



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.08.2021  
Kabul Tarihi : 04.10.2021

Received Date : 25.08.2021  
Accepted Date : 04.10.2021

### ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PROSES PARAMETRELERİNİN ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

### NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS PARAMETERS ON TENSILE STRENGTH

Oğuz DOĞAN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-4203-8237)

Çağrı UZAY<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-3852-1031)

Muhammed Safa KAMER<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-7713-8951)

<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Oğuz DOĞAN, oguzdogan@ksu.edu.tr

#### ÖZET

Kaynak prosesi başta otomotiv sektörü olmak üzere, endüstride çelik sacların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik direnç kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre kolay uygulanabilirlik, otomasyona uygunluk, dolgu metali gerektirmemesi vb. avantajlar gibi bir çok avantaja sahiptir. Elektrik direnç kaynağı uzun yıllardır bilinen bir işlem olmasına rağmen otomotiv endüstrisinde çok fazla kullanıldığı için üzerinde en çok çalışılan kaynak yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada, elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin çekme dayanımı üzerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Akım, sıkıştırma kuvveti ve kaynak süresi parametreleri değişken olarak ele alınmıştır. Dokuz farklı sonlu elemanlar kaynak analizi sonucunda elde edilen birleştirilmiş sac parçalar çekme analizine girdi olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda maksimum punta çapı ve çekme kuvvet değerleri çıktı olarak ele alınmıştır. Elde edilen çıktılar varyans analizi (ANOVA) tabii tutularak hangi parametrenin çekme dayanımı üzerine daha etkili olduğu araştırılmıştır. Sonuç olarak, akım ve zamanın artması ile çekme mukavemet değerlerinin arttığı, sıkıştırma kuvvetinin artması ile mukavemetin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma ayrıca, sonuçların minimum hata ile yaklaşık olarak tahmin edilebileceği ampirik denklemler de önermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik direnç kaynağı, sonlu elemanlar yöntemi, çekme testi, ANOVA, Simufact Welding

#### ABSTRACT

Welding is widely used joining method of the steel sheets in many industry especially in automotive. Compared to the other welding processes, the method provides ease of handling, simple implementation, is suitable for automation, no need any filler material, and etc. Although the resistance spot welding is the most commonly known method and has been applied for a long time, the research studies have continued since it is used highly in automotive industry. In this study, the effects of process parameters of resistance spot welding on tensile properties were investigated by using finite element method. Current, compression force, and welding time are considered process variables. Nine different finite element analyses (FEA) were conducted based on the welding parameters and the joined steel sheets obtained from FEA were defined as input into tensile analysis. The welding simulations and tensile test analysis yielded the maximum weld diameter and maximum tensile force values, respectively. The analysis of variance (ANOVA) was also carried out to examine which welding parameter is more significant on the tensile properties and weld size. As a result, while tensile properties increase with the increase of current and welding time, the increase of compression force decreases the maximum tensile forces. The study also recommends empirical equations to predict the approximate values of the responses with minimum error.

**Keywords:** Resistance spot welding, finite element method, tensile test, ANOVA, Simufact Welding

**To Cite:** DOĞAN, O., UZAY, Ç., & KAMER, M.S., (2021). ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PROSES PARAMETRELERİNİN ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4),319-331.

## GİRİŞ

Kaynak işlemleri, otomotiv endüstrisinde, farklı ve aynı tip çelik sacların birleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde otomotiv endüstrisinde elektrik direnç kaynağı en çok kullanılan birleştirme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Binek araçlarda ortalama 4000 ile 6000 arasında elektrik direnç kaynağı bulunmaktadır. Bu nedenle otomotiv endüstrisinde elektrik direnç kaynağı her zaman önemini korumaktadır (Özgül & Arslan, 2018). Doruk (2016), otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağının önemini ve uygulama alanlarını açıklamıştır.

Literatür incelendiğinde elektrik direnç kaynağı üzerine gerçekleştirilen birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunun elektrik direnç kaynağı işlem parametrelerinin kaynak performansına etkilerinin araştırılması üzerine olmuştur. Antika vd. (2018), TRIP ve DP çeliklerini farklı kaynak akımı ve kaynak sürelerinde kaynatarak hazırladıkları numuneleri çekme makaslama, mekanize soyma ve sertlik testlerine tabii tutmuşlardır. Mekanize soyma ve çekme makaslama dayanımlarının, artan kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak arttığını, ayrıca kaynak çekirdeğinin sertlik değerinin de esas metale göre yaklaşık %70 arttığını belirlemişlerdir. Özçatalbaş vd. (2018), AISI 304 paslanmaz çeliğin elektrik direnç kaynağındaki akım şiddeti ve soğutma ortamının, birleştirmenin mekanik özelliklerine ve mikro yapısına etkisini araştırmışlardır. Üç farklı akım şiddeti ve soğutma ortamında yaptıkları birleştirme numunelerine çekme-makaslama ve sertlik deneyleri yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda, uygun birleştirme özelliklerinin 7,5 kA akımda ve hava soğutmalı ortamda sağlandığını, akım şiddetinin artmasıyla çekme makaslama dayanımının artmasına rağmen birleştirmenin aşırı bir şekilde deforme olduğunu belirlemişlerdir.

Elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerine etkilerinin incelenmesinin yanı sıra bu parametrelerinin optimize edilerek en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik de literatürde farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Özgül & Arslan (2018), Al 5754-H111 malzemesini elektrik direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımı, kaynak süresi ve sıkıştırma yükü ile birleştirerek, kaynak işlemi uyguladıkları numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kaynaklı bağlantılara çekme deneyi yapmışlardır. Kaynak parametrelerindeki değişimin kaynak mukavemetini artırabileceğini, optimum kaynak parametrelerinin analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Ertek Emre (2019), mukavemet ve kaynak çekirdek geometrisinin optimizasyonu için çeşitli kaynak parametrelerinde TWIP (Twinning Induced Plasticity) çelik sacları nokta direnç kaynağı ile birleştirmiştir. Deney numunelerinin çekme, makaslama dayanımı ve kaynak çekirdek çapının optimizasyonunu Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanarak belirlemiştir. Çekme makaslama dayanımına etki eden en önemli kaynak parametresi kaynak akımı, kaynak çekirdek çapı değeri için en etkili değişkenin kaynak zamanı olduğunu tespit etmiştir. Kekik vd. (2021), 1200M ve DP800HF AHSS sacların elektrik direnç kaynağında kullanılan kaynak akımı, kaynak zamanı ve kaynak çene baskı kuvvetlerinin kaynak çekirdeği sertliği üzerine etkisini Taguchi yöntemiyle incelemişlerdir. Elektrik direnç kaynağı işleminde kaynak performansını arttırmak ve kaynak parametrelerini optimize etmek için kullanılan Taguchi yönteminin geçerliliğini deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. DP800HF ve 1200M saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile sorunsuz bir şekilde kaynatılabildiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada farklı proses parametrelerinin elektrik direnç kaynağı dayanımı üzerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Akım, kaynak süresi ve sıkıştırma kuvveti parametreleri değişken proses parametresi olarak ele alınmıştır. Dokuz farklı sonlu elemanlar kaynak analizi sonucunda elde edilen sonuçlar çekme analizlerine girdi olarak verilmiştir. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda, her bir kaynak için kaynak çapı ve çekme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar varyans analizine (ANOVA) tabi tutularak incelenen parametreler arasında hangi parametrenin daha etkili olduğu araştırılmıştır. Oluşturulan matematiksel modellere dayanarak sonuçları yaklaşık olarak tahmin edebilen ampirik denklemler türetilmiştir.

