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/64312>, (2016).

Görtan, M. O. and Yaldız, A., “Numerical investigations on the cold welding of aluminum and steel using forward extrusion”, *Proceedings Of The 22nd International Esaform Conference On Material Forming: Esaform 2019*, doi:10.1063/1.5112531, (2019).

Hongjian, Z., Wen-ping, W., Runni, W., Guoming, H., Re, X., “Effects of various conditions in cold-welding of copper nanowires: A molecular dynamics study”, *Journal of Applied Physics*, 122(20), 204303, doi:10.1063/1.5004050, (2017).

Huang, Y., Ran, X., Yan, X., Guo, T., “Effect of heat treatment on microstructure and properties of single crystal copper cold-welded joints”, *China Welding*, 28(2): 1-9, doi: 10.12073/j.cw.20190320001, (2019).

Iordachescu, M., Constantin, E., “Aluminium Plastic Deformation Process in Butt Cold Welding”, *6 th International Conference on Joining Ceramics, Glass and Metal - Joining Ceramic -Glass -Metal 2002, Munich*, pp 224-231, (2002).

Iordachescu, M., Iordachescu, D., Scutelnicu, E. and Ocaña, J. L., “FEM model of butt cold welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(5), 402–409, doi:10.1179/174329313x13789830157140, (2007).

Iordachescu, D., Iordachescu, M., Planas, J., Ocaña, J.L. and Blasco, M., “Strain-Hardness Correlation in Aluminium Butt Cold Welded Joints”, *Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*, <https://www.researchgate.net/publication/45315658>, (2008).

Kudo, H., Kikuchi, Y., Miyazaki, K., *Ann. CIRP* 27 165. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61760-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61760-0), (1978).

Kundu, S., Ghosh, M., Laik, A., Bhanumurthy, K., Kale, G. B. and Chatterjee, S. “Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer”, *Materials Science and Engineering: A*, 407(1-2), 154–160, doi:10.1016/j.msea.2005.07.010, (2005).

Latypov, R.A.; Bulychev, V.V.; Latypova, G.R.; Paramonov, S.S., “Dislocation model of the formation of a welded joint in cold welding”, *Materials Today: Proceedings*, doi:10.1016/j.matpr.2020.08.101, (2020).

Li, P., Li, J., Xiong, J., Zhang, F. and Raza, S. H., “Diffusion bonding titanium to stainless steel using Nb/Cu/Ni multi-interlayer”, *Materials Characterization*, 68, 82–87, doi:10.1016/j.matchar.2012.03.016, (2012).

Lilleby, A., Grong, Ø. and Hemmer, H., “Cold pressure welding of severely plastically deformed aluminium by divergent extrusion”, *Materials Science and Engineering: A*, 527(6), 1351–1360, doi:10.1016/j.msea.2009.10.003, (2010).

Loginov, Y. N., Illarionov, A. G., Klyueva, S. Y. and Ivanova, M. A., “Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks”, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 53(1), 45–53, doi:10.3103/s1067821212010154, (2012).

Mahendran, G., Balasubramanian, V. and Senthilvelan, T., “Influences of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg-Cu dissimilar joints”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(6), 997–1005, doi:10.1016/s1003-6326(09)60248-x, (2010).

Mazaheri, H., Aval, H. J. and Jamaati, R., "Achieving high strength-ductility in pure copper by cold rolling and submerged friction stir processing (SFSP)", *Journal of Manufacturing Processes*, 67, 496–502, doi:10.1016/j.jmapro.2021.05.018, (2021).

Mazak, [QUICK TURN SMART 200], (Mayıs, 2022), Web adresi:<https://www.mazak.com.vn/quick-turn-smart-200/>, (2022).

Mümin Ş., H. Erol A., Kaan Ö., “Çelikler Ve Demir-Dışı Malzemelere Soğuk Basınç Kaynağının Uygulanması”, (Mayıs, 2022), Web adresi: <https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/S33.pdf>, (2022).

Nikon, [ECLIPSE LV150NA and LV150N], (Mayıs, 2022), <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/industrial-microscopes/upright-microscopes-eclipse-lv150n-and-lv150na>, (2022).

Nikon, [SMZ 745/745T], (Mayıs, 2022), <http://www.nikonmikroskop.com/content.php?cid=254>, (2022).

Nishikawa, S., Arayashiki, T., Takahashi, M., Chiba, J., Nogami, M. And Hongo, T., “Effect of Interfacial Microstructure on Mechanical Properties of Cold Pressure-Welded Al-Cu Joints Subjected to Annealing”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, doi:10.1007/s11665-021-05970-3, (2021).

Olia, H., Abbasi, M., Razavi, S., H., “Evaluation of diffusion and phase transformation at Ag/Al bimetal produced by cold roll welding”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22(2), 0–317, doi:10.1016/s1003-6326(11)61176-x, (2012).

Pereira, Z. S.; da Silva, E. Z., “Cold Welding of Gold and Silver Nanowires: A Molecular Dynamics Study”, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(46), 22870–22876, doi:10.1021/jp207842v, (2011).

Peter, N. J., Gerlitzky, C., Altin, A., Wohletz, S., Krieger, W., Tran, T. H., Erbe, A., “Atomic level bonding mechanism in steel/aluminum joints produced by cold pressure welding”, *Materialia*, 100396, doi:10.1016/j.mtla.2019.100396, (2019).

Pinar, A., M., “Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method”, *The Arabian Journal for Science and Engineering B: Engineering*, Vol. 38, No. 3, pp 705-714, DOI 10.1007/s13369-012-0372-5, (2013).

