

İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**1100 SERİSİ ALÜMİNYUM MALZEMELERDE TIG KAYNAĞI İLE OLUŞAN
KAYNAK DİKİŞ GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU.**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih TURHAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN

AĞUSTOS 2017

İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**1100 SERİSİ ALÜMİNYUM MALZEMELERDE TIG KAYNAĞI İLE OLUŞAN
KAYNAK DİKİŞ GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU.**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih TURHAN
(600913004)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Levent AYDIN

AĞUSTOS 2017

İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 600913004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih TURHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “1100 SERİSİ ALÜMİNYUM MALZEMELERDE TIG KAYNAĞI İLE OLUŞAN KAYNAK DİKİŞ GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yard. Doç. Dr. Levent AYDIN**
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yard.Doç. Dr. Aydın ÜLKER**
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Yard.Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT
Ege Üniversitesi

Teslim Tarihi : **08 Eylül 2017**
Savunma Tarihi : **08 Ağustos 2017**

ÖNSÖZ

Optimizasyon konusunu kendisinden aldığım ders, proje ve tezler ile bana sevdiren, bu konuda yüksek lisans yapmamı sağlayan ve son olarak da çeşitli endüstri dallarında pek çok uygulamaları olan bu yaygın ve güncel konuda tez çalışması yapmamı sağlayan sayın hocam Yard. Doç. Dr. Levent AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, geleceğe umutla bakmamı sağlayan ve çalışmalarım süresince desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen motivasyon kaynağım sevgili eşim L.Ceyda TURHAN'a teşekkür ederim.

Ağustos 2017

Fatih Turhan

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	16
1.1 Problemin Tanımı.....	17
1.2 Araştırmanın Motivasyon Kaynağı ve Amaçları	18
1.3 Tez Çalışmasının Referans Aldığı Çalışmalar	19
1.4 Literatür Araştırması	20
2. TIG KAYNAĞI VE ÖZELLİKLERİ	24
2.1 TIG Kaynağı.....	24
2.2 TIG Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları	27
2.3 TIG Kaynağında Kullanılan Ekipmanlar	28
2.3.1 Güç kaynağı	28
2.3.2 TIG kaynak torcu	30
2.3.3 TIG kaynak elektrodu	32
2.3.4 Dolgu malzemesi.....	34
2.3.5 Tel sürme sistemleri	34
3. REGRESYON ANALİZİ	36
3.1 Modeller	36
3.2 Regresyon Analizinin Amacı ve Kullanımı	38
3.3 Genel Uygunluk Denklemi.....	39
3.4 Nonlinear Regresyon Analizi	40
4. MATEMATİKSEL MODEL	42
5. OPTİMİZASYON	49
5.1 Tek Amaçlı Optimizasyon	50
5.2 Çok Amaçlı Optimizasyon	50
5.3 Stokastik Optimizasyon Algoritmaları.....	51
5.3.1 Nelder-Mead Algoritması	51
5.3.2 Random Search Algoritması	53
5.3.3 Simulated Annealing Algoritması.....	54
5.3.4 Differential Evolution Algoritması	56
5.4 Wolfram Mathematica ve Optimizasyon Araçları	57
5.4.1 NMinimize ve NMaximize Çözücüleri.....	58
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	60

6.1 Kaynak Parametrelerinin Doğrudan Etkileri	60
6.1.1 Kaynak hızı	60
6.1.1.1 Kaynak hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi	61
6.1.1.2 Kaynak hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi	62
6.1.1.3 Kaynak Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi	64
6.1.1.4 Kaynak Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi	65
6.1.2 Kaynak Akımı	67
6.1.2.1 Kaynak Akımının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi	67
6.1.2.2 Kaynak Akımının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi	68
6.1.2.3 Kaynak Akımının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi	69
6.1.2.4 Kaynak Akımının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi	69
6.1.3 Gaz Temizlik Yüzdesi	70
6.1.3.1 Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi	71
6.1.3.2 Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi	72
6.1.3.3 Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi	74
6.1.3.4 Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi	75
6.1.4 Ark Mesafesi	76
6.1.4.1 Ark Mesafesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi	76
6.1.4.2 Ark Mesafesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi	78
6.1.4.3 Ark Mesafesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi	79
6.1.4.4 Ark Mesafesinin Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi	81
6.1.5 Kaynak Dolgu Teli	82
6.1.5.1 Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi	82
6.1.5.2 Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi	84
6.1.5.3 Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi	85
6.1.5.4 Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikiş Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi	87
6.2 TIG Kaynak Parametrelerinin Kaynak Nüfuziyetine Etkileri	88
6.3 TIG Kaynak Parametrelerinin ve Kaynak Dikiş Alanının Optimizasyonu	89
7. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR	92
KAYNAKLAR	94

EKLER	98
ÖZGEÇMİŞ	116



KISALTMALAR

TIG	: Tungsten Inert Gas
FH	: Üst Yükseklik
FW	: Üst Genişlik
BH	: Alt Yükseklik
BW	: Alt Genişlik
RSM	: Response Surface Methodology
GA	: Genetic Algorithm
SA	: Simulated Annealing
aBPNN	: Advance Back-Propagation Neural Network
GA-NN	: Genetic Algorithms and Neural Network
NN	: Neural Network
SCR	: Silicon Controlled Rectifer
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
DE	: Differential Evolution
NM	: Nelder-Mead
ACO	: Ant Colony Optimization
MA	: Memetic Algorithms
PSO	: Particle Swarm Optimization
HD	: Hesaplanmış Değer
ÖD	: Ölçülmüş Değer
NP	: Nüfus Büyüklüğü
WTPE	: Kaynak Tekniği Performans Faktörü

SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece
CO_2	: Karbondioksit
W	: Tungsten
ThO_2	: Toryum Oksit
ZrO_2	: Zirkonyum Oksit
CeO_2	: Seryum Oksit
x	: Girdi Değişkenleri
y	: Yanıt Fonksiyonu
R^2	: Korelasyon Katsayısı
H	: Isı Miktarı
I	: Akım
V	: Volt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1	: Optimizasyon problemleri için, kullanılan kısıtlar,tasarım değişkenleri ve kullanılan optimizasyon metodları	18
Tablo 2.1	: Tungsten elektrotların kimyasal bileşimleri ve renk kodları (DIN 32528).	33
Tablo 2.2	: Tungsten elektrotların bileşim ve çaplarına göre akım yüklenebilme kapasiteleri	34
Tablo 4.1	: İnce alüminyum levhaların TIG kaynağı için çalışma datası.	44
Tablo 4.2	: İnce alüminyum levhaların TIG kaynağı için doğrulama datası.	46
Tablo 4.3	: Fonksiyon modellerine göre kaynak geometrisi ölçülerinin R ² değerleri	47
Tablo 5.1	: Dört optimizasyon metoduna ait Wolfram Mathematica v.11 programı ayarları	57
Tablo 6.1	: Kaynak dikişi kesit geometrisine ait ölçülerin optimizasyon değerleri... ..	90
Tablo 6.2	: Farklı alt yükseklik (BH) kısıtları için hesaplanan minimum kaynak dikişi kesit geometrisi alanı optimizasyon sonuçları.....	91
Tablo A.1	: Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları.....	98
Tablo A.2	: Çalışma datasına göre BH ve BW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.	110
Tablo A.3	: Çalışma datasına göre FH ve FW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.	112
Tablo A.4	: Kontrol datasına göre BH ve BW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.	114
Tablo A.5	: Kontrol datasına göre FH ve FW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.	115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kaynak dikişi kesit geometrisi.	17
Şekil 2.1 : Kaynak yönteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.2 : Soğuk tel ile TIG kaynağı.	26
Şekil 2.3 : Sıcak tel ile TIG kaynağı.....	27
Şekil 2.4 : Kaynak Güç Ünitesi : (a)İnvertör kontrollü ünite, (b) Tristör kontrollü ünite.	30
Şekil 2.5 : Bir TIG kaynak torcunun parçaları.	30
Şekil 2.6 : Su soğutmalı bir TIG kaynak torcunun kesiti.....	31
Şekil 5.1 : Nelder-Mead akış şeması.	52
Şekil 5.2 : Random Search akış şeması.	53
Şekil 5.3 : Simulated Annealing akış şeması.....	55
Şekil 5.4 : Differential Evolution akış şeması.	56
Şekil 6.1 : Kaynak hızının farklı giriş parametleri ile üst genişliğe etkisi.....	61
Şekil 6.2 : Kaynak hızının farklı giriş parametleri ile üst yüksekliğe etkisi.....	62
Şekil 6.3 : Artan kaynak hızı ile üst yükseklik ve alt yükseklik arasındaki ilişki	64
Şekil 6.4 : Kaynak hızının farklı giriş parametleri ile alt genişliğe etkisi.	64
Şekil 6.5 : Kaynak hızının farklı giriş parametleri ile alt yüksekliğe etkisi ...	66
Şekil 6.6 : Kaynak akımının farklı giriş parametleri ile üst genişliğe etkisi.	67
Şekil 6.7 : Kaynak akımının farklı kaynak hızlarında üst genişliğe etkisi ...	68
Şekil 6.8 : Kaynak akımının farklı kaynak hızlarında alt genişliğe etkisi.	69
Şekil 6.9 : Kaynak akımının farklı kaynak hızlarında alt yüksekliğe etkisi ...	70
Şekil 6.10 : Koruyucu gaz temizlik yüzdesinin farklı akım değerlerinde üst genişliğe etkisi.....	71
Şekil 6.11 : Koruyucu gaz temizlik yüzdesinin farklı akım değerlerinde üst yüksekliğe etkisi ...	72
Şekil 6.12 : Koruyucu gaz temizlik yüzdesinin farklı akım değerlerinde alt genişliğe etkisi.....	74
Şekil 6.13 : Koruyucu gaz temizlik yüzdesinin farklı akım değerlerinde alt yüksekliğe etkisi ...	75
Şekil 6.14 : Ark mesafesinin farklı akım değerlerinde üst genişliğe etkisi.	77
Şekil 6.15 : Ark mesafesinin farklı akım değerlerinde üst yüksekliğe etkisi ...	78
Şekil 6.16 : Ark mesafesinin farklı akım değerlerinde alt genişliğe etkisi.....	80
Şekil 6.17 : Ark mesafesinin farklı akım değerlerinde alt yüksekliğe etkisi	81
Şekil 6.18 : Dolgu tel hızının farklı akım değerlerinde üst genişliğe etkisi ...	83
Şekil 6.19 : Dolgu tel hızının farklı akım değerlerinde üst yüksekliğe etkisi	84
Şekil 6.20 : Dolgu tel hızının farklı akım değerlerinde alt genişliğe etkisi ...	85
Şekil 6.21 : Dolgu tel hızının farklı akım değerlerinde alt yüksekliğe etkisi ...	87
Şekil 6.22 : WTPF'nin nüfuziyete etkisi	89

Şekil 6.23 : Kaynak dikiş kesit geometrisi ölçülerinin, kaynak dikiş kesit alanına göre değişimi..... **91**



1100 SERİSİ ALÜMİNYUM MALZEMELERDE TIG KAYNAĞI İLE OLUŞAN KAYNAK DİKİŞ GEOMETRİSİNİN OPTİMİZASYONU.

ÖZET

Mühendislik spektrumu kapsamında kaynak, tamamlayıcı parçalar, montaj işlemi ve makine parçaları üretiminde kullanılan temel bir işlemdir. TIG kaynağı, gıda endüstrisinde, gemilerde, köprülerde, paslanmaz çelik kaynağında vb. yerlerde en sık kullanılan ve en iyi bilinen kaynak yöntemidir. Temel olarak TIG kaynağı kaynak kalitesi, üst yükseklik (FH), üst genişlik (FW), alt yükseklik (BH), alt genişlik (BW) ve kaynak dikiş kesit geometrisi alanı gibi kalite ölçütlerine sahip kaynak dikiş kesit geometrisi tarafından nitelendirilmiştir. Kaynak dikiş kesit geometrisi, kaynağın mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu yüzden kaynak parametrelerinin seçimi, en uygun kaynak dikiş kesit geometrisinin elde edilmesinde oldukça önemlidir. Bu çalışmada TIG kaynağı parametrelerinin (kaynak hızı, kaynak akımı, gaz temizlik yüzdesinin, kaynak dolgu teli hızı ve ark mesafesi) kaynak dikiş kesit geometrisi şekli ve kalite ölçütlerine etkisi araştırılmıştır. Kaynak dikiş kesit geometrisinin tahmini ve optimizasyonu için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, TIG kaynağında kaynak dikiş kesit geometrisi ve kaynak parametreleri arasındaki ilişkileri yapılandırmak için nonlineer regresyon analizi uygulanmış, matematiksel hesaplamalar için de “*Wolfram Mathematica v.11*” programı kullanılmıştır.

İlk olarak kaynak dikişinin kesit geometrisini tahmin edebilmek için bir matematik modeli geliştirilmiştir. Daha sonra TIG kaynak fenomenini tahmin etmek için oluşturulan matematik modelin, nonlineer regresyon analizleri sonucunda prosesi doğru bir şekilde tahmin edebildiği görülmüştür. Kaynak dikişinin optimizasyon çalışmalarında da “*Differential Evolution*”, “*Nelder-Mead*”, “*Simulated Annealing*” ve “*Random Search*” metodları kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kaynak dikiş geometrisine ait alan için ulaşılabilecek en düşük değere, mümkün olan en yüksek nüfuziyet miktarı koşulu altında optimizasyon işlemleri yapılmıştır.

OPTIMIZATION OF WELD BEAD GEOMETRY FOR TIG WELDING OF 1100 SERIES ALUMINUM

SUMMARY

Across the engineering spectrum, welding is an essential process in the manufacturing of components, assemblies or complete machines. Tungsten inert gas (TIG) welding is the best known and most frequently used method of welding process in food industry, ships, bridges and welding of stainless steels. Basically, TIG weld quality is strongly characterized by the weld pool geometry which has several quality responses such as front height (FH), front width (FW), back height (BH), back width (BW) and area of penetration. Weld pool geometry plays an important role in determining the mechanical properties of the weld. Therefore, it is very important to select the welding process parameters for obtaining an optimal weld pool geometry. In this study, the effect of TIG welding process parameters (welding speed, welding current, gas flow rate, wire speed and gap distance) on the weld pool shape and the quality responses were investigated. The mathematical models were developed for optimization and prediction of the weld pool geometry. Also, a non-linear regression analysis was applied to construct the relationships between welding process parameters and weld pool geometry in TIG welding. Mathematical calculations was used in the Wolfram Mathematica v.11 and Differential Evolution is used in the optimization study.

First, a mathematical model was developed to predict the section geometry of the weld beam. Later, the mathematical model for estimating the TIG welding phenomenon was found to be able to accurately predict the process as a result of nonlinear regression analysis. In the optimization works of welding beam,

"*Differential Evolution*", "*Nelder-Mead*", "*Simulated Annealing*" and "*Random Search*" methods are used. As a result of the work done, the optimization process is carried out under the condition of the lowest possible value for the area of the weld bead geometry, the highest possible penetration amount.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kaynak mekanik özelliklerinin belirlenmesinde, kaynak dikişi kesit geometrisi çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, optimum kaynak dikişi kesit geometrisini elde etmek için kaynak işlem parametrelerini seçmek çok önemlidir. Genellikle, arzulan kaynak işlemi parametreleri deneyimle veya bir el kitabı temel alınarak belirlenir. Bununla birlikte, bu, seçilen kaynak işlem parametrelerinin, o özel kaynak makinesi ve çevre için en uygun veya en yakın kaynak dikişi kesit geometrisini üretebileceğinden emin olunamaz.

Günümüzde, TIG kaynağı birçok ekipman için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir, çünkü yüksek kaliteli kaynaklar düşük ekipman maliyetleriyle üretilmektedir. İşlem basınç uygulanmadan koruyucu gaz kullanır. Buna ek olarak, dolgu metalinin eklenmesiyle veya eklenmeden de kullanılabilir. TIG kaynağı, elektrot katot ve iş parçası anot veya tam tersi şeklinde kaynak yapılabilme imkanı tanımaktadır. Öncelikle inert gaz atomlarının iyonlaşmasıyla elde edilen ve negatif elektrot tarafından yayılan elektronlar ark akımını taşırlar. Elektronlar, birleştirilecek iki malzemenin iş parçası kenarlarını eritmek için gerekli ısıyı ürettikleri pozitif iş parçasına doğru çekilir. Böylece, sıvı malzeme içeren bir kaynaklama füzyon bölgesi oluşturulur ve çoğunlukla kaynak dikişi olarak belirtilir.

Tezin çalışmasının organizasyonu aşağıdaki şekilde gerçekleştirmiştir;

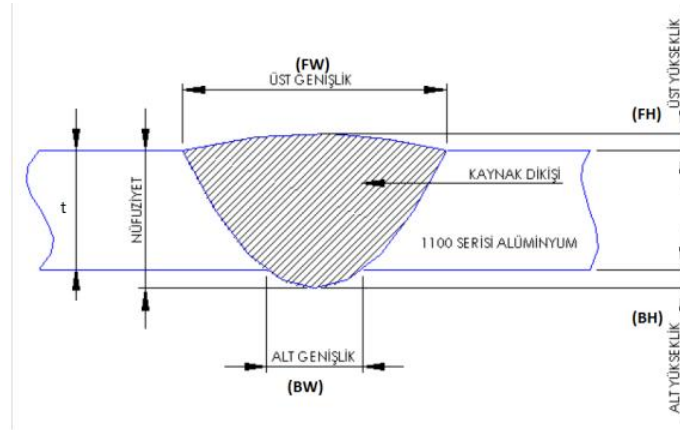
Yapılan bu çalışma 7 bölümden oluşmaktadır. **Bölüm 1**'de TIG kaynağı ve kaynak dikişi kesit geometrisinin önemi, çalışmayı yapmamızdaki amaçlarımız ve bu konu ile ilgili yapılmış literatürde yer almış çalışmalar anlatılmıştır. **Bölüm 2**'de, kaynaklı birleştirme yöntemlerinde biri olan TIG kaynağı ile kaynak işleminde kullanılan ekipmanlar anlatılmıştır. **Bölüm 3**'te, regresyon analizinin sunumu. **Bölüm 4**'te, mühendislik problemimiz için oluşturulan fonksiyonlar ve bu fonksiyonlar ile yapılan regresyon analizlerinin sonuçları anlatılmaktadır. **Bölüm 5**'te, optimizasyon

hakkında genel bilgilendirme ve genel optimizasyon metodları olan “*Nelder-Mead*”, “*Simulated Annealing*” ve “*Random Search*” ile tez çalışmamızda daha yoğun olarak kullanılan “*Differential Evolution*” yöntemi anlatılmıştır. Daha sonra da optimizasyon yapılacak amaç fonksiyonlarımız hakkında bilgilendirme gerçekleştirilmiştir. **Bölüm 6**'da, yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler irdelenmiştir. Kaynak giriş parametrelerinin amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. **Bölüm 7**'de ise konu ile ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

1.1.Problemin Tanımı

Temel olarak, TIG kaynak kalitesi, şekil 1.1'de gösterildiği gibi çeşitli kalite özelliklerine sahip kaynak dikişi kesit geometrisi ile güçlü bir şekilde karakterizedir. Bunlar;

- Üst genişlik (FW),
- Üst yükseklik (FH),
- Alt genişlik (BW),
- Alt yükseklik (BH),
- Nüfuziyet'tir (BH+t).



Şekil 1.1. Kaynak Dikişi Kesit Geometrisi

Yapılan bu çalışmada maksimum nüfuziyet koşulu altında minimum kaynak dikişi kesit geometrisine ait alan hesaplanmıştır. Bu problemlerin çözümünde kaynak dikişi kesit geometrisine ait her bir amaç fonksiyonu için ve kesiti oluşturan alan için de bir

amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Dolayısı ile bu tez kapsamında beş farklı optimizasyon problemi çözülmüştür. Bu problemler Tablo 1.1’de belirtilmiştir.

Optimizasyon problemlerinin çözümü yapılırken üst genişlik (FW) amaç fonksiyonu için dört farklı metot kullanılmıştır. Çıkan sonuçların her metot için aynı olmasından dolayı bundan sonraki optimizasyon problemlerinde çalışma mantığının en iyi olduğunu düşündüğümüz “*Differential Evolution*” (DE) metodu ile devam edilmiştir.

Tablo 1.1: Optimizasyon problemleri için, kullanılan kısıtlar, tasarım değişkenleri ve optimizasyon metodları

Problem No	Amaç	Kısıtlar	Tasarım Değişkenleri	Optimizasyon Algoritması	
1	Üst Genişlik (FW) Minimizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • $FH < 1 + 0.1 \text{ FW}$, (ISO 5817:2014) • Kaynak hızı (a) $\in \{24, 35, 46\}$; • Dolgu teli sürme hızı (b) $\in \{1.5, 2, 2.5\}$; • Koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c) $\in \{30, 70\}$; 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaynak hızı (a) • Dolgu teli sürme hızı (b) • Koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c) • Ark mesafesi (d) • Kaynak akımı (e) 	Simulated Annealing (SA), Differential Evolution (DE), Random Search (RS), Nelder-Mead (NM)	
2	Üst Yükseklik (FH) Minimizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • Ark mesafesi (d) $\in \{2.4, 3.2\}$; • Kaynak akımı (e) $\in \{80, 95, 110\}$. 		<ul style="list-style-type: none"> • Kaynak hızı (a) • Dolgu teli sürme hızı (b) • Koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c) • Ark mesafesi (d) • Kaynak akımı (e) 	Differential Evolution (DE)
3	Alt Genişlik (BW) Minimizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • $BH < 1 + 0.1 \text{ BW}$, (ISO 5817:2014) • Kaynak hızı (a) $\in \{24, 35, 46\}$; • Dolgu teli sürme hızı (b) $\in \{1.5, 2, 2.5\}$; • Koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c) $\in \{30, 70\}$; 			
4	Alt Yükseklik (BH) Maksimizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • Ark mesafesi (d) $\in \{2.4, 3.2\}$; • Kaynak akımı (e) $\in \{80, 95, 110\}$. 			
5	Kaynak Dikişi Kesit Alanı Minimizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • $BH > 0.1 - 0.7$ • Kaynak hızı (a) $\in \{24, 35, 46\}$; • Dolgu teli sürme hızı (b) $\in \{1.5, 2, 2.5\}$; • Koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c) $\in \{30, 70\}$; • Ark mesafesi (d) $\in \{2.4, 3.2\}$; • Kaynak akımı (e) $\in \{80, 95, 110\}$. 			

1.2. Araştırmanın Motivasyon Kaynağı ve Amaçları

Bu tez çalışmasını yapmak seçme motivasyonumuz aşağıdaki gibi özetlenir;

- Ark kaynağı işlemi, yüksek sıcaklıklara sahip ve ciddi bozulmalar ile kalıcı gerilmelere neden olan son derece karmaşık bir fenomendir.

- Isı tipi kaynak olan TIG kaynağı, demiryolu, denizcilik, köprüler, inşaat sektörü, otomotiv, havacılık ve nükleer reaktörler gibi yüksek hassasiyet gerektiren geniş bir uygulama yelpazesi ile en önemli üretim operasyonlarından biridir.
- Kaynak dikişi kesit geometrisi, kaynağın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, optimum kaynak dikişi kesit geometrisini elde etmek için kaynak işlem parametrelerini seçmek çok önemlidir.
- Birçok mühendislik uygulamasının asıl amacı mekanik özelliklerden ödün vermeden maliyet ve ağırlığı azaltmaktır.
- Optimizasyonun, mühendislik yapılarında olduğu kadar karşımıza çıkabilecek karmaşık tüm sistemlerin tasarımında çok önemli bir rolü vardır.

Bu tez çalışmasını yaparken ulaşmak istediğimiz hedefler;

- TIG kaynak giriş parametreleri ve bunlara bağlı olarak kaynak dikişi geometrisinin matematiksel olarak modelini oluşturmak.
- Optimum kaynak giriş parametreleri ile minimum kaynak dikişi kesit alanı ve maksimum penetrasyonu elde etmek.
- TIG kaynak giriş parametrelerinin, kaynak dikişi üzerindeki etkilerinin araştırılması.

1.3. Tez Çalışmasının Referans Aldığı Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında aşağıda bulunan referanslar temel alınarak tez çalışması organize edilmiştir. Regresyon modelinin oluşturulması için gerekli olan kaynak proses datası Tarnng ve diğ. (1999) çalışmasından, kaynak giriş parametrelerinin kaynak dikişi kesit geometrisi üzerindeki etkilerinin incelenmesi Eşme (2006) çalışmasından, kaynak dikişi kesit geometrisi için fonksiyonunun oluşturulması ve optimizasyonun yapılması Arpith (2017) çalışmasından, kaynak giriş parametrelerine bağlı olarak kaynak tekniği performans faktörü hesabı Gunuraj (2000) çalışmasından yararlanılmıştır.

- Eşme, U. (2006). *Effect of pool geometry on the quality of TIG welded joints*. (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Tarng, Y. S., Tsai, H. L. and Yeh, S. S. (1999) Modeling, Optimization and Classification of Weld Quality in Tungsten Inert Gas Welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, No. 9, 1427-1438.
- S. Arpith, B. K. Singh, P. Mastanaiah (2017), Prediction and optimization of weld bead geometry for electronvbeam welding of AISI 304 stainless steel, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 89,27–43.
- Gunaraj, V. & Murugan, N. (2000). Prediction and Optimization of Weld Bead volume for the Submerged Arc Process — Part 1. *Welding Research Supplement*, Elsevier, 286-294.

1.4.Literatür Araştırması

Temelde, TIG kaynak kalitesini etkileyen parametreler içerisinde, kaynak dikişi kesit geometrisi önde gelmektedir. Kaynak dikişi kesit geometrisi, kaynak mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Nanda ve diğ., (2011) yaptıkları çalışmalarda kaynak dikişi kesit geometrisini oluşturan üst genişlik,üst yükseklik ve nüfuziyet gibi parametreleri incelemişler ve kaynak kalitesi için önemli birer etken olduklarını açıklamışlardır. Ark kaynağı işlemlerinin çoğunda olduğu gibi, TIG prosesi de lineer olmayan matematiksel ifadeler ile doğru bir şekilde modellenebilir. Buna ek olarak, TIG kaynak işlemi, düşük ısı girişi, az sıçrama ve kaynak temizliği ile de karakterizedir. TIG kaynağı, koruyucu amaçla sarf edilemeyen tungsten elektrot ve argon gibi inert bir gaz kullanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, TIG kaynağında modelleme, simülasyon ve proses optimizasyonunun çeşitli yönleri üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Kaynak geometrisinin matematiksel ifadesi, tüm kaynak ısı çevriminin bir sonucu olduğu için araştırmacılar için büyük bir ilgi konusu olmuştur. Bu gerçeğin farkında olarak, çeşitli araştırmacılar tarafından bazı geleneksel regresyon analizi yaklaşımları kullanılmış ve kaynak sürecinin modellenmesi için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. Narang ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada kaynak makro yapı bölgesinde “*Fuzzy Logic Simulation*” ile kaynak havuzu profil özelliklerini modellemişlerdir. Modelleme sürecinde ısıdan etkilenen bölgenin şekli ile birlikte

kaynak dikiş kesit geometrisinin tahmini, ark hızı, kaynak akımı ve ark uzunluğu gibi TIG kaynak işlemi parametreleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir..

Hem lineer hem de nonlinear geleneksel regresyon analizleri, belirli bir modülde (örneğin, deneylerin full faktöriyel tasarımı ve fraksiyonel faktöryel tasarımları) toplanan deneysel verilere dayanılarak geçmişte gerçekleştirilmiştir. Tarng ve diğ. (1998), TIG kaynaklarının ön genişliği, arka genişliği, ön yüksekliği ve arka yüksekliği tahmininde “*Neural Networks*”, kaynak proses parametreleri ile kaynak dikiş özellikleri arasındaki karmaşık ilişkileri oluşturmak için hem “*back-propagation*” hem de “*counter-propagation*” kullanmışlardır. Deneysel sonuçları, “*counter-propagation*” ağının TIG kaynak işlemi için “*back-propagation*” ağından daha iyi öğrenme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, “*back-propagation*” ağı TIG kaynak işlemi için “*counter-propagation*” ağından daha iyi bir genelleme kabiliyetine sahip olduğu sonucuna da varılmıştır.. Yang ve diğ. (1993) Curvilinear regresyon denklemleri kaynak dikiş kesit geometrisi özelliklerini modellemek için kullanılmıştır, ancak sadece korelasyon katsayıları bildirilmiştir. Bu araştırma korelasyon katsayısı ile tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki sapmaların standart sapması ile erime oranı, toplam füzyon alanı, nüfuziyet, kaynak dikiş yüksekliği ve kaynak havuzu arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmaların sonunda korelasyon denkleminin korelasyon katsayısı ile tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki sapmaların standart sapması arasında güçlü bir ilişki bulunmadığı bulunmuştur. Lee ve diğ. (2000), bir gaz metal ark kaynak işleminde çoklu regresyon analizi ile kaynak parametrelerinin fonksiyonlarını bulmuşlardır. Regresyon modeli denklemi, ters dönüşümün uygulandığı kaynak dikişinin arka yüksekliği parametrelerinin korelasyonu yoluyla kaynak işlemi parametrelerinden elde edilmiştir. Sonuç olarak ileri süreçteki maksimum tahmin hatası oranı %9,5'in altında ve kaynak işlemi parametrelerinin ters işlemdeki tahmin hatası oranı %6,5'in altında elde edilmiştir. Kim ve diğ. (2003), robotik CO₂ ark kaynağı işlemi için proses değişkenleri ve kaynak dikiş nüfuziyeti arasındaki ilişkileri belirlemek için lineer ve non-linear çoklu regresyon denklemlerini türetmiştir. Geliştirilen matematik modeller nüfuziyeti makul bir doğrulukla tahmin etmiştir. Dutta ve diğ. (2007), bir TIG kaynak prosesini klasik bir lineer regresyon tekniği, aBPNN (*Advance Back-Propagation Neural Network*) ve GA-NN (*Genetic Algorithms ve Neural Network*) kullanılarak modellenmiş ve bazı test durumları ile

performansları karşılaştırılmıştır. “NN” tabanlı yaklaşımlar, deneysel çalışmaların modellenmesi süreci için geleneksel regresyon analizine kıyasla daha uyarlanabilir olarak görülmüştür. Eşme (2006) çalışmasında TIG kaynağı parametrelerinin (kaynak hızı, kaynak akımı, gaz akış oranı ve boşluk mesafesi) kaynak dikişi kesit geometrisi ölçüleri ile kalite ölçütlerine etkisi araştırılmıştır. Kaynak dikişi kesit geometrisinin matematiksel ifadesinin yazılması ve optimizasyonu için matematiksel modeller geliştirmiş, ayrıca, TIG kaynağında kaynak dikişi kesit geometrisi ve kaynak parametreleri arasındaki ilişkileri yapılandırmak için “*Neural Network*” (NN) kullanmıştır. Geliştirilen matematiksel modellerin, istenilen kaynak dikişi kalitesini elde etmek için doğru işlem parametrelerini seçmek ve verilen süreç parametreleri için kaynak havuzu kalitesini tahmin etmek için kullanışlı olduğu görülmüştür.

Joby ve diğ. (2015) kaynak dikişi kalitesinin ölçümünde çekme mukavemetini incelemiştir. Bu işlemler için regresyon denklemlerini RSM'yi (*Response Surface Method*) kullanarak gerçekleştirmiş ve en ideal kaynak parametrelerini seçebilmek için “*Genetic Algorithm*” (GA) ve “*Simulated Annealing*” (SA) algoritmalarını kullanarak optimize etmişlerdir. Bu modeller, optimizasyon prosedürünün parçası olarak tatmin edici sonuçlar vermiştir ve onay testinde, GA ve SA'nın giriş prosesi parametrelerini belirlemek için etkili bir şekilde kullanılabilir. Tarng ve diğ. (1999) TIG kaynak işlem parametreleri ile kaynak dikişi kesit geometrisi arasındaki ilişkileri oluşturmak için “*Neural Network*” kullanmış ve “*Simulated Annealing*” algoritması yardımı ile de optimum kaynak dikişi kesit geometrisi ve giriş parametre değerlerini bulmuştur. Ayrıca, kaynak dikişi kesit geometrisindeki özellikleri kullanarak kaynak kalitesini sınıflandırmak ve doğrulamak için “*fuzzy c-means algorithm*” tabanlı kod kullanılmıştır. Bu çalışma sayesinde, nonlineer çok değişkenli TIG kaynak işlemleri daha fazla anlaşılabilen, analiz edilebilen ve kontrol edilebilen. Dey ve diğ. (2010) kaynak işlemini Al-1100 alüminyum plakalar üzerinde bir elektron ışını kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirmiştir. Daha sonra regresyon analizini, işlemin girdi-çıkı ilişkileri kurmak için gerçekleştirilmiştir. Maksimum nüfuziyet koşulunu sağladıktan sonra kaynak alanı minimuma indirilmiştir. Bu çalışmada kısıtlı optimizasyon problemi, bir ceza fonksiyonu yaklaşımı ile “*Genetic Algorithm*” (GA) kullanılarak çözülmüş. Optimum kaynak dikişi kesit geometrisi belirlenebilmiştir. Kaynak dikişi profilleri “*Neural Networks*” kullanılarak tahmin edilmiş ve GA-NN'nin BPNN'den daha iyi

performans gösterdiği bulunmuştur. Dey ve diğ.. (2009) östenitik paslanmaz çelikler ile yaptıkları elektron kaynağı çalışmaları sonucunda yine aynı metodlar ve algoritmaları kullanarak (2010) yılındaki çalışmanın sonuçlarının aynısını elde etmişlerdir. GA-NN'nin BPNN'den daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.



BÖLÜM 2

TIG KAYNAĞI VE ÖZELLİKLERİ

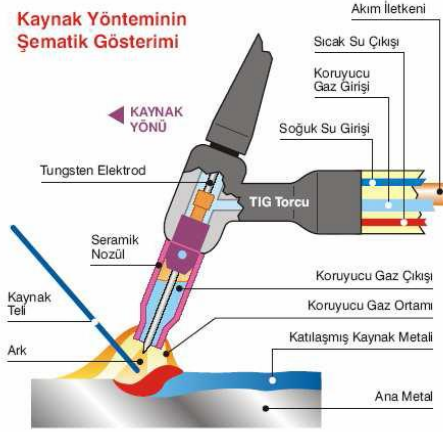
2.1. TIG Kaynağı

Isı tipi kaynak olan TIG kaynağı, trenler, gemiler, köprüler, otomobiller ve nükleer reaktörler için geniş bir uygulama yelpazesi ile yapısal elemanların birleştirilmesi için en önemli üretim operasyonlarından biridir. Metali eritmek ve bir kaynak oluşturmak için ısı üretmek gerekir. Bunun için de bir elektrik arkı yaratan doğru veya alternatif elektrik akımı ile sürekli bir şekilde çalışılmasını gerektirir (Awang, 2002).

Ark kaynağı işlemi, son derece yüksek sıcaklıklara sahip ve ciddi bozulmalara ve kalıcı gerilmelere neden olan son derece karmaşık bir işlemdir. Bu aşırı fenomen, bu kaynak yapısını, kırılmaya, burkulmaya, korozyona ve diğer arıza türlerine karşı savunmasız hale getirmektedir.

Heliarc tungsten gaz kaynağı işlemi olarak da bilinen TIG kaynağı, Amerikan Havacılık Endüstrisinin bazı magnezyum ve alüminyumun parçaların birleştirme yöntemleri sonucunda İkinci Dünya Savaşı sırasında keşfedildi. Russell Meredith, 1930'lu yılların sonlarında bir tungsten elektrot ve helyum gazı kullanarak magnezyum kaynağı için ilk TIG işlemini gösterdi. Heliarc kaynağı pek çok

ayrıntılıdır ve isim değişikliği ile günümüze kadar devam etmiştir. Günümüzde gaz olarak artık argon kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de gösterildiği üzere tungsten elektrotların aşırı ısınması ve kopan elektrot parçacıklarının kaynak dikişinin kalitesini olumsuz etkilenmesi sebebi ile sulu soğutmaya sahip elektrotlar ve sistemler tasarlanmıştır.



Şekil 2.1 : Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi (Baylan,O.,2015)

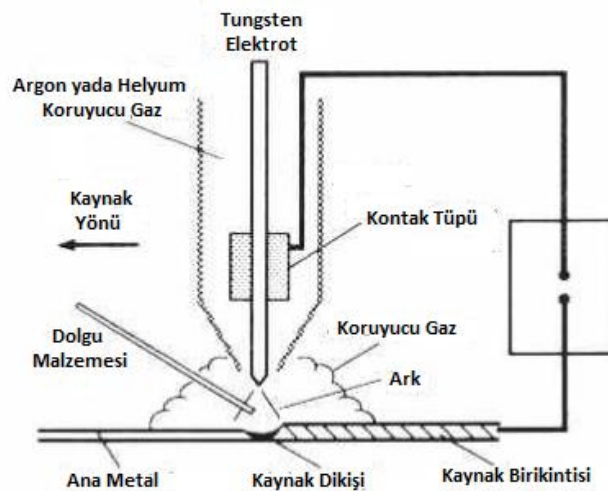
Elektrik boşalması, elektrot ucu ve kaynak yapılacak iş parçası arasında bir ark oluşturur. Ark, normal olarak, düşük voltajlı kaynak akımı için havada başlangıç iletkenlik yolunu sağlayan küçük bir kıvılcım üreten yüksek frekanslı bir jeneratörü olan bir güç kaynağı ile başlatılır. Bu ateşleme nabzının frekansı, birkaç MHz'e kadar büyük olabilmektedir. Bu frekans, yüksek gerilimle birlikte, kaynak hücresi çevresinde güçlü bir elektriksel parazit oluşturur; bu da, sensörler ve ölçüm cihazı kullanıldığında bir dezavantajdır. Ark, tabanı ve dolgu malzemesini eritmek için gerekli olan termal enerjiyi üreten yüksek sıcaklıkta iletken bir arkdan oluşur. Ark sıcaklığı, kaynak dikişi yüzeyinin 11700 ° C ve 14700 ° Ci arasında farklılık gösterir ve eritilmiş yüzey sıcaklığı malzemeye bağlı olarak 1427 ° C'den 2500 ° C'ye kadar uzanır (Ericsson, 2002).

