

**OTOMOTİV SANAYİNDE KULLANILAN GALVANİZLİ ÇELİKLERİN
AZ31B MAGNEZYUM ALAŞIMI İLE YAPILAN PUNTA DİRENÇ KAYNAK
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rahime KESKİN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

Bu tez çalışması 23.Fen.Bil.18 numaralı proje ile Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OTOMOTİV SANAYİNDE KULLANILAN GALVANİZLİ
ÇELİKLERİN AZ31B MAGNEZYUM ALAŞIMI İLE YAPILAN
PUNTA DİRENÇ KAYNAK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

Rahime KESKİN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Rahime KESKİN tarafından hazırlanan “Otomotiv Sanayinde Kullanılan Galvanizli Çeliklerin AZ31B Magnezyum Alaşımı İle Yapılan Punta Direnç Kaynak Performansının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ... / ... / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi **İmza ...**

Üye : Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU
Eskişehir Osmangazi Üni. Müh. Mim. Fakültesi **İmza**

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

/ / 2024

İmza

Rahime KESKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV SANAYİNDE KULLANILAN GALVANİZLİ ÇELİKLERİN AZ31B MAGNEZYUM ALAŞIMI İLE YAPILAN PUNTA DİRENÇ KAYNAK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Rahime KESKİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Bu çalışmada, metalürjik özellikleri birbirinden farklı olan 2 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımı ve 1,5 mm kalınlığındaki Erdemir 1314 kalite galvanizli çelik sacların, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan punta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Bazı özellikleri bakımından alüminyum alaşımlara benzeyen ancak ondan daha hafif olan magnezyum alaşımların, alüminyuma alternatif olarak otomotiv sanayinde kullanım alanının artırılması amacıyla yine otomotiv sanayinde yaygın kullanılan galvanizli çelik malzeme ile punta kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynak ile birleştirme işlemi yapılmadan önce mekanik özelliklerini belirlemek için TS EN ISO 6892-2 standardına göre çekme testleri yapılmıştır. Ayrıca temin ettiğimiz numunelerin içyapısını OES (Optik Emisyon Spektroskopisi) ile inceleyerek istenilen özelliklerde olup olmadığı belirlenmiştir. TS EN ISO 14273 standardına uygun hazırlanan ve oda koşullarında punta direnç kaynağı uygulanan AZ31B magnezyum alaşım ve 1314 kalite çelik kaynak numuneleri, magnezyumun hızlı oksitlenmesinden dolayı tutarlı sonuçlar vermediği görülmüştür. Yapılan literatür taramasında daha önce yeterli çalışma yapılmayan bir yöntem olan oksijensiz ortamda punta direnç kaynağını uygulayabilmek için punta kaynak makinesine kabin yapılmış ve içerisine argon gazı verilerek oksijen oranı sıfırlanmaya çalışılmıştır. Oksitlenmenin önlenmesi için yapılan bu ortamda kaynak işlemleri tekrarlanmıştır. Kaynak süresi, basma kuvveti ve sıkıştırma süresi sabit tutularak farklı kaynak akımlarında yapılan kaynak bağlantılarının çekirdek yapıları incelenerek optimum değerler analiz edilmiştir. Kaynak işlemleri yapılan numuneler çekme deneyine tabi tutularak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Numune

kesme cihazında kesilerek parlatılan numunelerin mikro yapıları XRD ve SEM analizleri yapılarak detaylı görüntülenmiş ve Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Görüntülerde çekirdek yapısının simetrik olmadığı ve birleşimin çekirdeğin etrafında ve düzensiz olduğu saptanmıştır. Zn elementinin eriyerek magnezyum ara yüzeyine nüfuz etmesinden dolayı çekirdek bölgesinde gözenekler oluşmuştur.

Yapılan deneyler sonucu AZ31B magnezyum alaşımı ve 1314 kalite düşük karbonlu galvanizli çelik saclar için en yüksek çekme kuvveti sağlanan kaynak parametreleri 250 kgf basma kuvveti, 25 periyot sıkıştırma süresi, 8 periyot kaynak süresi ve 7,6 kA olarak belirlenmiştir.

2024, xiii + 86 sayfa

Anahtar Kelimeler: Punta Direnç Kaynağı, Elektrik Nokta Direnç Kaynağı, Magnezyum Alaşımı, AZ31B, Galvanize Çelik, Sac Levha Birleştirme Metodu, Çekme Kuvveti

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PERFORMANCE OF GALVANIZED STEEL SHEET AND MAGNESIUM ALLOY (AZ31B) SHEET USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Rahime KESKİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ahmet ÇETKİN

In this research investigates the weldability of 2 mm thick AZ31B magnesium alloy and 1.5 mm thick Erdemir 1314 grade galvanized steel sheets, which have different metallurgical properties, using spot resistance welding commonly employed in the automotive industry. Magnesium alloys, which are lighter than aluminum alloys and share some characteristics with them, are being explored as alternatives to aluminum in the automotive industry. Therefore, spot welding was conducted with galvanized steel, a widely used material in automotive manufacturing, aiming to expand the application of magnesium alloys in automotive applications as an alternative to aluminum. Before the welding process, tensile tests were conducted according to TS EN ISO 6892-2 standard to determine the mechanical properties. Additionally, the internal structure of the samples we provided was examined using OES (Optical Emission Spectroscopy) to determine whether they have the desired properties. Welding was applied using spot resistance welding under conditions prepared according to TS EN ISO 14273 standard, and it was observed that consistent results were not obtained due to rapid oxidation of magnesium.

In the literature review, it was found that there is insufficient research on a method previously unexplored, which involves applying spot resistance welding in an oxygen-free environment. To achieve this, a cabin was constructed around the spot welding machine and filled with argon gas to minimize the oxygen content. Welding was repeated in this controlled environment to prevent oxidation. Welding parameters such as welding

time, welding current, and compression time were kept constant, and the microstructures of the welded joints were analyzed to determine the optimum values.

In the experiments, samples that underwent welding were subjected to tensile testing to determine their mechanical properties. After cutting and polishing the samples using a cutting machine, their microstructures were examined in detail through XRD and SEM analyses, and Vickers hardness values were measured. The images revealed that the core structure was asymmetric and the bonding around the core was irregular. Pores were observed in the core region due to the penetration of Zn element melting into the magnesium interface.

Based on the experiments, the welding parameters that provided the highest tensile strength for AZ31B magnesium alloy and 1314 grade low-carbon galvanized steel sheets were determined as follows: 250 kgf compression force, 25 cycles compression time, 8 cycles welding time, and 7.6 kA welding current.

2024, xiii + 86 pages

Keywords: Electric Resistance Spot Welding, Magnesium Alloy, AZ31B, Galvanized Steel, Sheet Metal Joining Method, Tensile Strength

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesinden çalışma sonuçlarının değerlendirilmesine kadar olan tüm süreçte yanımda olup kıymetli fikirleri ile beni yönlendiren, her zaman katkı ve yardımları ile çalışmalarımı kolaylaştıran ve değerli zamanlarını ayıran sayın danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Ahmet ÇETKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarlarındaki çalışmalarında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocalarıma, 23.Fen.Bil.18 numaralı projemize maddi destek sağlayan BAP Koordinasyon Birimine ve her konuda yardımlarını esirgemeyen tüm akademik ve teknik üniversite personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca yardım ve teşvikleriyle daima yanımda olan Habibe GENÇAY, Emre ERYİĞİT, Cahit AYDIN ve diğer tüm arkadaşlarıma bu süreçte gösterdikleri güven, sevgi ve anlayışlarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, bugünlere gelmemde sevgi ve desteklerini asla esirgemeyen sevgili babam Zafer KESKİN, rahmetli annem Hatice KESKİN, canım ablam Gamze BİNBOĞA ve eniştem Ozan BİNBOĞA'ya sonsuz sevgi, saygı ve minnetlerimi sunarım. Bu uzun ve yorucu tez sürecimde de sabırla yanımda oldukları için çok teşekkür ederim. Ayrıca her yorulduğumda yüzümü güldürüp güç veren, motivasyon kaynaklarım olan canım yeğenlerim Masal BİNBOĞA ve Öykü BİNBOĞA iyi ki varsınız.