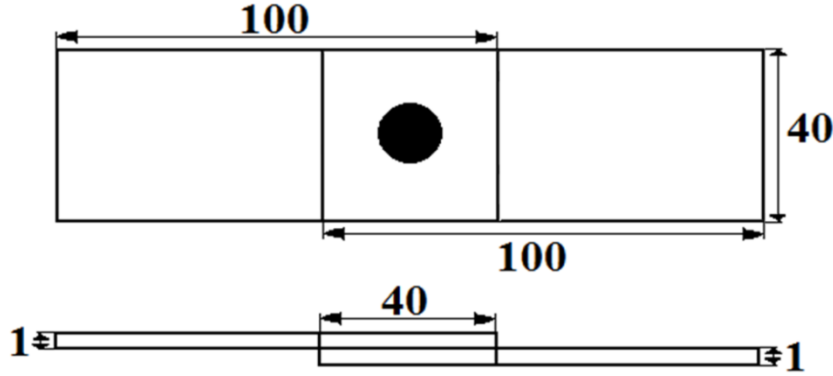
## MATERYAL VE METOT

### *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektrik Direnç Kaynağının Modellenmesi*

Bu çalışmadan elektrik direnç kaynağı prosesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik olarak modellenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elektrik direnç kaynağı sonlu elemanlar modeli Simufact Welding paket programı içerisinde bulunan “Resistance Spot Welding” modülü içerisinde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde standart sonlu elemanlar analiz prosedürü takip edilmiştir. Altı basamaktan oluşan yöntem şu şekilde sıralanabilir. Geometrinin oluşturulması, malzeme tanımı, sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması, analiz sınır şartlarının tanımlanması, analizin çalıştırılması ve sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir.

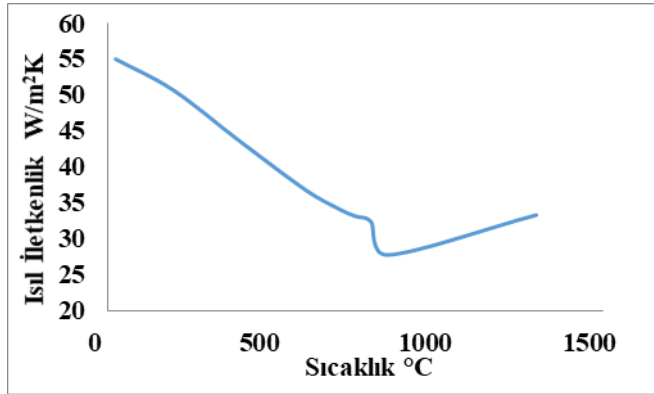
Analizin birinci basamağında analiz geometrisi oluşturulmuştur. ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 standardında belirtildiği üzere test numuneleri 100 mm boyunda, 40 mm genişliğinde ve 1 mm kalınlığında olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca test numunelerinin 40 mm uzunluğundaki kısımları üst üste Şekil 1’de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Numunelerinin tasarlanma işlemi Solidworks ortamında yapılmış olup, Simufact Welding programı içerisinde step dosya formatında gönderilmiştir.

Kaynak elektrotu olarak ise 6 mm çapında B tipi elektrik direnç kaynağı elektrotu seçilmiştir. Elektrotun modellenmesi ise doğrudan Simufact Welding programı içerisinde gerçekleştirilmiştir.

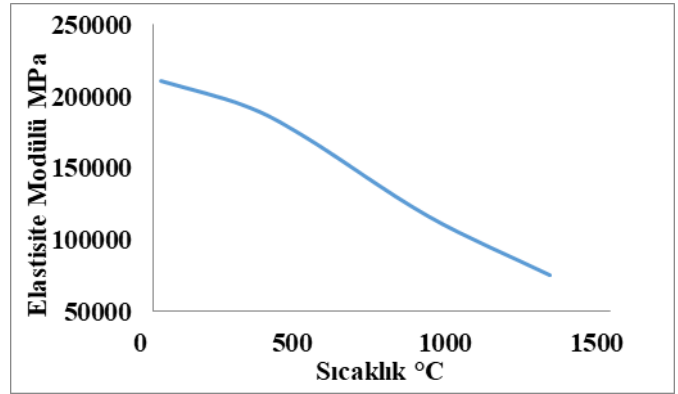


Şekil 1. Sonlu Elemanlar Test Numunelerinin Standart Boyutları

Geometrik modellemenin tamamlanmasından sonra oluşturulan geometrilere malzeme tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. SHGA370 galvanizli çelik deney numunelerinin malzemesi olarak belirlenmiştir. Elektrotlar malzemesi olarak ise bakır alaşımı tanımlanmıştır. Tanımlanan malzemeler “Simufact Material” malzeme kütüphanesinden seçilerek tanımlanmıştır. Bu nedenle malzemelerin mekanik ve termal özellikleri de otomatik olarak kütüphaneden çekilmektedir. Bu kütüphane sayesinde çok farklı malzeme için seçim yapma imkânı bulunmaktadır.



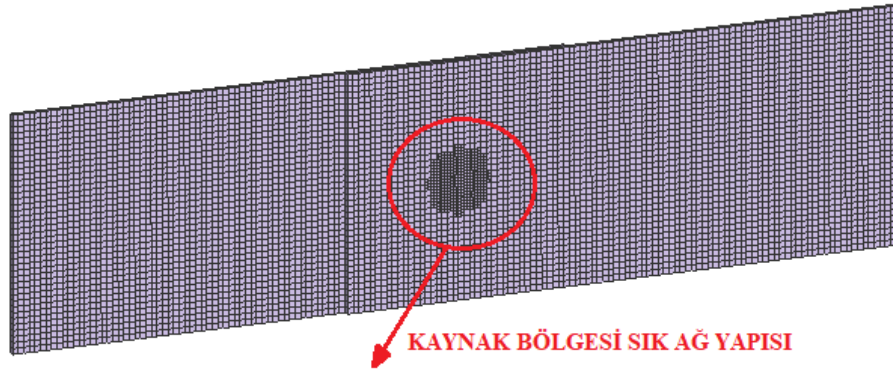
a)



b)

Şekil 2. Sıcaklığa Bağlı Malzeme Özelliklerinin Değişimi, a) Isıl İletkenlik, b) Elastisite Modülü

Malzemelerin ısı iletkenlik ve elastisite modülü değerleri kütüphane üzerinde sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2’de SHGA370 malzemesi için sıcaklığa bağlı olarak ısı iletkenlik ve elastisite modülü değişimi gösterilmektedir. Katılma sıcaklığı 1466 °C, erime sıcaklığı ise 1517 °C olarak tanımlanmıştır. Temas ısı transfer katsayısı ( $\alpha$ ) 1000 W/m<sup>2</sup>K, emisyon katsayısı ( $\epsilon$ ) 0,6 ve analizin başlangıç sıcaklığı 20 °C olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Simufact Welding programında otomatik olarak verilen standart değerler olup değiştirilmesi mümkündür.