Akımın üç farklı alternatifi kullanılabilir;

- Pozitif elektrotlu doğru akım (DC)
- DC bir negatif elektrot ile,
- Alternatif akım (AC).

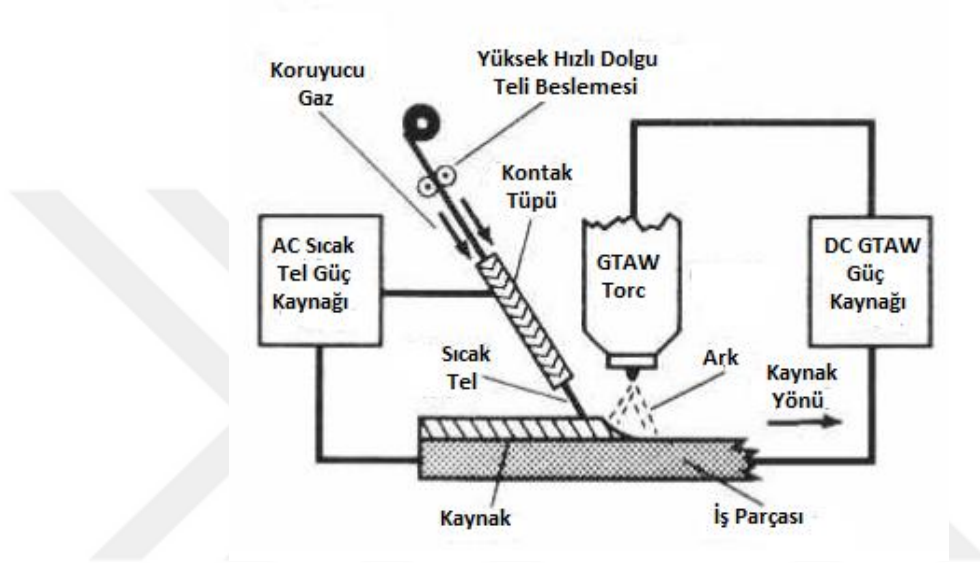
AC çoğunlukla alüminyum ve magnezyum kaynağı için tercih edilir. Çünkü yüzeydeki oksit tabakasının temizliği bu yolla başarılabilir. DC ise bir negatif elektrot ile alüminyum kalın plakaları da dahil olmak üzere çoğu diğer malzemeler için kullanılır. Darbeli ve darbeli olmayan akımlar ile kullanılabilir. Darbeli olmayan bir akım en yaygın olanıdır. Darbeli bir akımın kullanımı nüfuziyetin artırılması gibi bazı avantajlara sahiptir (Lothongkum ve diğ., 2001).

Taban malzemesinin kalınlığına, dikiş türüne ve diğer faktörlere bağlı olarak, ilave dolgu malzemesine ihtiyaç duyulabilir. Otomatik TIG kaynağında sıcak veya soğuk tel kullanılabilir. Soğuk tel veya çubuk erimiş kaynak dikişinin önüne şekil 2.2'de gösterildiği gibi beslenir. Bobinli tel, 100 mm makaralarda veya çubuk olarak 915 mm uzunluğunda üretilirler. Bobinler ve çubuklar, soğuk tel kaynağı sırasında kaynak dikişinin ön kenarına manuel olarak beslenir.



Şekil 2.2 : Soğuk tel ile TIG kaynağı (Kou,1987)

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi sıcak tel, arkadan beslenir ve prosese dolgu metali yığma hızını arttırmak için ısıtılmış olarak kullanılır. Tel, ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılır ve kaynak dikişinin arka kenarına beslenir. 29 kg/saat'e kadar biriktirme oranları elde edilebilir. Sıcak tel ile elde edilen daha yüksek yığma hızı oranları, süreçleri kaynak ve kaplamalar için rekabetçi hale getirir ve verimliliği artırır. Dolgu malzemesi genellikle temel malzemeyle aynıdır (Modenesi ve diğ., 2000).



Şekil 2.3 : Sıcak tel ile TIG kaynağı (AWS,1991)

Arkı devam ettirmek aynı zamanda erimiş kaynak dikişi ile elektrotu atmosferik kontaminasyondan korumak için inert bir gaz kullanılır. Kaynak parametrelerine ve kaynak malzemelerine bağlı olarak, argon, helyum veya iki gaz karışımı kullanılabilir. Argon, alaşımsız, düşük alaşımlı ve paslanmaz çeliklerde yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, mekanik kaynak için argon ve hidrojen veya helyum karışımı kullanılabilir (Tusek ve Suban, 2000). Duplex paslanmaz çeliklerde, doğru bir ferrit / ostenit dengesi sağlamak için argonun azot ile karıştırılması yaygın bir işlemdir. Alüminyum ve alaşımlar genellikle argon kullanılarak kaynaklanır. Helyum ilavesi ısı transferini iyileştirmek için kullanılabilir ve bu nedenle bazen kalın kısımların kaynağı için tercih edilebilir (Suban ve diğ., 2001).

2.2. TIG Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

TIG kaynağının başlıca avantajları aşağıdaki gibidir;

- Yüksek kalitede düşük distorsiyonlu kaynak kabiliyeti,
- Dolgu telli yada telsiz çalışabilme,
- Her pozisyonda kaynak yapılabilme olanağı ve özellikle ince malzemelerin kaynağına uygunluk,
- Bu yöntem ile ayrı cins metalleri ve alaşımları birbirleri ile kaynatma olanağı mümkündür.
- Görülebilir ark ve kaynak dikişi,
- Dolgu metali ark ile geçmez. Eklenen dolgu miktarı kaynak akım seviyesine bağlı değildir.
- Tungsten elektrot ile dikişte çok az bir karbür ayrışması meydana gelir,

TIG kaynağının dezavantajları aşağıdaki gibidir;

- TIG kaynağında metal yığılma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür,
- Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir,
- Koruyucu gaz gerektirir,
- Kirliliğe hassastır bu yüzden yüzey temizliği gerektirir,
- Açık havada kullanımı zordur,
- İş parçasının ve dolgu malzemesinin kimyasal yapısı düzeltilemez,
- Kalay ve kurşun gibi çok düşük erime noktalı metaller için genellikle kullanılmaz.

2.3. TIG Kaynağında Kullanılan Ekipmanlar

2.3.1. Güç Kaynağı

TIG kaynağına ait güç kaynakları genellikle sabit akımlı, düşük volt-amper eğrisine sahiptirler. TIG kaynak yönteminde, kaynatılan malzemenin türüne göre hem alternatif akım hem de doğru akım kullanıldığından, modern akım üreteçleri her iki tür akımı da gerektiğinde sağlayabilecek türde dizayn edilmişlerdir. İyi bir kaynak akım üretici hem alternatif hem de doğru akım sağladığında, kaynak akımını sabit

tutabilmek ve ayrıca doğru akımda tutuşmayı, alternatif akımda ise arkın sürekliliğini sağlamak için bir yüksek frekans jeneratörüne sahip olmalıdır. Son yıllarda birçok uygulamada bu konuda darbeli akım da kullanılmaktadır.

Günümüzde TIG kaynak yönteminde akım üretici olarak transformatör ve redresör özellikli jeneratörler, alternatörlere nazaran çok daha yaygın bir kullanma alanına sahiptir. Redresörler, akımı kaynak gerilimine ayarlayan bir transformatör ve bu akımı doğrultan bir redresörden oluşmuşlardır, bu neden ile hem doğru akım hem de alternatif akım üreten bu tür üreteçler ile her tür metal ve alaşımın kaynağını yapmak mümkün olabilmektedir.

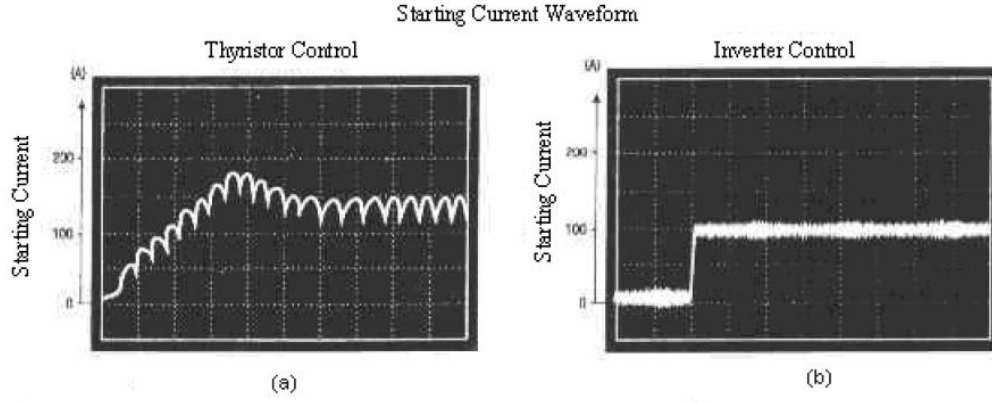
Günümüzde gelişmiş TIG kaynak redresörleri bir de darbeli akım üretecek biçimde dizayn edilmişlerdir. Darbeli akım doğru akımın şiddetinin iki sınır değer arasında öngörülen frekansta değişmesidir. Bu şekilde akımın üst sınır değerinin nüfuziyeti elde edilebilmekte ve aynı zamanda ortalama akım şiddetinin ısı girdisi parçaya uygulanmaktadır.

Son yıllarda da inverter üniteler TIG kaynak yönteminde yaygın bir uygulama alanı bulmuştur; bu akım üreteçleri daha hafif olukları gibi daha stabil bir ark oluşturduklarından pek çok kullanıcı tarafından tercih edilmektedirler.

İnverter güç kaynağı üç dönüştürücüden oluşur:

- 60 Hz birincil alternatif akımı (AC), DC'ye doğrultur.
- Doğru akımı yüksek frekanslı AC'ye dönüştürülür.
- Alternatif akımı DC'ye doğrultulur (Byrd,1993).

TIG kaynağındaki inverter üniteler sabit akımı sabit voltaja çevirebilirler. Böylece çok yönlü bir üreteç elde edilmiş olur. İnvörtör kontrollü güç kaynakları, geleneksel silikon kontrollü doğrultucu (SCR) güç kaynaklarından daha kararlı ve daha hızlı tepki vermektedir. Şekil 2.4,'de invertör kontrollü bir ark kaynağı makinesi ile tristör kontrollü kaynak makinelerinin tepkilerini karşılaştırıldığı iki farklı grafik verilmiştir.



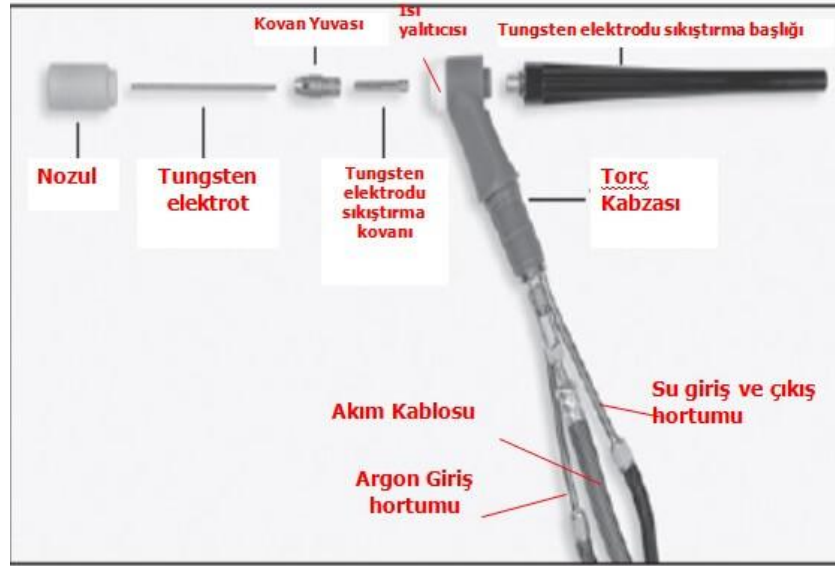
Şekil 2.4 : (a) Tristör kontrollü ünite, (b) İnvörtör kontrollü ünite (ASM, 2002)

2.3.2 TIG Kaynak Torcu

TIG kaynak yönteminde torç, iş parçası ile ucundaki tungsten elektrot arasında kaynak için gerekli olan elektrik arkını oluşturabilmek için, akım kablosundan aldığı akımı elektroda iletmek, koruyucu gazı kaynak banyosunun üzerini örtecek biçimde sevk etmek görevlerini yerine getirmek için geliştirilmiş bir elemandır.

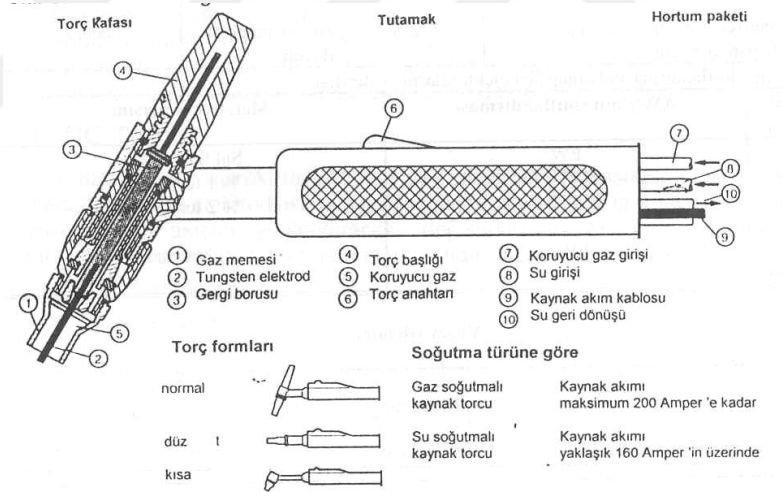
TIG kaynak yönteminde kullanılan torçlar uygulama koşulları göz önünde bulundurularak çeşitli tür ve büyüklüklerde üretilmektedirler. El ile yapılan TIG kaynağında kullanılan torçlar hafif, küçük ve elektrik akımı kaçaklarına karşı etkin bir biçimde yalıtımlı olarak tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Torç ile akım üretici, gaz tüpü ve soğutma suyu ile bağlantıları, değişik kalınlıklardaki kablolar ve hortumlar ile sağlanır ve bunların tümü torç bağlantı paketi adı verilen çelik spiral takviyeli bir kalın hortum içine yerleştirilmişlerdir.

Genel olarak koruyucu gaz debisi arttıkça, gaz nozulu çapı da büyür.



Şekil 2.5 : Bir TIG Kaynak Torcunun Parçaları (Baylan,O.,2015-2)

Genelde torçlar hava soğutmalı ve su soğutmalı olarak iki ana gruba ayrılırlar.



Şekil 2.6 : Su Soğutmalı Bir TIG Kaynak Torcunun Kesiti (Kurt, 2006)

TIG kaynak torçlarına takılan gaz memeleri, torcun biçimine, türüne, kapasitesine, hava veya su soğutmalı olmasına, kullanılan gaz debisine ve kaynak yerine göre değişik çap ve tipte olabileceği gibi değişik malzemelerden de üretilmiş olabilir. Günümüz endüstrisinde kullanılan gaz nozulları, malzemeleri açısından başlıca dört gruba ayırabiliriz:

- Seramik gaz nozulları,

- Metalsel gaz nozulları,
- Saydam gaz nozulları,
- Çift gazlı gaz nozulları.

Hava soğutmalı torçlarda tercih edilen seramik gaz nozulları kırılğan olmalarına karşın, fiyatlarının ucuzluğu, oldukça yüksek sıcaklıklarda dahi kullanılabilmeleri ve alternatif akım uygulamalarında yüksek frekans akımının oluşturduğu çapraz ateslemelere engel olması nedeni ile endüstride en yaygın olarak kullanılan TIG gaz nozulu türüdür.

2.3.3 TIG Kaynak Elektrodu

TIG kaynak yöntemi ile diğer elektrik ark kaynağı yöntemleri arasındaki en önemli fark, ek kaynak metalinin elektrot tarafından sağlanmaması ve elektrodun sadece ark oluşturma görevini üstlenmiş olmasıdır. Günümüz endüstrisinde ticari saflıktaki tungsten (% 99.5 W) ile toryum, zirkonyum ve lantanyum ile alaşımlandırılmış elektrotlar kullanılmaktadır. Uygulamada karşılaşılan TIG kaynak elektrotlarını, saf tungsten elektrotlar, alaşımlı elektrotlar ve çizgili elektrotlar olmak üzere üç grup altında toplamak mümkündür. TIG kaynak elektrotları, AWS A5.12 ile DIN 32528 standartların da bileşimlerine göre sınıflandırılmış ve bunları birbirlerinden kolaylıkla ayırt edebilmek için Tablo 2.1’de renk kodları kullanılmıştır.

Tablo 2.1 : Tungsten Elektrotların Kimyasal Bileşimleri ve Renk Kodları (DIN 32528)

TUNGSTEN ELEKTROT İÇİN RENK KODLARI				
Standart Gösterim		Kimyasal bileşimler		UÇ RENKLERİ
ISO 6848	AWS A5.12	OKSİT İLAVESİ	TUNGSTEN	
WT20	EWTh-2	ThO ₂ : 1.70–2.20%	2% THORIATED	Kırmızı
WP	EWP	~~~~~	SAF	Yeşil
WL15	EWLa-1.5	La ₂ O ₃ : 1.30–1.70%	1.5% LANTHANATED	Altın
WC20	EWCe-2	CeO ₂ : 1.80–2.20%	2% CERIATED	Gri
WL20	EWLa-2	La ₂ O ₃ : 1.80–2.20%	2% LANTHANATED	Mavi
WZ8	EWZr-8	ZrO ₂ : 0.70–0.90%	0.8% ZIRCONIATED	Beyaz
LaYZr™	EWG	La ₂ O ₃ : 1.3–1.7%; Y ₂ O ₃ : 0.06–0.10%; ZrO ₂ : 0.6–1.0%	1.5% LANTHANATED 0.8% YTTRIATED 0.8% ZIRCONIATED	Açık yeşil

DIN 32528 de TIG kaynak elektrotlarının çapları 0.5, 1.0, 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 3.2, 4.0, 5.0, 6.0, 6.4 ve 8.0 mm boyları ise 50, 75, 150, 175 mm olarak belirlenmiştir. AWS A5.12 de ise elektrotların çapları 0.01, 0.02, 0.04, 1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16, 1/4 inç boyları ise 3, 6, 7, 12, 18 ve 24 inç olarak saptanmıştır. 7 inçten daha uzun olanlar sadece mekanize ve otomatik kaynak yöntemlerinde kullanılırlar. Uygulamada elektrot çapı, elektrodun maksimum akım yüklenebilme kapasitesi göz önüne alınarak seçilmelidir. Bu değere yaklaşıldığında arkın ısı yoğunluğu artmakta, daha stabil bir ark ile nüfuziyeti fazla, dikiş yüksekliği az bir dikiş elde edilebilmektedir. TIG kaynak yönteminde kullanılan elektrotların akım yüklenebilme kapasitesi çok sayıdaki etkene bağlı olarak oldukça geniş bir aralık içinde değişmektedir (Tablo 2.2). Bu etkenleri şu şekilde sıralayabiliriz;

- Elektrodun bileşimi,
- Koruyucu gazın türü,
- Elektrodun, elektrot tutucusunun dış kısmında kalan boyu,
- Elektroda uygulanan soğutma sisteminin etkinliği,
- Akım türü ve kutuplama,
- Kaynak pozisyonu.

Tablo 2.2 : Tungsten Elektrotların Bilesim ve çaplarına Göre Akım Yklenebilme Kapasiteleri

Elektrot apı (mm)	Alternatif Akım (A)		Doğru Akım (A)	
	W Elektrod	WT Elektrod	W ve WT Elektrod (-)	W ve WT Elektrod (+)
0.5	5-15	5-20	5-20	-
1.0	10-60	15-80	15-80	-
1.6	50-100	70-150	70-150	10-20
2.4	100-160	140-235	150-250	15-30
3.2	150-210	220-325	250-400	25-40
4.0	200-275	300-425	400-500	40-55
4.8	250-350	400-525	500-650	55-80
6.4	325-425	500-700	650-800	80-125

DIN 32528'e göre tungsten elektrotlar Şu biçimde gösterilmektedir:

Elektrot; DIN 32528 1,6 – 75 - WT 10

Burada 1.6 elektrodun mm. olarak çapını, 75 mm. olarak boyunu ve WT 10 da bileŐiminde % 0.9 ila 1.2 toryum-oksit bulunduğunu belirtmektedir.

2.3.4 Dolgu Malzemesi

TIG kaynağında dolgu metalinin seçimi, genel olarak, diğer ark kaynak yöntemlerine göre daha az sorun ortaya çıkarmaktadır. Genellikle dolgu metalinin seçimi, kaynak yapılan ana metalin türüne bağlıdır. TIG kaynağında, dolgu metali ark içine değil, kaynak edilecek parçanın kaynak ağzına beslenir; bu, avantajlı bir durumdur, çünkü daha verimli alaŐım transferi ile sonuçlanır ve böylece kaynak metalinin kompozisyonu üzerinde daha doğru kontrol sağlanır (Modenesi ve diğer., 2000).

2.3.5 Tel Sürme Sistemleri

Tel besleme sistemleri bir dizi bileŐenden yapılır ve basitten komplekse doğru deđiŐir. Temel de, telin makaradan çekilmesi için telin yeterince kavranması (zellikle sıcak tel TIG kaynağında) ve kılavuz tüpü boyunca kaynak noktasına itmek

için bir vasıttan oluşur. Tel, soğuk tel için ön kenara beslenir, sıcak tel beslemeleri ise arka kenara beslenir (AWS,A5 1991).



BÖLÜM 3

REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi; herhangi bir değişkenin (bağımlı değişken) bir veya birden fazla değişken ile (bağımsız – açıklayıcı değişken) arasındaki ilişkinin matematik bir fonksiyon şeklinde yazılmasıdır. Elde edilen bu fonksiyona ise regresyon denklemi adı verilmektedir (Orhunbilge, 2000). Regresyonda kullanılan temel matematiksel araç olan en küçük kareler, 1805 yılında Legendre tarafından, Dunquerque ve Barcelona arasındaki meridyen yayının uzunluğunu hesaplamak için doğrusal olarak tanımlanmış ve yeni oluşturulmuş ölçüm birimi “metre” için kullanılmıştır. 1809'da Gauss, 1820'de de Laplace, yöntemi istatistiksel olarak ispatlamış, tekniği nonlinear durumlara genişletmiş ve ağırlıklandırılmış en küçük kareleri tanıtmıştır. Regresyon analizinin temeli; ilk olarak Francis Galton tarafından 19. yüzyılın sonlarında atılmıştır. Galton yaptığı çalışmada; anne-babaların boyu ile çocuklarının boyları arasındaki ilişkiyi incelemiş ve kısa boylu anne babaların çocuklarının boylarının kısa, uzun boylu anne-babaların çocuklarının boylarının uzun olmasına rağmen, çocuklarının boylarının ana kütle boy ortalamasına doğru yaklaşma eğiliminde olduğunu görmüştür. Bu eğilimi “ortaya doğru çekilme = regression to mediocrity” olarak adlandırmıştır. (Galton, 1886). Galton'un çalışmaları bugün, değişkenler arasındaki istatistik ilişkileri inceleyen “Regresyon Analizi (Regression Analysis – Relationship Analysis)”nin başlangıcı olmuştur. Günümüzde regresyon analizi için lineer ve nonlinear olmak üzere iki türlü yaklaşım bulunmaktadır.

3.1. Modeller

Regresyon analizinin temel unsurlarından biri modeldir. Bir model, nicel terimlerle çalışılan deneysel sistemi açıklayan matematiksel bir fonksiyondur. Genel olarak, bir model aşağıdaki gibi temsil edilir:

$$y=f(x;a) \quad (1)$$

Genellikle modellerin üç temel bileşeni vardır: matematiksel ilişki veya fonksiyon (f), parametreler (a) ve değişkenler (x). En yaygın durumlarda, yalnızca bir veya iki bağımsız değişkene sahip olup gerçek değerli sürekli denklemlerden nispeten basittirler. Bunlara örnek olarak üstel, hiperbolik ve lojistik fonksiyonlar verilebilir. Aynı fonksiyonlar, mevcut fiziksel süreçlerden tamamen ilgisiz olayların modellenmesinde de kullanılabilir.

Fonksiyonun nasıl türetildiğine bağlı olarak, modeller iki geniş grupta sınıflandırılabilir (Ferreti ve diğ., 1989):

- Yapılandırılmış veya mekanistik modeller,
- Yapılandırılmamış veya ampirik modeller.

Yapılandırılmış modeller, altında yatan mekanizmanın teorik alt yapısından elde edilebilir. Mutlaka olup bitenlere dair bir fikir sahibiyiz veya onunla ilgili bir teori var demektir.

Yapılandırılmamış modeller, ölçümlerin açıklanmasında kullanışlı oldukları için seçilen ampirik fonksiyonlardır (Reinsch, 1967; Marschner ve diğ., 1978). Yarı ampirik modellerin üçüncü bir grubu ise, teorik değerlendirmelerden ve kısmen gözlemlerden elde edildiğinden, yukarıdaki türler arasında yer alır (Seshadri ve diğ., 1963), (Barker ve diğ., 1980).

Modellerin bir diğer bileşeni de parametrelerdir. Fonksiyon, eğri türünü belirlediğinde, gerçek şekli, konumu ve oranı parametre değerleri ile belirlenir. Mekanik ve yarı ampirik modellerde, parametreler, sistem için gerekli olan özellikleri bölümlü modellerde oran veya difüzyon sabitlerini temsil ettiği için esas itibarıyla önemlidir. Ampirik modellerde, parametreler eğriyi tam olarak tanımlamak ve daha etkin hesap yapmak için gereklidir, ancak sistemin herhangi bir temel özelliğini temsil etmezler.

Parametrelerin model fonksiyonu içerisindeki matematiksel ifadelerine bağılı olarak, modelleri lineer ve nonlinear olmak üzere iki kategoride sınıflandırabiliriz. Bu ayrım önemlidir, çünkü nonlinear fonksiyonlarla oluşturulan matematiksel modellerin çalışması için gerekli olan metodoloji lineer modellere göre çok daha karmaşıktır. İkincisi, lineer modellerin çoğunlukla ele alınması ve anlaşılması kolaydır, bununla birlikte gerçek hayatta ancak az sayıda fenomeni modellemek için kullanılabilirler.

Fonksiyonlar ayrıca bağımsız değişkenlerine göre lineer olabilir yada olmayabilir. Değişkenlere ve parametrelere göre lineerlik veya lineerlik ile ilgili her türlü kombinasyon mevcuttur.

Bu tez kapsamında, ele alınan problemin karmaşıklığı sebebiyle, nonlinear regresyon modelleri tercih edilmiştir.

3.2. Regresyon Analizinin Amacı ve Kullanımı

Nonlinear regresyon üç farklı amaçla kullanılabilir:

- Modelin geçerliliğini sınamak (veya hipotezi karşılaştırmak),
- Modeli karakterize etmek (diğer bir deyişle parametreleri tahmin etmek),
- Sistemin davranışını tahmin etmek (enterpolasyon ve kalibrasyon).

Model doğrulama veya karşılaştırma, regresyon analizinin önemli bir uygulamasıdır. Bir sisteme ait model ve deney verileri arasında iyi uyum bir eğriye ulaşmak, matematiksel modelin başarısıyla ilgili en iyi göstergelerden biridir. Ancak iyi bir uyum, modelin doğru olduğunun her zaman bir kanıtı değildir. Bu aşamada dikkatli hareket etmek, yapılan işin anlamlı olması açısından önemlidir. Parametrelerin tahmin edilmesi, regresyonun doğrudan bir sonucudur. Regresyon, davranışları tahmin etmek için, yani enterpolasyon (veya tahmin) ve kalibrasyon (veya ters tahmin) için yararlıdır. İnterpolasyon ve ekstrapolasyon ise gerçek deneyler yapmak zorunda kalmadan sistemin davranışını öngörmek için kullanılabilirler.

3.3. Genel Uygunluk Denklemi

Bazı nonlinear modeller veri dönüştürme yoluyla lineer hale getirilebilir ve bu nedenle grafik çizim yoluyla analiz edebilmeye olanak sağlarlar. Bununla birlikte, deney veri hataları genellikle veri dönüştürme ile değişikliğe uğrarlar ve dolayısıyla parametre değerlendirmesinde önemli hatalara yol açabilirler. İkinci olarak, belirli bir modeli lineerleştiren ve birbirinden farklı sonuçlar veren bazı dönüşümler vardır. Herşeye rağmen, bu, grafik gösterimlerin reddedilmesi gerektiği anlamına gelmez. Gerçekten de, herhangi bir veri analizinde ilk adım olmalıdır çünkü önerilen modelden belirgin sapmaların saptanmasına izin verirler ve yine de bilgiyi sezgisel bir şekilde yoğunlaştırmanın en iyi yoludur. Bununla birlikte, veri analizi yöntemi olarak kullanılmaya devam edilmemelidir.

Nonlinear sayısal yöntemler, grafiksel yöntemlerin yukarıda öngörülen dezavantajlarının çoğunu çözmektedir. Grafik yöntemler zayıf deneysel verilerle başarısız olmasına rağmen, genellikle bir şeylerin yanlış olduğunu basit bir gözlemlerle anlamaya olanak sağlarlar. Sayısal yöntemlerle elde edilen risk, sonuçta körü körüne deneyin gerçek sonucu olarak alınabilecek bir cevap vermesi olabilir. Bu, daha sonra, sayısal analizle başlamadan önce deneylerin grafiksel sunumlarının yapılmasının önemli bir nedenidir. Özetle; her iki yöntemin güçlü yönlerini modelleme aşamasında kullanmak, başarıya ulaşmak için kaçınılmazdır.

3.4. Non-Linear Regresyon Analizi

Nonlinear regresyon modeli aşağıdaki denklemde belirtildiğı gibi yazılabilir:

$$y_i = f(x_i, \theta) + \varepsilon_i \quad (2)$$

Burada ε hata teriminin bağımsız olarak alınabileceğı ve normal dağılımlı olduğı varsayılır.

Nonlinear regresyon için aşağıdaki maddelerde belirtilen önemli özellikler dikkate alınarak matematsiksel modelleme süreçleri sistematik halde gerçekleştirilebilir.

- a) Nonlinear regresyon, linear regresyondan daha esnektir, çünkü fonksiyonun doğrusal veya lineerleştirilebilir olmasına gerek yoktur. Bu sebeple doğrusal olmayan regresyon fenomeni veriye uydurmak için geniş bir seçim olanağı sağlar. f fonksiyonu için tek gereklilik θ unsurlarına göre farklılaşmasıdır. Bu da en küçük kareler yöntemi ile hesaplanabilir.
- b) Nonlinear regresyon, f fonksiyonunun linear hale getirilebildiğı durumlarda dönüşümlerin ve doğrusal regresyonun kullanımından daha uygun olabilir.
- c) Nonlinear regresyon, incelenen sürecin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektiren f fonksiyonunun ne olduğunun bilgisi gerektirir (polinom, trigonometrik, üstel vb.). Linear regresyon modelleri ise girdi ve çıktı arasındaki ilişki kabaca belli olan ancak hassas derecede netlik gerektirmeyen proses tahminleri için uygundur.

Nonlinear regresyon modelleri en genel matematiksel ifadeleri içerdiklerinden fonksiyonel olarak genelleştirilmiş hallerini yazmak mümkün değildir. Bununla birlikte, mühendislik alanında kullanılan temel bir kaç model tipi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Polinom tipi:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

Üstel fonksiyon tipi:

$$y = a_0 + a_1e^x + a_2e^{x^2} + \dots a_n e^{x^n} \quad (4)$$

Trigonometrik fonksiyon tipi:

$$y = a_0 + a_1\sin x + a_2\sin x^2 + \dots a_n\sin x^n \quad (5)$$

Rasyonel fonksiyon tipi:

$$y = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots a_nx^n}{b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots b_nx^n} \quad (6)$$

Bu aşamada, yukarıda bahsi geçen model tiplerinin birden fazla girdi içeren çok değişkenli halleri de benzer mantıkla türetilebilir. Bir diğer önemli husus, matematiksel fonksiyon aileleri hakkında daha geniş bilgi sahibi olunarak örneğin özel fonksiyonlar (Bessel, Laguerre, Lambert, Gamma, vb.) ya da elementer fonksiyonların farklı kombinasyonları da model yapıları olarak seçilebilir.

BÖLÜM 4

MATEMATİKSEL MODEL

Tez çalışmasının bu bölümünde, kaynak girdi parametrelerinin bir fonksiyonu olarak kaynak dikişi kesit geometrisi için bir model geliştirmeyi amaçlanmıştır. Önceki bölümlerde de vurgulandığı gibi kaynak dikişinin mekanik özellikleri, geometrik parametrelere o da işlem parametrelerine bağlıdır.

Kaynak dikişi kesit geometrisini ve kaynak dikişinin kalitesini etkileyen bağımsız olarak kontrol edilebilir işlem parametreleri, kaynak hızı (a), dolgu teli sürme hızı (b), koruyucu gaz temizlik yüzdesi (c), ark mesafesi (d) ve kaynak akımı (e)'dir. Çıktı parametreleri ise üst yükseklik (FH), üst genişlik (FW), alt yükseklik (BH), alt genişlik (BW) olarak isimlendirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan deney seti, en istatistiksel prensiplere dayalı olarak Y.S. Tarng ve arkadaşları tarafından hazırlanmıştır (Tablo 4.1 ve Tablo 4.2). İşlemin matematiksel bir modeli de TIG kaynak parametrelerinin optimum değerlerini belirlemek için geliştirilmiştir. Bunun için çok değişkenli non-lineer regresyon tipi kullanılmıştır. Ardından, elde edilen bilgiler, süreci optimize etmek ve parametrelerin amaç fonksiyonları üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmıştır.

Bu çalışmada kaynak dikişi kesit geometrisi modellenmesi yapılırken standart non-lineer çoklu regresyon analizi ile “*Artificial Neural Network*” (ANN) metodunun kazanımları hibrit olarak kullanılmıştır. Bu sebeple Y.S. Tarng ve arkadaşları

tarafından gerçekleştirilen 108 adet deneysel çalışma datası 72 çalışma ve 36 doğrulama datası olarak iki ayrı parçaya ayrılmış, regresyon modellenmesi 72 değer üzerinden yapılmış ve elde edilen matematiksel modelin doğruluğu, (i) R^2 değeri (ii) 36 değer üzerinden test edilerek gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar içinde “*Wolfram Mathematica v.11*” programı kullanılmıştır.

Tablo 4.3, çeşitli fonksiyonlar ile R^2 değerlerini veren ve “*Wolfram Mathematica v.11*” bilgisayar yazılımı kullanarak yapılan regresyon tahminlerini göstermektedir. Bu tablo, her fonksiyonun regresyon modeline uyması için nasıl davrandığına yönelik bir göstergedir. Referans makalesi modelinde, 108 adetlik deney sonuçlarından 32 adet ve 36 adetlik deneyler seçilmiş, regresyon analizleri 32 adetlik deney tablosuna göre yapılmıştır. 36 adet deney içeren doğrulama datasından ise kurulan modelin teyidi alınmamıştır. Bizim çalışmamızda ise beşinci dereceden polinom fonksiyonun R^2 değerlerini en iyiyi sağladığı ve dolayısı ile bu modelin gerekli regresyon eşitliğine uyması için en iyi olduğu anlaşılmaktadır. R^2 sonuçları doğrultusunda fenomeni en iyi tahmin eden modelin 5. dereceden polinom fonksiyon olduğu görülmektedir. Bundan sonraki adımda 5 farklı optimizasyon problemi, elde edilen matematik model yardımı ile çözülmüştür.

Tablo 4.1 : İnce alüminyum levhaların TIG kaynağı için çalışma datası (Y.S. Tarng ve diğ.,1998)

NO	GİRİŞ PARAMETRELERİ					ÇIKTI DEĞERLERİ			
	Kaynak Hızı (cm/dak.)	Dolgu Teli Hızı (cm/dak.)	Temizlik (%)	Ark Mesafesi (mm)	Akım (A)	Ön Yükseklik (mm)	Ön Genişlik (mm)	Arka Yükseklik (mm)	Arka Genişlik (mm)
1	24	1,5	30	2,4	80	-0,149	6,09	0,672	5,664
2	24	1,5	30	3,2	80	0,027	6,411	0,412	5,197
3	24	1,5	70	2,4	80	-0,179	7,432	0,593	7,058
4	24	1,5	70	3,2	80	-0,306	7,287	0,63	6,895
5	24	2,5	30	2,4	80	0,155	6,676	0,743	5,96
6	24	2,5	30	3,2	80	0,099	6,824	0,803	5,732
7	24	2,5	70	2,4	80	-0,129	7,009	0,878	6,989
8	24	2,5	70	3,2	80	-0,077	7,46	0,82	7,809
9	24	1,5	30	2,4	95	-0,017	8,664	0,437	8,75
10	24	1,5	30	3,2	95	-0,25	8,782	0,593	9,993
11	24	1,5	70	2,4	95	-0,553	9,757	0,852	9,993
12	24	1,5	70	3,2	95	-0,42	10,374	0,736	10,687
13	24	2,5	30	2,4	95	-0,345	9,783	0,965	10,237
14	24	2,5	30	3,2	95	-0,043	8,803	0,654	9,076
15	24	2,5	70	2,4	95	-0,134	9,75	0,798	9,465
16	24	2,5	70	3,2	95	-0,168	10,348	0,708	10,193
17	24	1,5	30	2,4	110	-0,599	11,348	0,805	11,679
18	24	1,5	30	3,2	110	-0,745	11,491	1,1	11,848
19	24	1,5	70	2,4	110	-0,254	11,237	0,47	12
20	24	1,5	70	3,2	110	-0,683	12,946	0,945	13,921
21	24	2,5	30	2,4	110	-0,232	9,338	0,866	10,611
22	24	2,5	30	3,2	110	-0,557	12,348	1,139	12,403
23	24	2,5	70	2,4	110	-0,623	11,767	1,128	12,86
24	24	2,5	70	3,2	110	-0,617	12,533	1,084	13,346
25	35	1,5	30	2,4	80	0,123	5,355	0,245	4,104
26	35	1,5	30	3,2	80	0,108	5,173	0,34	3,418
27	35	1,5	70	2,4	80	-0,044	5,833	0,51	4,875
28	35	1,5	70	3,2	80	-0,09	5,831	0,502	5,082
29	35	2,5	30	2,4	80	0,251	5,656	0,557	4,37
30	35	2,5	30	3,2	80	0,23	5,562	0,593	3,948
31	35	2,5	70	2,4	80	0,18	5,711	0,45	5,085
32	35	2,5	70	3,2	80	0,12	5,85	0,626	4,989
33	35	1,5	30	2,4	95	-0,213	6,348	0,458	5,874
34	35	1,5	30	3,2	95	-0,19	6,992	0,447	6,74
35	35	1,5	70	2,4	95	-0,152	7,163	0,464	6,994
36	35	1,5	70	3,2	95	-0,213	7,25	0,504	7,019
37	35	2,5	30	2,4	95	-0,164	7,288	0,715	6,724
38	35	2,5	30	3,2	95	-0,113	6,966	0,746	6,433
39	35	2,5	70	2,4	95	-0,107	7,055	0,696	7,24

Tablo 4.1 (devam) : İnce alüminyum levhaların TIG kaynağı için çalışma datası (Y.S. Tarng ve diğ.,1998).