Rahime KESKİN
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Magnezyum ve Alaşımları	4
2.1.1 Magnezyumun Özellikleri ve Tarihçesi	5
2.1.2 Magnezyumun Kaynakları ve Kullanım Alanları	6
2.1.3 Magnezyumun Alaşımları ve Sınıflandırılması.....	9
2.1.4 Otomotiv Endüstrisinde Magnezyum.....	11
2.1.5 Magnezyumun Kaynak Kabiliyeti.....	13
2.2 Alüminyum ve Alaşımları.....	16
2.2.1 Alüminyumun Özellikleri ve Tarihçesi	16
2.2.2 Alüminyum Kaynakları ve Üretimi.....	17
2.2.3 Alüminyum Alaşımları ve Kullanım Alanları.....	20
2.2.4 Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum Kullanımı	23
2.2.5 Alüminyumun Kaynak Kabiliyeti	25
2.3 Düşük Karbonlu Galvaniz Kaplı Çelik	28
2.3.1 Demirin Özellikleri ve Tarihçesi	28
2.3.2 Demir Kaynakları ve Çelik Üretimi	30
2.3.3 Çeliklerin Sınıflandırılması	32
2.3.4 Galvanizli Çelikler.....	34
2.3.5 Otomotiv Endüstrisinde Galvanizli Çelikler	35
2.3.6 Galvanizli Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	36

2.4 Kaynak ile Birleştirme	38
2.4.1 Kaynak ve Başlıca Kaynak Yöntemleri	38
2.4.2 Nokta (Punta) Direnç Kaynağı	39
3. MATERYAL ve METOT	45
3.1 Genel	45
3.2 Numunelerin Hazırlanması	46
3.3 Numunelerin Nokta Direnç Kaynak ile Birleştirilmesi.....	48
3.4 Deney Numunelerinin Mekanik Testleri.....	53
4. BULGULAR	58
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	72
6. KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	Üst Üste Binme Mesafesi
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
b	Genişlik
Ca	Kalsiyum
cm ³	Santimetreküp
Cu	Bakır
E	Elastisite Modülü
Fe	Demir
σ_c	Çekme Gerilmesi
σ_k	Kopma Gerilmesi
HV	Hardness Vickers
K	Kalay
kA	Kilo Amper
Kg-f	Kilogram Kuvvet
kN	Kilo Newton
L ₀	İlk Ölçü Uzunluğu
Lc	Paralel Uzunluk
lf	Saclar arasındaki serbest uzunluk
ls	Toplam Uzunluk
lt	Her bir Sac Uzunluğu
L _t	Toplam Uzunluk
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
MPa	Megapaskal
N	Newton
Na	Sodyum
Ni	Nikel
Si	Silisyum
Sn	Kalay
St	Çelik
t	Kalınlık
Ti	Titanyum
Zn	Çinko

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AA 1050	1xxx serisi alüminyum magnezyum alaşımı
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
EDK	Elektrik Direnç Kaynağı
EDS	Energy Dispersive Spectrum
EDX	Energy Dispersive Spectrum with X-ray
EMI	Elektromanyetik Parazit
EN	European Norm
HAZ	Heat affect zone
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelikler
HV	Hardness vickers
ISO	International Organization for Standardization
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal İnert Gaz
MRI	Magnesium Research Institute
RFI	Radyo Frekans Paraziti
RSW	Resistance Spot Welding
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SPH	Sıkı paket hegzagonal kristal yapı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TUAM	Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
XRD	X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	2023 Dünya manyezit rezervleri	6
Şekil 2.2	2023 Dünya manyezit rezervleri dağılım grafiği	7
Şekil 2.3	Türkiye’deki manyezit ve dolomit yatakları haritası	8
Şekil 2.4	Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar.....	12
Şekil 2.5	Kaynak bağlantısı arayüzündeki RSW çekirdek oluşumu görünümü: (a) kaynak 1, bağlantı arayüzünde çekirdek oluşmamış (29 kA, 0,12 s, 0,1 MPa) ve (b) kaynak 2, bağlantı arayüzünde çekirdek oluşmuş (29 kA, 0,16 s, 0,1 MPa) ..	13
Şekil 2.6	Wang ve arkadaşlarının punta direnç kaynak uygulamalarındaki numunelerin boyutları ve konfigürasyonu.....	15
Şekil 2.7	a) Boksit b)Alümina.....	18
Şekil 2.8	2023 Dünya boksit rezervleri	19
Şekil 2.9	2023 Dünya boksit rezervleri dağılım grafiği	19
Şekil 2.10	Zn kaplamalı çelik ara katmanla 28 kA kaynak akımı değerinde yapılan Al-Mg kaynağı	27
Şekil 2.11	2023 Dünya demir rezervleri	30
Şekil 2.12	2023 Dünya demir rezervleri dağılım grafiği	31
Şekil 2.13	Türkiye demir yataklarının dağılımı haritası	31
Şekil 2.14	Punta kaynak için numune ve elektrotların şematiği	36
Şekil 2.15	Elektrik nokta direnç kaynağı prensibi	41
Şekil 2.16	Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları.....	42
Şekil 2.17	Farklı kalınlıkta malzemelerin punta direnç kaynağı.....	43
Şekil 3.1	TS EN ISO 6892-2 Standardına göre hazırlanmış çekme deneyi numunelerinin boyutları.....	48
Şekil 3.2	TS EN ISO 14273 Standardına göre hazırlanmış nokta kaynak deneyi numunelerinin boyutları	48
Şekil 3.3	TS EN ISO 14273 Standardına göre birleştirilmiş kesme deneyi numune örneği.....	49
Şekil 3.4	Nokta direnç kaynak numunesi çifti ve kaynak pozisyonu görünüşleri	49
Şekil 4.1	TS EN ISO 6892-2 Standardına göre hazırlanan çekme deneyi ile elde edilen yük-uzama grafiği.....	59
Şekil 4.2	Galvanize çelik numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği.....	60
Şekil 4.3	Magnezyum numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği.....	61
Şekil 4.4	Alüminyum numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği	61
Şekil 4.5	Kaynaklı bağlantıların maksimum çekme kuvveti-kaynak akımı grafiği.....	62

Şekil 4.6 Çekme deneyi sonunda ayrılan Mg numunenin ara yüzey görüntüsü	63
Şekil 4.7 7,2 kA 7,4 kA ve 7,6 kA'lık kaynak çekirdeklerinin mikro görüntüleri.....	64
Şekil 4.8 a) Zn elementinin Mg alaşımıyla ergimesi b)Mg ve çelik birleşim arayüzünün ayrıldığı 3 bölge	65
Şekil 4.9 Kesme ile kırılan yüzeyin morfolojisi.....	66
Şekil 4.10 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak SEM görüntüsü	66
Şekil 4.11 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDX grafiği ...	67
Şekil 4.12 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDS grafiği....	67
Şekil 4.13 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak SEM görüntüsü	68
Şekil 4.14 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDX grafiği ...	68
Şekil 4.15 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDS grafiği....	69
Şekil 4.16 Çekirdek kesitinde üç farklı doğrultuda uygulanan sertlik testi görüntüsü...	69
Şekil 4.17 A doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları.....	70
Şekil 4.18 B doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları	70
Şekil 4.19 C doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Magnezyum elementinin fiziksel özellikleri	4
Çizelge 2.2 Magnezyum alaşımların standart gösterimleri	10
Çizelge 2.3 Alüminyumun bazı özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması.....	17
Çizelge 2.4 Alüminyum üretim yolları ve kullanım alanları.....	18
Çizelge 2.5 Yeryüzünde en çok bulunan on elementin bulunma oranları.....	20
Çizelge 2.6 Saf Alüminyumun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 2.7 Alüminyum ve alaşımlarının başlıca endüstriyel kullanım alanları.....	23
Çizelge 2.8 Demir elementinin özellikleri	29
Çizelge 3.1 AZ31B magnezyum alaşımın kimyasal bileşimi	45
Çizelge 3.2 AZ31B magnezyum alaşımın mekanik özellikleri.....	45
Çizelge 3.3 Erdemir 1314 Galvanize çeliğin kimyasal bileşimi	45
Çizelge 3.4 Erdemir 1314 Galvanize çeliğin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 3.5 AA1050 Alaşımın kimyasal bileşimi	46
Çizelge 3.6 AA1050 Alaşımın mekanik özellikleri	46
Çizelge 3.7 AZ31B magnezyum alaşımlı numunenin kimyasal analizi	47
Çizelge 3.8 Erdemir 1314 Galvanize çelik numunenin kimyasal analizi	47
Çizelge 3.9 AA1050 Serisi alüminyum alaşımlı numunenin kimyasal analizi.....	47
Çizelge 3.10 TSE EN ISO 14273 Standart ölçü değerleri	49
Çizelge 3.11 Oksijensiz ortamda yapılan kaynak parametreleri	53
Çizelge 3.12 Deney malzemelerinin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri	58

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.2 Alüminyumdan üretilen motor blok ve dış aksamlar.....	24
Resim 2.3 Demir bileşikleri a) Hematit b) Siderit c) Manyetit d) Limonit	28
Resim 2.4 Bern Doğa Tarihi Müzesi'nde sergilenen demirden yapılmış ok ucu.....	29
Resim 2.5 Otomobil alt kısmında galvanizli çelik kullanımı.....	35
Resim 2.6 Bazı direnç kaynağı uygulama çeşitleri a)Punta b)Dikiş c)Alın.....	39
Resim 2.7 Punta direnç kaynak makine çeşitleri a) Seyyar tip b)Robot kollu c)Pres tipi d) Çoklu kaynak.....	40
Resim 3.1 AKÜ Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan nokta direnç kaynak makinesi.....	50
Resim 3.2 Normal oda koşullarında yapılan punta kaynak kusurları	51
Resim 3.3 Kabin montajı yapılan nokta direnç kaynak makinesi ve birleştirilen numune	52
Resim 3.4 Gaz seviye ölçüm sensörü.....	52
Resim 3.5 a) Çekme deneyi yapılan çekme testi numunesi b) Çekme testi yapılan kaynaklı numuneler	53
Resim 3.6 Instron 8801 Çekme test cihazı.....	54
Resim 3.7 Metkon Metacut 250 manuel kesme cihazı görselleri	54
Resim 3.8 a) Remet Evolution IPA30 Bakalite alma cihazı b) Bakalite alınan nokta kaynaklı numuneler	55
Resim 3.9 Metkon Gripo 2V marka zımparalama ve parlatma cihazı.....	55
Resim 3.10 Lecia DMS 300 Mikroskop görseli ve kaynak bölgesinin mikroskop altındaki görüntüsü	56
Resim 3.11 LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM)	56
Resim 3.12 Metkon Vickers sertlik ölçüm cihazı	57
Resim 4.1 Çekme deneyi sonrası Erdemir 1314 Galvanize çelik numunesine ait görsel	59
Resim 4.2 Çekme deneyi sonrası AA1050 alüminyum alaşım numunesine ait görsel..	60
Resim 4.3 Çekme deneyi sonrası AZ31B magnezyum alaşım numunesine ait görsel ..	60

1. GİRİŞ

Günümüz üretim sektöründe kullanılan malzeme çeşitliliğinin artması, değişik fonksiyonlar gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliğini doğurmuştur. Özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin daha da önemli hale gelmesi farklı özelliklerdeki malzemelerin bir arada kullanılmasını zorunlu kılmıştır (Esendir 2009).