Şekil 3. Sonlu Elemanlar Analizlerde Kullanılan Ağ Yapısının Genel Görünümü

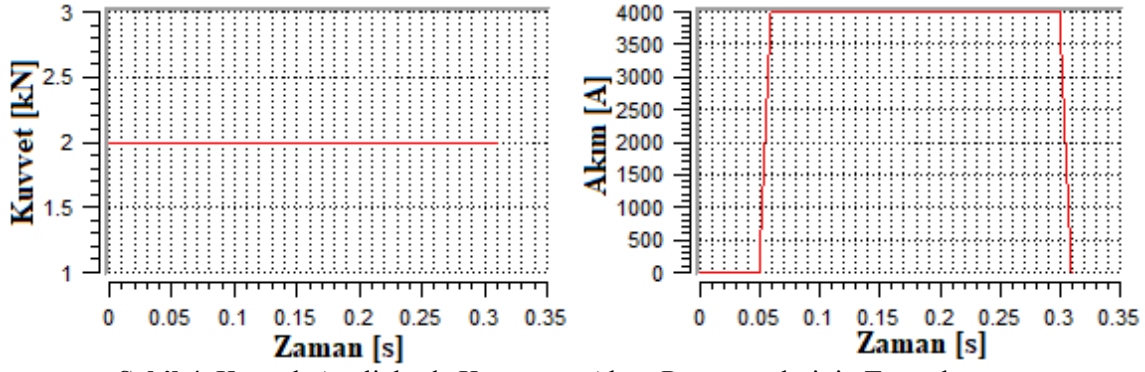
Malzeme tanımlanmasından sonra modelin ağ yapısının oluşturulması gerçekleştirilmiştir. Modelin ağ yapısı iki aşamada oluşturulmuştur. Öncelikle sac parçalara tamamına 1 mm boyutunda hexahedral yapıda ağ yapısı oluşturulmuş, ardından kaynağın yapılacağı bölge Şekil 3'te görüldüğü gibi 10 mm çapındaki bölgeye 0,25 mm boyutunda elemanlar oluşturulmuştur. Bu sayede kaynak bölgesindeki sonuçların daha doğru olması sağlanmıştır. Ayrıca kaynak işleminden etkilenmeyen diğer bölgelere gereksiz yere sık eleman oluşturulmayarak analizin çözüm süresi ve bilgisayar hafızasında kaplayacağı alan minimuma indirgenmiştir. Bu çalışmada ağdan bağımsızlık çalışması sadece kaynak bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesindeki 10 mm çapa sahip olan bölge 1 – 0,5 -0,25 ve 0,1 mm boyutlarında ağ yapıları ile sıra ile denemiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. 0,25 mm eleman boyutundan sonra kaynak bölgesinde önemli bir değişim görülmediğinden kaynak bölgesine uygulanan sık ağ yapısının eleman boyutu 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kurulan sonlu elemanlar modeli yaklaşık olarak 20000 hexahedral eleman ve 45000 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Ağ yapısının tanımlanmasından sonra modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Bu çalışmanın amacı farklı kaynak parametrelerinin kaynak dayanımı üzerine olan etkisinin görülmesi olduğundan dolayı üç farklı sıkıştırma kuvveti (1,5 kN – 2 kN – 2,5 kN), üç farklı akım (4000 A – 8000 A – 12000 A) ve üç farklı kaynak süresi (0,1 s – 0,25 s – 0,5 s) değişken parametre olarak incelenmiş ve bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları dikkate alınarak toplamda dokuz farklı deney tasarlanmıştır.

Tablo 1. Sonlu Elemanlar Kaynak Analizlerinde Kullanılan Farklı Proses Parametreleri

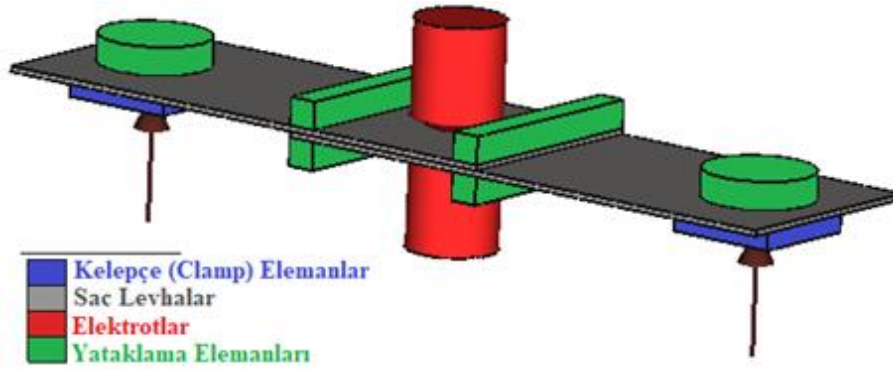
Deney No	Sıkıştırma Kuvveti (kN)	Akım (A)	Zaman (s)
1	1,5	4000	0,10
2	1,5	8000	0,25
3	1,5	12000	0,50
4	2,0	4000	0,25
5	2,0	8000	0,50
6	2,0	12000	0,10
7	2,5	4000	0,50
8	2,5	8000	0,10
9	2,5	12000	0,25

Bu çalışma için gerçekleştirilen deney tasarımı çalışması Tablo 1de gösterilmektedir. Deney 4 için, sıkıştırma kuvveti ve akımın zamana göre değişimi ise Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde öncelikle elektrot uçları kapanarak sıkma kuvveti uygulanır ardından, akım parçalar üzerine etkimektedir. Akımın sistem üzerinden kalkmasından sonra sıkma kuvveti de parçalar üzerinden kaldırılmaktadır.



Şekil 4. Kaynak Analizlerde Kuvvet ve Akım Parametrelerinin Tanımlanması

Kaynak işlemi Tablo 1’de gösterildiği gibi deney numarasının karşısında yer alan süre kadar devam etmektedir. Kaynak işleminin bitmesinin ardından analiz sanal olarak soğumaya bırakılmaktadır. Kaynak işlemi bittikten sonra analiz 150 s boyunca soğumaya bırakılmaktadır. Analiz sırasında elektrot kuvvetinden dolayı sac levhaların düz bir düzlem üzerinde sabit kalması için kelepçe (clamp) ve yataklama elemanları Şekil 5’te görüldüğü gibi eklenmiştir. Kelepçe (clamp) elemanlar sac parçaların alt yüzeylerine, yataklama elemanları ise üst yüzeye gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca 100 N değerinde kelepçeleme (clamp) kuvveti uygulanarak sistemin sabit kalması sağlanmıştır. Şekil 5’te elektrik direnç kaynağı için tanımlanan tüm sınır şartları görülmektedir. Çözüm için hazır hale getirilen analizler son olarak çözdürülerek sonuçlar incelenmiştir.

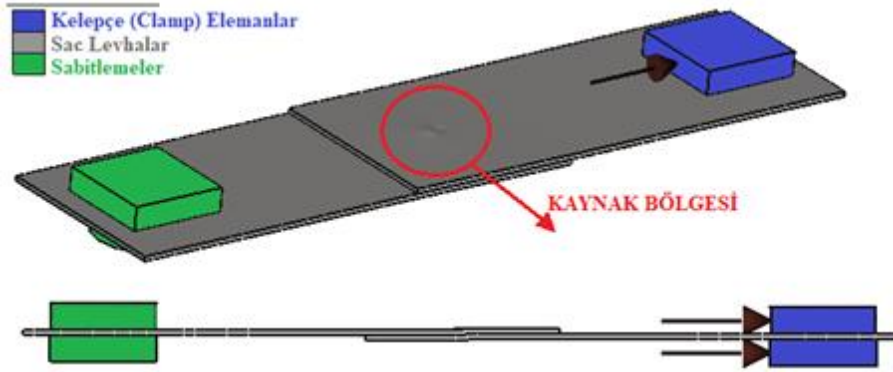


Şekil 5. Elektrik Direnç Kaynağı Sonlu Elemanlar Analizi Sınır Şartlarının Genel Görünümü

### **Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çekme Deneylerinin Modellenmesi**

Farklı proses parametrelerine göre gerçekleştirilen elektrik direnç kaynağı analizlerinin sonucunda oluşan yapıların çekme dayanımlarının tespit edilebilmesi için yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çekme analizleri gerçekleştirilmiştir. 150 s sonucunda soğuması tamamlanan elektrik direnç kaynağı analiz sonuçları, çekme analizi için girdi olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle geometri, malzeme ve ağ yapısı bilgileri doğrudan birinci analizde tanımlanan değerler ile birebir aynıdır.