NO	GİRİŞ PARAMETRELERİ					ÇIKTI DEĞERLERİ			
	Kaynak Hızı (cm/min)	Dolgu Teli Hızı (cm/min)	Temizlik (%)	Ark Mesafesi (mm)	Akım (A)	Ön Yükseklik (mm)	Ön Genişlik (mm)	Arka Yükseklik (mm)	Arka Genişlik (mm)
40	35	2,5	70	3,2	95	-0,018	7,549	0,591	7,166
41	35	1,5	30	2,4	110	-0,575	8,337	0,766	8,763
42	35	1,5	30	3,2	110	-0,267	8,605	0,506	8,58
43	35	1,5	70	2,4	110	-0,385	9,109	0,672	9,652
44	35	1,5	70	3,2	110	-0,564	9,67	0,743	9,952
45	35	2,5	30	2,4	110	-0,556	8,756	1,011	8,853
46	35	2,5	30	3,2	110	-0,188	9,442	0,666	9,614
47	35	2,5	70	2,4	110	-0,309	9,015	0,784	9,041
48	35	2,5	70	3,2	110	-0,318	9,297	0,785	9,47
49	46	1,5	30	2,4	80	0,357	4,982	0,001	2,255
50	46	1,5	30	3,2	80	0,168	4,898	0,277	2,998
51	46	1,5	70	2,4	80	0,088	5,02	0,281	3,302
52	46	1,5	70	3,2	80	0,09	4,423	0,42	3,172
53	46	2,5	30	2,4	80	0,39	4,78	0,062	1,33
54	46	2,5	30	3,2	80	0,487	4,992	0,139	1,6
55	46	2,5	70	2,4	80	0,38	5,231	0,397	2,817
56	46	2,5	70	3,2	80	0,394	5,337	0,378	3,041
57	46	1,5	30	2,4	95	-0,321	5,847	0,44	5,332
58	46	1,5	30	3,2	95	-0,152	5,704	0,386	5,35
59	46	1,5	70	2,4	95	-0,155	5,967	0,445	5,415
60	46	1,5	70	3,2	95	-0,09	5,892	0,399	5,319
61	46	2,5	30	2,4	95	-0,236	5,984	0,696	5,531
62	46	2,5	30	3,2	95	0,067	6,03	0,575	5,636
63	46	2,5	70	2,4	95	-0,075	5,562	0,816	4,835
64	46	2,5	70	3,2	95	0,138	6,546	0,575	6,285
65	46	1,5	30	2,4	110	-0,217	6,092	0,359	6,419
66	46	1,5	30	3,2	110	-0,339	7,335	0,619	7,52
67	46	1,5	70	2,4	110	-0,249	7,719	0,492	7,706
68	46	1,5	70	3,2	110	-0,396	7,633	0,458	7,601
69	46	2,5	30	2,4	110	-0,01	6,396	0,536	6,197
70	46	2,5	30	3,2	110	0,074	6,863	0,484	6,072
71	46	2,5	70	2,4	110	-0,201	7,052	0,658	7,48
72	46	2,5	70	3,2	110	-0,385	7,759	0,798	7,917

Tablo 4.2 : İnce alüminyum levhaların TIG kaynağı için doğrulama datası (Y.S. Tarng ve diğ.,1998).

NO	GİRİŞ PARAMETRELERİ					ÇIKTI DEĞERLERİ			
	Kaynak Hızı (cm/min)	Dolgu Teli Hızı (cm/min)	Temizlik (%)	Ark Mesafesi (mm)	Akım (A)	Ön Yükseklik (mm)	Ön Genişlik (mm)	Arka Yükseklik (mm)	Arka Genişlik (mm)
1	24	2	30	2,4	80	-0,066	6,123	0,801	5,541
2	24	2	30	3,2	80	0,114	5,979	0,682	4,633
3	24	2	70	2,4	80	-0,213	7,424	0,806	7,026
4	24	2	70	3,2	80	0,034	7,516	0,557	7,48
5	24	2	30	2,4	95	-0,167	8,481	0,713	8,34
6	24	2	30	3,2	95	-0,296	8,928	0,807	8,64
7	24	2	70	2,4	95	-0,219	9,677	0,688	9,717
8	24	2	70	3,2	95	-0,448	10,523	1,005	11,088
9	24	2	30	2,4	110	-0,281	10,871	0,713	11,142
10	24	2	30	3,2	110	-0,452	10,83	0,803	11,37
11	24	2	70	2,4	110	-0,651	13,986	1,09	14,146
12	24	2	70	3,2	110	-0,74	12,273	1,148	12,712
13	35	2	30	2,4	80	0,144	5,474	0,425	5,057
14	35	2	30	3,2	80	0,224	5,449	0,379	3,884
15	35	2	70	2,4	80	0,023	5,758	0,515	4,97
16	35	2	70	3,2	80	0,041	5,758	0,54	4,768
17	35	2	30	2,4	95	-0,094	6,665	0,613	6,304
18	35	2	30	3,2	95	-0,154	7,402	0,564	7,44
19	35	2	70	2,4	95	-0,179	7,614	0,61	7,557
20	35	2	70	3,2	95	-0,05	7,506	0,457	7,31
21	35	2	30	2,4	110	-0,433	8,011	0,868	8,047
22	35	2	30	3,2	110	-0,449	8,473	0,78	8,466
23	35	2	70	2,4	110	-0,396	9,652	0,782	10,277
24	35	2	70	3,2	110	-0,553	9,773	0,847	10,427
25	46	2	30	2,4	80	0,454	5,581	0,315	3,046
26	46	2	30	3,2	80	0,193	4,645	0,332	2,81
27	46	2	70	2,4	80	0,023	5,656	0,584	4,034
28	46	2	70	3,2	80	0,219	5,538	0,363	2,857
29	46	2	30	2,4	95	0,057	5,6	0,495	4,836
30	46	2	30	3,2	95	0,155	6,002	0,351	4,922
31	46	2	70	2,4	95	-0,189	5,859	0,729	5,201
32	46	2	70	3,2	95	-0,182	6,124	0,569	5,299
33	46	2	30	2,4	110	-0,368	6,927	0,748	6,775
34	46	2	30	3,2	110	-0,154	6,877	0,539	6,335
35	46	2	70	2,4	110	-0,35	7,63	0,65	7,869
36	46	2	70	3,2	110	-0,225	7,553	0,557	7,707

Tablo 4.3 : Fonksiyon modellerine göre kaynak geometrisi ölçülerinin R² değerleri

	R ²	Referans Makale Modeli*	4. Derece Polinom Model	5. Derece Polinom Model
Çalışma Datası	Arka Yükseklik	0,789298	0,937399	0,964117
	Arka Genişlik	0,971766	0,990747	0,997344
	Ön Yükseklik	0,847849	0,940308	0,97193
	Ön Genişlik	0,972834	0,990799	0,997724
Doğrulama Datası	Arka Yükseklik	0,850297	0,961873	0,988406
	Arka Genişlik	0,982617	0,996965	0,997496
	Ön Yükseklik	0,930275	0,973936	0,986197
	Ön Genişlik	0,970867	0,996155	0,999355

*Dutta. (2007).

Burada BH,BW,FH ve FW değerlerini kaynak hızı, dolgu teli hızı, gaz temizlik yüzdesi, ark mesafesi ve akım cinsinden ifade etmek için “*Wolfram Mathematica v.11*” “FindFit” çözücüsü kullanarak çoklu nonlinear regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Etkileşim terimleri de dahil olmak üzere regresyon eşitliğinin genel formu şu şekildedir:

$$y = b_0 + \sum_1^5 b_i x_i + \sum_1^5 b_{ij} x_i x_j + \sum_1^5 b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_1^5 b_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \sum_1^5 b_{ijklm} x_i x_j x_k x_l x_m + \sum_1^5 b_{ii} x_i^2 + \sum_1^5 b_{iiij} x_i^3 x_j^2 + \sum_1^5 b_{iiijk} x_i^2 x_j^2 x_k + \sum_1^5 b_{iiijkl} x_i^2 x_j x_k x_l + \sum_1^5 b_{iii} x_i^3 + \sum_1^5 b_{iiii} x_i^4 + \sum_1^5 b_{iiiii} x_i^5 \quad (7)$$

Bu fonksiyonda x, girdi değişkenlerinin kodlanmış değerlerini temsil eder, y ise yanıt yani çıktı değerini göstermektedir. $b_0, b_1, \dots, b_{12345}$ değerleri ise en küçük kareler tekniği kullanılarak belirlenecek olan katsayıları temsil etmektedir.

Çalışma datası için öngörülen matematiksel modelin, doğrulama datasındaki veriler ile regresyon analizi yapıldığında hesaplanan R² değerlerinin yine yüksek olduğu görülmektedir. Bu şekilde belirlenen fonksiyon TIG kaynak parametreleri ile kaynak dikişi kesit geometrisini doğru bir şekilde tarif etmektedir. Tablo A.1’de gösterildiği gibi çalışma datası verilerine göre giriş parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen katsayılar listelenmiştir.

Her bir çıktı parametresi için (7) fonksiyonu program yardımı ile çalıştırılmış ve hesaplanmış değerler (HD), ölçülmüş değerler (ÖD), sapma değerleri Tablo A.2, Tablo A.3, Tablo A.4 ve Tablo A.5'te belirtilmiştir.

Ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasındaki farkın oldukça küçük olmasından dolayı kaynak dikişinin kesit geometrisini tarif etmesi için düzenlenen fonksiyonun mühendislik problemimizi doğru tanımladığı görülmektedir.



BÖLÜM 5

OPTİMİZASYON

Optimizasyon, verilen kısıtlar kümesi altında ve seçilen bir optimizasyon hedef fonksiyonuna uygun olarak, tasarım değişkenlerinin mümkün olan en iyi değerlerinin elde edildiği bir prosedürdür. Mühendislik alanında en yaygın optimizasyon prosedürü, toplam maliyeti en aza indirecek veya muhtemel güvenilirliği ve kaliteyi maksimize edecek şekilde gerçekleştirilir. Mühendislikteki tasarım problemleri, optimizasyon yaklaşımının uygulanmasını gerektiren pek çok durumu içerir. Bu sebeple etkili bir optimizasyon algoritması kullanarak en iyi çözümü sistematik bir temelle bulabilmek, bir mühendis için başarı kriteri olarak değerlendirilir.

Tasarım problemlerini çözmek için birçok optimizasyon algoritması mevcuttur. Bunlar temelde geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemler olarak sınıflandırılabilirler. Geleneksel yöntemler daha çok gradyan tabanlıdır (fonksiyonların türev bilgilerine ihtiyaç duyarlar) ve deterministik bir yaklaşımla problemi formüle ederler. Bu sebeple nonlinear fonksiyonları içeren, daha karmaşık ve uzun matematiksel yapılarla ifade edilen problemler için tercih edilmezler. Kısıtlı varyasyon ve Lagrange çarpanları gibi yöntemler analitiktir ve geleneksel yöntemlere örnek olarak verilebilir (Silva,2014). Geleneksel olmayan yöntemler ise stokastik süreçleri ve sezgisel tabanlı arama tekniklerini kullanarak sonuca gider ve yaklaşık çözüm üretirler. Türev bilgisine ihtiyaç duymama, tam sayılı programlamaya uyarlama kolaylığı, ayrık ve sürekli çözüm kümelerinin her ikisinden de sonuca gidebilme kabiliyeti gibi avantajlarından dolayı son dönem mühendislik optimizasyon problem çözümlerinde tercih edilmektedirler. Kaynak prosesi fiziksel süreç olarak nonlinear terimleri içerdiğinden, geleneksel optimizasyon yöntemleri çözüm için başarısız olur. Bu koşullar altında, *Evolutionary Algorithms* (GA), *Differential Evolution* (DE), *Nelder-Mead* (NM), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Memetic Algorithms* (MA), *Particle Swarm Optimization*

(PSO) ve *Simulated Annealing* (SA) yöntemleri gibi stokastik optimizasyon metotlarının kullanılması uygundur.

Bu çalışmada TIG kaynak dikişi kesit geometrisinin optimizasyon süreci sırasıyla “*Random Search* (RS)”, “*Differential Evolution* (DE)”, “*Nelder-Mead* (NM)” ve *Simulated Annealing*(SA) metotları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1 Tek Amaçlı Optimizasyon

Tek amaçlı optimizasyon, minimize yada maksimize etmek istediğimiz bir tane amaç fonksiyonumuzun olması durumudur. Bu optimizasyon yaklaşımı tasarım değişkenleri, kısıtlar ve kısıtların sınırlarını içermektedir. Tek amaçlı optimizasyon yaklaşımı ile çözülen problemler aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} &\text{minimizasyon} && f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ &\text{öyle ki} && h_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \geq 0 && i = 1, 2, \dots, r \\ & && g_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = 0 && j = 1, 2, \dots, m \\ & && \theta^L \leq (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \leq \theta^u \end{aligned}$$

Burada f amaç fonksiyonu, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ tasarım değişkenleri, h ve g ise kısıtlardır.

5.2 Çok Amaçlı Optimizasyon

Çok amaçlı bir optimizasyon problemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} &\text{minimizasyon} && f_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), f_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \dots, f_t(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ &\text{öyle ki} && h_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \geq 0 && i = 1, 2, \dots, r \\ & && g_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = 0 && j = 1, 2, \dots, m \\ & && \theta^L \leq (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \leq \theta^u \end{aligned}$$

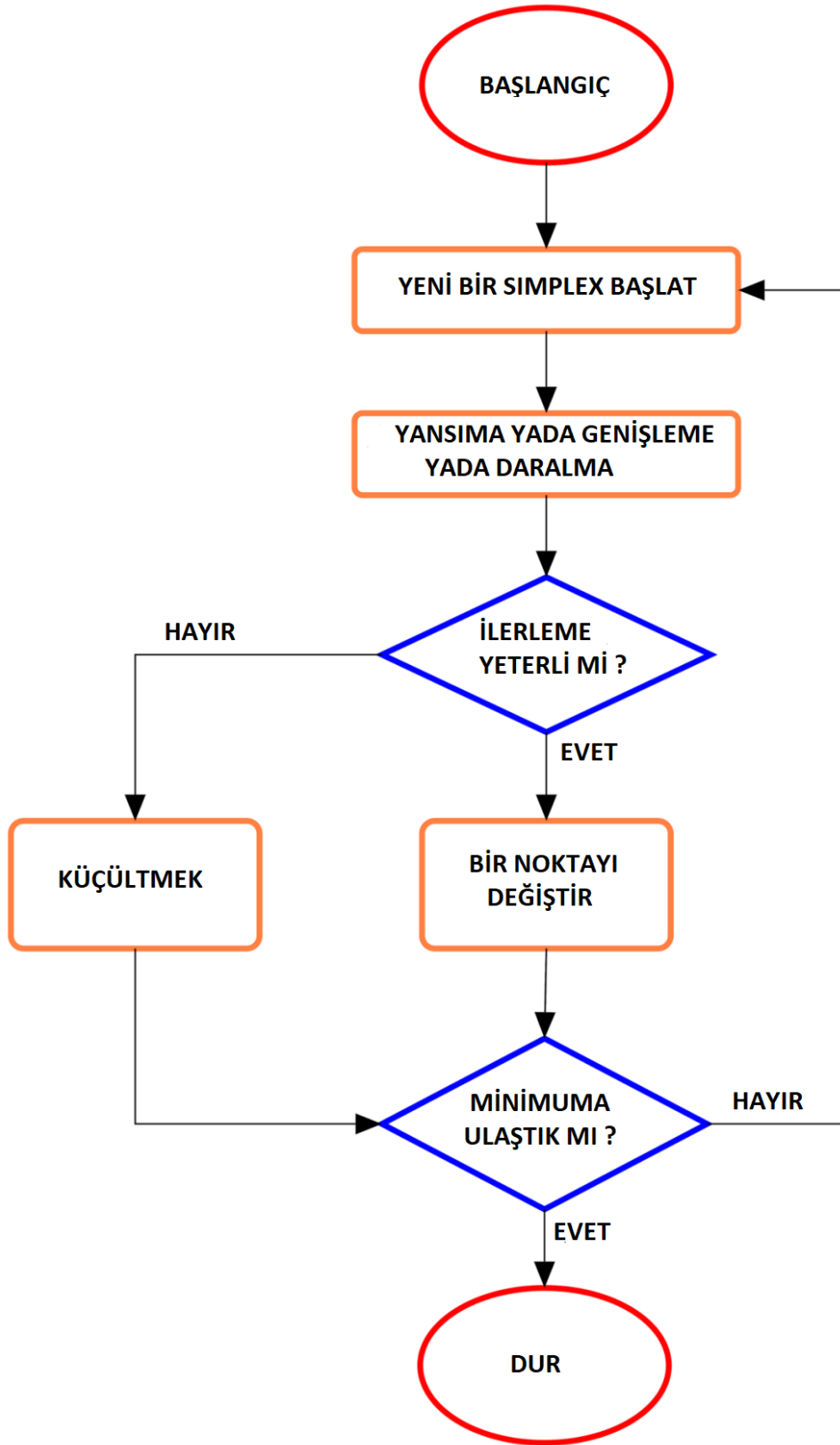
Burada f_1, f_2, \dots, f_t minimizasyon yada maksimizasyon yapılacak fonksiyonlardır.

5.3 Stokastik Optimizasyon Algoritmaları

Bu tezde, optimum kaynak dikiş kesit geometrisi ve minimum kaynak dikiş kesit alanı problemleri için DE, NM, RS ve SA yöntemleri kullanılmış ve aşağıdaki alt bölümlerde algoritmaların basamakları kısaca açıklanmıştır. Algoritmaların ilgili parametreleri için seçeneklerin ayarlanmasında kullanılan değerler Tablo 5.1'de ayrıca listelenmiştir.

5.3.1 Nelder-Mead Algoritması

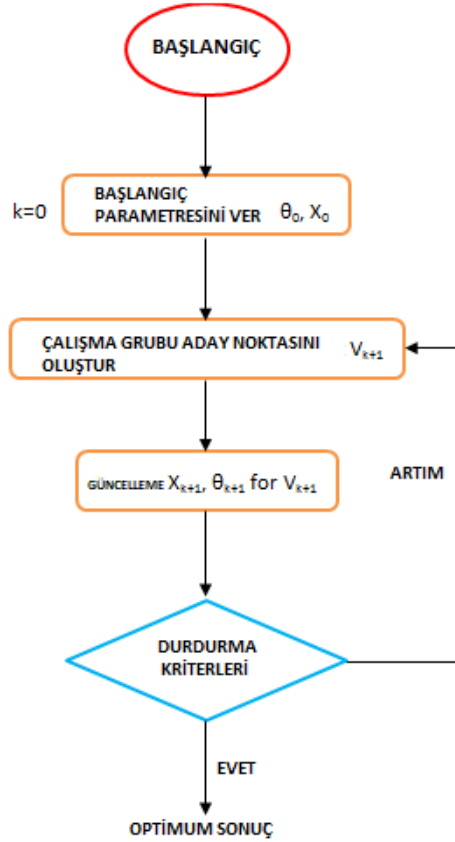
Nelder-Mead algoritması, geleneksel bir lokal arama yöntemidir. Nelder ve Mead (1965) tarafından öncelikle kısıtsız optimizasyon problemi için tasarlanmıştır. Nelder-Mead küresel bir optimizasyon algoritması olmasa da, pratik kullanımda çok fazla lokal minimuma sahip olmayan problemler için oldukça iyidir. Algoritma seçeneklerinin ayarlanması dört temel prosedür ile kontrol edilir: Yansıma, genişleme, daralma ve büzülme. Karakteristik özelliklerden biri algoritmanın ilk bir kaç iterasyonda önemli derecede ilerleme sağlamasıdır. Dahası, yöntem genellikle yineleme başına “*shrink*” dışında bir veya iki fonksiyon değerlendirmesine ihtiyaç duyar ve dönüşümler, pratikte nadiren görülür. Buna ek olarak, simpleks hedef fonksiyonun yerel konturuna uyacak şekilde yönünü, boyutunu ve şeklini değiştirebilir, bu nedenle NM optimum noktanın barındığı zor alanların keşfedilmesinde yüksek esnekliğe sahiptir. Algoritmaya ait akış şeması kabaca şekil 5.1’de verildiği gibi ifade edilebilir.



Şekil 5.1 : Nelder-Mead akış şeması (Barati'den uyarlanmış, 2011)

5.3.2 Random Search Algoritması

Monte-Carlo yöntemi olarak da bilinen Random Search yöntemi, stokastik tabanlı bir algoritma olup Branch ve Bound, Interval Analysis ve Tunneling gibi deterministik yöntemlerinden oldukça farklıdır. Stokastik süreçte, rasgele sayı üreticisine dayanan bir takım standart teknikler ve programlar vardır. Elde edilen değerler, arzulanan herhangi bir dağılıma yakınlık sağlamak için ölçeklendirilmeli ve dönüştürülmelidir. Random Search algoritmasının en önemli avantajı, sürekli ve ayrık alanlarda da dahil olmak üzere konveks olmayan, türevlenebilir amaç fonksiyonları için genel optimuma ulaşma kabiliyetine sahip olmasıdır. RS yönteminin diğer bir avantajı, karmaşık problemlerde uygulanmasının nispeten kolay olmasıdır. Genellikle, RS algoritmalarının, kötü yapılanmış küresel optimizasyon problemleri için hızlı bir şekilde sonuç verdiği için "güçlü" oldukları ve iyi performans gösterdiği bilinmektedir. Şekil 5.2'de metodun temel çalışma prensiplerini içeren bir akış şeması mevcuttur. Random Search yönteminin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi (Zabinsky, 2011) çalışmasında bulunabilir.



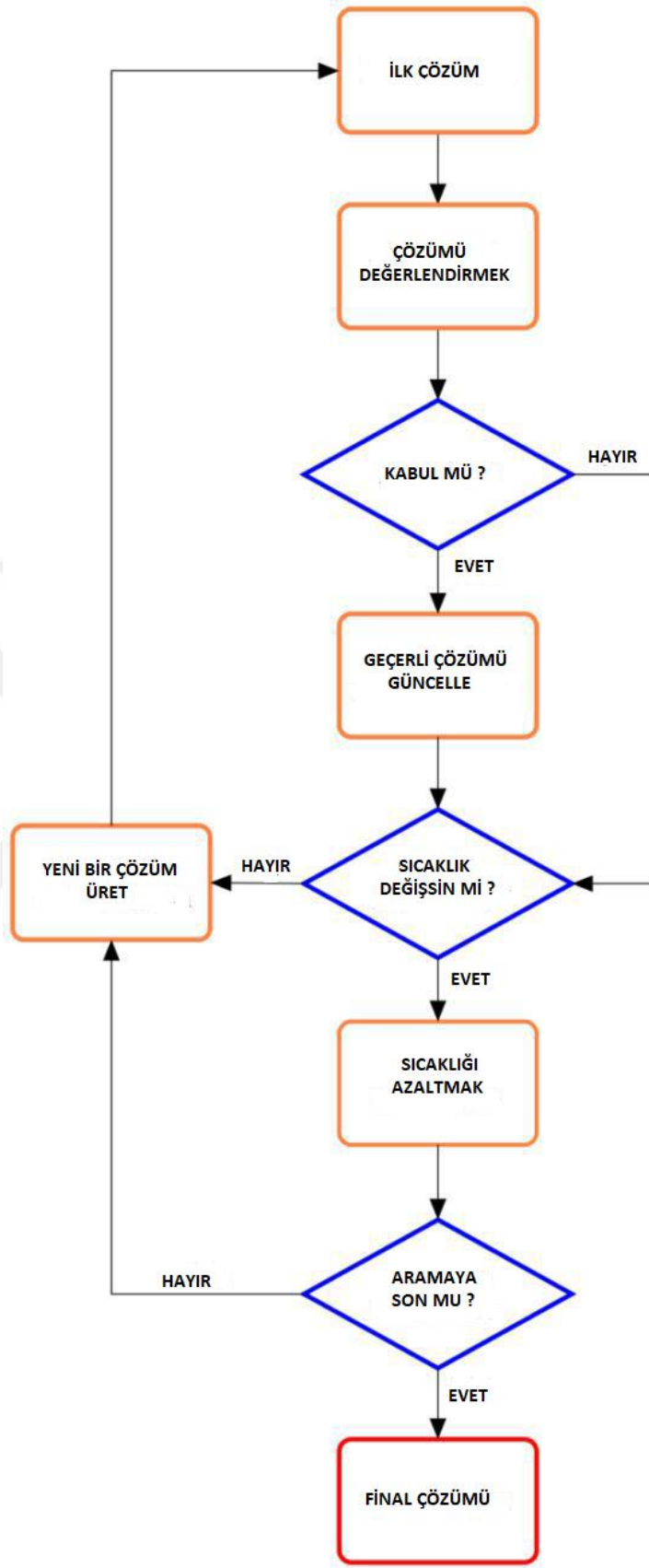
Şekil 5.2 : Random Search akış şeması (Zabinsky'den uyarlanmış, 2011)

5.3.3 Simulated Annealing Algoritması

En popüler rasgele arama yöntemlerinden biri de SA'dır. Bir metal nesnenin yüksek sıcaklığa ısıtıldığı ve yavaşça soğumasına izin verilen, tavlama işleminin fiziksel sürecine dayanır. Ergitme işlemi, maddenin atomik yapısının daha düşük bir enerji durumuna geçmesini ve böylece sert bir malzeme haline gelmesini sağlar. Optimizasyon açısından, SA algoritmasında işlem yapının yerel bir minimumdan uzaklaşmasını ve daha iyi bir küresel optimal noktayı keşfetmesini ve yerleşmesini sağlar. SA'nın en büyük avantajı, sürekli, ayrık veya karışık tamsayılı gibi çeşitli optimizasyon problemlerini çözmeyi mümkün kılmasıdır. Bu yöntemin çalışma aşamasında, her yinelemede rastgele yeni bir nokta üretilir ve tüm durdurma ölçütleri yerine getirildiğinde algoritma durur. Yeni noktanın geçerli noktadaki veya arama kapsamındaki boşluğu, Boltzmann'ın olasılık dağılımına dayanmaktadır. Dağılım, bir sistemin "T" sıcaklığında termal denge içindeki enerjisini ifade eder. Boltzmann'ın olasılık dağılımı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir (Rao, 2009);

$$P(E) = e^{-E/kT} \quad (8)$$

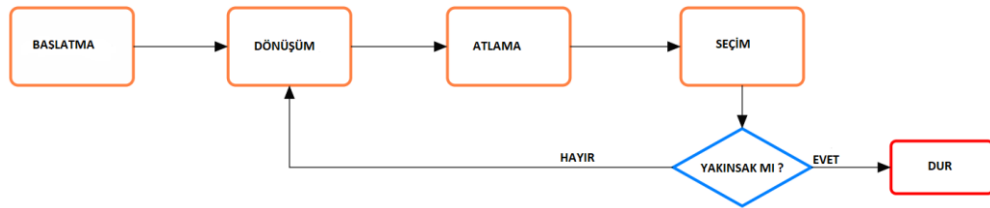
Burada, $P(E)$ enerji seviyesine ulaşma ihtimalini temsil eder, k , boltzmann sabiti ve T , sıcaklıktır.



Şekil 5.3 : Simulated Annealing akış şeması (Pham & Karaboğa'dan uyarlanmış, 2000)

5.3.4 Differential Evolution Algoritması

DE algoritması, optimizasyon için (Price & Storn, 1997) tarafından gerçekleştirilen evrimsel programlamanın bir dalıdır. DE’de her değişkenin değeri gerçek sayı ile temsil edilir. DE’nin avantajları basit bir yapısının olması, kullanımının kolay olması, hızlı olması ve sağlamlığıdır. DE, gerçek değerli değişkenlerle problemleri çözmek için en iyi genetik tip algoritmalarından biridir. DE, uzman bilgisi veya karmaşık tasarım algoritmalarına başvurmadan neredeyse çözülemeyen tüm problemlere çözüm üretebilmek için çeşitli bilim ve mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. DE, dönüşümü bir arama mekanizması olarak kullanır ve arama, uygulanabilir alandaki muhtemel bölgelere yönlendirir. Her nesil için D boyutlu parametre vektörlerinin popülasyonu olarak NP değişkenlerini kullanan nüfusa dayalı bir arama tekniğidir. Problemlerle ilgili hiçbir bilgi mevcut değilse ilk popülasyon rasgele seçilir. Mevcut ön çözüm durumunda, başlangıç popülasyonu genellikle ön çözüme normal dağılmış rasgele sapmalar eklenerek üretilir. DE, iki popülasyon üyesi arasındaki ağırlıklı fark vektörünü üçüncü bir üyeye ekleyerek yeni parametre vektörleri üretir. Ortaya çıkan vektör, önceden belirlenmiş bir popülasyon üyesinden daha düşük bir hedef fonksiyon değeri üretirse, yeni oluşturulan vektör, karşılaştırıldığı vektörün yerine geçer. Buna ek olarak, en iyi parametre vektörü, optimizasyon işlemi sırasında yapılan ilerlemeyi takip etmek için her jenerasyon için değerlendirilir. Rasgele sapmalar üretmek için nüfustan uzaklığı ve yön bilgisini çıkarmak mükemmel yakınsaklık özelliklerine sahip uyarlanabilir bir düzende sonuçlanır (Price ve diğ., 2005).



Şekil 5.4 : Differential Evolution akış şeması (Vo-Duy ve diğ.’den uyarlanmış, 2017)

Tablo 5.1 : Dört optimizasyon metoduna ait “*Wolfram Mathematica v.11*” programı ayarları

Opsiyonlar	DE	NM	RS	SA
CrossProbability	0.5	-	-	-
RandomSeed	0	5/1/2/5	0	0
ScalingFactor	0.6	-	-	-
SearchPoints	-	-	3000	1000
Tolerance	0.001	0.001	0.001	0.001
ContractRatio	-	0.5	-	-
ExpandRatio	-	2.0	-	-
ReflectRatio	-	1.0	-	-
ShrinkRatio	-	0.5	-	-
Levellterations	-	-	-	50
PerturbationScale	-	-	-	0.1

Bu çalışmada kaynak dikişi kesit geometrisinin alanı minimize edilmiştir. Fakat kaynak dikişinin mekanik özellikleri bakımından kalitesinde korunabilmesi için nüfuziyetin (BP, nüfuziyet) maksimum olması istenmiştir. Burada özellikle, nüfuziyetin ulaşabileceği maksimum değerde, elde edilebilecek minimum alan hesaplanmıştır. Maksimum nüfuziyet için genel form şu şekildedir:

$$\text{Nüfuziyet} = BH + \text{İş Parçası Kalınlığı} \quad (9)$$

Kaynak dikişine ait kesit geometrisinin, alan hesabının yapılabilmesi için genel formu şu şekildedir (Siddaiah ve diğ., 2017):

$$\text{Alan} = \left(\frac{FW^2+FH^2}{8FH}\right)^2 \cos^{-1}\left(\frac{FW^2-FH^2}{FW^2+FH^2}\right) - \frac{FW^3}{16FH} + \frac{(FH)(FW)}{4} + FW + \frac{(BP)(BW)}{2} \quad (10)$$

5.4. Wolfram Mathematica ve Optimizasyon Araçları

Mathematica programlama dilinde yerel optimizasyon problemleri “FindMinimum” çözücüsü kullanılarak çözülebilir. Optimizasyon problemleri ayrıca problemin

karmaşıklığına, yaklaşım seçimine, analitik ve nümerik çözüm arayışına bağlı olarak “Minimize” veya “NMinimize” çözümleri kullanarak da sayısal olarak çözülebilir.

Aşağıdaki örneklerde Mathematica programına ait farklı çözümleri kullanımları listelenmiştir:

Minimize komutu kullanırsak,

```
In[1]:= Minimize[{x - y, -3 x^2 + 2 x y - y^2 >= -1}, {x, y}]  
Out[1]= {-1, {x -> 0, y -> 1}}
```

NMinimize kullanarak problemi sayısal olarak çözmek istersek,

```
In[1]:= NMinimize[x^4 - 3 x^2 - x, x]  
Out[1]= {-3.51391, {x -> 1.30084}}
```

FindMinimum, sayısal olarak yerel bir minimum bulur. Bu örnekte bulunan yerel minimum da lokal bir minimumdur.

```
In[3]:= FindMinimum[{x - y, -3 x^2 + 2 x y - y^2 >= -1}, {x, y}]  
Out[3]= {-1., {x -> 2.78301 × 10-17, y -> 1.}}
```

5.4.1. NMinimize ve NMaximize Çözümleri

“NMinimize” ve “NMaximize”, kısıtlı global optimumu bulmak için birkaç algoritma uygular. Bu algoritmalar, türevlenebilir veya sürekli olmayan ve yerel optimum metotları tarafından kolayca yakalanmayan fonksiyonlarla baş edebilecek kadar esneklerdir.

Bazen bir problem için optimum nokta bulmak kısıtlamalar olmadan bile zor olabilir ve bu nedenle kullanılan yöntemler başarısız olabilir. Fonksiyonu farklı başlangıç koşullarında birkaç kez optimize etmek ve sonuçların en iyisini almak sıklıkla yararlı olabilir.

$\sin(x+y)-x^2-y^2$ ifadesinin maksimumunu bulalım,

```
In[46]:= NMaximize[Sin[x + y] - x2 - y2, {x, y}]  
Out[46]= {0.400489, {x → 0.369543, y → 0.369543}}
```

$(y - \frac{1}{2})^2 + x^2$ fonksiyonunun minimumunu şu kısıtlarla bulalım :

$y \geq 0$ ve $y \geq x + 1$

```
In[47]:= NMinimize[{x2 + (y - .5)2, y ≥ 0 && y ≥ x + 1}, {x, y}]  
Out[47]= {0.125, {x → -0.25, y → 0.75}}
```

NMinimize çözücüsü çalışması için, başlaması gereken dikdörtgen bir başlangıç bölgesine ihtiyaç duyar. Bu, diğer sayısal yöntemlere bir başlangıç noktası veya başlangıç noktası vermekle benzerdir. İlk bölge, her değişkene bir sonlu üst ve alt sınır vererek belirtilir. Bu kısıtlamalarda bir $\mathbf{a} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ veya değişkenlerde $\{x, a, b\}$ eklenerek yapılır. Her ikisi de verilirse, değişkenlerin sınırları başlangıç bölgesi için kullanılır. Bir değişken x için başlangıç bölgesi belirtilmemişse, varsayılan başlangıç bölgesi olan $-1 \leq \mathbf{x} \leq 1$ kullanılır. Farklı değişkenlerin başlangıç bölgeleri farklı şekillerde tanımlanabilir.

NMinimize ve NMaximize, otomatik, "DifferentialEvolution", "NelderMead", "RandomSearch" ve "SimulatedAnnealing" olmak üzere çeşitli optimizasyon yöntemlerine sahiptir. "Method" seçeneği ile kontrol edilir. Metoda özgü tüm seçenekler, sol taraflar da dizeler halinde verilmelidir.

Varsayılan yöntemle NMinimize, sorunun türüne göre hangi yöntemi kullanacağını seçer. Amaç fonksiyonu ve kısıtlamaları lineer ise, "LinearProgramming" çözücüsü kullanılır. Tamsayı değişkenleri varsa veya nonlinear ifadeler söz konusu ise "Differential Evolution" devreye alınır.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kaynak prosesi parametrelerini ilişkilendirmek için geliştirilen regresyon modelleri baz alınarak (I) kaynak dikişi kesit geometrisi optimizasyonu, (ii) kaynak dikiş alan minimumizasyonu stokastik yöntemler ile gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda giriş parametre değerlerindeki değişimler ile kaynak dikişi kesit geometrisi ölçülerindeki değişimler irdelenmiştir.

Bu sayede optimizasyon için geliştirilen matematiksel modeller, kaynak dikişi kesit geometrisi parametrelerini öngörmeye ve yüksek derecede tekrarlanabilirlik ve artan üretim hızı ile istenen kaynak kalitesini nispeten düşük bir maliyetle elde etmek için işlem parametrelerini optimum değerlerde ayarlama yardımcı olacaktır.

6.1. Kaynak Parametrelerinin Doğrudan Etkileri

Kaynak dikişine ait kesitin geometrisini oluşturan ön yükseklik, ön genişlik, alt yükseklik ve alt genişlik değerlerinin kaynak girdi parametreleri ile nasıl sonuçlar meydana getirdiği irdelenmiştir. Grafiklerde belirtilen değerler regresyon analizi sonucu hesaplanan değerlerden oluşmaktadır. Elde edilen veriler ile çalışmaya konu olan dataların kıyaslanması sonucunda değerlerin tutarlılık gösterdiği görülmektedir.

