S355 KLEVİS BRAKETLERİN PROJEKSİYON KAYNAK PROSESİ PARAMETRE OPTİMİZASYONU

KÜBRA KORKMAZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

S355 KLEVİS BRAKETLERİN PROJEKSİYON KAYNAK PROSESİ PARAMETRE OPTİMİZASYONU

KÜBRA KORKMAZ
502210060

Prof. Dr. Ali Bayram
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA– 2021

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Kübra Korkmaz tarafından hazırlanan "S355 KLEVİS BRAKETLERİN PROJEKSİYON KAYNAK PROSESİ PARAMETRE OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali Bayram

Başkan : İmza

Üye : İmza

Üye : İmza

Üye : İmza

Üye : İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

Bilimsel Etik Bildirim Sayfası

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olaraksunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitedebaşka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

../../….
İmza
Kübra Korkmaz

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım haklarıtarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof.Dr.Ali Bayram	Kübra Korkmaz
Tarih	Tarih
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI :Kübra Korkmaz
ÜNVANI :
Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim dalı
E-POSTA : kbrakorkmaz95@gmail.com
PROGRAMI: YÜKSEK LİSANS
ORCID: 0009-0005-7165-9050
TÜBİTAK ID : TBTK-0202-9715
WOS RESEARCHER ID : NSV-0367-2025
SCOPUS AUTHOR ID :
Google Scholar ID :g-Cmw7IAAAAJ

DANIŞMAN
Adı SOYADI :Prof.Dr.Ali Bayram
ÜNVANI : Prof.Dr.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ ABD
E-POSTA : bayram@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 11777
ORCID :0000-0001-7311-8358
TÜBİTAK ID :TBTK-0010-1047
WOS RESEARCHER ID : GZC-1297-2022
SCOPUS AUTHOR ID :50123456789
Google Scholar ID :oCMfGfoAAAAJ

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA
BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. Arı, A., Korkmaz, K., Mühürdar, B., Bayram, A. (2023). PROJEKSİYON KAYNAĞIN PROSES PARAMETRELERİNİN S355MC KLEVİS BRAKETİN BAĞLANTI PERFORMANSINA ETKİSİ. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 28(3), 991-1008. https://doi.org/10.17482/uumfd.1329959
2. ……
3. ……
4. ……
5. ……
6. ……
7. ……
8. ……
9. ……
10. ……

*Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☒

Anahtar Kelimeler:
Process Planning
Compressive Strength

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

S355 KLEVİS BRAKETLERİN PROJEKSİYON KAYNAK PROSESİ PARAMETRE OPTİMİZASYONU

Kübra KORKMAZ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı
Danışman : Prof. Dr. Ali Bayram

Günümüzde gelişen ve ilerleyen bir sektör olan otomotiv sektöründe kullanılan kaynak proseslerinden projeksiyon kaynak konusu bu tezde incelenmek üzere ele alınmıştır. Otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın üretimini gerçekleştirdiği amortisörün bağlantı elemanlarından biri olan klevis braketine uygulanan kaynak işleminin iyileştirilmesine yönelik çalışmada, koparma test verilerinin değerlendirilmesi ve bu doğrultuda en uygun proses parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu tez de daha çok kaynak prosesindeki parametrelerin kopma testi sonucuna etkileri incelenecektir. Parametrelerin belirlenmesi ve bir deney tasarımı yapılması için Taguchi metodundan faydalanılacaktır. MINITAB programında gerekli deney tasarımı ve varyans analizi yapılarak uygun parametreler belirlenecektir. Buna ek olarak yapılan deneylerin kaynak bölgelerinde makro ve mikyo yapı incelemesi yapılıp, sertlik değerlerine de bakılacaktır.

Anahtar Kelimeler : Projeksiyon Kaynak, Taguchi Deney Tasarımı, Parametre optimizasyonu, Amortisör Klevis braket, Koparma testi
2025, vii +58 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

PROJECTION WELDING PROCESS OF S355 KLEVIS BRACKETS PARAMETER OPTIMIZATION

Kübra KORKMAZ

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali Bayram

In this thesis, we discuss projection welding, one of the welding processes used in the rapidly developing automotive sector. By looking at the connection equipment of the shock absorber, which is the production of the automobile company, It is aimed to examine the breakout test results to improve the welding process which plays a role in the production of the clevis bracket and determining the optimal parameters This study focuses on analyzing how different parameters used in the welding process affect the outcomes of rupture tests, aiming to identify the most effective process settings.. The Taguchi method will be used to determine the parameters and design experiments. The appropriate parameters will be determined by performing the necessary experimental design and variance analysis using the MINITAB program.

Key words: Projection welding, taguchi experimental design, parameter optimization,shock absorber,stress rupture test
2025, vii +58 pages.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi çalışmamda öncelikle bana yol gösteren ve yardımcı olan değerli danışmanım Sn. Prof. Dr. Ali Bayram'a teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel çalışmalar için de yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Sn.İbrahim Berk Mühürdar'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük emekleri olan ve beni her zaman destekleyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Kübra KORKMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....i
ABSTRACT.....ii
TEŞEKKÜR.....iii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....vi
1.GİRİŞ.....1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....3
2.1 Elektrik Direnç Kaynağı.....5
2.1.1. Kaynak Akımı.....6
2.1.2. Kaynak Zamanı.....7
2.1.3. Direnç.....8
2.1.4. Baskı Kuvveti.....8
2.1.5. Malzeme Özellikleri.....8
2.1.6. Yüzey Kaplaması.....9
2.1.7. Parça ve Elektrot Geometrisi.....9
2.1.8. Kaynak Makinesi Karakteristiği.....10
2.2. Kabartılı Nokta Kaynağı (Projeksiyon Kaynak).....11
2.2.1. Elektrot Malzemesi Özellikleri.....15
2.2.2. Kaynak Malzemesi Özellikleri.....16
3.MATERYAL METOD.....19
3.1 Taguchi Metodu.....15
3.2 Klevis Braket Yapısı ve Kaynak Prosesi.....24
3.3. Deneysel Çalışmalar.....30
3.3.1. Deney Tasarımı (DOE) ve ANOVA Analizi.....26
4. BULGULAR.....34
5.TARTIŞMA VE SONUÇ.....46
KAYNAKLAR.....54

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
$\sum$	Toplam

Kısaltmalar	Açıklama
ITAB	Isının Tesiri Altındaki Bölge
F	Kuvvet
I	Akım (Amper) (A)
t	Kaynak süresi (cycle)
Q	Isı
R	Direnç
daN	Basınç
kN	Kilonewton
AM	Ana malzeme
FB	Füzyon bölgesi
S/N	Sinyal gürültü oranı
d	Deney sayısı
L	Ortagonal dizi türü
a	Faktörler seviyesi
k	Faktör sayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Kabartı Kaynağında Kısmi Dirençler Projeksiyon Kaynak Prosesi	13
Şekil 2.2.	Projeksiyon Kaynak Prosesi	14
Şekil 2.3.	Farklı sac türlerinde (AHSS, düşük mukavemetli ve konvansiyonel HSS) mukavemet ile uzama oranı arasındaki ilişki	
Şekil 3.1.	Balık Kılçığı Diyagramı	17
Şekil 3.2	Taguchi yönteminin uygulanması sırasında takip edilmesi gereken sistematik süreç akış şeması	23
Şekil 3.3.	Klevis Braket	25
Şekil 3.4.	Kaynak Noktaları	25
Şekil 3.5	Klevis Braketin Geometrisi	26
Şekil 3.6	Kaynak Makinesinde Klevis Braketin Sabitlenmesini Sağlayan Fikstür Yapısı	26
Şekil 3.7	Elektrod Geometrisi	27
Şekil 3.8	Kopma Testi Cihazı	27
Şekil 3.9	Kaynaklanmış Klevis Braket ve Kopma Testi Uygulanmış braket	
Şekil 3.10	Projeksiyon kaynağın geometrik özelliğin şematik gösterimi; Ana malzeme (AM), FB çapı (r) ,FB uzunluğu (b) , ITAB genişliği (a) sac kalınlığı (T),kaynak penetrasyon derinliği (r/T)	
Şekil 3.11	Projeksiyon kaynak makinesi ve özellikleri	29
Şekil 3.12	Safe Window Çalışması	33
Şekil 4.1	1 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	33
Şekil 4.2	2 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	35
Şekil 4.3	3 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	35
Şekil 4.4	4 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	36
Şekil 4.5	5 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	36
Şekil 4.6	6 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	37
Şekil 4.7	7 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	37
Şekil 4.8	8 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	38
Şekil 4.9	9 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	38
Şekil 4.10	10 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	39
Şekil 4.11	11 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	39
Şekil 4.12	12 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	40
Şekil 4.13	13 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	40
Şekil 4.14	14 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	41
Şekil 4.15	15 Nolu Deneyin Kopma Grafiği	41
Şekil 4.16	Seçilen ortogonal dizi MINITAB görüntüsü	42
Şekil 4.17	Numunelerin 2 ve 3 numaralı kaynak noktalarının geometrik ölçümü	44
Şekil 4.18	Projeksiyon kaynak parametrelerinin kopma mukavemetine	46
Şekil 4.19	etkisinin Sinyal-Gürültü (S/N) oranları ile analizi	
Şekil 4.20	Çekme-kayma testi sonuçları ortalamaları	51
Şekil 4.21	Kaynakların mikrosertlik dağılımları	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	2.1.	Kaynak Kalitesini ve Kabiliyetini Etkileyen Unsurlar	4
Çizelge	2.2.	Kabartılı Kaynak için Alaşımsız Çelikler Çalışma Değerleri	12
Çizelge	2.3.	Kabartılı Kaynak için Paslanmaz Çelikler Çalışma Değerleri	12
Çizelge	2.4.	S355 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi	17
Çizelge	2.5.	S355 Çeliğinin Akma ve Çekme Dayanımları	17
Çizelge	3.1.	Deneyde Kullanılan Faktörler Ve Seviyeleri	30
Çizelge	3.2.	Deney Matrisi	30
Çizelge	4.1.	1 Nolu Deney Parametreleri	35
Çizelge	4.2	2 Nolu Deney Parametreleri	36
Çizelge	4.3	3 Nolu Deney Parametreleri	36
Çizelge	4.4	4 Nolu Deney Parametreleri	37
Çizelge	4.5	5 Nolu Deney Parametreleri	37
Çizelge	4.6	6 Nolu Deney Parametreleri	38
Çizelge	4.7	7 Nolu Deney Parametreleri	38
Çizelge	4.8	8 Nolu Deney Parametreleri	39
Çizelge	4.9	9 Nolu Deney Parametreleri	39
Çizelge	4.10	10 Nolu Deney Parametreleri	40
Çizelge	4.11	11Nolu Deney Parametreleri	40
Çizelge	4.12	12 Nolu Deney Parametreleri	41
Çizelge	4.13	13 Nolu Deney Parametreleri	41
Çizelge	4.14	14 Nolu Deney Parametreleri	42
Çizelge	4.15	15 Nolu Deney Parametreleri	42
Çizelge	4.16	Deney Faktörleri ve Seviyeleri	43
Çizelge	4.17	Deney parametreleri tablosu	48
Çizelge	4.18	9 numunenin 2 ve 3 nolu kaynakların geometrik ölçümleri	50
Çizelge	4.19	Numunelerin çekme-kayma test sonuçları ve ortalamaları	50
Çizelge	4.20	Çekme-kayma testi için ANOVA sonuçları	

1.GİRİŞ

Günümüzde endüstride önemli bir paya sahip olan otomotiv sektörü gün geçtikçe gelişmekte ve ilerlemektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan teknolojilerde yenilenmeye geliştirilmeye açık olanak sağlayan bir konudur. Firmalar için üretim proseslerini geliştirmek ve müşteri, pazar ihtiyaçlarına daha iyi cevaplar verebilmek adına üniversitelerde ve firmalarda birçok Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Bu tezde belirlenmiş olan projeksiyon kaynak için parametre optimizasyonu bir otomotiv firmasının müşteri hedeflerine cevap verebilme ihtiyacından doğmaktadır.

Araç süspansiyon sistemi parçalarından olan amortisörler, yoldan kaynaklanan ve tekerleklere iletilen sarsıntı ve titreşimleri aracın şasisine iletmeden emmek veya en aza indirmek için yaylarla birlikte kullanılır. Amortisörün temel görevi yaylarda oluşan salınımı engellemektir. Bu salınımın hareketinin önlenmesi ile birlikte araç yol tutuşu artar ve fren mesafesi kısalır. Bu nedenle amortisörler yolcu güvenliği için önemli bir emniyet parçasıdır. Ülkemizde gerçekleşen trafik kazalarının %30'u araçların bozuk amortisörlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bir amortisörün ömrü en uzun 80 bin kilometre olarak belirlenmiştir. Bu durum ülkemiz yol şartlarında 50 bin kilometreye kadar gerilemektedir. Yol koşulları iyileştikçe ve teknoloji geliştikçe amortisör parçalarından beklentiler de zamanla değişmektedir. Sürekli gelişmekte olan teknolojik yaşamda birçok parça gibi amortisör parçalarının da daha yüksek performans gösteren ürünler olması talep edilmektedir.

Projeksiyon kaynağının otomasyona uyarlanabilirliği ve yüksek hız, çok sayıda projeksiyon ve sac metal grubu üretmenin en önemli avantajlarıdır. Kaynama ve ısıdan etkilenen küçük alanlar ve malzeme özelliklerinde bozulma olmaması, direnç nokta kaynağının sunduğu önemli avantajlardır. Projeksiyon kaynağı tipik bir seri üretim yöntemidir. Elektrodun tek bir hareketiyle aynı anda birden fazla noktanın kaynaklanabilmesi, projeksiyon kaynak yöntemini avantajlı hâle getirmekte ve farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, projeksiyon kaynak yöntemine ait proses parametreleri ve bu parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenecektir. Kaynak sonrasında dayanıklılık temel hedef olduğundan kopma testi sonuçları irdelenecektir.

Bu tez kapsamında, otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılan kaynak teknolojilerinden biri olan projeksiyon kaynağı üzerine odaklanılmıştır. Özellikle amortisör üretiminde kullanılan bu yöntemle ilgili proses parametrelerinin optimize edilmesi, hem ürün kalitesinin artırılması hem de üretim verimliliğinin iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Yapılan çalışma ile farklı kaynak parametrelerinin parça üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde incelenmiş ve ideal işlem koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, hem üretim sürecinde karşılaşılan kalite problemlerinin önüne geçilmesi hem de daha dayanıklı ve uzun ömürlü amortisör parçalarının üretilmesi hedeflenmektedir. Çalışma, aynı zamanda sektördeki firmalara, benzer uygulamalarda yol gösterici olabilecek teknik veriler sunmayı amaçlamaktadır.

Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan amortisör sistemlerinde yer alan klevis braketin üretim sürecinde uygulanan projeksiyon kaynak yönteminin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında, kaynak parametrelerinin klevis braketin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda, farklı parametre kombinasyonlarıyla toplam dokuz adet deneysel numune üretilmiş ve bu numunelere çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen veriler ANOVA analizi yapılarak parametrelerin etki oranları belirlenmiştir. Numunelerden alınan örneklerden projeksiyon kaynak noktalarından beş tanesinden en kritik ikisi seçilerek makro ve mikro yapılar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kaynak teknolojisinin tarihsel gelişimine antik dönemlerden itibaren bakıldığında, ilk örneklerin Bronz Çağı'na kadar uzandığı görülmektedir. Bu dönemde, altın gibi metallerin basınç uygulanarak katlanması ve birleştirilmesiyle oluşturulan küçük kutular, kaynak benzeri işlemlerin erken örnekleridir. Demir Çağı'na gelindiğinde, özellikle Doğu Akdeniz medeniyetleri ile Antik Mısır'da demir parçalarının bir araya getirilmesinde kaynak yöntemlerinin kullanılmaya başlandığı anlaşılmaktadır. MÖ 1000'li yıllardan kalma aletler, bu uygulamaların izlerini taşımaktadır. Orta Çağ boyunca demircilik gelişmiş, dövme ve ısı kullanılarak çeşitli nesneler kaynatılmıştır. Modern anlamdaki kaynak teknikleri ise ancak 19. yüzyılın başlarında gelişmeye başlamış ve sanayi devrimi ile birlikte yaygınlaşmıştır.

Kaynak işlemi, metalik malzemelerin ısı, basınç ya da her ikisinin yardımıyla, ilave malzeme kullanılarak ya da kullanılmadan birleştirilmesi esasına dayanır. Aynı ilkelere dayalı olarak, termoplastik malzemeler de ısı ve basınçla birleştirilebilir. Kaliteli ve güvenilir bir kaynak elde edebilmek için kaynak bölgesinde meydana gelen metalürjik ve kimyasal süreçlerin dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Kaynak işlemleri çoğu zaman belirli zorluklar içerdiğinden, kusursuz bir sonuç için çeşitli önlemler geliştirilmiştir. Bu çerçevede, karbon eşdeğeri, segregasyon ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) gibi kavramlar önem kazanmıştır. Kaynaklı üretim tercih edilirken, maliyetin düşük tutulması, istenilen işlevin sağlanması ve uzun ömür hedeflenir. Başarılı bir kaynak işlemi için ise malzeme, tasarım ve üretim koşulları bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Kaynakta önemli faktörler şu şekilde sıralanabilir ;

- Yapısal tasarımda kaynak güvenliği
- Malzemelerin özelliklerinin kaynakla uyumu
- Üretim sürecinde kaynak uygulanabilirliği

Bu üç temel etken olan malzeme, konstrüksiyon ve üretim; kaynak işlemi üzerinde farklı derecelerde belirleyici etkiye sahiptir. Kaynağa uygun bir malzemenin seçilmesi yeterli değildir; aynı zamanda, bu malzemenin kullanılacağı yapının tasarımı ve uygulanacak üretim yöntemleri de hedeflenen kaynak kalitesini sağlayacak şekilde uyumlu olmalıdır. Kaynak güvenliği sağlanmış bir yapısal tasarım, uygun malzeme ve doğru üretim

teknikleri ile birleştirildiğinde, hizmet ömrü boyunca beklenen işlevleri güvenli şekilde yerine getirebilmelidir. Bir kaynaklı imalat süreci, tasarlanan konstrüksiyon özellikleri ve mevcut üretim koşulları altında sorunsuz olarak gerçekleştirilebiliyorsa, bu durum o yapının kaynak yapılabilirliğe sahip olduğunu gösterir. (Kou, 2003; Bayansar, 2018).

