



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN SCGA590 DU ÇELİĞİNİN NOKTA
DİRENÇ KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZÜLFİNAZ MELİKE DOĞAN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MUHAMMED ELİTAŞ

BİLECİK, 2026

10833727

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN SCGA590 DU ÇELİĞİNİN NOKTA
DİRENÇ KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZÜLFİNAZ MELİKE DOĞAN

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. MUHAMMED ELİTAŞ

BİLECİK, 2026

10833727

BEYAN

Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan SCGA590 DU Çeliğinin Nokta Direnç Kaynağıyla Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Zülfinaz Melike Doğan

../../2026

İmza:

	YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN ÖĞRENCİ BEYAN FORMU	BŞEÜ-KAYSİS Belge	DFR-516
		İlk Yayın Tarihi/Sayısı	30.04.2026/16
		Revizyon Tarihi	00
		Revizyon No.su	00
		Toplam Sayfa	1

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu
☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan faýdalandım .
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan faýdalanmadım .

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları
<i>*Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.</i>
Tezinizde/projenizde kullandığınız <u>yapay zekâ araçlarını</u> ve <u>sürümünü</u> listeleyiniz:
ChatGPT, GPT-5.5 Thinking sürümü kullanılmıştır.
Yapay zekâ araçlarını tezin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):
☐ Cümle oluşturma
☐ Literatür tarama
☒ Çeviri
☐ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz):.....
Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Zülfinaz Melike DOĞAN

.././2026

İmza:

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana yol gösteren, her zaman beni destekleyen ve tezimin planlanmasında, yürütülmesinde, yazılmasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli danışmanım Doç. Dr. Muhammed ELİTAŞ'a, tez çalışmasının yapılması ve sonuçlarının elde edilmesinde desteklerinden dolayı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne, tez çalışmam boyunca manevi desteklerini esirgemeyen bölüm arkadaşlarıma, her zaman yanımda olan ve beni bu günlere getiren biricik aileme, ve bu bölümü okumama vesile olan hocam Prof. Dr. Birol AKYÜZ'e teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamı yaşamı boyunca benden desteğini esirgemeyen ve sonsuz teşekkürü hakeden babacığım İrfan DOĞAN'a armağan ediyorum.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, otomotiv endüstrisinde kullanılan 1,2 mm kalınlığındaki SCGA590 DU çift fazlı çelik sacların nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği incelenmiştir. Deneyisel çalışmada kaynak akımı ve kaynak süresinin kaynaklı bağlantıların mikroyapı, mikro sertlik, kaynak çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve kırılma tipi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla SCGA590 DU çelik numuneleri 8 kA, 10 kA ve 12 kA kaynak akımlarında; 100 ms ve 200 ms kaynak sürelerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneylerde elektrot basıncı sabit tutulmuş ve her parametre grubu için numuneler hazırlanmıştır. Kaynaklı numunelerin mikro yapısal incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Esas metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali bölgelerinde meydana gelen mikroyapısal değişimler değerlendirilmiştir. Ayrıca malzemeye EDS analizi yapılarak elementel dağılımı incelenmiş ve malzemenin Fe esaslı yapısı ile galvaniz kaplamaya bağlı Zn varlığı değerlendirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla mikro sertlik ölçümleri ve çekme-makaslama deneyleri yapılmıştır, maksimum sertlik değeri 12 kA-100 (600 HV) parametrelerinde elde edilirken, maksimum çekme makaslama değeri 10 kA-200 ms (13.92 kN) parametrelerine elde edilmiştir. Çekme-makaslama deneyleri sonrasında oluşan kırılma tipleri makro ve mikro ölçekte incelenmiş; ara yüzey kırılması, kısmi ara yüzey kırılması ve düğme tipi kırılma davranışları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak SCGA590 DU çift fazlı çeliğin nokta direnç kaynağı ile birleştirilebilir olduğu, ancak uygun kaynak kalitesi için akım ve süre parametrelerinin dengeli seçilmesi gerektiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, kaynak parametrelerinin mikroyapı, sertlik, çekme-makaslama dayanımı, kaynak çekirdek çapı ve kırılma tipi üzerinde belirgin etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Bu yönüyle çalışma, SCGA590 DU çeliğinin otomotiv endüstrisindeki nokta direnç kaynak uygulamalarına yönelik parametre seçimi ve kaynak kalitesi değerlendirmesi açısından literatüre katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: SCGA590 DU çeliği, nokta direnç kaynağı, mikro sertlik, çekme-makaslama dayanımı, kırılma tipi.

ABSTRACT

In this thesis study, the weldability of 1.2 mm-thick SCGA590 DU dual-phase steel sheets used in the automotive industry was investigated using the resistance spot welding method. In the experimental study, the effects of welding current and welding time on the microstructure, microhardness, weld nugget diameter, tensile shear strength, and failure mode of the welded joints were evaluated. To this end, SCGA590 DU steel specimens were joined by resistance spot welding at welding currents of 8 kA, 10 kA, and 12 kA, and welding times of 100 ms and 200 ms. Electrode pressure was kept constant during the experiments, and specimens were prepared for each parameter group. Microstructural examinations of the welded specimens were performed using an optical microscope and a scanning electron microscope. Microstructural changes occurring in the base metal, heat-affected zone, and weld metal regions were evaluated. In addition, EDS analysis was performed on the material to examine the elemental distribution, and the presence of Zn associated with the galvanized coating was evaluated in the Fe-based structure of the material. Microhardness measurements and tensile-shear tests were conducted to determine the mechanical properties. The failure modes resulting from tensile-shear tests were examined at the macro- and micro-scales; interfacial failure, partial interfacial failure, and pullout failure behaviors were evaluated. As a result, it was determined that SCGA590 DU dual-phase steel can be joined using resistance spot welding; however, a balanced selection of welding current and welding time parameters is required to achieve adequate weld quality. The study revealed that welding parameters have a significant effect on microstructure, micro hardness, tensile shear strength, weld nugget diameter, and failure mode. In this regard, the study has the potential to contribute to the literature in terms of parameter selection and weld quality assessment for resistance spot welding applications of SCGA590 DU steel in the automotive industry.

Keywords: SCGA590 DU steel, resistance spot welding, micro hardness, tensile-shear strength, failure mode.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
GRAFİKLER LİSTESİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. OTOMOTİV ÇELİKLERİ	2
2.1. Çift Fazlı Çelikler	3
2.2. Çift Fazlı Çeliklerin Mikroyapısı	5
3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI	7
3.1. Elektrik Direnç Kaynak Kabiliyeti	7
3.2. Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler	8
3.2.1. Kaynak akımı	9
3.2.2. Kaynak süresi	10
3.2.3. Elektrot kuvveti.....	11
3.2.4. Tutma süresi	11
3.2.5. Elektrot geometrisi ve malzemesi	12
3.2.6. Sac kalınlığı ve yüzey kaplaması	12
3.3. Elektrik Direnç Kaynak Çeşitleri	13
3.4. Nokta Direnç Kaynağı.....	14
3.4.1. Nokta direnç kaynağının uygulama alanları.....	15
3.4.2. Nokta direnç kaynak bölgesinde oluşan dirençler	15
3.4.3. Nokta direnç kaynağında dikkat edilmesi gereken faktörler	17
4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN NOKTA DİRENÇ KAYNAKLANABİLİRLİĞİ.....	20
5. MATERYAL VE YÖNTEM	25
5.1. Deneyde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	25
5.2. Numune Ölçüleri.....	26
5.3. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi	26
5.4. Mikro Yapı İnceleme Çalışmaları.....	28
5.5. Mikro Sertlik Testi	30
5.6. Çekme Makaslama Testi ve Kaynak Çekirdek Çap Ölçümü.....	30

5.7. Taramalı Elektron Mikroskobu	31
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
6.1. Mikro yapı.....	32
6.2. Mikro Sertlik Sonuçları	37
6.3. Çekme Makaslama Dayanımı.....	39
6.4. Kırılma Tipleri.....	42
7. SONUÇLAR	50
KAYNAKÇA	52

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. SCGA çeliğinin kimyasal birleşimi.....	25
Tablo 5.2. NDK işlem parametreleri.	26
Tablo 6.1. SCGA590 çeliğinin çekme makaslama dayanımı	40
Tablo 6.2. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının çekme makaslama deney sonuçları.	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. AHSS çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri	3
Şekil 2.2. Otomotiv çeliklerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.3. DP çeliklerinde ferrit ve martenzit dağılımı	5
Şekil 2.4. İncelenen yüzeyler ve temsili sertlik profili	6
Şekil 3.1. NDK uygulama işlemi	7
Şekil 3.2. Kaynak kalitesini etkileyen parametreler	9
Şekil 3.3. NDK prosesinde kullanılan elektrot alaşımları.....	12
Şekil 3.4. NDK işlemi aşamaları.....	14
Şekil 3.5. NDK bölgesinde oluşan dirençlerin şematik gösterimi.	16
Şekil 3.6. Kaynak kusurları.....	17
Şekil 3.7. Elektrot uç çeşitleri.	18
Şekil 5.1. SCGA590 çeliğinin mikroyapısı.....	25
Şekil 5.2. Numune ölçüleri	26
Şekil 5.3. Çalışmada kullanılan NDK makinesi	27
Şekil 5.4. NDK işlemi	27
Şekil 5.5. METKON METACUT-300 hassas kesme cihazı.....	28
Şekil 5.6. MEKTON FORCİPOL 2V zımparalama ve parlatma cihazı	29
Şekil 5.7. NİKON ECLİPSE LV150N endüstriyel mikroskop.....	29
Şekil 5.8. EMCOTEST DUROSCAN 20 mikro sertlik ölçüm cihazı	30
Şekil 5.9. SHİMADZU AG-IC çekme makaslama test cihazı.....	31
Şekil 5.10. ZEISS / Supra 40 VP SEM cihazı	31
Şekil 6.1. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin makro görüntüsü.	32
Şekil 6.2. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin profil görüntüsü.....	32
Şekil 6.3. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	33
Şekil 6.4. KM bölgesinde gözlenen boşluklu yapı.....	34
Şekil 6.5. SCGA 590 DU çeliğine ait EDS analizi.	35
Şekil 6.6. SCGA 590 DU çeliğine ait EDS analizi ve element dağılımı.	36
Şekil 6.7. NDK ile birleştirilen 12 kA-200 ms parametrelili SCGA590 çeliğine ait elektrot batma derinliğinin ölçümü.	38
Şekil 6.8. NDK işlemi uygulanan A1 kodlu numuneye ait ara yüzey kırılma tipi.	43

Şekil 6.9. NDK işlemi uygulanan A3 kodlu numuneye ait kısmi ara yüzey kırılma tipi.	44
Şekil 6.10. NDK işlemi uygulanan A4 kodlu numuneye ait düğme kırılma tipi.	45
Şekil 6.11. 8 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait ara yüzey kırılma tipi SEM görüntüsü	46
Şekil 6.12. 10 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait kısmi ara yüzey kırılma tipi SEM görüntüsü	47
Şekil 6.13. 10 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait çatlak başlangıcı SEM görüntüsü	48
Şekil 6.14. 10 kA-200 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait düğme tipi kırılma SEM görüntüsü.	49

GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa

Grafik 6.1. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının mikrosertlik ölçümü	37
Grafik 6.2. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının maksimum kuvvet değerleri	40
Grafik 6.3. SCGA590 çelik numunelerine ait çekirdek çap değerleri	42

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

%: Yüzde

mm: Milimetre

cm: Santimetre

kN: Kilonewton

kA: Kiloamper

Q: Isı Girdisi

I: Kaynak Akımı

R: Direnç

t: Zaman

AHSS: Advanced High Strenght Steel

DP: Dual Phase

NDK: Nokta Direnç Kaynağı

ITAB: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

SCHAZ: Sub Critical Heat Affected Zone

UCHAZ: Upper Critical Heat Affected Zone

ICHAZ: Inter Critical Heat Affected Zone

KM: Kaynak Metali

EM: Esas Metal

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

1. GİRİŞ

Çelikler, alternatif malzemeler olmasıyla birlikte hala otomotiv endüstrisi için en önemli malzeme sınıfını teşkil etmektedir. Otomotiv sanayisinde fiyat/performans ve düşük yakıt tüketimi amacıyla daha hafif araç üretimi çalışmaları yapılmaktadır. Bu sebeple endüstride çelikler içerisinde özel ısıtılma işlemi prosesleri ile elde edilen çift fazlı çelikler ön plana çıkmaktadır.

Çift fazlı çeliklerin büyük çoğunluğu düşük ağırlık, emniyetli performans gelişimi ve maliyet kazanımı gibi avantajları sebebiyle otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu doğrultuda mevcut çeliklere kıyasla daha ince çift fazlı çeliklerde eşdeğer çekme mukavemeti elde edilmektedir. Bu durum ise ağırlık azalmasına katkı sağlamaktadır. Çift fazlı çelikler otomobilin dayanımında düşüş yaşatmadan ağırlığını azaltmakta, benzer veya daha yüksek seviyede çarpışma enerjisini absorbe edebilmektedir (Elitaş, 2021; Long ve Khanna, 2007).

Çift fazlı çeliklerin bir çeşidi de SCGA çeliğidir. SCGA çeliği, sünekliği sağlayan ferrit fazı ve mukavemet artırıcı etkisi bulunan martenzit fazından oluşmaktadır. Ayrıca SCGA çeliği çekme mukavemetinin yüksek oluşu sebebiyle otomobilde çarpışma sönümleyicilerde, motor braketleri, yan panellerde, aks bağlantı parçalarında ve güçlendirme parçaları gibi çarpışmaya maruz kısımlarda kullanılmaktadır. Galvaniz tavlı olup korozyona karşı dirençlidir. Soğuk haddelenmiş olması da bu çeliğin gerinim sertliğini artırarak daha mukavemetli hale getirmektedir.

Endüstride araç gövde imalatında farklı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Nokta direnç kaynak (NDK) yöntemi, bu kaynak metotları içerisinde ön plana çıkmaktadır. Araç gövdelerinde 3000-5000 arası NDK uygulaması bulunmaktadır (Elitaş, 2023; Yuan vd., 2017). Bahsedilen çift fazlı çelikleri başarılı bir şekilde kullanabilmek için NDK işleminin doğru anlaşılması ve karakterize edilmesi önemlidir yani araçların yapısal performansı kaynaklı birleştirmelerin yapısal yeterliliğine bağlıdır (Riesner vd., 2000; Kuziak vd., 2008).

Literatürde SCGA çeliklerinin kaynaklı birleşimleri üzerine az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada SCGA590 DU çeliğinin farklı akım ve zaman parametrelerine sahip NDK'lı birleşimlerinin deneysel verileri incelenmiş olup ideal kaynak parametreleri araştırılmıştır. Bu bağlamda, tez çalışmasının literatüre ve benzer çalışmaları yapacak araştırmacılara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

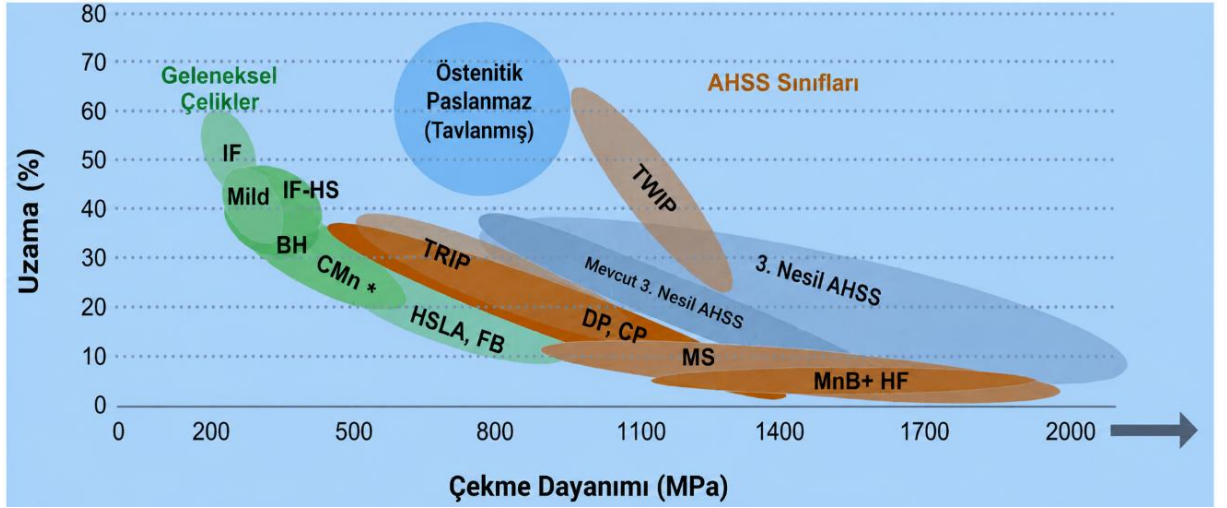
2. OTOMOTİV ÇELİKLERİ

Otomotiv çelikleri, araç gövdesi ve yapısal elemanlarda kullanılan en önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Çeliklerin yüksek dayanım, ekonomik üretim, geri dönüştürülebilirlik, kaynaklanabilirlik ve farklı dayanım seviyelerinde üretilebilme özellikleri otomotiv sektöründeki kullanımını sürdürmesini sağlamaktadır. Hafif metaller ve kompozit malzemeler belirli uygulamalarda avantaj sağlasa da çelikler, maliyet ve üretim altyapısı bakımından otomotiv gövde üretiminde temel malzeme grubu olmayı sürdürmektedir (Kuziak vd., 2008).

Otomotiv çelikleri genel olarak düşük karbonlu çelikler, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler ve geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel düşük karbonlu çelikler iyi şekillendirilebilirlik sunarken, yüksek dayanım gerektiren bölgelerde yetersiz kalabilmektedir. Buna karşılık AHSS, daha yüksek mukavemet değerleriyle daha ince sac kullanımına olanak sağlayarak araç ağırlığının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Schmitt ve Lung, 2018).

AHSS; çift fazlı çelikler, TRIP çelikleri, kompleks fazlı çelikler, martenzitik çelikler ve presle sertleştirilmiş çelikler gibi farklı gruplardan oluşmaktadır. Bu çeliklerin mekanik davranışları yalnızca kimyasal bileşimlerinden değil, aynı zamanda mikroyapılarında bulunan fazların türü, oranı ve dağılımından da etkilenmektedir. Bu nedenle AHSS çeliklerin tasarımında mikroyapı kontrolü temel bir mühendislik yaklaşımıdır (Kuziak vd., 2008).

Otomotiv uygulamalarında kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin önemli avantajlarından biri, çarpışma anında kontrollü deformasyon ve enerji absorpsiyonu sağlayabilmeleridir. Araç gövdesinde bazı bölgelerin darbe enerjisini emmesi, bazı bölgelerin ise yolcu kabinini koruyacak şekilde yüksek rijitlik göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle otomotiv gövde tasarımında farklı dayanım sınıflarına sahip çelikler birlikte kullanılmaktadır (Schmitt ve Lung, 2018).

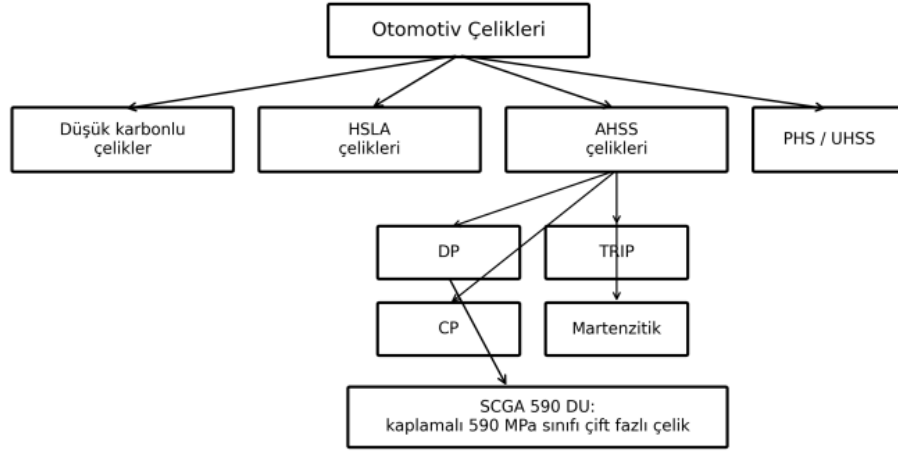


Şekil 2.1. AHSS çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri

590 MPa dayanım sınıfındaki çelikler, otomotiv gövdesinde orta-yüksek dayanım gerektiren bölgelerde kullanılabilmektedir. Bu çelikler yüksek mukavemet sağlarken şekillendirme kabiliyetini tamamen kaybetmediği için özellikle enerji absorpsiyonu ve yapısal destek gerektiren parçalarda tercih edilmektedir. SCGA590 gibi kaplamalı çift fazlı otomotiv çelikleri, dayanım ve korozyon direnci gereksinimlerinin birlikte karşılanması açısından önem taşımaktadır (WorldAutoSteel, t.y.-a).