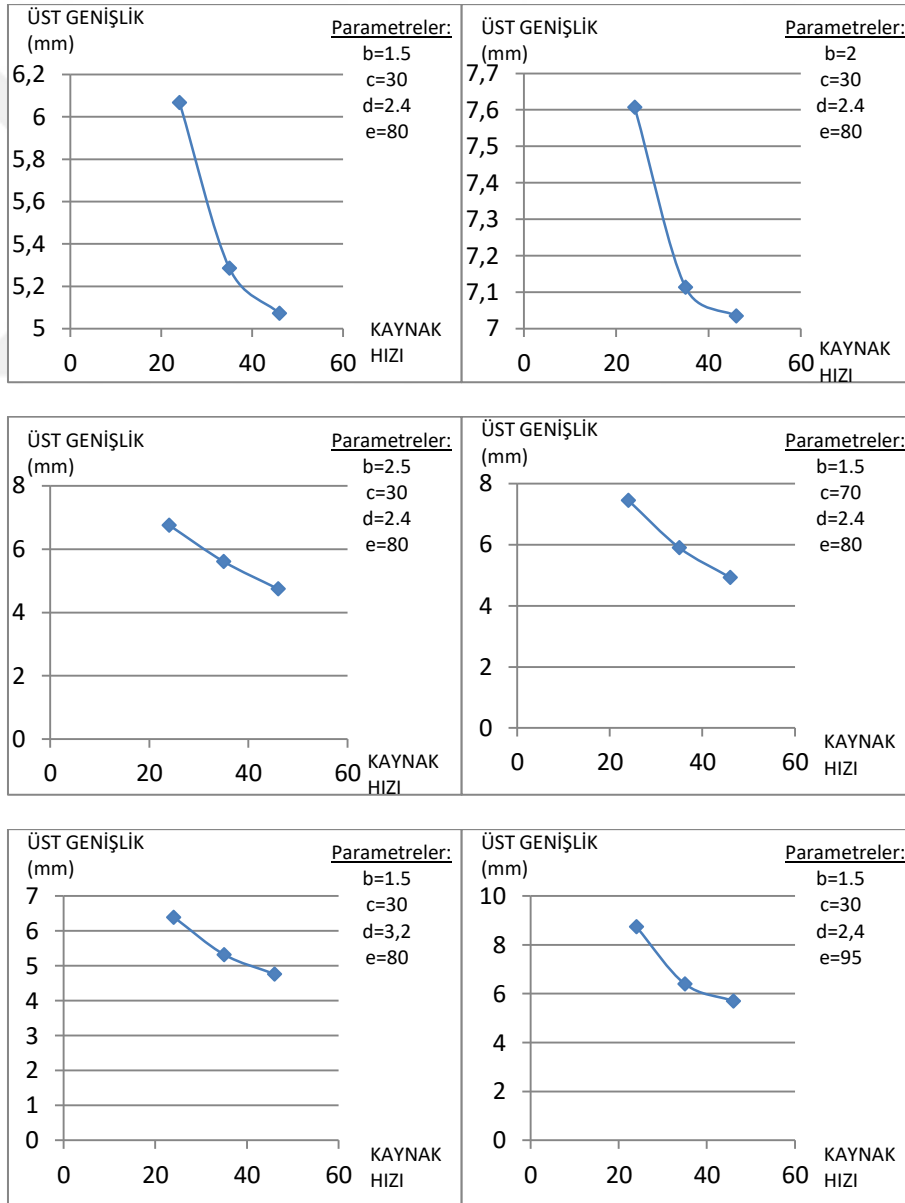
6.1.1. Kaynak Hızı

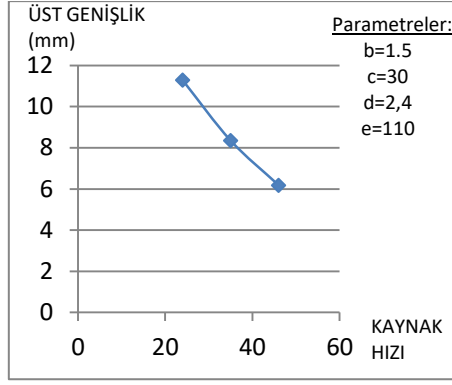
Yapılan çalışmalar neticesinde yüksek kaynak hızı tüm kaynak dikişine ait kesit geometrileri için olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, hız arttıkça torç, metal üzerinde daha hızlı ilerlemekte ve dikiş bölgesinde daha az bir

metal birikim oranı elde edilmektedir. Hız daha da arttıkça, kaynaklı bölgeyi dolduracak olan erimiş metal yetersiz olmaktadır.

6.1.1.1.Kaynak Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi

Kaynak hızı, üst genişlikte oluşan tüm ölçüsel değişikliklerde direkt etkindir. Isıdan etkilenen bölge azaldıkça kaynak genişliği de azalmaktadır. Şekil 6.1’te gösterildiği gibi, artan kaynak hızı farklı tel hızı, koruyucu gaz temizlik yüzdesi, ark mesafesi ve akım değerlerinde de yetersiz ısı girdisi sebebi ile üst yüksekliği düşürmektedir.

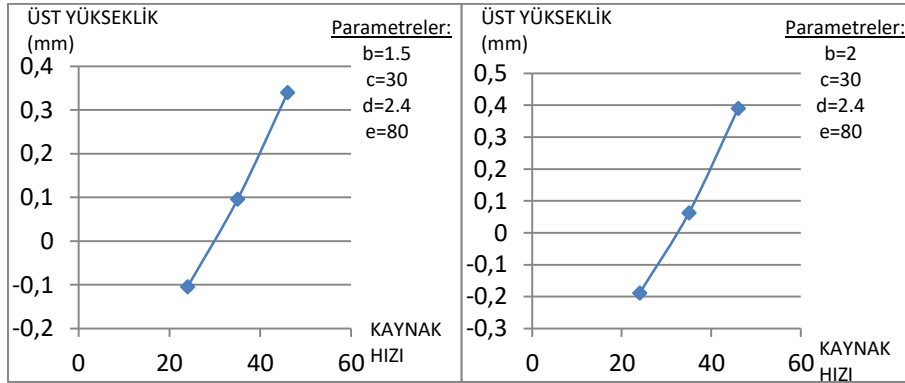


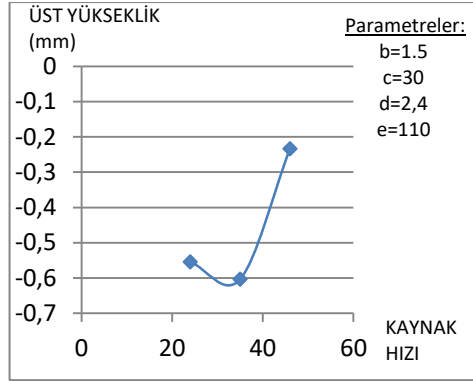
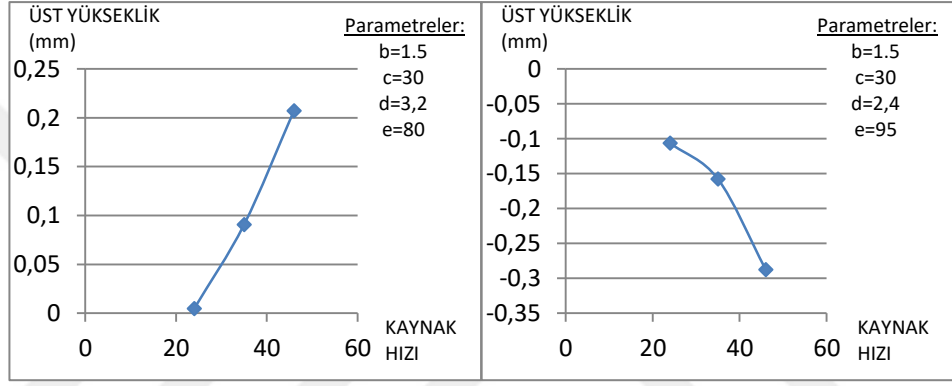
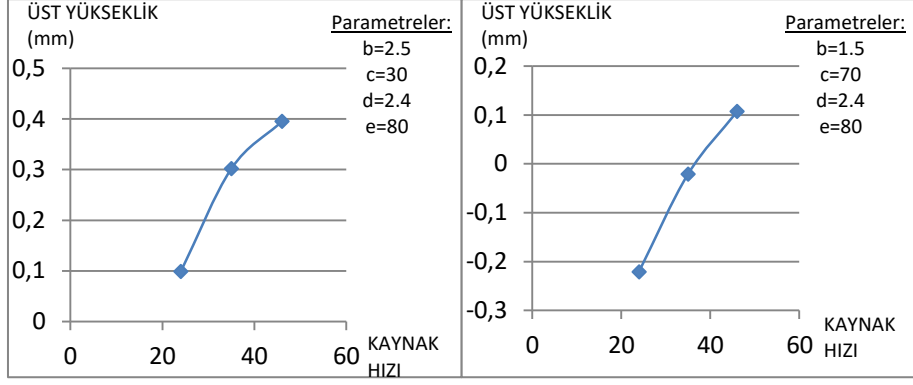


Şekil 6.1 : Kaynak Hızının Farklı Giriş Parametleri ile Üst Genişliğe Etkisi.

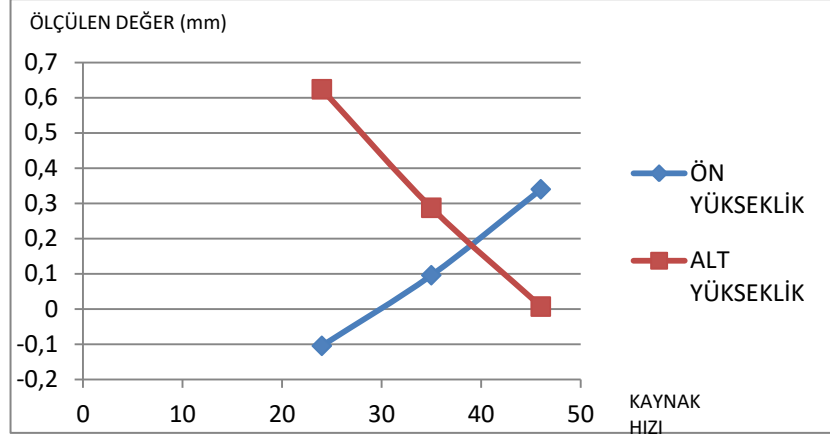
6.1.1.2. Kaynak Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi yüksek kaynak hızı kaynak dikişi kesit geometrisinin yüksekliğini arttırmaktadır. Kaynak hızının artırılması, dolgu malzemenin tam olarak ana malzemeye nüfuziyet edememesi sebebi ile yüksekliği arttırmaktadır. Şekil 6.3’te artan ön yüksekliğe karşılık azalan nüfuziyet görülmektedir. Kaynak hızının arttırıldığı durumlarda, işlem için kullanılan kaynak akımı da arttırılırsa, işlem bölgesinde oluşan ısı girdisi artacağından üst yükseklikte belirli bir miktarda azalma oluşmaktadır. Fakat akım değeri dahada arttırıldığında üst yükseklik miktarı artmaya devam etmektedir.





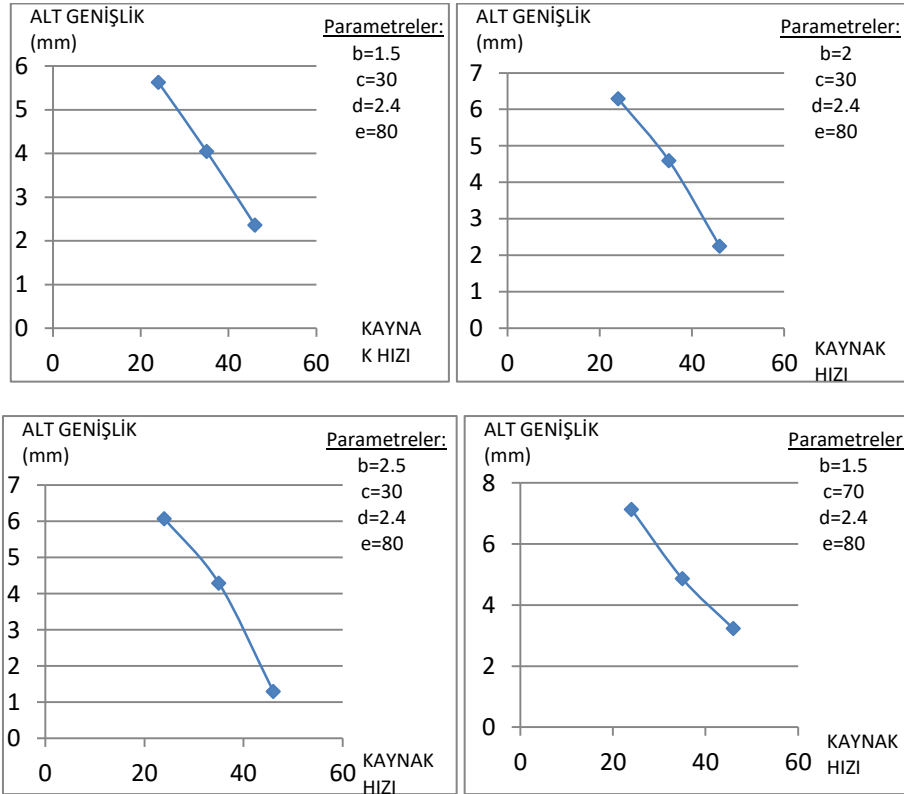
Şekil 6.2 : Kaynak Hızının Farklı Giriş Parametreleri ile Üst Yüksekliğe Etkisi

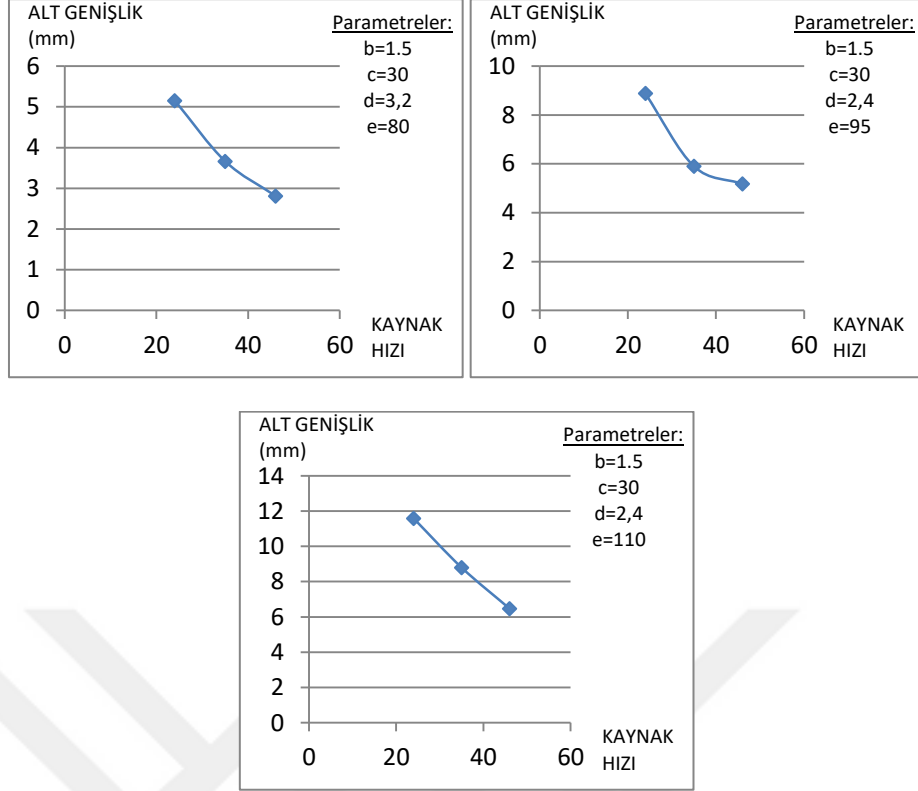


. Şekil 6.3 : Artan Kaynak Hızı ile Üst Yükseklik ve Alt Yükseklik Arasındaki İlişki.

6.1.1.3. Kaynak Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi artan kaynak hızları ile alt genişlik değerleri düşmektedir. Çünkü artan hız ile sisteme verilen ısı miktarı düşmekte ve ana kaynağın nüfuziyeti azalmaktadır.

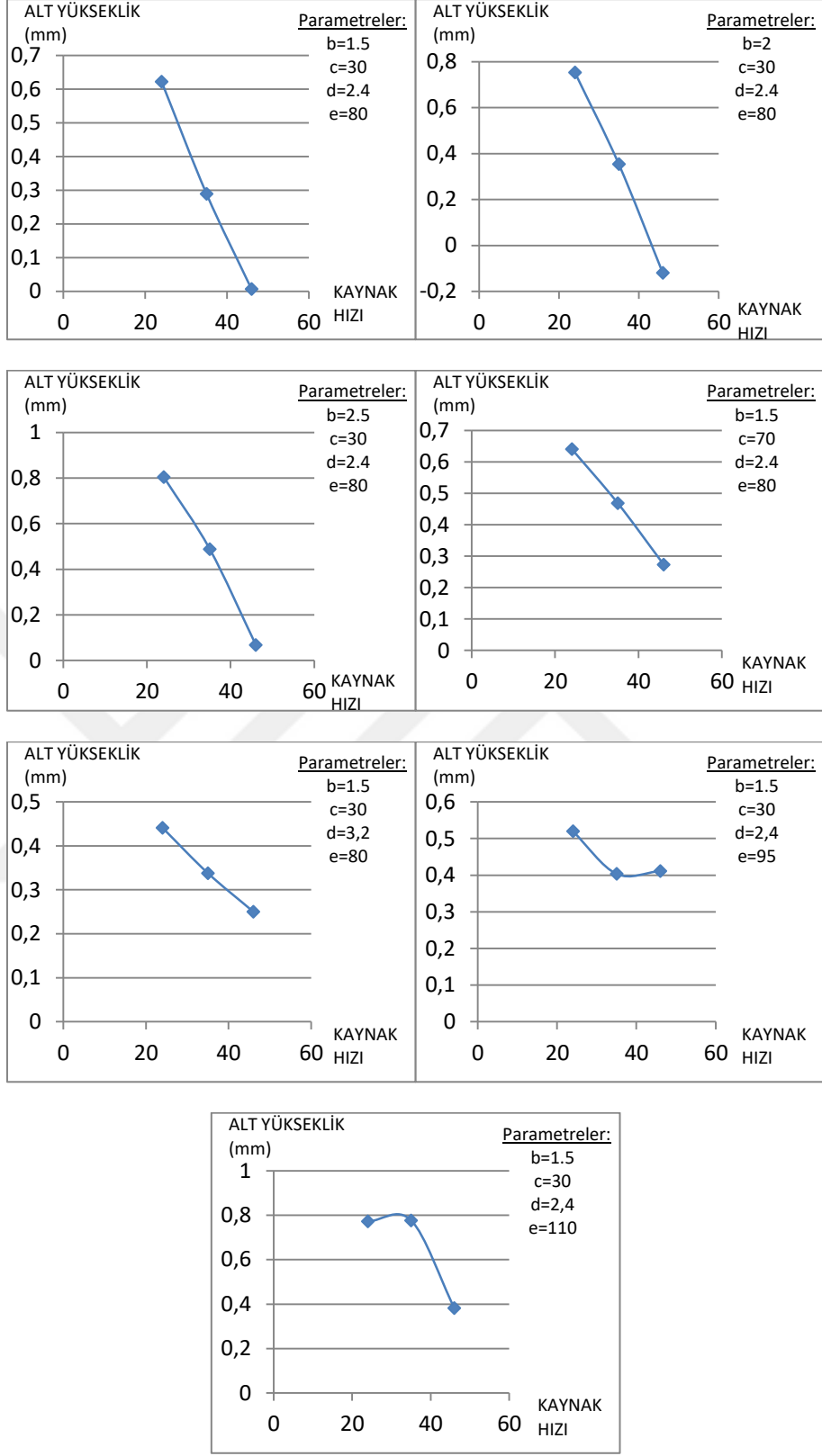




Şekil 6.4 : Kaynak Hızının Farklı Giriş Parametleri ile Alt Genişliğe Etkisi.

6.1.1.4. Kaynak Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.5’da görüldüğü gibi kaynak hızının artması ile kaynak dikişi kesit geometrisine ait alt yükseklik değeri de düşmektedir. Bunun sebebi diğer unsurlarda da olduğu gibi ısı oluşumunun azalması sonucunda gerekli nüfuziyetin sağlanamamasıdır. Bu durum kaynak kalitesi için istenmeyen bir durumdur. Kaynak dikişinin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli çıktı unsurlarından biri nüfuziyetin oranıdır. Nüfuziyet ne kadar artar ise kaynak dikişinin mekanik özellikleri de o oranda iyileşme göstermektedir. Fakat aşırı nüfuziyet meydana gelen kaynak dikişleri de, günümüz imalat koşulları göz önünde bulundurulduğunda maliyet arttırıcı bir unsurdur. Bu sebeple en ideal kaynak dikişinin elde edilmesi için kaynak giriş parametrelerinin optimize edilmesi gereklidir.



Şekil 6.5 : Kaynak Hızının Farklı Giriş Parametleri ile Alt Yüksekliğe Etkisi.

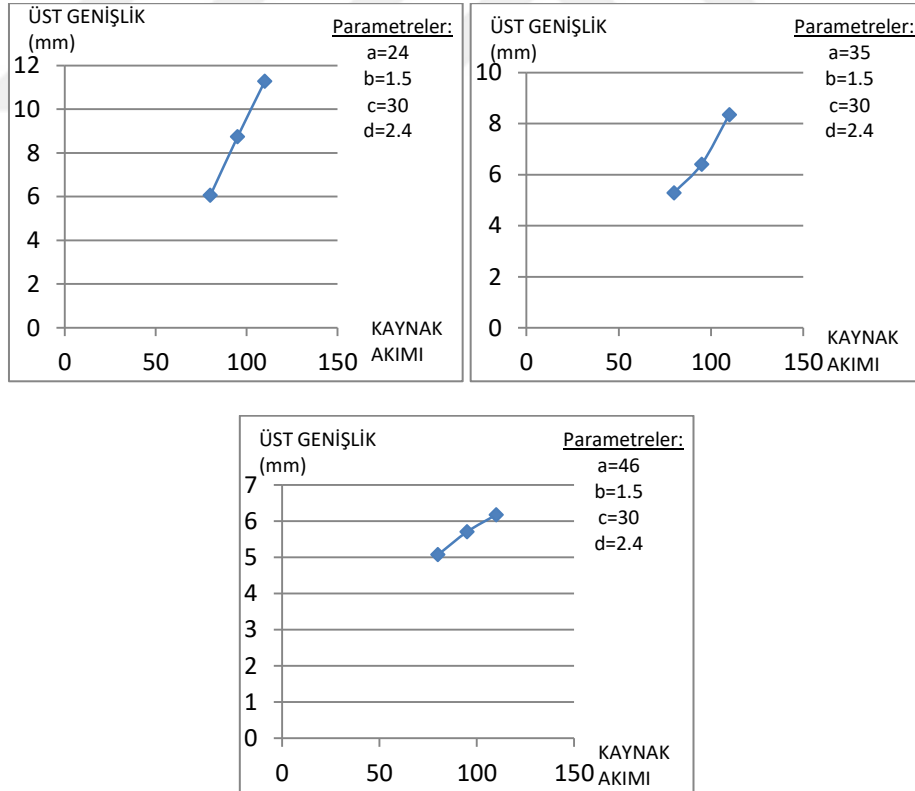
6.1.2. Kaynak Akımı

Akım, herhangi bir kaynak prosesinde kontrol edilmesi gereken en önemli giriş parametrelerinden birisidir. Çünkü akımdaki bir değişiklik, kaynak kalitesini etkiler.

Isı giriş formülü $H = \frac{EI}{1000V}$ (Eşme, 2006)'e göre akımdaki herhangi bir değişiklik ısı giriş hızı ile malzeme biriktirme oranını büyük ölçüde etkiler.

6.1.2.1. Kaynak Akımının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi

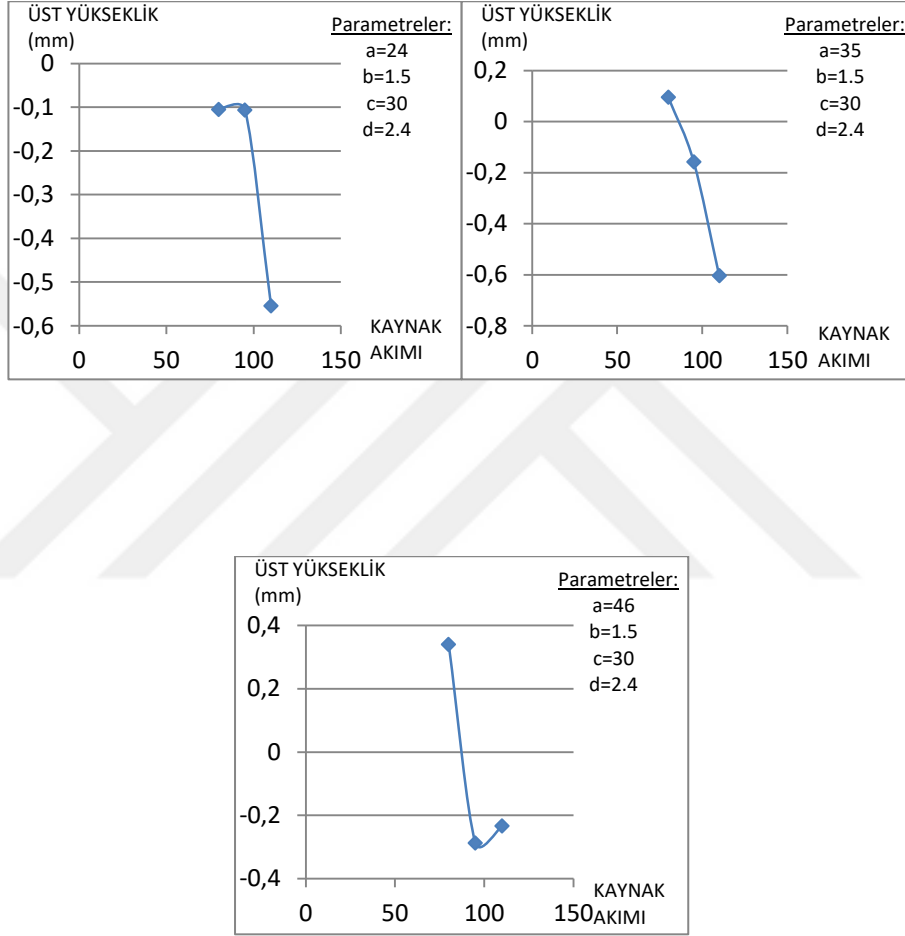
Şekil 6.6'de olduğu gibi artan kaynak akımları ile kaynak dikişi kesit geometrisinin üst genişliği artmaktadır. Fakat uygun olmayan kaynak hızları ile ısı girişi arttırılarak, kaynak yığılması oluşup üst genişliği daha da arttırmaktadır.



Şekil 6.6 : Kaynak Akımının Farklı Giriş Parametleri ile Üst Genişliğe Etkisi.

6.1.2.2.Kaynak Akımının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi

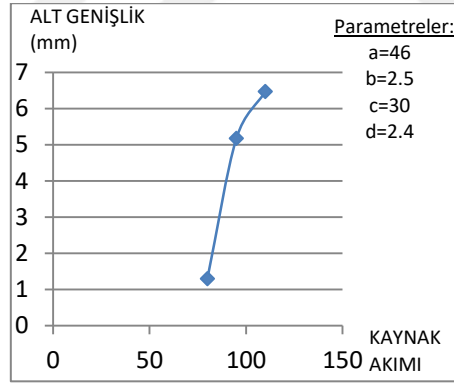
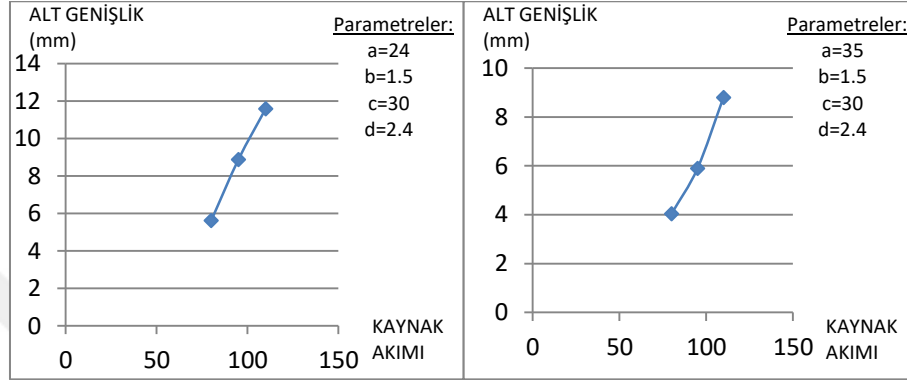
Şekil 6.7’de olduğu gibi artan kaynak akımı ile nüfuziyet artmakta ve bu sebepten ötürü kaynak dikişi kesit geometrisinin üst yüksekliği azalmaktadır.



Şekil 6.7 : Kaynak Akımının Farklı Kaynak Hızlarında Üst Genişliğe Etkisi.

6.1.2.3. Kaynak Akımının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi

Şekil 6.8’ da görüldüğü gibi farklı kaynak hızlarında da artan kaynak akımı ile nüfuziyet artmakta ve kaynak dikişi kesit geometrisinin alt genişliğide artmaktadır.

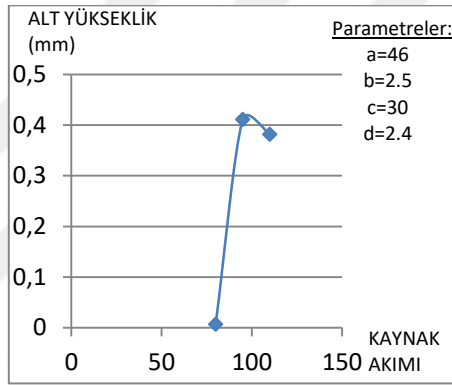
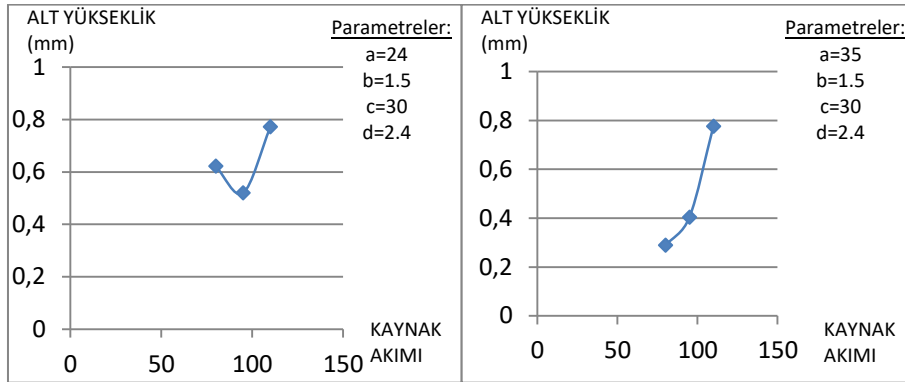


Şekil 6.8 : Kaynak Akımının Farklı Kaynak Hızlarında Alt Genişliğe Etkisi.

6.1.2.4. Kaynak Akımının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.9’da görüldüğü gibi artan kaynak akımı ile kaynak dikişine ait alt yükseklikte artmaktadır. Artan akım değerleri ısı girdisini arttırmakta ve nüfuziyette de artış

yaşatmaktadır. Fakat yüksek kaynak hızlarında artan akım ile birlikte dolgu malzemesi yetersiz gelmekte ve alt yükseklik düşüş göstermektedir.



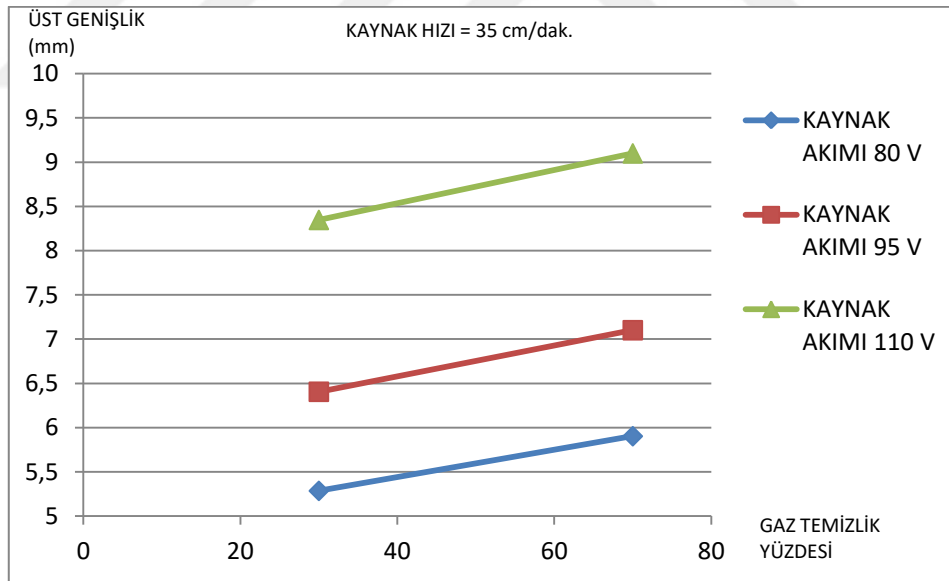
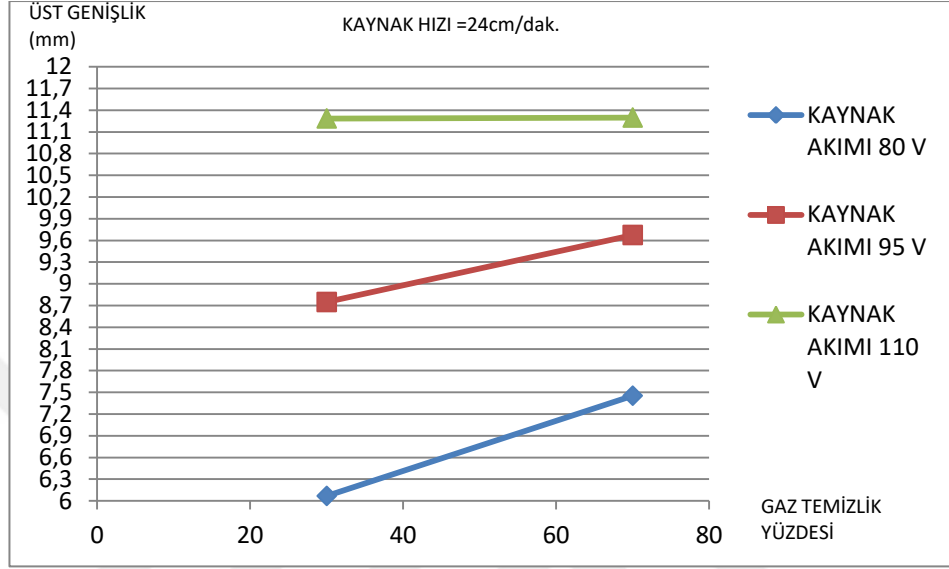
Şekil 6.9 : Kaynak Akımının Farklı Kaynak Hızlarında Alt Yüksekliğe Etkisi.

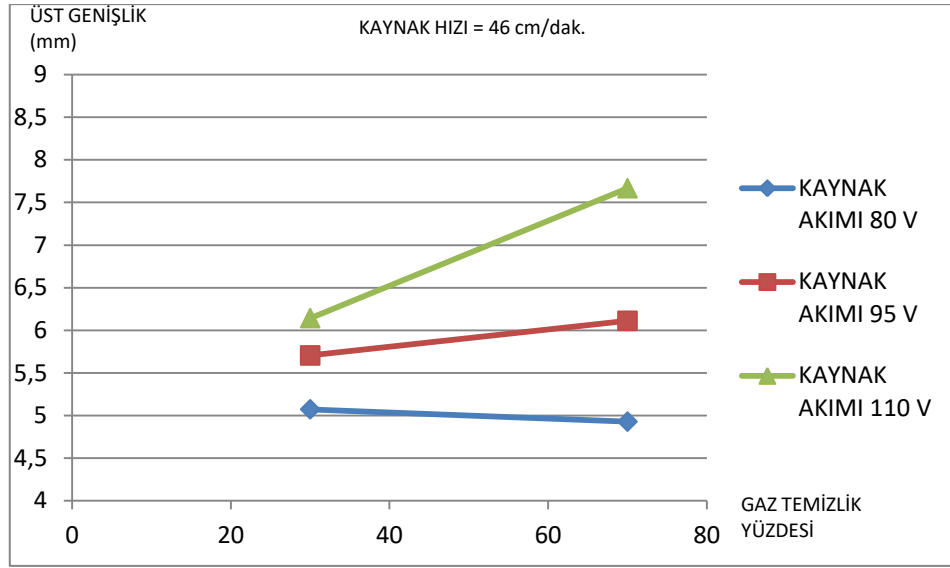
6.1.3. Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesi

Sonuçlar, koruyucu gazın kaynak geometrisi üzerine etkisinin kaynak akımı ve kaynak hızı kadar önemli olmadığını bununla birlikte, nüfuziyet üzerine daha belirgin olduğunu göstermiştir. Ancak gaz temizlik yüzdesi, kaynak hızı, akım ve ark uzunluğu ile uyumlu olmalıdır.

6.1.3.1. Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi

Şekil 6.10'de olduğu gibi farklı kaynak hızlarında da artan gaz temizleme yüzdesi ile üst genişlikte artış oluşmaktadır.