Çizelge 2.1. Kaynak Kalitesini ve Kabiliyetini Etkileyen Unsurlar (Çil 2009)

Malzeme (Kaynağa Uygunluk)	Kimyasal Bileşim	Gevrek kırılma
		Sıcak çatlama
		Sertleşme eğilimi
		Yaşlanma
		Kaynak metali karışım oranı
	Metalurjik Özellikler	Tane büyüklüğü
		İçyapı
		Segregasyon
		Kalışkılar
		Anizotropi
	Fiziksel Özellikler	Erime sıcaklığı
		Mukavemet
		Genleşme özelliği
		Isıl iletkenlik
		Tokluk
Konstrüksiyon (Kaynak emniyeti)	Konstrüktif Şekillendirme	Parça kalınlığı
		Çentik etkisi
		Kuvvet hatlarının akışı
		Dikişlerin konumu
		Rijitlik farklılıkları
	Gerilme Durumu	Sıcaklık
		Korozyon
		Zorlanma hızı
		Gerilmelerin tür ve şiddeti
		Gerilmelerin eksen sayısı
İmalat (Kaynak yapılabilirlik)	Kaynağa Hazırlık	Kaynak yöntemi
		İklim koşulları
		İlave malzemenin türü
		Ön tavlama
		Ağız biçimi
		Birleştirme türü
	Kaynağın Uygulanması	Kaynak sırası
		Isının uygulanışı
		Isı girdisi
	Kaynaktan Sonraki İşlemler	Taşlama
		Isıl işlem
		Dekapaj temizleme

2.1 Elektrik Direnç Kaynağı

Elektrik direnç kaynağı, iki metal parça arasında elektrik akımının geçişiyle oluşan dirençten kaynaklanan ısının ve uygulanan basıncın birleşimiyle gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde ısı kaynağı yalnızca elektrik akımıdır; sürece harici bir ısı girişi söz konusu değildir.. Yapılan kaynak bölgesinde oluşan ısı ve elektrotlar sayesinde meydana gelen basınç ile kaynak yapılır. Ortaya çıkan ısı metali ergitir fakat iki parçanın birleştirilmesi için yeterli değildir, bu sebeple ergiyen metallerin birbiri ile birleştirilmesi için basınç parametresi devreye girer. Hem basınç hem ısı ve gerekli proses ile kaynak gerçekleştirilir. Elektrik direnç kaynağının elektrik ark kaynağından farklarından biri elektrotlar ergiyen metali oluşturmaz, herhangi bir sarf malzeme kullanılmaz, ergiyen metal iş parçalarının kaynak bölgeleridir. Diğer kaynak metotlarına göre daha güvenli bir çalışma alanında çalışılır ve daha çevrecidir. (http://megep.meb.gov.tr, 2017)

Direnç kaynak yöntemi, üç temel aşamada gerçekleşmektedir: sıkıştırma, ısı üretimi (akış) ve basınç uygulaması. Bu yöntemde, iki metal yüzeyin birleştirilmesi amacıyla öncelikle elektriksel dirençten kaynaklanan ısı enerjisi kullanılarak yüzeyler lokal olarak ısıtılır. Isıtma sonucunda ergime gerçekleşir ve ardından uygulanan mekanik basınç ile birleşme sağlanır. Ergitilen bölgelerin hızlı bir şekilde soğuması, kaynak dikişinin kaliteli ve dayanıklı olmasına katkı sağlar. Bu hızlı ısıtma-soğutma döngüsü aynı zamanda işlem süresinin kısalmasına da olanak tanır; böylece üretim verimliliği artırılmış olur. Ancak bazı uygulamalarda, kaynak bölgesinde oluşabilecek gevrek yapının önüne geçmek amacıyla temperleme (ısıl işlem) gerekebilir. Bu işlem, soğuma esnasında ortaya çıkabilecek kırılganlıkları önleyerek malzeme tokluğunu artırır.

Birleşme bölgesinde ısı, Joule kanununa göre oluşur ve bu durum Denklem 2.1 ile ifade edilmektedir.

$$Q=I^2.R.t \tag{2.1}$$

Burada Q üretilen ısıyı, I kaynak akımını, R devredeki toplam elektrik direncini ve **t** ise akımın uygulandığı süreyi temsil etmektedir. Denklemdeki ısı üretimi doğrudan akımın karesiyle orantılıdır.

Üretilen ısının bir bölümü iletim ve ışınım yoluyla çevreye kaybolmaktadır. Kaynak direncinin düşük olması nedeniyle, yeterli miktarda ısı üretimi için yüksek akım değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüksek akım, düşük gerilimli özel bir transformatör aracılığıyla sağlanır. Aynı zamanda, basma kuvveti hem temas basıncını sağlar hem de elektrik akımını parçaya ileten elektrotlar aracılığıyla uygulanır. Söz konusu kuvvet, genellikle pnömatik ya da mekanik sistemlerle kontrol edilir. (Gugel, M.D., 1995)

Elektrik direnç kaynağı, kullanım şekillerine göre çeşitli alt gruplara ayrılmaktadır. (http://megep.meb.gov.tr, 2017)

- Nokta Kaynağı
  a) Normal Nokta Kaynağı
  b) Kabartılı Nokta Kaynağı
- Dikiş Kaynağı
  a) Sürekli Dikiş Kaynağı
  b)Aralıklı Dikiş Kaynağı
- Alın Kaynağı
  a) Basınçlı Alın Kaynağı
  b) Yakma Alın Kaynağı (http://megep.meb.gov.tr, 2017)

Elektrik direnç kaynağı prosesinde kullanılan malzemelerin sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve termal özellikler, kaynak işleminin kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, özellikle malzemenin kimyasal bileşimi, kaynak bölgesinde oluşan mikro yapıyı ve kaynak sonrası mekanik özellikleri belirleyen temel faktörlerden biridir. Alaşım elementlerinin türü ve oranı, eriyik havuzunun oluşumu, katılaşma yapısı ve ısı tesirli bölge (ITAB) üzerindeki etkiler açısından büyük önem taşır.

Malzemenin termal iletkenliği, özgül ısısı ve ergime sıcaklığı gibi termofiziksel özellikleri de kaynak esnasında oluşan ısının yayılımını ve dolayısıyla birleşme kalitesini etkileyen diğer önemli parametrelerdendir. Ayrıca, malzemenin üretim yöntemi (sıcak haddelenmiş, soğuk çekilmiş vb.) ve yüzey durumu, kaynak sırasında oluşabilecek temas direncini ve akım geçişini doğrudan etkileyebilmektedir.

Elektrik direnç kaynağında temel olarak; kaynak akımı, temas yüzeyleri arasındaki direnç ve bu akımın uygulanma süresi olmak üzere üç ana parametre tanımlanmaktadır. Bu tanım basit görünse de, sanayide uygulanan kaynak proseslerinde bu temel parametrelerin yanında elektroda uygulanan basınç, elektrot malzemesi, yüzey temizliği ve soğutma koşulları gibi çok sayıda etkenin kaynak kalitesi üzerinde belirleyici olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda proses parametrelerinin dikkatli seçimi ve kontrolü, kaynak bütünlüğü ve performansı açısından kritik öneme sahiptir.

2.1.1. Kaynak Akımı

Joule kanunundan anlaşılacağı gibi kaynak akımı ısı oluşumu açısından en etkili parametrelerden birisidir. Kaynak akımı ne kadar artarsa kaynak çekirdeği büyüklüğü de doğru orantılı bir şekilde artar.
Kaynak akımının düşük olma durumunda uzun süreli kaynak oluşarak ısıtılan alanın genişlemesine neden olur, akımın yüksek olması durumunda ise akımın zor geçtiği için, ark ve çatlaklar meydana gelebilir. Bu sebepten dolayı da akım, patlamalara ve elektrot bozulmalarına yol açar.

2.1.2. Kaynak Zamanı

Kaynakta akımın aktığı süreye kaynak zamanı denir. Bu süreç içerisinde ısı oluşturulur. Bilimsel olarak belirlenen teorik bilgilerdeki değerler bazı kayıplardan dolayı ve kabul edilen şartlardan dolayı kaynak yapmaya yetmez. Bu yüzden kaynak yapılırken teorikte olandan daha fazla bir akım uygulanır. Uygulamanın yapıldığı bölgenin soğuması amacıyla bir süre elektrotlar kaynak üzerinde bekletilir. Elektrotlardan geçen chiller sıvısı kaynak bölgesindeki ısının uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Bu süreye de sıkma zamanı adı verilir. Yapılan işlemde nüfuziyet artar bu sebeple de kaynak izi belirginleşir. Kaynak süresinin uzun olması ergimiş bölgenin miktarını artırır. Ergiyen bölgenin büyümesi baskı oluşturur bu baskıdan dolayı da patlama oluşur. Bu durum malzemeye zarar verir, malzeme bölgesi zarar görür ve parça delinebilir.

2.1.3. Direnç

Temas direnci, kaynağın uygulandığı yüzeyler arasında malzeme ile birlikte önemli bir özelliktir. Uygulanan kaynakta akım, kuvvet gibi önemli parametrelerle de sürekli temas halindedir. Özellikle malzemenin cinsine (yumuşak çelik vb.) göre farkın oluştuğu sıcaklık ve basınçlarda değişken dirençler oluşmaktadır.- Kaynak uygulamasında sıcaklık artarsa direnç ters orantılı bir şekilde azalır, basınç artar. Metallerin yüzeyleri mikron seviyesinde de olsa pürüzlülük vardır. Bu pürüzlü yüzeylerin oluşturduğu birleşme yüzeyi, az olacağından dolayı uygulanması gerekenden daha az kaynak kuvveti gerekecektir. Bu sebepten dolayı, direnç düşüp ısı transferi azalacaktır ve kaynak çekirdeğinde küçülmeye sebep olacaktır. Kaynak esnasında geçen zamanının bir kısmı metallerin yüzeylerinde bulunan maddeleri (yağ, kir, pas) yakmaya harcanacağından dolayı sıcaklık düşmesine sebep olur. Ters orantılı olarak sıcaklık düştüğünde direnç artar.

2.1.4. Baskı Kuvveti

İyi bir kaynak kalitesi elde etmek için metallerin temas eden yüzeyleri arasında ihtiyaç olan direnç ve deformasyonun meydana gelmesi açısından baskı kuvveti çok önemlidir. Kaynak bölgesinde baskı kuvvetinin önceden belirlenmiş olması gerekmektedir. Bu iki parça arasında akımın geçmesini ve kaynağın gerçekleşmesini sağlayacak olan parametrelerden biridir. Eğer baskı kuvveti düşük tutulursa yüksek direnç sebebiyle parçada patlama meydana gelir. Bunun tam tersi baskı kuvveti yüksek tutulursa parçadaki birbirine temas ettirilen yüzeyler fazla olacağından direnç ve akım azalır, bundan dolayı da ısı geçişi azalır ve kaynak çapında küçülme olur.

2.1.5. Malzeme Özellikleri

Direnç kaynağı uygulamalarında, malzemelerin fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişim gösterir. Özellikle özdirenç, ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi, kaynak sürecinin verimliliğini belirleyen temel faktörler arasında yer alır.

Yüksek ısı iletkenliğine ve düşük elektriksel dirence sahip olan bakır ve gümüş gibi metaller, elektrik akımını çok hızlı ilettiklerinden dolayı kaynak bölgesinde yeterli ısı üretimi sağlanamayabilir. Bu durum, bu metallerin kaynakla birleştirilmesini, sanılanın aksine daha zor hale getirir. Ancak bu özellikleri sayesinde, bu metaller elektrot üretiminde tercih edilen en uygun malzemelerden biridir.
Eğer kaynak işlemi farklı türden iki metal arasında yapılacaksa, bu metaller arasındaki ısı geçişi dikkate alınmalıdır. Genellikle, özdirenci daha yüksek olan metalin özellikleri kaynak parametrelerinin belirlenmesinde esas alınır.

Buna ek olarak, kullanılan malzemelerin sertliği de kaynak direnci üzerinde doğrudan etkili bir faktördür. Malzeme ne kadar sert olursa, elektriksel temas direnci o kadar değişebilir.

2.1.6. Yüzey Kaplaması

Yüzey kaplaması olan parçalar çoğunlukla kaplamasız parçalara göre daha zor kaynaklanırlar fakat istisnaları da bulunur. Bazı parçalardaki kaplama iyileştirici yönünde de bir etki yapabilmektedir. Malzemede kaplama varsa özel olarak değerlendirilerek elektrod seçimi ve diğer parametreler buna göre yapılmalıdır. Kaplamalı parçaların kaynak prosesleri oluşturulurken tasarımına ve parametrelere ekstra özen gösterilmelidir. Yapılan kaynağın kalitesi kontrol edilmelidir.

2.1.7. Parça ve Elektrot Geometrisi

Elektrik direnç kaynağı yönteminde, akım yoğunluğu ile bu akımın parça üzerindeki dağılımı, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen temel unsurlar arasında yer alır. Bu bağlamda, hem elektrotların geometrisi hem de kaynaklanacak parçaların tasarımı, prosesin başarısı açısından kritik öneme sahiptir (Gould, 2012; AWS, 2020).

Özellikle nokta (punta) kaynağı uygulamalarında, kullanılan elektrotların şekli ve boyutları kaynak çekirdeğinin çapını belirler. Elektrot ucunun temas alanı küçüldükçe, akım daha yoğun bir şekilde sınırlı bir bölgeye aktarılır; bu da kaynak bölgesinde daha

yüksek bir sıcaklık oluşmasına neden olur. Ancak bu durum, malzeme deformasyonları ya da aşırı ergime gibi istenmeyen sonuçlara yol açabileceğinden, optimum elektrot tasarımı büyük önem taşır (Messler, 2004).

Projeksiyon kaynağı gibi özel uygulamalarda ise, odak noktası genellikle elektrottan ziyade parçaların kendisidir. Bu yöntemde, kaynak noktasının belirlenmesinde parçaların tasarımında yer alan çıkıntı (projeksiyon) yapılar belirleyicidir. Özellikle yüzeyleri doğrudan temas etmeyen veya belirli bir hizalanma gerektiren parçaların tasarımında, birleşme yüzeylerinin akım geçişine ve ısı üretimine uygun şekilde planlanması gerekir. Aksi takdirde, istenilen kaynak sağlamlığı elde edilemeyebilir (Schulz, 1993; TWI, n.d.).

Ayrıca, kaynak işlemi sırasında kullanılan kaynak memesi (elektrot ucu), ısıyı homojen şekilde dağıtarak kaynak kalitesini desteklemelidir. Bu nedenle, meme tasarımı; birleşme yüzeyinin düzgünlüğünü sağlayacak, aynı zamanda da ısıyı dengeli yayacak şekilde yapılmalıdır. Yanlış yerleştirilen veya uygun olmayan geometrilere sahip elektrotlar, ısının dengesiz dağılmasına ve dolayısıyla zayıf kaynak oluşumuna neden olabilir (AWS, 2020).

2.1.8. Kaynak Makinesi Karakteristiği

Elektrik direnç kaynağı prosesinde, kullanılan kaynak makinesinin hem elektriksel hem de mekanik özellikleri kaynak kalitesini doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu cihazların karakteristik performansları hem güvenilir hem de tekrarlanabilir kaynaklar elde edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Gould, 2012).

Makinenin en temel elektriksel özelliklerinden biri, kaynak sırasında ihtiyaç duyulan akımın hızlı ve doğru şekilde ölçülüp kontrol edilmesidir. Uygulanan akımın belirlenen tolerans aralıklarında sabit tutulabilmesi, kaynak bölgesindeki ısıl dengenin korunmasını sağlar. Bu amaçla, gelişmiş kontrol üniteleri kullanılarak kaynak akımına ulaşma süresi minimuma indirilmeli, böylece toplam enerji tüketimi de azaltılmalıdır (AWS, 2020).

Ayrıca, kaynak devresinde yer alan iletken bileşenler arasındaki açıklıklar, istenmeyen manyetik (magnetik) veya indüktif kayıplara yol açabilir. Bu tür kayıpların azaltılması için, açıklıklarda manyetik özellik taşıyan metallerin bulunmaması tercih edilir. Böylece, enerji kaybı ve ısı artışı minimize edilmiş olur (Messler, 2004).

Makinenin mekanik özellikleri de en az elektriksel parametreler kadar önemlidir. Özellikle punta kaynağında, elektro-mekanik kolların açılıp kapanma süresindeki kararlılık ve yapısal rijitlik (yani mekanik esnemeye direnç) prosesin tekrarlanabilirliği açısından belirleyici olabilir. Rijit olmayan veya gecikmeli tepki veren sistemler, kaynak bölgesinde istenmeyen tutarsızlıklara neden olabilir (Schulz, 1993).

Bunların yanı sıra, kaynak makinesinin uygun bir soğutma sistemine sahip olması da uzun süreli ve yüksek frekansta yapılan kaynak işlemlerinde sistemin güvenliğini ve kararlılığını korumak için önemlidir (TWI, n.d.).

2.2. Kabartılı Nokta Kaynağı (Projeksiyon Kaynak)

Projeksiyon ya da kabartı kaynağı diye adlandırılan kaynak türü direnç kaynağının bir çeşididir, belirlenen yüzeyde elektrik akımının yoğunlaştırılmasıyla yapılmaktadır. Bir ya da iki yüzeydeki yükseltilmiş kabartıların kaynak enerjisini lokalize ederek ve yoğunlaştırarak kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Kabartılı nokta kaynağının bir diğer adı da projeksiyon kaynağıdır. Kabartılı nokta kaynağı, temel çalışma prensibi açısından standart nokta kaynağı ile benzerlik gösterir. Ancak klasik nokta kaynağında akımın geçiş alanı, elektrotların uç kısımlarının şekli ve boyutlarıyla belirlenirken; kabartılı nokta kaynağında bu sınırlandırma, birleştirilecek malzeme yüzeylerinde yer alan kabartılar aracılığıyla sağlanır. Bu kabartılar, akımın belirli noktalara odaklanmasını sağlayarak kaynak işlemini yönlendirir. (http://megep.meb.gov.tr,2017)

Kabartılı nokta kaynağında; kabartılar kaynak bölgesini oluşturur. Kaynak yapılacak üst üste gelen plakaların birinde bulunan kabartı sayesinde o bölgede temas gerçekleşir.

Temas gerçekleşen bu bölgede elektrik akımı yoğundur bu sebeple kabartının ısınması hızla gerçekleşir. Isınan kabartı erir çöker ve ergiyik oluşturur, basınç sayesinde de kaynak gerçekleşmiş olur. Paslanmaz ve alaşımsız çelikler için kabartısı kaynak yönteminde çalışma değerleri aşağıdaki Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kabartılı kaynak için alaşımsız çelikler çalışma değerleri (Anık 1993).

Kabartı boyutları (mm)				Kuvvet (daN)	Akım şiddeti (A)	Kaynak süresi (s)	Kaynak noktası (mm)
S	d	h	l				
0,5	1,75	0,5	4	200	4000	0,16	3,5
1	3	0,7	7	400	6600	0,26	4,5
1,5	4	0,9	9,5	600	9000	0,36	5,7
2	4,75	1	11	800	11000	0,42	7
2,5	5,5	1	12,5	1000	12500	0,46	9
3	7	1,5	17,5	1200	14000	0,48	11

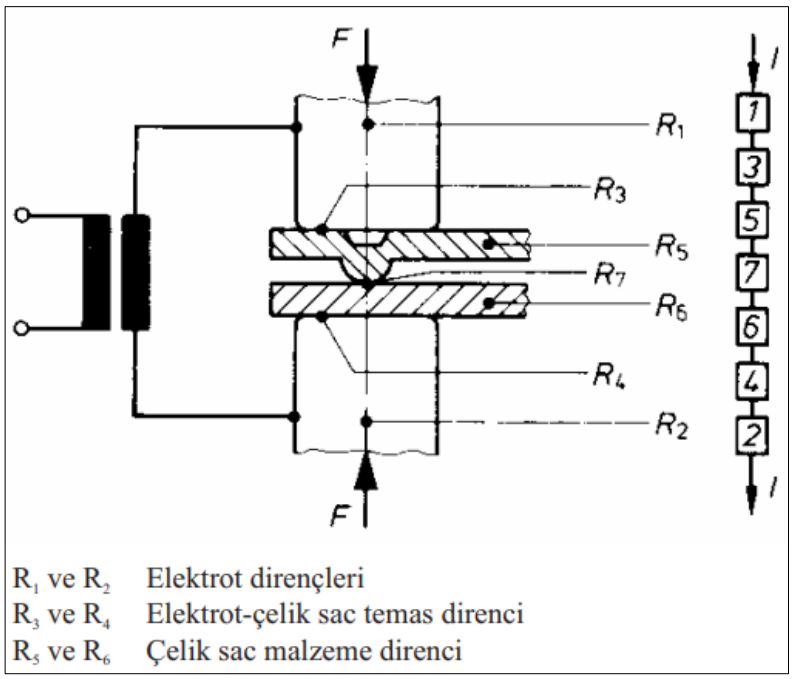
Çizelge 2.3. Kabartılı kaynak için paslanmaz çelikler çalışma değerleri (Anık 1993).