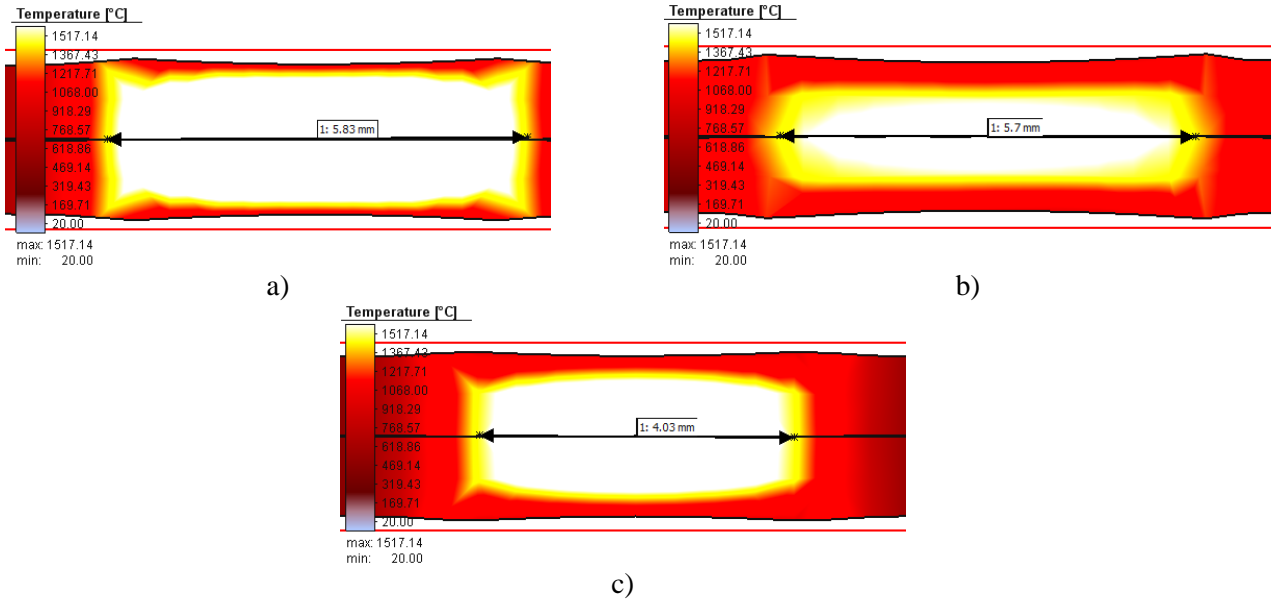
Çekme analizlerinde kaynak analizlerinden farklı olarak sistemin sınır şartları değiştirilmiştir. Şekil 6’da çekme analizleri için tanımlanan sınır şartları görülmektedir. Kaynak edilmiş sac levhaların sol tarafındaki alt ve üst uç noktalarının tüm serbestlik dereceleri sıfır olacak şekilde sabitlenmiştir. Sac levhaların sağ tarafındaki alt ve üst kısımlar ise hareketli kelepçe elemanlar ile tutturularak eksen doğrultusunda hareket ettirilmiştir. Çekme analizlerinde hareketli kelepçe elemanlar toplamda 4 mm hareketi 8 s içerisinde kat etmek sureti ile ilerletilmiştir. Her bir saniye toplamda 10 alt adıma bölünerek toplamda 80 nokta için çekme analizi gerçekleştirilmiş ve her bir nokta için kuvvet değerleri kayıt edilmiştir.



Şekil 6. Sonlu Elemanlar Çekme Analizi Sınır Şartları Genel Görünümü

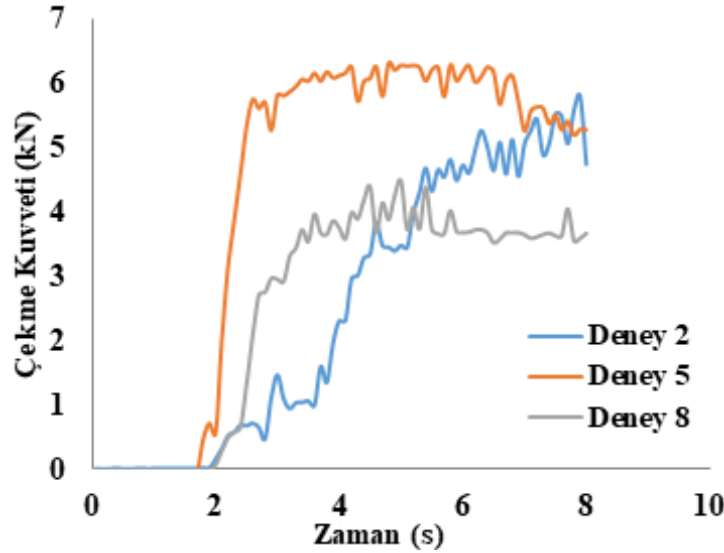
## BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektrik direnç kaynağı analizleri sonucunda, farklı proses parametreleri altında kaynak bölgesinde meydana gelen sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 7’de bazı analizler (2 – 5 ve 8 numaralı deneyler) için elde edilen kaynak bölgeleri sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, tüm analizler için alt ve üst parçalarda simetrik bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, farklı parametrelerin etkisi ise birlikte kaynak olan bölgenin boyutları ölçülerek, proses parametrelerinin kaynak bölgesine olan etkisi de incelenmiştir. Bazı parametreler altında kaynak bölgesinin büyüdüğü bazılarında ise küçüldüğü görülmektedir. Proses parametrelerinin kaynak bölgesine olan etkisi detaylı olarak varyans analizi bölümünde anlatılmıştır.



Şekil 7. Farklı Deneyler için Elde Edilen Elektrik Direnç Kaynak Bölgeleri a) Deney 2, b) Deney 5, c) Deney 8

Şekil 8’de bazı analizler (2 – 5 ve 8 numaralı deneyler) için elde edilen çekme eğrileri görülmektedir. Çekme eğrileri toplam 8 saniye için her bir saniyede 10 kuvvet değeri olacak şekilde toplam 80 değerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil incelendiğinde, en yüksek kuvvet değerinin 5. analizde olduğu görülmekle birlikte en düşük kuvvet değerlerinin ise 2. analizde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı Deneyler için Analizlerden Elde Edilen Çekme Grafikleri

Tablo 2' de tüm deneyler için kaynak çapları ve analizlerden elde edilen maksimum çekme kuvvetlerinin değişimi gösterilmektedir. Kaynak çapının artması ile birlikte maksimum çekme kuvveti değerlerinin arttığı, kaynak çapının azalması ile birlikte ise kuvvet değerlerinin azaldığı görülmektedir. En yüksek kuvvet ve kaynak çapı 3 numaralı deneyde, en düşük kaynak çapı ve kuvvet değerinin ise 1 numaralı deneyde olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin kaynak çapı ve maksimum çekme kuvvetine olan etkileri detaylı olarak ANOVA analizi bölümünde ele alınmıştır.