Konstrüksiyonların imalinde en çok kullanılan bağlantı yöntemi kaynaktır. Kaynaklar, işlemin cinsine göre ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı diğer adıyla basınç kaynağı olarak ikiye ayrılır. Farklı metallere yapılan kaynaklar, genellikle katı hal kaynak yöntemleri ile yapıldığı gibi elektron ışın, MIG/MAG, TIG gibi kaynak yöntemleri ile de yapılabilmektedir (Gülenç 2005). Kaynak yöntemi, yapılacak yer ve malzemeye göre seçilmektedir. Ergitme kaynak yönteminin hatalara daha elverişli olması ve soğumanın homojen olmamasından kaynaklı makro düzeyde iç gerilmelerin varlığı bu yöntemin belli başlı dezavantajları olup kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Bu sebeple farklı özelliklerdeki malzemelerin birleştirilmesinde, boyut ve şekillerin de uygunluğuna göre, daha az kaynak hatası oluşması ve kaynak sonrasındaki iç gerilmelerin minimum düzeyde olması nedenleriyle katı hal kaynak yöntemleri daha avantajlı hale gelmektedir (Aslan 2001).

Basınç kaynak çeşitleri arasında en geniş kullanım alanına sahip yöntem elektrik direnç (punta) kaynağıdır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılmakta olan punta kaynak yöntemi, metallerin birbirleri ile bağlanmasında en çok tercih edilen birleştirme yöntemi olarak günümüzde hala önemini korumaktadır. Onlarca yıldır nokta kaynak yöntemi, otomobil ve havacılık endüstrisinde yüksek kaliteli bağlantılar sağlamak için yaygın olarak tercih edilmektedir. Verimli ve ucuz olmasıyla seri üretim için elverişli bir birleştirme yöntemi olan punta direnç kaynağı zahmetsiz bir şekilde robot kollarına montaj edilebilmesi sayesinde, bir otomobilde yaklaşık 5000 adet nokta direnç kaynağı uygulanabilmektedir (Hamidinejad vd. 2012, Li vd. 2013, Mandalan vd. 2016).

Endüstriyel üreticiler, mükemmel özelliklere sahip dayanımı yüksek, hafif, şekillendirme kabiliyeti iyi olan malzeme kullanmayı tercih ederler. Son zamanlarda otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufunu, sürüş emniyetini, yolcu güvenliğini artırmak ve çevresel faktörlerden dolayı araçların ağırlıkları azaltılmak istenmektedir (Hayat 2012).

Özellikle enerji ve petrol krizlerinin yaşandığı son zamanlarda, araçlar ne kadar hafif olursa yakıt tasarrufu o kadar çok sağlanır. Ayrıca doğal kaynak rezervlerinin azalması ve artan çevre kirliliğinden dolayı özellikle otomobil sanayinde sera gazı emisyonlarının ve yakıt tüketiminin azaltılmasının yolları aranmaktadır Yakıt tüketiminin yaklaşık % 60' 1 otomobil ağırlığından kaynaklandığından dolayı otomobillerde ağırlığı azaltmak doğrudan yakıt tasarrufunu sağlayacaktır. Bu nedenle son yıllarda yapılan araştırmalarda, otomotiv gövdelerinin ve bileşenlerinin üretiminde kullanılacak malzemelerin daha hafif olmasına büyük önem verilmiştir (D'Errico vd. 2013, Ortowicz vd. 2015, Manladan vd. 2016).

Önceki zamanlarda, otomobillerde sadece düşük karbonlu çelik saclar kullanılırken, son dönemde yapısını korozyona dirençli hale getirmek için düşük karbonlu çelik sacları çinko ile kaplayarak elde ettikleri galvanizli çelik saclar kullanmaktadır (Akkuş 2006). İç ve dış kapı panelleri, tavan çerçeveleri, kapı mekanizmaları, tamponlar, tekerlekler, motor, şasi araçlarda çeliklerin kullanıldığı başlıca parçalardır (Arıkan vd. 2004).

Otomotiv endüstrisinde başlıca ve en önemli malzeme olarak kullanılan çeliğe alternatif olarak araç ağırlığını azaltmak amacıyla magnezyum, alüminyum, kompozit ve plastik malzemeler gibi çeşitli hafif materyaller denenmiştir (Goede vd. 2009, Hayat 2011). Alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ ve magnezyumun yoğunluğu $1,74 \text{ g/cm}^3$ olup, yoğunluğu $7,86 \text{ g/cm}^3$ olan çelikten daha hafiftirler (Prasanna vd. 2016). Magnezyum ve alüminyum, üstün mekanik özelliklerinden dolayı otomobil üretiminde çelik yerine kullanılan alternatif malzemelerdir. Böylece üretilen otomobiller hem daha hafif hale getirilerek yakıt tasarrufu sağlar hem de sera gazı emisyonlarının azaltılmasında büyük önem taşır.

Magnezyum alaşımları yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk ve mükemmel geri dönüştürülebilirlik gibi üstün özelliklerinden dolayı, üretimde son yıllarda artan bir ilgi kazanmıştır (Sun vd. 2009). Günümüzün en önemli mühendislik malzemelerinden bir diğeri olan alüminyum alaşımlar da hafif, dayanıklı ve fonksiyonel oluşuyla oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Kullanım alanının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine ait olan alüminyum, özellikle otobüs, kamyon, tren gibi büyük araçlarda hafifliğiyle önemli yakıt tasarrufu sağlarken, sağlamlığıyla da uçak, gemi ve tekne yapımında kullanımı artmıştır.

Bu tez çalışmasında magnezyum alaşımlarının, otomotiv sanayinde çok kullanılan birleştirme yöntemi olan punta (nokta) direnç kaynağı ile galvaniz çelik saclarla olan birleştirilmesi incelenmiştir. Alüminyum alaşımlardan daha hafif olan magnezyum alaşımların, alüminyuma bir alternatif malzeme olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi için alüminyum alaşımın galvaniz çelik sacla olan punta direnç kaynağı deneyleri de yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Magnezyum alaşımların yapılan literatür araştırmalarında farklı ergime noktasındaki diğer malzemelerle olan punta direnç kaynağı ile birleştirilmesi üzerine yeterli güncel çalışma bulunamamıştır. Ayrıca yüzeylerinin hızlı oksitlenmesi sebebiyle kullanım alanının kısıtlanmasından kaynaklı bu alanda daha çok araştırmaya ihtiyaç olduğu görülmüştür.

Otomotiv sektöründe en çok kullanılan galvanizli çelik malzemelerin, alüminyumdan daha hafif bir malzeme olan magnezyum alaşımları ile yine aynı endüstride çok kullanılan punta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılarak, alüminyumla karşılaştırılması ve magnezyum alaşımların kullanım alanını genişletmek amacıyla bu tez konusu seçilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Magnezyum ve Alaşımları

Kimyasal sembolü Mg olan magnezyum parlak, gümüş beyazı renginde bir elementtir. Periyodik cetvelde 12 atom numarası ile alkali toprak metalleri grubundan olan magnezyum, atom ağırlığı 24,312 ve yoğunluğu 1,74 g/cm³ ile doğada en çok bulunan elementler arasındadır. Okyanusların % 0,13'ünde ve yer kabuğunun % 2,7'sinde magnezyum bulunmaktadır. Çizelge 2.1'de fiziksel özellikleri verilen magnezyum elementi çelikten % 70 ve alüminyumdan % 33 daha hafif olmasından dolayı, kullanılan alaşım maddeleri arasında önemli bir yere sahiptir. Ayrıca magnezyumun karbon, oksijen ve kalsiyum gibi elementlerle oluşturduğu bazı bileşikleri (magnezyum karbonat, magnezyum oksit, magnezyum klorür, magnezyum sülfat, magnezyum hidroksit) günümüzde kullanılan çok önemli bir hammaddedir. (Eroğlu 2022).

Çizelge2.1 Magnezyum elementinin fiziksel özellikleri (Kaçar ve Öztürk 2006).

Fiziksel Özellikler	Mg
Atom Numarası	12
Atom Ağırlığı	24,312 g/mol
Yoğunluğu	1,74 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	650 °C
Kaynama Noktası	1107°C
Ergime Isısı	368 kJ.kg ⁻¹
Yanma Isısı	25020 kJ.kg ⁻¹
Buharlaşma Isısı	5272 kJ. kg ⁻¹
Sertlik	30-47 HB
Elastisite Modülü	44,5.10 ³ MPa
Çekme Dayanımı	250-300 MPa
Akma Dayanımı	200-220 MPa
Elektrik İletkenliği	22.2 m/ohm.K
Özgül Isı Kapasitesi	1047 K/kg.K
Kristal Yapı	Hegzagonal sıkı paket

2.1.1 Magnezyumun Özellikleri ve Tarihçesi

Magnezyum ilk kez 1755’de İngiltere’de Joseph Black isimli İskoç kimyager tarafından, MgO bileşiminin içinde keşfedilmiştir. Ancak Black bu yeni elementi MgO’dan ayırmayı başaramamıştır.