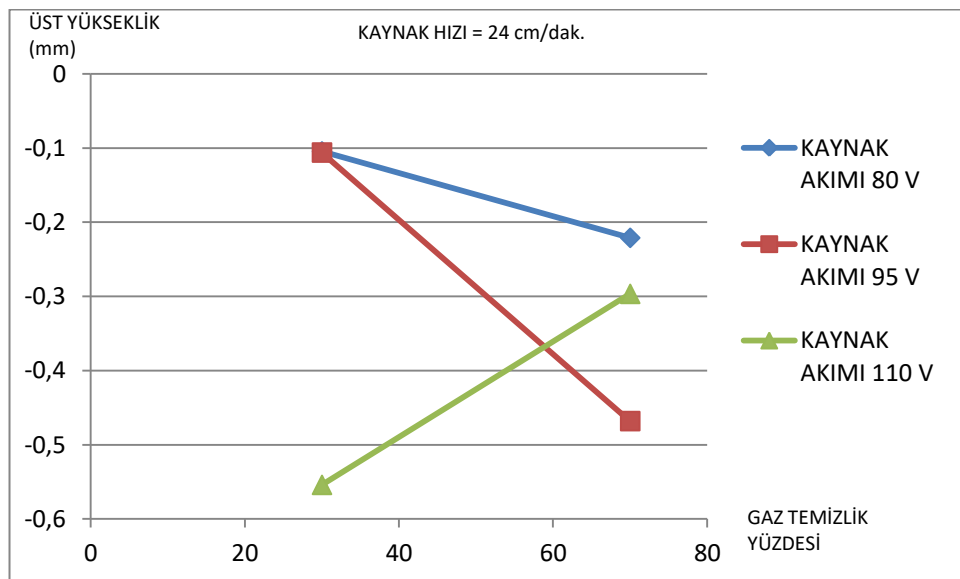


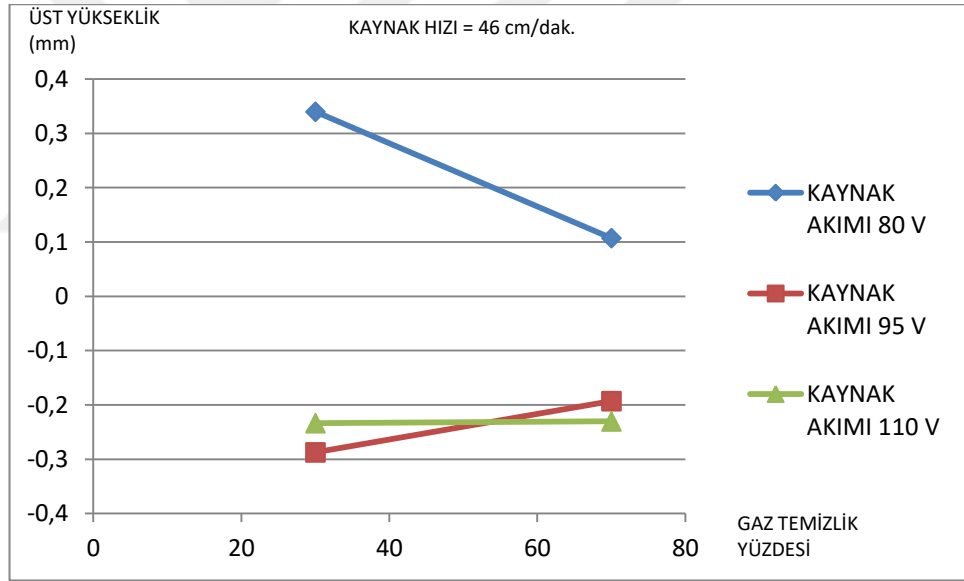
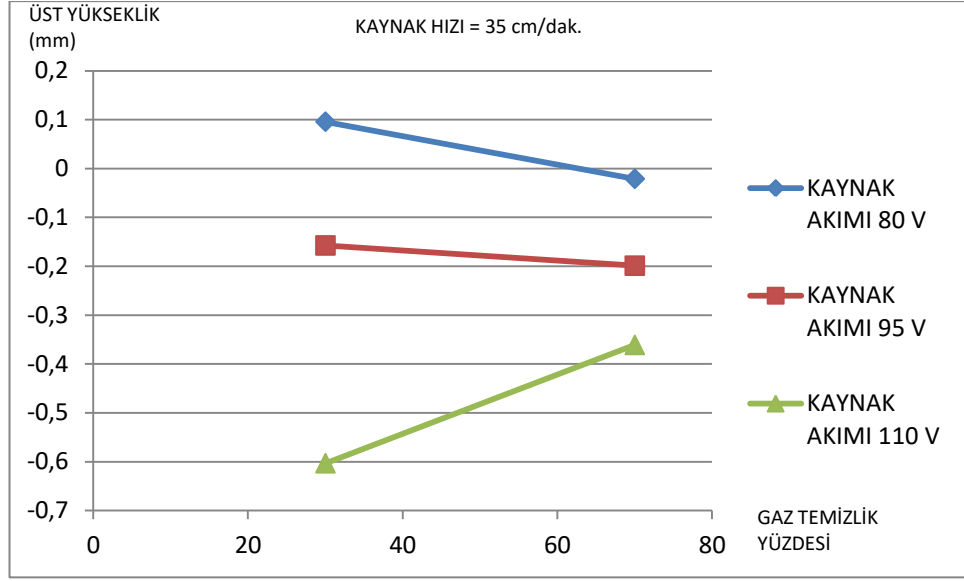


Şekil 6.10 : Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesi Farklı Akım Değerlerinde Üst Genişliğe Etkisi.

6.1.3.2. Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.11’de olduğu gibi artan koruyucu gaz temizlik yüzdesi ile genel olarak kaynak dikişi kesit geometrisinin üst yüksekliğinde düşüş gözlenmektedir. Fakat yüksek akım değerlerinde ısı girişinin çok olması sebebi ile gaz artışı ile yükseklik değeri de artmaktadır.

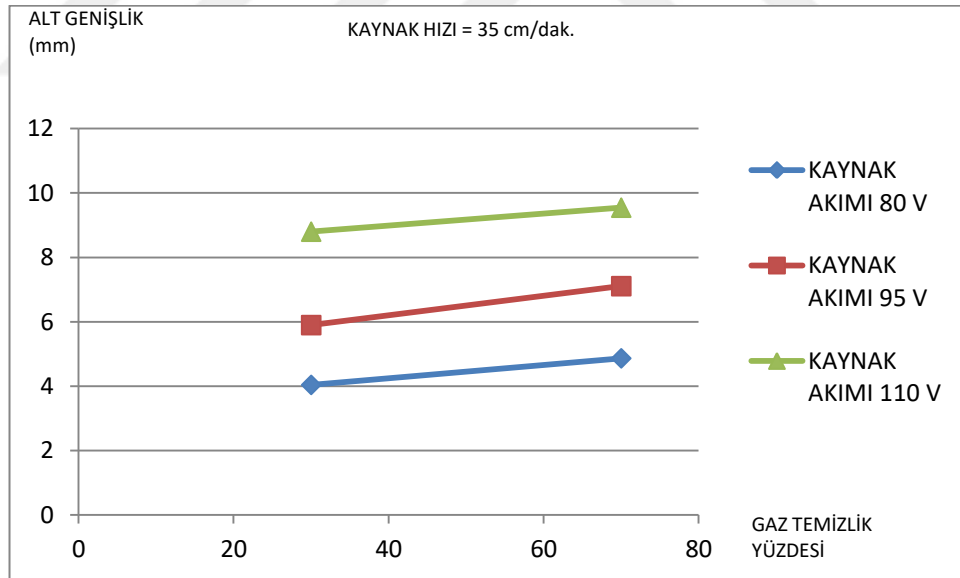
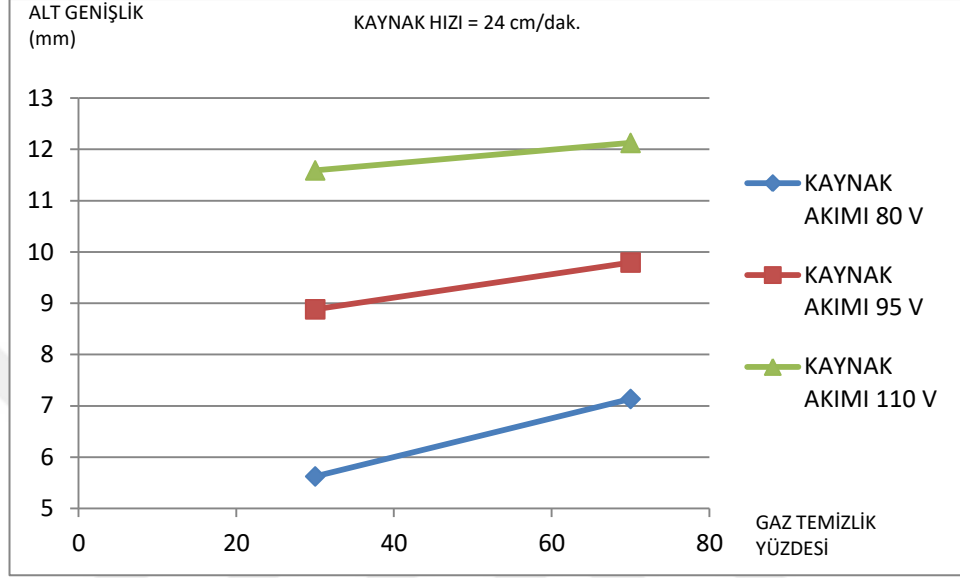


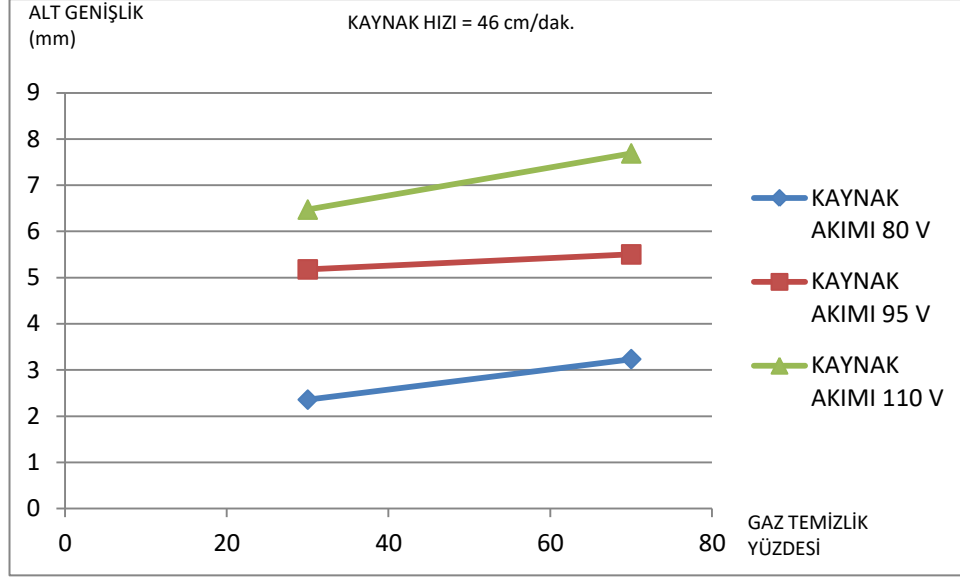


Şekil 6.11 : Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Farklı Akım Değerlerinde Üst Yüksekliğe Etkisi.

6.1.3.3. Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi

Şekil 6.12’te görüldüğü üzere artan koruyucu gaz temizlik yüzdesi ile ısı girdisi artmakta ve kaynak dikişi kesit geometrisine ait alt genişlikte artış gözlenmektedir.

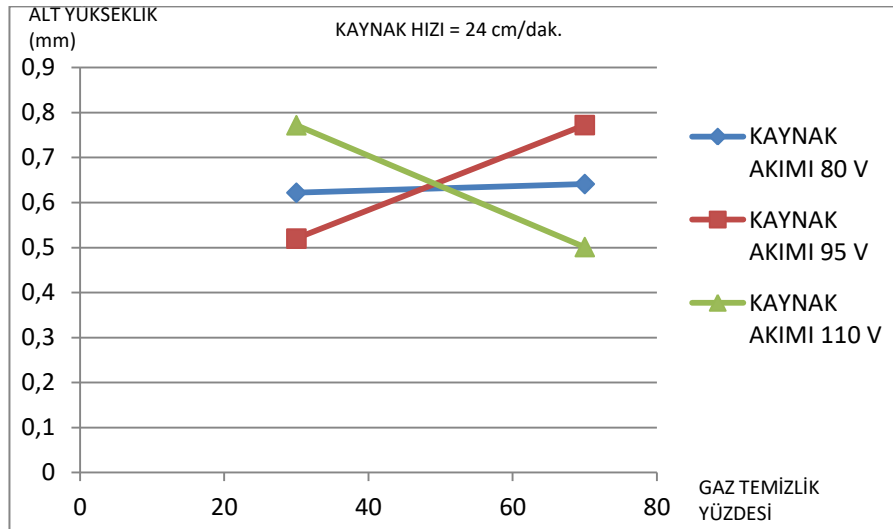


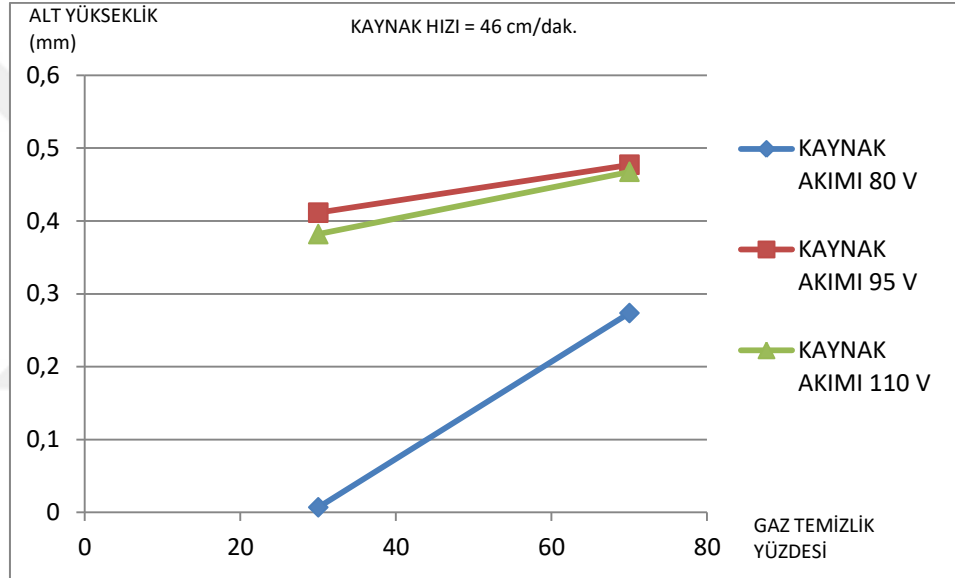
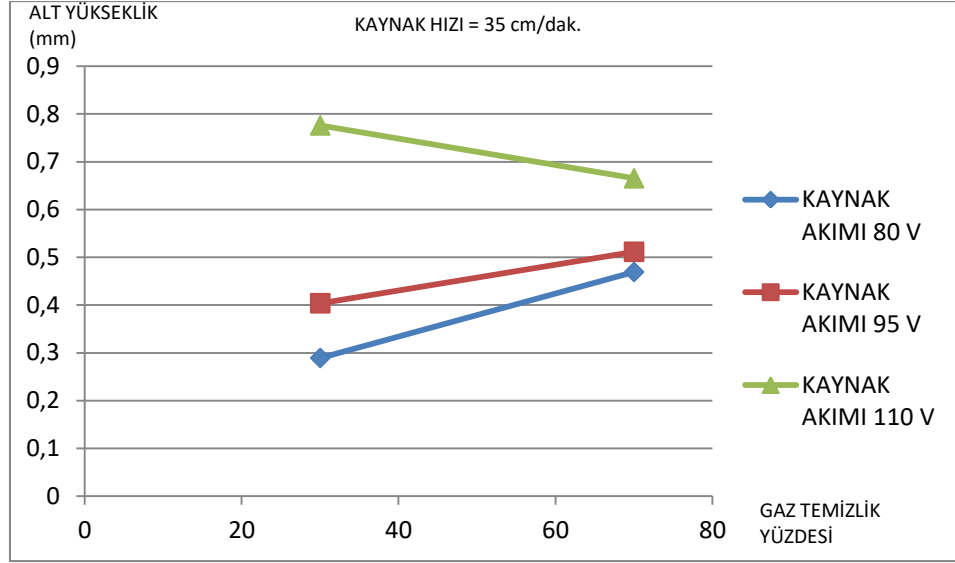


Şekil 6.12 : Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Farklı Akım Değerlerinde Alt Genişliğe Etkisi.

6.1.3.4. Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.13'te olduğu üzere artan koruyucu gaz temizlik yüzdesi ile kaynak dikişi kesit geometrisine ait alt yükseklik değeri de artmaktadır. Bu sayede kaynak dikişinde maksimum nüfuziyet ile istenen kalite kriterleri sağlanabilmektedir. Fakat koruyucu gazın tek başına değil, kaynak hızı ve kaynak akımı ile birlikte kaynak dikişi kesit geometrisinin ölçülerine olan ilişkisi incelenmelidir. Düşük kaynak hızlarında ve yüksek kaynak akım değerlerinde alt yükseklikte ve nüfuziyette düşüş yaşanmaktadır. Yüksek kaynak hızlarında ise yüksek yüzdeli koruyucu gaz ile alt yükseklikte artış görülmektedir.





Şekil 6.13 : Koruyucu Gaz Temizlik Yüzdesinin Farklı Akım Değerlerinde Alt Yüksekliğe Etkisi.

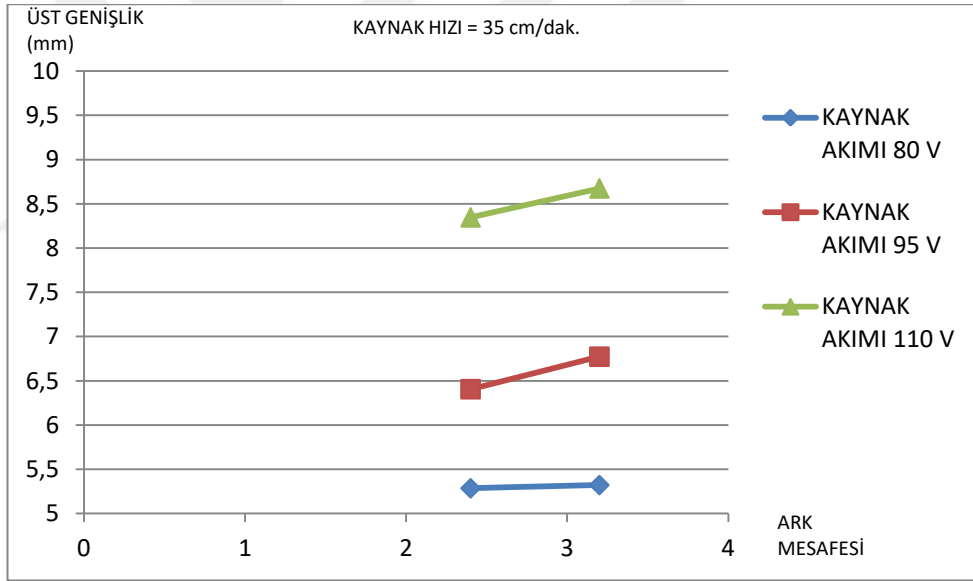
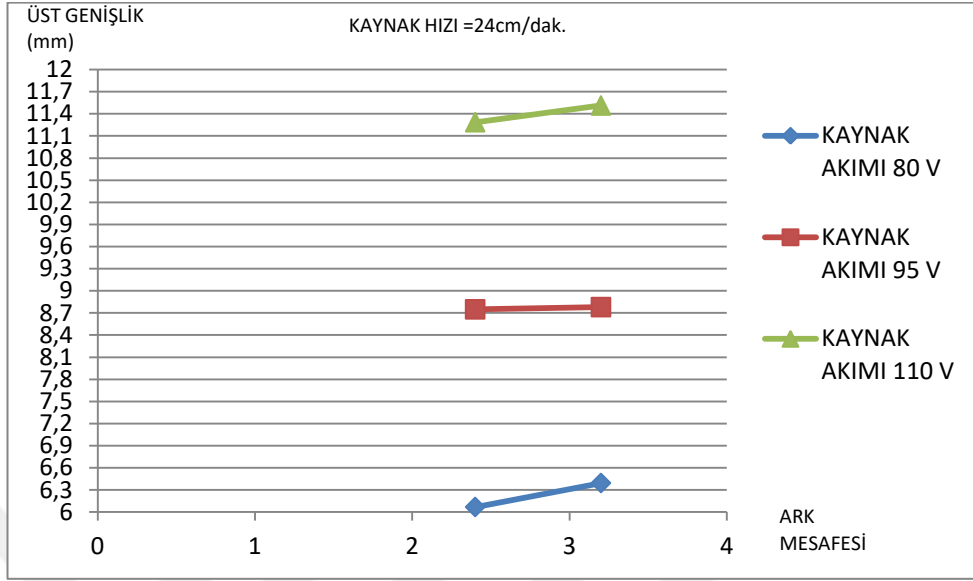
6.1.4. Ark Mesafesi

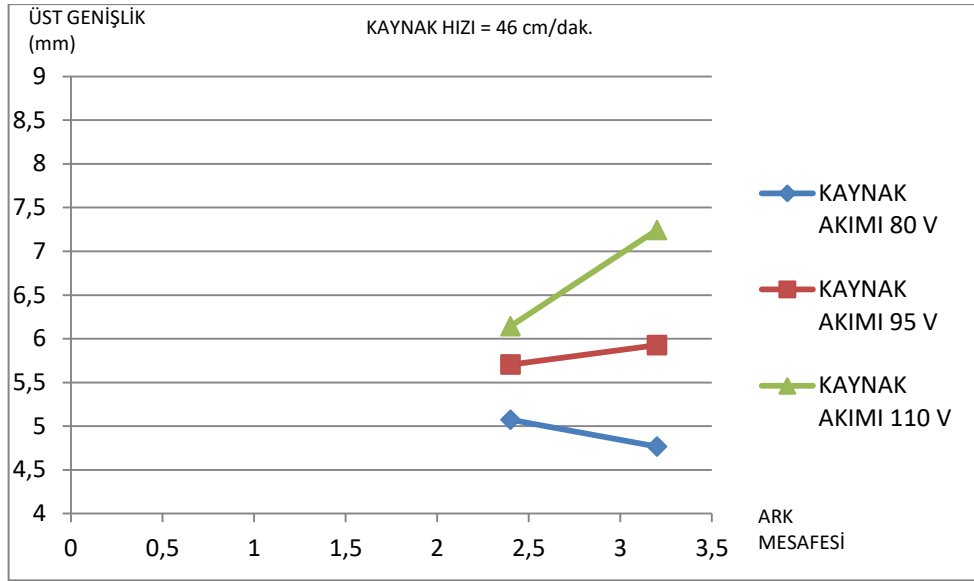
Genel olarak, ark uzunluğunun artması , verimsiz kaynakla sonuçlanmaktadır.. Fakat çalışmalar gösteriyor ki bunun tersi durumlarla da zaman zaman karşılaşılmaktadır.

6.1.4.1. Ark Mesafesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi

Yukarıda da belirtildiği gibi, artan ark uzunluğu arkın koni şeklinde tabanını artırır. Bu da üst genişliği arttıracaktır. Şekil 6.14'de gösterildiği gibi, farklı akım ve hız

değerlerinde de üst genişlikte artış görülmektedir. Fakat yüksek kaynak hızı ve düşük akım durumunda gerekli ısı elde edilmediği için üst genişlikte düşüş görülmektedir.

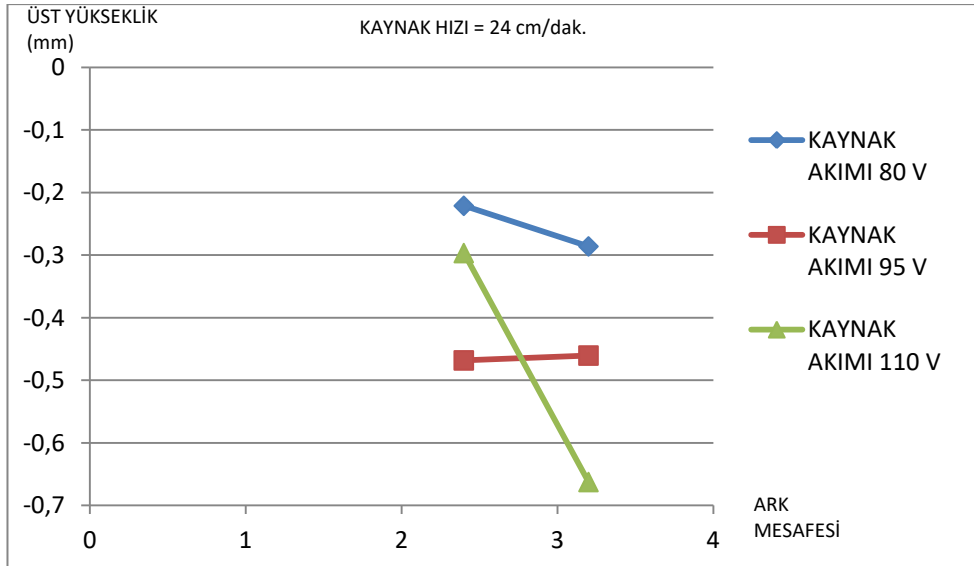


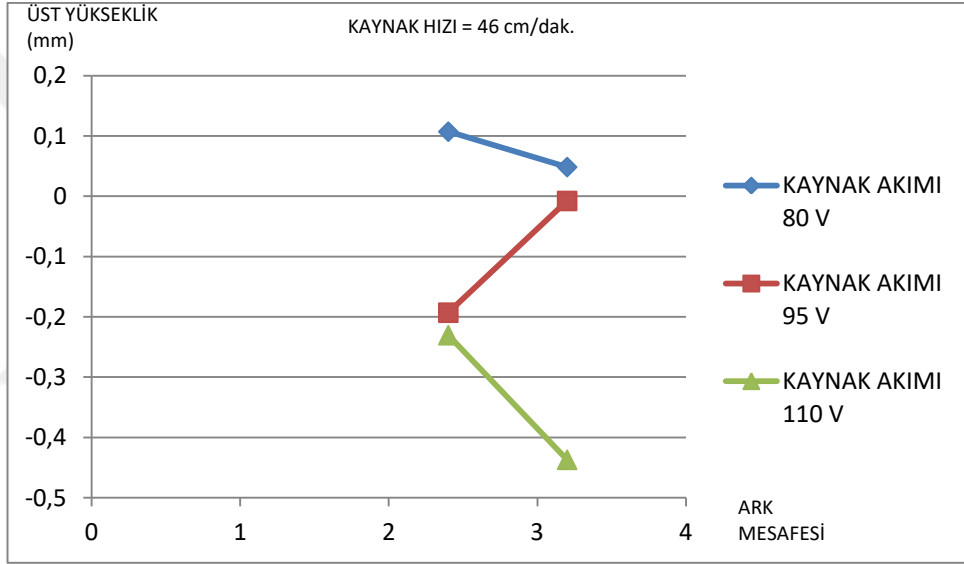
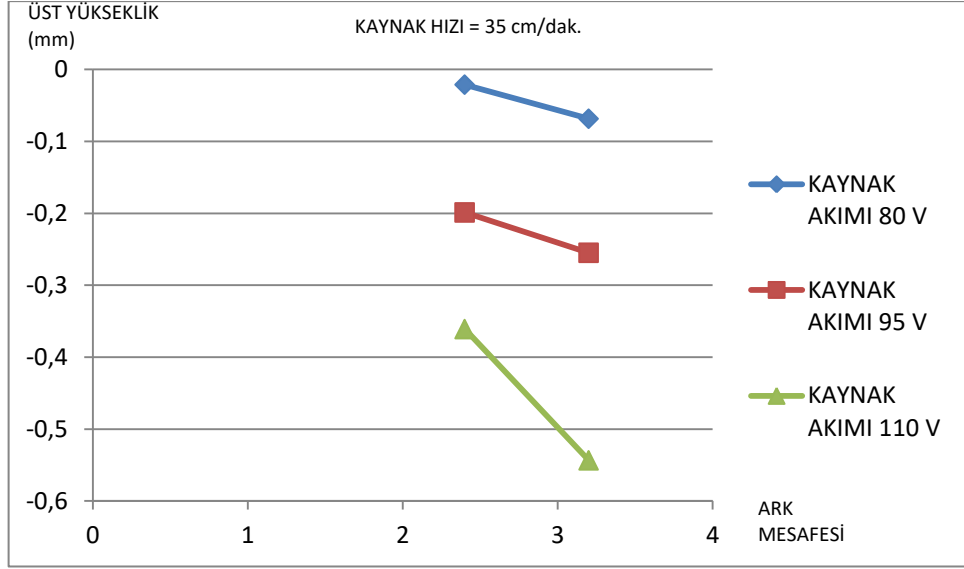


Şekil 6.14 : Ark Mesafesinin Farklı Akım Değerlerinde Üst Genişliğe Etkisi.

6.1.4.2. Ark Mesafesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi

Yukarıda verilen kaynak verimliliği formülüne uygun olarak, aralık mesafesi arttığında ark voltajı artar ve böylece kaynak işleminin toplam verimliliği azalır. Şekil 6.15'da gösterildiği gibi ark boşluğundaki artış, üst yüksekliği azaltmaktadır.

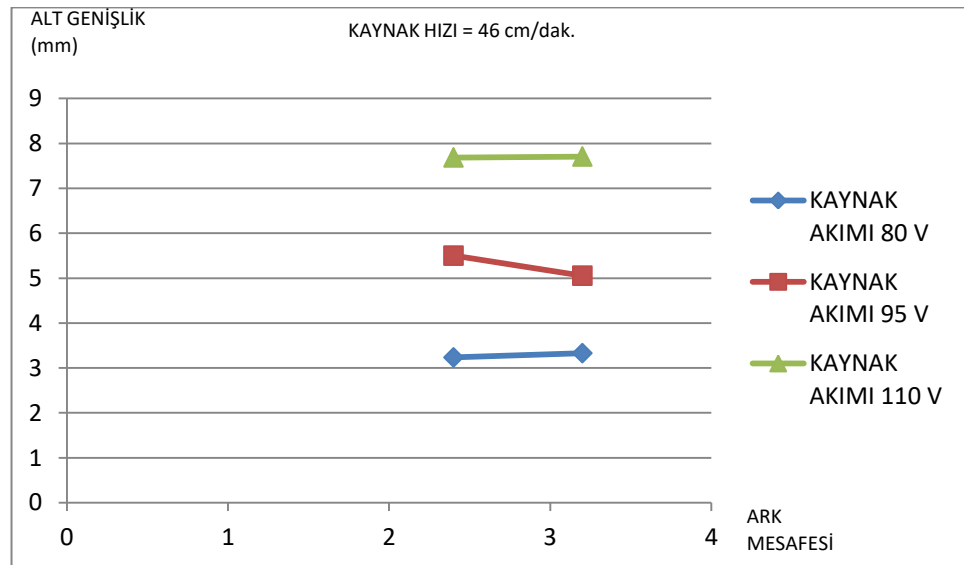
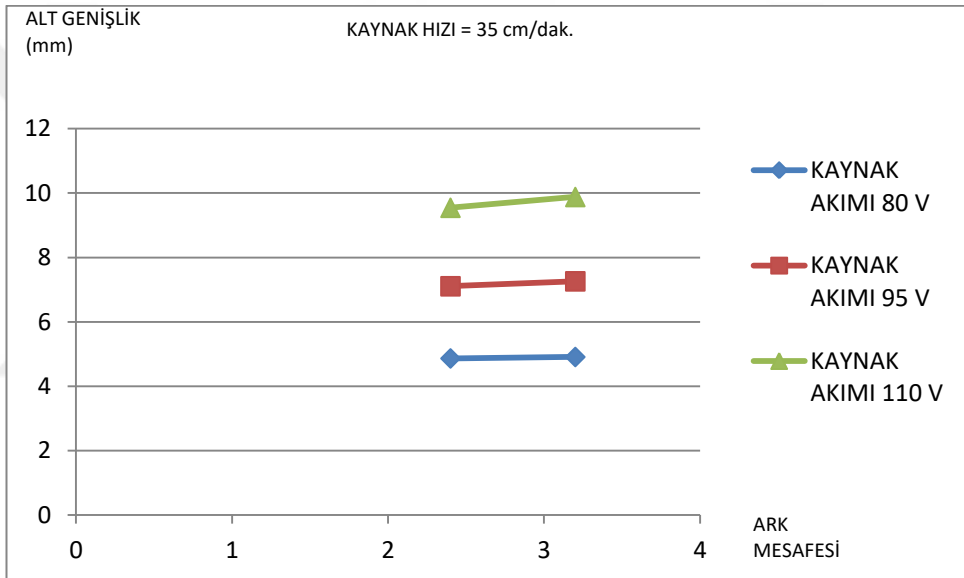
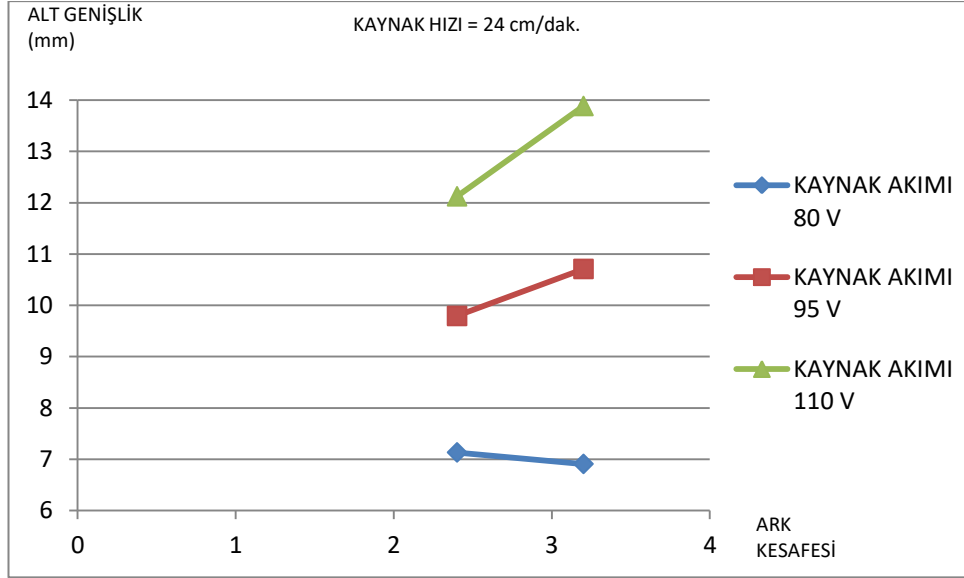




Şekil 6.15 : Ark Mesafesinin Farklı Akım Değerlerinde Üst Yüksekliğe Etkisi.

6.1.4.3. Ark Mesafesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi

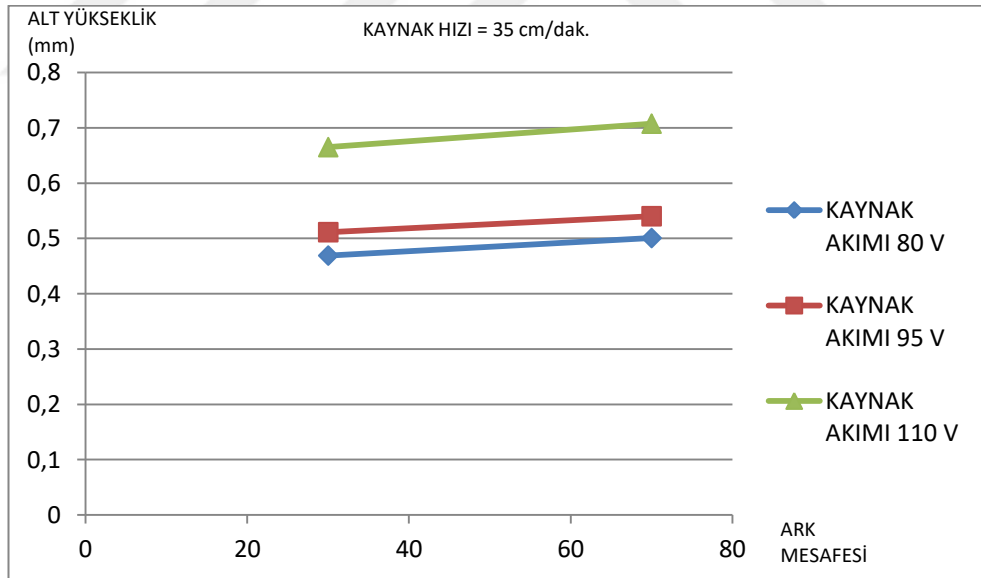
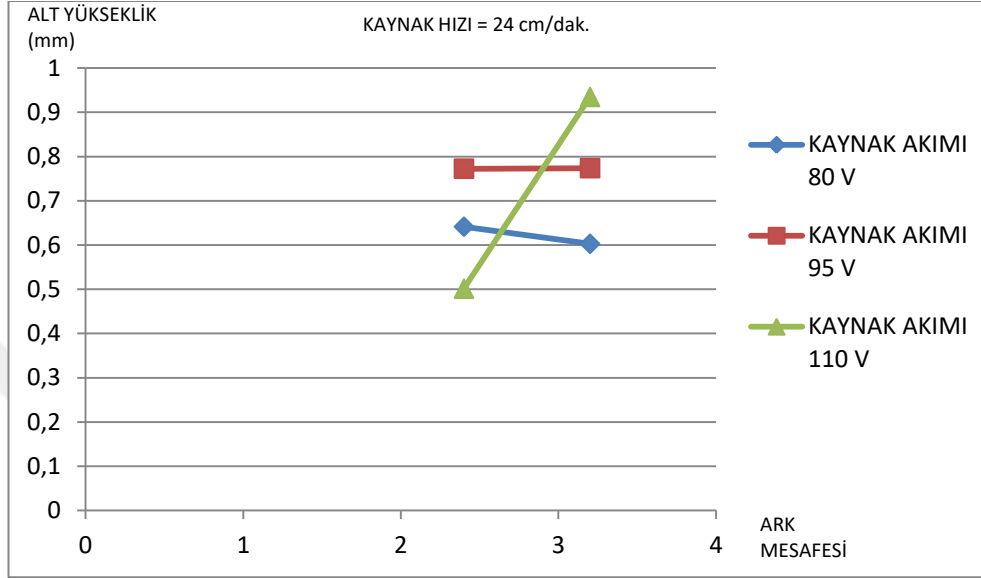
Şekil 6.16'de gösterildiği gibi artan ark mesafeleri sonucunda kaynak dikişi kesit geometrisine ait alt genişlik değerleri genel olarak artış gözlenmektedir.