2.1. Çift Fazlı Çelikler

Çift fazlı çelikler, AHSS içerisinde otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan gruplardan biridir. Bu çeliklerin temel mikroyapısı yumuşak ferrit matrisi içinde dağılmış sert martenzit adacıklarından oluşmaktadır. Düşük karbon oranına sahip bu çeliklerde, ferrit ve martenzit beraberinde mikro yapıda perlit, beynit, sementit ve kalıntı östenit gibi fazlar da gözlemlenebilir (Akay, 2005).



Şekil 2.2. Otomotiv çeliklerinin sınıflandırılması

Ferrit fazı malzemeye süneklik ve şekillendirilebilirlik kazandırırken, martenzit fazı dayanımın artışı sağlanmaktadır (Tasan vd., 2015)

Düşük akma dayanımı/çekme dayanımı oranına ve yüksek başlangıç pekleşme hızına sahip olan çift fazlı çelikler bu özellikleriyle yüksek dayanım ve iyi şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinden ötürü otomobil gövde parçalarında, kapı dikmelerinde ve tavan dikmelerinde çok sıkça kullanılmaktadır (Doğan ve Elitaş, 2025.).

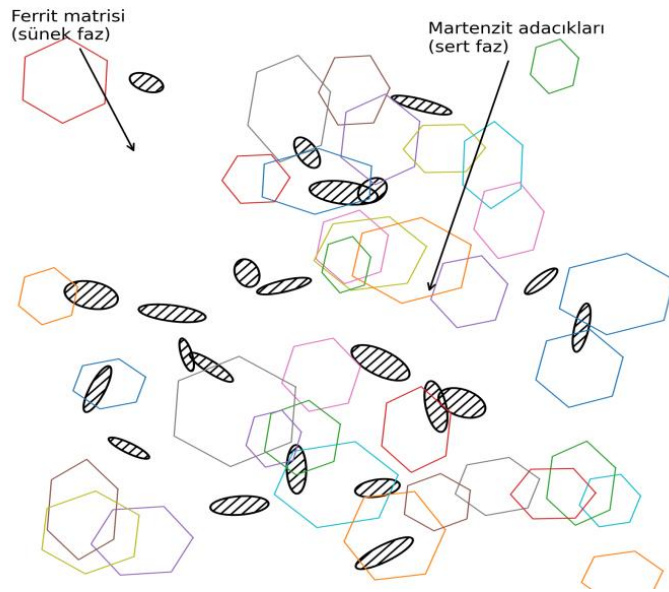
Çift fazlı çeliklerde dayanım seviyesi büyük ölçüde martenzit hacim oranına bağlıdır. Martenzit oranı arttıkça çekme dayanımı yükselirken, süneklik ve yerel şekillendirilebilirlik azalabilir. Bu nedenle çift fazlı çeliklerde optimum performans, ferrit ve martenzit fazlarının uygun oran ve dağılımda bulunmasıyla elde edilir (Akay, 2005).

Otomotiv uygulamalarında çift fazlı çeliklerin kullanımı, araç gövdesinin hafifletilmesine ve çarpışma güvenliğinin artırılmasına katkı sağlar. Bu çelikler özellikle yan darbe elemanları, traversler, gövde takviye parçaları ve enerji absorbe eden bölgelerde tercih edilebilmektedir. Bu kullanım alanları, çift fazlı çeliklerin hem mukavemet hem de şekillendirilebilirlik açısından dengeli bir malzeme grubu olduğunu göstermektedir (WorldAutoSteel, t.y.-a).

SCGA 590 DU çeliği, çift fazlı çeliklerin otomotivde kullanılan kaplamalı türleri içinde değerlendirilebilir. Kaplama tabakası korozyon direncini artırırken, kaynak sırasında elektrot ve sac yüzeyi arasındaki temas koşullarını değiştirebilir. Bu nedenle SCGA 590 DU gibi kaplamalı çift fazlı çeliklerde kaynak parametrelerinin malzeme ve yüzey özelliklerine uygun seçilmesi gerekmektedir (Doğan ve Elitaş, 2025).

2.2. Çift Fazlı Çeliklerin Mikroyapısı

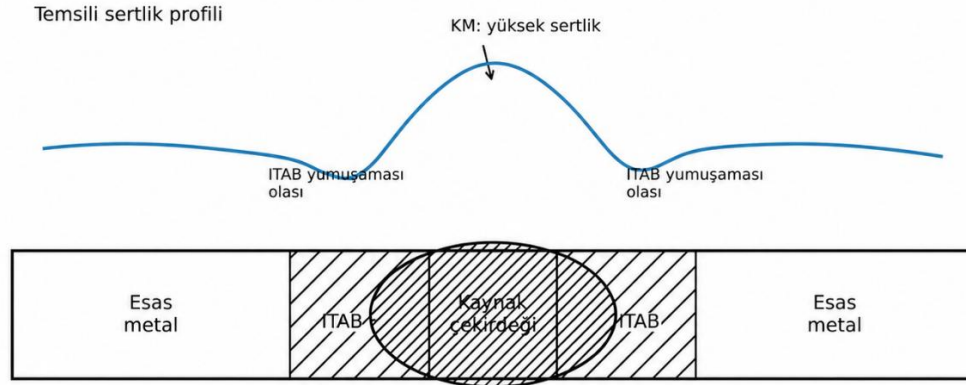
Bir önceki paragraflarda belirtildiği üzere çift fazlı çeliklerin mikroyapısı genel olarak sürekli ferrit matrisi ve bu matris içinde dağılmış martenzit fazından oluşmaktadır. Bunun beraberinde deformasyona uğrayan dual phase (DP) çeliğinde plastik şekil değişimi öncelikle yumuşak olan ferrit fazında başlar. Martenzit adacıkları ise deformasyona karşı daha yüksek direnç göstererek yük taşıma kapasitesini artırır. Ferrit ve martenzit arasındaki bu gerilme paylaşımı, DP çeliklerine yüksek pekleşme hızı kazandırır (Tasan vd., 2015).



Şekil 2.3. DP çeliklerinde ferrit ve martenzit fazlarının dağılımı

Kaynak işlemi sırasında çift fazlı çeliklerin mikroyapısı önemli ölçüde değişebilir. Esas metalde (EM) ağırlıklı olarak ferrit fazı ve adacıklar şeklinde martenzit fazı bulunurken, KM’de ergime ve hızlı katılaşma nedeniyle çoğunlukla martenzitik yapı oluşur. Isının tesiri altındaki bölgede (ITAB) ise sıcaklık geçmişine bağlı olarak tane büyümesi, kısmi dönüşüm ve martenzitin temperlenmesi gibi mikroyapısal değişimler meydana gelebilir (Ramazani vd., 2015).

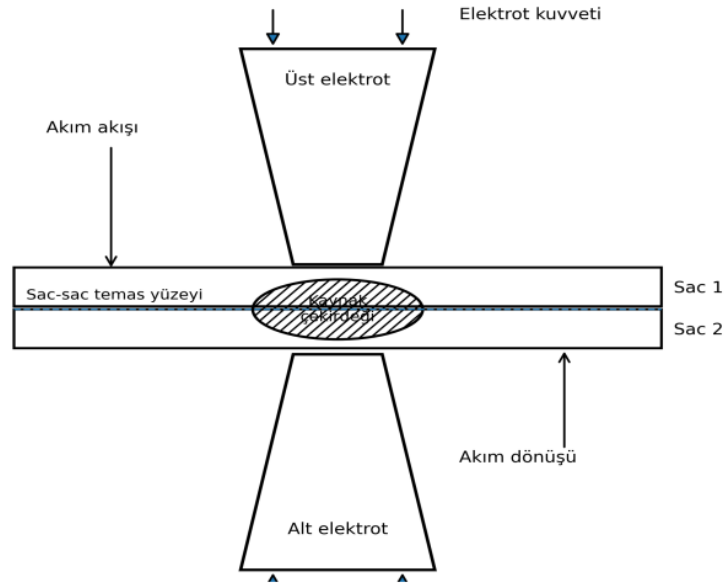
Bu mikroyapısal değişimler, kaynaklı bağlantının sertlik dağılımı ve mekanik performansı üzerinde doğrudan etkilidir. KM bölgesinde martenzitik yapının artması sertliği yükseltirken, ITAB’da temperlenmiş martenzit oluşumu lokal yumuşamaya neden olabilmektedir (Ramazani vd., 2015). Bu nedenle bu çalışmada SCGA590 çeliğinin kaynaklı bağlantılarında yalnızca KM değil, EM’den KM’ye doğru tüm bölgesel mikroyapı değişimleri incelenmiştir.



Şekil 2.4. İncelenen yüzeyler ve temsili sertlik profili

3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI

Elektrik direnç kaynağı, metallerin kaynak akımı ve elektrot basıncı etkisiyle birleştirildiği bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı, iş parçaları ve temas yüzeylerinde oluşan elektriksel direnç sonucunda meydana gelir. Kaynak bölgesinde oluşan ısı, malzemenin lokal olarak yumuşamasına veya ergimesine neden olur ve basınç etkisiyle birleştirme gerçekleşir. Ardından gelen soğuma işlemi ile birlikte ayrılmaz türden bir birleşim sağlanır (Zhang ve Senkara, 2006: 235).



Şekil 3.1. NDK uygulama işlemi

Elektrik direnç kaynağının temel avantajları arasında yüksek üretim hızı, otomasyona uygunluk, ilave dolgu metali gerektirmemesi ve seri üretimde tekrarlanabilir kalite sağlaması yer almaktadır. Bu özellikler nedeniyle yöntem otomotiv, beyaz eşya, sac metal imalatı ve elektrik-elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (WorldAutoSteel, t.y.-d).

3.1. Elektrik Direnç Kaynak Kabiliyeti

Elektrik direnç kaynak kabiliyeti, bir malzemenin belirli kaynak parametreleri altında kabul edilebilir kaynak çekirdeği, yeterli mekanik dayanım ve uygun yüzey kalitesi sağlayabilme özelliği olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda kaynaklı bağlantının servis koşullarında yeterli performans göstermesini de kapsar (WorldAutoSteel, t.y.-c).

Bir malzemenin elektrik direnç kaynak kabiliyeti; elektriksel direnç, ısıl iletkenlik, ergime sıcaklığı, sac kalınlığı, yüzey durumu, kaplama türü ve mekanik dayanım gibi özelliklerden etkilenir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

Elektrik direnç kaynağında ısı girdisi genel olarak akım, direnç ve kaynak süresiyle ilişkilidir. Direnç kaynak yöntemlerinde ısı oluşumu Eşitlik 3.1 ile açıklanır. Bu bağıntıya göre kaynak akımı ısı oluşumu üzerinde karesel etkiye sahip olduğundan, akım değişimi kaynak kalitesini belirleyen en kritik değişkenlerden biridir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

$$N_s = I^2 R t \quad (3.1)$$

N_s : Isı enerjisine dönüşen elektrik enerjisi

I : Kaynak yapılan parçadan geçen akım şiddeti

R : Kaynak yapılan parçanın elektrik direnci

t : Süre

AHSS ve çift fazlı çeliklerde kaynak kabiliyeti, geleneksel düşük karbonlu çeliklere göre daha karmaşık değerlendirilmektedir. Bu çeliklerde yüksek dayanım, farklı faz yapıları ve kaplama tabakası kaynak işlemi sırasında mikroyapısal dönüşümler ve temas koşulları üzerinde etkili olur. Bu nedenle çift fazlı çeliklerde kaynak parametrelerinin deneysel olarak optimize edilmesi gerekmektedir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

Kaplamalı çeliklerde kaynak kabiliyeti ayrıca yüzey kaplamasının kaynak sırasında davranışıyla ilişkilidir. Çinko esaslı kaplamalar elektrot yüzeyinde aşınma, kirlenme veya temas alanı değişimine neden olabilir. Bu durum kaynak akımı aralığını ve kaynak kalitesini etkileyebilmektedir (WorldAutoSteel, t.y.-b).

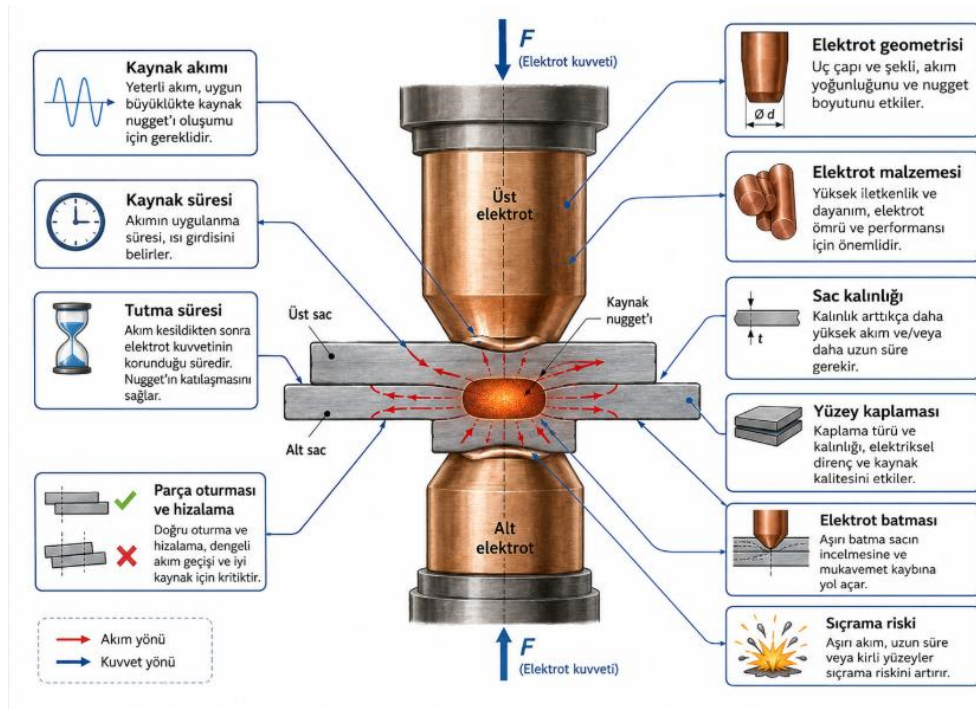
SCGA 590 DU çeliğinin kaynak kabiliyeti değerlendirilirken çift fazlı mikroyapısı ve kaplamalı yüzey yapısı birlikte dikkate alınmalıdır. Bu malzemede uygun kaynak parametreleri seçildiğinde yeterli kaynak çekirdeği elde edilebilir; ancak aşırı ısı girdisi elektrot batması, sıçrama veya yüzey hasarı gibi kalite problemlerine yol açabilir (Doğan ve Elitaş, 2025).

3.2. Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler

Elektrik direnç kaynağında kaynak kalitesi, kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti, tutma süresi, elektrot geometrisi, elektrot malzemesi, sac kalınlığı ve yüzey kaplaması gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler birbirinden bağımsız değildir; bir parametredeki değişim diğer parametrelerin etkisini artırabilir veya azaltabilir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

Kaynak kalitesinin değerlendirilmesinde kaynak çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı, çapraz çekme dayanımı, kırılma tipi, mikrosertlik dağılımı, elektrot izi ve yüzey kalitesi dikkate alınır. Özellikle otomotiv saclarında kaynak kalitesi yalnızca dayanım bakımından değil, seri üretim kararlılığı ve görünür yüzey kalitesi açısından da önemlidir (Pouranvari ve Marashi, 2013).

NDK işleminde uygun olmayan parametre seçimleri, yetersiz kaynak çekirdeği, elektrot batması, sıçrama, ara yüzey tipi kırılma, aşırı sertleşme veya KM yumuşaması gibi problemlere neden olabilir. Bu nedenle parametrelerin malzeme türü, sac kalınlığı ve kaplama durumuna göre belirlenmesi gerekir (WorldAutoSteel, t.y.-c).



Şekil 3.2. Kaynak kalitesini etkileyen parametreler.

3.2.1. Kaynak Akımı

Kaynak akımı, elektrik direnç kaynağında ısı oluşumunu belirleyen en etkili parametrelerden biridir. I^2Rt bağıntısı gereği akımın karesel etkisi bulunduğu için, akım değerindeki artış kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarını önemli ölçüde artırır. Bu nedenle kaynak çekirdek çapı, sertlik dağılımı ve bağlantı dayanımı kaynak akımından doğrudan etkilenir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

Kaynak akımı düşük olduğunda saclar arasında yeterli ergime oluşmayabilir ve kaynak çekirdeği istenen boyuta ulaşamayabilir. Bu durumda bağlantının çekme-makaslama dayanımı düşük olabilir ve ara yüzey kırılması meydana gelebilir. Kaynak akımı uygun seviyeye çıkarıldığında çekirdek çapı büyür ve bağlantının yük taşıma kapasitesi artabilir

(Pouranvari ve Marashi, 2013).

Kaynak akımının gereğinden fazla artırılması ise kaynak kalitesini olumsuz etkileyebilir. Aşırı akım, kaynak bölgesinde fazla ısı girdisi oluşturarak sıçrama, yüzey yanığı, elektrot batması ve kaynak bölgesinde lokal incelme gibi kusurlara yol açabilir. Bu nedenle en yüksek akım değeri her zaman en iyi kaynak performansı anlamına gelmemektedir (Liu vd., 2024).

SCGA590 çeliği üzerine yapılan bir çalışmada 8 kA, 10 kA ve 12 kA akım değerleri ile 100 ms ve 200 ms süreler kullanılmış; en yüksek sertlik değerinin 10 kA–200 ms parametresinde 621 HV olarak elde edildiği bildirilmiştir. Bu sonuç, 12 kA gibi daha yüksek akım değerlerinin her koşulda daha iyi mikroyapısal veya mekanik sonuç vermediğini göstermektedir (Doğan ve Elitaş, 2025).

Literatürde rastlanan çalışmada 12 kA–200 ms numunesinin çekme diyagramında görülen düşüş, yüksek akımın oluşturduğu aşırı ısı girdisiyle ilişkilendirilebilir. 12 kA akım değeri, 10 kA'ya göre aynı süre ve direnç koşullarında daha yüksek ısı oluşum potansiyeline sahiptir. Bu yüksek ısı girdisi sac yüzeyini yumuşatarak elektrot kuvveti altında elektrot batmasını artırmış ve bağlantının yük taşıma kapasitesinde düşüşe neden olmuş olabilir (Liu vd., 2024).

3.2.2. Kaynak Süresi

Kaynak süresi, kaynak bölgesine uygulanan elektrik akımının devam ettiği süreyi ifade eder. Sabit akım ve elektrot kuvveti altında kaynak süresinin artırılması, kaynak bölgesinde daha fazla ısı birikmesine ve kaynak çekirdeğinin büyümesine katkı sağlayabilir. Bu nedenle kaynak süresi, çekirdek gelişimi üzerinde doğrudan etkili bir parametredir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

Kaynak süresi kısa olduğunda yeterli ısı oluşmayabilir ve kaynak çekirdeği istenen boyuta ulaşamayabilir. Bu durumda bağlantı dayanımı düşük kalabilir. Kaynak süresi uygun seviyede artırıldığında çekirdek çapı büyüebilir ve kaynaklı bağlantının mekanik performansı iyileşebilir (Pouranvari ve Marashi, 2013).