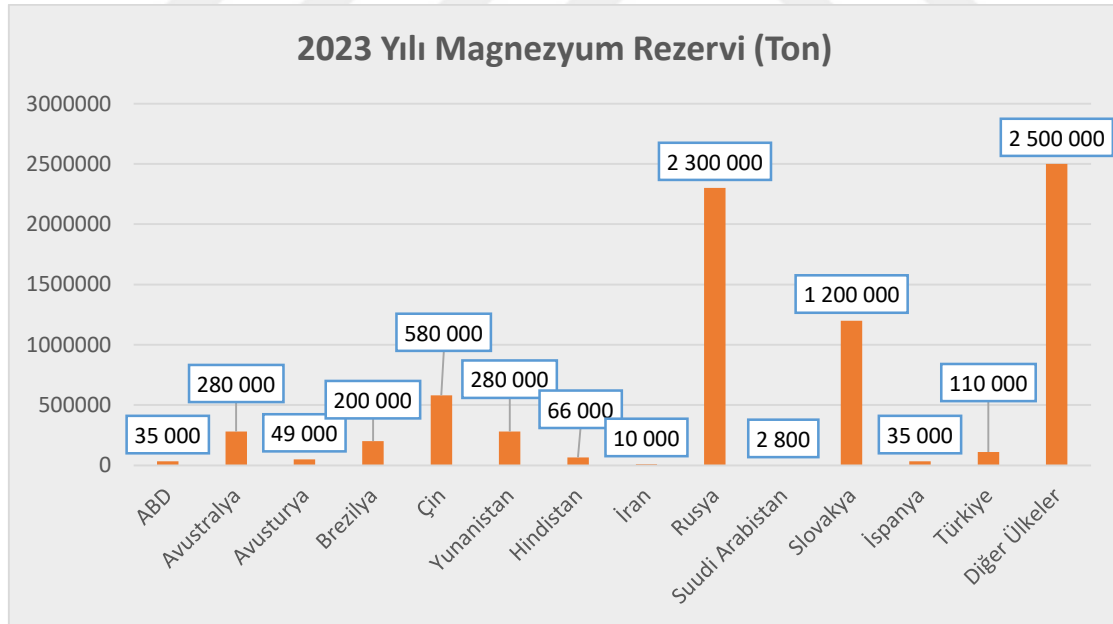
İngiliz fizikçi ve kimyager Sir Humphry Davy tarafından 1808 yılında ayrıştırılarak ilk saf magnezyum elde edilmiştir. Ayrıştırma yöntemi olarak galvanik bir pil ve bir cıva katot kullanan Davy, magnezyum sülfatı elektroliz yöntemiyle indirgeyerek saf metalik Mg’u bulmuştur. 1828’de, Fransız Antoine Alexandre Brutun Bussy, kurutulmuş (dehidre edilmiş) magnezyum klorürü, yüksek sıcaklık altında potasyumla eriterek magnezyumu ayrıştırmayı başarmıştır. Daha sonraları ünlü bilim adamı Sir Humphry’in asistanı olan İngiliz bilim adamı Michael Faraday magnezyum klorürü elektroliz yöntemiyle indirgemiş ve 1833 yılında magnezyum metalini elde etmiştir. 1841 yılında Alman Robert Wilhelm Bunsen karbon-çinko elektrik pili üzerindeki çalışmalarıyla geliştirdikten sonra, 1852’de eritilip kurutulan magnezyum klorürden magnezyum metalini üretmeyi başarmıştır. O yıllarda bazı Avrupa ülkelerinde girişimler olmasına karşın, magnezyuma olan kalıcı ilgiyi Almanya göstermiş ve 1868’de dünyadaki tek magnezyum üretimi Almanya’da yapılmaya başlanmıştır. Magnezyum o dönemde alüminyum üretiminde indirgeyici olarak kullanılmış ve ayrıca toz ve şerit halinde el fenerlerinde kullanılmıştır. Amerika’da ise ilk magnezyum tesisi General Electric firması tarafından 1914’de New York’da kurulmuştur. Böylece II. Dünya savaşı sırasında kullanılan bombaların kullanılmıştır. Savaşın sonlarına kadar Mg üretimi Amerika, Avrupa, Japonya ve Avustralya’daki birçok fabrikada devam etmiş, 1944 yılına gelindiğinde 13 ülkedeki toplam 41 fabrikanın üretimi 210 bin ton olmuştur. 1940’larda Kanadalı Dr. Pidgeon tarafından ise dıştan ısıtmalı vakum retortlarında (fırın) ferrosilisyum ile dolomit redüklenerek magnezyum üretilmiş ve bu yöntem Pidgeon Prosesi adıyla tarihe geçmiştir (Eroğlu 2022).

Magnezyum üretimi 1900’lerde dünya genelinde yılda sadece 10 tondur. Magnezyumun otomotiv, askeriye ve havacılık sektörlerinde büyük oranda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte magnezyum üretimi 1990 yılına gelindiğinde dünyanın sadece batı kesiminde 250 000 tona ulaşmıştır. 2020 yılında ise magnezyum bileşikler üretimi 27 milyon tona ulaşmıştır (Eroğlu 2022).

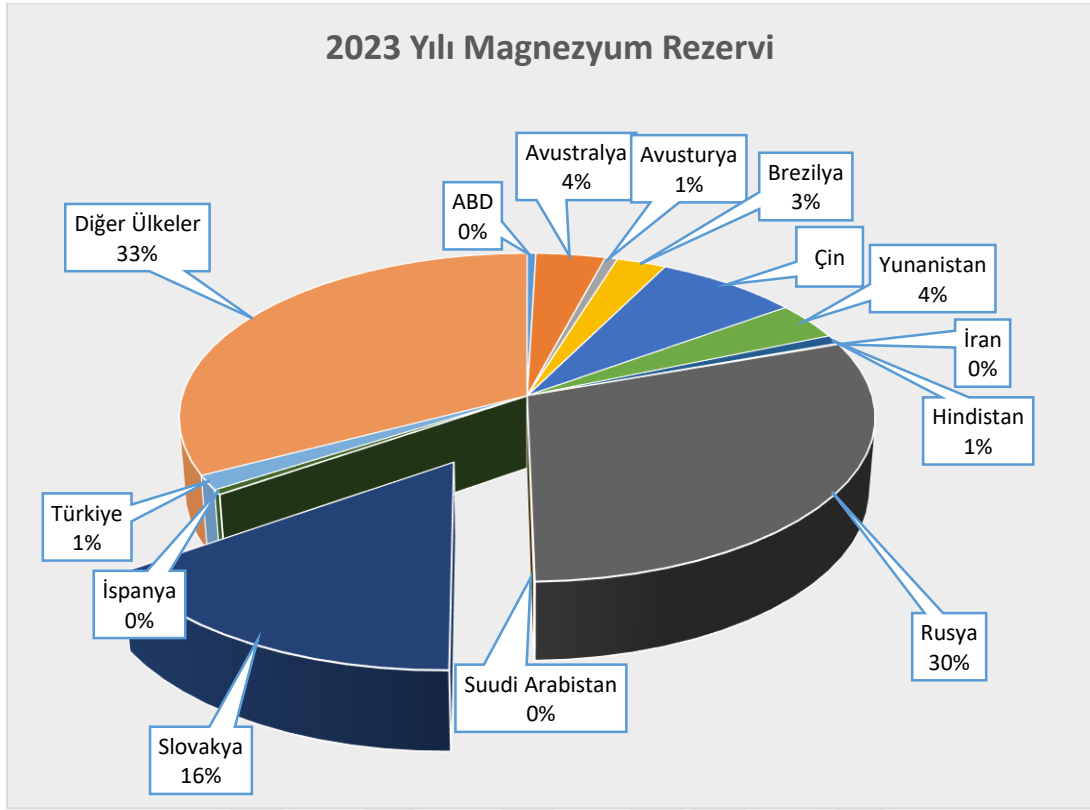
2.1.2 Magnezyum Kaynakları ve Kullanım Alanları

Doğada son derece yaygın olarak bulunan magnezyumun dünyada en büyük üreticisi ve ihracatçısı ülke Çin'dir. Yılda yaklaşık 900 000 ton metal magnezyum üretimi ile Çin, dünyadaki üretimin yaklaşık %85'ini karşılamaktadır. Çin'in ardından ise Rusya, İsrail, Brezilya, Kazakistan, Türkiye ve Ukrayna sırayla gelmektedir (Eroğlu 2022).

Magnezyum doğada serbest halde yer almaz ve minerallerin içerisinde bileşikler halinde bulunur. Bu minerallerin çoğundan magnezyum almak ekonomik olarak bir hayli zordur. Günümüz teknolojileri ile ticari amaçlı magnezyumun üretiminde en çok manyezit ($MgCO_3$) madeni kullanılırken diğer kullanılan cevherler ise dolomit ($MgCa(CO_3)_2$), karnalit ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) ve brusittir ($Mg(OH)_2$). Ayrıca deniz ve göl tuzlarında çözünmüş halde bulunan magnezyum için tuzlu sular önemli bir kaynaktır (Eroğlu 2022). Şekil 2.1'de görüldüğü üzere tahminen dünya üzerinde yaklaşık 13 milyar ton manyezit rezervi bulunmaktadır ve bunların önemli bir kısmı Rusya, Slovakya, Çin, Avustralya, Yunanistan, Brezilya ve Türkiye'de bulunmaktadır (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.1 2023 Dünya manyezit rezervleri (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.2 2023 Dünya manyezit rezervleri dağılım grafiği (İnt.Kyn.1).