Kabartı boyutları (mm)				Kuvvet (daN)	Akım şiddeti (A)	Kaynak süresi (s)	Kaynak noktası (mm)
S	d	h	l				
0,5	1,75	0,5	4	115	4800	0,16	3,5
1	3	0,7	7	230	8000	0,26	4,5
1,5	4	0,9	9,5	350	11000	0,36	5,7
2	4,75	1	11	465	13000	0,42	7
2,5	5,5	1	12,5	580	14500	0,46	9
3	7	1,5	17,5	700	16500	0,48	11

Projeksiyon kaynak bir direnç kaynağı yöntemi olarak akımın parça üzerinden belirlenen noktalara gönderilmesidir. Parça üzerindeki kabartılar parçalar arasındaki temas noktasını azaltarak, kabartısız aynı kaynak prosesine göre daha düşük kaynak süresi ve elektrod basıncı oluşur.

Bu kaynak işleminin öne çıkan özelliklerinden birisi kalın malzemeler üzerinde daha yakın kaynak aralıklarına olanak vermesidir. Projeksiyon kaynak genelde somun, saplama gibi bağlantı noktalarını sac metal düzeneklerine bağlamak için kullanılır. Özellikle otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir. Paslanmaz çelik, düşük karbonlu

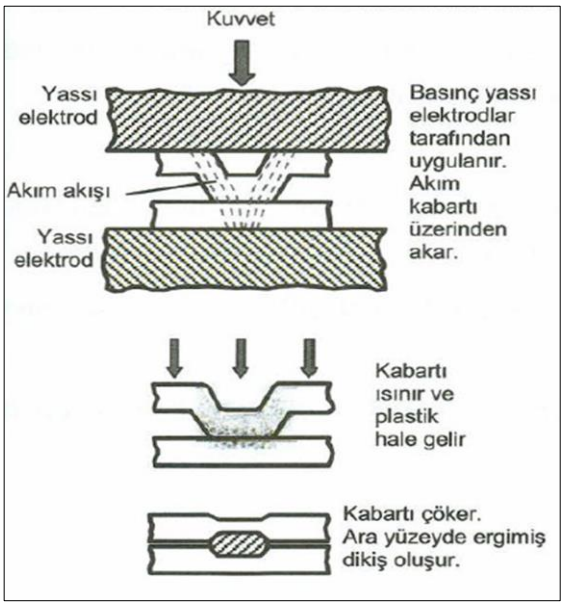
çelikler ve alüminyum projeksiyon kaynak için uygun olan malzemelerdir. Projeksiyon kaynak birden fazla noktada çoklu olarak kaynak yapmaya imkan sağlayan bir prosestir. Farklı kalınlıkta malzemelerin birleştirilmesi de projeksiyon kaynakla birlikte mümkündür.



Şekil 2.1. Kabartı kaynağında kısmi dirençler (Anık,1993)

Kaynak çekirdeğinin oluşumunda ısı üreten dirençler R_5,R_6,R_7 dir. Parçalar arasında meydana gelen R_7 temas direnci, bazı özelliklerden etkilenir. R_7 burada temas direnci anlamına gelmektedir ve uygun sınırlarda tutulması çok önemlidir. Bu da ancak sac yüzeyinin temizliği ve yüksek baskı kuvvetleri ile mümkün olmaktadır. Kabartılar malzemede deformasyon oluşturularak meydana getirilir ve kaynak sırasında oluşturulan bu kabartılar tekrar düzleştirilir. Kabartı olamayan yüzeydeki deformasyon oldukça az derecededir. Elektrot kuvveti çok düşük olduğunda, temas yüzeyi çapı ve basıncı, ergimiş metali barındıracak yeterli temas çapı ile sağlanamaz ve taşma meydana gelir. Üstelik ilk döngünün sonunda sırt tamamen çökmez; tabaka ayrımı gözlemlenebilir kalır. Çok yüksek kuvvet uygulandığında aşırı soğuk istifleme meydana gelir ve çıkıntının erken mekanik bozulması meydana gelir. Aşırı yüksek bir kabartıda kullanılırsa, temas ara yüzeyinde yer alan ısınma hızı, kabartının çökme oranından çok daha yüksek olacaktır.

Kabartı oranı yüksekliği düşük olduğunda, kabartının erken çökmesi ile temas alanının arttığı, akım yoğunluğunun azaldığı ve çekirdeğin oluşumunda gecikme olur.



Şekil 2.2. Projeksiyon kaynak prosesi (Anık,1993)

Projeksiyon kaynak veya kabartı kaynağı birden çok noktadan kaynak yapabilme imkanı sunar. Kabartı noktalarına buckel adı verilir. İki düz elektrod buckellerden kaynağı gerçekleştirir.

Elektrik direnç kaynağı (Electric Resistance Welding – ERW), genel olarak iki metal levha ya da iş parçasının bir termoelektrik işlem yoluyla birleştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemde, elektrotlar aracılığıyla iş parçalarının üzerinden elektrik akımı geçirilir. Elektrik akımına karşı oluşan direnç; elektrotlar, iş parçalarının kendisi ve temas yüzeyleri dahil olmak üzere sistemdeki tüm bileşenlerde ısı meydana getirir. En yüksek sıcaklık, iki iş parçasının doğrudan temas ettiği yüzeyde oluşur. Bu bölgedeki sıcaklık, metallerin ergimesine neden olarak bir kaynak banyosu oluşturur. Elektrik akımı kesildikten sonra, uygulanan basınç altında bu kaynak banyosu katılaşır ve iki parça metal birbirine kalıcı olarak bağlanmış olur. (Anık 1993).

Projeksiyon kaynağının sac metal malzemelerde fazla miktardaki üretimler için hızlı olması ve kolay uygulanabilirliği açısından oldukça fazla avantajı vardır. Kaynak yapılan bölgede ısı tesiri altındaki bölgenin küçük olması ve kaynak bölgesinin malzemeden bağımsız olarak hareket ettirilmesi malzemenin özelliğinin bozulmamasını sağlar. Elektrodun tek hareketiyle aynı anda birden çok noktada kaynak yapabilme imkanı tanır.

Aynı zamanda farklı kalınlıktaki sacların kaynakla birleştirilmesine de imkan sunmaktadır. Projeksiyon kaynak prosesinde kontrol altında tutulması gereken parametreler: kaynak süresi, kaynak akımı, projeksiyon çapı, projeksiyon yüksekliği, baskı kuvveti, sıkma kuvveti, baskı süresi, projeksiyon sayısı, projeksiyonlar arası mesafe, sac malzeme kalitesi, malzeme kalınlığı, bakır elektrot geometrisi ve alaşımı.

2.2.1. Elektrot Malzemesi Özellikleri

Elektrot malzemesinin seçimi, kaynak işleminin kalitesi açısından oldukça önemlidir. Farklı metaller bir araya getirildiğinde, elektrik akımına karşı daha yüksek direnç gösteren metal, daha fazla ısı üretir. Projeksiyon kaynağında, kaynak yapılacak parçanın tasarımı; punta kaynağında ise elektrotların şekli belirlenirken, malzemenin özellikleri temel belirleyici faktörlerdir.

Ayrıca, malzemenin sertlik derecesi de temas direncini etkileyen önemli unsurlardan biridir. Sertliği yüksek olan metaller (yüksek akma dayanımına sahip olanlar) aynı basınç altında daha yüksek temas direncine yol açar; bunun sebebi ise pürüzlü yüzeylerde deformasyonun azalması ve gerçek temas alanının küçülmesidir.

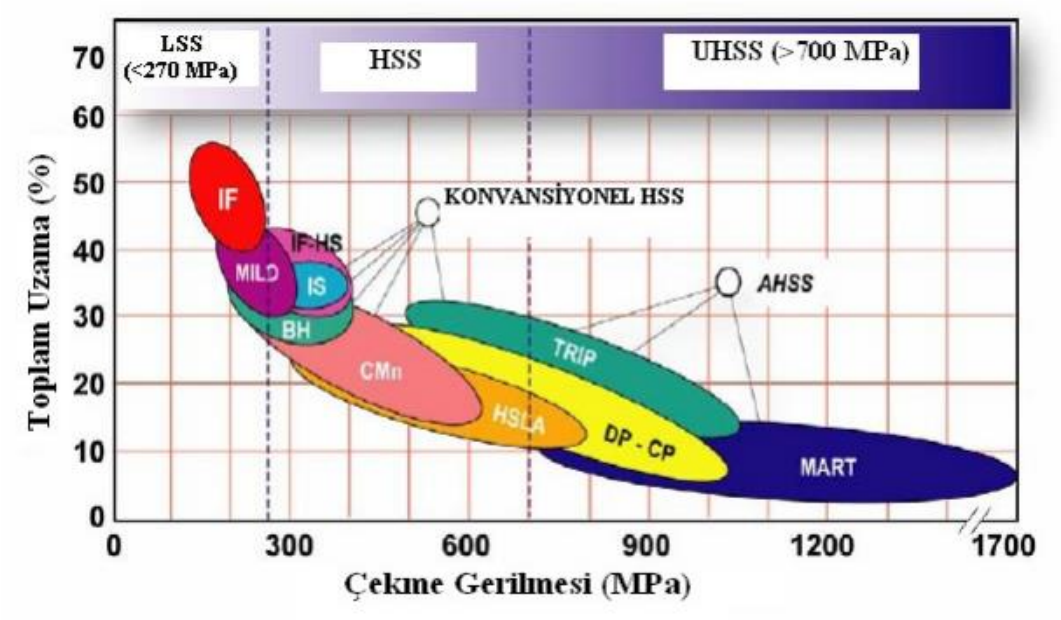
Hafif metaller ve demir dışı alaşımlar gibi farklı türdeki malzemelerin kaynaklarında, termal dengeyi sağlamak amacıyla çeşitli elektrot malzemeleri tercih edilmektedir. Elektrot ile iş parçasının geometrik yapısı ve boyutları, akım yoğunluğunun dağılımını ve buna bağlı olarak kaynak kalitesini etkiler. Elektrotların formu, kaynak bölgesindeki akım yoğunluğunu ve kaynak çekirdeğinin boyutunu belirlemektedir.

Farklı kalınlıklardaki iş parçalarının kaynak işlemleri ise farklı akım değerleri ve işlem parametreleri gerektirir. Projeksiyon kaynağında, iş parçasının geometrik tasarımı, özellikle farklı metaller bir araya getiriliyorsa, malzeme özellikleri ile uyumlu şekilde planlanmalıdır. Örneğin, lehim ara yüzeyinde termal dengeyi iyileştirmek için düşük dirençli yüzeylere kabartılar veya çıkıntılar eklenmesi faydalı olabilir. Kaynak elektrotlarının yüksek dayanıklılık ve ısı iletkenliğine sahip olması gerekir. Ayrıca, elektrot malzemelerinin elektrik iletkenliğinin yüksek olması ve iş parçası malzemeleriyle kimyasal reaksiyona girerek alaşım oluşturmaması önemlidir.
Çeliklerin kaynak yapılabilirliği üzerinde karbon içeriğinin önemli bir etkisi vardır. Karbon oranındaki küçük artışlar, kaynak bölgesinde sertliğin hızla yükselmesine neden olur. Artan sertlik ise iç yapıda yırtılma ve bozulma riskini beraberinde getirebilir. Kaynak işlemi için kabul edilebilir bir kalite sağlamak amacıyla, karbon miktarının levha kalınlığının kareköküyle çarpımı $0,10 + 0,12\sqrt{s}$ değerinin altında tutulması gerekmektedir. Bu sınırın üzerinde karbon içeren malzemelerde kaynak sonrası temperleme işlemi uygulanması gerekebilir.

2.2.2. Kaynak Malzemesi Özellikleri

Metal bileşiminde bulunan diğer elementler de kaynak kabiliyetini etkiler. Özellikle fosfor ve kükürt, çekirdek ara yüzeyinde yırtılma sürecini hızlandırıcı etkiye sahiptir. Titanyumun artması ise genellikle çekirdek çapını küçültmekte, çekme ve makaslama dayanımını düşürmekte ve kaynak akım sınırını azaltmaktadır. Ayrıca, azot elementi ara yüzeyde hasar oluşumuna sebep olmaktadır. (Akyol,2001)

Projeksiyon kaynağında genellikle gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) kullanılır (Şekil 2.3). Bu çeliklerin tercih edilmesinin en büyük sebebi mukavemeti ve sünekliği arasındaki sinerjidir.



Şekil 2.3. Farklı sac türlerinde (AHSS, düşük mukavemetli ve konvansiyonel HSS) mukavemet ile uzama oranı arasındaki ilişki (Anonim,2005)

Bu çelikler araçların emniyetini artırmak ve aynı zamanda ağırlığını azaltmak için otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotivde çelik sacların birleştirilmesinde en çok kullanılan yöntem projeksiyon kaynağıdır. Bu deneyde kullanılan S355 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.4'de akma ve çekme dayanımları Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. S355 çeliğinin kimyasal bileşimi

Elementler	C	Mn	P	Si	S	Al	Nb	Ti	V	Fe
Ağrılık oranı %	0,12	1,50	0,025	0,50	0,020	0,02	0,09	0,15	0,20	Kalan

Çizelge 2.5. S355 çeliğinin akma ve çekme dayanımları

Çelik	**%0,2 Akma Mukavemeti, Rp0, 2dk, (MPa)**	**Çekme mukavemeti, Rm, MPa (N/mm2)**
S355	355	470 – 630

Bu çalışmada kullanılan klevis braket malzemesi, yüksek mukavemet ve iyi kaynaklanabilirlik özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilen S355 yapısal çeliğidir. S355 çeliği; %0,12 karbon, %1,50 manganez, %0,025 fosfor, %0,50 silisyum, %0,020 kükürt, %0,02 alüminyum, %0,09 niobyum, %0,15 titanyum ve %0,20 vanadyum içeren bir alaşım yapısına sahiptir. Bu alaşım elementleri, çeliğe hem dayanım hem de süneklik kazandırmakta, aynı zamanda kaynak sırasında oluşabilecek gevrekleşmeleri minimize etmektedir. Özellikle Mn, Nb, Ti ve V gibi mikro alaşım elementleri, tane inceltici etkileri sayesinde hem mekanik özellikleri artırmakta hem de ısıdan etkilenen bölgelerde çatlak oluşum riskini azaltmaktadır (Callister & Rethwisch, 2020).

Malzemenin mekanik özellikleri değerlendirildiğinde; en az 355 MPa akma dayanımı ve 470–630 MPa aralığında çekme dayanımı sunduğu görülmektedir. Bu özellikler, projeksiyon kaynaklı parçalar gibi darbe, titreşim ve statik yüklere maruz kalan bağlantı elemanlarında güvenilir bir performans sağlamaktadır. Ayrıca, düşük karbon içeriği sayesinde kaynak kabiliyeti yüksek olup, kaynak sonrası ısıl işlemlere duyulan ihtiyaç en aza indirilmektedir. Bu nedenlerle, S355 çeliği, klevis braket gibi güvenlik ve dayanım açısından kritik uygulamalarda uygun bir malzeme tercihi olarak öne çıkmaktadır.

3.MATERYAL METOD

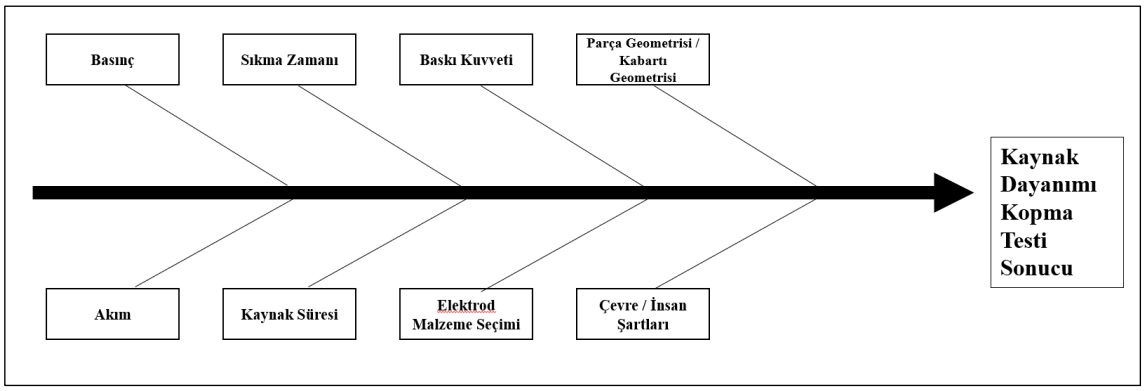
3.1 Taguchi Metodu

Taguchi metodu, Genichi Taguchi tarafından deney tasarımına dayalı olarak geliştirilen bir kalite iyileştirme yaklaşımıdır. Bu yöntemin temel prensibi, kaliteyi ürün veya süreç tasarımının erken aşamalarında sağlamaktır. (Aydın,1994)

Taguchi metodunu öne çıkaran bir avantajı parametre optimizasyonlarında kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen iki gruba sahip olmasıdır. Tüm bu parametrelerin kombinasyonlarını en iyi şekilde yapıp en uygun kombinasyonları belirleyen bir tasarım metodudur. Aynı zamanda deney sayısını aza indirerek zamandan ve iş gücünden tasarruf yapan bir yöntemdir. Kısacası deney tasarım metodu olan taguchi metodu bir ürünün kalite ve performansını geliştirmek için bulunmuş bir istatistiksel tekniktir. Deney tasarımı ve parametre optimizasyonu için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Taguchi metodu, çok sayıda parametre ve seviye kombinasyonunun bulunduğu durumlarda, deney sayısını önemli ölçüde azaltarak etkili çözümler geliştirilmesini sağlar.(Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Taguchi metodu sadece deney sayısını azaltarak zamandan tasarruf sağlamaz aynı zamanda kalite kavramını oldukça güçlendirir. Kontrol edilemeyen parametrelerin de deney sonuçlarına etkilerini de göz önüne alarak daha gerçekçi bir sonuç elde edilmesini sağlar. Deney tasarımı yapılırken ilk hedef hataların en minimuma indirilmesidir. Bunun için rassallaştırma ile deney sonuçlarının daha doğru ve güvenilir olması hedeflenir. Rassallaştırma deney sonuçlarına kontrol edilemeyen faktörlerin eşit şekilde etki ettirilmesini sağlar.

Şekil 3.1’de balık kılçığı diyagramında çalışmadaki deney sonucunu etkileyen parametreler gösterilerek neden sonuç ilişkisi ifade edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.1. Balık Kılçığı Diyagramı

Taguchi metodu uygulanacak bir deney tasarımında öncesinde belirlenmesi gereken tanımlar vardır. Öncelikle yapacağımız çalışmada kullanacağımız parametreler belirlenir. Kontrol edilebilen ve edilemeyen parametreler ortaya konulur. Deneyde etkin rol oynayacak olan değişken ve deneye dahil edeceğimiz kontrol edilen parametrelere faktör adı verilir. Bu sebeple deney tasarımına faktör seçimi ile başlanmalıdır. Faktör seçimi yapıldıktan sonra hangi seviye deney yapılacağına karar vermek için faktör seviyeleri belirlenir. Faktör seviyeleri o parametre için olan değişkenlerdir.