Kaynak süresinin aşırı artırılması ise kaynak bölgesinde gereğinden fazla ısı birikmesine neden olur. Bu durum ITAB'ın genişlemesine, elektrot izinin derinleşmesine, yüzey kaplamasının bozulmasına ve elektrot batmasının artmasına yol açabilir. Bu nedenle kaynak süresi, kaynak akımıyla birlikte dengeli seçilmelidir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

3.2.3. Elektrot Kuvveti

Elektrot kuvveti, direnç kaynağı sırasında sacların birbirine bastırılmasını ve akım geçişinin kontrollü şekilde gerçekleşmesini sağlayan temel parametrelerden biridir. Elektrot kuvveti, saclar arası temas direncini, akım yoğunluğunu, kaynak çekirdeği oluşumunu ve yüzey deformasyonunu doğrudan etkiler.

Elektrot kuvveti yetersiz olduğunda temas direnci aşırı artabilir ve kaynak bölgesinde kontrolsüz ısı oluşumu meydana gelebilir. Bu durum sıçrama, yüzey hasarı ve düzensiz çekirdek oluşumu gibi problemlere neden olabilir. Elektrot kuvvetinin gereğinden fazla olması ise temas direncini düşürerek yetersiz ısı oluşumuna veya sıcaklıkla yumuşayan sac yüzeyinde elektrot batmasına yol açabilir (WorldAutoSteel, t.y.-b).

Elektrot batması, kaynak sonrası sac yüzeyinde elektrot ucunun oluşturduğu kalıcı çökme olarak tanımlanabilir. Otomotiv nokta kaynak kalite değerlendirmelerinde elektrot batma derinliğinin sac kalınlığına oranı önemli bir yüzey kalite kriteridir. İncelenen kaynak kalite kriterlerinde elektrot batmasının dış sac kalınlığının yaklaşık %25-30'unu aşmaması gerektiği kabul edilmektedir (American Welding Society, 2021).

Literatürde optimum yüzey kalitesi ve yeterli mekanik performans için elektrot batma oranının çoğu durumda sac kalınlığının yaklaşık %10–20'si aralığında tutulmasının daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşıma göre 1,2 mm kalınlığındaki sac için hedef elektrot batma aralığı yaklaşık 0,12–0,24 mm olarak değerlendirilebilir. Bu aralığın üzerine çıkan batma değerleri, lokal incelme ve gerilme yığılması nedeniyle çekme diyagramında düşüşe neden olabilir (Ribeiro vd., 2020).

3.2.4. Tutma Süresi

Tutma süresi, kaynak akımı kesildikten sonra elektrotların belirli bir süre daha saclar üzerinde basınç uygulamaya devam ettiği süreyi ifade eder. Bu süre, kaynak çekirdeğinin katılaşması ve bağlantının stabil hale gelmesi açısından önemlidir. Yetersiz tutma süresi, kaynak çekirdeği tam katılaşmadan elektrot basıncının kalkmasına neden olabilir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

Tutma süresi uygun seçildiğinde kaynak çekirdeğinin kontrollü soğuması sağlanır ve bağlantının geometrik kararlılığı artar. Özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde hızlı soğuma nedeniyle martenzitik dönüşümler meydana geldiğinden, tutma süresi kaynak bölgesinin şekillenmesi ve kusur oluşumunun sınırlandırılması bakımından önemlidir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

Bu nedenlerle tutma süresi hem kaynak kalitesi hem de üretim hızı açısından optimize edilmelidir.

3.2.5. Elektrot Geometrisi ve Malzemesi

Elektrot geometrisi, akım yoğunluğunu ve kaynak bölgesindeki ısı dağılımını etkileyen önemli bir faktördür. Elektrot uç çapı küçüldükçe temas alanı azalır ve akım yoğunluğu artar. Bu durum kaynak çekirdeği oluşumunu hızlandırabilir; ancak aşırı akım yoğunluğu yüzey hasarı, sıçrama ve elektrot batması riskini artırabilir (WorldAutoSteel, t.y.-d).

Elektrot uç çapının büyük olması akım yoğunluğunu azaltarak daha geniş temas alanı oluşturur. Bu durum yüzey deformasyonunu sınırlayabilir; ancak yeterli ısı oluşumu sağlanamazsa kaynak çekirdeği yetersiz kalabilir. Bu nedenle elektrot geometrisi sac kalınlığı, malzeme türü ve kaynak akımıyla uyumlu seçilmelidir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

Elektrot malzemesi genellikle yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip bakır alaşımlarından seçilmektedir. Kaplamalı çeliklerde elektrot yüzeyinde çinko birikimi veya aşınma meydana gelebileceğinden, elektrot malzemesi ve bakım sıklığı kaynak kararlılığı açısından önem taşır (WorldAutoSteel, t.y.-b).

Elektrot malzemesinin iletkenliği, sertliği ve aşınma direnci kaynak kalitesi üzerinde etkilidir. NDK uygulaması için doğru bir elektrot alaşımı seçilmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin de göz önüne alınmasıyla gerçekleşmektedir (Esendir, 2008: 20).

Alaşım Cinsi	Brinell Sertliği (kg/mm ²)	İletkenlik (% Saf Bakır)	Yumuşama sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı iş parçası
Bakır (Soğuk Çek.)	95	90	150	Alüminyum
Tellür - Bakır	100	90	175	Alüminyum
Kadmiyum - Bakır	110	85	250	İnce yumuşak çelik sac
Krom - Bakır	150	80	500	Tüm çelikler
Tungsten - Bakır	200-300	30	1000	Çelik ve Bakır Alaşımları

Şekil 3.3. NDK prosesinde kullanılan elektrot alaşımları

3.2.6. Sac Kalınlığı ve Yüzey Kaplaması

Yüzey kaplaması, kaynak sırasında elektrot ile sac arasındaki temas koşullarını etkiler. Çinko esaslı kaplamalar korozyon direnci sağlarken, kaynak sırasında elektrot yüzeyinde birikme, temas direnci değişimi ve elektrot aşınmasına neden olabilir. Bu durum kaynak akımı aralığını daraltabilir ve proses kararlılığını etkileyebilir (WorldAutoSteel, t.y.-b).

Bunun beraberinde birleştirilen levhaların kalınlığı ve yüzeyinde galvaniz, Al-Si gibi kaplamaların bulunması kaynak çekirdeği oluşumunu etkileyen önemli faktörlerdir. Kaplamalar, kaynak bölgesinde gaz boşlukları ve gözenek oluşumuna yol açabilmektedir (Feizollahi vd., 2025).

SCGA 590 DU gibi kaplamalı çift fazlı çeliklerde kaplama tabakası, kaynak bölgesinde yeterli çelik-çelik temasının oluşması için kaynak çevrimi sırasında uygun şekilde uzaklaştırılmalıdır. Kaplamanın etkili biçimde uzaklaşmadığı veya elektrot yüzeyinde biriktiği durumlarda ısı dağılımı düzensizleşebilir. Bu durum kaynaklı birleşimi olumsuz etkileyebilir.

3.3. Elektrik Direnç Kaynak Çeşitleri

Elektrik direnç kaynağı, elektrik akımının iş parçaları ve temas yüzeyleri üzerinden geçirilmesiyle oluşan direnç ısısından yararlanılarak gerçekleştirilen bir kaynak yöntemleri grubudur. Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı, ark veya alev gibi dış bir ısı kaynağından değil, doğrudan parçaların elektriksel direncinden elde edilir. Kaynak işlemi sırasında elektrik akımı, mekanik basınç ve temas direnci birlikte etkili olur. Bu nedenle elektrik direnç kaynağı, özellikle ince sacların hızlı ve tekrarlanabilir şekilde birleştirilmesinde önemli bir üretim yöntemi olarak değerlendirilmektedir (ASM International, 2011; Zhang ve Senkara, 2006).

Elektrik direnç kaynak yöntemleri; bağlantı geometrisi, elektrot şekli, akımın uygulama biçimi ve iş parçalarının temas düzenine göre farklı türlere ayrılmaktadır. ISO/TR 23413 standardında direnç kaynak yöntemleri genel olarak NDK, projeksiyon kaynağı, dikiş direnç kaynağı, yakma kaynağı ve yığma alın kaynağı şeklinde ele alınmaktadır. Benzer şekilde ISO 669 standardı da direnç kaynak ekipmanlarını nokta, projeksiyon, dikiş, yakma ve yığma alın kaynak işlemlerini gerçekleştirebilecek makine grupları üzerinden tanımlamaktadır (International Organization for Standardization [ISO], 2016, 2019).

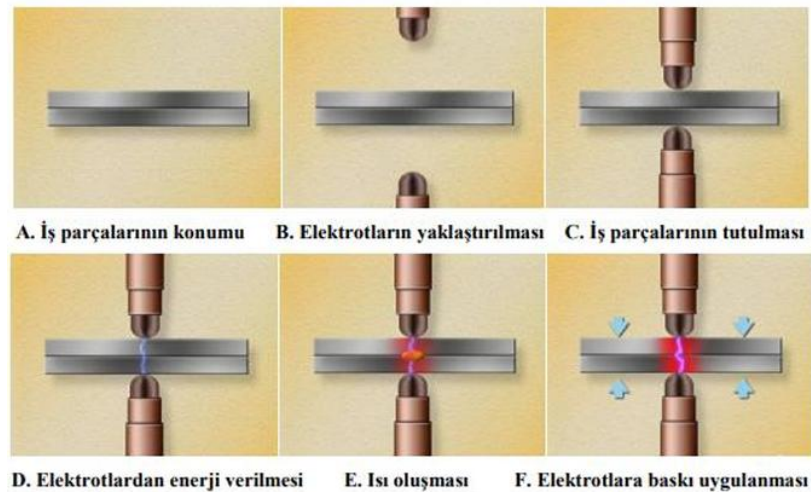
NDK, elektrik direnç kaynak yöntemleri içinde özellikle otomotiv saclarının birleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde iki veya daha fazla sac parça bindirme konumunda elektrotlar arasında sıkıştırılır ve kısa süreli yüksek elektrik akımı uygulanır. Akım geçişi sırasında en yüksek ısı genellikle sac-sac temas yüzeyinde oluşur ve bu bölgede lokal ergime meydana gelir. Soğuma sonrasında oluşan kaynak çekirdeği, saclar arasında noktasal bir bağlantı sağlar. NDK, kısa çevrim süresi, otomasyona uygunluğu ve ilave dolgu metali gerektirmemesi nedeniyle seri üretim hatlarında önemli bir avantaja sahiptir (Messler, 2004; Pouranvari ve Marashi, 2013).

Projeksiyon kaynağı otomotiv endüstrisinde özellikle somun, vida, saplama ve bağlantı elemanlarının sac parçalar üzerine bağlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde kaynak bölgesinin önceden belirlenmiş projeksiyon noktalarında oluşması, ısı girdisinin daha kontrollü yönlendirilmesine olanak sağlar. Nielsen ve arkadaşları, kare somunların saclara projeksiyon kaynağı ile birleştirilmesini incelemiş ve bu yöntemin otomotiv endüstrisinde yaygın kullanılan bir üretim prosesi olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle projeksiyon kaynağı, NDK işlemine alternatif olmaktan çok, bağlantı elemanı kaynaklarında onu tamamlayan bir yöntem olarak değerlendirilebilir (Nielsen vd., 2015).

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan yöntem NDK prosesidir. Bunun nedeni, SCGA 590 DU çift fazlı çelik sacların ince sac formunda olması ve otomotiv sektöründe bu tür sacların çoğunlukla bindirme bağlantı şeklinde birleştirilmesidir. NDK, 1,2 mm kalınlığındaki kaplamalı otomotiv saclarının kısa sürede ve kontrollü ısı girdisiyle birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle elektrik direnç kaynak çeşitleri içinde NDK, malzeme türü, numune geometrisi ve otomotiv uygulama alanı açısından en uygun yöntem olarak öne çıkmaktadır (Pouranvari ve Marashi, 2013; Zhang ve Senkara, 2006).

3.4. Nokta Direnç Kaynağı

NDK, iki veya daha fazla sacın üst üste bindirilerek elektrotlar arasında sıkıştırılması ve kısa süreli yüksek akım uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir elektrik direnç kaynak yöntemidir.



Şekil 3.4. NDK İşlemi Aşamaları

NDK işleminin en önemli avantajları arasında kısa işlem süresi, otomasyona uygunluk, ilave dolgu metali gerektirmemesi ve seri üretimde yüksek tekrarlanabilirlik sağlaması yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv gövde üretiminde en yaygın

kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri haline gelmiştir (Pouranvari ve Marashi, 2013).

NDK işleminde kaynaklı bağlantı genellikle EM, ITAB ve kaynak çekirdeği (KM) olmak üzere üç ana bölgeden oluşur. Kaynak çekirdeği ergime ve katılaşma sonucu oluşurken, ITAB ergimeden ısıl çevrime maruz kalan bölgeyi ifade eder. Bu bölgelerde oluşan mikroyapısal değişimler kaynaklı bağlantının mekanik davranışını belirler (Zhang ve Senkara, 2006).

Bu nedenlerle, çift fazlı çeliklerde NDK birleşimlerinin değerlendirilmesinde mikroyapı, sertlik ve mekanik test sonuçları birlikte ele alınmalıdır.

3.4.1. Nokta Direnç Kaynağının Uygulama Alanları

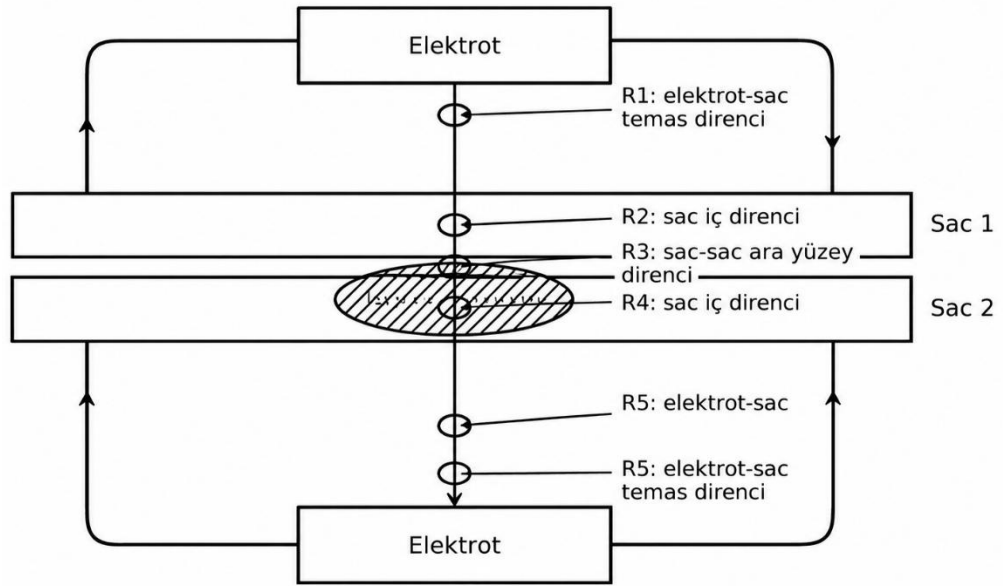
NDK; otomotiv, beyaz eşya, metal mobilya, sac konstrüksiyon ve elektrik-elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ince sacların bindirme bağlantılarında hızlı ve ekonomik bir birleştirme yöntemi olması, bu yöntemin endüstriyel kullanımını artırmaktadır (Doğan ve Elitaş, 2025).

Otomotiv sektöründe NDK, araç gövdesinin farklı sac parçalarının birleştirilmesinde temel yöntemlerden biridir. Bir araç gövdesinde çok sayıda nokta kaynaklı bağlantı bulunur ve bu bağlantılar gövde rijitliği, yorulma dayanımı, çarpışma performansı ve titreşim davranışı üzerinde doğrudan etkilidir (Pouranvari ve Marashi, 2013).

AHSS çeliklerinin otomotivde kullanımının artması, NDK işleminin önemini daha da artırmıştır. AHSS ve çift fazlı çeliklerin seri üretimde kullanılabilmesi için bu malzemelerin uygun kaynak parametreleriyle güvenilir şekilde birleştirilebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle NDK, otomotiv çeliklerinin üretim süreçlerinde kritik bir proses olarak değerlendirilmektedir (WorldAutoSteel, t.y.-c).

3.4.2. Nokta Direnç Kaynak Bölgesinde Oluşan Dirençler

Nokta direnç kaynağında sacların hacimsel direnci de kaynak çevriminin ilerleyen aşamalarında önem kazanmaktadır. Başlangıçta temas dirençleri daha baskın olabilir; ancak sıcaklık arttıkça sac malzemesinin elektriksel direnci de artar. Bu nedenle kaynak çevrimi sırasında dinamik direnç eğrisi, temas dirençleri ve hacimsel dirençlerin birlikte değişimini yansıtan önemli bir proses göstergesi olarak kabul edilmektedir (Wang ve Wei, 2001).



Şekil 3.5. NDK bölgesinde oluşan dirençlerin şematik gösterimi.

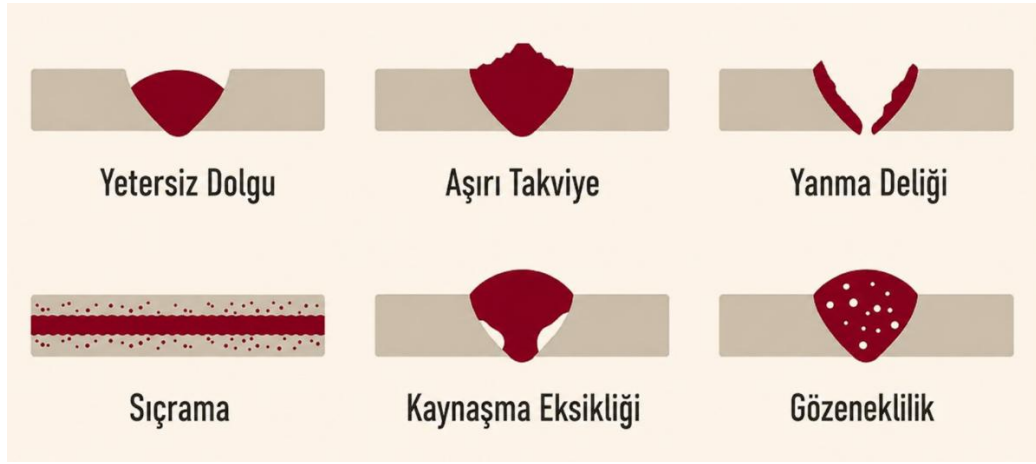
Literatüre göre toplam direnç genel olarak iki ana grupta incelenebilir. Bunlardan ilki, elektrot ve sac malzemelerinin kendi elektriksel öz dirençlerinden kaynaklanan hacimsel dirençtir. İkincisi ise elektrot-sac temas yüzeyinde ve sac-sac ara yüzeyinde meydana gelen temas dirençleridir. Temas dirençleri, özellikle kaynak işleminin başlangıç aşamasında ısı oluşumu üzerinde önemli rol oynamaktadır. Kaynak çevrimi ilerledikçe yüzey pürüzlülüklerinin ezilmesi, kaplama tabakasının yer değiştirmesi, sıcaklık artışı ve temas alanının büyümesi nedeniyle bu dirençlerde değişim meydana gelir (Rogeeon vd., 2008).

Kaplamalı saclarda direnç dağılımı kaplamasız saclara göre daha karmaşık hale gelmektedir. Çinko esaslı veya galvaniz tavlı kaplamalar, kaynak başlangıcında temas direncini değiştirebilir. Kaynak çevrimi sırasında kaplama tabakası yumuşar, yer değiştirir veya elektrot yüzeyine transfer olabilir.