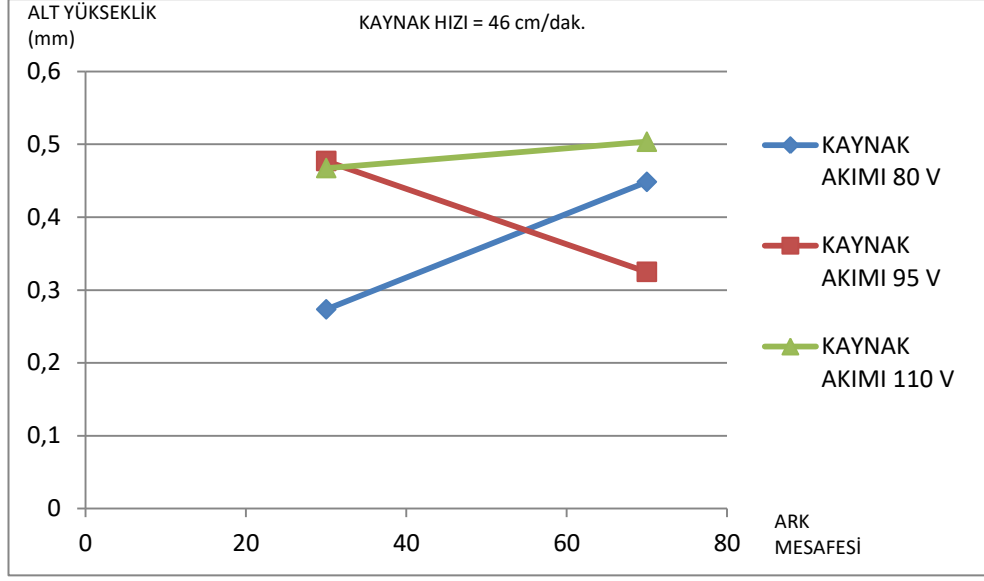


Şekil 6.16 : Ark Mesafesinin Farklı Akım Değerlerinde Alt Genişliğe Etkisi.

6.1.4.4. Ark Mesafesinin Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.17'de görüldüğü gibi artan ark mesafesi ile alt yükseklikte genel olarak yükselme görünmektedir. Böylece nüfuziyette artmaktadır.





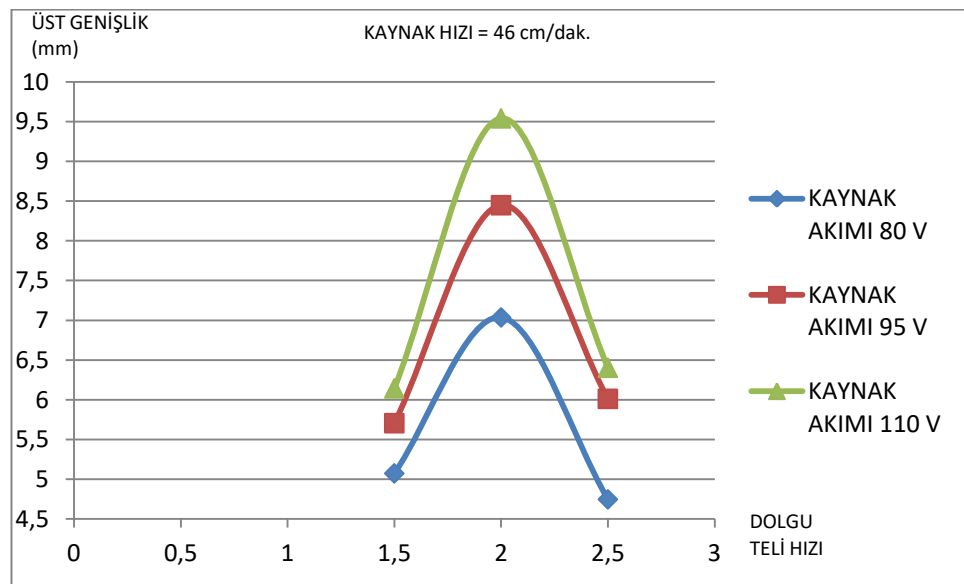
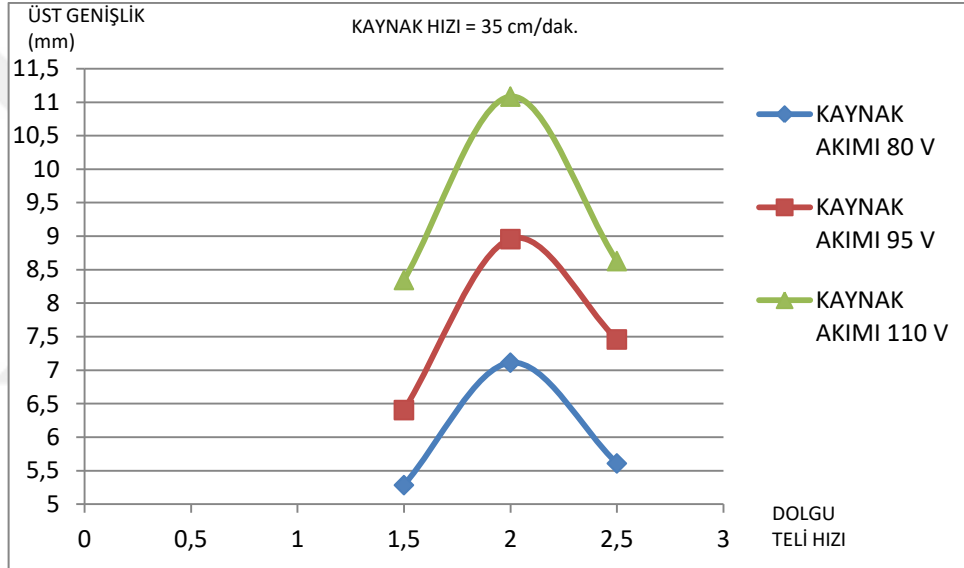
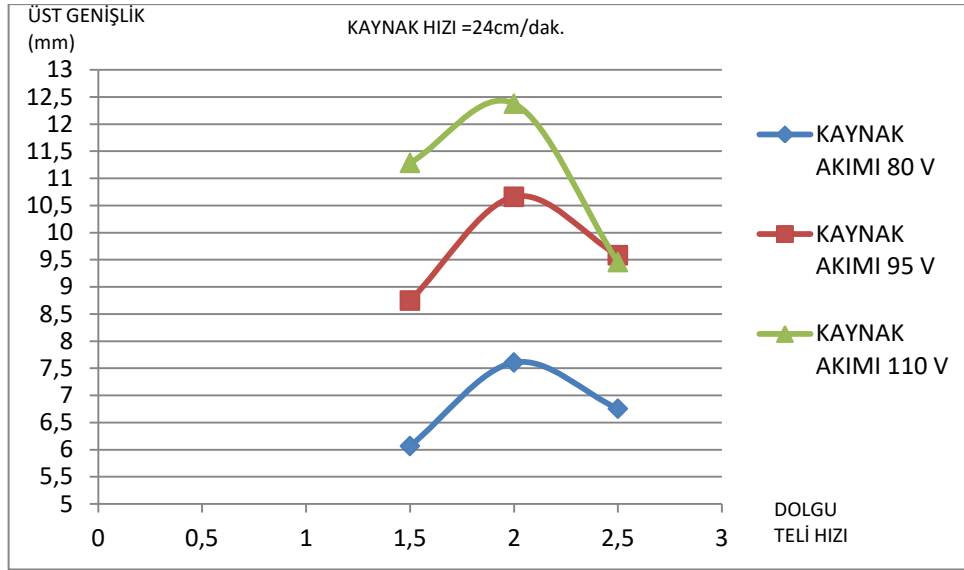
Şekil 6.17 : Ark Mesafesinin Farklı Akım Değerlerinde Alt Yüksekliğe Etkisi.

6.1.5. Kaynak Dolgu Teli

Uygun dolgu teli hızının seçilmesi, kaynak bölgesinin servis ömrü üzerinde büyük bir etki yaratmaktadır.

6.1.5.1. Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Genişliğine Etkisi

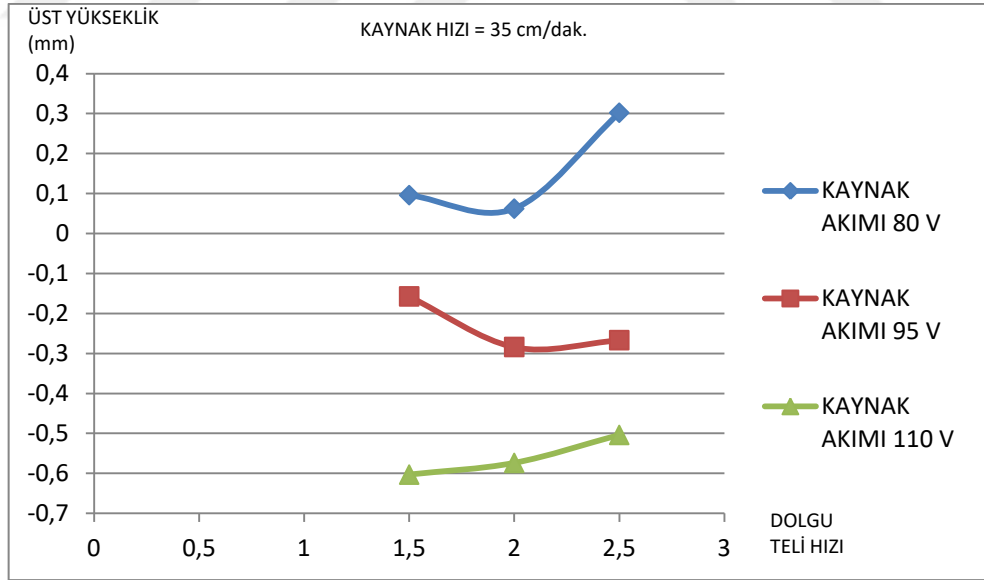
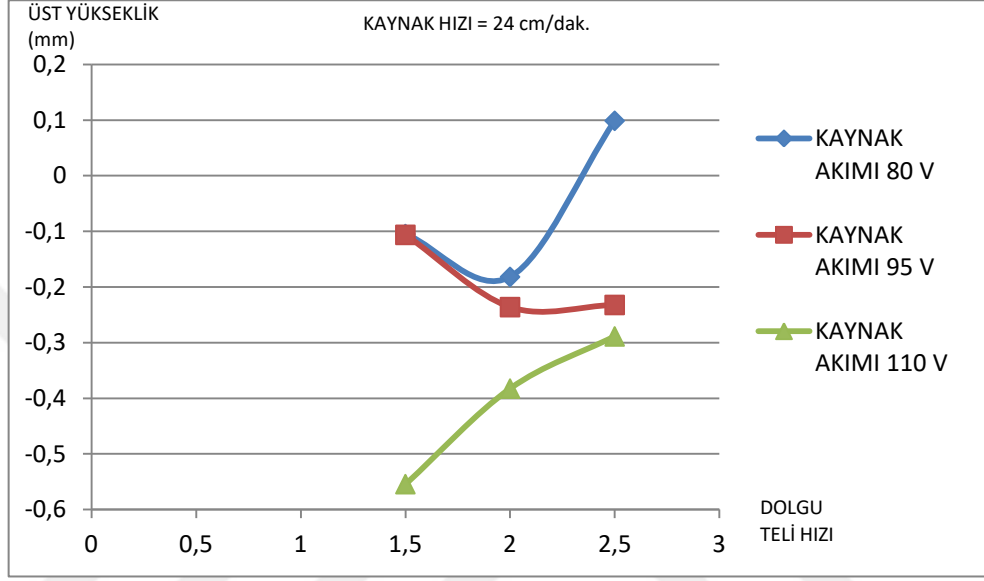
Şekil 6.18’de görüldüğü gibi artan dolgu teli hızlarında kaynak dikişi kesit geometrisine ait üst genişlik değerleri önce belli bir değere kadar artmaktadır. Daha sonra malzemeyi ergitmek için gerekli olan ısı girdisi sağlanamadığı için üst genişlik ölçülerinde düşme olmaktadır. Fakat hesaplanan değerlerden de görüldüğü gibi artan dolgu tel hızına karşılık yüksek akımlar ve daha düşük kaynak hızlarında üst genişlik daha büyük olmaktadır.

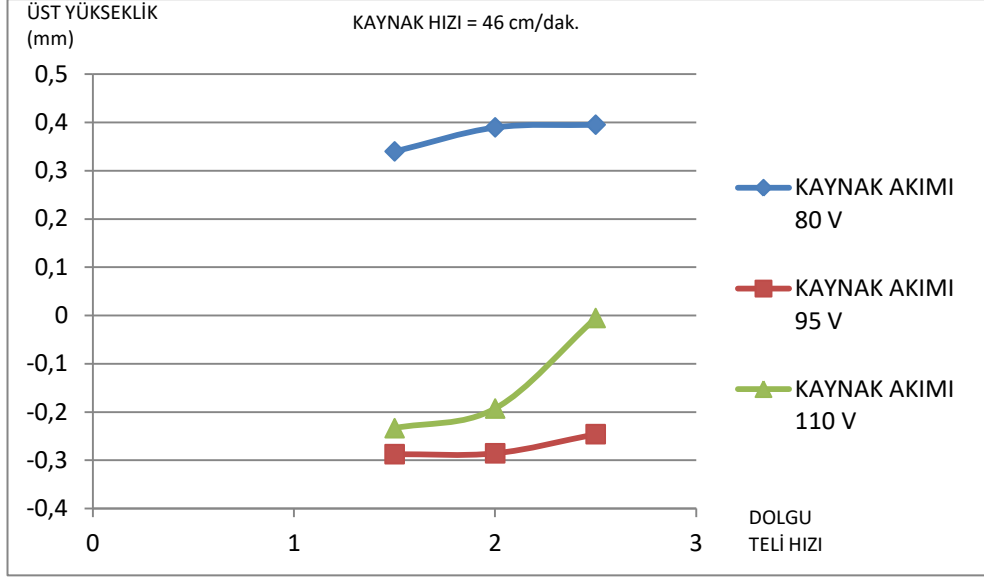


Şekil 6.18 : Dolgu Tel Hızının Farklı Akım Değerlerinde Üst Genişliğe Etkisi.

6.1.5.2. Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Üst Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.19’de görüldüğü gibi artan dolgu teli hızı kaynak dikişi kesit geometrisinin üst yüksekliğini arttırmaktadır. Düşük kaynak akımı ve düşük kaynak hızlarında dolgu teli gerekli nüfuziyeti sağlayamayıp malzeme üzerine yığılmıştır.

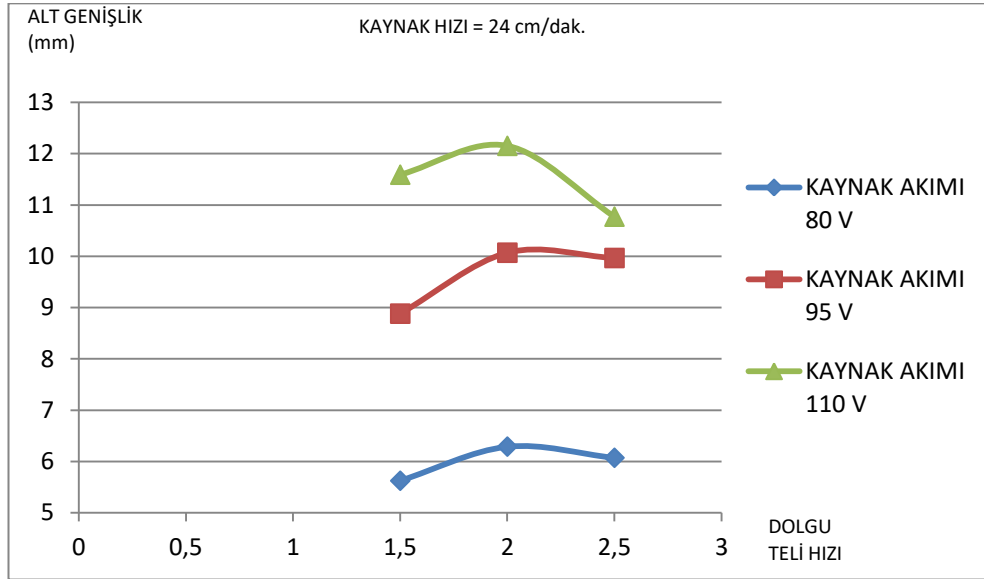


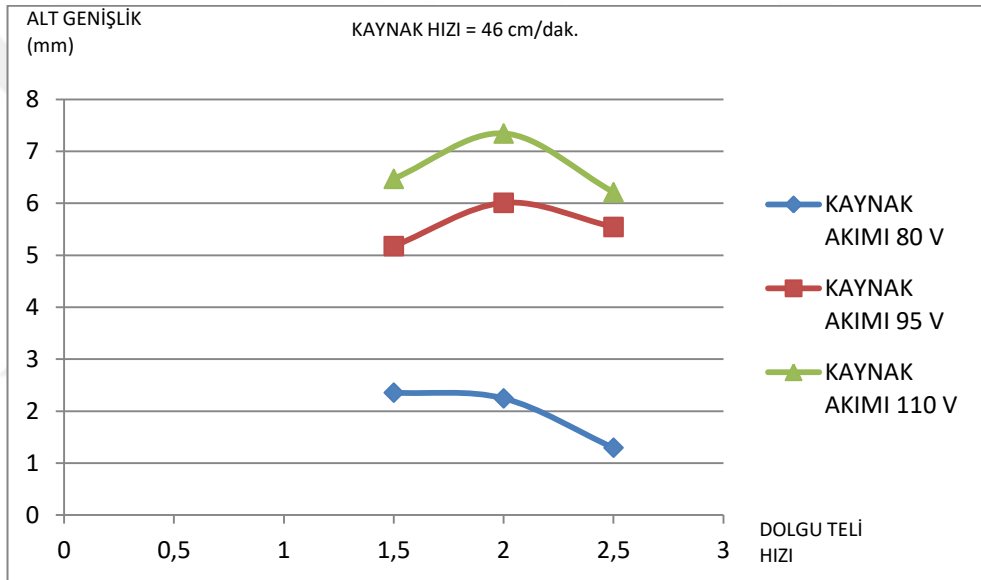
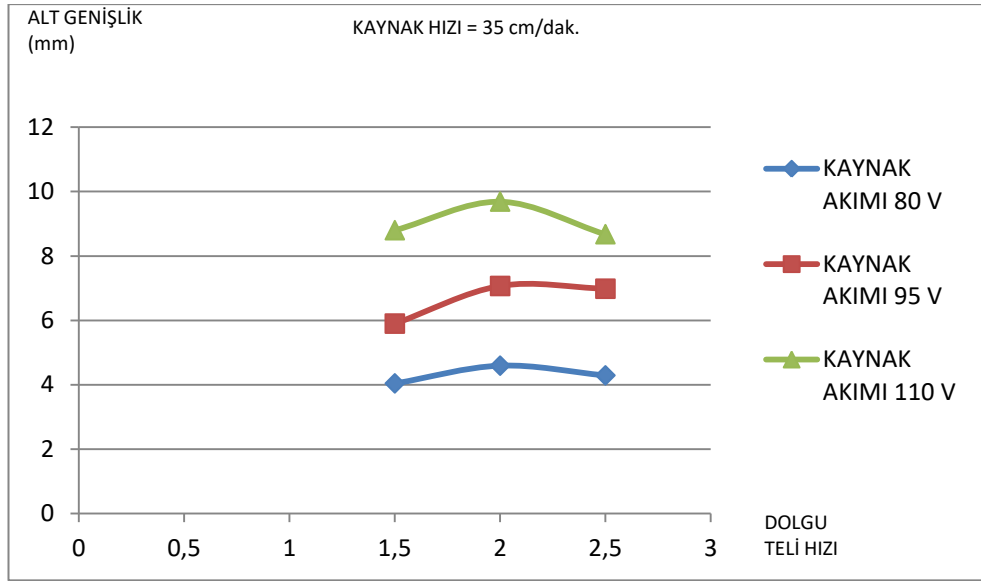


Şekil 6.19 : Dolgu Tel Hızının Farklı Akım Değerlerinde Üst Yüksekliğe Etkisi.

6.1.5.3. Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Genişliğine Etkisi

Şekil 6.20' de görüldüğü gibi artan dolgu teli hızlarında alt genişlikte belirli bir miktar yükseldikten sonra düşüş yaşanmaktadır. Bunun sebebi de artan dolgu malzemesine karşılık gerekli ısı girdisinin olmayışıdır. Gerekli ısı girdisinin sağlandığı proseslerde nihai alt genişlikler hep daha büyük değerlerdedir.

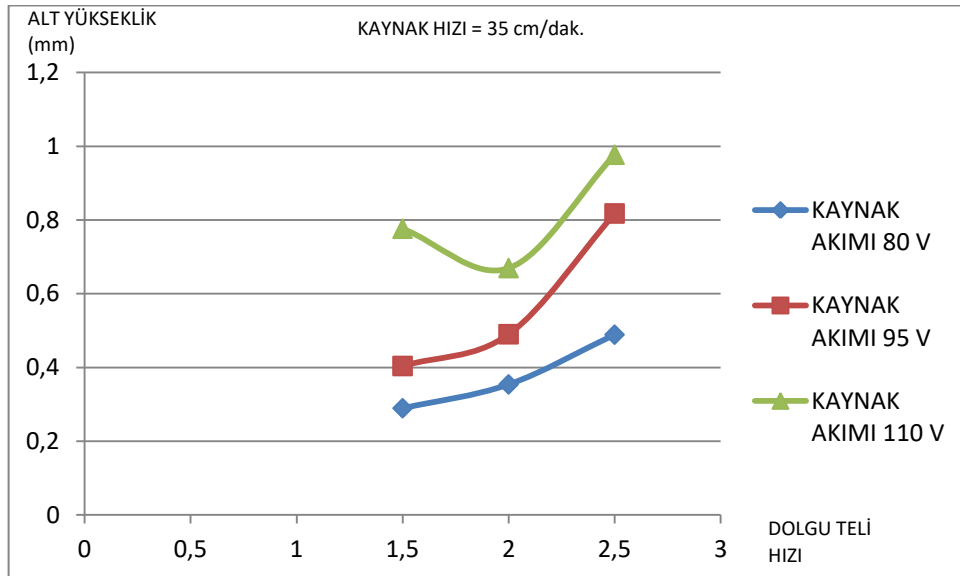
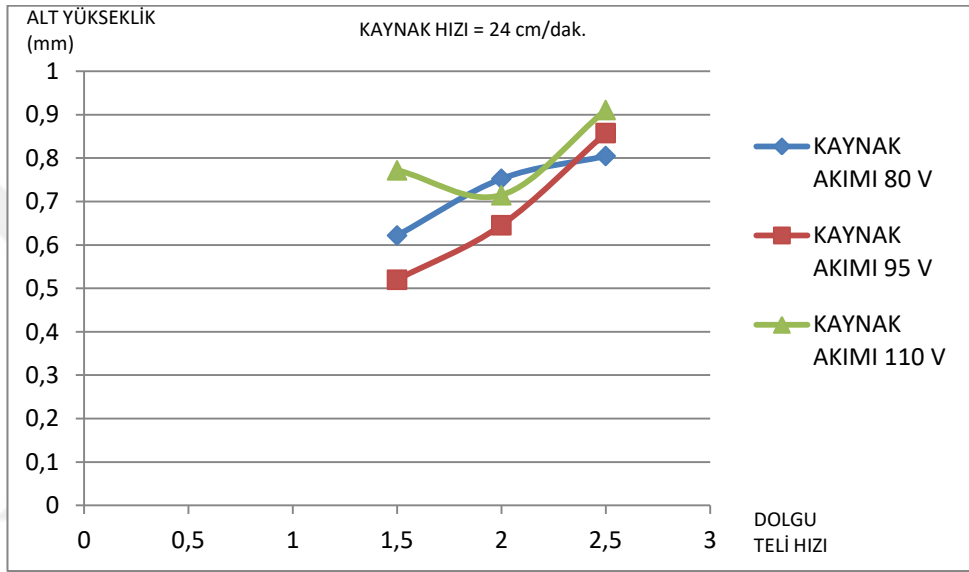


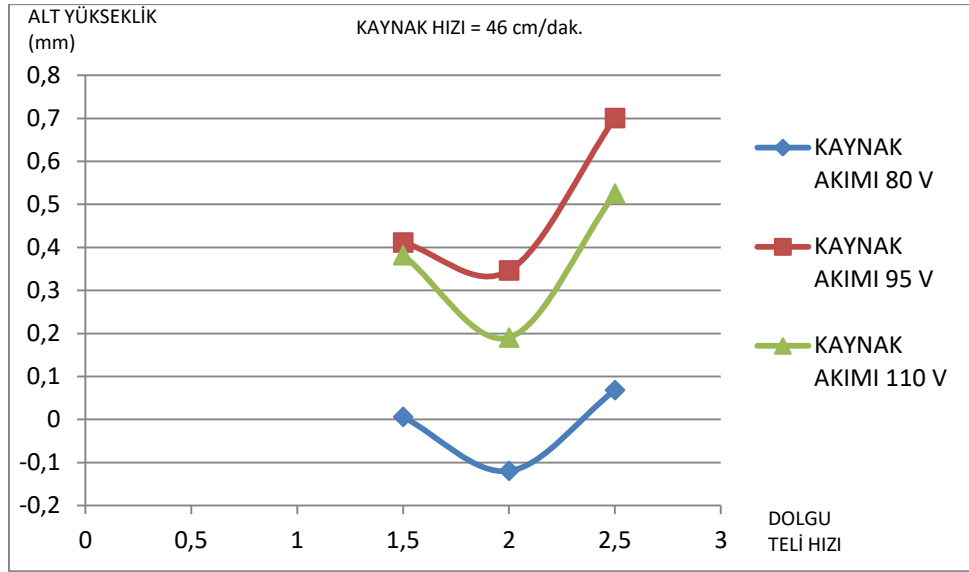


Şekil 6.20 : Dolgu Tel Hızının Farklı Akım Değerlerinde Alt Genişliğe Etkisi.

6.1.5.4. Kaynak Dolgu Teli Hızının Kaynak Dikişi Kesit Geometrisinin Alt Yüksekliğine Etkisi

Şekil 6.21’de görüldüğü üzere artan dolgu teli hızlarında önce alt yükseklik bir miktar düşmektedir. Tel hızı artmaya devam ettikçe alt yükseklikte artmaya devam etmektedir. Dolgu teli hızının “2 cm/dak” değerinde alt yüksekliğin en az olduğu değerde yukarıda olduğu gibi alt genişlik en büyük değerini almaktadır. Artan alt yükseklik değeri ile de kaynağın iş parçasına olan nüfuziyeti de artmaktadır.





Şekil 6.21 : Dolgu Tel Hızının Farklı Akım Değerlerinde Alt Yüksekliğe Etkisi.

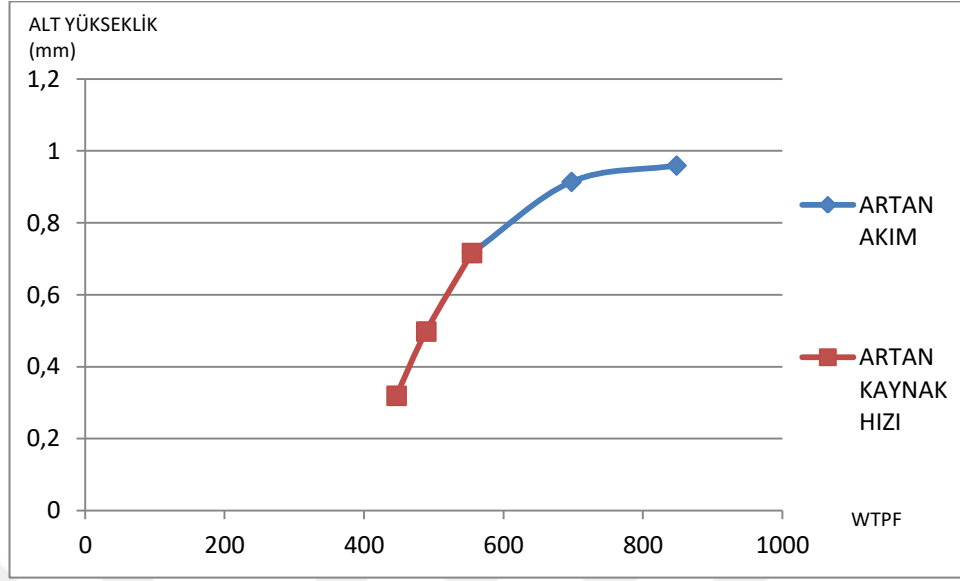
6.2. TIG Kaynak Parametrelerinin Kaynak Nüfuziyetine Etkileri

Yukarıda görüldüğü gibi kaynak parametrelerindeki değişim kaynak dikişi kesit geometrisinin ölçülerini de etkilemektedir. Fakat nüfuziyete etkisi olan alt yüksekliğin (nüfuziyetin) maksimum olması tüm parametrelere bağlıdır. Bunu da Jackson (1953), nüfuziyet, kaynak voltajı, kaynak akımı ve kaynak hızı arasındaki ilişki hakkında bir kaynak tekniği performans faktörü (WTPF) kullanarak bildirmiştir. WTPF'nin gösterimi şu şekildedir;

$$WTPF = \sqrt[3]{\frac{I^4}{SE^2}} \quad (9)$$

Burada I, kaynak akımını (amper), S kaynak hızını (m/dak), ve E kaynak voltajını (volt) temsil etmektedir.

Nüfuziyet ile ilgili kaynak tekniği performans faktörü şekil 6.22'te gösterilmiştir. Jackson (1953) tarafından rapor edilen kaynak tekniği performans faktörü sonuçları ile aynı eğilime sahip olduğu bulunmuştur. Artan kaynak tekniği performans faktörü ile nüfuziyette artmaktadır.



Şekil 6.22 : WTPF'nin nüfuziyete etkisi.

6.3. TIG Kaynak Parametrelerinin ve Kaynak Dikişi Kesit Geometrisi Alanının Optimizasyonu

Geliştirilen matematiksel modeller, istenen kaynak dikişi kalitesini elde etmek için doğru işlem parametrelerini seçmek veya verilen süreç parametreleri için kaynak dikiş kalitesini tahmin etmek için yararlıdır. Bu modeller, sürecin optimizasyonunu kolaylaştırır. Ayrıca, işlem parametrelerinin kaynak dikişi kalitesi üzerindeki etkisinin anlaşılmasına, ve yüksek verimlilikle nispeten düşük bir maliyetle yüksek kaliteli bir kaynak dikişi elde etmek için kaynak dikişi kalitesinin optimize edilmesine yardımcı olurlar.

Çalışmanın bu bölümünde, geliştirilmiş matematik modellerin tümü nonlineer olduğu için, süreç parametrelerini optimize etmek için “*Random Search (RS)*”, “*Differential Evolution (DE)*”, “*Nelder-Mead (NM)*” ve *Simulated Annealing (SA)* optimizasyon metodları kullanıldı.

Tablo 6.1’da görüldüğü gibi minimum kaynak dikişi kesit alanı ve maksimum nüfuziyetin sağlanabilmesi için dört farklı optimizasyon problem ile üst genişlik, üst yükseklik ve alt genişlik minimize edilmiştir. Alt yükseklik değeri ise maksimize edilmiştir. Bulunan değerlere karşılık gelen giriş parametrelerinin çalışma datası

(ÇD) ve doğrulama datası (DD) içerisinde hangi işlem sırasında olduğunda belirtilmiştir.

Tablo 6.1 : Optimum kaynak dikişi kesit geometrisi ölçüleri ve giriş parametre değerleri.

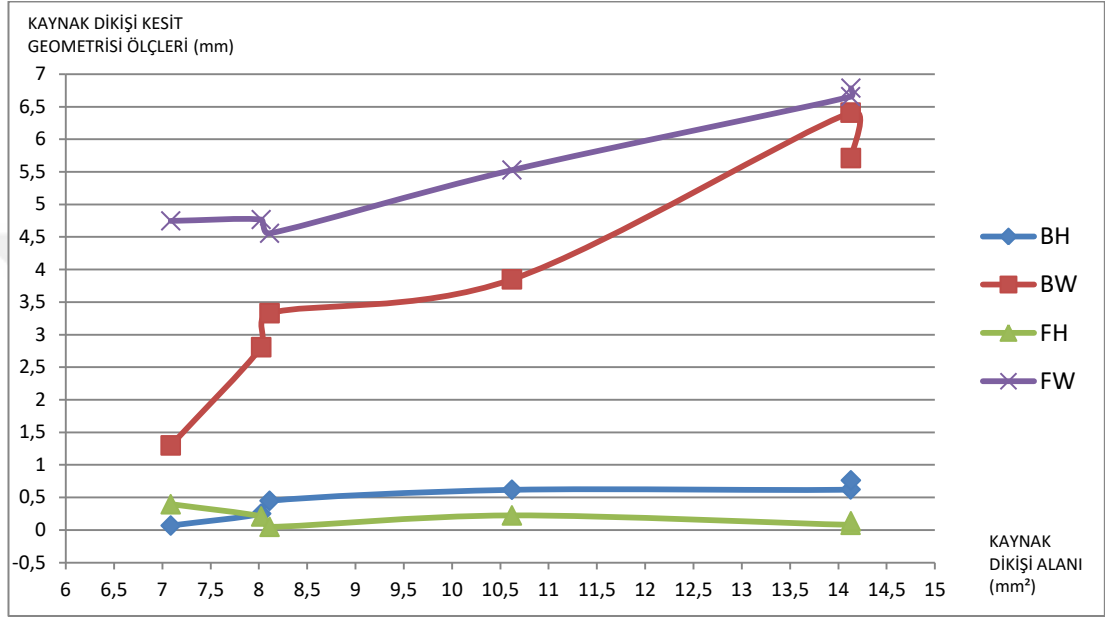
Optimizasyon Problem No	Kaynak Dikişi Kesit Geometrisi		Kaynak Hızı (cm/dak.)	Tel Hızı (cm/dak.)	Koruyucu Gaz (%)	Ark Mesafesi (mm)	Akım (A)	Yanıt	Test No
1	Üst Genişliğin (FW) Minimizasyonu	DE Minimizasyon Ölçüm Değeri	46	1,5	70	3,2	80	4,5552	ÇD-52
								4,423	
2	Üst Yüksekliğin (FH) Minimizasyonu	DE Minimizasyon Ölçüm Değeri	24	2	70	3,2	110	-0,8942	DD-12
								-0,74	
3	Alt Genişliğin (BW) Minimizasyonu	DE Minimizasyon Ölçüm Değeri	46	2	30	3,2	80	-0,0127	DD-25
								3,046	
4	Alt Yüksekliğin (BH) Maksimizasyonu	DE Maksimizasyon Ölçüm Değeri	24	2	70	3,2	110	1,1471	DD-12
								1,148	

Yapılan beş farklı optimizasyon çalışması sonucunda maksimum nüfuziyet koşulu ile minimum kaynak dikişi kesit alanı hesaplanmıştır. Ulaşılabilecek en küçük kaynak alanı Tablo 6.2’de görüldüğü gibi 7,0867 mm²’dir. Fakat bu değere ulaşırken hesaplanan giriş parametreleri ile maksimum nüfuziyetin sağlanamadığı şekil 6.23’te görülmektedir. BH değeri 0,06mm çıkmaktadır.

Elde edilen 0,06mm değeri pratikte istenen bir nüfuziyet değeri değildir. Gerçekte bu kadar küçük bir ölçü değerine ulaşamamaktadır. Bu sebepten ötürü hesaplamalar yapılırken kaynak dikişi kesit geometrisinin alanı her durum için ayrı ayrı optimizasyon problemleri oluşturulup minimize edilmiş ve sırası ile “BH> 0,1”, “BH> 0,3”, “BH> 0,4”, “BH> 0,5”, “BH> 0,7” kısıtları altında meydana gelen alanlar hesaplanmıştır. Bu optimizasyon çalışması esnasında hesaplanan her alan değeri için bulunan giriş parametre değerleri de BW, FH ve FW’yi temsil eden fonksiyonlarda yerlerine koyularak olması gereken ölçüsel değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm değerler Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2’den anlaşıldığı gibi BH değeri, kaynak dikişi kesit alanı 7,0867 mm²’den 8,11013 mm²’ye yükselirken en büyük büyüme oranına sahiptir. Bu noktadan sonraki

tüm alan hesaplamaları için BH değeri ilk koşulda olduğu kadar yükseliş gösterememiş fakat kaynak dikişi kesit alanının miktarı fazlası ile artmıştır. Bu sebepten ötürü kaynak dikişi kesit alanının 8,11013 mm² olduğu noktadaki giriş parametre değerleri ile bulunan 5c numaralı problem çözümü bize istenen sonucu vermektedir.



Şekil 6.23 : Kaynak Dikişi Kesit Geometrisi Ölçülerinin, Kaynak Dikişi Kesit Geometrisi Alanına Göre Değişimi

Tablo 6.2 : Farklı alt yükseklik (BH) kısıtları için hesaplanan minimum kaynak dikişi kesit alanı optimizasyon sonuçları

Alan Optimizasyon Problem No	Alan (mm ²)	BH (mm)	BW (mm)	FH (mm)	FW (mm)	Giriş Parametreleri				
						a (cm/dak.)	b (cm/dak.)	c (%)	d (mm)	e (A)
5a	7,0863	0,067	1,298	0,395	4,746	46	2,5	30	2,4	80
5b	8,0234	0,25	2,806	0,207	4,766	46	1,5	30	3,2	80
5c	8,1101	0,448	3,328	0,0485	4,555	46	1,5	70	3,2	80
5d	10,6194	0,617	3,848	0,223	5,527	35	2,5	30	3,2	80
5e	14,1268	0,621	6,408	0,079	6,655	46	2,5	70	3,2	95
5f	14,1295	0,761	5,71	0,132	6,784	24	2,5	30	3,2	80

BÖLÜM 7

GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte, TIG kaynağını, ulaşım endüstrisi, havacılık sanayi, gıda endüstrisi, makine imalatı ve alüminyum malzemelerin kullanıldığı yerler için sıradan ark kaynağına ilginç bir alternatif haline getirir.