Tablo 2. Kaynak Çapları, Çekme Deneyi Sonuçları Deneysel Tasarımı ve Sonuç Çıktıları

Deney	Faktör 1: Sıkıştırma kuvveti (kN)	Faktör 2: Akım (A)	Faktör 3: Zaman (s)	Yanıt 1: Kaynak çapı (mm)	Yanıt 2: Maksimum çekme kuvveti (kN)
1	1,5	4000	0,1	1,20	0,21
2	1,5	8000	0,25	5,83	5,79
3	1,5	12000	0,5	8,14	8,33
4	2	4000	0,25	2,20	2,48
5	2	8000	0,5	5,70	6,31
6	2	12000	0,1	5,64	6,05
7	2,5	4000	0,5	2,36	2,47
8	2,5	8000	0,1	4,03	4,48
9	2,5	12000	0,25	7,07	7,20

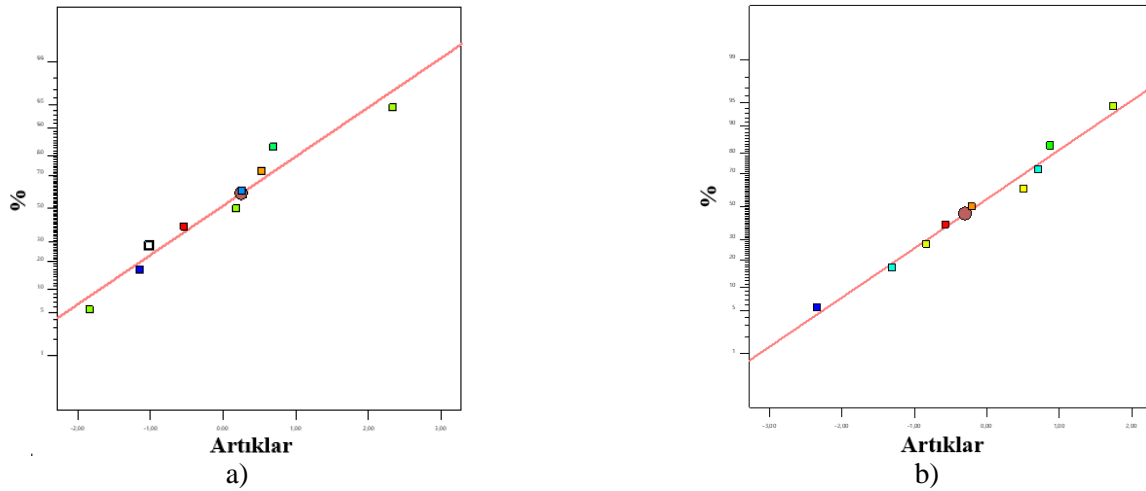
### Varyans Analizi (ANOVA)

Çalışmada göz önünde bulundurulmuş Sıkıştırma Kuvveti (F), Akım (A) ve Zaman (t) gibi kaynak parametrelerinin, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım parametreleri ve seviyeleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüzey Yanıt Metodu (RSM: Response Surface Methodology) ile Merkezi Kompozit Tasarım (CCD: Central Composite Design) yapılmış ve matematiksel ve istatistiksel olarak optimum deney şartları belirlenmiştir. CCD deneysel tasarım sayesinde her parametrenin birbiri ile olan etkisini incelemek yerine daha az sayıda ancak yeterli olabilecek kadar (Croarkin ve Tobias, 2015) etkileşim göz önünde bulundurulmuş ve daha önceki bölümlerde de belirttiği gibi toplam dokuz farklı konfigürasyonda inceleme yapılmıştır. Yüzey Yanıt Metodunun bu avantajı hem mühendislik uygulamalarında hem de akademik çalışmalarda başvurulan bir yöntem olmasını sağlamakta ve böylece fazla deney sayısını elimine ederek malzeme, zaman, proses bakımından maliyet-etkin çözümler sunmaktadır (Türk, 2016; Basmacı vd., 2018). Deneysel tasarım, Design Expert 12 paket programı ile gerçekleştirilmiş olup Tablo 2'de parametreler ve bunun sonucunda elde edilen yanıtlar (response) görülmektedir.

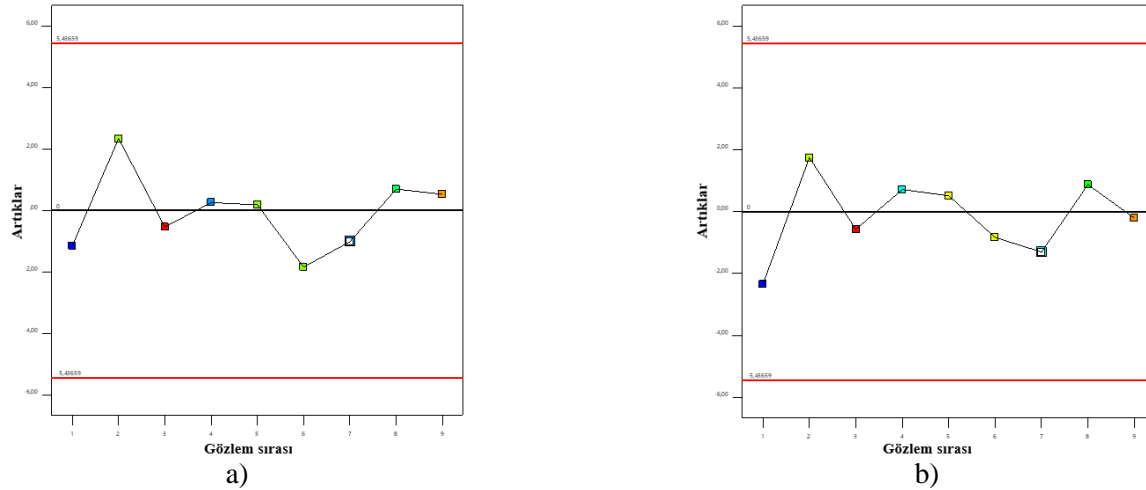
**Tablo 3.** Kaynak Parametreleri ve Seviyeleri

Parametreler	Seviyeler		
	I	II	III
Sıkıştırma Kuvveti (F)	1,5 kN	2 kN	2,5 kN
Akım (A)	4000 A	8000 A	12000 A
Zaman (t)	0,1 s	0,25 s	0,5 s

Varyans analizlerine (ANOVA) geçmeden önce verilerin normal dağılım eğrisine uygun olup olmadığının araştırılması gerekmektedir (Akkuş 2021). Bu yüzden Şekil 9'da gösterildiği gibi normallik testi gerçekleştirilmiştir. Verilerin normal dağılıma uygun olması normallik varsayımının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

**Şekil 9.** Normallik Testi; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

Şekil 10'da ise verilerin rastgele dağıldığı görülmekte olup parametrelerin bağımsızlık varsayımlarının sağlandığı anlaşılmaktadır.