Birçok ülkede, özellikle Avrupa'da stratejik ürün olarak kabul edilen magnezyum aynı zamanda Avrupa Birliği tarafından oluşturulan “kritik hammaddeler” listesinde yer almaktadır. Son yıllarda çevresel kaygılar gerekçesiyle ve enerji alanında yaşadığı sorunlar nedeniyle Çin'in üretimini azaltması, metal magnezyum temininde sıkıntılar yaşanmasına ve özellikle otomotiv endüstrisinde ara ara üretim krizine neden olmuştur.

Ülkemizde magnezyumun kaynağı olarak kullanılmakta olan manyezit ve dolomit yatakları Şekil 2.3'te görüldüğü üzere çoğu bölgede vardır ve rezerve miktarı çoktur. Bu rezervin çoğunluğu Eskişehir ve Kütahya arasında yoğunlaşırken, Konya, Çankırı ve Erzincan illerinde de büyük yataklar bulunmaktadır. 2020 yılı verilerine göre toplam 106 milyon ton manyezit ve 19 milyar ton dolomit rezervimiz bulunmaktadır. Bu yatakların çoğu iyi kalitede, sanayide kullanılabilir nitelikte olup genellikle demir içerikleri oldukça düşüktür (Eroğlu 2022).



Şekil 2.3 Türkiye’deki manyezit ve dolomit yatakları haritası (Eroğlu 2022).

Magnezyum sıkı paket hegzagonal (SPH) kristal yapıya sahiptir ve bu nedenle soğuk şekillendirmeye elverişli değildir. 225 °C’nin altındaki şekillendirme işlemlerinde sadece tek kayma düzleminin olması nedeniyle magnezyum kırılmalıdır (Mordike ve Ebert 2001).

Geleceğin metali olarak her geçen gün daha da kıymetlenen magnezyum, demir ve alüminyumdan sonra endüstriyel alanlarda en çok kullanılan üçüncü metaldir. Magnezyum alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve iyi kaynaklanabilirlik gibi özellikleri nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisi başta olmak üzere ateşli silahlar, roket ve füzeler, kara araçları, hava araçları, personel ekipmanları ve iletişim cihazları gibi pek çok askeri malzemede, ilaç sanayisinde, şarj edilebilir pillerin yapımında kullanılmaktadır (Enz vd. 2017).

Magnezyum elementi de alüminyum gibi elektromanyetik parazit (EMI) ve radyo frekans paraziti (RFI) koruma özelliklerine sahiptir ve ayrıca daha düşük ağırlıkta olduğundan kullanımı çok avantajlı olmaktadır. Günlük hayatımızda kullandığımız elektronik aletin çoğunun yapımında magnezyum kullanılmaktadır. Cep telefonu, dizüstü bilgisayar, tablet, kamera ve LCD ekran vb. birçok ürün magnezyum alaşımları kullanarak imal edilmektedir. Magnezyum yalnızca cihazları hafifletmekle kalmayıp aynı zamanda elektromanyetik parazitlere ve radyo frekanslarına karşı da mükemmel koruma sağlamaktadır (Kazdal 1999).

2.1.3 Magnezyum Alaşımları ve Sınıflandırılması

Alaşımsız olarak magnezyum düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahiptir. Bu nedenle saf magnezyuma genellikle Alüminyum, Mangan, Çinko, Toryum, Zirkonyum, Gümüş gibi elementler eklenerek özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır (Seçgin 2012, Yıldırım 2018).

Magnezyum elementi hegzagonal kafes yapısına sahiptir ve tane çapı sayesinde çok sayıda metalle katı çözünebilir. Magnezyum elementinin alaşımlarında uygulanan sertleştirme yöntemlerinden katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi önemli yer tutar (Ünal 2008).

Magnezyumun alüminyum ile oluşturulan alaşımı en yaygın kullanılan alaşımdır ve saf magnezyumda mukavemeti artırmaktadır. Çekme dayanımını ve sertliği artarken olumsuz etki olarak da darbe dayanımı ve süneklik düşmektedir. Çinko ile olan magnezyum alaşımında ise tokluk, çekme dayanımı, korozyon direnci ve akıcılık artmaktadır. Ancak %2'nin üzerindeki çinko sıcak kırılabilirliğe neden olmaktadır (Schwam vd. 2000). Mangan elementi de magnezyum alaşımında korozyona karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Günümüzde alaşımlandırma elemanları olarak; mikro poroziteyi azaltmak için nadir toprak metalleri, tane inceltme için zirkonyum, yüksek sıcaklık özellikleri geliştirilmek için gümüş veya bakır, sürünme direncinin iyileştirilmesi için ise toryum katılmaktadır (Kaçar vd. 2006).

Magnezyum alaşımların diğer metallere bakıldığında korozyon direnci daha düşüktür ve hatta saf magnezyumun havayla olan temasında yüzeyinde oksit tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu magnezyum oksit tabakayı önlemek ve korozyon direncini artırmak için bazı çözüm önerileri aşağıda sıralanmıştır.

- 1-Üretim aşamasında demir, bakır, nikel gibi elementlerden arındırılması sayesinde magnezyumun saflığının yükseltilmesi korozyon direncini artırır.
- 2-Nikel kaplama, kromatlama gibi yüzey kaplama metotları ile yüzey kaplaması yapılan magnezyumlar daha güç korozyona uğrarlar.
- 3-Başka bir metalle elektrolite olmuş magnezyum alaşımları dıştan boyanmalıdır.

4-Nemli ortamlarda kullanılan magnezyum alaşımlarda farklı metallerle temasını önlemek için arasına plastik malzeme konulmalıdır.

5-Magnezyum alaşımların paslanmaz çelik, nikel ve bakır ile temas etmesi durumunda araya izolasyon yapılmalıdır (Erdoğan 2001).

Saf magnezyum, üretim safhasında eklenen Al, Zn, Cu, Fe, Si, Ni, Ag, Sn gibi elementlerle mekanik özellikleri geliştirilmekte ve de isimlendirilmektedir. Magnezyum alaşımlarının gösterilmesi ASTM standartlarınca belirlenmiştir. Genellikle iki harf, iki veya üç rakam ve devamında varsa impurite (safsızlık) seviyelerini gösteren harflerle tanımlanmaktadır. Alaşımda en çok bulunan alaşım elementi ilk harfi oluştururken en çok bulunan ikinci alaşım elementi de ikinci harfi oluşturur. Harflerden sonra gelen ilk rakam, ilk harfteki elementin ağırlıkça yüzde oranını ve ikinci rakam ise ikinci sıradaki harf elementinin ağırlık yüzdesinin oranını göstermektedir. Devamında harfler olursa bunlar da genellikle katılaşma seviyelerindeki alaşımlarda A,B,C,D gibi modifikasyonları belirtmektedir. Örneğin AZ91D, alaşımı %9 alüminyum (A), %1 çinko (Z) ve D modifikasyonudur. (Gaines vd. 1996, Zivic vd. 2014)

Çizelge 2.2 Magnezyum alaşımların standart gösterimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) (Zhang vd. 2000, Bolstad vd. 2000, Sarennah vd. 2001).

SERİ ADI	ALAŞIM İÇERİĞİ	ÖRNEK
AE SERİSİ	Magnezyum - Alüminyum - Toprak alaşımları	AE42
AJ SERİSİ	Magnezyum - Alüminyum - Stronsiyum	AJ52 HP
AM SERİSİ	Magnezyum - Alüminyum - Mangan alaşımları	AM60B
AS SERİSİ	Magnezyum - Alüminyum - Silisyum alaşımları	AS31
AZ SERİSİ	Magnezyum - Alüminyum - Çinko alaşımları	AZ91D
EQ SERİSİ	Magnezyum - Toprak gümüş- Bakır alaşımları	EQ21
EZ SERİSİ	Magnezyum - Toprak - Çinko alaşımları	EZ33A
HM SERİSİ	Magnezyum - Toryum - Mangan alaşımları	HM 21A
HZ SERİSİ	Magnezyum - Toryum - Zirkonyum alaşımları	HZ32A
QE SERİSİ	Magnezyum - Gümüş - Toprak alaşımları	QE22A
QH SERİSİ	Magnezyum - Gümüş - Toryum alaşımları	QH21
WE SERİSİ	Magnezyum - İtiryum - Toprak alaşımları	WE43
ZC SERİSİ	Magnezyum - Çinko - Bakır alaşımları	ZC71
ZK SERİSİ	Magnezyum - Çinko - Zirkonyum alaşımları	ZK11
ZT SERİSİ	Magnezyum - Çinko - Toryum alaşımları	ZT32

Çizelge 2.2’de gösterilen magnezyum alaşımların dışında Magnezyum Araştırma Enstitüsünün (MRI) geliştirdiği yeni standart alaşımlar da vardır. Bu yeni alaşımlar “MRI-1, MRI-2, MRI-3, ... MRI- 230D” şeklinde gösterilmektedir ve halen devam eden araştırmalarla keşfedilen alaşımlar artmaktadır (Rausch G, Ziese A 2003).