Taguchi'nin geliştirdiği birçok istatistiksel yöntemin, robust tasarımın ürün performansını artırmadaki etkisi nedeniyle büyük öneme sahip olduğu kabul edilmektedir.. Robust tasarım; dışsal veya içsel değişkenliklere rağmen sistem performansını optimize eden, hata oluşmadan önce problemi tasarım aşamasında çözen mühendislik yaklaşımıdır. (Taguchi, 1986)

Bu yöntemler arasında sinyal/gürültü oranı, ortogonal diziler, doğrusal grafikler ve varyans analizi yer almaktadır. Robust tasarım, mühendisler arasında daha etkili, kullanımı kolay ve pratik teknikler sunması nedeniyle yaygın şekilde tercih edilmektedir. (Tang, J.,Tang K., 1989.)

Taguchi metodunda çıkan sonuçlarda değişkenliği optimal tutmak asıl hedeftir. Bu şu anlama gelir kontrol edilemeyen parametreleri kontrol edilebilen parametrelere karşı değişkenliği en aza yakın tutmaktır. Kontrol edilemeyen parametreler çevre şartları

olabilir. Robust tasarımdan kasıt kontrol edilemeyen faktör seviyelerinin olumsuz etkilerini azaltarak doğru sonuca ulaşmak için belirlenen tasarım biçimidir. Parametreler ve toleranslar buna göre dikkatli belirlenmelidir.

Bu metodun ilk adımı sistem tasarımıdır. Sistem tasarımında olanakların kullanılabilirliği değerlendirilir, mevcut teknolojik gelişmeler incelenir ve sistem tasarımında kullanılabilirliği üzerine çalışma yapılır. Tüm süreçlerde olduğu gibi, sistem tasarımının da temel hedefi, en düşük maliyetle en kaliteli ürünü geliştirerek maksimum müşteri memnuniyetini sağlamaktır.

Parametre tasarımı, bir ürünün ya da sürecin kalite düzeyini artırmak amacıyla kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilmesini amaçlayan kritik bir aşamadır. Bu süreçte temel hedef, ürünün performansını artırırken üretim esnasında ortaya çıkan kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisini en aza indirmektir. Bu tür değişkenler genellikle "gürültü faktörleri" olarak adlandırılır ve ürün kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Taguchi, 1986).

Söz konusu tasarım sürecinde, kontrol edilebilen faktörlerin uygun seviyelerinin belirlenmesi büyük önem taşır. Bu seviyeler, ürünün performansına etki eden en uygun koşulları temsil eder. Etkin parametre düzeylerini belirlemek için kullanılan temel araçlardan biri Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizidir. Bu oran, sistemin istenilen çıktıyı üretme kapasitesini ifade ederken aynı zamanda gürültü faktörlerinin etkisine karşı dayanıklılığı da değerlendirir (Antony, 2003).

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, sürecin yapısını ortaya koymak için süreç akış şemaları ve neden-sonuç (Ishikawa) diyagramları hazırlanmalıdır. Bu sayede süreçte etkili olan tüm faktörler tanımlanarak, deney tasarımında kullanılacak değişkenler net şekilde belirlenmiş olur.

Parametre ve seviyeler belirlendikten sonra, uygun ortogonal deney dizisi seçilerek deney tasarımına geçilir. Taguchi yöntemi kapsamında geliştirilen bu diziler, daha az sayıda deneyle güvenilir sonuçlar elde etmeyi sağlar.

Deneylerde kullanılan semboller genel olarak şu şekilde ifade edilir:

d: Yapılan toplam deney sayısı

a: Faktör seviyesi (örneğin 2 ya da 3 seviye)

k: Faktör sayısı

L: Ortogonal dizi türü,

Örneğin L4, L8, L16 gibi Taguchi yönteminde yaygın olarak kullanılan ortogonal diziler, iki seviyeli faktörler için L4, L8, L16, L32; üç seviyeli faktörler için ise L9, L18, L27 gibi dizilerdir. Bu diziler, deneysel kombinasyonları sistematik ve dengeli şekilde dağıtarak her bir faktörün etkisini ayrı ayrı analiz etme olanağı tanır (Montgomery, 2017). Deney tasarımında bir diğer önemli unsur ise serbestlik dereceleridir. Her faktörün serbestlik derecesi, o faktörün sahip olduğu seviye sayısından bir çıkarılarak belirlenir. Bu hesaplamalar, uygun ortogonal dizinin seçimi ve deneyin geçerliliği açısından önemlidir.

Taguchi'nin deneysel tasarımı şu temel aşamalardan oluşmaktadır. (Ross, 1988)

1.Çözülmesi gereken problemin açık ve kesin şekilde tanımlanması

2.Performans kriterlerinin belirlenmesi ve uygun ölçüm sisteminin seçilmesi

3.Performansı etkileyen faktörlerin seçilmesi ve bu faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi

4.Faktörlerin kontrol edilebilir olanlarla hata (gürültü) faktörleri olarak ayrılması

5.İncelenecek olan bileşik etkilerin saptanması

6.Uygun ortogonal deney dizisinin belirlenmesi

7.Kontrol faktörleri ile etkileşimlerini gösterecek doğrusal grafiklerin hazırlanması

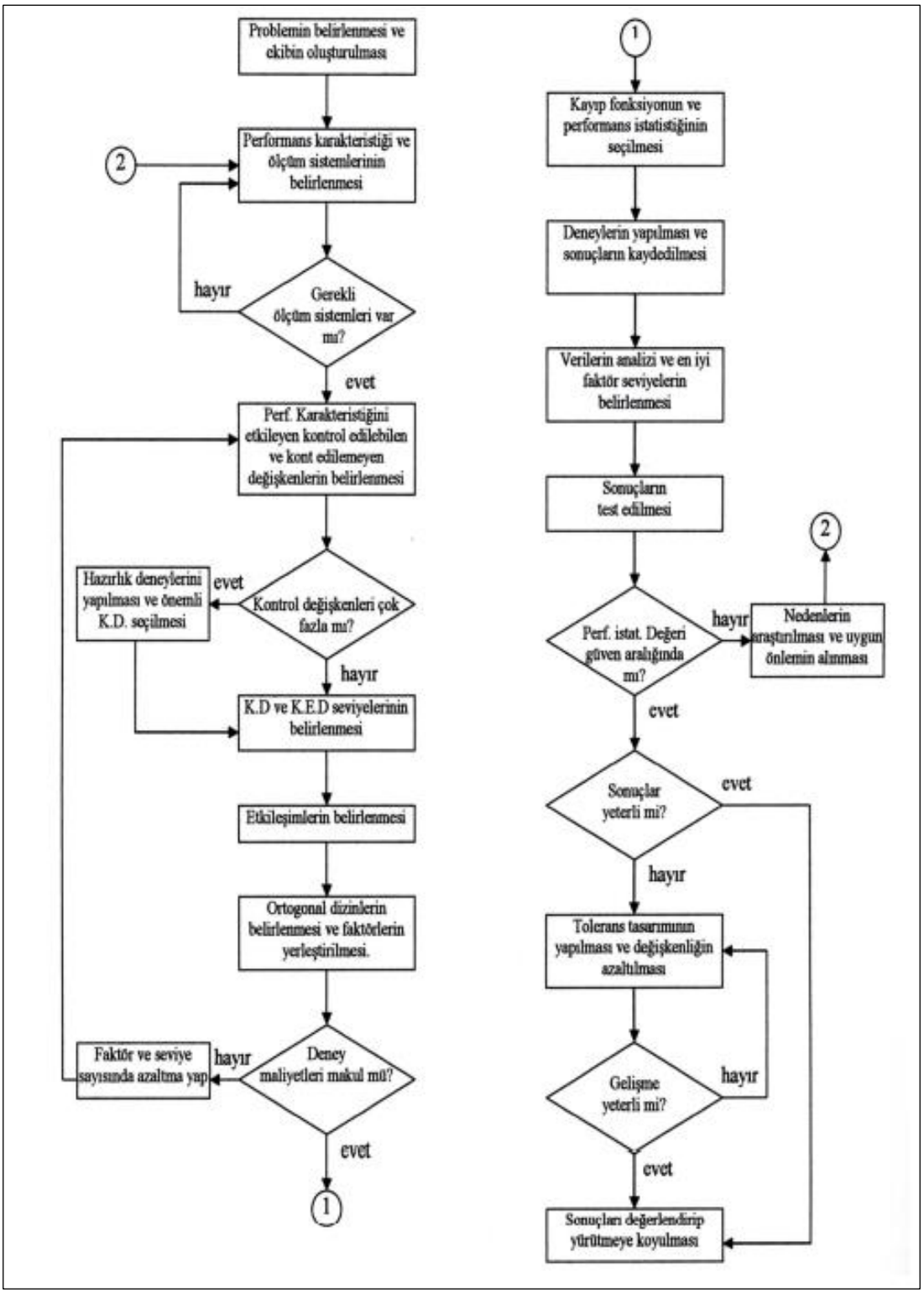
8.Faktörlerin ve etkileşimlerin deney tasarımındaki sütunlara dağıtılması

9.Kalite kayıp fonksiyonları ile performans ölçütlerinin seçimi

10.Deneylerin uygulanması ve sonuçların kayıt altına alınması

11.Elde edilen verilerin analiz edilmesi ve kontrol edilebilen faktörlerin optimum değerlerinin belirlenmesi

12.Doğrulama deneylerinin yapılması ve çalışmanın tamamlanması



Şekil 3.2. Taguchi yönteminin uygulanması sırasında takip edilmesi gereken sistematik süreç akış şeması. (Kara, 2012)

3.2 Klevis Braket Yapısı ve Kaynak Prosesi

Projeksiyon kaynak otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir prosestir. Bu kaynak prosesinin değerlendirilecek yönü tabiki sonuç aldığımız çıktının kalitesi olacaktır. Kalite değerlendirilmesi yapılacak çıktı için girdiler yani parametrelerin optimize çalışması yapılıp bir WPS (Welding Procedure Specification) oluşturulacaktır. Bu projede malzeme olarak S355MC 3 mm saclar kaynaklı birleştirme için kullanılmıştır. Projeksiyon kaynak ile birleştirme işlemi, eşit kabartı çökmeleri, minimum parça deformasyonu ve maksimum çekme mukavemeti elde etmek için en uygun kaynak kombinasyonları belirlenmiştir.

Bu amaçla, Amortisör grubunda yer alan Klevis Braket parçası üretiminde kullanılan ve çalışılan firma için yeni bir proses olan projeksiyon kaynak operasyonu, parçanın fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için önemli bir işlem adımıdır. Parçanın maruz kaldığı enerjiyi soğuran bölgenin mekanik dayanımı ve servis ömrü, projeksiyon kaynak prosesinin kalite parametreleri tarafından doğrudan etkilenir. 3mm kalınlığındaki S355MC kalite sac malzemeden oluşan amortisör parçasını üretebilmek için gereken min. 45kA değeri mevcut teçhizat ile sağlanamamaktadır. Bu projede, parçanın mevcut teçhizat ile müşteri gereksinimlerine uygun olarak üretilebilmesi ve minimum 25 kN yüke dayanabilmesi için gereken kaynak optimizasyonu ve parça geometrisi iyileştirme çalışmaları yapılacaktır.

Genel hedef klevis braket parçasının kaynak parametrelerini optimize ederek müşteriye istenen özellik ve kalitede malzeme gönderilebilmesidir. Bunun için parçaların kopma testindeki sonuçlardaki iyileştirme için kaynak parametrelerinde optimizasyon yapılması gerektiğine karar verilmiştir. Yapılan çalışmalar ışığında bu ölçülerdeki bir parçanın projeksiyon kaynak operasyonunu yapabilmek için minimum 600 kW'lık trafo ve 45 kA akım değerine ulaşabilecek makine gerekmektedir. Mevcutta kullanılan 400 kW ve 38kA ile imalatı gerçekleştirebilmek için kaynak optimizasyonu çalışması yapılacaktır.

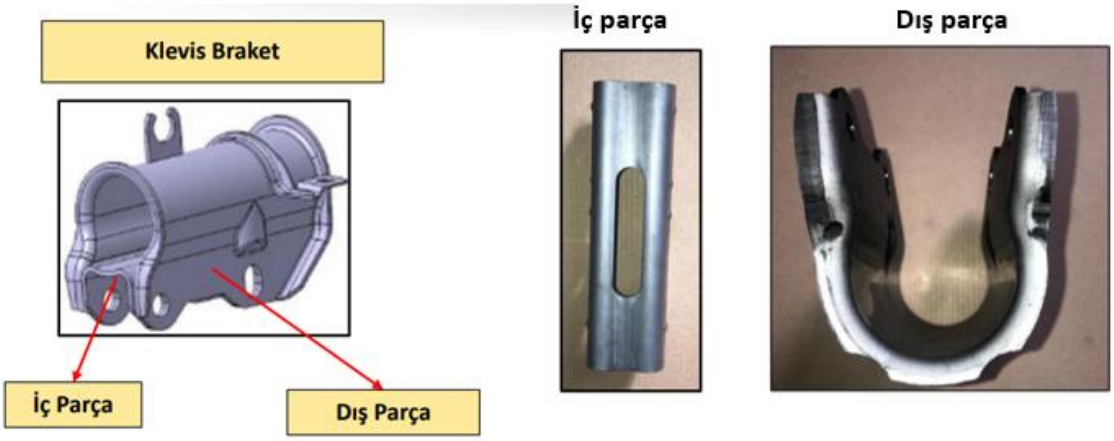
Parça geometrisinin pres operasyonundan stabil gelmesi için sac bükmede geri yaylanmanın etkisi sonlu eleman yöntemi ile analiz edilmiş, analiz sonucuna göre de

kalibrasyon kalıbı tasarımı yapılmış ve bu çıktılar ışığında imal edilmiştir. Mevcutta kullanılan projeksiyon kaynak makinasına tablanın eksenel rijitliğinin sağlanması için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Kaynak işlemi sırasında tablanın rijit olarak hareket ettiğini tespit etmek ve garanti altına almak için sensörler eklenmiştir.

Şekil 3.3. Klevis Braket

Deney çalışmasında üzerinde kaynak çalışılan parça resmi, Şekil 3.3'de gösterilmiştir. İki parça birbirine 4 noktadan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.4'de kaynak noktaları gösterilmektedir.

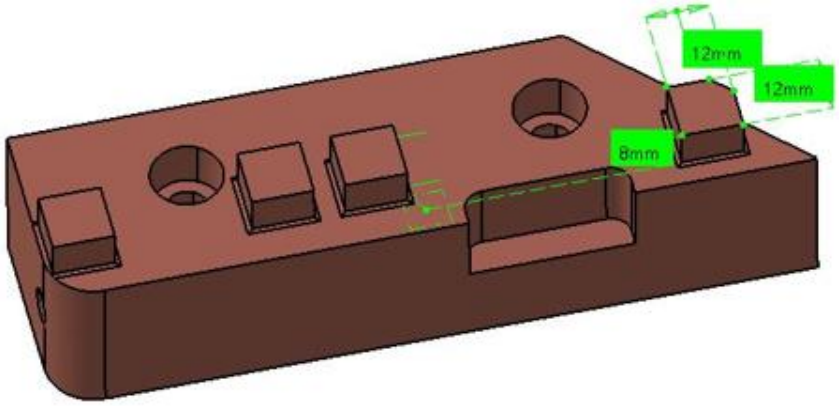
Şekil 3.4. Kaynak noktaları ve numaraları



Şekil 3.5. Klevis Braketin Geometrisi

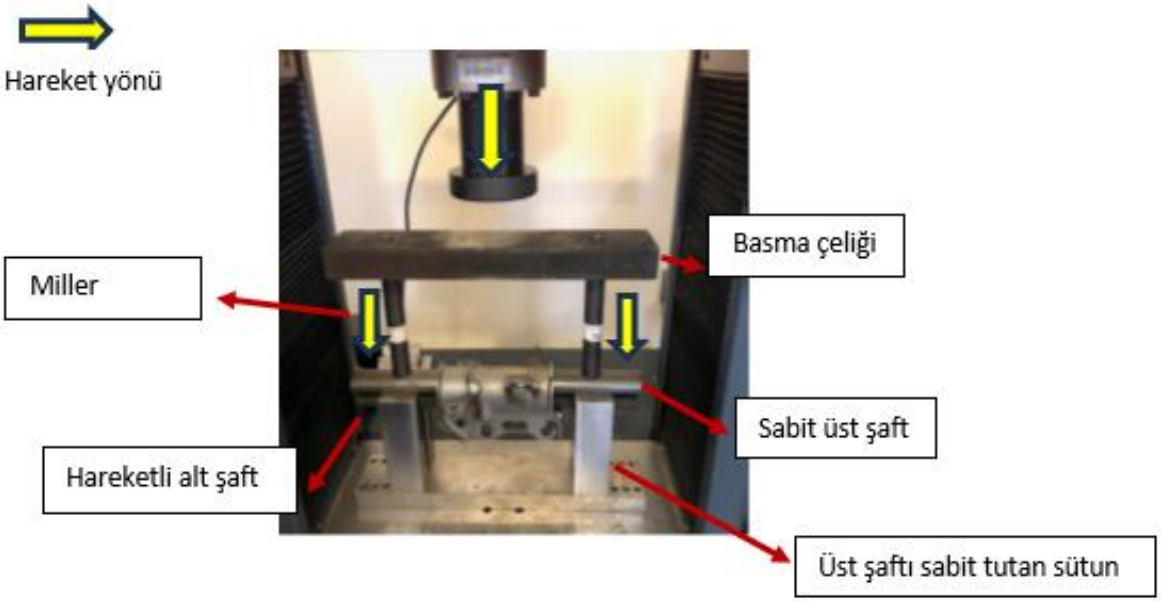
Şekil 3.6. Kaynak Makinesinde Klevis Braketin Sabitlenmesini Sağlayan Fikstür Yapısı

Kaynakta kullanılan elektrot, Cu,Ni,Si,Cr alaşımlı Cupro marka HSS CuNi2Si Cr özelliklerine sahiptir. Sertliği 120-230 HB (Brinell), Akma Dayanımı 500-6000 N/mm^2 dir. Değişim periyodu 1/1000 parçadır.



Şekil 3.7. Elektrod geometrisi

Üretim şartlarında yapılan kopma testlerinde oldukça değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. Kopma testi cihazı

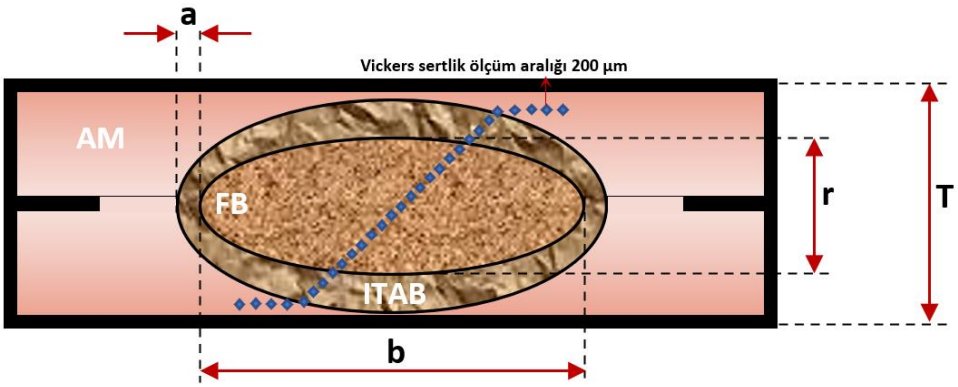
Şekil 3.9. Kaynaklanmış klevis braket ve kopma testi uygulanmış klevis braket

Kopma testi sonuçlarında ilk puntanın kopma sonuçları ele alınmıştır istenilen kıstas buna göre belirlenmiştir. Testler 21 °C ortam sıcaklığında OSKİM Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. Kullanılan test cihazı markası MG üniversal çekme cihazıdır. 100kN 40mm/dk hızıyla testler yapılmıştır. Çekme kayma testleri belirli bi standartı yoktur firma prosedürlerine göre yapılmıştır.