Bu durum elektrot-sac ara yüzeyinde temas alanının değişmesine, elektrot aşınmasına ve kaynak kalitesinde kararsızlığa neden olabilir. SCGA 590 DU gibi kaplamalı otomotiv çeliklerinde bu nedenle yüzey kaplaması, kaynak bölgesinde oluşan dirençlerin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken temel faktörlerden biridir (Rogeeon vd., 2008; Wei ve Wu, 2012).

3.4.3. Nokta Direnç Kaynağında Dikkat Edilmesi Gereken Faktörler

Nokta direnç kaynağında kaynak kalitesi, birden fazla proses değişkeninin etkisiyle belirlenebilir. Bunlar kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti, tutma süresi, elektrot geometrisi, elektrot malzemesi, sac kalınlığı, yüzey kaplaması, parça oturması ve elektrot hizalaması gibi değişkenlerden oluşur. Bu parametrelerden herhangi birinin uygun seçilmemesi, yetersiz kaynak çekirdeği, sıçrama, elektrot batması, ara yüzey kırılması veya yüzey hasarı gibi kalite problemlerine neden olabilir (ISO, 2015; Pouranvari ve Marashi, 2013).



Şekil 3.6. Kaynak kusurları.

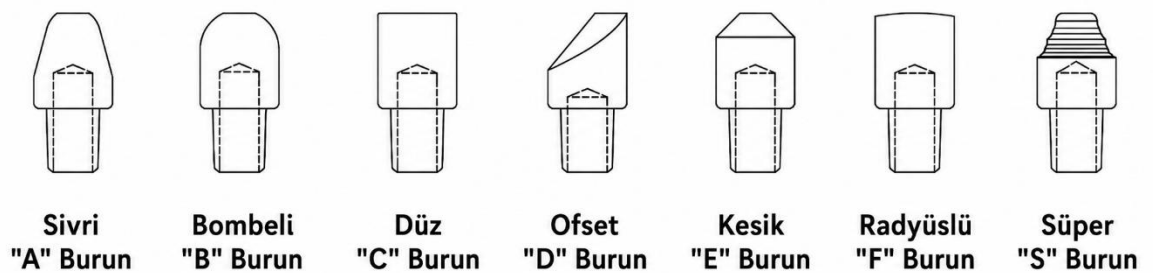
Kaynak akımı, NDK işleminde ısı oluşumu üzerinde en etkili parametrelerden biridir. Akımdaki küçük bir artış kaynak bölgesindeki ısı miktarını önemli ölçüde arttırabilir. Düşük akım değerlerinde yeterli ergime oluşmayabilir ve kaynak çekirdeği küçük kalabilir. Aşırı yüksek akım değerlerinde ise sıçrama, yüzey yanığı, elektrot batması ve KM'de kusur oluşumu görülebilir. Bu nedenle kaynak akımı, yeterli çekirdek oluşumu sağlayacak fakat aşırı ısı girdisi oluşturmayacak aralıkta seçilmelidir (Zhang ve Senkara, 2006; Wan vd., 2014).

Kaynak süresi, kaynak bölgesine akımın uygulandığı süreyi ifade eder. Kaynak süresi arttığında kaynak bölgesinde daha fazla ısı birikir ve kaynak çekirdeği büyüyebilir. Ancak sürenin aşırı artırılması, ITAB'ın genişlemesine, elektrot izinin derinleşmesine ve kaplama bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle kaynak süresi, akım değeri ve sac kalınlığı ile birlikte değerlendirilmelidir. Yüksek akım ve uzun süre kombinasyonu, özellikle ince saclarda elektrot batması ve sıçrama riskini artırabilir (Pouranvari ve Marashi, 2013; Wan vd., 2014).

Elektrot kuvveti, saclar arasındaki temas koşullarını belirleyen temel parametrelerden biridir. Yetersiz elektrot kuvveti temas direncini artırarak lokal aşırı ısınmaya ve sıçramaya yol açabilir. Çok yüksek elektrot kuvveti ise temas direncini düşürerek çekirdek oluşumunu sınırlayabilir veya yüksek sıcaklıkta yumuşayan sac yüzeyinde aşırı elektrot batmasına neden olabilir. Sun ve arkadaşları, elektrot kuvvetinin kaynak kalitesi üzerinde belirgin etkisi olduğunu ve değişken elektrot kuvveti uygulamalarının kaynak çekirdeği gelişimi ile yüzey deformasyonunu etkileyebileceğini belirtmiştir (Sun vd., 2007).

Tutma süresi, kaynak akımı kesildikten sonra elektrotların saclara basınç uygulamaya devam ettiği süredir. Bu süre, kaynak çekirdeğinin basınç altında katılaşması ve bağlantının geometrik kararlılık kazanması açısından önemlidir. Tutma süresi yetersiz olduğunda kaynak çekirdeği tam oluşmadan elektrot basıncı düşebilir ve boşluk, çatlak veya düzensiz katılaşma riski artabilir. Bununla birlikte gereğinden uzun tutma süresi üretim çevrimini uzatır ve seri üretim verimliliğini azaltabilir (ISO, 2015; Pouranvari ve Marashi, 2013).

Elektrot geometrisi ve elektrot malzemesi, akım yoğunluğunu ve ısı dağılımını doğrudan etkiler. Elektrot uç çapının küçük olması akım yoğunluğunu artırarak çekirdek oluşumunu hızlandırabilir; ancak yüzeyde aşırı ısınma ve elektrot batması riskini yükseltebilir. Bu riskler beraberinde malzeme dayanımının düşmesine sebep olabilir. Elektrot uç çapının büyük olması ise akım yoğunluğunu düşürerek yüzey deformasyonunu azaltabilir; fakat yetersiz ısı girdisi nedeniyle kaynak çekirdeği küçük kalabilir. Bu nedenle elektrot uç geometrisi, sac kalınlığı ve malzeme dayanımıyla uyumlu seçilmelidir (Zhang ve Senkara, 2006).



Şekil 3.7. Elektrot uç çeşitleri

Elektrot malzemesinin elektriksel ve ısı iletkenliği, kaynak sırasında ısı dengesini etkileyen önemli bir faktördür. NDK işleminde yaygın olarak bakır alaşımlı elektrotlar kullanılır. Elektrot yüzeyinin aşınması, kirlenmesi veya kaplama malzemesiyle reaksiyona girmesi temas alanını değiştirir. Bu durum aynı kaynak parametreleri kullanılsa bile kaynak

çekirdeği boyutunda ve yüzey izinde değişkenliğe neden olabilir. Özellikle çinko kaplamalı otomotiv saclarında elektrot bakımının düzenli yapılması, kaynak kalitesinin sürekliliği açısından gereklidir (Rogeon vd., 2008).

Sac kalınlığı ve malzeme türü, kaynak parametrelerinin seçiminde dikkate alınması gereken temel faktörlerdir. Kalın saclarda yeterli çekirdek oluşumu için daha yüksek ısı girdisine ihtiyaç duyulabilir. İnce saclarda ise aşırı ısı girdisi yüzey deformasyonu, elektrot batması ve lokal kesit incilmesi oluşturabilir. Bu nedenle 1,2 mm kalınlığındaki SCGA 590 DU saclarda, yeterli çekirdek oluşumu sağlanırken yüzey hasarı ve elektrot batması sınırlandırılmalıdır (ISO, 2015; AWS, 2021).

Yüzey kaplaması, NDK işleminde temas direnci ve elektrot aşınması üzerinde etkili olan önemli bir değişkendir. Çinko esaslı kaplamalar korozyon direnci açısından avantaj sağlasa da kaynak sırasında elektrot-sac temas koşullarını değiştirebilir. Kaplamanın ergimesi, yer değiştirmesi veya elektrot yüzeyine transfer olması, kaynak çevrimi boyunca direnç dağılımını ve akım yoğunluğunu etkileyebilir. Bu durum SCGA 590 DU gibi kaplamalı çift fazlı çeliklerde kaynak parametrelerinin kaplamasız çeliklere göre daha dikkatli seçilmesini gerektirir (Wei ve Wu, 2012).

Parça oturması ve elektrot hizalaması, kaynak kalitesi açısından önemli fakat çoğu zaman ihmal edilen faktörlerdir. Saclar arasında boşluk bulunması, elektrotların tam karşılıklı hizalanmaması veya numunelerin kaynak sırasında kayması, akım yolunu ve basınç dağılımını değiştirebilir. Bu durumda kaynak çekirdeği eksantrik oluşabilir veya bağlantıda mekanik dayanım düşebilir. Otomotiv üretiminde bu nedenle fiktürleme, elektrot hizası ve parça yüzey temizliği kaynak kalitesinin sürekliliği açısından kontrol edilmelidir (Aminisharifabad ve Yang, 2019).

Sıçrama, NDK işleminde aşırı ısı girdisi veya yetersiz mekanik kontrol nedeniyle ergimiş metalin kaynak bölgesinden dışarı atılmasıdır. Sıçrama meydana geldiğinde kaynak çekirdeğinde hacim kaybı, boşluk, çatlak ve düzensiz çekirdek geometrisi oluşabilir. Wan ve arkadaşları, DP600 çeliğinin NDK işleminde sıçrama oluşumunun aşırı elektrot batması, çekirdek kusurları ve kaynak kalitesinde düşüşle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle sıçrama sınırı, kaynak parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir üst sınır olarak değerlendirilmelidir (Wan vd., 2014).

Elektrot batması, kaynak sonrası elektrot ucunun sac yüzeyinde oluşturduğu kalıcı çökme olarak tanımlanabilir. Elektrot batması belirli bir seviyeye kadar normal kabul edilse de aşırı batma sac kesitinde lokal incelme ve gerilme yığılması oluşturabilir. AWS D8.1M standardı, otomotiv çeliklerinde NDK için görsel ve ölçülebilir kalite kabul kriterleri

sunmaktadır. Bu bağlamda elektrot izi ve yüzey deformasyonu, kaynaklı bağlantının kalite değerlendirmesinde dikkate alınması gereken önemli kriterlerdendir (AWS, 2021).

4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN NOKTA DİRENÇ KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

Çift fazlı çeliklerin otomotiv sektöründe yaygınlaşması, bu malzemelerin nokta direnç kaynağı davranışının ayrıntılı olarak incelenmesini gerekli hale getirmiştir. Çift fazlı çelikler yüksek dayanım ve şekillendirilebilirlik dengesini ferrit-martenzit esaslı mikroyapıları sayesinde sağlamaktadır. Ancak bu mikroyapı, kaynak çevrimi sırasında yüksek sıcaklık, hızlı ısınma ve hızlı soğuma etkisiyle önemli dönüşümlere uğramaktadır. Bu nedenle çift fazlı çeliklerin kaynaklanabilirliği yalnızca kaynak çekirdeğinin oluşup oluşmadığıyla değil; kaynak bölgesindeki mikroyapı, sertlik dağılımı, kırılma modu, çekme-makaslama dayanımı ve yüzey kalitesiyle birlikte değerlendirilmelidir (Zhang ve Senkara, 2006; Pouranvari ve Marashi, 2013).

NDK sırasında çift fazlı çeliklerde kaynak bölgesi genel olarak EM, ITAB ve kaynak çekirdeği olmak üzere üç ana bölgeden oluşmaktadır. EM ağırlıklı olarak ferrit ve düşük miktarda martenzit fazlarından meydana gelirken, kaynak çekirdeği ergime ve hızlı katılaşma sonucunda çoğunlukla martenzitik yapı kazanmaktadır. Bu durum kaynak çekirdeğinde yüksek sertlik değerlerinin oluşmasına neden olur. Buna karşılık ITAB'da sıcaklık geçmişine bağlı olarak martenzitin temperlenmesi, kısmi dönüşüm veya tane büyümesi gibi farklı mikroyapısal değişimler meydana gelebilmektedir (Ma vd., 2008).

Ramazani ve arkadaşları, DP600 çeliğinin NDK bağlantılarında kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada kaynak çekirdeğinde martenzitik yapının baskın olduğu, ITAB'da ise martenzitin temperlenmesine bağlı olarak sertlik düşüşü meydana geldiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, çekme deneylerinde düğme tipi kırılma modunun görüldüğünü ve çatlak başlangıcının kaynak çekirdeği çevresindeki martenzitik bölgelerle ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Bu sonuç, çift fazlı çeliklerde kaynak sonrası oluşan lokal mikroyapısal farklılıkların mekanik davranışı doğrudan etkilediğini göstermektedir (Ramazani vd., 2015).

Khan ve arkadaşları, 590R, DP600, DP780 ve TRIP780 gibi farklı ileri yüksek dayanımlı çeliklerin NDK bağlantılarını incelemiştir. Çalışmada AHSS türlerinin farklı alaşım içeriği ve üretim geçmişi nedeniyle kaynak bölgesi sertliği ve mikroyapı davranışlarının değiştiği belirtilmiştir.

Araştırmacılar, kaynak çekirdeği sertliğinin malzemenin kimyasal bileşimiyle ilişkili olduğunu ve AHSS çeliklerin otomotiv yapılarında kullanılmasının kaynak performansının daha ayrıntılı anlaşılmasını gerekli kıldığını ifade etmiştir (Khan vd., 2008).

Ma ve arkadaşları, DP600 çeliğinin NDK bağlantılarında mikroyapı ve kırılma karakteristiğini incelemiştir. Çalışmada kaynak çekirdeğinde hızlı soğumaya bağlı martenzitik yapı oluştuğu, kaynak bölgesinde oluşan mikroyapısal değişimlerin kırılma davranışı üzerinde belirleyici olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, kaynak çekirdeği geometrisi, sertlik dağılımı ve olası kaynak kusurlarının bağlantının yük taşıma kapasitesini etkilediğini ortaya koymuştur (Ma vd., 2008).

Zhang ve arkadaşları, farklı kalınlıklardaki DP780 ve DP600 çift fazlı çeliklerin NDK bağlantılarını incelemiştir. Çalışmada kaynaklı bağlantının EM, ITAB ve KM bölgesinden oluştuğu; kaynak merkezine doğru martenzit oranı, tane boyutu ve sertlik değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Bu sonuç, farklı dayanım ve kalınlıktaki çift fazlı çeliklerin kaynaklanmasında ısı dağılımının ve çekirdek gelişiminin bağlantı performansı açısından kritik olduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2014).

Çift fazlı çeliklerde NDK kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan biri kaynak akımıdır. Kaynak akımı arttıkça kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarı artmakta, buna bağlı olarak kaynak çekirdeği çapı ve kaynak bölgesi sertliği değişmektedir. Ancak akımın gereğinden fazla artırılması sıçrama, elektrot batması, yüzey deformasyonu ve mekanik dayanımda düşüş gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle çift fazlı çeliklerde en uygun parametre, en yüksek akım değeri değil; yeterli çekirdek oluşumu, sınırlı yüzey hasarı ve uygun kırılma modu sağlayan akım-süre kombinasyonudur (Pouranvari ve Marashi, 2013; Elitaş, 2021).

Elitaş, DP1200 çeliğinin NDK birleşimlerinde kaynak parametrelerinin çekme makaslama özellikleri ve kırılma modları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada kaynak akımının çekme-makaslama dayanımı üzerinde etkili olduğu, akım artışının belirli bir seviyeye kadar dayanımı artırdığı, ancak aşırı parametrelerde sıçrama ve kalite kaybı oluşturabileceği belirtilmiştir. Bu sonuç, yüksek dayanımlı çift fazlı çeliklerde kaynak penceresinin daralabileceğini ve parametre optimizasyonunun zorunlu olduğunu göstermektedir (Elitaş, 2021).

Pareek ve arkadaşları, DP590 çeliğinin NDK işleminde kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvvetinin kaynak kalitesi üzerindeki etkisini modellemiş ve optimize etmiştir. Çalışmada çekme-makaslama dayanımı, dinamik temas direnci ve kaynak çekirdeği çapı

değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, çekme-makaslama dayanımının kaynak akımı ve elektrot kuvvetine kaynak süresinden daha duyarlı olduğunu; numunelerde ara yüzey kırılması ve düğme tipi kırılma modlarının görüldüğünü belirtmiştir (Pareek vd., 2022).

Singh ve arkadaşları, 1,2 mm kalınlığındaki DP590 çeliğe 7–15 kA aralığında, 1 kA artışlarla NDK uygulamıştır. Çalışmada 9 kA değerinin kritik akım olduğu, bu akımda kırılmanın EM’de ve düğme tipi modunda gerçekleştiği belirtilmiştir. Kritik akımın altındaki değerlerde kırılmanın çoğunlukla kaynak çekirdeğinde ve ara yüzey kırılması şeklinde olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuç, 1,2 mm kalınlığındaki 590 MPa sınıfı çift fazlı çeliklerde kaynak akımının kırılma modunu belirleyen temel değişkenlerden biri olduğunu göstermektedir (Singh vd., 2026).

Singh ve arkadaşlarının DP590 çalışması, bu tezde kullanılan SCGA 590 DU çeliği açısından da önemlidir. Çünkü her iki çalışma da yaklaşık 590 MPa dayanım sınıfındaki ve 1,2 mm kalınlık seviyesindeki çift fazlı çeliklerin NDK davranışını incelemektedir. Söz konusu çalışmada 9 kA civarında düğme tipi kırılma modunun elde edilmesi, düşük akımlarda yetersiz çekirdek oluşumu, yüksek akımlarda ise aşırı ısı girdisi ve kusur oluşumu riskinin değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum, bu tezde kullanılan 8, 10 ve 12 kA akım değerlerinin kaynak davranışını karşılaştırmak için uygun bir aralık oluşturduğunu desteklemektedir (Singh vd., 2026).

Asati ve arkadaşları, DP780 çeliğinde geleneksel NDK ile kademeli akım uygulamasını karşılaştırmıştır. Çalışmada kademeli akım uygulamasının kaynak akımı aralığını 2 kA’dan 3 kA’ya çıkardığı, daha düşük ortalama akım değerlerinde daha büyük kaynak çekirdeği, daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve daha iyi enerji absorpsiyonu sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, uygun parametrelerde düğme tipi kırılma modunun elde edildiğini ve çatlak ilerlemesinin yumuşamış kritik sıcaklık altı ITAB’da başladığını ifade etmiştir (Asati vd., 2024).

Asati ve arkadaşlarının bulguları, çift fazlı çeliklerde kaynak penceresinin genişletilmesi için akım profilinin yalnızca sabit değer olarak değil, zamana bağlı değişen bir proses girdisi olarak da ele alınabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, SCGA 590 DU gibi kaplamalı çift fazlı çeliklerde klasik tek darbeli kaynak parametrelerinin yanında kademeli akım veya çok darbeli kaynak çevrimlerinin de bağlantı performansını iyileştirmek için araştırılabileceğini göstermektedir (Asati vd., 2024).

Betiku ve arkadaşları, AHSS çeliklerin NDK bağlantılarında kaynak sonrası yerinde ısıl işlem ve çift kuvvet uygulamasının mekanik davranışa etkisini incelemiştir. Çalışmada çift

kuvvet uygulamasının enerji absorpsiyon kapasitesini %39, çift kuvvet ile kaynak sonrası ısıtıl işlem akımının birlikte uygulanmasının ise %85 artırdığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, bu iyileşmenin kaynak çekirdeği kenarında tane incelmesi ve çatlak ilerleme yolunun değişmesiyle ilişkili olduğunu ifade etmiştir (Betiku vd., 2024).

Bu bulgu, çift fazlı ve AHSS çeliklerde kaynak performansının yalnızca çekirdek çapının artırılmasıyla değil, kaynak çekirdeği kenarındaki mikroyapının kontrol edilmesiyle de iyileştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle çarpışma güvenliği açısından enerji absorpsiyon kapasitesi kritik olduğundan, kaynak bölgesinde çatlak ilerleme yolunu değiştiren veya ITAB yumuşamasını azaltan proses tasarımları otomotiv uygulamaları için önem taşımaktadır (Betiku vd., 2024).

Zhou ve arkadaşları, DP590 çeliğinin NDK işleminde dinamik direnç ve elektrot yer değiştirmesi gibi proses sinyallerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada dinamik direnç ve elektrot yer değiştirmesinin kaynak sırasında malzeme davranışını dolaylı olarak yansıttığı, kaynak çevrimi ilerledikçe temas alanının değiştiği ve elektrot izlerinin daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. Bu sonuç, elektrot batması ve kaynak çekirdeği gelişiminin proses sırasında izlenebilir değişkenler olduğunu göstermektedir (Zhou vd., 2022).