2.1.4 Otomotiv Endüstrisinde Magnezyum

Magnezyum alaşımları, mükemmel özgül mukavemet ve sertliğe, olağanüstü boyutsal stabiliteye, yüksek sönümlene kapasitesine ve yüksek geri dönüşüm özelliğine sahiptir (Maguteeswarana vd. 2012).

Döküm, dövme ve enjeksiyon gibi yöntemler ile üretilen malzemeler, asal gaz ortamlarında kolaylıkla işlenebilir ve kaynaklanabilirler. Magnezyum alaşımların pek çoğu da iyi işlenebilirlik ve dökülebilme özelliğine sahiptir. Magnezyum alaşımlarının diğer önemli özelliği ise, ses ve titreşimi absorbe edebilmesidir. Bu özelliği ile magnezyum, kullanıldığı makinaların ve makina parçalarının ömrü artmaktadır. Saf magnezyumun dökme demire göre çok daha yüksek titreşim sönümleyici özelliği vardır (Davis 1998). Böyle mükemmel özelliklerinin yanında, magnezyum alaşımlarının kullanımında bazı sınırlılıklar da vardır. Ergimiş magnezyumun yanmaya karşı yüksek reaktif özelliğinin yanında, düşük korozyon direnci bunlardan bazılarıdır (Mert vd. 2010).

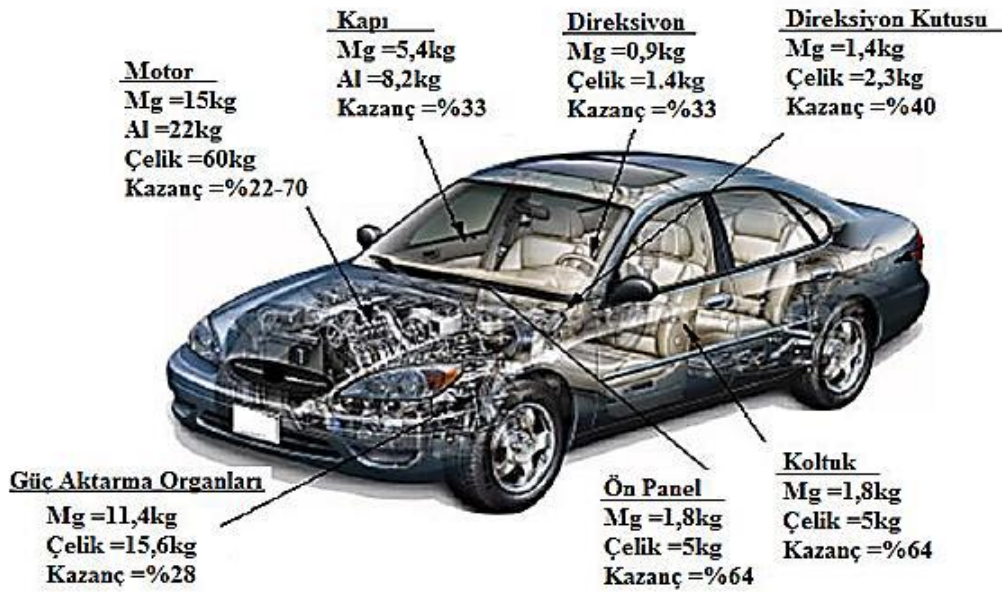
Magnezyum alaşımları hafiflik, yüksek ısı iletkenlik, yüksek boyutsal kararlılık, iyi elektromanyetik koruma, yüksek sönümlene, iyi işlenebilme ve kolay geri dönüşüm gibi özellikleri nedeniyle başta savunma sanayi ve taşımacılık olmak üzere diğer endüstriyel alanlarda kullanımı her geçen gün artmaktadır. (Öztürk ve Kaçar 2012).

Otomotiv endüstrisinde kullanılabilecek malzemeler arasında magnezyum alaşımlı (AZ31B) malzemeler, plastiklerle karşılaştırıldığında daha katı ve daha fazla geri dönüşümlü, alüminyum ve çelik ile karşılaştırıldığında ise çok daha hafif ve yeterli dayanıma sahiptir.

Otomobillerde kullanılan magnezyum alaşımından üretilmiş ürünler:

- | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1. Tekerlekler | 2. Silindir kapağı | 3. Yanma odaları |
| 4. Debriyaj gövdesi | 5. Koltuk yükselticisi | 6. Koltuk kızıakları |
| 7. Orta konsol | 8. Kapı içi koruyucu | 9. Tekerlek göbeği |
| | kirişler | |
| 10. İç kapı kolları | 11. Kol dayama yerleri | 12. Kapı kilidi gövdeleri |
| 13. Motor destek | 14. Endüksiyon sistemi | 15. Kaporta |
| braketleri | yuvası | |
| 16. Araç ön paneli | 17. Soğutma peteği | 18. Hava Filtresi |
| 19. Şanzıman gövdesi | 20. Emme manifoldu | 21. Far mesnedi |
| 22. Açılır tavan iskeleti | 23. Ventil | 24. Travers |
| 25. ABS fren destek ve | 26. Geçme hava yastığı | 27. Gösterge paneli |
| tutma braketleri | tutucuları | destek kirişi |

Yukarda otomobillerde kullanılan magnezyum alaşımından üretilmiş ürünler gösterilmektedir (Atak vd. 2018). Bu parçaların diğer metallerle olan ağırlık farkları ise Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



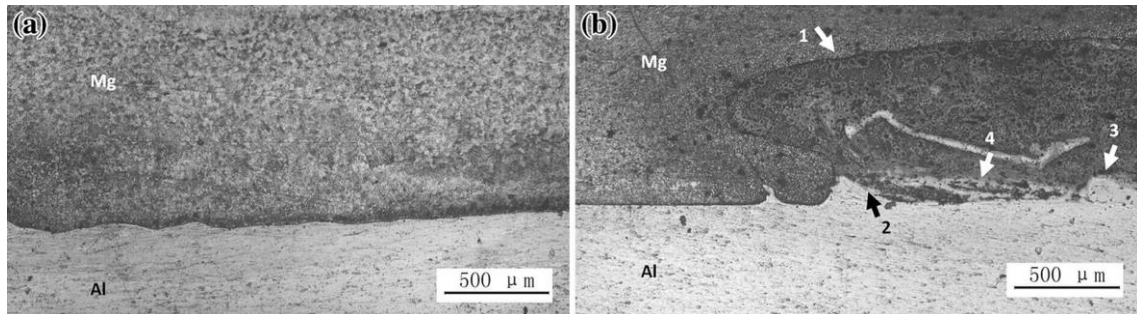
Şekil 2.4 Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar (Şık 2010).

2.1.5 Magnezyumun Kaynak Kabiliyeti

Magnezyum alaşımları; yüksek ısı iletkenlik ve genleşme katsayısı, düşük erime sıcaklığı gibi özelliklerinden dolayı kaynak kabiliyeti düşüktür (Hongfeng vd. 2019). Bu sebeple genelde inert gaz korumalı proseslerde kaynak işlemi yapılmıştır. Ancak son zamanlarda katı hal kaynak tekniklerinden difüzyon, sürtünme karıştırma ve punta direnç kaynağı üzerinde çok sayıda çalışma yapılmaktadır (Çelikyürek ve Önal 2016).

Magnezyum alaşımlarının farklı metallerle olan bağlantılarında özellikle çeliklerle olan lazer-tungsten inert gaz hibrit kaynak yöntemi, lazer kaynağı, ultrasonik kaynak ve nokta kaynak yöntemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Sun vd. 2016). Ancak magnezyum alaşımların alüminyum ile kaynağı hakkında çok az çalışma vardır (Wang vd. 2013). Wang ve arkadaşları (2013), alüminyum levhayı soğuk metal transfer metoduyla magnezyum levhaya kaynaklamış ve kırılgan bir yapı meydana gelmiştir.

Luo ve Li (2014), magnezyum ve alüminyum alaşımların punta direnç kaynağı ile kaynaklanmasını ve çekirdek yapısını inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde 2 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımı ve 1 mm kalınlığında 2024 Alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 25x100 mm boyutlarında kesilen numunelerin kimyasal temizliği yapılmış ve 8 mm çapındaki saf bakır elektrot kullanılarak punta direnç kaynağı yapılmıştır. Arayüzdeki temas direnci nedeniyle çekirdek oluşumu öncelikle temas arayüzünde gerçekleşmiş ve Şekil 2.5'te görüldüğü üzere uygulanan farklı kaynak kuvvetleri çekirdek oluşumunu etkilemiştir.



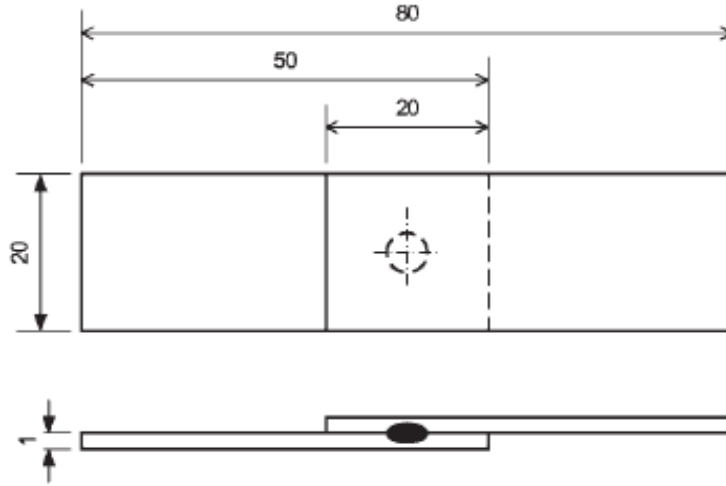
Şekil 2.5 Kaynak bağlantısı arayüzündeki RSW çekirdek oluşumu görünümü: (a) kaynak 1, bağlantı arayüzünde çekirdek oluşmamış (29 kA, 0,12 s, 0,1 MPa) ve (b) kaynak 2, bağlantı arayüzünde çekirdek oluşmuş (29 kA, 0,16 s, 0,1 MPa).