Projeksiyon kaynağın kalitesinin iyi olması klevis braketin performansını artıracaktır.9 numune parçası farklı parametrelerin taguchi metoduyla belirlenen kombinasyonlarına göre kaynatılmıştır. Kaynak süresi 55, 60 ve 65, basınç değerleri sırasıyla 37, 40 ve 45 daN olarak seçilmiş, sıkma ve çevrim zamanı ise 35, 40 ve 45 çevrim olarak belirlenmiştir. Akım değeri 38kA olarak, bekleme süresi de 15 çevrim olarak sabit tutulmuştur. Bu numunelerin çekme-kayma testleri, mikroyapı ve sertlikleri de incelenmiştir. Metalografik olarak mikro ve makro yapıları ANSI/AWS/SAE/D8.9M-2012 standartına uygun olarak incelenmiştir. Numunelerden kaynak bölgelerinin kesilmesi için Tel Elektro Erozyon makinesi kullanılmıştır. Öncesinde taşlanıp parlatılmıştır. Taşlama esnasında 80 ila 2400 grit metalografik kağıt kullanılmıştır. Daha sonra, içerisinde 0,05 µm boyutunda alümina partikülleri içeren bir süspansiyon çözelti ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir..

Kaynak numuneleri öncelikle %2 nital dağlama solüsyonuna batırılmış, sonrasında da 10 saniye asitleme solüsyonuna daldırılmıştır.

Sonrasında optik mikroskop ile incelenmeye alınmıştır. İncelemelerde OM marka, Olympus G40x büyütme özelliğine sahip mikroskop kullanılmıştır. Projeksiyon kaynaklı bölgeler; kaplama bölgesi (KB), füzyon bölgesi (FB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak sınıflandırılmıştır. Kaynak kesit analizinde ise geometrik ölçümlerin yapılabilmesi için Nikon marka stereografik mikroskop ve Euromex ImageFocus ALPHA yazılımı kullanılmıştır. Bu analiz kapsamında ölçülen parametreler şunlardır: Füzyon bölgesi uzunluğu (FB), füzyon bölgesi çapı, kaynak penetrasyon derinliği (r/T oranı), ısı tesiri altındaki bölge genişliği (ITAB) ve sac kalınlığı (T).



Şekil 3.10. Projeksiyon kaynağın geometrik özelliğin şematik gösterimi; Ana malzeme (AM), FB çapı (r) ,FB uzunluğu (b) , ITAB genişliği (a) sac kalınlığı (T),kaynak penetrasyon derinliği (r/T),

Numunelerin sertlik değerleri, ANSI/AWS/SAE/D8.9M-2012 standardına uygun olarak OSTİM Teknik Üniversitesi Makine Laboratuvarı'nda Vickers mikrosertlik testi cihazı ile belirlenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, 21 °C ortam sıcaklığında, 100 g yük ve 15 saniye yükleme süresi kullanılarak yapılmıştır. İlgili standarda göre, ölçüm noktaları arasındaki mesafenin girinti çapının en az üç katı olması gerekmektedir; bu mesafe yaklaşık 200 µm olarak kabul edilmiştir (Singh Bharaj et al. 2023).

3.3. Deneysel Çalışmalar

3.3.1. Deney Tasarımı (DOE) ve ANOVA Analizi

Araştırmacılar, deney tasarımı (DOE) gibi istatistiksel yaklaşımlarla, minimum sayıda deney yaparak önemli teknik veriler elde etmeyi amaçlarlar. Bu bağlamda, Taguchi yöntemi, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir DOE yöntemidir. DOE'de incelenen değişkenlere faktör denir ve her faktör belirli seviyelere sahiptir. DOE'nin çıktısı ise geliştirilmek istenen ölçülebilir sonuç DOE reaksiyonudur. Deney sayısını azaltmak için bu çalışmada Taguchi'nin ortogonal L9 dizisi tercih edilmiştir. Basınç, kaynak süresi ve sıkma zamanı olmak üzere üç faktör değiştirilmiştir. Yanıt değişkeni üzerindeki etkilerin değerlendirilmesi için deneysel faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesi gerekmekte olup, bu düzenlemeler Çizelge 3.1'de yapılmıştır. Deneyler ise Çizelge 3.2'de belirtilen deney matrisi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. (Soomro ve diğ., 2021).

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A- Basınç (daN)	37	40	43
B- Kaynak süresi (çevrim)	55	60	65
C- Sıkma süresi (çevrim)	35	40	45

**1 çevrim = 0.02 sn*

Çizelge 3.2. Deney matrisi

Deney No	A- Basınç (daN)	B- Kaynak süresi (çevrim)	C- Sıkma zamanı (çevrim)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Optimizasyon sürecinde, hedef fonksiyon olarak kullanılan sinyal/gürültü (S/N) oranlarının logaritmik dönüşümleri, veri analizini kolaylaştırmak ve ideal sonuçların tahminini desteklemek için kullanılır. İstatistiksel optimizasyon problemlerinde genellikle üç tip S/N oranı tercih edilir: "küçük olan daha iyidir", "büyük olan daha iyidir" ve "nominal değer en iyisidir". Mukavemet gibi özellikler, birçok faktörün etkisiyle değişkenlik gösterir. Bu değişkenliklerin göreceli önemini daha iyi anlamak amacıyla varyans analizi (ANOVA) kullanılır; böylece faktörlerin etkileri varyans bazında ayrıştırılarak incelenir. (Ari et al. 2022).

Sinyal değeri (S), sistemin üretmesi beklenen ve ölçülmek istenen gerçek çıktıyı ifade ederken; gürültü (N) ise bu çıktıyı etkileyen, sistem dışı istenmeyen değişkenlik kaynaklarını temsil eder. Bu yaklaşıma göre, S/N oranı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır. S/N oranının büyüklüğü, sistem yanıtı üzerindeki etkinin derecesini gösterir. S/N oranı arttıkça, sistemin dış etkenlere karşı daha kararlı hale geldiği, yani performans üzerindeki etkisinin arttığı anlaşılır. Bu oran genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilir ve değişkenliğe karşı duyarlılığın bir ölçütü olarak değerlendirilir. S/N oranı, yanıt değişkeninin optimizasyonunda kullanılan performans kriterleri kapsamında yer alır. (Ari et al. 2023).

$$S/_N = -10\log_{10}\left[\frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i{}^2}\right] \tag{3.1}$$

y ölçüm değeri ve n deney sayısıdır.

Varyans analizi (ANOVA), incelenen faktörlerin kalite ile ilişkili çıktı değişkeni üzerindeki etkisini ve her seviyenin bu etkiyi ne ölçüde değiştirdiğini ortaya koyar. Aynı zamanda, elde edilen sonuçların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı da değerlendirilir. Bu kapsamda ilk adım olarak, sinyal/gürültü (S/N) oranındaki toplam değişkenliği temsil eden toplam kareler toplamı (SST) hesaplanır. Bu hesaplama Denklem 2 kullanılarak gerçekleştirilir ve varyans analizine temel oluşturur. (Soomro et al. 2021).

$$SS_T = \sum_{i=1}^{n}(\eta_i - \eta_m)^2 \tag{3.2}$$

η_i, her bir ölçüm sonucuna karşılık gelen sinyal/gürültü (S/N) oranını, η_m ise bu oranların ortalamasını ifade etmektedir. n, gerçekleştirilen toplam deney sayısını temsil eder. Toplam kareler toplamı (SS_T), faktörlerin etkisini yansıtan kareler toplamı değerlerinden oluşur: SS_A (A faktörüne ait kareler toplamı), SS_B (B faktörüne ait kareler toplamı) ve SS_C (C faktörüne ait kareler toplamı). Bunun dışında, SS_E ise deneysel hatadan kaynaklanan varyasyonu gösteren hata kareleri toplamıdır. Her bir faktöre ait kareler toplamı, Denklem 3 yardımıyla ayrı ayrı hesaplanmıştır.. (Sun ve Hao 2012).

$$SS_j = \sum_{i=1}^{k_j} \left[n_{ji} \mathrm{x} \left(\eta_{ji} - \eta_m \right)^2 \right], \qquad j = A, B \; veya \; C \tag{3.3}$$

Bu bağlamda, k_j ifadesi A, B ve C faktörlerinin sahip olduğu seviye sayısını; n_{ji}, ilgili faktörün *i.* seviyesinde gerçekleştirilen deney sayısını; η_{ji}, aynı seviyedeki sinyal/gürültü (S/N) oranını ve η_m ise tüm seviyelere ait ortalama S/N oranını temsil etmektedir. Sonraki aşamada, her bir deneysel faktörün sonuçlar üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla Denklem 4 kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve bu doğrultuda F-Testi uygulanmıştır.

$$F = \frac{SS_j/\mathbf{k-1}}{SS_E/\mathrm{N-k}} \tag{3.4}$$

k – 1, grup sayısından bir eksiltilerek elde edilen ve grup kaynaklı varyasyonun serbestlik derecesini ifade eder. N – k ise toplam gözlem sayısından grup sayısının çıkarılmasıyla hesaplanan ve hata (artık) varyasyonuna ait serbestlik derecesidir. (Kurt et al. 2009).

Çalışmaya başlamadan değişken parametreler ve sabit tutulacak parametreler belirlenmiştir. Bu aynı zamanda Taguchi metodundaki faktörlerin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Belirlenen faktörler için seviyeleri yani değerlerin belirlenmesi için de ön bir çalışma yapılmıştır. Kaynak parametreleri çalışması için öncelikle seri üretim parametrelerinden de yola çıkarak safe window çalışması yapılarak öncelikle belirlenen parametreler için doğru aralıkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bu çalışma için değişken parametreler; Basınç (pressure), kaynak zamanı (weld time), sıkma (squeeze) olarak belirlenmiştir. Makineye göre belirlenen sabit tutulacak programda (weld current) Akım parametresidir.

Şekil 3.11. Projeksiyon Kaynak Makinesi ve Özellikleri

FAKTÖR 1	KAYNAK ZAMANI (WELD TIME)												
SEVİYELER	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
KOPMA DAYANIMI				21,55 kN	28,15 kN	34,95 kN	OK	29,5 kN	35,94 kN	45,89 kN			
FAKTÖR 2	BASINÇ (PRESSURE)												
SEVİYELER	26	29	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58	61
KOPMA DAYANIMI				46,59 kN	37,45 kN	33,55 kN	OK	30,88 kN	21 kN				
FAKTÖR 3	SIKMA ZAMANI (SQUEEZE)												
SEVİYELER	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
KOPMA DAYANIMI							OK						
	(Tek Pulse Kaynak akımı maximum seviyeden indirilerek denenecek) - KAYNAK AKIMI - (Çift Pulse ve Kaynak akımı maximum seviyeden indirilerek denenecek)												
KAYNAK AKIMI	26	28	30	32	34	36	38 kA	36	34	32	30	28	26
					18 kN	25,31 kN	OK	33,51 kN	21,94 kN				

OK	NOK

Şekil 3.12. Safe Window Çalışması

Seri üretim parametrelerinde ortalama doğru sonuç veren değerlerden yola çıkılarak değerler belirlenmiştir. Şekil 3.12'de görülen resimde her değer değiştirilirken diğer değerler sabit tutulmuştur. Örneğin ilk denenen parametre kaynak zamanı 60 ms olarak kabul edildiğinde basınç 60 daN, sıkma zamanı 60 ms, ve kaynak akımı 38kA alınmıştır. Yapılan kaynak sonrasında yapılan koparma testinde 34,95 kN sonucu bulunmuştur.

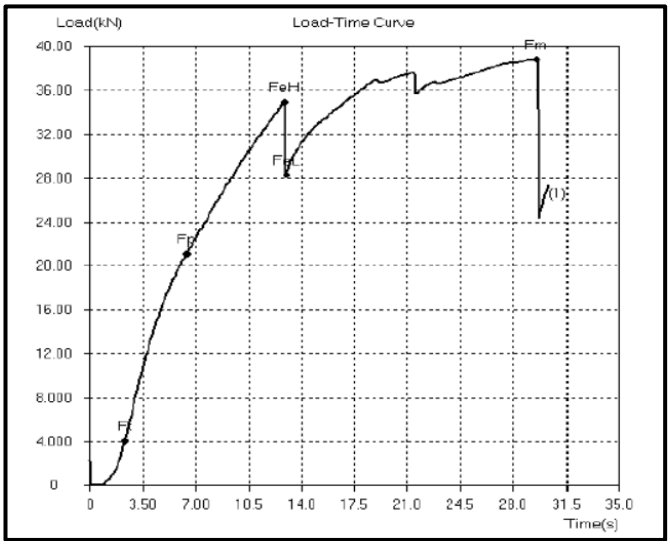
4.BULGULAR

Bu bölümde, klevis braket üretiminde uygulanan projeksiyon kaynak prosesine ait parametrelerin, ürünün mekanik ve yapısal özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen 9 farklı proses koşulunda üretilen numunelere uygulanan kopma-çekme testlerinden elde edilen veriler grafiklerle görselleştirilmiş ve mekanik davranışlar nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, Çizelge 3.1'de sunulan test değerleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler üzerinden ANOVA analizi uygulanmış ve kaynak parametreleri ile mekanik performans arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, projeksiyon kaynağıyla oluşturulan beş kaynak noktasından en kritik iki noktanın makro ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiş; kaynak süresi ve basıncının ısı girdisi üzerindeki etkileri, ısı tesirli bölgelerin ve füzyon alanlarının boyutlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, mikro yapıda gözlenen değişimlerin ve ortalama sertlik değerlerinin kaynak parametrelerinden doğrudan etkilendiği belirlenmiştir.

Araştırma kapsamında, üç farklı kaynak basıncı (37, 40 ve 43 daN), üç farklı kaynak süresi (55, 60 ve 65 çevrim) ve üç farklı sıkma süresi (35, 40 ve 45 çevrim) kullanılarak toplam dokuz farklı kaynak kombinasyonu ile numuneler hazırlanmıştır. Deney boyunca kaynak akımı 38 kA ve bekleme süresi 15 çevrim sabit tutulmuştur. Elde edilen numunelere uygulanan kopma-çekme testlerinden alınan veriler grafiklerle sunulmuş, sonuçlar belirli düzeyde değişkenlik göstermiştir

Çizelge 4.1. 1 Nolu Deney Parametreleri

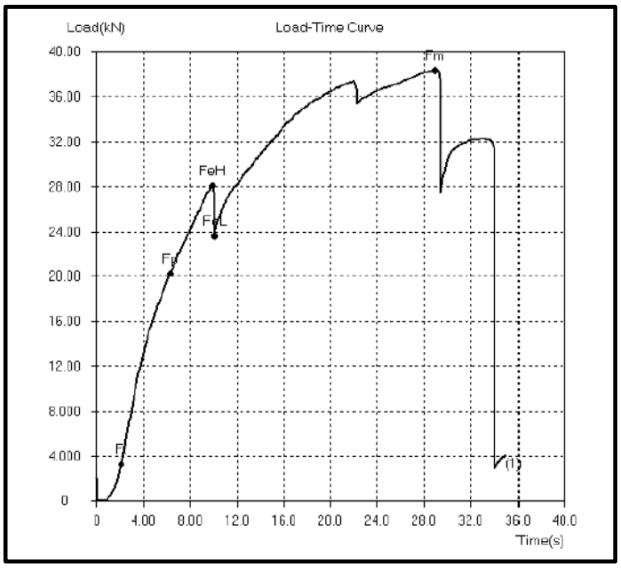
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	60	60	34,95



Şekil 4.1. 1 Nolu Deneyin Kopma Grafiği

Çizelge 4.2. 2 Nolu Deney Parametreleri

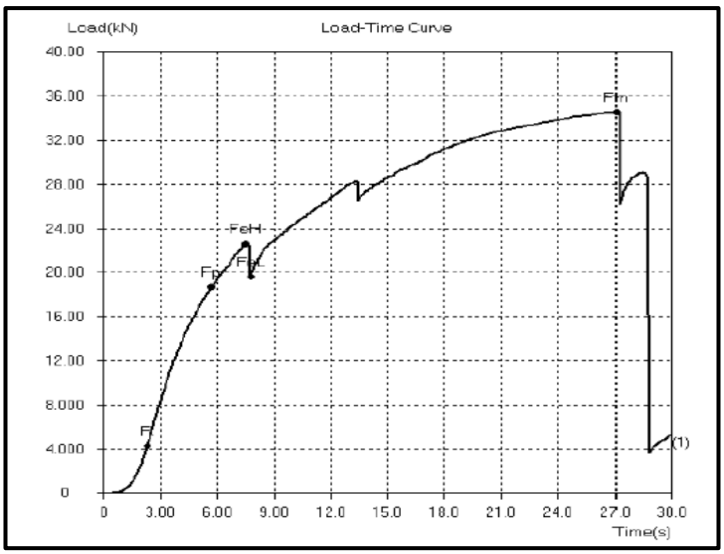
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	55	60	28,15



Şekil 4.2. 2 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.3. 3 Nolu Deney Parametreleri

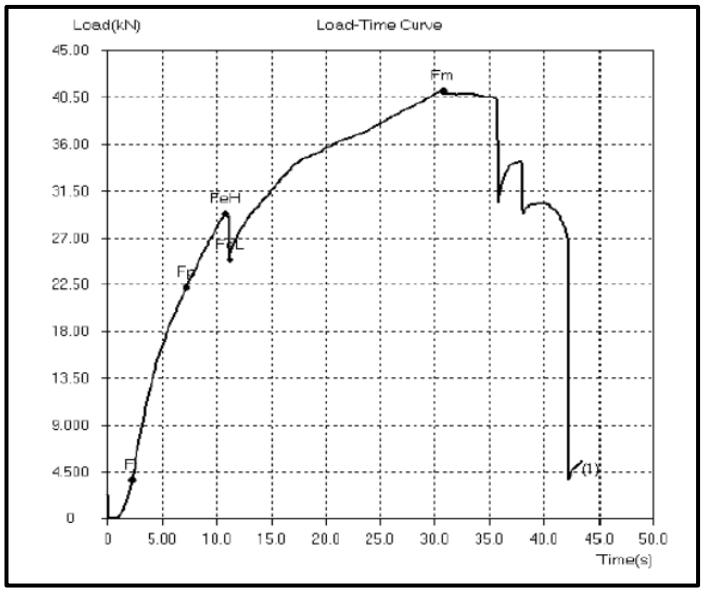
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	50	60	21,55



Şekil 4.3. 3 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.4. 4 Nolu Deney Parametreleri

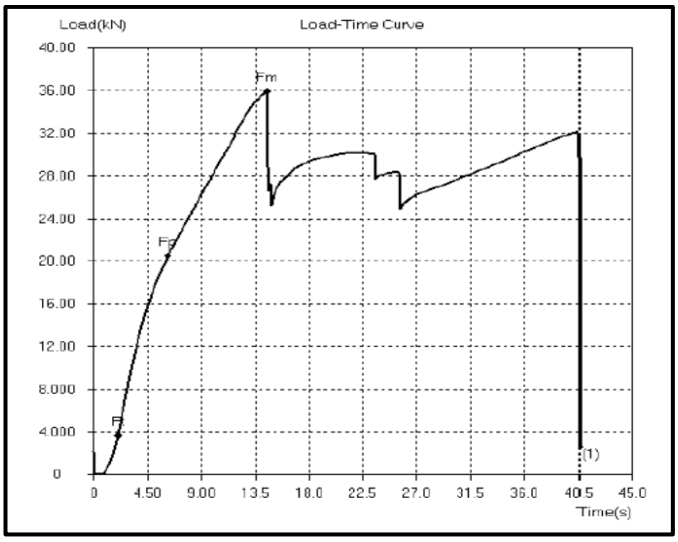
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	70	60	29,51