Elektrot batması bu tezde 12 kA–200 ms parametresinde görülen yüksek akım ve uzun kaynak süresi, kaynak bölgesinde aşırı ısı girdisi oluşturarak sac yüzeyinde incelme meydana gelmesine sebep olabilir. Bu durumda elektrot kuvveti altında kaynak çekirdeğinde daha fazla plastik deformasyon ve elektrot batması meydana gelir. Elektrot batması arttığında sac kesitinde lokal incelme oluşur, gerilme yığılması artar ve çekme-makaslama testi sırasında yük taşıma kapasitesi düşebilir (American Welding Society, 2021; Zhou vd., 2022).

Su ve arkadaşları, otomotiv gövde üretiminde NDK birleşimlerinde başlangıç sac aralığının mekanik davranış üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada modern çelik araç gövdelerinde yaklaşık 3000–6000 nokta kaynak bulunduğu, bu kaynakların gövde bütünlüğü açısından kritik olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, başlangıç sac aralığının artmasıyla çekme-makaslama numunelerinde tepe yük değerlerinin azaldığını ve kaynak kalitesinin olumsuz etkilendiğini raporlamıştır (Su vd., 2024).

Başlangıç sac aralığı, elektrot hizasızlığı, yüzey kaplaması ve elektrot aşınması gibi üretim kaynaklı değişkenler, çift fazlı çeliklerde NDK kalitesinin tekrarlanabilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle laboratuvar koşullarında elde edilen optimum kaynak parametrelerinin endüstriyel üretime aktarılmasında yalnızca akım ve süre değil, aynı zamanda parça oturması, elektrot durumu ve yüzey temas koşulları da dikkate alınmalıdır.

Çinko kaplamalı ileri yüksek dayanımlı çeliklerde NDK sırasında sıvı metal gevrekleşmesi, yüzey çatlakları ve elektrot-kaplama etkileşimi gibi ek problemler görülebilmektedir. Sun ve arkadaşları, Zn kaplamalı AHSS çeliklerin NDK birleşimlerinde kaynak akımı, elektrot hızı ve sac aralığı gibi faktörlerin LME çatlak oluşumu eğilimini etkileyebileceğini belirtmiştir. Bu durum, SCGA 590 DU gibi kaplamalı çift fazlı çeliklerde kaynak parametrelerinin yalnızca mekanik dayanım açısından değil, yüzey ve çatlak oluşumu açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Sun vd., 2024).

1,2 mm kalınlığındaki saclarda elektrot batmasının kabul edilebilirlik sınırı dikkatle değerlendirilmelidir. AWS otomotiv nokta kaynak kalite kriterlerine göre elektrot batmasının dış sac kalınlığının yaklaşık %30'unu aşmaması beklenir. Bu durumda 1,2 mm kalınlık için üst sınır yaklaşık 0,36 mm'dir. Bununla birlikte iyi yüzey kalitesi ve daha kararlı mekanik performans için literatürde %10–20 aralığı daha uygun kabul edilmektedir. Bu aralık 1,2 mm sac için yaklaşık 0,12–0,24 mm'ye karşılık gelmektedir (American Welding Society, 2021; Ribeiro vd., 2020).

Genel olarak literatür değerlendirildiğinde, çift fazlı çeliklerin NDK işlemine uygun olduğu; ancak kaynak kalitesinin dar bir parametre aralığında kontrol edilmesi gerektiği görülmektedir. Kaynak akımı ve kaynak süresi çekirdek oluşumunu artırırken, aşırı ısı girdisi elektrot batması, sıçrama, ITAB yumuşaması ve kırılma modunda olumsuz değişimlere neden olabilir. Bu nedenle SCGA 590 DU çift fazlı çeliğinin kaynaklanabilirliği değerlendirilirken mikroyapı, sertlik dağılımı, çekme-makaslama davranışı, kırılma modu, elektrot batması ve yüzey kalitesi birlikte incelenmiştir.

Bu tez çalışması, 1,2 mm kalınlığındaki SCGA 590 DU çift fazlı çeliğin 8-10-12 kA akım ve 100–200 ms süre aralığında NDK davranışını incelemesi bakımından literatürdeki DP590 ve SCGA590 çalışmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle kaynak akımı değerlerinin karşılaştırılması, düşük ısı girdisi, optimum çekirdek gelişimi ve aşırı ısı girdisi koşullarının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, kaplamalı 590 MPa sınıfı çift fazlı otomotiv çeliklerinin NDK parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlayabilecek niteliktedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada SCGA590 DU kalite otomotiv saclarından numuneler hazırlanmış olup, NDK işlemi uygulanmıştır.

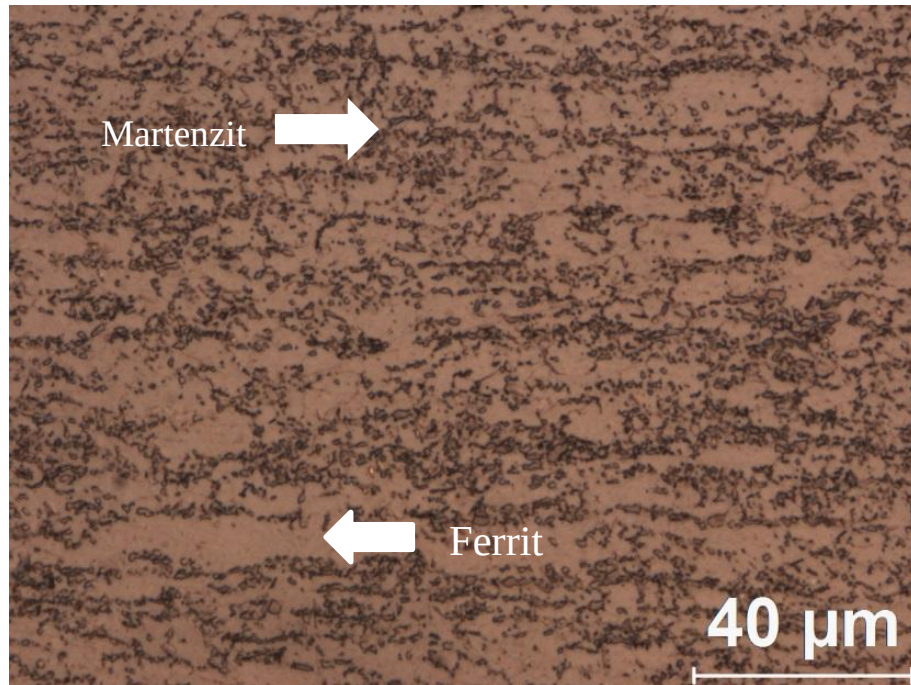
5.1. Deneyde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

SCGA çelikleri otomotiv endüstrisinde oldukça kullanılan düşük karbonlu çelik grubuna ait, soğuk haddelenmiş galvaniz kaplı bir çelik türüdür. SCGA590 çeliği soğuk haddelenmiş olmasıyla korozyon direncini, galvaniz kaplı yapısı ile kaynak kabiliyetini arttırmaktadır.

SCGA590 sacının kimyasal özellikleri Tablo 5.1.'de mikro yapısı ise Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. SCGA çeliğinin kimyasal bileşimi

Çelik	C	Mn	Si	P	S	Fe
SCGA590	0,23	3,3	2	0,09	0,015	Kalan

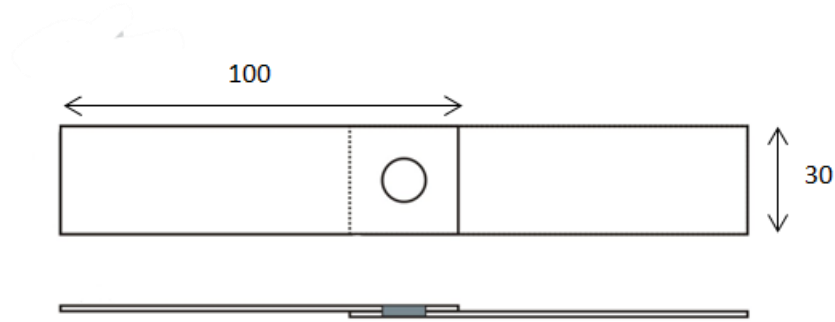


Şekil 5.1. SCGA590 çeliğinin mikroyapısı

SCGA çeliği çift fazlı olup ağırlıklı olarak ferrit fazından ve düşük miktarda (partikül şeklinde) martenzit fazından oluşmaktadır (Şekil 5.1). Yaklaşık 590 MPa çekme dayanımına sahiptir.

5.2. Numune Ölçüleri

Temin edilen 1,2 mm kalınlığındaki sac metal, NDK işleminde kullanılmak üzere giyotin makas yardımıyla 100*30 mm uzunluklarında EN ISO 14273 standartlarına göre kesilmiştir. Numune ölçüleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Numune ölçüleri

5.3. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi

İstenilen boyutlarda kesilen SCGA590 numune çiftleri, SAĞLAMLAR marka PP060 model akım ve zaman kontrollü kaynak makinesi yardımıyla farklı parametrelerde birleştirilmiştir. İşlem esnasında kullanılan NDK makinesi Şekil 5.3’te verilmiştir. 6 mm çapında bakır elektrotlar kullanılarak üç farklı akım ve iki farklı zaman parametrelerinde her parametreden 4 adet numune olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir. NDK işlemi 8kA, 10kA ve 12kA kaynak akımlarında, 100 ms ve 200 ms kaynak sürelerinde ve 4,4 bar elektrot basıncı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrot basıncı tüm NDK işlemleri boyunca sabit tutulmuştur. NDK işlem parametreleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. NDK işlem parametreleri.

Birleşim	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Kaynak akımı(kA)	8	10	12	8	10	12
Kaynak Süresi(ms)	100	100	100	200	200	200



Şekil 5.3. Çalışmada kullanılan NDK makinesi

NDK işlemi sonrasında oluşan birleşimler Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. NDK işlemi

5.4. Mikro Yapı İnceleme Çalışmaları

Faz yapılarının incelenmesi amacıyla NDK birleşimleri bakalite alınmak üzere METKON METACUT-300 hassas kesme cihazında kaynak bölgesini içerecek şekilde kesilmiştir. Hassas kesme cihazı Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Hassas kesme işleminde kullanılan cihazın teknik özellikleri;

Kesme Gücü:4/5.1 kW

Disk Dönüş Hızı:2800 rpm

Disk Çapı:250/300 mm

Kesme Kapasitesi:Ø110 mm

T-Kanal Tabla Boyutları:300mm x 380 mm

T-Kanal Genişliği:12 mm

Cihaz Boyutları:740 mm x 770 mm x 670 mm

Soğutma Ünitesi Hacmi:80 lt şeklindedir.



Şekil 5.5. METKON METACUT-300 hassas kesme cihazı

Numunelerin istenilen boyutlarda kesilmesinin ardından bakalite alınmıştır. Sonrasında MEKTON FORCİPOL 2V ZIMPARALAMA ve PARLATMA CİHAZI kullanılarak 120-220-360-600-800-1200-1500-2000 mesh zımparalar vasıtasıyla numune yüzeylerinde zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi ardından numunelere parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işlemi sırasında 3 mikron ve 1 mikron elmas pastalar sırasıyla kullanılmıştır. Kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı Şekil 5.6’ da verilmiştir.

Zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan cihazın özellikleri;

Çift zımparalama ve parlatma bölgesi

Motor Gücü:0.75 HP

Dönüş Hızı:50-600 rpm

Boyutlar:700 mm x 690 mm x 340 mm şeklindedir.



Şekil 5.6. MEKTON FORCİPOL 2V zımparalama ve parlatma cihazı

Zımpara ve parlatma işlemi sonrasında numunelere %2 Nital (%2 Nitrik asit+%98 Metanol) çözeltisinde 2 saniyelik sürelerle kademeli olarak dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi sonrasında numunelerin EM, ITAB ve KM bölgelerinin mikroyapıları incelenmiştir. Bu aşamada NİKON ECLİPSE LV150N ENDÜSTRİYEL MİKROSKOP kullanılmıştır (Şekil 5.7).

İnceleme esnasında kullanılan cihazın özellikleri;

Maksimum Örnek Boyutu:150 mm x 150 mm

Maksimum Örnek Yüksekliği:38 mm

Maksimum Büyütme Oranı:100x şeklindedir.



Şekil 5.7. NİKON ECLİPSE LV150N endüstriyel mikroskop

5.5. Mikro Sertlik Testi

Mikro sertlik testlerinde, mikroyapı incelemeleri için kullanılan numuneler kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri EM, ITAB ve KM bölgeleri boyunca eksenlere paralel doğrultuda her bölgede ölçüm, her numunede 15 ölçüm olacak şekilde yapılmıştır. Mikro sertlik işleminde HV0,5 yük 10 saniye süreyle uygulanmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Vickers ve Knoop sertlik uçlarıyla Vickers sertlik ölçüm prensine göre (malzeme yüzeyine tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesi) sertlik ölçümü yapabilen EMCOTEST DUROSCAN 20 cihazıyla yapılmıştır. Mikro sertlik ölçüm cihazının ölçme yük aralığı 1g-10kg arasında olup, iz görüntülerini 10x,40x ve 60x olacak şekilde odaklama yapabilmektedir. Cihazın görüntüsü Şekil 5.8.'de verilmiştir.



Şekil 5.8. EMCOTEST DUROSCAN 20 mikro sertlik ölçüm cihazı

5.6. Çekme Makaslama Testi ve Kaynak Çekirdek Çap Ölçümü

SCGA590 numunelerine farklı parametrelerde uygulanan NDK işlemi sonrası çekirdek çap değerleri dijital kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm sonrasında, 100kN çekme-basma işlemini uygulayabilen SHİMADZU AG-IC cihazında 2 mm/dk çene hızında çekme makaslama testleri gerçekleştirilmiştir. İşlem esnasında her parametre için 3 adet numune kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak ortalama çekme makaslama kuvvet değerleri belirlenmiştir. Test cihazı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. SHİMADZU AG-IC çekme makaslama test cihazı

5.7. Taramalı Elektron Mikroskobu

SCGA590 sac numunelerinin NDK'lı birleşimleri ve çekme makaslama testi sonrasında oluşan kırılma yüzeyleri yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesi amacıyla SEM kullanılarak incelenmiştir. SEM Cihazı vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektro manyetik lensler ile inceltilmekte olan elektron demetiyle beraber malzemeyi analiz etmeye yarayan cihazdır. İşlem esnasında Maksimum çözünürlüğü 1 nm ve büyütme aralığı 12x-900.000 x olan ZEISS / Supra 40 VP olan cihaz kullanılmıştır. Şekil 5.10.' da gösterilmiştir.



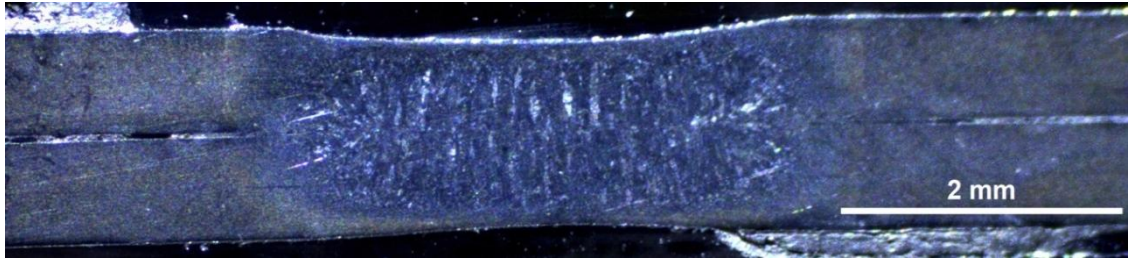
Şekil 5.10. ZEISS / Supra 40 VP SEM cihazı

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

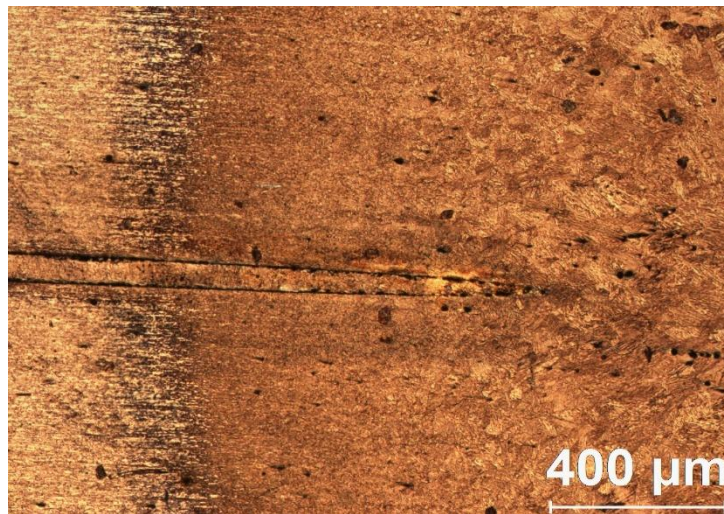
6.1. Mikroyapı

NDK işlemi sonrasında malzemenin kaynaklanabilirliğinin belirlenmesi ve mikroyapı etkilerinin belirlenmesi için EM ve kaynak uygulanan bölgenin incelenmesi oldukça önemlidir. Yapılan çalışmada SCGA590 çeliğine farklı kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrelerinde NDK prosesi uygulanmış olup elde edilen birleşimlerin mikroyapısal değişimleri ve makro görüntüleri incelenmiştir. Şekil 6.1’de 12 kA-200 ms kaynak parametrelerinde birleştirilen SCGA590 çeliğinin makro görüntüsü, Şekil 6.2’de kaynak profil görüntüsü verilmiştir.

NDK elektrotlarının su ile soğutulması nedeniyle kaynak bölgesindeki soğuma hızı oldukça yüksektir. Bu hızlı soğuma, karbon difüzyonuna yetecek zamanı bulamamasına yol açtığından hem KM’de hem de ITAB’da mikro yapı büyük ölçüde martenzit fazı şeklinde oluşmuştur. Soğuma hızının artmasıyla beraber östenitten martenzite dönüşüm oranı da yükselir. Bu nedenle KM’de, EM’den farklı olarak iğnemi martenzit fazının yoğunlaştığı görülmektedir.