Aynı kaynak akımı ve kuvveti altında kaynak süresi diğerinden kısa olan kaynakta erime ve çekirdek yapısı gerçekleşmezken, uzun kaynak süresi olan işlemdeki yeterli direnç ısısı sayesinde erime gerçekleşmiş ve kaynak çekirdek yapısı oluşmuştur. Kaynak çekirdeği oluşmayan birleşimlerin mikrosertlik deney sonuçlarına bakıldığında ise alüminyum ve magnezyum alaşımları arasında neredeyse hiç geçiş bölgesi meydana gelmemiştir. Kaynağın gerçekleştiği birleştirme işleminde de $Al_{12}Mg_{17}$ intermetalik bileşiklerden oluşan çekirdek yapısı oluşmuştur. Oluşan intermetalik bileşiğin sertliğinin, kaynak yapılan ana metallere daha yüksek olduğu saptanmış ve bu sertlik farkının mikroçatlak ve kırılmaların oluşumunu kolaylaştırarak kaynak kalitesini düşürdüğü belirlenmiştir.

Babu ve arkadaşları (2012), AZ31 magnezyum alaşımların nokta direnç kaynağı sonrası mikro yapısını inceleyen çalışma yapmışlardır. 3mm kalınlığındaki numuneler 45x105 mm boyutlarında kesildikten sonra tel fırça ve asetonla yüzey temizliği yapılmıştır. Nokta kaynağı uygulanan numunelerin, mikro yapılarını incelemek üzere kaynak çekirdeğinden düzleme dik olarak kesilmiş ve ardından taşlama ve dağlama işlemleri yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonrası kaynak çekirdek bölgesinin mikro yapısının α -Mg ve β - $Al_{12}Mg_{17}$ olarak tanımlanan bazı ikinci faz parçacıklardan oluştuğu, çekirdeğin kenarlarında hücresel dendrit yapı meydana geldiği gözlenmiştir. Kaynak yapılan ana metallere bakıldığında çekirdek yapısı ve ITAB'da sertliğin azaldığı belirlenmiştir. Erimiş magnezyumun havayla veya sıkışmış yüzey oksit filmlerindeki nemle etkileşimi nedeniyle yüzey kirliliğine bağlı oluşan gözenekler de kaynağın mukavemetini azaltmıştır.

Sun ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada 2 mm kalınlığında AA5052 alüminyum levha ile yine kalınlığı 2 mm olan AZ31 magnezyum levhayı punta direnç kaynağı ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Deneylerin bazılarında 0,6 mm kalınlığında kalay kaplı AISI 1008 çelik ara tabakası kullanılmış ve ara tabaka olmadan yapılan kaynak yapısı ile karşılaştırılmıştır. Ara tabaka kullanılan kaynakta çelik erimeden kalmış ve Al-Mg reaksiyonu önlenmiştir. Diğer ara tabakalı kaynaklarda ise çatlak ve boşluk gibi arayüz kusurları oluşmuştur. Her iki kaynak denemesinde aynı akımlar altında kaynak çekirdek çaplarının birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

Wang ve arkadaşları (2013), özellikle otomotiv endüstrisinde alüminyum ve çelik malzemelerin yerini almaya aday olan magnezyum alaşımların, yine otomotiv sanayinde yaygın kullanılan punta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak süresinin etkisini araştırmışlardır. 1 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımlı sacları; hiç işlem görmemiş, mekanik taşlama uygulanmış ve kimyasal sıvıya ($0.56 \times 10^{-3} \% \text{H}_2\text{SO}_4$) daldırılarak film kaplanmış olarak 3 yüzey koşulu sağlamışlar ve Şekil 2.6’da gösterildiği ebat ve düzenekte hazırlamışlardır.



Şekil 2.6 Wang ve arkadaşlarının punta direnç kaynak uygulamalarındaki numunelerin boyutları ve konfigürasyonu.

Deneylerde sabit kaynak akımı ve kuvveti uygulamış, kaynak süresini de 1’den 12 periyota (1 periyot 0-0,2 s) kadar değiştirmişlerdir. Çalışma sonunda kaynak çekirdeğinin değişim aşamalarını oluşum, büyüme ve denge döngüleri olarak üçe ayırmışlardır. İlk kaynak döngüsü çelik ve alüminyum alaşımlara göre daha kısa sürmüş 1 periyotta gerçekleşmiş ve katı metal erimeye başlayarak çekirdek nokta şeklinde oluşmaya başlamıştır. Sonraki 2-4 periyotta kaynaktaki noktanın çapı hızla büyümüş ve 2 mm’den 5 mm’ye çıkmıştır. Çekirdek çapı yaklaşık $5 t^{1/2}$ (t, numunenin kalınlığı) değerine ulaştığında, numunelerin deformasyonu artar. Ayrıca numune ve elektrot arasındaki temas alanının artmasına bağlı olarak akım yoğunluğunun azalması ve soğutma suyunun etkisiyle ısıнын uzaklaştırılması sebebiyle ısınma hızı azalır. Sonuç olarak kaynak süresinin artmasıyla kaynak çapının elips şeklinde büyüdüğü gözlenmiş, 5-6 periyottan sonra neredeyse durmuş ve kaynak süresi 12 periyota ulaştığında kaynak çekirdek çapı 5,4 mm olarak ölçülmüştür. Çekirdeğin mikroyapısını incelediklerinde eş eksenli dendritik yapı gözlemlenmiştir.

Numuneleri yüzey koşullarına göre karşılaştırdıklarında; orijinal yüzeye sahip numunelerde oluşan oksit tabakasının, mekanik taşıma yapılan yüzeylere göre daha çok olduğu ve çekme makaslama yükü değerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kimyasal film yüzeyi olan numunede ise daha çok ısınmaya bağlı olarak sıvı metalin dışarı atıldığı ve bu sebeple çekme makaslama yükünün düştüğü sonucuna varılmıştır.

2.2 Alüminyum ve Alaşımları

2.2.1 Alüminyumun Özellikleri ve Tarihçesi

Kimyasal sembolü Al ve atom numarası 13 olan alüminyum elementi, gümüş renginde ve 2,70 g/cm³ yoğunlukta hafif bir metaldir. Dünyada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir ve doğada saf halde bulunmaz. Kimyasal aktivitesi yüksek olan alüminyum diğer çok kullanılan metaller olan kalay, kurşun, demirde olduğu gibi bileşikler halindedir. Alüminyumun elde edilmesi silikat ve oksit bileşiklerinden oluşan boksit cevherinden sağlanır (Eroğlu ve Şahiner 2018). Alüminyumun elde edilmesi için öncelikle cevherin içindeki yabancı maddelerden arınması gerekmektedir. Oksit halindeki bileşikten alüminyumun ilk ayrılması 1807’de Sir Humprey Davy tarafından olmuştur. 1825 yılında ise Danimarka’da H.C. Oersted laboratuvar ortamında alüminyum üretimini başlatmıştır. Bundan iki yıl sonra da F.Wöhler Almanya’da gri toz şeklinde alüminyumu üretmiştir. Kimyasal teknik kullanılarak ilk ticari amaçlı üretim Fransa’da 1855 yılında Sainte-Claire Deville tarafından yapılmıştır. Hafif olma özelliğinden dolayı üzerindeki ilgiyi artıran alüminyumu üretim teknolojisi gün gün iyileştirilerek devam etmiştir. En temel üretim metodu olan eritme tuz elektroliz yöntemini ise 1886’da birbirlerinden bağımsız yaptıkları çalışmalarla Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul L. T. Heroult bulmuştur ve bu prosese Hall-Heroult adı verilmiştir. K. J. Bayer’in ise 1892 yılındaki boksit cevherinden alümina eldesini sağlayan çalışması üzerine kendi adının verildiği bu Bayer prosesin bulunmasıyla endüstriyel olarak alüminyumun üretimi artmış ve kullanım alanı genişlemiştir (Gedik 2008).

İlk dönemler ev dekorasyon malzemelerinde ve elektrik kablolarında kullanılan alüminyuma 2. Dünya Savaşı döneminde uçak sanayinde talep olmuştur. Günümüzde savunma, inşaat, otomotiv ve ambalaj sektörlerinde kendine yer bulan alüminyum ayrıca gıda, ilaç ve kimya sektörlerinde de tercih edilmektedir.

Çizelge 2.3 Alüminyumun bazı özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması (Deschams vd. 2001).