Şekil 4.4. 4 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.5. 5 Nolu Deney Parametreleri

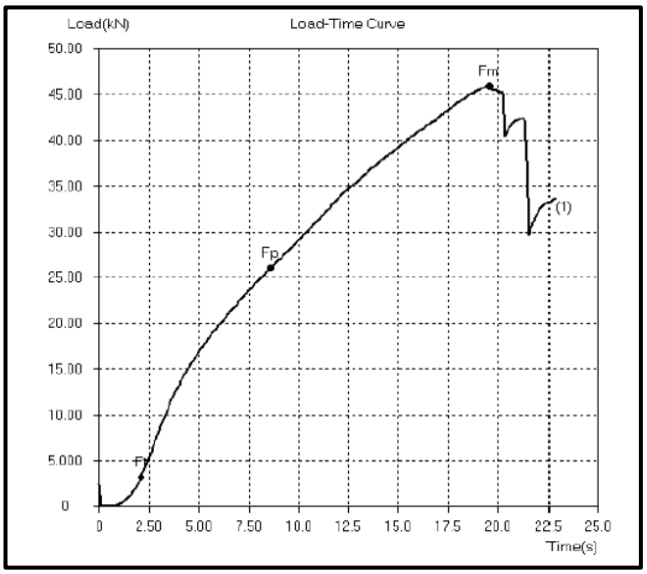
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	75	60	35,94



Şekil 4.5. 5 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.6. 6 Nolu Deney Parametreleri

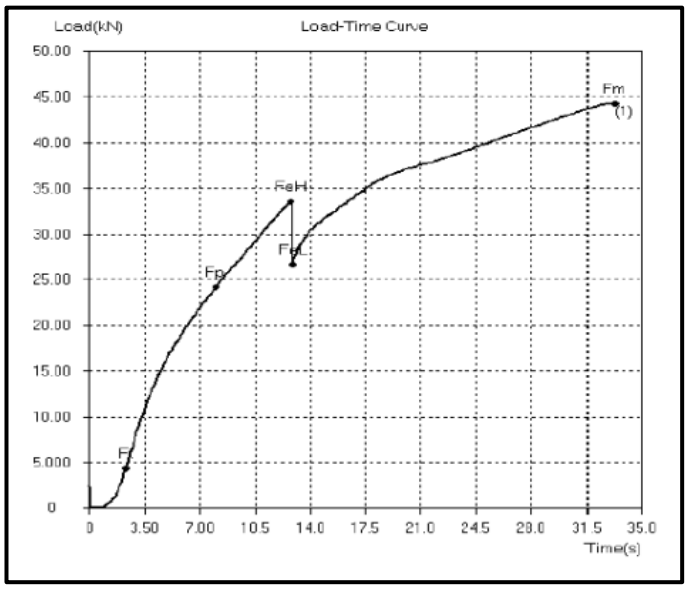
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	43	80	60	45,89



Şekil 4.6. 6 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.7. 7 Nolu Deney Parametreleri

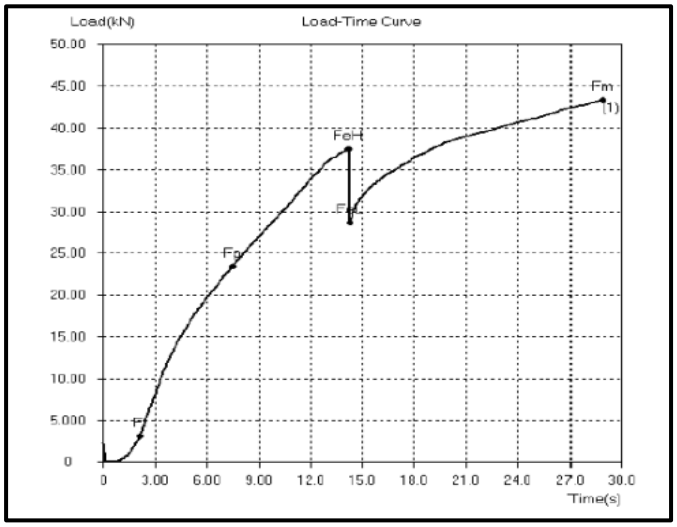
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	40	65	60	33,55



Şekil 4.7. 7 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.8. 8 Nolu Deney Parametreleri

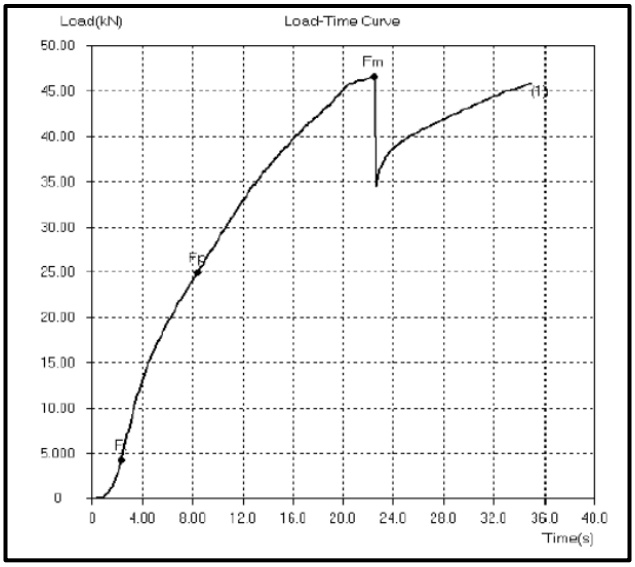
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	37	65	60	37,45



Şekil 4.8. 8 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.9. 9 Nolu Deney Parametreleri

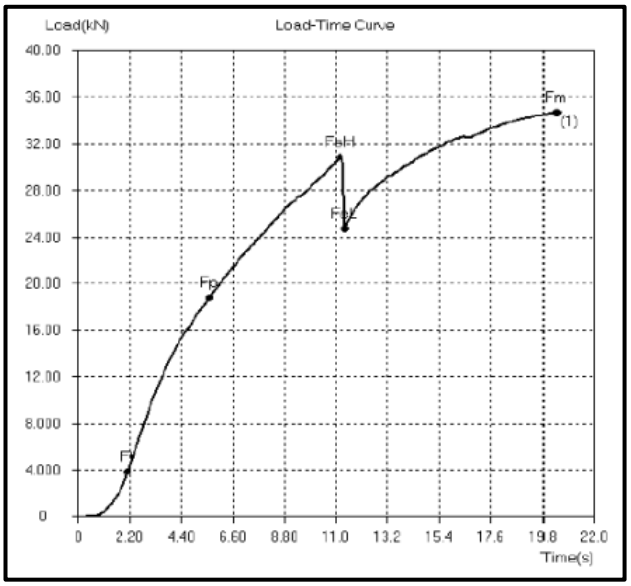
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	34	65	60	46,59



Şekil 4.9. 9 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.10. 10 Nolu Deney Parametreleri

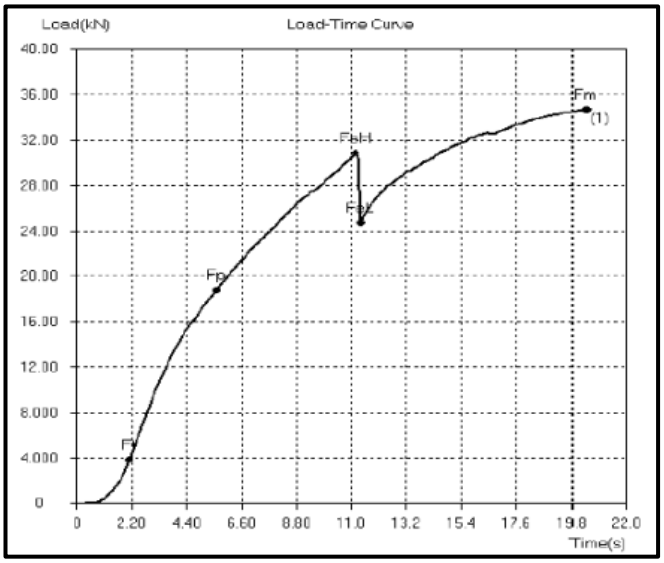
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	46	65	60	30,88



Şekil 4.10. 10 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.11. 11 Nolu Deney Parametreleri

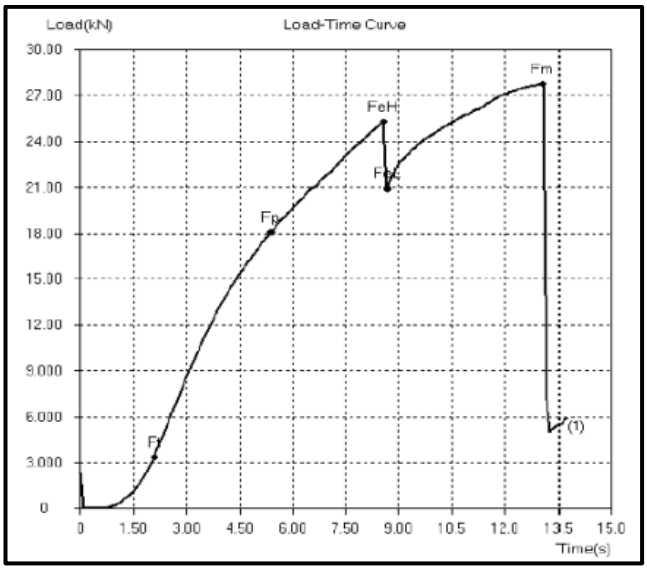
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	38	49	65	60	21



Şekil 4.11. 11 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.12. 12 Nolu Deney Parametreleri

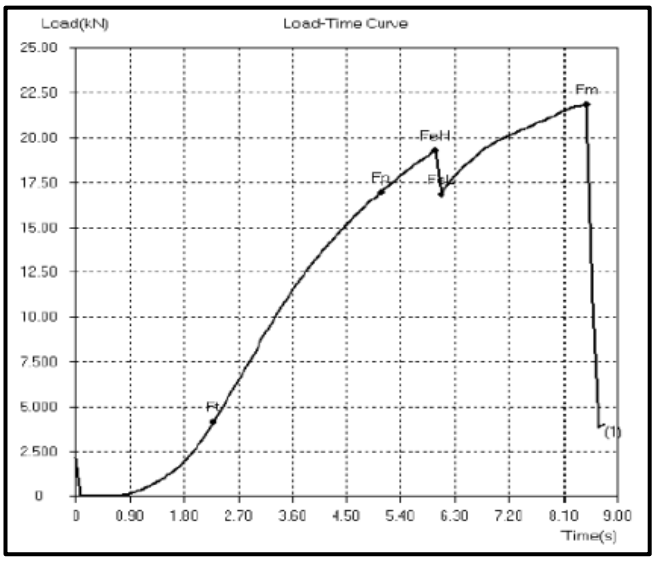
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	36	43	65	60	25,31



Şekil 4.12. 12 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.13. 13 Nolu Deney Parametreleri

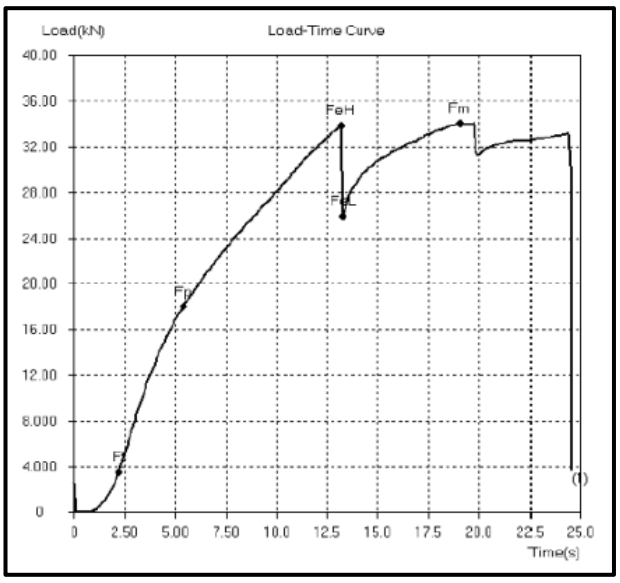
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	34	43	65	60	18



Şekil 4.13. 13 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.14. 14 Nolu Deney Parametreleri

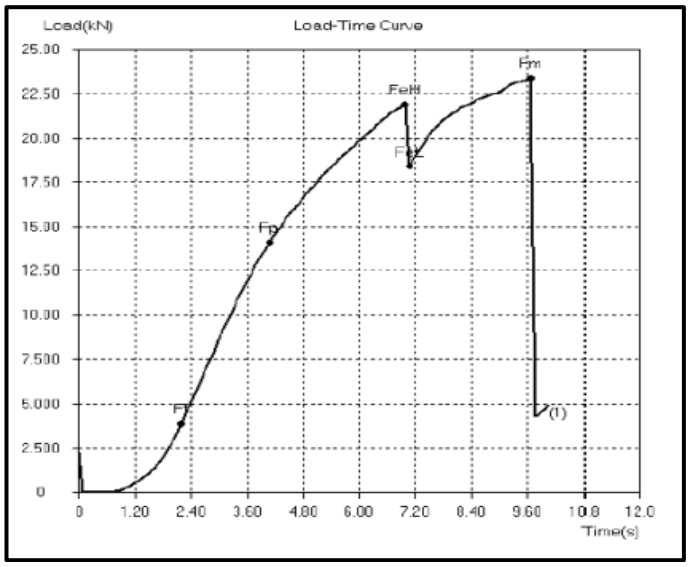
Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	36 (Pulses 2)	43	65	60	33,51



Şekil 4.14. 14 Nolu Deney Kopma Grafiği

Çizelge 4.15. 15 Nolu Deney Parametreleri

Parametreler	Akım (Current) kA	Basınç (Pressure)(daN)	Kaynak Zamanı (Weld Time)(ms)	Sıkma Zamanı (Squeeze)(ms)(cycle)	Kopma Testi Sonucu (kN)
Değerler	34 (Pulses 2)	43	65	60	21,94



Şekil 4.15. 15 Nolu Deney Kopma Grafiği

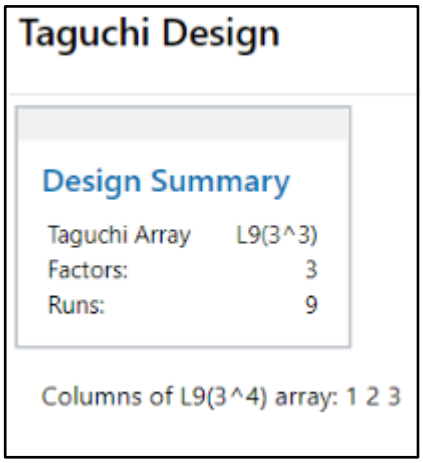
Yapılan denemelerde tüm deneylerde kopma dayanımı 25 kN üzerinde gelmiştir.Safe window çalışmasında NOK alınan parametre seviyeleri tabloya alınmamıştır.Bulunan tüm bu sonuçların analizinin yapılması için tüm veriler MINITAB programına aktarılmıştır. Ortalama değer,standart sapma ve sinyal gürültü oranına göre oluşturulan grafikler aşağıdaki gibidir.

Belirlenen aralığa göre tüm parametrelerle bir deney tasarımı oluşturmak için faktörler ve seviyeleri seçilmiştir. Çizelge 4.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.16. Deney Faktörleri ve Seviyeleri

FAKTÖRLER	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Basınç (Pressure) (daN)	37	40	43
Kaynak Süresi (Welding time) (cycle)	55	60	65
Sıkma zamanı (Squeeze) (cycle)	35	40	45

Deneyde değişken parametreler belirlenmiş, deney için tüm seviyeler Çizelge 3.18'de gösterilmiştir. Belirlenen bu faktör ve seviyeleri MINITAB programı ile ortagonal bir seri oluşturulmuştur.



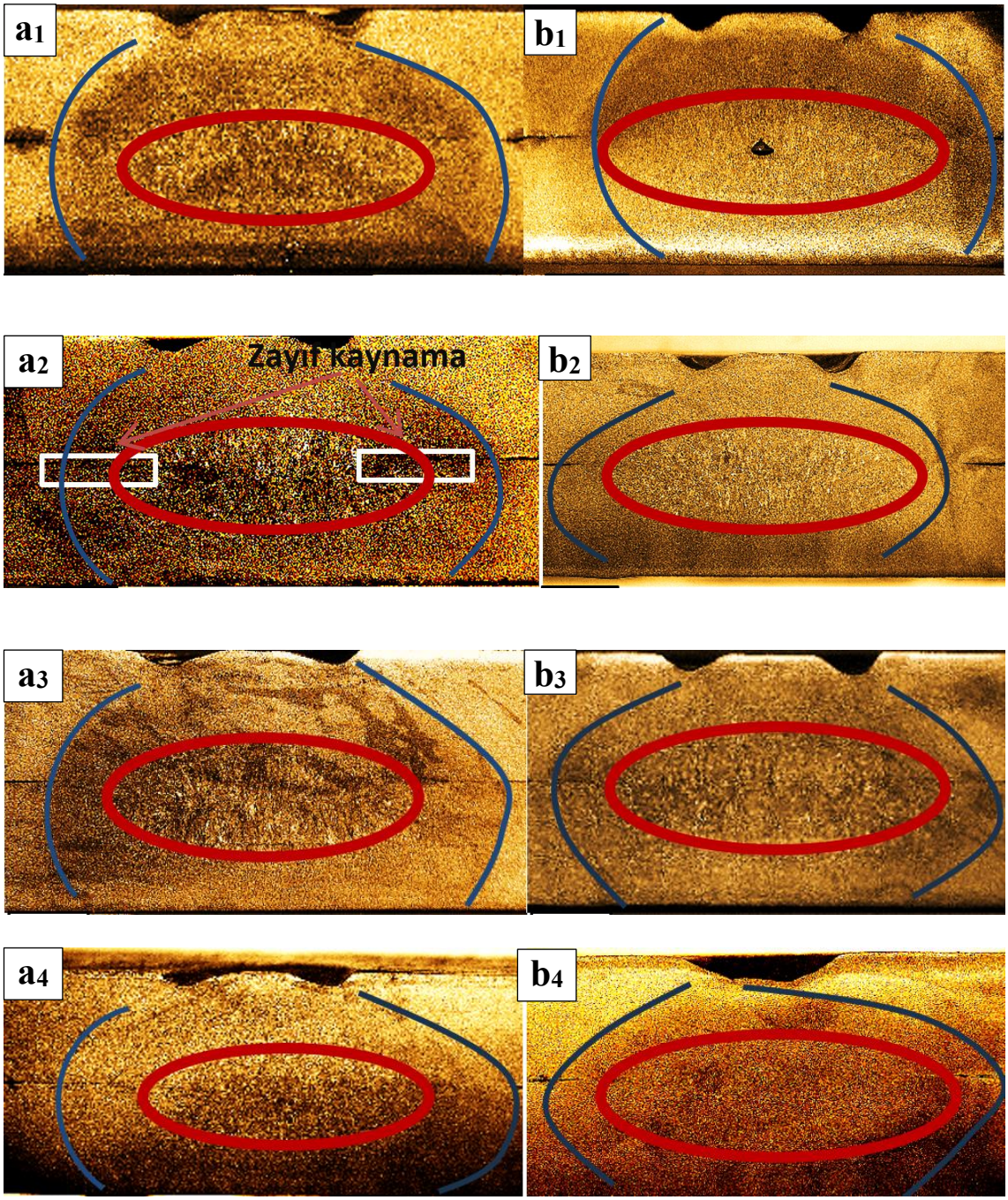
Şekil 4.16. Seçilen ortogonal dizi MINITAB görüntüsü