**Şekil 10.** Bağımsızlık Varsayımı; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

ANOVA işlemi, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvvetlerinin analizleri için %95 güven aralığında yapılmıştır. Bu sebeple ANOVA tablolarında yer alan p değerinin 0,05'ten küçük elde edildiği durumlarda parametrelerin yanıtlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir. ANOVA sonuçları sırasıyla kaynak çapı için Tablo 4, maksimum çekme kuvveti için ise Tablo 5'te verilmektedir.



**Tablo 4.** Kaynak Çapı için ANOVA Sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	42,63	3	14,21	29,61	0,0013	Anlamlı
A- Sıkıştırma kuvveti	0,4873	1	0,4873	1,02	0,3598	
B- Akım	37,95	1	37,95	79,08	0,0003	
C- Zaman	4,20	1	4,20	8,74	0,0316	
<b>Artık</b>	2,40	5	0,4799			
<b>Cor Toplam</b>	45,03	8				

**Tablo 5.** Maksimum Çekme Kuvveti için ANOVA Sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	51,04	3	17,01	21,36	0,0028	Anlamlı
A- Sıkıştırma kuvveti	0,0054	1	0,0054	0,0068	0,9376	
B- Akım	44,94	1	44,94	56,42	0,0007	
C- Zaman	6,10	1	6,10	7,66	0,0395	
<b>Artık</b>	3,98	5	0,7965			
<b>Cor Toplam</b>	55,02	8				

Sonuçlar incelendiğinde, kaynak parametrelerine dayanarak oluşturulan matematiksel modellerin kaynak çapı ( $p=0,0013$ ) ve maksimum çekme kuvveti ( $p=0,0028$ ) için anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Her bir bağımsız değişkenin sonuçlar üzerindeki etkisi incelendiğinde ise Akım ve Zamanın oluşturulan modele anlamlı bir şekilde etki ettiği ancak sıkıştırma kuvvetinin sonuçlar üzerinde istatistiksel olarak anlamsız olduğu tespit edilmiştir. Kaynak çapı için bakıldığında  $p$  değeri Akım ve Zaman için sırasıyla 0,0003 ve 0,0316; Sıkıştırma kuvveti için 0,3598 olarak bulunmuştur.  $F$  değerleri incelendiğinde ise Akım için 79,08, Zaman için 8,74 bulunmuştur bu da Akımın Zamana kıyasla daha etkili parametre olduğunu göstermektedir. ANOVA sonuçları maksimum çekme kuvveti açısından incelendiğinde ise  $p$  değeri Akım ve Zaman için sırasıyla 0,0007 ve 0,0395; Sıkıştırma kuvveti için 0,9376 olarak bulunmuştur.  $F$  değerleri Akım için 56,42, Zaman için 7,66 olup maksimum çekme kuvveti için oluşturulan modelde de Akımın Zamana göre daha etkili parametre olduğu anlaşılmaktadır. ANOVA sonuçlarına göre sıkıştırma kuvvetinin hem kaynak çapı hem de maksimum çekme kuvveti üzerinde etkisinin anlamsız bulunması, o parametrenin  $p$  değerlerinin 0,05'ten büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Herhangi bir deneysel parametrenin sonuçlar üzerinde ne kadar etkili olduğu parametrenin  $F$  değerinin yüksekliği ile ilgilidir. ANOVA, deneysel çalışma yapan araştırmacıların hangi deneysel parametrenin sonuçlar üzerinde daha etkili olduğunu tespit etmek için başvurduğu güçlü bir mühendislik aracıdır (Gürbüz vd, 2018; Özlü vd, 2019).

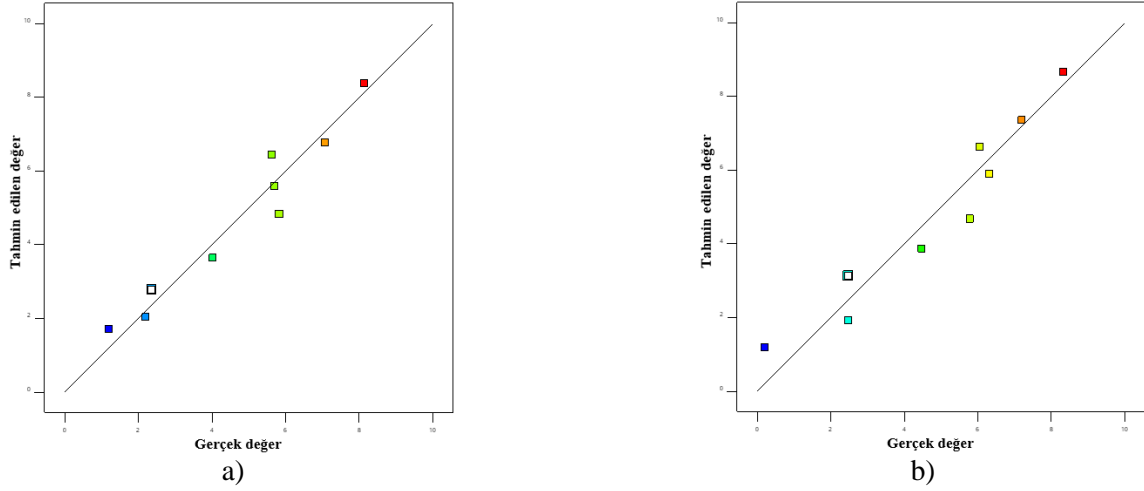
Merkezi Kompozit Tasarıma göre oluşturulan modellerin korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) da oldukça yüksek bulunmuştur. Kaynak çapı için  $R^2$  değeri %94,67, maksimum çekme kuvveti için  $R^2$  değeri %92,76'dır. Yüksek  $R^2$  değerleri oluşturulan matematiksel modellerin elde edilen anlamlı değişiklikleri güçlü bir şekilde açıklayabildiğini ve bağımsız değişkenlere dayanarak kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti gibi yanıtları tahmin edebileceğini göstermektedir. Böylece regresyon analizleri neticesinde elde edilecek ampirik denklemler vasıtası ile kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti; akım, zaman ve sıkıştırma kuvvetinin bir fonksiyonu olarak minimum hata ile tespit edilmesi mümkündür. Eşitlik 1 ve 2'de bu denklemler verilmiştir.