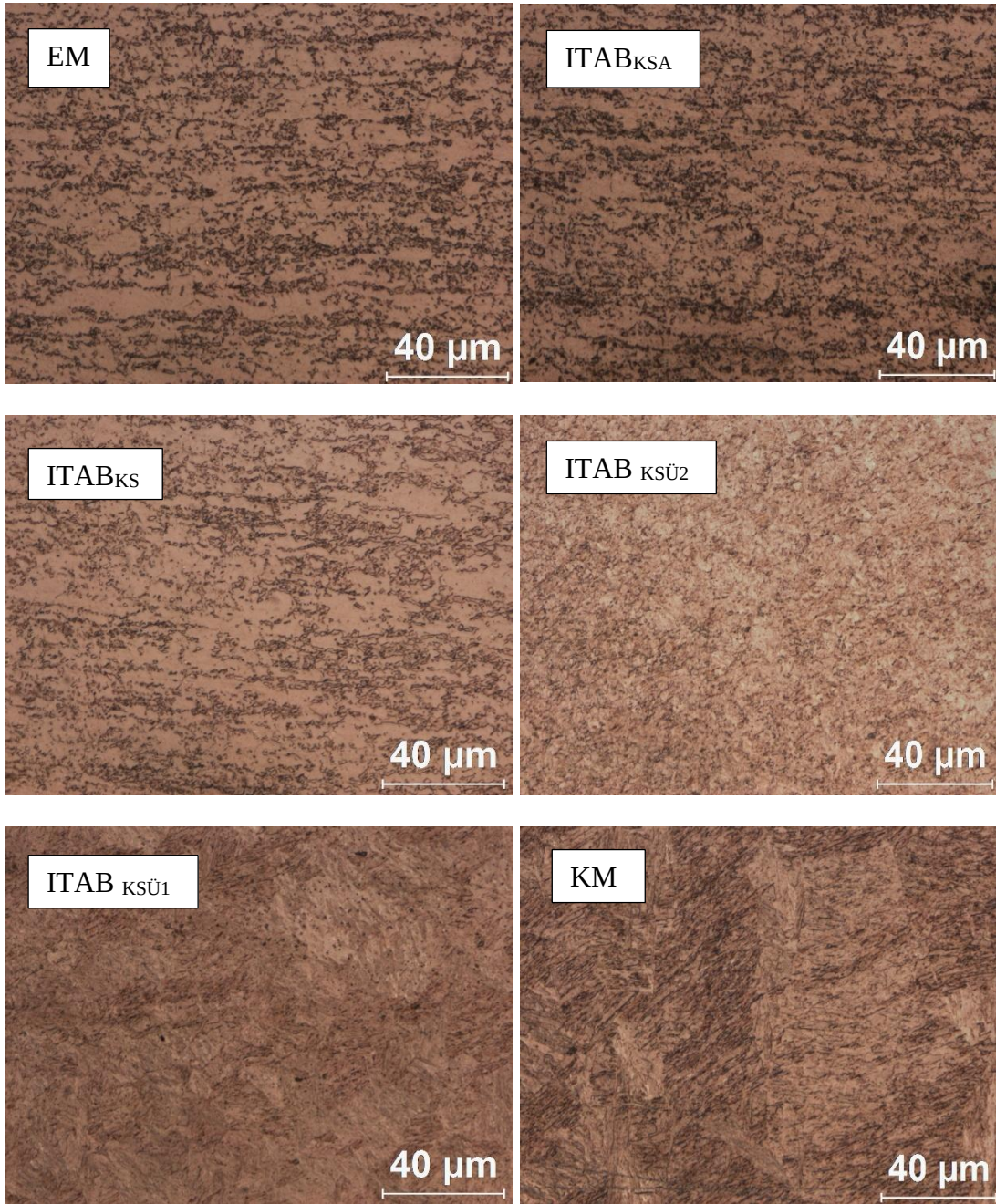
Şekil 6.1. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin makro görüntüsü.



Şekil 6.2. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin profil görüntüsü.

SCGA590 çeliğinin EM, ITAB ve KM bölgelerinde meydana gelen yapısal değişimleri gösteren mikroyapı resimleri Şekil 6.2’de verilmiştir. EM, ITAB bölgeleri ve KM bölgesinin mikroyapıları Şekil 6.3’te gösterilmiştir.

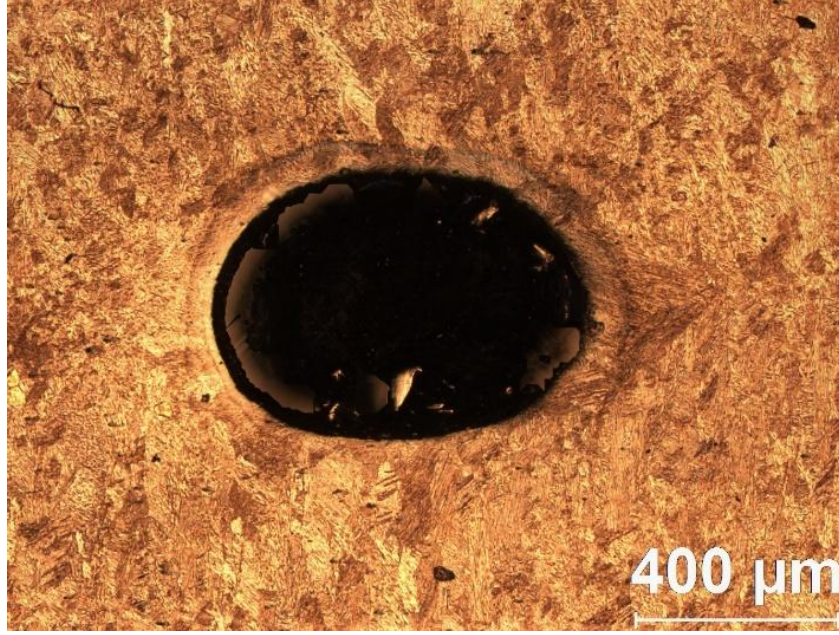
Literatürde NDK ile birleştirilmiş çift fazlı çeliklerin ITAB’ı incelendiğinde, bu bölgenin termal çevrime bağlı olarak dört alt bölgeye ayrıldığı rapor edilmektedir. Bu alt bölgeler; kritik sıcaklık altı ITAB ($ITAB_{KSA}$), kritik sıcaklıklar arası ITAB ($ITAB_{KS}$), ince taneli kritik sıcaklık üstü ITAB ($ITAB_{KSÜ2}$) ve kaba taneli kritik sıcaklık üstü ITAB ($ITAB_{KSÜ1}$) olarak tanımlanmaktadır (Ramazani vd., 2015).



Şekil 6.3. NDK ile birleştirilen SCGA590 çeliğinin mikro yapı görüntüleri.

Şekil 6.3 incelendiğinde NDK işleminin neticesinde SCGA590 çeliğinin EM bölgesinin ferritik yapıda olduğu, ITAB'a doğru yüksek sıcaklık nedeni ile tane büyümesi olduğu ve KM'de ise yapının iğnemsiz martenzit yapıda olduğu gözlemlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri neticesinde 8 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan numunede yetersiz kaynak parametreleri sonucu istenilen birleşim elde edilemediği tespit edilmiş, KM bölgesinde boşluk gözlemlenmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. KM bölgesinde gözlenen boşluklu yapı.

. Bu tez çalışmasında mikroyapı incelemeleri beraberinde SCGA 590 DU malzemesinin elementel dağılımının incelenmesi adına EDS analizi yapılmıştır.

EDS analizi, numunedeki elementel dağılımının değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. İncelemeler esnasında SCGA 590 DU çeliğinin yapısı ve elementlerin dağılımının incelenmesi de kaynak kalitesinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Bu nedenle EDS analizi yapılarak Fe, Mn, Si, Zn ve diğer alaşım/kaplama elementlerinin malzeme içerisindeki dağılımları incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemenin kimyasal bileşiminde Fe ana element olarak verilmiş; Cr, Mn, Si, C, P, O ve W gibi elementlerin ise daha düşük oranlarda bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle EDS analizinde Fe elementinin yoğun ve sürekli dağılım göstermesi, EM temel matris yapısının demir esaslı olduğunu ortaya koymaktadır

Mn, Si ve Cr gibi elementler çelik içerisindeki alaşım elementleri olarak değerlendirilmektedir. Bu elementlerin EM’de düşük oranlarda bulunması, SCGA590 DU çeliğinin kimyasal yapısıyla uyumludur.

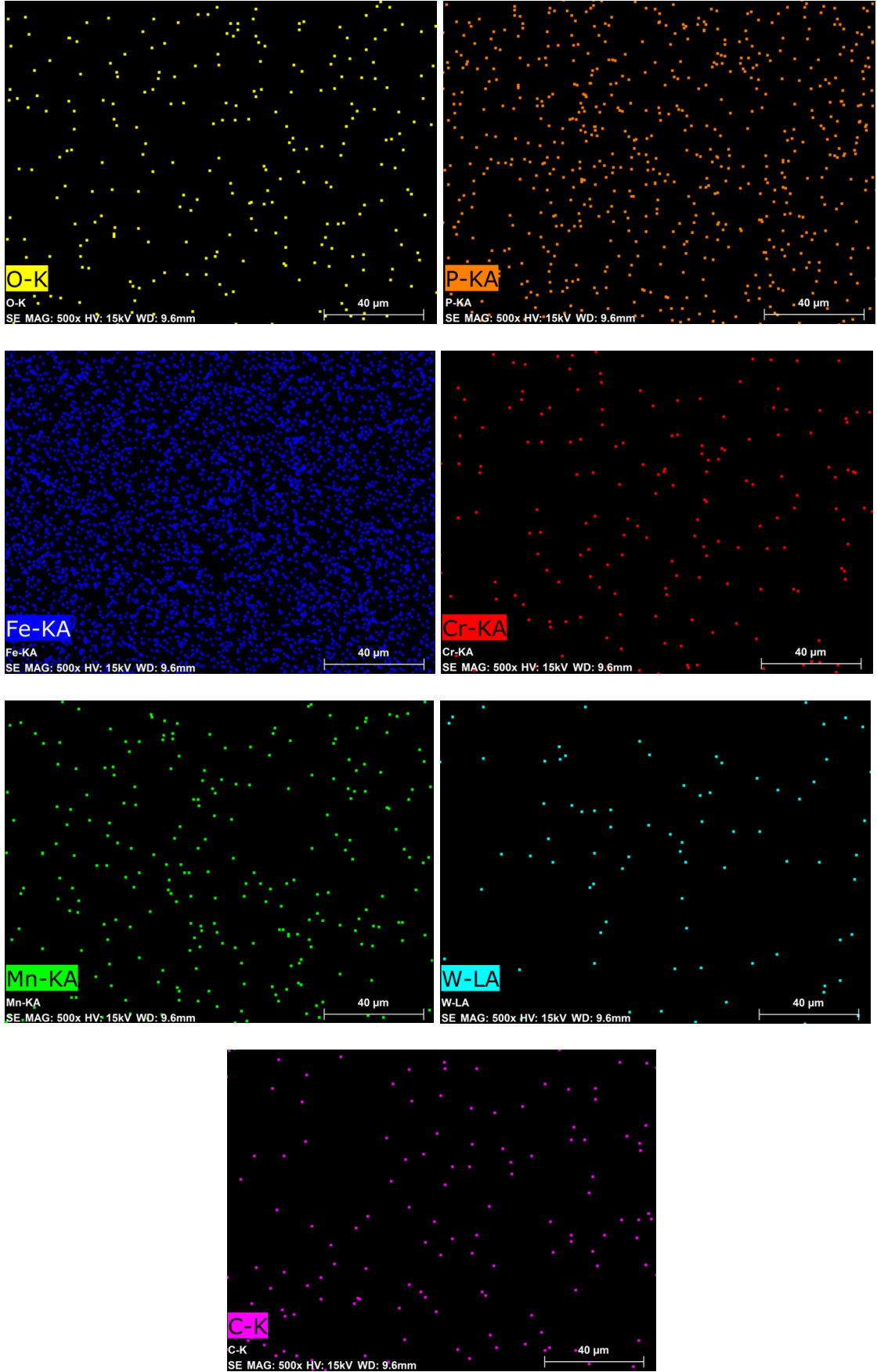
EDS analizinde Zn elementinin tespit edilmesi durumunda, SCGA590 DU çeliğinin galvaniz kaplı yapısıyla ilişkilendirilebilir.

Galvaniz kaplama, çelik yüzeyinde korozyon direncini artırmak amacıyla kullanılan çinko esaslı bir kaplama türüdür. Bu nedenle esas metal yüzeyinden alınan EDS analizlerinde Zn elementinin görülmesi, malzemenin galvaniz kaplı olduğunu destekleyen bir bulgu olarak değerlendirilir.

Yapılan deney sonucunda elde edilen EDS haritaları ve noktasal analiz sonuçları Şekil 6.5 ve 6.6’da verilmiştir.

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Iron	K-series	73.77	86.51	69.09	3.33
Carbon	K-series	5.33	6.25	23.22	3.67
Manganese	K-series	0.44	0.51	0.42	0.17
Zinc	K-series	4.64	5.44	3.71	1.03
Oxygen	K-series	1.09	1.28	3.57	0.99
Total:		85.27	100.00	100.00	

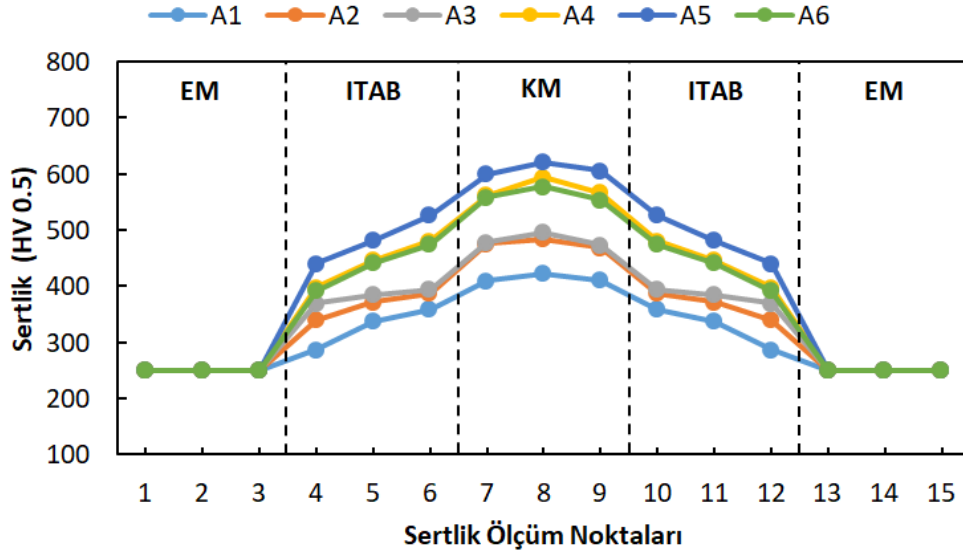
Şekil 6.5. SCGA 590 çeliğine ait EDS analizi.



Şekil 6.6. SCGA 590 DU çeliğine ait EDS analizi ve elementel dağılımı.

6.2. Mikro Sertlik Sonuçları

8 kA, 10 kA ve 12 kA kaynak akımlarında, 100 ms ve 200 ms kaynak sürelerinde 4,4 bar sabit elektrot basıncında elde edilen NDK'lı numunelerin mikro sertlik değerleri Şekil 6.5'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Grafik 6.1. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının mikrosertlik ölçümü.

Elektrot basıncı işlem boyunca sabit tutulup akım ve zaman parametreleri;

8 kA-100 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A1) 409-422 HV,

8 kA-200 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A2) 469-484 HV,

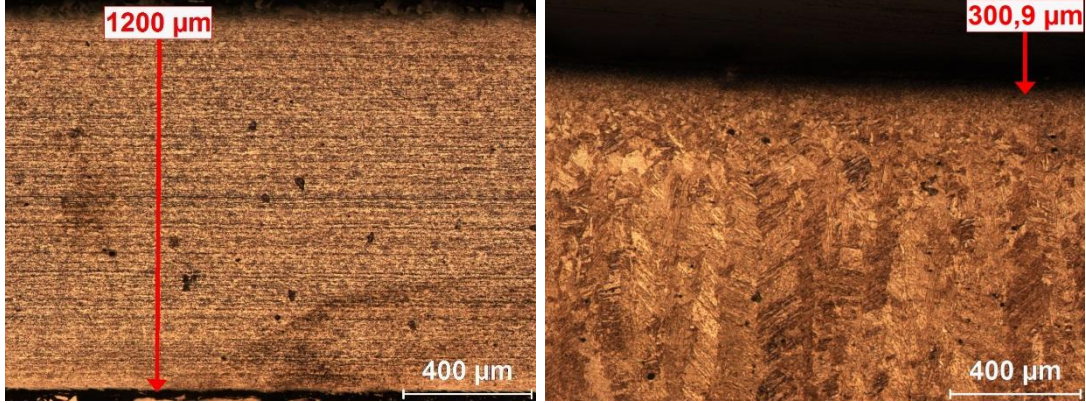
10 kA-100 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A3) 473-496 HV,

10 kA-200 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A4) 562-593 HV,

12 kA-100 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A5) 600-621 HV,

12 kA-200 ms parametrelerinde kaynak metali bölgesi sertliği (A6) 553-578 HV olduğu gözlemlenmiştir.

İncelemeler sonucunda en düşük KM bölgesindeki sertlik değeri A1 numunesinde elde edilirken, en yüksek değer ise A5 numunesinde elde edilmiştir. A6 numunesinde kaynak parametreleri yükselmesine rağmen KM bölgesi sertliğinde düşüş meydana gelmiştir. Sertlik değerindeki düşüş incelendiğinde 12 kA-200 ms parametrelerine ait numunenin mikroyapı görüntülerinden EM genişliği ve KM bölgesindeki derinlik kıyaslandıktan sonra KM bölgesinde batma derinliğinin %25 olduğu saptanmış olup numuneye ait görseller Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.7. NDK ile birleştirilen 12 kA-200 ms parametrelili SCGA590 çeliğine ait elektrot batma derinliğinin ölçümü.

Söz konusu oran, otomotiv nokta kaynak kalite değerlendirmelerinde kullanılan %30 üst kabul sınırının altında kalmakla birlikte, iyi yüzey kalitesi ve daha kararlı mekanik performans için literatürde önerilen %10-20 aralığının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. (American Welding Society [AWS], 2021; Ribeiro vd., 2020).

SCGA590 çeliği özelinde Doğan ve Elitaş tarafından yapılan çalışmada 8 kA, 10 kA ve 12 kA kaynak akımları ile 100 ms ve 200 ms kaynak süreleri kullanılmıştır. Çalışmada kaynaklı birleşimin EM, ITAB ve KM olmak üzere üç farklı bölgeden oluştuğu ve sertlik değerlerinin EM’den KM’ye doğru arttığı belirtilmiştir. En yüksek sertlik değeri 10 kA–200 ms parametresinde 621 HV olarak elde edilmiştir (Doğan ve Elitaş, 2025).

Doğan ve Elitaş’ın çalışmasında en yüksek sertliğin 12 kA yerine 10 kA–200 ms parametresinde elde edilmesi, aşırı akım artışının her zaman daha iyi kaynak performansı sağlamayacağını göstermektedir. Bu sonuç, bu tezde 12 kA–200 ms numunesinin çekme diyagramında görülen düşüşle uyumludur. Çünkü yüksek akım ve uzun süre kombinasyonu, kaynak çekirdek çapını artırsa bile aşırı ısı girdisi nedeniyle elektrot batması, yüzey hasarı, lokal incelleme veya sıçrama gibi olumsuzluklara neden olabilir (Doğan ve Elitaş, 2025; American Welding Society, 2021).

Bu tez çalışmasında 12 kA–200 ms parametresinde meydana gelen çekme diyagramı düşüşü, yetersiz kaynak oluşumundan farklı olarak, aşırı ısı girdisine bağlı bir kalite problemiyle değerlendirilebilir. Bu parametrede kaynak bölgesindeki sıcaklık artışı sac yüzeyini yumuşatmış, elektrot kuvveti altında elektrot batmasını artırmış ve kaynak bölgesinde lokal kesit zayıflaması oluşturmuş olabilir. Elektrot batmasının artması, çekme-makaslama testinde gerilme yığılmasına neden olarak bağlantının maksimum yükten sonra ani düşüş göstermesine yol açabilir (American Welding Society, 2021; Zhou vd., 2022).

A5 numunesinde 12 kA-100 ms parametresinde kaynak metali sertliği 600-621 HV aralığında elde edilirken, A6 numunesinde 12 kA-200 ms parametresinde sertlik değeri 553-578 HV aralığına düşmüştür.

Bu sonuç, kaynak parametrelerinin artırılmasının her durumda daha yüksek kaynak performansı sağlamadığını göstermektedir. A6 numunesinde sürenin 200 ms tercih edilmesiyle ısı girdisi artmış; buna bağlı olarak elektrot batması ve lokal deformasyon etkisi belirginleşmiş olabilir.

Bu bağlamda 12 kA-200 ms parametresi, SCGA590 DU çeliği için aşırı ısı girdisi ve yüzey deformasyonu riski taşıyan bir kaynak koşulu olarak değerlendirilebilir.

6.3. Çekme Makaslama Dayanımı

Kaynaklı bağlantıların mekanik performansının değerlendirilmesinde çekme-makaslama testi en yaygın kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Otomotiv saclarının büyük bölümü NDK ile birleştirildiğinden, kaynak bölgesinin servis koşullarında taşıyabileceği yükün belirlenmesi oldukça önemlidir.