TIG kaynağı yüksek hızlı ve kolayca otomatikleştirilmiş bir işlem olduğundan, imalat istasyonlarında kabul edilebilir bir kaynak dikişi kesit geometrisi elde etmek için tüm kaynak parametreleri kontrol edilebilir ve uygun bir kombinasyon içerisinde kullanılabilir.

Bu çalışmada, Yapılan bu çalışmada maksimum nüfuziyet koşulu altında minimum kaynak dikişi kesit geometrisine ait alan hesaplanmıştır. Sunulan model, deneyleri önceden yapılmış olan test koşullarını, kaynak dikişi kesit geometrisini, kaynak girişi parametreleriyle ilişkilendirerek başarıya ulaşmıştır. Bu şekilde, verilen spesifikasyonlar için en iyi kaynak parametrelerini bulmak için gerçek kaynakların yapılması gerekli değildir. Ölçülmüş değerler ile nonlinear regresyon analizi uygulanan ve “*Diferential Evolution*” yöntemi ile optimize edilen sonuçlarının yakın çıkması tez boyunca yürütülen prosesin başarısını kanıtlamaktadır. Bu da ulaşılabilir en az kesit alanına sahip bir kaynak dikişi kesit geometrisi sağlamakla birlikte kaynak kalitesinden de ödün vermeksizin maksimum nüfuziyet sağlamaktadır.

Geliştirilmiş matematiksel model, 1,6 mm kalınlığındaki 1100 kalite alüminyum plakalarının yüksek doğrulukla TIG kaynağı için kaynak dikişi kesit geometrisini öngörebilir. Çalışma, girdi parametrelerindeki etkileşimlerin önemini ve kaynak dikişi kesit geometrisine olan etkisini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma ile kaynak dikişi kesit geometrisini tahmin etmek, bir hesap makinesinde ki işlem kadar basittir. Kullanıcı sadece TIG kaynak girdi değişkenlerini girmelidir,

çıkıtı olarak kaynak dikişi kesit geometrisi ölçülerini sağlayarak hesaplama çalışmalarını yapar.

Kaynak parametrelerinin etkisi çeşitli malzemeler için aynı olabilir. Aradaki fark sadece kaynak tepkileri üzerinedir. Bu nedenle, bu parametreler, kaynak dikişi kesit geometrisi ölçümleri için gelecekte çeşitli materyal türleri üzerinde de hazırlanabilir ve denenebilir.



KAYNAKLAR

- Arunachalam, V.** (2008). Optimization using differential evolution. *Facility for Intelligent Decision Support Department of Civil and Environmental Engineering The University Of Western Ontario*, London, Ontario, Canada
- ASM** (2002). Metals Handbook, Tenth Edition, ASM International Handbook Committee, Materials Park Vol. 1.
- Awang, M.** (2002). The effects of process parameters on steel welding response in curved plates, MSC Thesis, College of Engineering and Mineral Resources West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- AWS**, (1991). Welding Handbook 8th edition, Volume 2, 74-107.
- AWS** (1991). A5.32-9X Standard, Specification for Shielding Gases.
- Barati, R.** (2011). Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead simplex algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 1-8.
- Barker, B.E. & Fox, M.E.** (1980). Computer resolution of overlapping electronic absorption bands. *Chem. Soc. Rev.*, (9), 143-184.
- Baylan, O.,** (2015). TIG kaynağı şematik gösterim ve özet bilgi. <http://www.metaluzmani.com/tig-kaynagi-sematik-gosterim-ve-ozet-bilgi/>
- Baylan, O.,** (2015-2). Torç elemanları. <http://www.metaluzmani.com/torc-elemanlari/>
- Byrd, T.** (1993), Inverter power sources, an efficient alternative, *Welding Journal*, (2), 37-40.
- Cârmenes, R.S.** (1996). Nonlinear Regression, Chapter 4. Elsevier, Departamento de Biología Funcional Universidad de Oviedo Oviedo, SPAIN
- Dey, V., Pratihari, D.K., Datta, G.L., Jha, M.N., Saha, T.K., Bapat, A.V.** (2009). Optimization of bead geometry in electron beam welding using a Genetic Algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1151–1157
- Dey, V., Pratihari, D.K., Datta, G.L., Jha, M.N., Saha, T.K., Bapat, A.V.** (2010). Optimization and prediction of weldment profile in bead-on-plate welding of Al1100 plates using electron beam. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 48, 513–528
- Dixon, M. & Webb, E.C.** (1979). Enzymes. 3rd Ed. Longman, London.
- Dutta, P., & Pratihari, D.K.** (2007). Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based

- approaches. *Journal of Materials Processing Technology*, (184), 56–68
- Ericsson, M.** (2002), Simulation of robotic TIG-Welding, *Lund Institute of Technology Department of Mechanical Engineering*, Sweden.
- Eşme, U.** (2006). *Effect of pool geometry on the quality of TIG welded joints.* (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Eşme, U., Bayramoğlu, M., Kazancoğlu, Y., & Özgün, S.** (2009). Optimization of weld bead geometry in TIG welding process using grey relation analysis and Taguchi Method, *Materials and Technology*, 43, (3), 143–149.
- Ferreti, J.A. & Weiss, G.H.** (1989). One-dimensional nuclear overhauser effects and peak intensity measurements. *Meth. Enzymol.*, 176, 3-11.
- Galton, F.** (1886). Regression towards mediocrity in hereditary stature, *Journal of Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, Vol. 15, 246–263
- Gunaraj, V. & Murugan, N.** (2000). Prediction and Optimization of Weld Bead volume for the Submerged Arc Process — Part 1. *Welding Research Supplement*, Elsevier, 286-294.
- Jackson, C. E. & Shrubbsall, A. E.** (1953). Control of penetration and melting ratio with welding technique, *Welding Journal*, 32(4), 172-178.
- Jacquez, J.A.** (1972). *Compartmental analysis in biology and medicine.* Elsevier, New York.
- Joby, J., & Muthukumar, S.** (2015). Optimization of activated TIG welding parameters for improving weld joint strength of AISI 4135 PM steel by genetic algorithm and simulated annealing, *Int J Adv Manuf Technol*, Springer-Verlag London, Vol. 6, Issue 72.
- Kim, I.S., Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y., & Kim, O.S.** (2003). A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic Co₂ arc welding, *J. Mater. Process. Technol.*, 136, 139–145.
- Kou, S.** (1987). *Welding Metallurgy* Second Edition, John Wiley & Sons.
- Kurt, H.,İ.** (2006). *TIG kaynak yöntemiyle birleşen östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi.* (Yüksek Lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lee, J.I., & Rhee S.** (2000). Prediction of process parameters for gas metal arc welding by multiple regression analysis, *Proc. of Institution of Mechanical Engineers*, Part B, vol. 214, 443–449.
- Levenberg, K.** (1944). A method for the solution of certain problems in least squares. *Quart. Appl. Math.*, (2), 164-168.
- Lothongkum, G., Viyanit, E. & Bhandhubanyong, P.** (2001). Study on the Effects Pulsed TIG Welding Parameters on delta-Ferrite Content, Shape Factor and Bead Quality in Orbital Welding of AISI 316L Stainless Steel Plate, *Journal of Materials Processing Technology*, (110), 233-238.

- Marquardt, D.W.** (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM J. Appl. Math.*, (11), 431-441.
- Marschner, I., Erhardt, F. & Scriba, P.C.** (1978). *Calculation of the immunoassay standard curve by spline function*, *Radioimmunoassay and related procedures in medicine*, 111-122, Int. Atomic Energy Agency, Vienna.
- Modenesi, J.P., Apolinario, R.E., & Pereira, M.I.** (2000), TIG Welding With Single-Component Fluxes, *Journal of Materials Processing Technology*, (99), 260-265.
- Nanda, N.K. & Balasubramanian, K.R.** (2011). Parametric Optimization of TIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Grey-Based Taguchi Method, *Advanced Materials Research*, Vols. 383-390, 4667-4671.
- Narang, H.K., Singh, U.P., Mahapatra, M.M., & Jha, P.K.** (2011). Prediction of the weld pool geometry of TIG arc welding by using fuzzy logic controller, *International Journal of Engineering, Science and Technology* Vol. 3, No. 9, 77-85.
- Nelder, J.A. & Mead, R.** (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, (7), 308-313.
- Orhunbilge N.** (2000). Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi, 2.Baskı, İstanbul, 12.
- Pham, D., & Karaboga, D.** (2000). Intelligent optimization techniques, genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural network. Springer, New York.
- Price, V. K., Storn, M. R., & Lampinen, A. J.** (2005). Differential evolution: A practical approach to global optimization. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Price, V. Kenneth, Storn, & M. Rainer** (1997). Differential evolution - A simple evolution strategy for fast optimization, *Dr. Dobb's Journal*, (22), 18-24 and 78.
- Rao, S.S.** (2009). Engineering optimization: theory and practice, 4th ed. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Reinsch, C.H.** (1967). Smoothing by spline function. *Numerische Mathematik*, (10), 177-183.
- Seshadri, K.S. & Jones, R.N.** (1963). The shapes and intensities of infrared absorption bands. *Spectrochim. Acta*, (19), 1013-1085.
- Siddaiah, A., Singh, B.K., & Mastanaiah, P.** (2017). Prediction and optimization of weld bead geometry for electron beam welding of AISI 304 stainless steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 89, 27-43
- Silva, S.P., Ribeiro Filho, S.L.M., & Brandao, L.C.** (2014). Particle swarm optimization for achieving the minimum profile error in honing process, *Precision Engineering*, (38), 759-768.

- Suban, M., Tusek, J. & Uran, M.** (2001), Use of Hydrogen in Welding Engineering in Former Times and Today, *Journal of Materials Processing Technology*, (119), 193-198.
- Tarng, Y.S. , Juang, S.C. , & Lii,H.R.** (1998). A comparison between the back-propagation and counter-propagation networks in the modeling of the TIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, (75), 54–62
- Tarng, Y. S., Tsai, H. L. & Yeh, S. S.** (1999) Modeling, Optimization and Classification of Weld Quality in Tungsten Inert Gas Welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, No. 9, 1427-1438.
- Tusek, J. & Suban, M.** (2000). Experimental research of the effect of hydrogen in Argon as a shielding gas in Arc Welding of high-alloy stainless steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, (25), 369-376.
- Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Do-Thi, T.D., Dang-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T.** (2017). A global numerical approach for lightweight design optimization of laminated composite plates subjected to frequency constraints. *Composite Structures*, 159, 646-655
- Yang, L.J., Chandel, R.S., & Bibby, M.J.** (1993). An analysis of curvilinear regression equations for modeling the submerged arc welding process, *J. Mater. Process. Technol.* 37, (1–4), 601–611.
- Zabinsky, Z.B.** (2011). Random Search Algorithmns. *In Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 1-16

EKLER
EK A: Tablolar

Tablo A.1 : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
	b0	1.7836850085137135	b0	-2.6114328944148806
x1	b1	-0.03656547604323018	b1	0.02072697763446732
x2	b2	0.02053064075102738	b2	-6.724385572644062
x3	b3	-0.026671115474291344	b3	-0.031297579541103585
x4	b4	0.2273289984904623	b4	-4.022072401249757
x5	b5	-0.021248329914320456	b5	-0.06353343078798768
x1x2	b12	-0.009675935881269953	b12	0.18991000928601864
x1x3	b13	0.0015164728643129062	b13	-0.0077806427553367905
x1x4	b14	-0.024714853737251574	b14	0.1828819407405371
x1x5	b15	-0.000628293767364378	b15	-0.0017714314657599705
x2x3	b23	0.002188873242470355	b23	-0.02616790058742634
x2x4	b24	0.1920967703094718	b24	1.470062186690807
x2x5	b25	0.007934315030101523	b25	0.1944417150459604
x3x4	b34	0.004633873312315109	b34	0.013792283114926017
x3x5	b35	0.0008038857384961575	b35	0.000571189843131237
x4x5	b45	-0.005230012435955598	b45	0.10787657234211989
x1 ²	b11	-0.0041407559375541865	b11	-0.006956910330892624
x2 ²	b22	-0.287356279158029	b22	-4.737526636079902
x3 ²	b33	-0.000925089606876522	b33	-0.00028946728524934797
x4 ²	b44	-0.05091979120274922	b44	-2.3201768679408183
x5 ²	b55	-0.0003807705552927371	b55	0.0008349197319376332
x1 ³	b111	-0.0001762570596912749	b111	-0.00045206933503367315
x2 ³	b222	-0.20104311097544775	b222	-2.4334935991135165
x3 ³	b333	-0.0000166518966146234	b333	-2.84895*10 ⁻⁶
x4 ³	b444	-0.05320418698384184	b444	-1.027207275664079
x5 ³	b555	-3.24882*10 ⁻⁶	b555	0.00003769547308995536
x1x2x3	b123	-0.0002966978543337686	b123	0.003338293362526786
x1x2x4	b124	-0.014346558229443336	b124	-0.23093042203531003
x1x2x5	b125	-0.00006972320170533227	b125	-0.008462310430118981
x1x3x4	b134	-0.00044837864945087316	b134	0.0003952881478785548
x1x3x5	b135	-0.00007461564842616938	b135	0.0002865178192851392
x1x4x5	b145	0.001949481933817092	b145	-0.006506448292173618
x2x3x4	b234	0.0002645877952810619	b234	-0.022544745466652565
x2x3x5	b235	-0.00021747222414420317	b235	-0.00044108926500969787
x3x4x5	b345	-0.00019111405414910018	b345	-0.0014350520865208775
x1 ² x2	b112	-0.00039255173439677374	b112	0.002049798157180873
x1 ² x3	b113	-1.52547*10 ⁻⁶	b113	0.000036781647037326854
x1 ² x4	b114	0.0005229529008435738	b114	0.004442699569241915
x1 ² x5	b115	0.00016658029022873793	b115	0.0004324876004051523
x2 ² x3	b223	0.006219944620357596	b223	-0.014843666260940941
x2 ² x4	b224	0.10937841831554776	b224	1.816377503453239
x2 ² x5	b225	0.009725307316939064	b225	0.16062366102075615
x2 ² x1	b221	-0.001240583573139111	b221	0.14280992594802622
x3 ² x4	b334	0.00006981727346907608	b334	0.00100291008387231
x3 ² x1	b331	0.00004162486948091291	b331	-0.00018532740149316168
x3 ² x2	b332	0.00004767597863361222	b332	0.0005263915013213788
x3 ² x5	b335	0.000022381011843731248	b335	0.00002409873159541112
x4 ² x5	b445	-0.0010304238833113682	b445	0.07709348324791507
x4 ² x1	b441	-0.01197379495253812	b441	0.116404044108366
x4 ² x3	b443	0.005975746639247754	b443	0.01243537437105284

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x4 ² x2	b442	0.12240732792824127	b442	1.7024942499353921
x5 ² x1	b551	9.61603*10 ⁻⁶	b551	-0.00004206195336591778
x5 ² x2	b552	-0.00010117178226812918	b552	-0.0001102211824940917
x5 ² x3	b553	-1.14686*10 ⁻⁶	b553	-0.000011741421273224697
x5 ² x4	b554	0.00009537313616740095	b554	-0.0005527569349848151
x1 ² x2 ²	b122	0.00040133508359342754	b122	0.002761925548286152
x1 ² x3 ²	b132	6.65044*10 ⁻⁷	b132	2.03676*10 ⁻⁶
x1 ² x4 ²	b142	0.00080022045911818	b142	0.003657936700730233
x1 ² x5 ²	b152	-3.97355*10 ⁻⁶	b152	-0.00010806434033351609
x2 ² x3 ²	b232	0.00019397519149694153	b232	0.00045480602115920127
x2 ² x4 ²	b242	0.10297444947927382	b242	1.7062012692889006
x2 ² x5 ²	b252	-0.000013236519711396823	b252	-0.00022684233868904685
x3 ² x4 ²	b342	0.00014825931398453456	b342	0.0006832095076435045
x3 ² x5 ²	b352	3.76332*10 ⁻⁸	b352	-4.1566*10 ⁻⁷
x4 ² x5 ²	b452	0.00010427824734906803	b452	-0.0004517064376373954
x1 ² x1 ²	b1111	-5.60364*10 ⁻⁶	b1111	-0.00001726496406548569
x2 ² x2 ²	b2222	-0.10179949093687814	b2222	-1.0979139265015572
x3 ² x3 ²	b3333	-2.58005*10 ⁻⁷	b3333	-3.22934*10 ⁻⁸
x4 ² x4 ²	b4444	-0.026692717309635197	b4444	-0.3981689884237494
x5 ² x5 ²	b5555	-1.02284*10 ⁻⁸	b5555	7.48206*10 ⁻⁷
x1 ³ x2	b1112	-0.000010692284809725932	b1112	-0.00017952264367942757
x1 ³ x3	b1113	-2.19176*10 ⁻⁶	b1113	0.000011218648563550242
x1 ³ x4	b1114	0.00006231774502364273	b1114	-5.97179*10 ⁻⁶
x1 ³ x5	b1115	0.00001014012903611802	b1115	0.000026411885842309125
x2 ³ x3	b2223	0.004023186560053684	b2223	-0.006988598312720519
x2 ³ x4	b2224	0.05158745270629478	b2224	1.0712286546788146
x2 ³ x5	b2225	0.005727716080905561	b2225	0.08669094876949174
x2 ³ x1	b2221	0.00035008421144799645	b2221	0.074951969215339
x3 ³ x4	b3334	9.87058*10 ⁻⁷	b3334	0.00001960865042661299
x3 ³ x1	b3331	7.16707*10 ⁻⁷	b3331	-3.08515*10 ⁻⁶
x3 ³ x2	b3332	7.74395*10 ⁻⁷	b3332	0.00001372914507262864
x3 ³ x5	b3335	3.86544*10 ⁻⁷	b3335	4.46502*10 ⁻⁷
x4 ³ x5	b4445	-0.00012163608207591609	b4445	0.03663466641170175
x4 ³ x1	b4441	-0.004916609365973152	b4441	0.053372127534930376
x4 ³ x3	b4443	0.0032018351888265443	b4443	0.006259829525155115
x4 ³ x2	b4442	0.056145750673476554	b4442	0.8976452372237874
x5 ³ x1	b5551	4.00663*10 ⁻⁷	b5551	-6.72269*10 ⁻⁷
x5 ³ x2	b5552	-4.8987*10 ⁻⁶	b5552	-0.0000610411880261725
x5 ³ x3	b5553	-2.70466*10 ⁻⁷	b5553	-5.05702*10 ⁻⁷
x5 ³ x4	b5554	4.24093*10 ⁻⁶	b5554	-0.000047732640387198825
x1 ² x2x3	b1223	-5.00476*10 ⁻⁶	b1223	-0.0000449754898105236
x1 ² x2x4	b1224	-0.000199593407604314	b1224	-0.0003960124395613168
x1 ² x2x5	b1225	-0.000014588300739406365	b1225	0.000052832581334325864

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x1 ² x3x4	b1234	0.00001709891836474023	b1234	-0.000043102669270279674
x1 ² x3x5	b1235	1.04012*10 ⁻⁶	b1235	-0.000013120499732794115
x1 ² x4x5	b1245	-0.00011963592198503049	b1245	-0.00013210306208287075
x2 ² x3x4	b2234	-0.0005837521774470451	b2234	-0.019715885982635805
x2 ² x3x5	b2235	-0.0003042084682348825	b2235	-0.00043696223983831066
x2 ² x4x5	b2245	-0.008361203919151556	b2245	-0.16181863343057995
x2 ² x1x3	b2213	-0.00048637447092144884	b2213	0.003894771559455474
x2 ² x1x4	b2214	-0.006853746786720947	b2214	-0.20902547092669868
x2 ² x1x5	b2215	0.00005306774840508482	b2215	-0.00621944064887432
x3 ² x1x2	b3212	-5.29596*10 ⁻⁶	b3212	0.00004587381597205119
x3 ² x1x4	b3214	-6.29562*10 ⁻⁶	b3214	-0.00002170979151493672
x3 ² x1x5	b3215	-1.63732*10 ⁻⁶	b3215	6.99518*10 ⁻⁶
x3 ² x2x4	b3224	-0.000026323348730188564	b3224	-0.00007755928102264484
x3 ² x2x5	b3225	-6.42458*10 ⁻⁶	b3225	-0.0000432105953646576
x3 ² x4x5	b3245	-3.58099*10 ⁻⁶	b3245	-0.00005178935592420416
x4 ² x1x2	b4212	-0.008235792335145011	b4212	-0.1710316177127849
x4 ² x1x3	b4213	-0.00045979395251297795	b4213	0.0011223839336425116
x4 ² x1x5	b4215	0.001335341807987182	b4215	-0.004026281554640769
x4 ² x2x3	b4223	-0.00007182245308552505	b4223	-0.011722156668744528
x4 ² x2x5	b4225	-0.008675332100678848	b4225	-0.1425080520349157
x4 ² x3x5	b4235	-0.00021350716481747435	b4235	-0.0009950660624780023
x5 ² x1x2	b5212	6.4729*10 ⁻⁶	b5212	0.00014032352314026367
x5 ² x1x3	b5213	4.931*10 ⁻⁷	b5213	-1.64656*10 ⁻⁶
x5 ² x1x4	b5214	-0.000035747052998904705	b5214	0.000036402706511323595
x5 ² x2x3	b5223	0.000012035378102305139	b5223	0.00008422187912514138
x5 ² x2x4	b5224	0.0000859876340434485	b5224	0.0018620990475680882
x5 ² x3x4	b5234	2.44478*10 ⁻⁶	b5234	0.00004287563225066171
x1x2x3x4	b11234	-0.00022156114132073067	b11234	-0.0035382604310511784
x1x2x3x5	b11235	0.000031931894927007727	b11235	-0.00015317878448714426
x1x3x4x5	b11345	0.00003504753558442325	b11345	0.000052069645427879876
x1x2x4x5	b11245	0.0009498380146317138	b11245	0.016214883637628172
x2x3x4x5	b22345	0.00008247884792766765	b22345	0.0034898416049986094
x1 ² x1 ² x1	b11111	-1.54475*10 ⁻⁷	b11111	-5.26898*10 ⁻⁷
x2 ² x2 ² x2	b22222	-0.04576862087366267	b22222	-0.4671274989402535
x3 ² x3 ² x3	b33333	-3.80516*10 ⁻⁹	b33333	-4.08991*10 ⁻¹⁰
x4 ² x4 ² x4	b44444	-0.01085724054225288	b44444	-0.14287710232871167
x5 ² x5 ² x5	b55555	2.09811*10 ⁻¹⁰	b55555	1.12995*10 ⁻⁸
x1 ² x1 ² x2	b11112	-2.48843*10 ⁻⁷	b11112	-0.00001044493634229128
x1 ² x1 ² x3	b11113	-1.06368*10 ⁻⁷	b11113	5.15333*10 ⁻⁷
x1 ² x1 ² x4	b11114	2.66871*10 ⁻⁶	b11114	-3.53251*10 ⁻⁶
x1 ² x1 ² x5	b11115	3.75617*10 ⁻⁷	b11115	9.78858*10 ⁻⁷
x2 ² x2 ² x1	b22221	0.00036294218581909963	b22221	0.034147234822229304
x2 ² x2 ² x3	b22223	0.0019870947972399204	b22223	-0.0030209697387897578

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x ² x ² x ⁴	b22224	0.022320296841716117	b22224	0.5120024967039818
x ² x ² x ⁵	b22225	0.0027361817450905546	b22225	0.0399809714792819
x ³ x ³ x ¹	b33331	1.09414*10 ⁻⁸	b33331	-4.65433*10 ⁻⁸
x ³ x ³ x ²	b33332	1.15781*10 ⁻⁸	b33332	2.34063*10 ⁻⁷
x ³ x ³ x ⁴	b33334	1.39405*10 ⁻⁸	b33334	3.11624*10 ⁻⁷
x ³ x ³ x ⁵	b33335	5.90726*10 ⁻⁹	b33335	6.98193*10 ⁻⁹
x ⁴ x ⁴ x ¹	b44441	-0.0018296695395871709	b44441	0.02105186700805853
x ⁴ x ⁴ x ²	b44442	0.022149910650925125	b44442	0.37643486299257156
x ⁴ x ⁴ x ³	b44443	0.0013512105955046116	b44443	0.0025757820163538506
x ⁴ x ⁴ x ⁵	b44445	0.000019080787940940735	b44445	0.014695970363688833
x ⁵ x ⁵ x ¹	b55551	7.80902*10 ⁻⁹	b55551	-8.99758*10 ⁻⁹
x ⁵ x ⁵ x ²	b55552	-9.92604*10 ⁻⁸	b55552	-1.44206*10 ⁻⁶
x ⁵ x ⁵ x ³	b55553	-6.27443*10 ⁻⁹	b55553	-1.01238*10 ⁻⁸
x ⁵ x ⁵ x ⁴	b55554	8.53109*10 ⁻⁸	b55554	-1.04862*10 ⁻⁶
x ¹ x ³ x ²	b11122	0.000021719892671097743	b11122	-0.00006149008209078809
x ¹ x ³ x ³	b11133	-2.13916*10 ⁻⁸	b11133	3.38659*10 ⁻⁷
x ¹ x ³ x ⁴	b11144	0.00006006423282564932	b11144	0.000046428100804293755
x ¹ x ³ x ⁵	b11155	-2.44324*10 ⁻⁷	b11155	-5.63065*10 ⁻⁷
x ² x ³ x ¹	b22211	0.0003261762652447247	b22211	0.0016520192461890162
x ² x ³ x ²	b22233	0.0001280350230260445	b22233	0.0002484805034039156
x ² x ³ x ⁴	b22244	0.05585718676399388	b22244	0.9661343566158714
x ² x ³ x ⁵	b22255	3.47748*10 ⁻⁶	b22255	-0.00014293505231143542
x ³ x ³ x ¹	b33311	1.41008*10 ⁻⁸	b33311	3.89197*10 ⁻⁸
x ³ x ³ x ²	b33322	3.42705*10 ⁻⁶	b33322	0.00001106307252648175
x ³ x ³ x ⁴	b33344	2.49366*10 ⁻⁶	b33344	0.000013045186927599755
x ³ x ³ x ⁵	b33355	9.07047*10 ⁻¹⁰	b33355	-7.50695*10 ⁻⁹
x ¹ x ³ x ² x ³	b11123	9.28607*10 ⁻⁸	b11123	-6.89377*10 ⁻⁶
x ¹ x ³ x ² x ⁴	b11124	7.80177*10 ⁻⁶	b11124	0.0002714633936214903
x ¹ x ³ x ² x ⁵	b11125	-6.75862*10 ⁻⁷	b11125	0.000015242714851050711
x ¹ x ³ x ³ x ⁴	b11134	1.57408*10 ⁻⁶	b11134	-2.8218*10 ⁻⁶
x ¹ x ³ x ³ x ⁵	b11135	1.583*10 ⁻⁷	b11135	-1.09662*10 ⁻⁶
x ¹ x ³ x ⁴ x ⁵	b11145	-9.30208*10 ⁻⁶	b11145	1.35249*10 ⁻⁶
x ² x ³ x ¹ x ³	b22213	-0.0002989374098698847	b22213	0.0022737691740616186
x ² x ³ x ¹ x ⁴	b22214	-0.0029444138995974446	b22214	-0.11557133781483706
x ² x ³ x ¹ x ⁵	b22215	0.00004535212285666048	b22215	-0.003240289121431884
x ² x ³ x ³ x ⁴	b22234	-0.0004362127734117066	b22234	-0.010805880354679671
x ² x ³ x ³ x ⁵	b22235	-0.00018299471199057757	b22235	-0.0002467960964116785
x ² x ³ x ⁴ x ⁵	b22245	-0.004277752629491378	b22245	-0.088543041994806
x ³ x ³ x ¹ x ²	b33312	-8.05116*10 ⁻⁸	b33312	6.18345*10 ⁻⁷
x ³ x ³ x ¹ x ⁴	b33314	-8.58645*10 ⁻⁸	b33314	-4.95855*10 ⁻⁷
x ³ x ³ x ¹ x ⁵	b33315	-2.6652*10 ⁻⁸	b33315	1.17186*10 ⁻⁷
x ³ x ³ x ² x ⁴	b33324	-5.79138*10 ⁻⁷	b33324	-0.000013942002359588092
x ³ x ³ x ² x ⁵	b33325	-1.12327*10 ⁻⁷	b33325	-8.60601*10 ⁻⁷

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x3 ³ x4x5	b33345	-5.54177*10-8	b33345	-9.382*10-7
x4 ³ x1x2	b44412	-0.003639449425524749	b44412	-0.0820892947980989
x4 ³ x1x3	b44413	-0.00023743832652207817	b44413	0.0006475312549667537
x4 ³ x1x5	b44415	0.0006266879792429433	b44415	-0.0018285181548814075
x4 ³ x2x3	b44423	-0.00006959833899476059	b44423	-0.004973649750273815
x4 ³ x2x5	b44425	-0.0041355720845830495	b44425	-0.06900191238316412
x4 ³ x3x5	b44435	-0.00011191596670554969	b44435	-0.000468708888312793
x5 ³ x1x2	b55512	1.88954*10-7	b55512	6.3136*10-6
x5 ³ x1x3	b55513	3.49343*10-8	b55513	-1.29086*10-7
x5 ³ x1x4	b55514	-1.53188*10-6	b55514	2.90963*10-6
x5 ³ x2x3	b55523	3.93055*10-7	b55523	2.42449*10-6
x5 ³ x2x4	b55524	5.75764*10-6	b55524	0.00010256009168655545
x5 ³ x3x4	b55534	1.22858*10-7	b55534	1.58193*10-6
x1 ² x2 ² x3	b11223	-3.59707*10-6	b11223	-0.00004090717295187308
x1 ² x2 ² x4	b11224	-0.00024268153233660252	b11224	-0.0010602758008403188
x1 ² x2 ² x5	b11225	-0.00003955477398009869	b11225	-0.00003280111586695193
x1 ² x3 ² x2	b11332	-5.05256*10-8	b11332	-1.39786*10-6
x1 ² x3 ² x4	b11334	3.11079*10-7	b11334	-1.75902*10-6,
x1 ² x3 ² x5	b11335	-3.88274*10-9	b11335	-3.79788*10-7
x1 ² x4 ² x2	b11442	-0.00008587646251351763	b11442	-0.00048514881911274077
x1 ² x4 ² x3	b11443	0.000011268823978212537	b11443	-0.00003207127794134004
x1 ² x4 ² x5	b11445	-0.00009619323091375964	b11445	-0.0001338748660109973
x1 ² x5 ² x2	b11552	1.15932*10-6	b11552	-4.71304*10-6
x1 ² x5 ² x3	b11553	-5.58425*10-8	b11553	7.72211*10-7
x1 ² x5 ² x4	b11554	0.000010040748393021854	b11554	6.50539*10-6
x2 ² x3 ² x1	b22331	-0.000011155791383802952	b22331	0.00006684793777446791
x2 ² x3 ² x4	b22334	-0.00003215010554724176	b22334	-0.0007680902250068265
x2 ² x3 ² x5	b22335	-8.75452*10-6	b22335	-0.00003739151794502717
x3 ² x4 ² x1	b33441	-8.71839*10-6	b33441	6.53045*10-6
x3 ² x4 ² x2	b33442	-0.000022391933905721223	b33442	-0.0005620196099078928
x3 ² x4 ² x5	b33445	-4.81492*10-6	b33445	-0.00003629858766571364
x4 ² x5 ² x1	b44551	-0.00002427379570749962	b44551	0.00002830983768777051
x4 ² x5 ² x2	b44552	0.00006707340291472005	b44552	0.0012209716943631845
x4 ² x5 ² x3	b44553	1.71455*10-6	b44553	0.00002913753071972326
x1 ² x2x3x4	b111234	-6.97314*10-6	b111234	0.00020773071625341697
x1 ² x2x3x4	b111235	8.55716*10-7	b111235	6.73726*10-6
x1 ² x3x4x5	b111345	-3.15298*10-6	b111345	3.23907*10-6
x1 ² x2x4x5	b111245	1.11915*10-6	b111245	-0.0003291150137743735
x2 ² x1x3x4	b22134	-0.00009450966423760284	b22134	-0.0027935527651263524
x2 ² x1x3x5	b22135	0.00003728729270706844	b22135	-0.00016673002418491148
x2 ² x1x4x5	b22145	0.00040052981287109373	b22145	0.013600099849719003
x2 ² x3x4x5	b222345	0.00009603708183032767	b222345	0.0029329746225233424
x3 ² x1x2x4	b33124	-2.7498*10-6	b33124	-0.000043605289178971994

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	BH		BW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x3 ² x1x2x5	b33125	7.57991*10 ⁻⁷	b33125	-2.14754*10 ⁻⁶
x3 ² x2x4x5	b33245	3.95882*10 ⁻⁶	b33245	0.00011306181289064868
x3 ² x1x4x5	b33145	4.89111*10 ⁻⁷	b33145	2.31779*10 ⁻⁶
x4 ² x1x2x3	b44123	-0.00011080216655556952	b44123	-0.002668191306999635
x4 ² x1x2x5	b44125	0.000624307672864974	b44125	0.011466891504053077
x4 ² x1x3x5	b44135	0.00003105262678006851	b44135	1.91637*10 ⁻⁶
x4 ² x2x3x5	b44235	0.00007773725932094005	b44235	0.002314372992663294
x5 ² x1x2x3	b55123	-2.07197*10 ⁻⁶	b55123	-4.17929*10 ⁻⁷
x5 ² x1x2x4	b55124	-0.00003390151515151604	b55124	-0.000645138888889144
x5 ² x2x3x4	b55234	-0.00001118055555551104	b55234	-0.00025488425925911893
x5 ² x1x3x4	b55134	-4.02462*10 ⁻⁷	b55134	-4.96054*10 ⁻⁶
x1x2x3x4x5	b12345	0.000024952651515181832	b12345	0.0002245738636364038

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
	b0	-1.8157215703232548	b0	-6.668433514315278
x1	b1	0.04137633638762016	b1	0.2547613201343468
x2	b2	0.2974185588724235	b2	-4.732372813808849
x3	b3	0.039496365430034194	b3	-0.02389161930300866
x4	b4	-0.11044343583427771	b4	-0.9554719221653944
x5	b5	0.03252945592136489	b5	0.03176115528607723
x1x2	b12	0.0173229718924237	b12	0.08799740426071176
x1x3	b13	-0.0012628759977060886	b13	-0.002043287037848971
x1x4	b14	0.02639113045582394	b14	-0.02936369392051456
x1x5	b15	0.0003790533311338345	b15	-0.007322880575391666
x2x3	b23	-0.0047599841605629545	b23	-0.023019816378157594
x2x4	b24	-0.1684178252815038	b24	0.7227948602934693
x2x5	b25	-0.017094546305458307	b25	0.1285797184804135
x3x4	b34	-0.009296846203190929	b34	-0.016188376620641116
x3x5	b35	-0.001122623103700982	b35	0.0004509828976049092
x4x5	b45	0.0026702394559589555	b45	0.0031970106690204663
x1 ²	b11	0.004745915322326532	b11	0.001668679148357284
x2 ²	b22	0.537793605834011	b22	-2.5130294499218957
x3 ²	b33	0.0012302144469245593	b33	0.0005701160955581744
x4 ²	b44	0.13035625415308816	b44	0.12183018683200547
x5 ²	b55	0.00038749682720708737	b55	0.0013151571660235308
x1 ³	b111	0.00020496560584844483	b111	-0.0002793877673941751
x2 ³	b222	0.33436362419342974	b222	-1.1454775667762267
x3 ³	b333	0.00002172976842212431	b333	0.000014411698726573104
x4 ³	b444	0.09039551589400419	b444	0.16727963256563408
x5 ³	b555	3.94768*10 ⁻⁷	b555	0.00002187300091793506
x1x2x3	b123	0.00021635083702394386	b123	0.002601998094356896
x1x2x4	b124	0.006855189624663185	b124	-0.0812163564867251
x1x2x5	b125	0.00003376701050074229	b125	-0.003811098682956809
x1x3x4	b134	0.0005803241606110844	b134	0.0015368377906802696
x1x3x5	b135	0.00007154447453668584	b135	0.00009306096500810429
x1x4x5	b145	-0.0018642853611959569	b145	0.0035752252311990465
x2x3x4	b234	0.005657931951081991	b234	-0.0182549547833014
x2x3x5	b235	0.000491726510498329	b235	-0.000027698173323534353
x3x4x5	b345	0.0004217116105144882	b345	0.00007089050686056439
x1 ² x2	b112	0.00016838109869093962	b112	0.0019136035987673214
x1 ² x3	b113	-0.000012972675887744341	b113	-0.000025625156967789992
x1 ² x4	b114	-0.000544265406504444	b114	0.0022686486754267135
x1 ² x5	b115	-0.00019120760992215517	b115	0.00022596243148132256
x2 ² x3	b223	-0.010381013079800138	b223	-0.013676750419090016
x2 ² x4	b224	-0.1110001199702777	b224	0.7193442416956867
x2 ² x5	b225	-0.018701087679617624	b225	0.09367709379693426
x2 ² x1	b221	0.006315207278317064	b221	0.02450315794123768
x3 ² x4	b334	-0.0001985619810018457	b334	-0.00021661065138764868
x3 ² x1	b331	-0.00003651284010914163	b331	-0.00009085834112827712
x3 ² x2	b332	-0.0001615611911077703	b332	0.0002628715681885162
x3 ² x5	b335	-0.00003173832050903272	b335	5.16411*10 ⁻⁶
x4 ² x5	b445	-0.0018864680016714432	b445	-0.0014590422509453739
x4 ² x1	b441	0.012526549469066887	b441	-0.047409072848094244
x4 ² x3	b443	-0.010429670060156717	b443	-0.007849470809348542