Pinar, A., M., Fırat, K., “AISI 4140 Çeliğın Çok Yönlü Takımla Tormalanmasında Yüzey Pürüzlülük Performansının Optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi (Journal of Polytechnic)*, Cilt 19, Sayı 4, pp 491-498, (2016).

Pinar, A., M., Fırat, K., “Machinability Evaluation of Multi-Directional Turning Tools”, *Materials Testing*, Vol. 62, No. 3, pp 311-316, DOI: 10.3139/120.111487, (2020).

Pwm, [EP500], (Mayıs, 2022), Web adresi: <https://coldpressurewelding.com/index.php/products/rod/ep500>, (2022).

Pwm, [Uygun metallar], (Mayıs, 2022), Web adresi: <https://coldpressurewelding.com/tr/home-turkish/what-is-cold-pressure-welding-tr>, (2022).

Samouhos, M., Peppas, A., Angelopoulos, P., Taxiarchou, M. And Tsakiridis, P., “Optimization of Copper Thermocompression Diffusion Bonding under Vacuum: Microstructural and Mechanical Characteristics”, *Metals*, 9(10), 1044, doi:10.3390/met9101044, (2019).

Sato, Y. S., Urata, M., Kokawa, H. and Ikeda, K., "Hall–Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys", *Materials Science and Engineering: A*, 354(1-2), 298–305, doi:10.1016/s0921-5093(03)00008-x, (2003).

Shimatsu, T.; Uomoto, M., “Atomic diffusion bonding of wafers with thin nanocrystalline metal films”, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 28(4), 706–. doi:10.1116/1.3437515,(2010).

Stroiman, I. M. and Mitrukov, G. A., “Cold-welding of aluminium and copper”, *Welding International*, 16(6), 488–490. doi:10.1080/09507110209549564, (2002).

Struers, [DuraScan], (Mayıs, 2022), Web adresi: <https://documents.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@aiim/documents/doc/uow155169.pdf>, (2012).

Tan, C. S.; Lim, D. F.; Singh, S. G.; Goulet, S. K.; Bergkvist, M., “Cu–Cu diffusion bonding enhancement at low temperature by surface passivation using self-assembled monolayer of alkane-thiol”, *Applied Physics Letters*, 95(19), 192108, doi:10.1063/1.3263154, (2009).

Topic, I., Höppel, H. W. and Göken, M., “Friction stir welding of accumulative roll-bonded commercial-purity aluminium AA1050 and aluminium alloy AA6016”, *Materials Science and Engineering: A*, 503(1-2), 163–166. doi:10.1016/j.msea.2007.12.057, (2009).

Toshio, E., Kenji, İ., Naofumi A., "Diffusion Welding of Copper to Aluminum(Materials, Metallurgy, Weldability)", *Osaka University Knowledge Archive : OUKA*, Vol. 8, No. 1, p.77-p.84, doi: <http://hdl.handle.net/11094/7282>, (2012).

Travessa, D., Ferrante, M., Ouden, G., "Diffusion bonding of aluminium oxide to stainless steel using stress relief interlayers", *Materials Science and Engineering A337 (2002) 287_296*, (2001).

Tylecote, R., F., "The Solid Phase Welding of Metals", *Edward Arnold Publishers Ltd., London*, <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000011>, (1968).

Uslularhadde, [Elektrik Direnç Kaynağı], (Mayıs, 2022), Web adresi: <https://uslularhadde.com/elektrik-direnc-kaynagi>, (2022).

Varmazyar, J. and Khodaei, M., "Diffusion bonding of aluminum-magnesium using cold rolled copper interlayer", *Journal of Alloys and Compounds*, doi:10.1016/j.jallcom.2018.09.320, (2018).

Wagener, H. W. and Haats, J., "Pressure welding of corrosion resistant metals by cold extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1-4), 275–280, doi:10.1016/0924-0136(94)90352-2, (1994).

Woźniak, H., "The results of the so far performed investigations of Al-Cu butt cold pressure welding by the method of upsetting", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 9(1), 135–145, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60046-6, (2009).

Yanni, W., Hui, L., Fu, S., Juntao, Z., "The Interfacial Characterization and Performance of Cu/Al-Conductive Heads Processed by Explosion Welding", *Cold Pressure Welding, and Solid-Liquid Casting. Metals*, 9(2), 237, doi:10.3390/met9020237, (2019).

Zhang, W., Bay, N. and Wanheim, T., "Influence of hydrostatic Pressure in Cold-Pressure Welding", *CIRP Annals*, 41(1), 293–297, doi:10.1016/s0007-8506(07)61207-4, (1992).

Zhang, Y., Li, J., Zhou, H., Hu, Y., Ding, S. and Xia, R., "Cold welding behavior of metallic glass nanowires: Insights from large-scale numerical simulations", *Journal of Materials Science*, 56(28), 15906–15920, doi:10.1007/s10853-021-06336-9, (2021).

Zhilyaev, A. P., Werner, T. and Cabrera, J. M., "Characterization of bimetallic interface in Cu-Al and Ni-Cu rods cold-welded by ECAP", *Advanced Engineering Materials*, doi:10.1002/adem.201900653, (2019).

Zhou, H., Li, J., Xian, Y., Hu, G., Li, X. and Xia, R., "Nanoscale Assembly of Copper Bearing-Sleeve via Cold-Welding: A Molecular Dynamics Study", *Nanomaterials*, 8(10), 785. doi:10.3390/nano8100785, (2018).

Zuruzi, A. ., Li, H. and Dong, G., "Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air", *Materials Science and Engineering: A*, 270(2), 244–248, doi:10.1016/s0921-5093(99)00188-4, (1999).