Çekme-makaslama dayanımı, kaynak çekirdeğinin yük taşıma kapasitesini, kaynak bölgesindeki metalurjik değişimlerin bağlantı davranışına etkisini ve kaynak parametrelerinin mekanik performans üzerindeki sonucunu doğrudan ortaya koymaktadır.

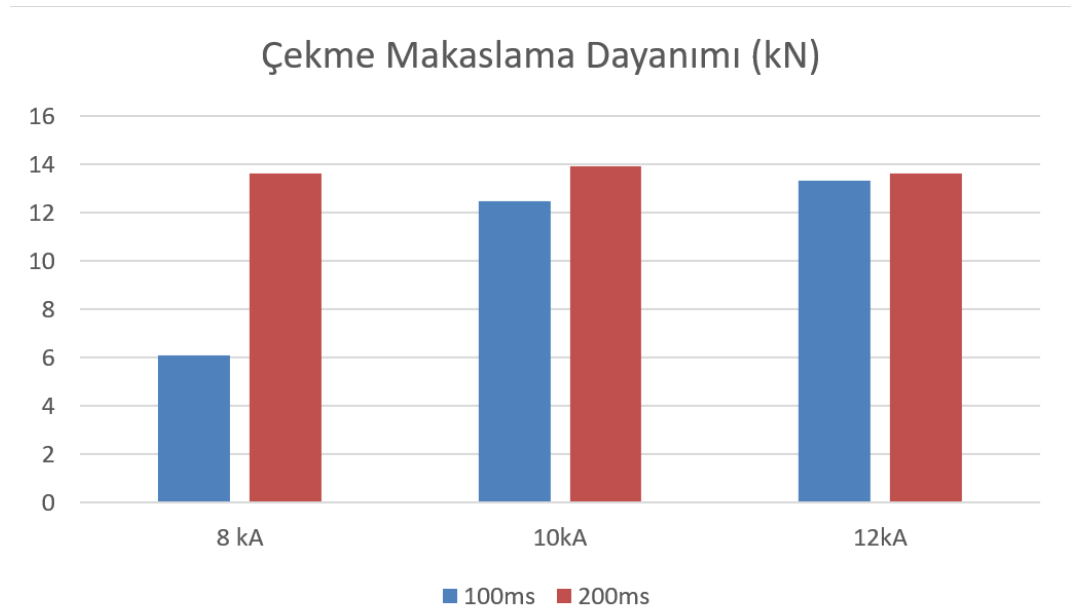
Çekme-makaslama testi yalnızca maksimum kuvvet değerinin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda kaynaklı bağlantının kırılma davranışının incelenmesi açısından da önemlidir.

NDK birleşimlerinde ara yüzey kırılması, kısmi ara yüzey kırılması ve düğme tipi kırılma gibi farklı kırılma modları görülebilmektedir. Literatürde genel olarak düğme tipi şeklindeki kırılma modu daha yüksek enerji absorpsiyonu ve daha iyi bağlantı performansı ile

ilişkilendirilirken, ara yüzey kırılması yetersiz kaynak çekirdeği veya düşük bağlantı dayanımıyla ilişkilendirilmektedir (Elitaş, 2021; Yuan vd., 2017).

Tablo 6.1 SCGA 590 çeliğinin çekme makaslama dayanımı.

Malzeme Bilgisi	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Uzama (mm)
SCGA 590 DU	24,9063 kN	18,4540



Grafik 6.2. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının maksimum kuvvet değerleri.

Tablo 6.2. SCGA590 çeliğinin farklı parametrelerde gerçekleştirilen NDK'lı bağlantılarının çekme makaslama deney sonuçları.

Kaynak Parametreleri	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Uzama (mm)
8 kA- 100 ms	6,08	5,27
8 kA- 200 ms	13,62	5,92
10 kA- 100 ms	12,46	5,85
10 kA- 200 ms	13,92	6,71
12 kA- 100 ms	13,33	6,24
12 kA- 200 ms	13,61	5,87

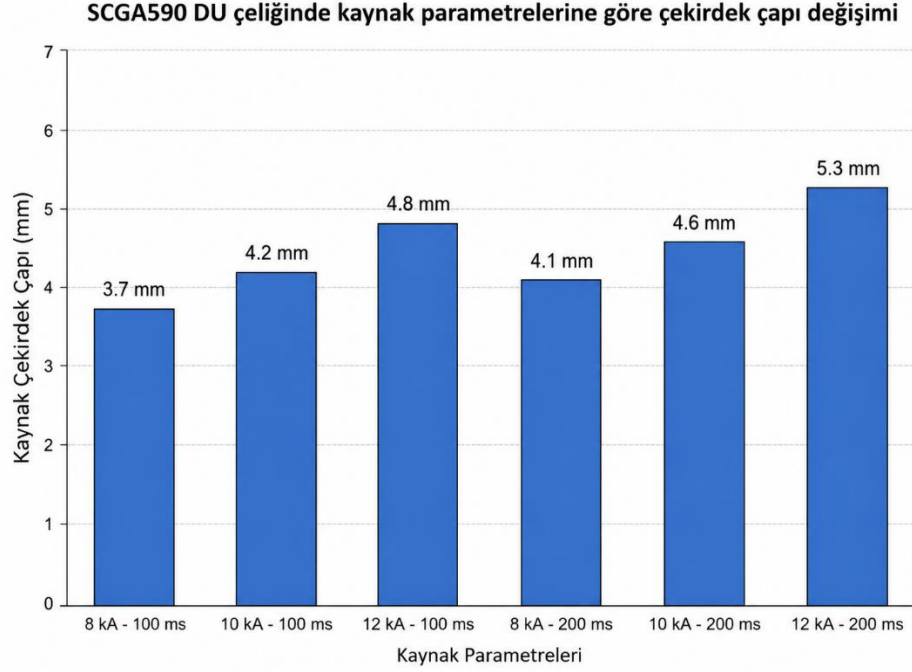
Verilere göre SCGA 590 DU çeliğinin kaynaklı birleşimlerinin akım ve zamana bağlı olarak sürekli bir artış göstermediğini, 12 kA kombinasyonlarının maksimum kuvvet değerlerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür.

Çekme makaslama deney sonuçları Şekil 6.6 ile birlikte değerlendirildiğinde bu numunede elektrot batma derinliğinin yaklaşık %25 olduğu tespit edilmiştir. 12 kA-200 ms parametrelili NDK'lı birleşiminin mikroyapısında gözlemlenen elektrot batma derinliği, çekme makaslama deney sonucunu olumsuz etkilemiştir.

Bu sebeple çekme-makaslama dayanımı sonuçları değerlendirilirken yalnızca kaynak akımı ve kaynak süresinin artışına bağlı olarak dayanımın artması beklenmemelidir. Yüksek akım ve kaynak süresi uygulaması beraberinde aşırı ısı girdisi oluşturabilir.

Aynı zamanda literatüre göre kaynak çekirdek çapı ve çekme makaslama dayanımı arasında doğrusal bir oran bulunsa da bu oran sınırsız bir artış göstermemektedir. Deney verilerinde görüldüğü üzere yüksek akım-zaman parametresi kaynak çekirdeği gelişimini arttırsa bile elektrot batması, yüzeyde lokal incelme ve gerilme yığılması gibi olumsuzluklara neden olarak bağlantının taşıma kapasitesini düşürebilir.

4,4 bar sabit elektrot basıncına sahip SCGA590 DU malzemesinin NDK'lı birleşimlerine ait çekirdek çap değerleri Grafik 6.3'de verilmiştir.



Grafik 6.3. SCGA590 DU çelik numunelerine ait çekirdek çap değerleri.

Deneyisel yöntemde kaynak çekirdek çap değerleri dijital kumpas yardımıyla ölçülmüştür ve ardından yapılan incelemeler neticesinde NDK işlemi esnasında sabit elektrot basıncı altında akım ve zaman parametreleri arttıkça aynı oranda kaynak çekirdek çaplarının arttığı görülmüştür.

6.4. Kırılma Tipleri

SCGA 590 DU kalite çelik numunelerine ilk aşamada çekirdek çap ölçümü, ardından çekme makaslama deneyi uygulanmıştır. Deney verileri neticesinde farklı akım ve zaman parametrelerinde birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiş olup, parametrelere bağlı olarak ara yüzey tipi kırılma, kısmi ara yüzey tipi kırılma ve tam düğme tipi kırılma örnekleriyle karşılaşılmıştır.

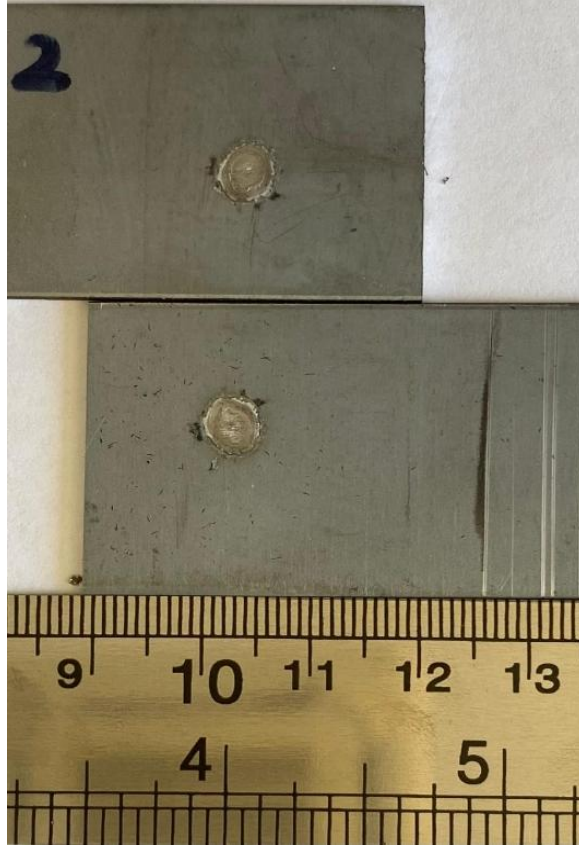
Ara yüzey kırılma tipi düşük akım-zaman parametreleri sebebiyle ısı girdisinin düşük olmasına ve metal sacların istenilen şekilde birleşmemesinden kaynaklı meydana gelir, yetersiz kaynak davranışını gösterir ve çekirdek çap ölçüsüyle doğru orantılıdır.

Yüksek akım-zaman parametrelerinin uygulandığı ve bunun beraberinde yeterli ısı girdisinin mevcut olduğu birleşimlerde çekirdek çap ölçüsü nispeten daha büyüktür Tam düğme tipi kırılma ise kaynak çekirdeğinin çevresindeki sacın tamamen kopması ve çekirdeğin belirgin bir düğme formunda bir sac yüzeyinden ayrılmasıyla oluşmaktadır bu

durum bağlantının ara yüzey kırılmasına göre daha yüksek yük taşıma ve enerji absorpsiyon kapasitesi gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

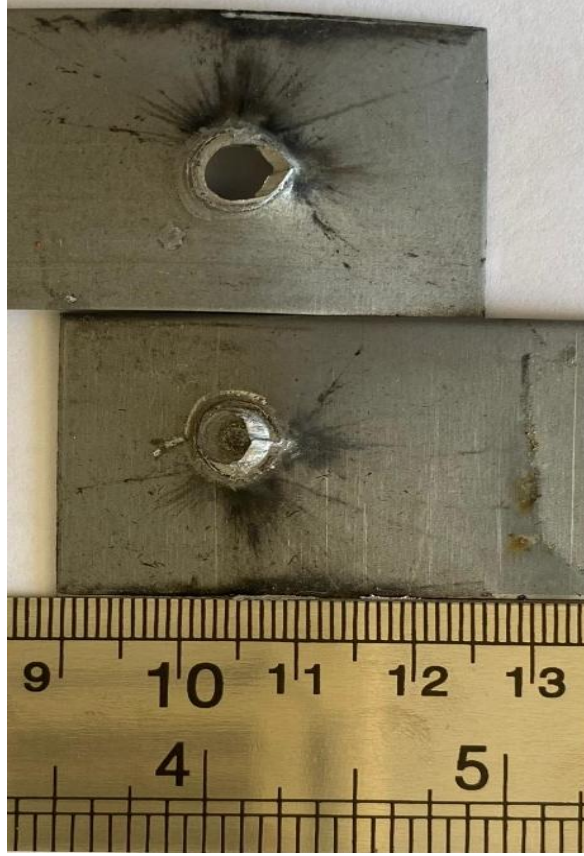
NDK işlemi uygulanan SCGA590 DU çeliğinin farklı parametrelerdeki birleşimlerine ait kırılma tipleri görsellerde verilmiştir.

Şekil 6.8’de 8 kA-100 ms parametrelerinde birleştirilen numuneye (A1) ait ara yüzey kırılması verilmiştir.



Şekil 6.8. NDK işlemi uygulanan A1 kodlu numuneye ait ara yüzey kırılma tipi.

Şekil 6.9’da 10 kA-100 ms parametrelerinde birleştirilen numuneye (A3) ait kısmi ara yüzey kırılması verilmiştir.

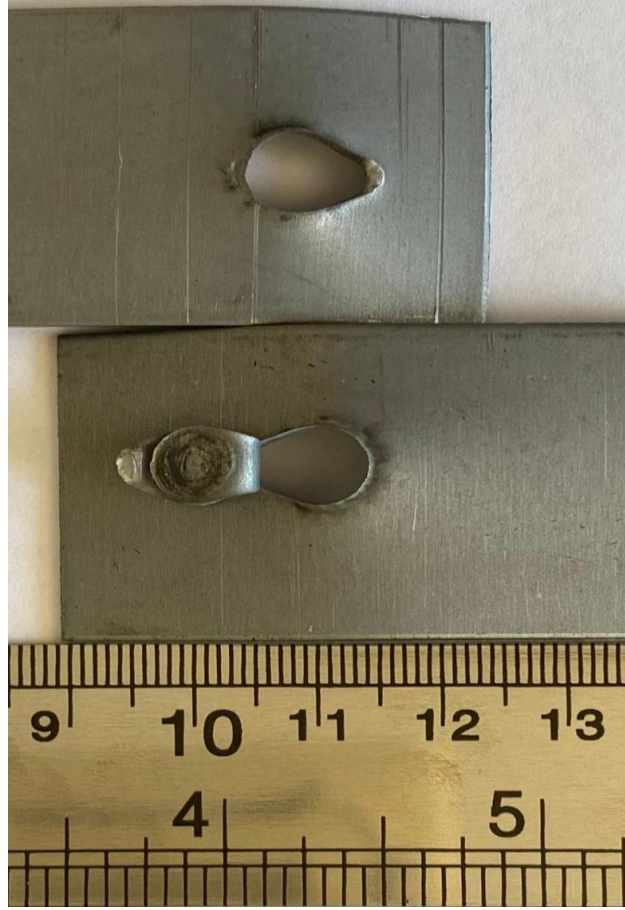


Şekil 6.9. NDK işlemi uygulanan A3 kodlu numuneye ait kısmi ara yüzey kırılma tipi.

Görselleri verilen iki akım- zaman parametreleri haricinde uygulanan parametrelerde tam düğme tipi kırılma meydana gelmiştir. Bu durum neticesinde zaman parametresinin kaynak çekirdek çapı ve kırılma tipi üzerindeki etkisi görülmüştür.

İstenen kırılma tiplerinden biri olan düğme tipi kırılma gelişmiş çekirdek oluşumunu ifade etmektedir. Buna ait görsel ve bu kırılmanın görüldüğü parametreler aşağıda verilmiştir.

Şekil 6.10’da 8 kA-200 ms, 10 kA-200 ms, 12 kA- 100 ms ve 12 kA-200 ms parametrelerinde görülen tam düğme tipi kırılma örneği verilmiştir.



Şekil 6.10. NDK işlemi uygulanan A4 kodlu numuneye ait düğme kırılma tipi.

Çekme-makaslama testi sonrasında belirlenen kırılma tipleri, kaynaklı bağlantının hasar davranışını ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada hasarın oluşum mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi adına ara yüzey kırılması, kısmi ara yüzey tipi kırılma ve tam düğme tipi kırılma gösteren numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile daha ayrıntılı olarak incelenmiştir.

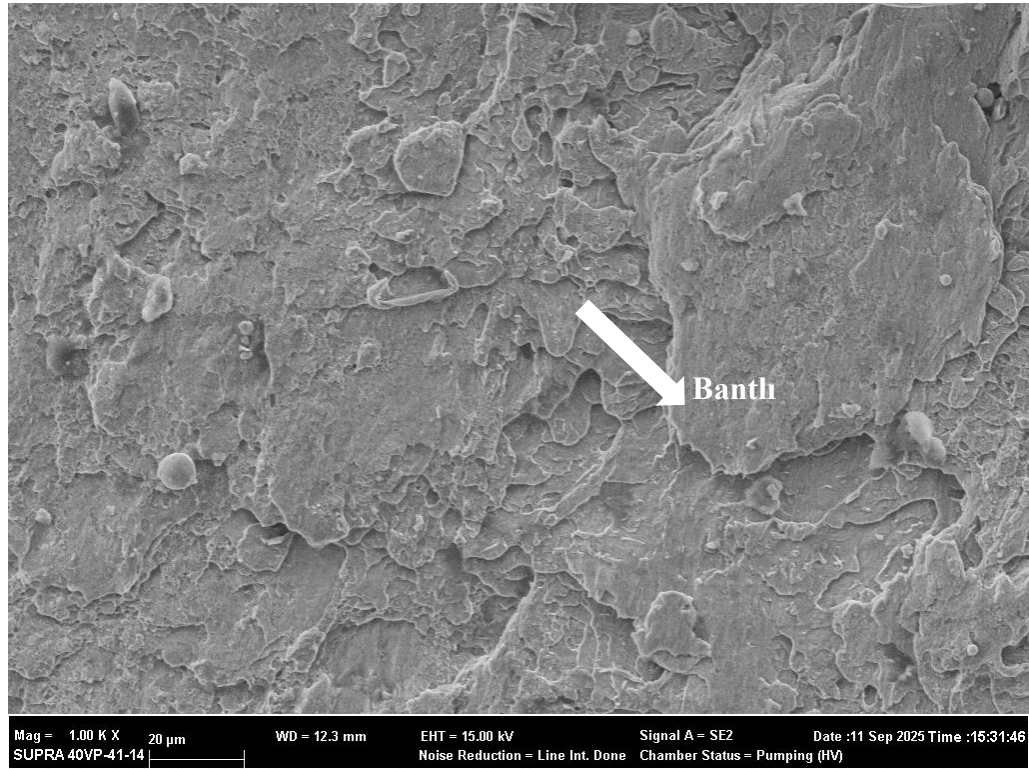
SEM görüntüleri sayesinde kırılma yüzeylerinde oluşan yapıları, gevrek kırılma bölgeleri, çatlak ilerlemesine dair izleri, ayrılma yüzeyleri ve malzemenin uğradığı plastik deformasyon daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Böylece kaynak parametrelerinin yalnızca maksimum çekme-makaslama dayanımı üzerindeki etkisi değil, aynı zamanda kırılma mekanizması ve kaynak bölgesinin mikroyapısal davranışı üzerindeki etkisi de yorumlanabilmektedir. Bu kapsamda farklı kaynak akımı ve kaynak süresiyle birleştirilen SCGA590 DU çelik numunelerine ait SEM kırık yüzey görüntüleri aşağıda verilmiştir.