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x4 ² x2	b442	-0.14241719663652688	b442	0.9957725703335032
x5 ² x1	b551	-7.9776*10 ⁻⁶	b551	-0.00008186237933351651
x5 ² x2	b552	0.00014277888343280757	b552	-0.00023192467725746083
x5 ² x3	b553	1.77512*10 ⁻⁶	b553	-9.82066*10 ⁻⁶
x5 ² x4	b554	-0.000024189608430308754	b554	-0.00025321792455757993
x1 ² x2 ²	b122	-0.000676927083537721	b122	0.0011908765720337645
x1 ² x3 ²	b132	-1.10624*10 ⁻⁶	b132	-8.81186*10 ⁻⁷
x1 ² x4 ²	b142	-0.0008813943093806559	b142	0.0012869181889415924
x1 ² x5 ²	b152	4.13287*10 ⁻⁶	b152	-9.64423*10 ⁻⁶
x2 ² x3 ²	b232	-0.00033359068212458006	b232	0.00010564901076606265
x2 ² x4 ²	b242	-0.131894766954134	b242	0.7465731669246815
x2 ² x5 ²	b252	0.0000441531066794477	b252	-0.00040224629510616974
x3 ² x4 ²	b342	-0.0002657818252224904	b342	-0.00020404431326287236
x3 ² x5 ²	b352	-2.40902*10 ⁻⁸	b352	-4.5204*10 ⁻⁷
x4 ² x5 ²	b452	-0.00005882079483926745	b452	-0.00031071161641410143
x1 ² x1 ²	b1111	6.57795*10 ⁻⁶	b1111	-0.00001500832109954189
x2 ² x2 ²	b2222	0.162921115575506	b2222	-0.4866191520330962
x3 ² x3 ²	b3333	3.34603*10 ⁻⁷	b3333	2.44114*10 ⁻⁷
x4 ² x4 ²	b4444	0.04150931537485278	b4444	0.08727856213388026
x5 ² x5 ²	b5555	-5.83855*10 ⁻⁸	b5555	2.85682*10 ⁻⁷
x1 ³ x2	b1112	-8.26852*10 ⁻⁶	b1112	-0.00004396518433694038
x1 ³ x3	b1113	1.17911*10 ⁻⁶	b1113	7.56068*10 ⁻⁷
x1 ³ x4	b1114	-0.00006439589869843145	b1114	0.00015656516810251805
x1 ³ x5	b1115	-0.000011143206894951383	b1115	0.000022195683770129798
x2 ³ x3	b2223	-0.006576590196298789	b2223	-0.006575281110736634
x2 ³ x4	b2224	-0.05566130559748249	b2224	0.4067023993960716
x2 ³ x5	b2225	-0.010784799557575487	b2225	0.04866539230878515
x2 ³ x1	b2221	0.0022011568280386235	b2221	0.005947961805833559
x3 ³ x4	b3334	-3.20664*10 ⁻⁶	b3334	-2.87598*10 ⁻⁶
x3 ³ x1	b3331	-6.35617*10 ⁻⁷	b3331	-1.69477*10 ⁻⁶
x3 ³ x2	b3332	-2.89765*10 ⁻⁶	b3332	7.88008*10 ⁻⁶
x3 ³ x5	b3335	-5.49941*10 ⁻⁷	b3335	6.18726*10 ⁻⁸
x4 ³ x5	b4445	-0.0014123103138028409	b4445	-0.0012022693457084627
x4 ³ x1	b4441	0.005091568984843992	b4441	-0.026120885397601604
x4 ³ x3	b4443	-0.005470796462628459	b4443	-0.00322441979519007
x4 ³ x2	b4442	-0.07067499543719101	b4442	0.5383366375262387
x5 ³ x1	b5551	-2.84441*10 ⁻⁷	b5551	-7.97839*10 ⁻⁸
x5 ³ x2	b5552	8.78303*10 ⁻⁶	b5552	-0.00004502453725130566
x5 ³ x3	b5553	3.84545*10 ⁻⁷	b5553	-4.1376*10 ⁻⁷
x5 ³ x4	b5554	-1.48212*10 ⁻⁶	b5554	-8.72548*10 ⁻⁶
x1 ² x2x3	b1223	0.000027121207554339885	b1223	7.08863*10 ⁻⁶
x1 ² x2x4	b1224	0.00036074293169251827	b1224	-0.0006897567796272098
x1 ² x2x5	b1225	0.00003154126822276211	b1225	-0.00001565583876579471

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x1 ² x3x4	b1234	-0.000011351557742593857	b1234	0.00001987119504337197
x1 ² x3x5	b1235	2.11468*10 ⁻⁷	b1235	1.14209*10 ⁻⁷
x1 ² x4x5	b1245	0.0001193910281148323	b1245	-0.0002651414303454944
x2 ² x3x4	b2234	0.005939853436481602	b2234	-0.011314575364498492
x2 ² x3x5	b2235	0.000569708207009699	b2235	-0.00009799681867790078
x2 ² x4x5	b2245	0.012093764376935236	b2245	-0.07751907389599859
x2 ² x1x3	b2213	0.00038135973797541776	b2213	0.0023522399551265324
x2 ² x1x4	b2214	0.0007964412209778413	b2214	-0.05758931254922164
x2 ² x1x5	b2215	-0.00003840955525071361	b2215	-0.0016919150347710157
x3 ² x1x2	b3212	2.12438*10 ⁻⁶	b3212	0.0000459133681406363
x3 ² x1x4	b3214	9.0953*10 ⁻⁶	b3214	0.00004088208835386217
x3 ² x1x5	b3215	1.60773*10 ⁻⁶	b3215	3.41384*10 ⁻⁶
x3 ² x2x4	b3224	0.0001607153665731662	b3224	-0.0005488965425851043
x3 ² x2x5	b3225	0.000014383500022293222	b3225	-0.000022405308546776605
x3 ² x4x5	b3245	9.40281*10 ⁻⁶	b3245	1.11559*10 ⁻⁶
x4 ² x1x2	b4212	0.00252214031015752	b4212	-0.06251032831381002
x4 ² x1x3	b4213	0.0005172218399063798	b4213	0.0012249451946949896
x4 ² x1x5	b4215	-0.0012523054085074943	b4215	0.003135574305309116
x4 ² x2x3	b4223	0.004202290862128957	b4223	-0.009287917640182154
x4 ² x2x5	b4225	0.012472471560843407	b4225	-0.07915297555072179
x4 ² x3x5	b4235	0.0003986581044106144	b4235	-4.16783*10 ⁻⁶
x5 ² x1x2	b5212	-0.000014406559386660256	b5212	0.00013223459209903965
x5 ² x1x3	b5213	-4.35033*10 ⁻⁷	b5213	5.54691*10 ⁻⁷
x5 ² x1x4	b5214	0.00003279806267894601	b5214	-0.00004382154544842156
x5 ² x2x3	b5223	-0.000022468608911315323	b5223	0.00006941778713295788
x5 ² x2x4	b5224	-0.00016340660408747484	b5224	0.0013779294554666145
x5 ² x3x4	b5234	-6.38366*10 ⁻⁶	b5234	0.00001728013688297784
x1x2x3x4	b11234	0.0002715488686795394	b11234	-0.0020415403201789217
x1x2x3x5	b11235	-0.00004274374679100678	b11235	-0.00014267422488242683
x1x3x4x5	b11345	-0.000048536479009259176	b11345	-0.00011703227657810252
x1x2x4x5	b11245	-0.0006583221674786884	b11245	0.006816265742898161
x2x3x4x5	b22345	-0.0006504620449386264	b22345	0.0023987841335383507
x1 ² x1 ² x1	b11111	1.82466*10 ⁻⁷	b11111	-5.19096*10 ⁻⁷
x2 ² x2 ² x2	b22222	0.0719890366662641	b22222	-0.20035928160739958
x3 ² x3 ² x3	b33333	4.92303*10 ⁻⁹	b33333	3.71851*10 ⁻⁹
x4 ² x4 ² x4	b44444	0.016258327843077097	b44444	0.036046489172539865
x5 ² x5 ² x5	b55555	-1.3251*10 ⁻⁹	b55555	3.30778*10 ⁻⁹
x1 ² x1 ² x2	b11112	-4.97177*10 ⁻⁷	b11112	-3.69035*10 ⁻⁶
x1 ² x1 ² x3	b11113	6.80069*10 ⁻⁸	b11113	5.25952*10 ⁻⁸
x1 ² x1 ² x4	b11114	-2.74808*10 ⁻⁶	b11114	5.97037*10 ⁻⁶
x1 ² x1 ² x5	b11115	-4.06722*10 ⁻⁷	b11115	9.20778*10 ⁻⁷
x2 ² x2 ² x1	b22221	0.0007765916223837287	b22221	0.0013052164664613067
x2 ² x2 ² x3	b22223	-0.0032254842388739838	b22223	-0.0028731304963303165

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x2 ² x2 ² x4	b22224	-0.02483117427192121	b22224	0.19121508450967867
x2 ² x2 ² x5	b22225	-0.005110491601625737	b22225	0.022069809912147666
x3 ² x3 ² x1	b33331	-9.73978*10 ⁻⁹	b33331	-2.65563*10 ⁻⁸
x3 ² x3 ² x2	b33332	-4.48437*10 ⁻⁸	b33332	1.3789*10 ⁻⁷
x3 ² x3 ² x4	b33334	-4.78398*10 ⁻⁸	b33334	-3.94277*10 ⁻⁸
x3 ² x3 ² x5	b33335	-8.41367*10 ⁻⁹	b33335	8.02707*10 ⁻¹⁰
x4 ² x4 ² x1	b44441	0.001883678150356483	b44441	-0.011140894229870016
x4 ² x4 ² x2	b44442	-0.02890427205665526	b44442	0.22796873638124193
x4 ² x4 ² x3	b44443	-0.002289522594086448	b44443	-0.0012002181716663798
x4 ² x4 ² x5	b44445	-0.0006616898952467411	b44445	-0.0005761541492764124
x5 ² x5 ² x1	b55551	-5.31641*10 ⁻⁹	b55551	1.20817*10 ⁻⁸
x5 ² x5 ² x2	b55552	1.85117*10 ⁻⁷	b55552	-1.03861*10 ⁻⁶
x5 ² x5 ² x3	b55553	8.90155*10 ⁻⁹	b55553	-8.24394*10 ⁻⁹
x5 ² x5 ² x4	b55554	-3.13807*10 ⁻⁸	b55554	-1.67545*10 ⁻⁷
x1 ³ x2 ²	b11122	-0.000041209556612222525	b11122	0.000013611149873807645
x1 ³ x3 ²	b11133	-7.13021*10 ⁻⁹	b11133	6.49455*10 ⁻⁸
x1 ³ x4 ²	b11144	-0.00006460775388635386	b11144	0.00013271712700376544
x1 ³ x5 ²	b11155	2.51585*10 ⁻⁷	b11155	-4.43127*10 ⁻⁷
x2 ³ x1 ²	b22211	-0.000488569510636303	b22211	0.000583856574284233
x2 ³ x3 ²	b22233	-0.0002102638813478494	b22233	0.00004018302720367611
x2 ³ x4 ²	b22244	-0.07333693324916302	b22244	0.39145863091768385
x2 ³ x5 ²	b22255	0.000012687083954809241	b22255	-0.00024890838988181243
x3 ³ x1 ²	b33311	-2.18596*10 ⁻⁸	b33311	-1.5839*10 ⁻⁸
x3 ³ x2 ²	b33322	-5.9262*10 ⁻⁶	b33322	3.62233*10 ⁻⁶
x3 ³ x4 ²	b33344	-4.49946*10 ⁻⁶	b33344	-3.4705*10 ⁻⁶
x3 ³ x5 ²	b33355	-6.87736*10 ⁻¹⁰	b33355	-8.46736*10 ⁻⁹
x1 ³ x2x3	b11123	1.25222*10 ⁻⁶	b11123	-2.97248*10 ⁻⁶
x1 ³ x2x4	b11124	0.000010783571584068865	b11124	0.0000658409915786752
x1 ³ x2x5	b11125	1.60345*10 ⁻⁶	b11125	5.00595*10 ⁻⁶
x1 ³ x3x4	b11134	-1.44973*10 ⁻⁶	b11134	-8.78463*10 ⁻⁷
x1 ³ x3x5	b11135	-8.5712*10 ⁻⁸	b11135	-1.01494*10 ⁻⁷
x1 ³ x4x5	b11145	9.15908*10 ⁻⁶	b11145	-0.000019564690137878697
x2 ³ x1x3	b22213	0.00023642435444792937	b22213	0.0013001605979916459
x2 ³ x1x4	b22214	-0.0003050010275239482	b22214	-0.029647028697498523
x2 ³ x1x5	b22215	-0.000030742267184236796	b22215	-0.0006932390191587897
x2 ³ x3x4	b22234	0.00339699175966273	b22234	-0.005538054027225196
x2 ³ x3x5	b22235	0.0003321696114065144	b22235	-0.00006423307999100292
x2 ³ x4x5	b22245	0.006322081048020719	b22245	-0.04108244866057516
x3 ³ x1x2	b33312	2.22807*10 ⁻⁸	b33312	6.94932*10 ⁻⁷
x3 ³ x1x4	b33314	1.30989*10 ⁻⁷	b33314	6.99037*10 ⁻⁷
x3 ³ x1x5	b33315	2.63475*10 ⁻⁸	b33315	6.20019*10 ⁻⁸
x3 ³ x2x4	b33324	2.78753*10 ⁻⁶	b33324	-9.6303*10 ⁻⁶
x3 ³ x2x5	b33325	2.50981*10 ⁻⁷	b33325	-4.66916*10 ⁻⁷

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x3 ³ x4x5	b33345	1.53756*10 ⁻⁷	b33345	1.60964*10 ⁻⁸
x4 ³ x1x2	b44412	0.0008753971200774101	b44412	-0.03031236549522819
x4 ³ x1x3	b44413	0.0002597162590875082	b44413	0.0005993086898752561
x4 ³ x1x5	b44415	-0.0005842179917796008	b44415	0.0015689404986037984
x4 ³ x2x3	b44423	0.002018518047034117	b44423	-0.003902743437859007
x4 ³ x2x5	b44425	0.006040406873721648	b44425	-0.0386683688177374
x4 ³ x3x5	b44435	0.00020266648040576297	b44435	-9.43416*10 ⁻⁶
x5 ³ x1x2	b55512	-3.91958*10 ⁻⁷	b55512	4.75596*10 ⁻⁶
x5 ³ x1x3	b55513	-3.22781*10 ⁻⁸	b55513	-1.13421*10 ⁻⁸
x5 ³ x1x4	b55514	1.42906*10 ⁻⁶	b55514	-2.19346*10 ⁻⁶
x5 ³ x2x3	b55523	-7.5728*10 ⁻⁷	b55523	1.90736*10 ⁻⁶
x5 ³ x2x4	b55524	-9.02067*10 ⁻⁶	b55524	0.00006544754396585357
x5 ³ x3x4	b55534	-2.97623*10 ⁻⁷	b55534	4.44564*10 ⁻⁷
x1 ² x2 ² x3	b11223	0.000023102915035875386	b11223	9.81761*10 ⁻⁶
x1 ² x2 ² x4	b11224	0.00037047592579051076	b11224	-0.0009170899846077253
x1 ² x2 ² x5	b11225	0.00005680363045858848	b11225	-0.000050470634653761805
x1 ² x3 ² x2	b11332	6.05282*10 ⁻⁷	b11332	-1.58168*10 ⁻⁷
x1 ² x3 ² x4	b11334	-1.73166*10 ⁻⁷	b11334	8.0458*10 ⁻⁸
x1 ² x3 ² x5	b11335	3.72975*10 ⁻⁸	b11335	-3.55681*10 ⁻⁸
x1 ² x4 ² x2	b11442	0.00021542500030369518	b11442	-0.0006606659658395415
x1 ² x4 ² x3	b11443	-5.92486*10 ⁻⁶	b11443	0.000015750051343812597
x1 ² x4 ² x5	b11445	0.0000987746966537119	b11445	-0.00019725008625738562
x1 ² x5 ² x2	b11552	-1.16391*10 ⁻⁶	b11552	-4.47429*10 ⁻⁶
x1 ² x5 ² x3	b11553	7.05923*10 ⁻⁹	b11553	3.52961*10 ⁻⁸
x1 ² x5 ² x4	b11554	-9.71935*10 ⁻⁶	b11554	0.000018184687786935523
x2 ² x3 ² x1	b22331	7.84306*10 ⁻⁶	b22331	0.00005082135014711729
x2 ² x3 ² x4	b22334	0.00015758724807159568	b22334	-0.0003861281034198089
x2 ² x3 ² x5	b22335	0.000016477652228707226	b22335	-0.00001814189962819031
x3 ² x4 ² x1	b33441	9.96685*10 ⁻⁶	b33441	0.00003664731341232086
x3 ² x4 ² x2	b33442	0.0001222997955613792	b33442	-0.0003855454080064062
x3 ² x4 ² x5	b33445	9.63517*10 ⁻⁶	b33445	1.49502*10 ⁻⁷
x4 ² x5 ² x1	b44551	0.00002217725836436553	b44551	-0.00001933567905557532
x4 ² x5 ² x2	b44552	-0.00012195668478170605	b44552	0.0009202351447448881
x4 ² x5 ² x3	b44553	-4.34123*10 ⁻⁶	b44553	0.000012309509857693283
x1 ² x2x3x4	b111234	-0.000025869490358062436	b111234	-0.000024707300275548125
x1 ² x2x3x4	b111235	-2.78753*10 ⁻⁶	b111235	4.77445*10 ⁻⁶
x1 ² x3x4x5	b111345	3.13576*10 ⁻⁶	b111345	1.35589*10 ⁻⁷
x1 ² x2x4x5	b111245	-0.000025223829201026844	b111245	0.00006017561983451974
x2 ² x1x3x4	b22134	0.0001106001208081392	b22134	-0.0018343037804990669
x2 ² x1x3x5	b22135	-0.00004509622549385439	b22135	-0.00012575367441450258
x2 ² x1x4x5	b22145	-0.00019038670787944353	b22145	0.004644506425462969
x2 ² x3x4x5	b222345	-0.0005728849089328304	b222345	0.0018363055351509887
x3 ² x1x2x4	b33124	5.1856*10 ⁻⁶	b33124	-0.00003396392781842715

Tablo A.1 (devam) : Çalışma datası değerlerine göre kaynak giriş değişkenleri ve katsayıları

Giriş Parametresi	FH		FW	
	Katsayı	Katsayı Değeri	Katsayı	Katsayı Değeri
x3 ² x1x2x5	b33125	-1.00456*10 ⁻⁶	b33125	-2.68914*10 ⁻⁶
x3 ² x2x4x5	b33245	-0.000017955753130994343	b33245	0.00007296006499380937
x3 ² x1x4x5	b33145	-8.18741*10 ⁻⁷	b33145	-3.33983*10 ⁻⁶
x4 ² x1x2x3	b44123	0.00015219038172093618	b44123	-0.0016147236605563676
x4 ² x1x2x5	b44125	-0.00043108082203824273	b44125	0.004848588521865795
x4 ² x1x3x5	b44135	-0.0000394666842085014	b44135	-0.00008632224536883897
x4 ² x2x3x5	b44235	-0.00047693862454916444	b44235	0.001560156411593724
x5 ² x1x2x3	b55123	2.82955*10 ⁻⁶	b55123	-1.36237*10 ⁻⁶
x5 ² x1x2x4	b55124	0.000029229797979890273	b55124	-0.00038263888888919503
x5 ² x2x3x4	b55234	0.000040949074074067	b55234	-0.00019335648148145767
x5 ² x1x3x4	b55134	6.8971*10 ⁻⁷	b55134	2.01231*10 ⁻⁶
x1x2x3x4x5	b12345	-6.86553*10 ⁻⁶	b12345	0.0002718276515151232

Tablo A.2 : Çalışma datasına göre BH ve BW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

NO	BH			BW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
1	0.621979	0.672	0.0500208	5.6233	5.664	0.0407014
2	0.441056	0.412	0.0290556	5.14844	5.197	0.0485556
3	0.641333	0.593	0.0483333	7.1335	7.058	0.0755
4	0.602632	0.63	0.0273681	6.90876	6.895	0.0137569
5	0.805069	0.743	0.0620694	6.07114	5.96	0.111139
6	0.761896	0.803	0.0411042	5.71012	5.732	0.0218819
7	0.817618	0.878	0.0603819	6.84306	6.989	0.145938
8	0.859417	0.82	0.0394167	7.86568	7.809	0.0566806
9	0.519979	0.437	0.0829792	8.88067	8.75	0.130674
10	0.551951	0.593	0.0410486	10.0408	9.993	0.0478403
11	0.772396	0.852	0.0796042	9.79273	9.993	0.200271
12	0.773674	0.736	0.0376736	10.7088	10.687	0.0217569
13	0.857924	0.965	0.107076	9.96545	10.237	0.271549
14	0.719146	0.654	0.0651458	9.16903	9.076	0.0930347
15	0.901701	0.798	0.103701	9.80615	9.465	0.341146
16	0.646229	0.708	0.0617708	10.0304	10.193	0.162632
17	0.772042	0.805	0.0329583	11.589	11.679	0.0899722
18	1.11199	1.1	0.0119931	11.8487	11.848	0.0007152
19	0.501271	0.47	0.0312708	12.1248	12	0.124771
20	0.934694	0.945	0.0103056	13.8855	13.921	0.0355139
21	0.911007	0.866	0.0450069	10.7714	10.611	0.16041
22	1.11496	1.139	0.0240417	12.3318	12.403	0.0711528
23	1.08468	1.128	0.0433194	12.6648	12.86	0.195208
24	1.10635	1.084	0.0223542	13.452	13.346	0.105951
25	0.289187	0.245	0.0441875	4.04234	4.104	0.0616597
26	0.337743	0.34	0.00225694	3.65817	3.418	0.240174
27	0.469188	0.51	0.0408125	4.86706	4.875	0.0079375
28	0.500882	0.502	0.00111806	4.91142	5.082	0.170576
29	0.488715	0.557	0.0682847	4.29078	4.37	0.0792153
30	0.619354	0.593	0.0263542	3.8487	3.948	0.0992986
31	0.51491	0.45	0.0649097	5.23381	5.085	0.148813
32	0.603021	0.626	0.0229792	5.0187	4.989	0.0297014
33	0.40375	0.458	0.05425	5.89878	5.874	0.0247778
34	0.417389	0.447	0.0296111	6.35819	6.74	0.381806
35	0.5115	0.464	0.0475	7.10842	6.994	0.114417
36	0.540361	0.504	0.0363611	7.26161	7.019	0.242611
37	0.817444	0.715	0.102444	6.98097	6.724	0.256972
38	0.727417	0.746	0.0185833	6.53306	6.433	0.100056
39	0.600306	0.696	0.0956944	6.84383	7.24	0.396167

Tablo A.2 (devam) : Çalışma datasına göre BH ve BW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

NO	BH			BW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
40	0.602833	0.591	0.0118333	7.20514	7.166	0.0391389
41	0.776063	0.766	0.0100625	8.79988	8.763	0.0368819
42	0.537868	0.506	0.0318681	8.72163	8.58	0.141632
43	0.665313	0.672	0.0066875	9.54552	9.652	0.106479
44	0.707757	0.743	0.0352431	9.87997	9.952	0.0720347
45	0.97684	1.011	0.0341597	8.67524	8.853	0.177757
46	0.658229	0.666	0.00777083	9.61324	9.614	0.0007569
47	0.814785	0.784	0.0307847	9.28835	9.041	0.247354
48	0.796146	0.785	0.0111458	9.40116	9.47	0.0688403
49	0.006833	0.001	0.00583333	2.35736	2.255	0.102361
50	0.250201	0.277	0.0267986	2.80638	2.998	0.191618
51	0.273479	0.281	0.00752083	3.23444	3.302	0.0675625
52	0.448486	0.42	0.0284861	3.32882	3.172	0.156819
53	0.068215	0.062	0.00621528	1.29808	1.33	0.0319236
54	0.15375	0.139	0.01475	1.72118	1.6	0.121181
55	0.392472	0.397	0.00452778	2.81413	2.817	0.002875
56	0.361562	0.378	0.0164375	2.95462	3.041	0.0863819
57	0.411271	0.44	0.0287292	5.17655	5.332	0.155451
58	0.45666	0.386	0.0706597	5.68397	5.35	0.333965
59	0.477104	0.445	0.0321042	5.50085	5.415	0.0858542
60	0.324965	0.399	0.0740347	5.05463	5.319	0.264368
61	0.700632	0.696	0.00463194	5.54558	5.531	0.0145764
62	0.528437	0.575	0.0465625	5.44291	5.636	0.19309
63	0.807993	0.816	0.00800694	4.89002	4.835	0.0550208
64	0.624938	0.575	0.0499375	6.40849	6.285	0.123493
65	0.381896	0.359	0.0228958	6.47209	6.419	0.0530903
66	0.575139	0.619	0.0438611	7.37765	7.52	0.142347
67	0.467417	0.492	0.0245833	7.68771	7.706	0.0182917
68	0.503549	0.548	0.0455486	7.70855	7.601	0.107549
69	0.525153	0.536	0.0108472	6.21435	6.197	0.0173472
70	0.515813	0.484	0.0318125	6.14391	6.072	0.0719097
71	0.670535	0.658	0.0125347	7.42785	7.48	0.0521458
72	0.7645	0.798	0.0335	7.87989	7.917	0.0371111

Tablo A.3 : Çalışma datasına göre FH ve FW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

NO	FH			FW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
1	-0.104688	-0.149	0.0443125	6.06785	6.09	0.0221458
2	0.004888	0.027	0.0221111	6.3929	6.411	0.0180972
3	-0.221153	-0.179	0.0421528	7.45325	7.432	0.02125
4	-0.286049	-0.306	0.0199514	7.30599	7.287	0.0189931
5	0.098833	0.155	0.0561667	6.75567	6.676	0.0796667
6	0.132965	0.099	0.0339653	6.78458	6.824	0.0394236
7	-0.074993	-0.129	0.0540069	6.93023	7.009	0.0787708
8	-0.108806	-0.077	0.0318056	7.49853	7.46	0.0385278
9	-0.106146	-0.017	0.0891458	8.74823	8.664	0.0842292
10	-0.205257	-0.25	0.0447431	8.77826	8.782	0.00374306
11	-0.468174	-0.553	0.0848264	9.67456	9.757	0.0824375
12	-0.460424	-0.42	0.0404236	10.376	10.374	0.00195139
13	-0.232146	-0.345	0.112854	9.58373	9.783	0.199271
14	-0.111451	-0.043	0.0684514	8.92178	8.803	0.118785
15	-0.242535	-0.134	0.108535	9.94748	9.75	0.197479
16	-0.103868	-0.168	0.0641319	10.231	10.348	0.116993
17	-0.554167	-0.599	0.0448333	11.2859	11.348	0.0620833
18	-0.767632	-0.745	0.0226319	11.5128	11.491	0.0218403
19	-0.296674	-0.254	0.0426736	11.2982	11.237	0.0611875
20	-0.662528	-0.683	0.0204722	12.9251	12.946	0.0209444
21	-0.288687	-0.232	0.0566875	9.4576	9.338	0.119604
22	-0.522514	-0.557	0.0344861	12.2686	12.348	0.0793611
23	-0.568472	-0.623	0.0545278	11.6483	11.767	0.118708
24	-0.649326	-0.617	0.0323264	12.6115	12.533	0.0784653
25	0.095770	0.123	0.0272292	5.28606	5.355	0.0689375
26	0.090826	0.108	0.0171736	5.32242	5.173	0.149424
27	-0.021090	-0.044	0.0229097	5.90373	5.833	0.0707292
28	-0.068506	-0.09	0.0214931	5.67978	5.831	0.151215
29	0.301937	0.251	0.0509375	5.6099	5.656	0.0461042
30	0.223465	0.23	0.0065347	5.52762	5.562	0.0343819
31	0.133382	0.18	0.0466181	5.75531	5.711	0.0443125
32	0.122215	0.12	0.0022152	5.88617	5.85	0.0361736
33	-0.1575	-0.213	0.0555	6.406	6.348	0.058
34	-0.156694	-0.19	0.0333056	6.77303	6.992	0.218972
35	-0.198861	-0.152	0.0468611	7.10142	7.163	0.0615833
36	-0.254944	-0.213	0.0419444	7.47256	7.25	0.222556
37	-0.266917	-0.164	0.102917	7.46008	7.288	0.172083
38	-0.098888	-0.113	0.0141111	6.95489	6.966	0.0111111
39	-0.012722	-0.107	0.0942778	6.8865	7.055	0.1685

Tablo A.3 (devam) : Çalışma datasına göre FH ve FW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

NO	FH			FW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
40	-0.023472	-0.018	0.0054722	7.55653	7.549	0.00752778
41	-0.603271	-0.575	0.0282708	8.34794	8.337	0.0109375
42	-0.283132	-0.267	0.0161319	8.67455	8.605	0.0695486
43	-0.361049	-0.385	0.0239514	9.09985	9.109	0.00914583
44	-0.543549	-0.564	0.0204514	9.59866	9.67	0.0713403
45	-0.504021	-0.556	0.0519792	8.63002	8.756	0.125979
46	-0.195576	-0.188	0.0075763	9.48749	9.442	0.0454931
47	-0.35666	-0.309	0.0476597	9.13919	9.015	0.124188
48	-0.314743	-0.318	0.0032569	9.2533	9.297	0.0437014
49	0.339917	0.357	0.0170833	5.07308	4.982	0.0910833
50	0.207285	0.168	0.0392847	4.76667	4.898	0.131326
51	0.107243	0.088	0.0192431	4.92802	5.02	0.0919792
52	0.048555	0.09	0.0414444	4.55522	4.423	0.132222
53	0.395229	0.39	0.0052291	4.74644	4.78	0.0335625
54	0.459569	0.487	0.0274306	5.06581	4.992	0.0738056
55	0.372611	0.38	0.0073888	5.26546	5.231	0.0344583
56	0.42359	0.394	0.0295903	5.2623	5.337	0.0747014
57	-0.287354	-0.321	0.0336458	5.70477	5.847	0.142229
58	-0.230049	-0.152	0.0780486	5.92672	5.704	0.222715
59	-0.192965	-0.155	0.0379653	6.11102	5.967	0.144021
60	-0.007631	-0.09	0.0823681	5.66749	5.892	0.224507
61	-0.245937	-0.236	0.0099375	6.01119	5.984	0.0271875
62	0.12134	0.067	0.0543403	5.92233	6.03	0.107674
63	-0.060743	-0.075	0.0142569	5.53302	5.562	0.0289792
64	0.079340	0.138	0.0586597	6.65547	6.546	0.109465
65	-0.233562	-0.217	0.0165625	6.14315	6.092	0.0511458
66	-0.300236	-0.339	0.0387639	7.24361	7.335	0.0913889
67	-0.230278	-0.249	0.0187222	7.66696	7.719	0.0520417
68	-0.436924	-0.396	0.0409236	7.72528	7.633	0.0922847
69	-0.005291	-0.01	0.0047083	6.40238	6.396	0.006375
70	0.047090	0.074	0.0269097	6.89687	6.863	0.0338681
71	-0.207868	-0.201	0.0068680	7.04652	7.052	0.00547917
72	-0.328931	-0.358	0.0290694	7.72424	7.759	0.0347639

Tablo A.4 : Kontrol datasına göre BH ve BW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

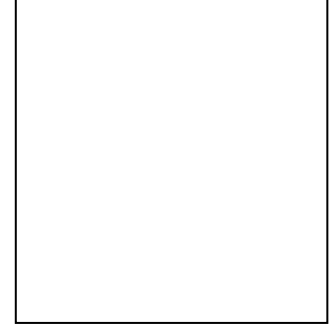
NO	BH			BW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
1	0.811847	0.801	0.0108472	5.6109	5.541	0.0698958
2	0.671153	0.682	0.0108472	4.5631	4.633	0.0698958
3	0.795153	0.806	0.0108472	6.9561	7.026	0.0698958
4	0.567847	0.557	0.0108472	7.5499	7.48	0.0698958
5	0.691306	0.713	0.0216944	8.20021	8.34	0.139792
6	0.828694	0.807	0.0216944	8.77979	8.64	0.139792
7	0.709694	0.688	0.0216944	9.85679	9.717	0.139792
8	0.983306	1.005	0.0216944	10.9482	11.088	0.139792
9	0.723847	0.713	0.0108472	11.2119	11.142	0.0698958
10	0.792153	0.803	0.0108472	11.3001	11.37	0.0698958
11	1.07915	1.09	0.0108472	14.0761	14.146	0.0698958
12	1.15885	1.148	0.0108472	12.7819	12.712	0.0698958
13	0.403306	0.425	0.0216944	4.91721	5.057	0.139792
14	0.400694	0.379	0.0216944	4.02379	3.884	0.139792
15	0.536694	0.515	0.0216944	5.10979	4.97	0.139792
16	0.518306	0.54	0.0216944	4.62821	4.768	0.139792
17	0.656389	0.613	0.0433889	6.58358	6.304	0.279583
18	0.520611	0.564	0.0433889	7.16042	7.44	0.279583
19	0.566611	0.61	0.0433889	7.27742	7.557	0.279583
20	0.500389	0.457	0.0433889	7.58958	7.31	0.279583
21	0.846306	0.868	0.0216944	7.90721	8.047	0.139792
22	0.801694	0.78	0.0216944	8.60579	8.466	0.139792
23	0.803694	0.782	0.0216944	10.4168	10.277	0.139792
24	0.825306	0.847	0.0216944	10.2872	10.427	0.139792
25	0.325847	0.315	0.0108472	3.1159	3.046	0.0698958
26	0.321153	0.332	0.0108472	2.7401	2.81	0.0698958
27	0.573153	0.584	0.0108472	3.9641	4.034	0.0698958
28	0.373847	0.363	0.0108472	2.9269	2.857	0.0698958
29	0.473306	0.495	0.0216944	4.69621	4.836	0.139792
30	0.372694	0.351	0.0216944	5.06179	4.922	0.139792
31	0.750694	0.729	0.0216944	5.34079	5.201	0.139792
32	0.547306	0.569	0.0216944	5.15921	5.299	0.139792
33	0.758847	0.748	0.0108472	6.8449	6.775	0.0698958
34	0.528153	0.539	0.0108472	6.2651	6.335	0.0698958
35	0.639153	0.65	0.0108472	7.7991	7.869	0.0698958
36	0.567847	0.557	0.0108472	7.7769	7.707	0.0698958

Tablo A.5 : Kontrol datasına göre FH ve FW için ölçülmüş ve hesaplanmış değerler.

NO	FH			FW		
	HD	ÖD	SAPMA	HD	ÖD	SAPMA
1	-0.0815625	-0.066	0.0155625	6.15013	6.123	0.0271319
2	0.129563	0.114	0.0155625	5.95187	5.979	0.0271319
3	-0.197438	-0.213	0.0155625	7.39687	7.424	0.0271319
4	0.0184375	0.034	0.0155625	7.54313	7.516	0.0271319
5	-0.135875	-0.167	0.031125	8.42674	8.481	0.0542639
6	-0.327125	-0.296	0.031125	8.98226	8.928	0.0542639
7	-0.250125	-0.219	0.031125	9.73126	9.677	0.0542639
8	-0.416875	-0.448	0.031125	10.4687	10.523	0.0542639
9	-0.296562	-0.281	0.0155625	10.8981	10.871	0.0271319
10	-0.436438	-0.452	0.0155625	10.8029	10.83	0.0271319
11	-0.635438	-0.651	0.0155625	13.9589	13.986	0.0271319
12	-0.755562	-0.74	0.0155625	12.3001	12.273	0.0271319
13	0.175125	0.144	0.031125	5.41974	5.474	0.0542639
14	0.192875	0.224	0.031125	5.50326	5.449	0.0542639
15	-0.008125	0.023	0.031125	5.81226	5.758	0.0542639
16	0.072125	0.041	0.031125	5.70374	5.758	0.0542639
17	-0.15625	-0.094	0.06225	6.77353	6.665	0.108528
18	-0.09175	-0.154	0.06225	7.29347	7.402	0.108528
19	-0.11675	-0.179	0.06225	7.50547	7.614	0.108528
20	-0.06725	-0.005	0.06225	7.61453	7.506	0.108528
21	-0.401875	-0.433	0.031125	7.95674	8.011	0.0542639
22	-0.480125	-0.449	0.031125	8.52726	8.473	0.0542639
23	-0.427125	-0.396	0.031125	9.70626	9.652	0.0542639
24	-0.521875	-0.553	0.031125	9.71874	9.773	0.0542639
25	0.438437	0.454	0.0155625	5.60813	5.581	0.0271319
26	0.208563	0.193	0.0155625	4.61787	4.645	0.0271319
27	0.0385625	0.023	0.0155625	5.61887	5.646	0.0271319
28	0.203437	0.219	0.0155625	5.56513	5.538	0.0271319
29	0.088125	0.057	0.031125	5.54574	5.6	0.0542639
30	0.123875	0.155	0.031125	6.05626	6.002	0.0542639
31	-0.220125	-0.189	0.031125	5.91326	5.859	0.0542639
32	-0.150875	-0.182	0.031125	6.06974	6.124	0.0542639
33	-0.383562	-0.368	0.0155625	6.95413	6.927	0.0271319
34	-0.138437	-0.154	0.0155625	6.84987	6.877	0.0271319
35	-0.334437	-0.35	0.0155625	7.60287	7.63	0.0271319
36	-0.240562	-0.225	0.0155625	7.58013	7.553	0.0271319

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Fatih TURHAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.11.1983-İZMİR
E-posta : fatih_turhan@hotmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007,Balıkesir Üniversitesi,Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 2008-2013 Şantiye Mühendisi (Mekanik Şantiye Şefi), Baltas Mühendislik,
BALIKESİR.
- 2013-.....Üretim Şefi, Genç Makine Isı Sistemleri, MANİSA