$$D = -0,376905 - (0,57F_s) + (0,000629A) + (4,1381t) \quad (1)$$

$$F_{max}^c = -1,95378 - (0,06F_s) + (0,000684A) + (4,9898t) \quad (2)$$

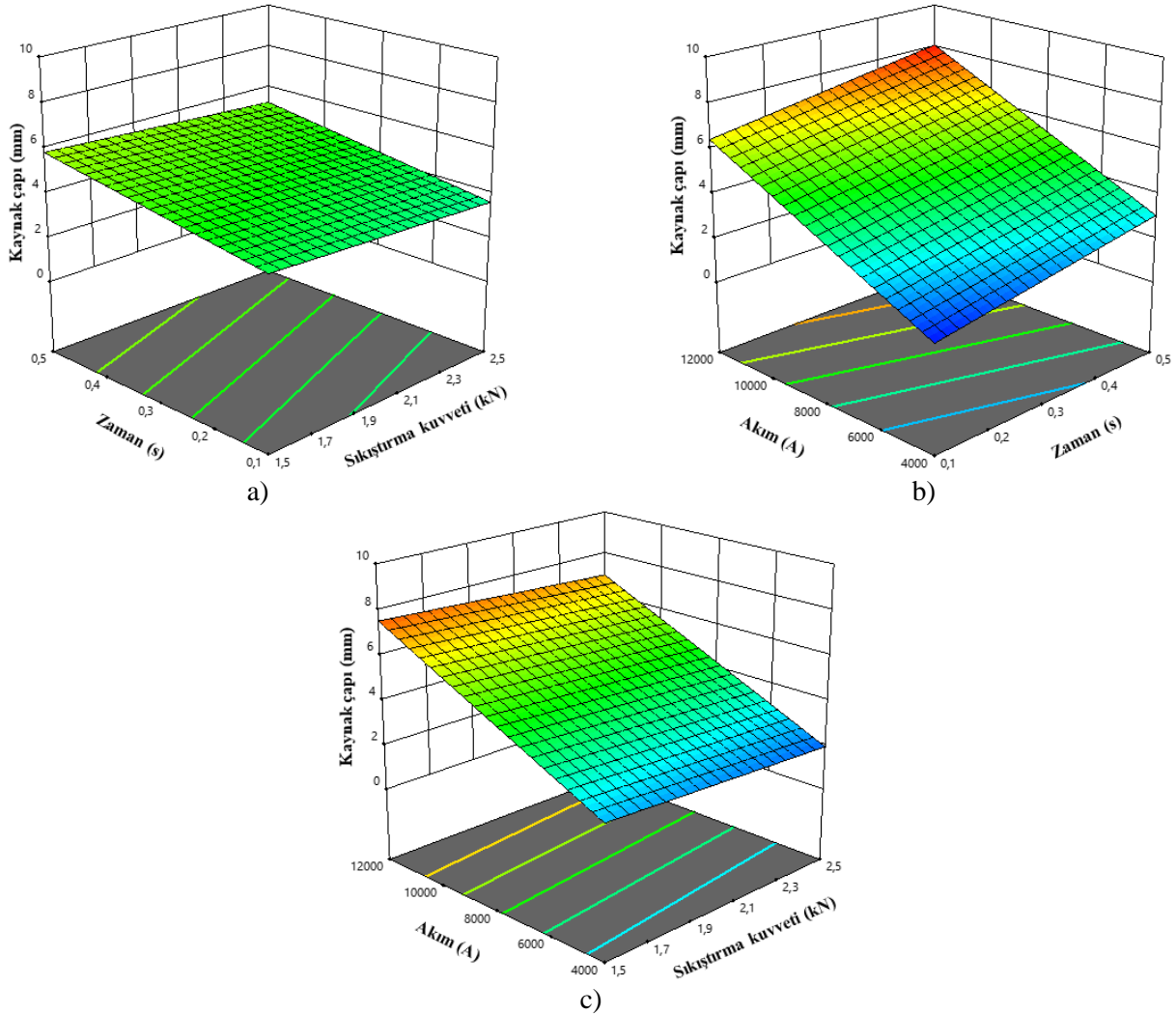
Yukarıdaki eşitliklerde  $D$  ve  $F_{max}^c$  sırası ile kaynak çapı (mm) ve maksimum çekme kuvveti (kN);  $F_s$  sıkıştırma kuvveti (kN),  $A$  amper (A) ve  $t$  zaman (s)'dir. Regresyon analizi sayesinde ortaya çıkan ampirik denklemleri birden fazla deneysel parametre içeren çalışmalarda minimum hata ile optimum sonuçlar elde etmek için kullanmak mümkündür. Örneğin, Tibet ve Çoruh (2017) da akü cürufları içerisindeki kurşun salımını sıcaklık, dozaj ve başvurulan standart yöntem türü bakımından incelemiş ve yüksek  $R^2$  değeri ile regresyon analizi gerçekleştirerek bir verim denklemi sunmuştur.

Yüksek  $R^2$  değerlerinin yanı sıra Şekil 11’de verilen gerçek değer-tahmin edilen değer grafikleri de regresyon analizinin minimum hata ile çalışır olduğunu ve verilerin birbiri ile oldukça uyum içinde olduğunu göstermektedir.



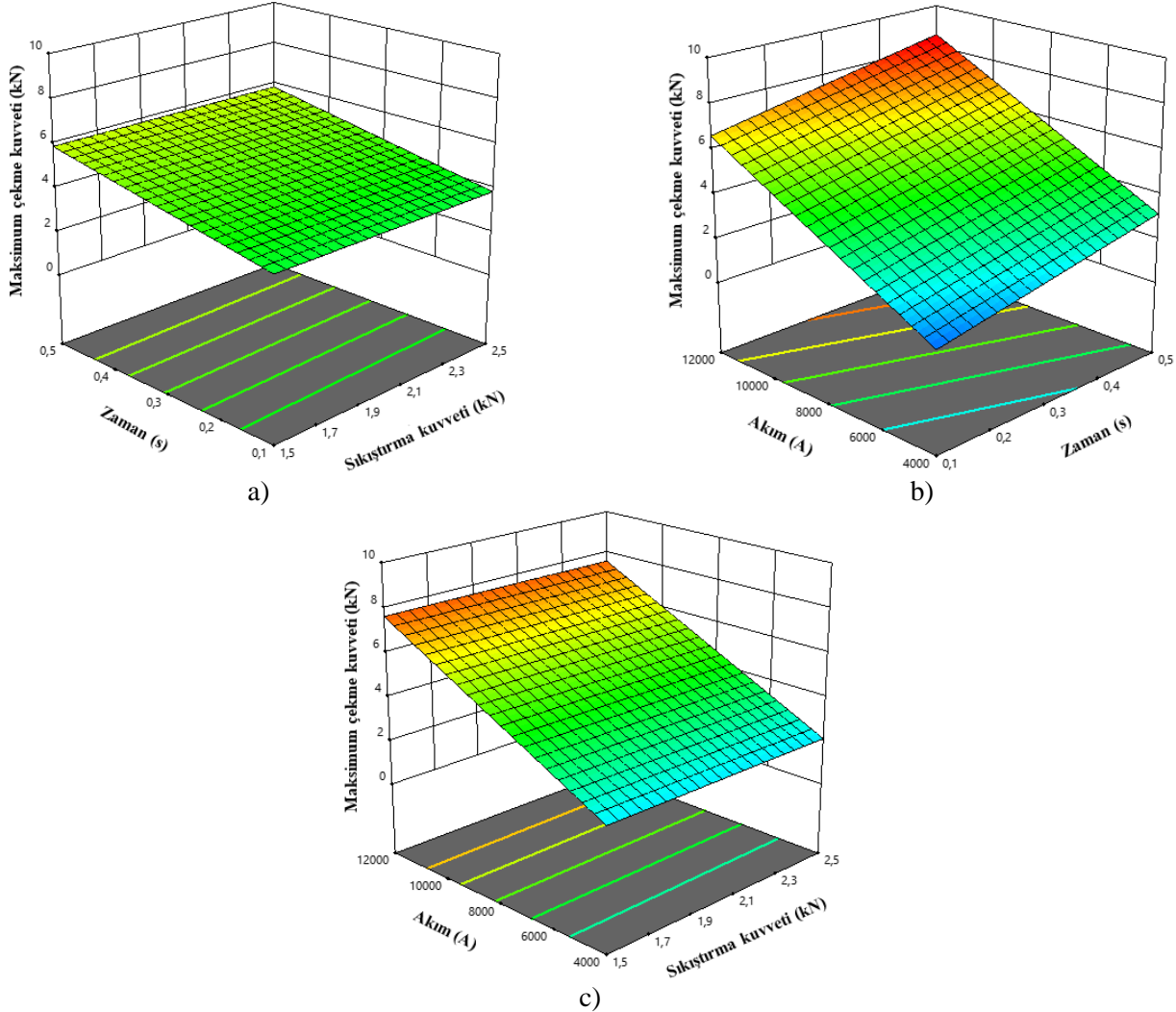
Şekil 11. Gerçek Değer – Tahmin Edilen Değer Grafikleri; a) Kaynak Çapı, b) Maksimum Çekme Kuvveti

Çalışmada ilaveten bağımsız değişken parametrelerin etkileşiminin etkisi de incelenmiş olup sonuçlar yüzey grafikleri ile sunulmuştur. İki veya daha fazla bağımsız değişken parametre içeren çalışmalarda sonuçları yüzey grafikleri ile sunmak hem her bir parametrenin etkisini hem de parametrelerin birbiri ile etkileşimlerini ortaya çıkarmayı sağlamaktadır (Bacak vd., 2021). Şekil 12 ve 13’te zaman-sıkıştırma kuvveti, akım-zaman ve akım-sıkıştırma kuvveti etkileşimlerinin kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti üzerine etkileri gösterilmektedir.