Ara yüzey kırılması gösteren numuneye ait SEM görüntüsünde bantlı ve yönlenmiş bir kırılma yapısı gözlemlenmiştir. Bu görüntü, kırılmanın kaynak çekirdeği çevresinde gerçekleştiğini göstermektedir. Literatüre göre ara yüzey kırılmasında kaynak çekirdeği

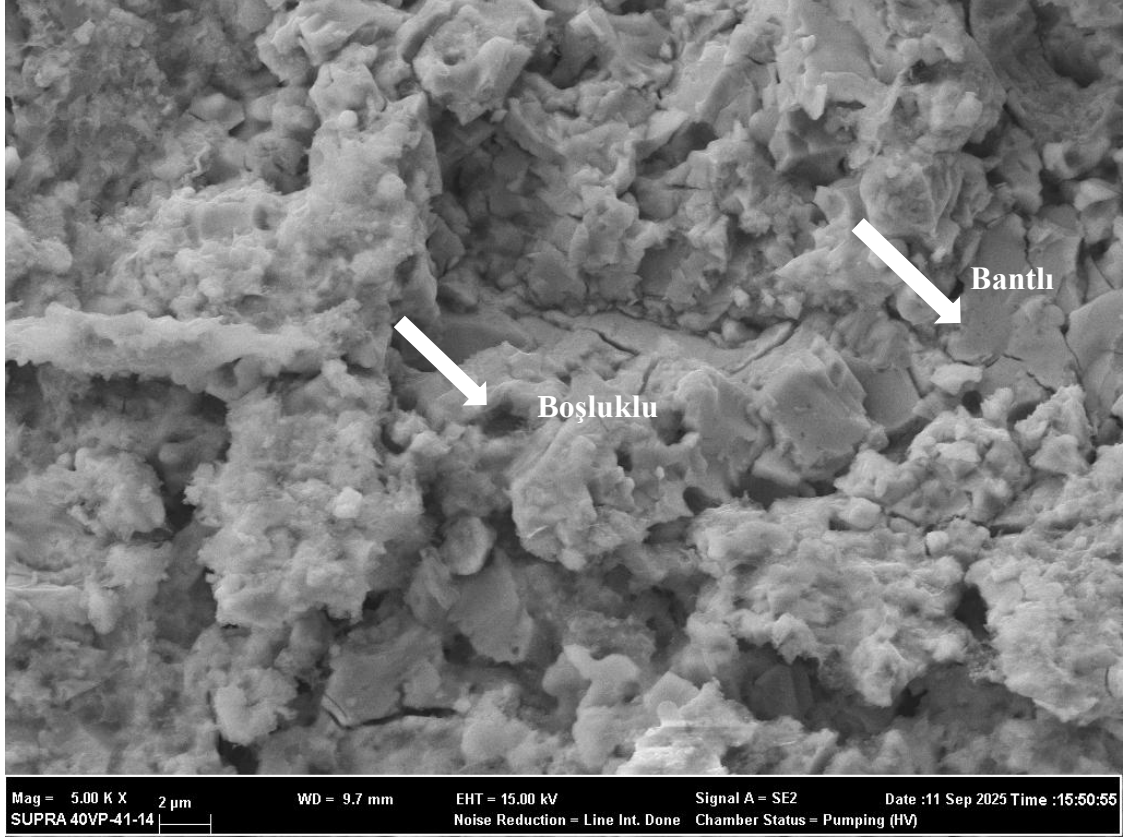
saclardan birini düğme şeklinde koparmadığı için yük taşıma kapasitesinin çoğunlukla sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, kaynak çekirdeği çapının yetersiz olması, kaynak bölgesinde gevrekleşme, yüksek sertlik veya ara yüzeyde kusur bulunması gibi nedenlerden kaynaklanabilir.

Bu bağlamda bantlı yapı gözlenen ara yüzey kırılması, bağlantının daha düşük enerji harcayarak hasara uğradığını göstermektedir.



Şekil 6.11. 8 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait ara yüzey kırılma tipi SEM görüntüsü

Kısmi ara yüzey kırılması gösteren numunede ise SEM görüntüsünde hem bantlı yapı hem de boşluklu-çukurlu bölgeler birlikte görülmüştür. Bu durum bantlı bölgelerde çatlağın ara yüzey boyunca daha gevrek kırılma tipiyle ilerlediğini gösterirken, boşluklu bölgeler kırılma sırasında bazı bölgelerde plastik deformasyonun da meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6.12. 10 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait kısmi ara yüzey kırılma tipi SEM görüntüsü

Kısmi ara yüzey kırılması gösteren numunede çatlak ilerlemesi gözlenmiştir, çatlakların özellikle kaynak çekirdeği çevresinde veya ara yüzey boyunca ilerlemesi, bu bölgede sertlik farkı, mikroyapısal değişim veya gerilme yoğunlaşmasının bulunduğunu düşündürülebilir.

Çift fazlı çeliklerin NDK işleminde ITAB ve KM bölgelerinde martenzitik yapı oluşabildiği için, bu bölgelerde sertlik artışı ve kırılma hassasiyeti de görülebilmektedir. Bu nedenle kısmi ara yüzey kırılması gösteren numunedeki çatlak ilerlemesi, kaynak bölgesindeki mikroyapısal sertleşme ile açıklanabilir.

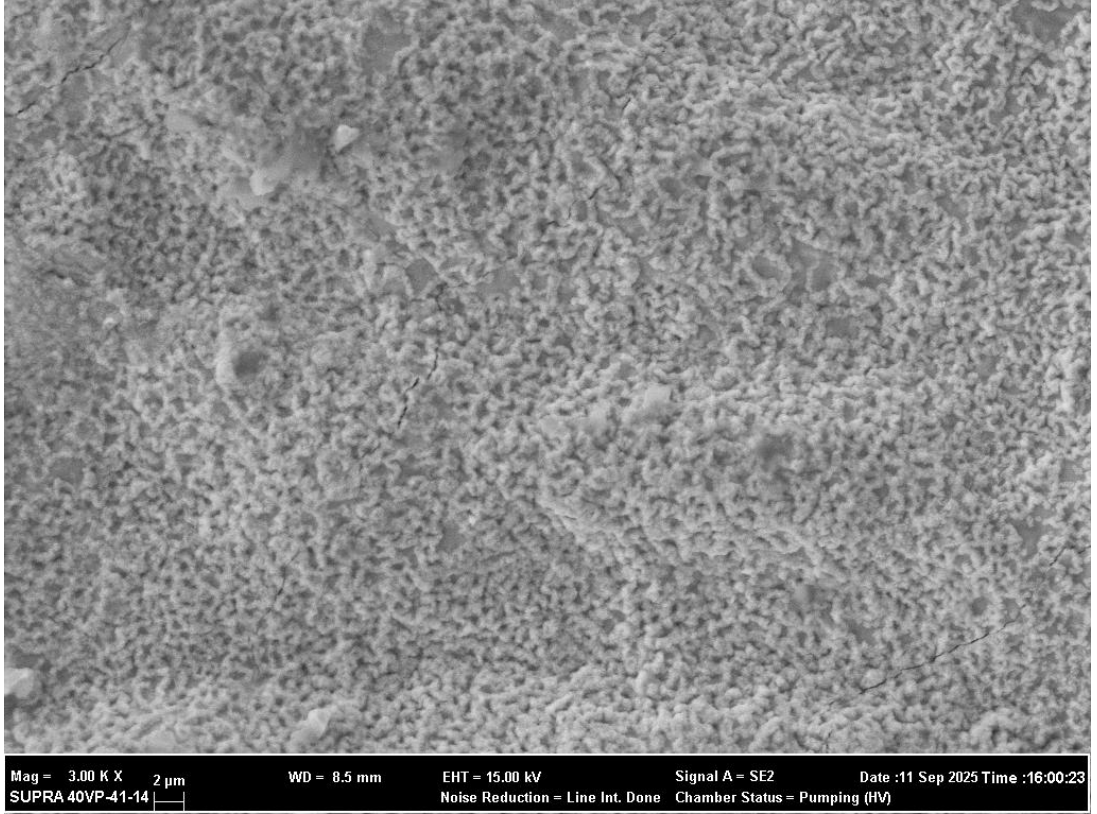


Şekil 6.13. 10 kA-100 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait çatlak başlangıcı SEM görüntüsü

Düğme tipi kırılma gösteren numuneye ait SEM görüntüsünde ise kırık yüzeyin büyük oranda boşluklu yapıdan oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kırılma esnasında mikro boşlukların oluşması, büyümesi ve birleşmesi sonucunda meydana geldiğini göstermektedir.

Boşluklu yapıların yoğun şekilde görülmesi ise, kırılma sırasında malzemenin daha fazla plastik deformasyona uğradığını ve hasarın daha sünek biçimde gerçekleşeceğini göstermektedir. Bu nedenle düğme tipi kırılma, ara yüzey tipi kırılmaya göre daha olumlu değerlendirilmektedir.

Literatürde NDK DP ve AHSS çeliklerinde kaynak çekirdek çapının artmasıyla kırılma modunun ara yüzey kırılmasından düğme tipi kırılmaya doğru değişebildiği ve düğme tipi kırılmanın daha yüksek maksimum yük ve enerji sönümleyebilmesi ile ilişkili olduğu belirtilmektedir (Jaber vd., 2017).



Şekil 6.14. 10 kA-200 ms parametrelerinde NDK işlemi uygulanan SCGA 590 DU çeliğine ait düğme tipi kırılma SEM görüntüsü.

NDK'lı numunelerin SEM analizlerinin incelenmesi neticesinde;

Ara yüzey kırılması daha sınırlı plastik deformasyon ve daha düşük bağlantı performansı ile ilişkilendirilirken, düğme tipi kırılma daha belirgin plastik deformasyon ve daha yüksek enerji sönümleyebilmesi ile ilişkilendirilebilir. Kısmi ara yüzey kırılması ise bu iki davranışa da geçiş niteliği taşımaktadır.

Bu sebeple kırık yüzeylerin SEM analizi, SCGA590 DU çeliğinin NDK'lı bağlantılarında kaynak parametrelerinin kırılma mekanizması üzerindeki etkisini açıklamak açısından önemli bir değerlendirme yöntemi olarak kullanılmıştır.

7. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada SCGA 590 DU çelik sac numuneleri sabit elektrot basıncı altında, farklı akım-zaman kaynak parametre değerleri altında nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kullanılan malzemenin yapısı, birleşimlerin mikroyapı özellikleri, çekme makaslama dayanımı, sertlik değerleri ve oluşan farklı kırılma tipleri incelenmiştir. İncelemeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Çift fazlı yapıya sahip olan SCGA 590 DU çeliğinin esas metal bölgesinde yoğun ferrit yapısına, ısı girdisi sebebiyle kaynak metali bölgesinin martenzit yapıya sahiptir.
2. Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde 8 kA-100 ms parametrelerinde yetersiz birleşme meydana gelmiştir.
3. SCGA590 DU çeliğinin EDS analizi sonucunda malzemenin Fe esaslı bir yapıya sahip olduğu, beraberinde alaşım elementleri içerdiği belirlenmiştir.
4. SCGA590 DU çeliğinin Zn elementi içerdiği tespit edilmiştir. Zn elementinin tespit edilmesi, kullanılan çeliğin galvaniz tavlı olduğunu desteklemektedir.
5. Nokta direnç kaynağı işleminde akım ve zaman parametreleri arttıkça belli bir oranda sertlik ve çekme dayanımının artmıştır.
6. Tüm parametrelerde ısı tesiri altında kalan bölgenin ve kaynak metali bölgesinin sertlik değerlerinin esas metal bölgesine göre daha yüksektir.
7. Nokta direnç kaynaklı numunelerde en düşük sertlik ve çekme dayanımı değerlerine sahip olan birleşimin 8 kA-100 ms parametrelerinde birleştirilmiş numuneye (A1) aittir.
8. Nokta direnç kaynaklı numunelerde 600-621 HV ile en yüksek sertlik değerlerine sahip birleşimin 12 kA-100 ms parametrelerinde birleştirilmiş numunedir (A5).
9. Nokta direnç kaynaklı numunelerde en yüksek çekme makaslama dayanımı 13.92 kN ile 10 kA-200 ms parametrelerinde birleştirilmiş numuneye (A4) aittir.
10. 12kA-200 ms parametrelerinde birleştirilmiş numunenin kaynak bölgesinde yaklaşık %25 elektrot batması tespit edilmiştir, bu sebeple kaynak bölgesindeki sertlik ve dayanım değerleri düşmüştür.
11. Nokta direnç kaynağı işleminde akım ve zaman parametreleri arttıkça çekirdek çapları artmıştır.
12. Çekme makaslama testleri boyunca nokta direnç kaynaklı numunelerde ara yüzey, kısmi ara yüzey ve düğme tipi kırılmalar görülmüştür.

13. Kırılma tipleri incelendiğinde A1 numunesinde ara yüzey, A2 numunesinde kısmi ara yüzey, A3-A4-A5-A6 numunelerinde düğme tipi kırılma meydana gelmiştir.
14. Kırılma tipleri incelendiğinde ara yüzey kopmasında bantlı yüzey, kısmi ara yüzey kopmasında bantlı yüzey ve boşluklu yapı görülürken düğme tipi kırılmada boşluklu yapı meydana gelmiştir.
15. Kırılma yüzeyinde bantlı yapıların oluşması sebebiyle gevrek kırılma meydana geldiği, boşluklu yapılarda sünek kırılma meydana gelmiştir.

KAYNAKÇA

- Akay, S. K. (2005). *Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çeliklerin fiziksel özelliklerinin araştırılması* [Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi]. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- American Welding Society. (2021). *AWS D8.1M:2021: Specification for automotive weld quality-Resistance spot welding of steel*. American Welding Society.
- Aminisharifabad, M., & Yang, Q. (2019). Statistical method to model the quality inconsistencies of the welding process. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1902.08869>
- Asati, B., Kishore, K., Shajan, N., & Arora, K. S. (2024). Investigation of a novel stepped-current vis-à-vis conventional resistance spot welding of dual-phase 780 (DP780) steel. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.077>
- ASM International. (2011). *ASM handbook: Volume 6A: Welding fundamentals and processes*. ASM International.
- Betiku, O. T., Ghatei-Kalashami, A., Ghassemi-Armaki, H., & Biro, E. (2024). In-situ dual force: A novel pathway to improving the mechanical properties of resistance spot welds. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147619>
- Doğan, Z. M., & Elitaş, M. (2025). Nokta direnç kaynak yöntemiyle farklı parametrelerde birleştirilen SCGA590 çeliğinin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin incelenmesi. *Alpha Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(3), 175-183. <https://doi.org/10.70988/ajeas.1834477>
- Elitaş, M. (2021). Effects of welding parameters on tensile properties and fracture modes of resistance spot welded DP1200 steel. *Materials Testing*, 63(2), 124-130. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0019>
- Elitaş, M. (2023). Effects of welding parameters on tensile properties and failure modes of resistance spot welded DC01 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237, 1607-1616.
- Esendir, E. (2008). *Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Feizollahi, V., Bahmani, A., Nadimi, N., Salmani, M. R., Pouranvari, M., Park, Y.-D., & Ashiri, R. (2025). Factors affecting weld quality in resistance spot welding of advanced high strength steels. *Scientific Reports*, 15, Article 30012.

- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14373:2015: Resistance welding- Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon steels*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 669:2016: Resistance welding- Resistance welding equipment-Mechanical and electrical requirements*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO/TR 23413:2019: Resistance welding-Overview of standards for resistance welding*. ISO.
- Jaber, H. L., Pouranvari, M., Salim, R. K., Hashim, F. A., & Marashi, S. P. H. (2017). Peak load and energy absorption of DP600 advanced steel resistance spot welds. *Ironmaking & Steelmaking*, 44(9). <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1229880>
- Khan, M. I., Kuntz, M. L., Biro, E., & Zhou, Y. (2008). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels. *Materials Transactions*, 49(7), 1629-1637. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008031>
- Kuziak, R., Kawalla, R., & Waengler, S. (2008). Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), 103-117. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60197-6](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60197-6)
- Liu, Y., et al. (2024). Indentation-free resistance spot welding of SUS301L stainless steel. *Metals*, 14(10), Article 1178. <https://doi.org/10.3390/met14101178>
- Long, X., & Khanna, S. K. (2007). Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet. *International Journal of Fatigue*, 29, 879-886.
- Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., & Biro, E. (2008). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1-2), 334-346. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.010>
- Messler, R. W. (2004). *Joining of materials and structures: From pragmatic process to enabling technology*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Nielsen, C. V., Zhang, W., Bay, N., & Martins, P. A. F. (2015). Numerical and experimental analysis of resistance projection welding of square nuts to sheets. *Procedia Engineering*, 81, 2141-2146. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.299>
- Pareek, M., Polar, A., & Rumiche, F. (2022). Modelling and optimization of resistance spot weld responses using RSM-GA technique for DP590 steel sheets. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 92, 453-466. <https://doi.org/10.1007/s40010-022-00772-1>
- Pouranvari, M., & Marashi, S. P. H. (2013). Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(5), 361-403. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000120>

- Ramazani, A., Mukherjee, K., Abdurakhmanov, A., Abbasi, M., & Prah, U. (2015). Characterization of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded DP600 steel. *Metals*, 5(3), 1704-1716. <https://doi.org/10.3390/met5031704>
- Ribeiro, R., et al. (2020). Optimization of the resistance spot welding process of 22MnB5 galvanized steel using response surface methodology and global criterion method based on principal components analysis. *Metals*, 10(10), Article 1338. <https://doi.org/10.3390/met10101338>
- Riesner, M., Sun, X., Wu, S., Hwang, H. Y., & Low, E. (2000). Modeling and optimizing of structural joints in automotive applications. In *Proceedings of the International Crashworthiness Conference* (p. 2096).
- Rogee, P., Carré, P., Costa, J., Sibilia, G., & Saindrenan, G. (2008). Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3), 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.127>
- Schmitt, J.-H., & Iung, T. (2018). New developments of advanced high-strength steels for automotive applications. *Comptes Rendus Physique*, 19(8), 641-656. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.004>
- Singh, V., Pande, M. M., Bhanumurthy, K., Chavan, V., & Samajdar, I. (2026). Resistance spot welding (RSW) of dual-phase (DP590) steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 35, 9094-9107. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12284-1>
- Su, Y., Song, K., Du, Z., Yu, K., Hu, Z., & Jin, H. (2024). Quantitative study of predicting the effect of the initial gap on mechanical behavior in resistance spot welding based on L-BFGS-B. *Materials*, 17(19), Article 4746. <https://doi.org/10.3390/ma17194746>
- Sun, H. T., Lai, X. M., Zhang, Y. S., & Shen, J. (2007). Effect of variable electrode force on weld quality in resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(8), 718-724. <https://doi.org/10.1179/174329307X251862>
- Sun, Y., et al. (2024). The high-cycle tensile-shear fatigue properties and failure mechanism of resistance spot-welded advanced high-strength steel with a Zn coating. *Materials*, 17(18), Article 4463.
- Tasan, C. C., Diehl, M., Yan, D., Bechtold, M., Roters, F., Schemmann, L., Zheng, C., Peranio, N., Ponge, D., Koyama, M., Tsuzaki, K., & Raabe, D. (2015). An overview of dual-phase steels: Advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design. *Annual Review of Materials Research*, 45, 391-431. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-021103>

- Wan, X., Wang, Y., Zhang, P., & Zhang, Y. (2014). Welding defects occurrence and their effects on weld quality in resistance spot welding of AHSS steel. *ISIJ International*, 54(8), 1883-1889. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1883>
- Wang, S. C., & Wei, P. S. (2001). Modeling dynamic electrical resistance during resistance spot welding. *Journal of Heat Transfer*, 123(3), 576-585. <https://doi.org/10.1115/1.1370502>
- Wei, P. S., & Wu, T. H. (2012). Electrical contact resistance effect on resistance spot welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11-12), 3316-3324. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.040>
- WorldAutoSteel. (n.d.-a). *Dual phase steels*. AHSS Guidelines.
- WorldAutoSteel. (n.d.-b). *Resistance spot welding and coating effects*. AHSS Guidelines.
- WorldAutoSteel. (n.d.-c). *Resistance spot welding of advanced high-strength steels*. AHSS Guidelines.
- WorldAutoSteel. (n.d.-d). *Resistance spot welding parameter guidelines*. AHSS Guidelines.
- Yuan, X., Li, C., Chen, J., et al. (2017). Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 31-41.
- Zhang, H., & Senkara, J. (2006). *Resistance welding: Fundamentals and applications*. CRC Press.
- Zhang, H., Wei, A., Qiu, X., & Chen, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints. *Materials & Design*, 54, 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.027>
- Zhou, K., et al. (2022). Analysis of process signals of resistance spot welding for DP590 steel using numerical calculation. *ISIJ International*, 62(9).