Çizelge 4.17. Deney parametreleri tablosu

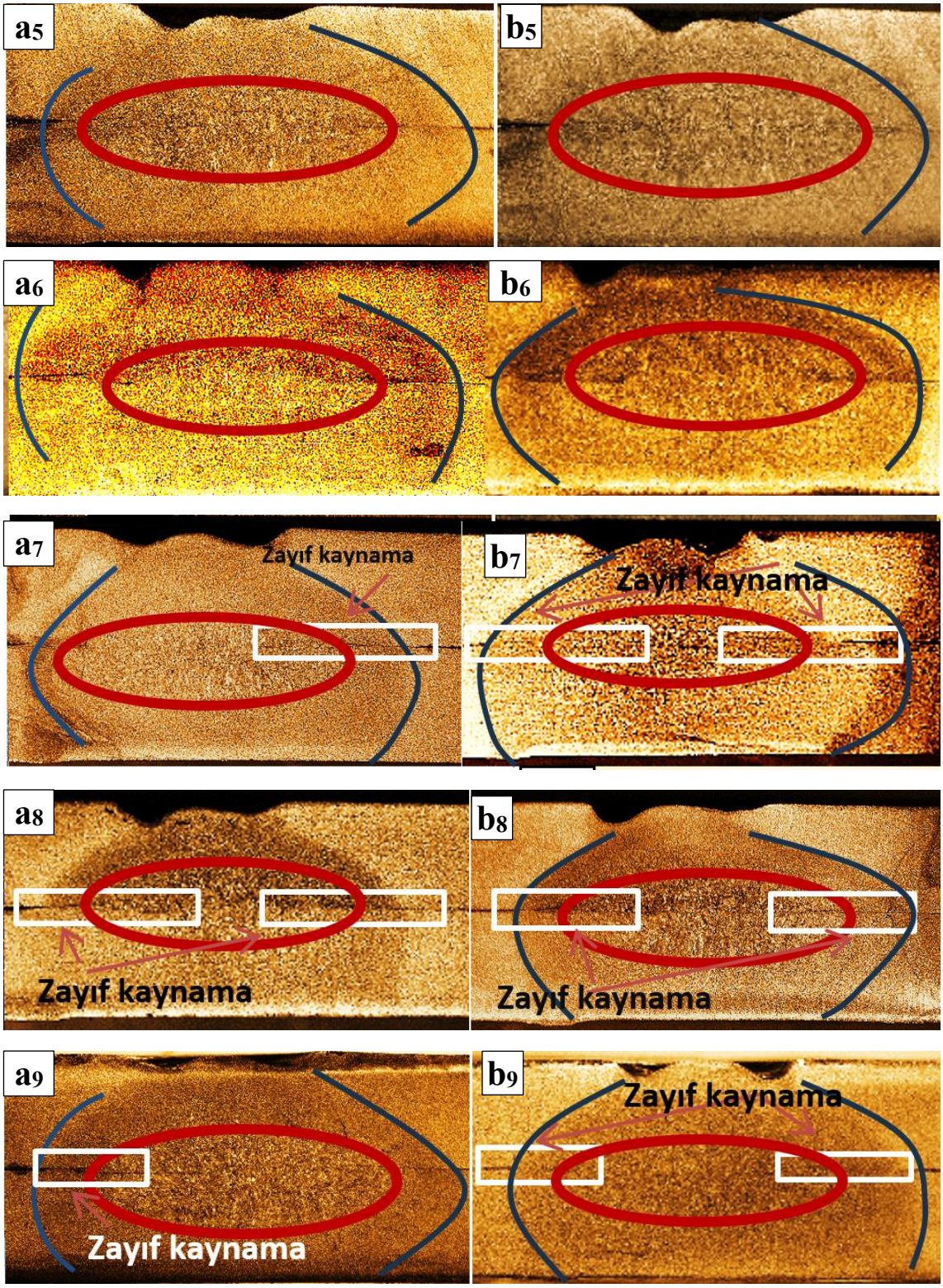
Deney No	Basınç (daN)	Kaynak süresi (cycle)	Sıkma Zamanı (cycle)
1	37	55	35
2	37	60	40
3	37	65	45
4	40	55	40
5	40	60	45
6	40	65	35
7	43	55	45
8	43	60	35
9	43	65	40

Belirlenen 9 deney her parametre kombinasyonu için 3 kez tekrarlanmıştır. Deney tablosu Çizelge 4.17'de gösterilmiştir.

Numunelerin detaylı analizleri için makro yapı, mikro yapı, sertlikleri incelenmiş ve çekme kayma testleri yapılmıştır. Aşağıda yapılan makroyapı görüntüleri verilmiştir. İncelemeye braket üzerindeki 2 ve 3 numaralı kaynak noktaları 9 parametre için incelenmiştir. Şekil 4.17'de makroyapıları verilmiştir.

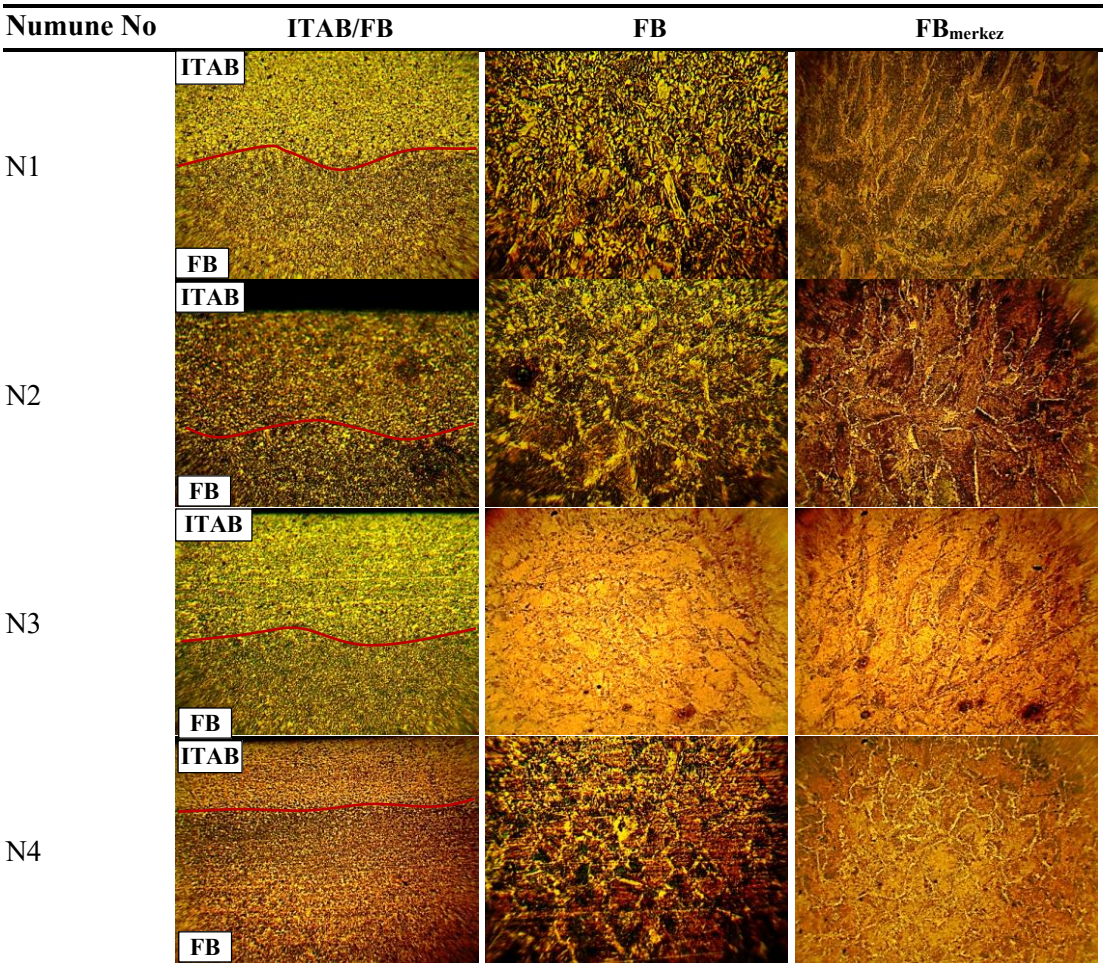


Şekil 4.17. Numunelerin 2 ve 3 numaralı kaynak noktalarının geometrik ölçümü
a) 2 numaralı kaynak noktası kesiti ve b) 3 numaralı kaynak noktası kesiti

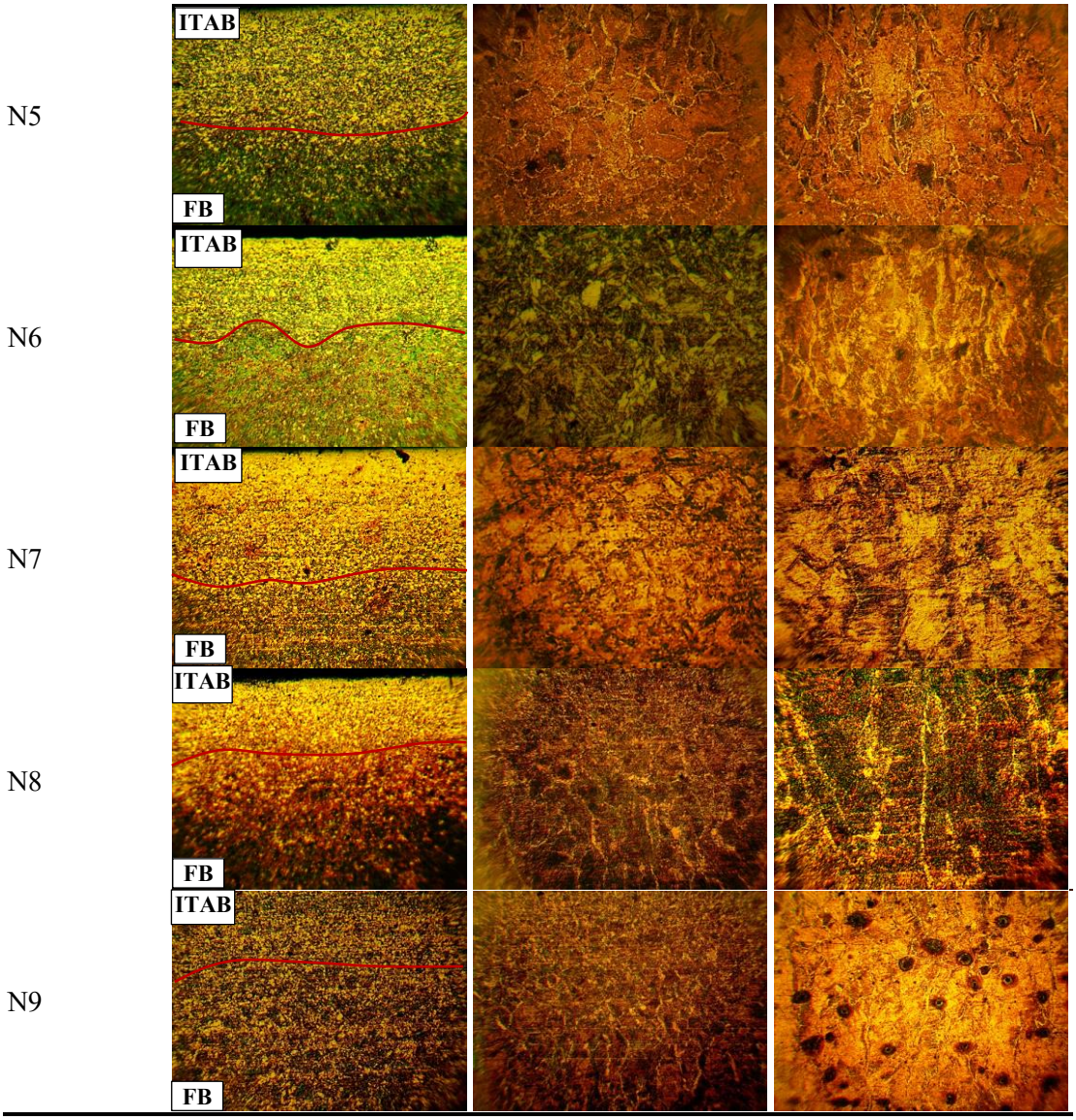


Şekil 4.17. Numunelerin 2 ve 3 numaralı kaynak noktalarının geometrik ölçümü
a) 2 numaralı kaynak noktası kesiti ve b) 3 numaralı kaynak noktası kesiti

2 ve 3 numaralı numunelerin makro yapıları Şekil 3.29'da görülmektedir. Görsellerde ITAB, ana malzeme ve füzyon bölgesi görülmektedir. Projeksiyon kaynağındaki soğutma hızı sıradan kaynak tekniklerine göre farklıdır, daha fazla olmaktadır. Ayrıca bu soğutma hızının faz oluşması üzerinde önemli bir rolü vardır. Numunelerde basınç parametresinin artmasıyla eksik kaynak hataları gözlemlenmiştir. Bunun sebebi eriyen malzemenin nüfuz etmeden yüzeye yayılmasıdır, malzemenin erime bölgesinden çevreye olan akışı olmadığı anlamına gelir. Bu durum, kaynak penetrasyonunun azalmasına ve daha yüzeysel bir kaynak bağlantısının oluşmasına yol açmıştır. Bunun bir diğer nedeni ise, kaynak işlemi sırasında ergiyen malzemenin sıvı hâle geçerek elektrotlar arasında bir bağlantı noktası oluşturmasıdır. Uygulanan yüksek basınç, sıvı metalin bağlantı alanı içinde serbestçe yayılmasını kısıtlayarak, daha dar ve sınırlı bir ergime bölgesi oluşmasına neden olmuştur.. (Li ve diğ., 2022).



Şekil 4.18. 9 numuneye ait ITAB ve temel bölgelerde gözlemlenen mikroyapısal özellikler



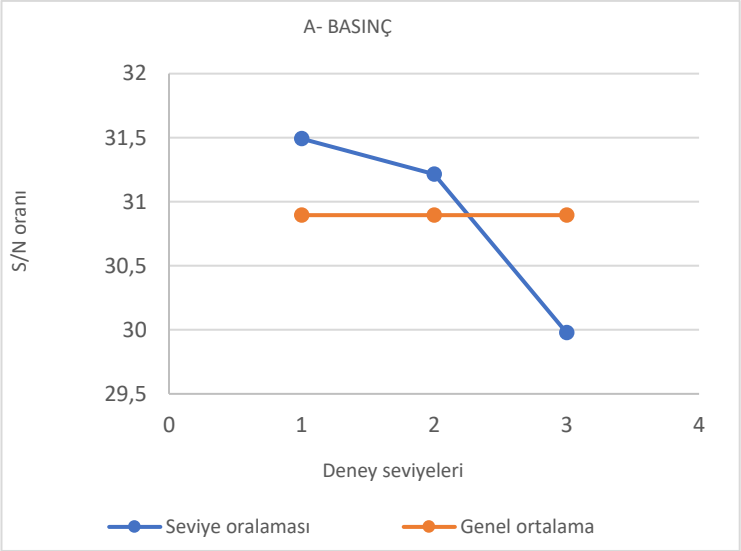
Şekil 4.18. 9 numuneye ait ITAB ve temel bölgelerde gözlemlenen mikroyapısal özellikler (devam)

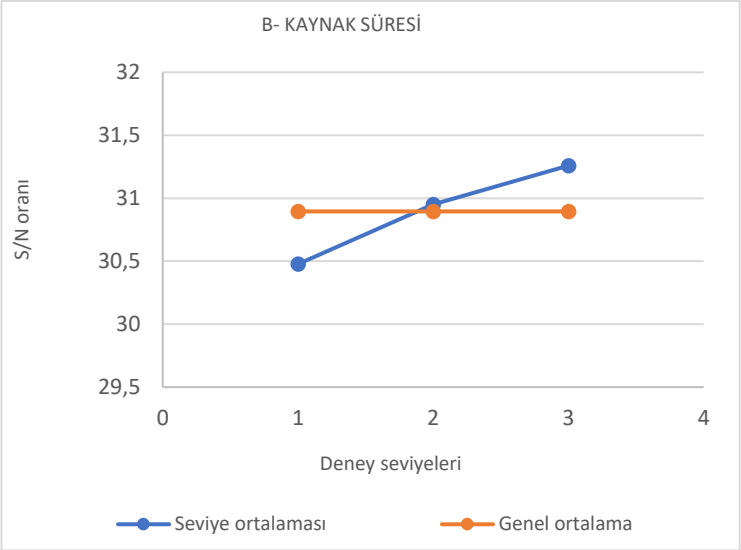
ITAB ve füzyon bölgesi olarak ayrılan kaynak bölgeleri tüm numuneler için Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Kaynak merkezine doğru büyüyen tanecikler bakır elektrotların hızlı ısı batmasından kaynaklanmaktadır. Füzyon bölgesinde de hızlı soğumadan dolayı martenzit yapı görülmektedir. ITAB'da üniform olmayan yapının elde edilmesinin sebebi de kaynak döngüsü termal gradyanıdır. ITAB bölgesinde malzeme hızla ısınmış ve ergime sıcaklığına yaklaşmış sonrasında da hızla soğumuş ve kristalleşmeden dolayı ince taneli bir mikroyapı oluşmuştur.

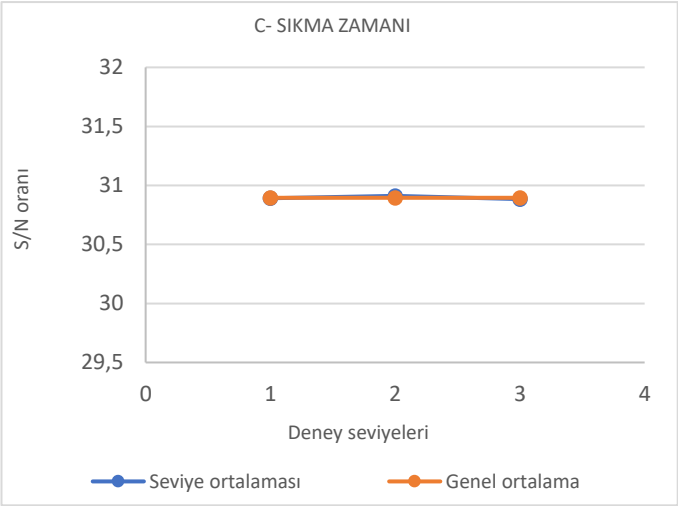
Yapılan mikroyapı incelemeleri ve alınan geometrik ölçümler sonucunda, sıkma süresinin kaynak kesiti geometrisi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Karşılaştırılan iki örnek numunenin benzer kesit ölçümleri sergilemesi, uygulanan kaynak işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Öte yandan, kaynak basıncının artırılmasıyla birlikte füzyon bölgesinin genişlediği ve penetrasyon derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Kaynak süresi sabit tutulan numuneler karşılaştırıldığında; örneğin N1, N4 ve N7 numunelerinde penetrasyon derinliği 0,45 µm'den 0,36 µm'ye azalmıştır. Benzer şekilde, N2, N5 ve N8 numunelerinde kaynak süresi 60 çevrim olarak sabitlenmiş olmasına rağmen, penetrasyon derinliğinde 0,16 µm'den 0,41 µm'ye bir düşüş gözlenmiştir. N3, N6 ve N9 numunelerinde ise bu değer 0,50 µm'den 0,44 µm'ye gerilemiştir. Bu bulgular, kaynak parametrelerinin birleşim kalitesi üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Projeksiyon kaynağında füzyon bölgesinin boyutu dayanım performansını etkileyen en önemli özelliklerden biridir bu şekilde bakıldığında N3 numunesi en iyi kaynak performansını göstermiştir. Kaynak süresinin etkileri de numuneler üzerinde gözlemlenebilir. 55 çevrim olan kaynak süresi 65 çevrime çıktığında füzyon bölgesinin boyutları ve ITAB bölgesi genişliği artmıştır. ITAB bölgesi geniş olan kaynağın mikroyapısında kaba taneler bulunur, bölgedeki kaba tanecikler genel mukavemeti ve mekanik dayanımı azaltır.