**Şekil 12.** Parametrelerin Etkileşiminin Kaynak Çapı Üzerine Etkisi; a) Zaman-Sıkıştırma Kuvveti, b) Akım – Zaman, C) Akım – Sıkıştırma Kuvveti

ANOVA sonuçları (Tablo 4 ve 5) göz önünde bulundurulduğunda en etkili parametre olan akım ve etkisinin istatistiksel olarak anlamsız bulunduğu sıkıştırma kuvvetinin etkileri etkileşim grafiklerinde açıkça görülmektedir . Zira Şekil 12 ve 13'te grafik eksenleri incelendiğinde akım değerindeki artışın çıktılarını fazlasıyla etkilediği; sıkıştırma kuvvetinin ise anlamlı bir fark ortaya koyamadığı anlaşılmaktadır. Yüksek akımda uzun süreli uygulanan kaynak işlemi ile büyük kaynak çapı oluşmakta ve kaynak malzemesinin daha yüksek çekme kuvvetlerini taşıdığı anlaşılmaktadır. Sıkıştırma kuvveti ise sonuçlar üzerinde tam tersi bir etki yapmaktadır. İlave olarak sıkıştırma kuvvetinin maksimum çekme kuvvetleri üzerindeki etkisi kaynak çapındaki sonuçlara kıyasla nispeten daha azdır. Yüzey grafikleri en etkili parametre kombinasyonlarının elde edilmesine de olanak sağlamaktadır (Basmacı vd., 2018).



**Şekil 13.** Parametrelerin Etkileşiminin Maksimum Çekme Kuvveti Üzerine Etkisi; a) Zaman-Sıkıştırma Kuvveti, b) Akım – Zaman, C) Akım – Sıkıştırma Kuvveti

## SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrik direnç kaynağı proses parametrelerinin, kaynak çekme dayanımına olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Simufact Welding paket programı kullanılarak hem elektrik direnç kaynak analizleri hem de çekme analizleri tamamlanmıştır. Üç farklı kaynak akımı, sıkıştırma kuvveti ve kaynak süresi değişken parametre olarak incelenmiştir. Kaynak analizlerinden elde edilen nümerik sonuçlar, çekme analizinin girdisi olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen kaynak ve çekme analizleri sonucunda, kaynak çapı ve maksimum çekme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen çıktılar varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilerek, kaynak proses parametrelerinin dayanım üzerine olan etkisi derinlemesine incelenmiştir. İncelenen sınır değerler arasında hem kaynak çapı, hem de çekme kuvveti için akım, zaman ve sıkıştırma kuvvetine

bağlı olarak fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu sayede incelenen sınırlar içerisinde herhangi bir değer için sonuç üretmek mümkün olacaktır. Gerçekleştirilen, kaynak ve çekme analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Kaynak çapı ve çekme kuvveti arasında benzer ilişki olduğu tespit edilmiştir. Kaynak çapının artması ile birlikte çekme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Kaynak çapının artması ile birlikte bağlantı bölgesinin alanı arttığı için daha dayanıklı kaynaklar elde edilmiştir. Kaynak akımının ve süresinin artması ile birlikte, daha büyük çapta kaynak bölgesi ve dayanım elde edilmektedir. Sıkıştırma kuvvetinin artması ile birlikte kaynak çapının ve dayanımın azaldığı görülmektedir. İstatistiksel olarak en anlamlı ve etkili parametrenin akım olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde zaman parametresinin de anlamlı ve etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan model incelendiğinde, sıkıştırma kuvvetinin sonuçlar üzerinde istatistiksel olarak anlamsız olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın ardından elde edilen nümerik sonuçlar, deneysel çalışma ile desteklenecek olup oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sağlanacaktır.

## TEŞEKKÜR

Simufact Welding paket programının bu çalışma için kullanılmasını sağlayan MSC Software ve BİAS Mühendislik firmalarına yazarlar olarak teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Antika, Y. E., Tatlı, Z., Çalışkan, F., & Tehçi, T. (2018). Effect of the Resistance Spot Welding Parameters in TRIP and DP Steels on Mechanical Properties. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 13 (3), 217–228.
- Akkuş, H. (2021). AISI 1040 Çeliğinin İşlenebilirliği Sırasında Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Farklı Tahmin Modelleri ile Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (2), 84-92.
- Bacak, S., Varol Özkavak, H., & Tatlı, M. (2021). FDM Yöntemi ile Üretilen PLA Numunelerin Çekme Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (1), 209-216.
- Basmacı, G., Kırbaş, İ., Ay, M., & Peker, M. (2018). Karma Taguchi ve Yüzey Yanıt Yöntemi Kullanılarak ASTM B574 (Hastelloy C-22)'in Tornalanması Esnasındaki İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi ve Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu. *Sakarya University Journal of Science*, 22, 761-771.
- Croarkin, C., & Tobias, P. (2015). Engineering Statistics e-Handbook. Erişim Adresi: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> Erişim Tarihi: 05.10.2015.
- Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., Kumru, U.C. (2016). Resistance Spot Welding Applications in Automotive Industry, *Mühendis ve Makina*, 57 (673), 48 – 53.
- Ertek Emre, H. (2019). Strength Optimization of Resistance Spot Welded TWIP Steel by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 778–787.
- Gürbüz H., Baday Ş., & Hamarat, İ. (2019). CNC Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Tel Elektrot Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16 (1), 20-29.
- Güler Özgül, H., & Arslan, S. (2018). Investigation of the Effects of Different Electrical Resistance Welding Parameters on Strength. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 673–679.
- Kekik, M., Aslanlar, S., & Apay, S. (2021). Optimization of Welding Parameters of AHSS Sheet Metals in Electric Resistance Spot Welding by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 702–711.
- Özçatalbaş, Y., Kuştutan, G., & Arabacı, U. (2018). Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties in Resistant Welding Joint of AISI 304 Stainless Steel. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2), 294–307.
- Özlu, B., Akgün, M., & Demir, H. (2019). AA 6061 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi ve Optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 151-158.

- Tibet, Y., & Çoruh, S. (2017). Akü Cüruflarının Killerle İmmobilizasyonu: Full Faktoriyel Dizayn Analiz. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (4) , 74-80 .
- Türk, T. (2017). Merkezi Kompozit Tasarımı Kullanılarak Bakır Cürufundan Arsenik Liçinin İncelenmesi. *Yerbilimleri*, 37, 193-202.