Çizelge 4.18. 9 numunenin 2 ve 3 nolu kaynakların geometrik ölçümleri

Numune No	**r/T (µm)**		**b (µm)**		**a (µm)**	
	2 numaralı kaynak	**3 numaralı kaynak**	**2 numaralı kaynak**	**3 numaralı kaynak**	**2 numaralı kaynak**	**3 numaralı kaynak**
N1	0,45	0,46	6872,50	6985,39	1461,35	1496,49
N2	0,46	0,45	7525,07	7898,56	1537,30	1594,52
N3	0,50	0,52	7713,03	7790,25	1729,88	1796,02
N4	0,43	0,42	6476,74	6529,41	1603,67	1589,54
N5	0,46	0,45	6621,52	6731,17	2067,66	2113,37
N6	0,49	0,47	6919,11	6940,55	2002,38	1984,92
N7	0,36	0,38	5604,63	5610,02	2196,20	2236,71
N8	0,41	0,40	5769,26	5711,13	2149,25	2105,13
N9	0,44	0,44	5857,98	5801,46	2344,43	2396,11







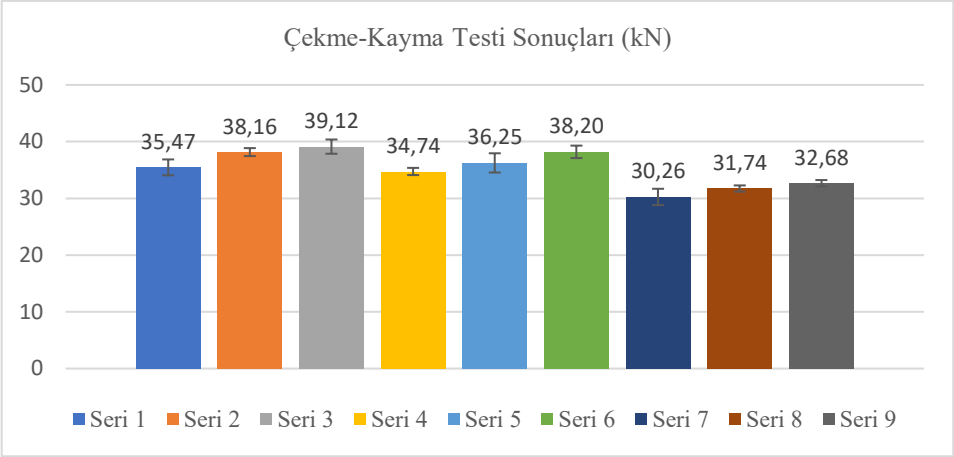
Şekil 4.19. Projeksiyon kaynak parametrelerinin kopma mukavemetine etkisinin Sinyal-Gürültü (S/N) oranları ile analizi

Şekil 4.19'da yapılan ANOVA analizinin S/N oranlarının grafikleri verilmiştir. S/N oranları ve deney seviyelerindeki değişim parametrelerin çekme-kayma testini nasıl etkilediğini göstermektedir, doğrudan mikroyapıyla ilgilidir. Kaynakların mikroyapıları kaynağın mukavemetini doğrudan etkiler. Çekme kayma testindeki ortalamalara bakılacak olunursa kaynak süresinin artması kopma mukavemetini artırmıştır.

Kaynak süresinin artmasıyla daha çok ısı girdisi olmuştur böylelikle füzyon bölgesi genişlemiştir yani kaynak süresinin artması dayanımı artırmıştır. Kaynak basıncının artmasıyla mukavemet değeri düşmüştür çünkü penetrasyon azalmıştır ve sığ bir kaynak oluşmuştur. Kopma mukavemeti üzerinde büyük değişikliğe sebep olmayan parametre de sıkma zamanıdır.

Çizelge 4.19. Numunelerin çekme-kayma test sonuçları ve ortalamaları

				ÇEKME KAYMA TEST SONUÇLARI (kN)			
Deney No	Basınç (daN)	Kaynak süresi (cycle)	Sıkma Zamanı (cycle)	1.DENEME	2.DENEME	3.DENEME	Ortalama
1	37	55	35	35,96	35,93	34,51	35,47
2	37	60	40	37,07	39,96	37,45	38,16
3	37	65	45	37,44	41,38	38,55	39,12
4	40	55	40	33,62	34,67	35,94	34,74
5	40	60	45	35,47	38,34	34,95	36,25
6	40	65	35	36,82	39,91	37,88	38,20
7	43	55	45	30,35	31,65	28,77	30,26
8	43	60	35	30,63	32,83	31,76	31,74
9	43	65	40	32,64	32,14	33,25	32,68



Şekil 4.20. Çekme-kayma testi sonuçları ortalamaları

Şekil 4.20'de numunelerin ortalama kopma dayanımları gösterilmiştir. Her numune için testler 3 defa tekrarlanmıştır. Makro yapı ve mikroyapı incelemeleri ve çekme-kayma testi sonuçları uyum içerisindedir. 3 nolu numune ortalama olarak en iyi kaynak performansına sahiptir. Bunu etkileyen en önemli iki parametre füzyon bölgesi genişliği ve ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğidir.

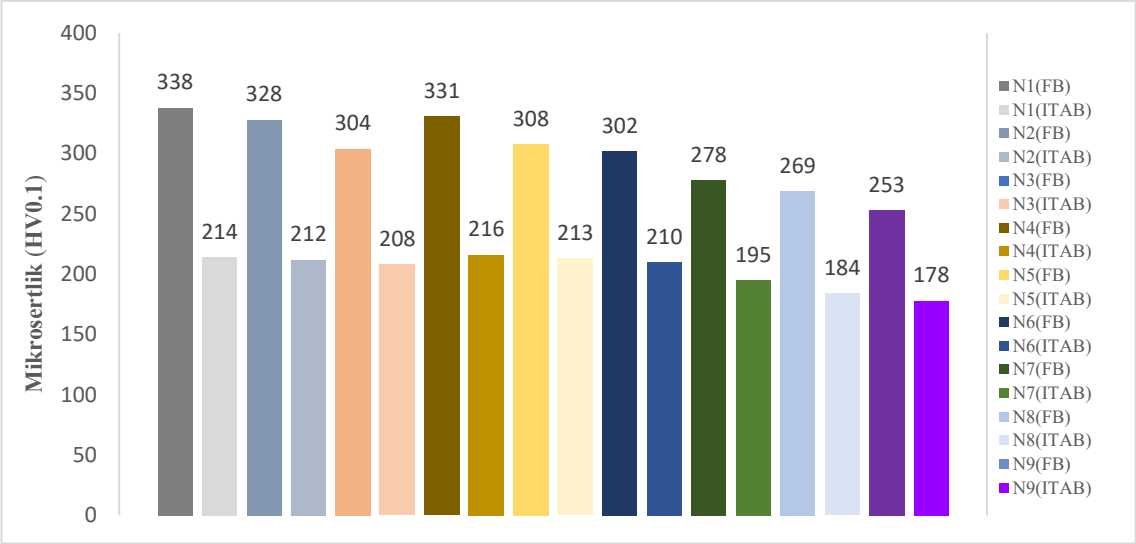
Çizelge 4.20. Çekme-kayma testi için ANOVA sonuçları

S/N oranı	30,90							
	Serbestlik derecesi	**Ortalama S/N değeri**			**Kareler toplamı**	**Varyans**	**F**	**Katkı oranı (%)**
		Seviye 1	**Seviye 2**	**Seviye 3**				
A- Basınç	2	31,49	31,22	29,98	3,90	1,95	130,84	80,23
B-Kaynak Süresi	2	30,48	30,95	31,26	0,93	0,47	31,19	19,13
C-Sıkma Zamanı	2	30,89	30,91	30,88	0,00	0,00	0,04	0,03
Hata	2				0,03	0,01		0,61
Toplam	8				4,86	2,43		

Bu özellikler ele alındığında 3.numune en geniş füzyon bölgesine alanına sahipken diğer numunelere göre daha az ısı tesiri altındaki bölgeye sahiptir. Ama penetrasyon derinliği

ve füzyon bölgesinin genişliği fazla olmasından dolayı performansı daha iyidir. Grafiğe eklenecek bir diğer yorumda kaynak süresi arttıkça kopma mukavemetinin artmıştır. Kaynak basıncı arttıkça da kopma mukavemeti azalmıştır.

Çizelge 4.20' de, uygulanan kaynak parametrelerinin kaynak kesit geometrisi üzerindeki etkileri sayısal verilerle ortaya konulmuştur. Analize göre en etkili parametre %80,23 ile kaynak basıncıdır. Kaynak süresi ondan sonra gelen bir diğer parametre olup sıkma zamanı kaynak üzerinde etkili olmamıştı.



Şekil 4.21. Kaynakların mikrosertlik dağılımları

Malzemelerin sertliklerine bakıldığında en yüksek sertlik füzyon bölgesinde en düşük sertlik ana malzeme bölgesindedir. Yukarıda verilen grafikte, ana metalin sertlik değerlerinin 170–190 HV aralığında seyrettiği gözlemlenmiştir. Ana malzemeden füzyon bölgesine ilerledikçe sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Füzyon bölgesinde ise sertlik, homojen bir dağılım göstermektedir. Bu durum, ilgili bölgede mikroyapının martensitik faza dönüşmesiyle açıklanmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Amörtisör braket parçası araç üzerinde emniyeti sağlayan güvenlik parçasıdır. Bu parça için kaynak optimizasyon çalışması yapılmıştır. 9 farklı numune üretilerek kopma testleri yapılmıştır. Projeksiyon kaynak için önemli olan birçok parametreden bu çalışma için kritik olan 3 parametre seçilmiş ve bununla birlikte parametrelerde öncelikle safe window çalışması yapılarak, parametreler için doğru çalışma aralıkları belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; bu 3 parametre için belirlenen çalışma aralıklardan en iyi sonucu veren değer seçilerek deney kombinasyonlarının belirlenmesi için taguchi metodu kullanılmıştır. Deney sayısı azaltılarak zamandan ve malzemeden tasarruf edilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar literatürdekilerle uygunluk göstermektedir. Taguchi metodunda oluşturulan analize göre grafiklerde ortalama değer, standart sapma ve sinyal gürültü oranına göre sonuçları irdelenmiştir.

Üç farklı parametre incelenmiş ve kopma mukavemeti üzerinde en belirleyici faktörün %80 oranla kaynak basıncı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kaynak basıncı artırıldığında, zayıf kaynak bölgeleri oluşmuş ve bu durum mukavemeti olumsuz yönde etkilemiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek kopma mukavemeti değeri 39,12 kN olarak elde edilmiştir. Ayrıca, kaynak sıkma süresinin etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak süresi arttıkça, penetrasyon derinliği ve füzyon bölgesi genişliği artış göstermiştir. En ideal penetrasyon ve füzyon bölgesi parametrelerine sahip numune ise N3 olarak belirlenmiştir. N3 numunesinin kaynak parametreleri sırasıyla 37 daN kaynak basıncı, 65 çevrim kaynak süresi ve 45 çevrim sıkma süresidir.

Kaynakların sertlikleri incelendiğinde mikroyapılarla eş durumlar gözlemlenmiştir. Kaynak süresinin arttığı durumda yüksek ısı girdisinden kaynaklanan malzeme kaba taneli bir yapıya dönüştüğünden sertlik değeri az çıkmıştır.

Tüm deney sonuçlarına göre en optimum parametreleri kaynak basıncının 37 daN, kaynak süresi 65 çevrim, sıkma süresinin 45 çevrim olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

MEGEP, Metal Teknolojisi, Elektrik Direnç Kaynağı, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/ (Erişim Tarihi 05.02.2022)

Gugel, M.D., (1995). Electrode Wear Mechanisms During The Resistance Spot Welding Of Hot-Dipped Galvanized Steel, PhD Thesis, MTU, Michigan.

Anık, S., Anık, E. S., & Vural, M. (1993). 1000 soruda kaynak teknolojisi

Akyol, M., 2001. Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak UygulamalarıVe Karşılaşılan Sorunlar, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Anonim (2005). International Iron & Steel Institute Commitee on Automotive Applications, 'Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines', March 2005.

Aydın M. E. ,1994 Taguchi Deneysel Tasarım Metodu ve Segman Sanayiinde Bir Uygulama, Sakarya Üniversitesi

Gökçe, H., & Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6*(1)

Alizadeh-Sh, M., Marashi, S. P. H., & Pouranvari, M. (2014). Microstructure–properties relationships in martensitic stainless steel resistance spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining, 19*(7), 595–602. https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000230

Arı, A., Karagöz, T., Arslan, O., & Bayram, A. (2023). AISI 1050 çeliği üzerine Inconel 718 lazer dolgu kaynağının morfolojisi, mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 28*(2), 613–630. https://doi.org/10.17482/UUMFD.1228584

Ari, A., Bayram, A., Karahan, M., & Karagöz, S. (2023). Evaluation of the mechanical properties of chopped carbon fibre reinforced polypropylene, polyethylene, polyamide 6, and polyamide 12 composites. *Industria Textila, 74*(2), 175–183. https://doi.org/10.35530/IT.074.02.202214

Ari, A., Bayram, A., Karahan, M., & Karagöz, S. (2022). Comparison of the mechanical properties of chopped glass, carbon, and aramid fiber reinforced polypropylene. *Polymers and Polymer Composites, 30*, 096739112210985. https://doi.org/10.1177/09673911221098570

Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U., & Ilhan, E. (2008). Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials and Design, 29*(7), 1427–1431. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.09.004

American Welding Society (AWS). (2020). *Resistance welding manual* (5th ed.). Miami, FL: American Welding Society.

Bayraktar, E., Kaplan, D., Devillers, L., & Chevalier, J. P. (2007). Grain growth mechanism during the welding of interstitial free (IF) steels. *Journal of Materials Processing Technology, 189*(1–3), 114–125. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.012

Bayansar, B. (2018). Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği. *Academia.edu*. https://www.academia.edu/30886642/Yap%C4%B1_%C3%A7eliklerinin_kaynaklanabilirli%C4%9Fi

Bi, Y., Dong, J., Yang, Y., Luo, Z., Su, J., & Zhang, Y. (2023). Microstructure and joint performance during resistance projection welding of sensor support. *Materials Letters, 335*, 133797. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.133797

Chakraborty, G., Pal, T. K., & Shome, M. (2014). Microstructure development in resistance spot welded galvannealed IF steel sheet. *Materials Science and Technology, 27*(1), 382–386. https://doi.org/10.1179/026708310X12701095964603

Chen, L., Guo, Z., Zhang, C., Li, Y., Jia, Y., & Liu, G. (2021). Experiments and numerical simulations on joint formation and material flow during resistance upset welding of WC-10Co and B318 steel. *Journal of Materials Processing Technology, 296*, 117164. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117164

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons

Das, T., Panda, S. K., Arora, K. S., & Paul, J. (2023). Investigation of the microstructure and mechanical behaviour of resistance spot-welded CR210 steel joints using graphene as an interlayer. *Materials Chemistry and Physics, 302*, 127693. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127693

Eftekharimilani, P., van der Aa, E. M., Hermans, M. J. M., & Richardson, I. M. (2017). Microstructural characterisation of double pulse resistance spot welded advanced high strength steel. *Science and Technology of Welding and Joining, 22*(7), 545–554. https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1274848

Goodarzi, M., Marashi, S. P. H., & Pouranvari, M. (2009). Dependence of overload performance on weld attributes for resistance spot welded galvanized low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology, 209*(9), 4379–4384. https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2008.11.017

Gould, J. E. (2012). *Welding process fundamentals*. Materials Park, OH: ASM International.

Han, G., Ha, S., Marimuthu, K. P., Murugan, S. P., Park, Y., & Lee, H. (2021).

Estimation of shear fracture load in resistance projection welded sheets with dissimilar strength and thickness. *Engineering Failure Analysis, 120*, 105042. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105042

Huin, T., Dancette, S., Fabrègue, D., & Dupuy, T. (2016). Investigation of the failure of advanced high strength steels heterogeneous spot welds. *Metals, 6*(5), 111. https://doi.org/10.3390/met6050111

Kurt, M., Bagci, E., & Kaynak, Y. (2009). Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40*(5–6), 458–469. https://doi.org/10.1007/S00170-007-1368-2

Kou, D. S. (2003). *Welding Metallurgy* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Li, M., Tao, W., Zhang, J., Wang, Y., & Yang, S. (2022). Hybrid resistance-laser spot welding of aluminum to steel dissimilar materials: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Design, 221*, 111022. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111022

Messler, R. W. (2004). *Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Nielsen, C. V., Zhang, W., Martins, P. A. F., & Bay, N. (2015). 3D numerical simulation of projection welding of square nuts to sheets. *Journal of Materials Processing Technology, 215*(1), 171–180. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.017

Paramonov, S. S., Bulychev, V. V., Maksimov, N. N., & Ponomarev, A. I. (2021). Improvement of zinc coated steel stamped part and steel nut projection welding process. *Materials Today: Proceedings, 38*(4), 1470–1473. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.129

Pouranvari, M., & Marashi, S. P. H. (2010). Key factors influencing mechanical performance of dual phase steel resistance spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining, 15*(2), 149–155. https://doi.org/10.1179/136217109X12590746472535

Ramazani, A., Mukherjee, K., Abdurakhmanov, A., Abbasi, M., & Prahl, U. (2015). Characterization of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded DP600 steel. *Metals, 5*(3), 1704–1716. https://doi.org/10.3390/MET5031704

Ross, P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill.

Salimi Beni, S., Atapour, M., Salmani, M. R., & Ashiri, R. (2019). Resistance Spot Welding Metallurgy of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A, 50*, 2218–2234. https://doi.org/10.1007/s11661-019-05146-8

Schulz, H. (1993). *High performance welding processes*. Cambridge, UK: Abington Publishing.

Sharifitabar, M., Halvaee, A., & Khorshahian, S. (2011). Microstructure and mechanical properties of resistance upset butt welded 304 austenitic stainless steel joints. *Materials and Design, 32*(7), 3854–3864. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.007

Shirmohammadi, D., Movahedi, M., & Pouranvari, M. (2017). Resistance spot welding of martensitic stainless steel: Effect of initial base metal microstructure on weld microstructure and mechanical performance. *Materials Science and Engineering: A, 703*, 154–161. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.067

Singh Bharaj, A., Kewati, A., Shukla, S., Gedam, S., Kukde, R., & Verulkar, S. (2023). Study of resistant spot welding and its effect on the metallurgical and mechanical properties: A review. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org

TWI Ltd. (n.d.). *Resistance welding – Types, principles, advantages*. The Welding Institute. Retrieved from https://www.twi-global.com

Taguchi, G., Chowdhury, S., & Taguchi, S. (2000). *Robust engineering: Learn how to boost quality while reducing costs & time to market*. McGraw-Hill.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Kübra Korkmaz
Doğum Yeri ve Tarihi	: BURSA - 14.12.1995
Yabancı Dil	: İngilizce (B2)
Eğitim Durumu	
Lise	: Turhan Tayan Anadolu Lisesi
Lisans	: Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans	:
Çalıştığı Kurum(lar)	:TOFAŞ ARGE-Araç Enstegrasyon (6 Ay) KARSAN – ARGE (1 Yıl) STEP MÜHENDİSLİK/Ford Otosan/(3.5 yıl)
İletişim (e-posta)	: kbrakorkmaz95@gmail.com
Akademik çalışmalar*	:

Arı, A., Korkmaz, K., Mühürdar, B., & Bayram, A. (2023). Projeksiyon kaynağın proses parametrelerinin S355MC klevis braketin bağlantı performansına etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi,28(3)