Özellik	Al	Mg	Cu	Fe	Zn
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,7	1,74	8,94	7,87	4,1
Elektrik Direnci (Ohm.mm ² /2).10 ²	2,66	4,46	1,68	9,8	6
Isı İletkenliği (cal/cm ² /cm°C)	0,52	0,37	0,92	0,19	0,27
Isı Genleşme Kat. (mm/mm°C).10 ⁻⁶	24	25,7	16,7	11,9	33
Ergime Sıcaklığı °C	660	651	1083	1535	420
Yanma Isısı (kcal/kg)	6970	6000	-	1600	1270
Uzama (%)	43	-	50	48	-
Sertlik (BHN)	19	-	25	70	-

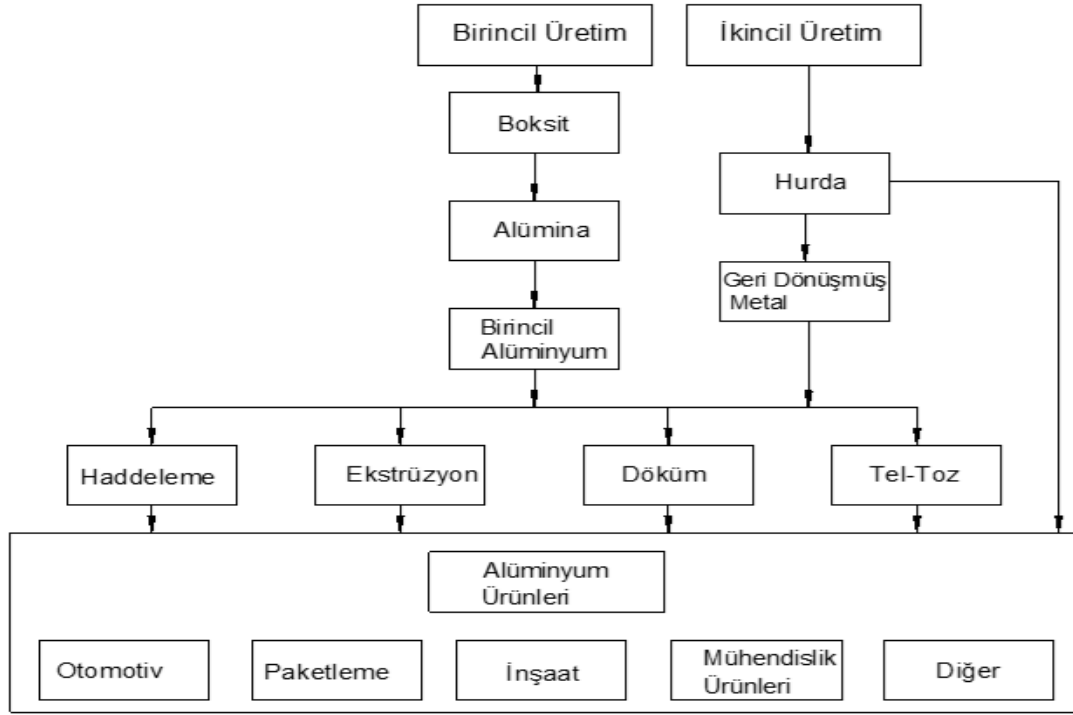
Çizelge 2.3’te verilen teknik özelliklerinde de görüldüğü gibi saf alüminyum, çeliğin üçte biri yoğunluktadır ve magnezyumdan sonra gelen en hafif ikinci metaldir. Ayrıca alüminyum alaşımlarının mukavemetinin 700 MPa’a ulaşması, ısı ve elektrik iletkenliklerinin iyi olması ve ısıl işlem kabiliyetlerinin yapı çeliklerinden yüksek olması gibi özellikleri sayesinde endüstride önemli bir malzeme haline gelmiştir (Gras vd. 2004).

2.2.2.Alüminyum Kaynakları ve Üretimi

Alüminyum metali birincil ve ikincil üretim şeklinde elde edilmektedir. Birincil alüminyum üretimi, alüminyum oksit ve hidroksitlerden oluşan boksit cevherinden yapılır. İkincil üretim ise hurda alüminyumlardan elde edilmektedir (İnt.Kyn.2).

Boksit cevherinde bulunan yabancı maddeler kızgın sodyum hidroksit ile tepkimeye sokularak arındırılır ve sırayla filtrasyon ve kristalize işlemleri de uygulanarak saf alümina elde edilir. Şekil 2.5’te gösterildiği üzere beyaz toz halindeki alüminaya elektroliz işlemi uygulandıktan sonra saf alüminyum elde edilmiş olur (Taban, 2004). İkincil alüminyum üretimi ise Çizelge 2.5’te de gösterildiği üzere hurda alüminyumun geri dönüştürülmesiyle yapılır. İkincil üretim yöntemi olan hurdadan geri dönüşüm ile alüminyum üretimi birincil üretime nazaran daha az enerji maliyeti gerektirdiği için ve çevre kirliliğine neden olmasından dolayı talep giderek artmaktadır (Eroğlu ve Şahiner 2018).

Çizelge 2.4 Alüminyum üretim yolları ve kullanım alanları (İnt.Kyn.2).



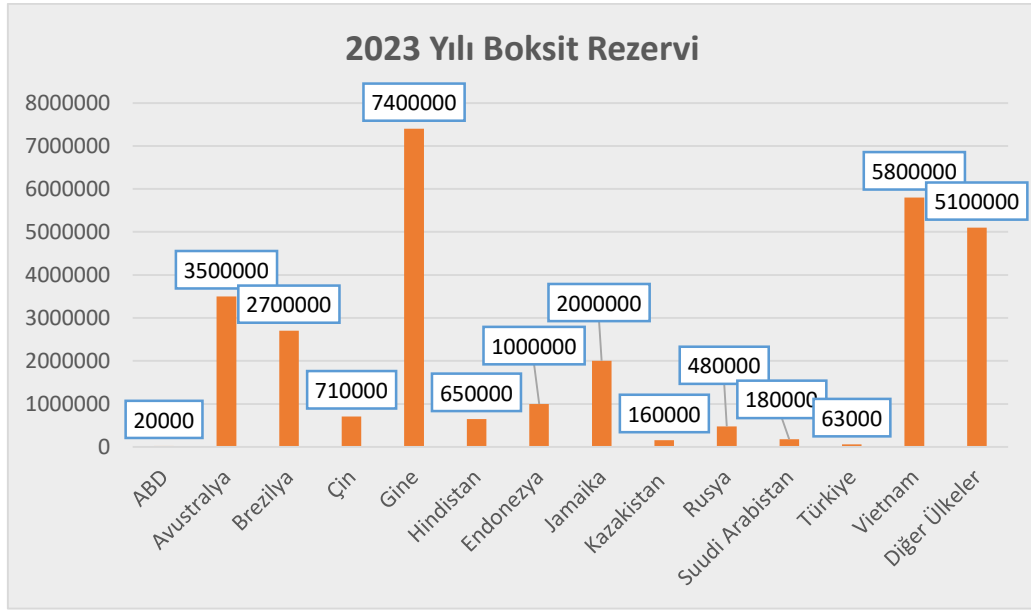
Alüminyu birincil üretiminde kullanılan boksit, alüminyum oksit ve hidroksit karışımı bir elementtir



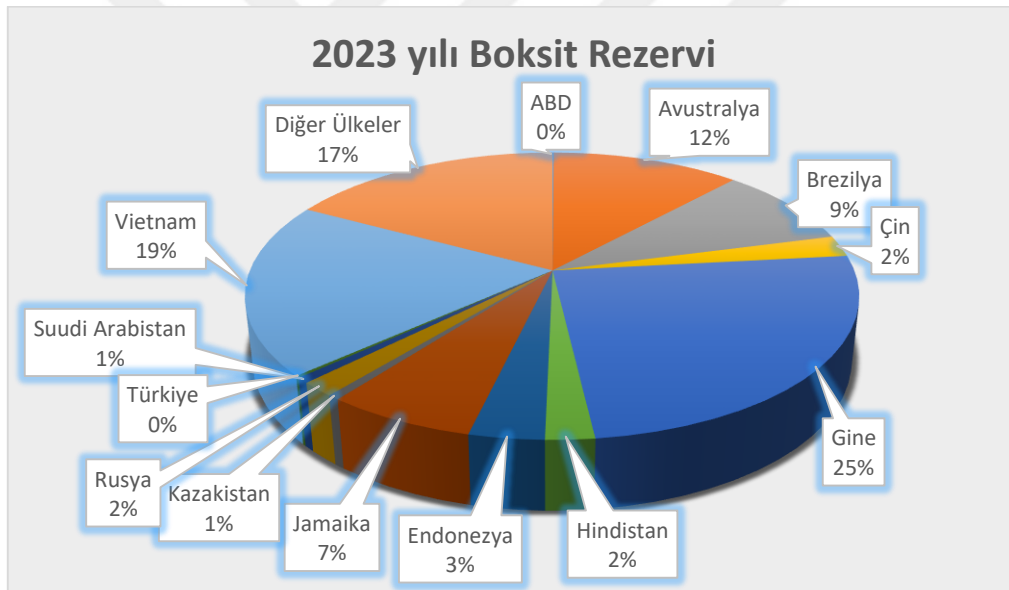
Alümina (AlO), saf alüminyum üretmek için zenginleştirilmiş boksitten elde edilir.

Şekil 2.7 a) Boksit b) Alümina (İnt.Kyn.2).

Boksit cevherinin dünya genelinde 55-75 milyar ton olduğu bilinmekle beraber bu rezervin 30 milyar tonu işlenebilir durumdadır. Ülkelerin boksit rezervlerinin verildiği Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere en çok boksit rezervi 7,4 milyar tonla Gine’de bulunmaktadır. Onu sırasıyla 5,8 milyar ton rezervle Vietnam ve 3,5 milyar ton rezervle Avustralya takip etmektedir (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.8 2023 Dünya boksit rezervleri (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.9 2023 Dünya boksit rezervleri dağılım grafiği (İnt.Kyn.1).

Çizelge 2.5'te belirtildiği gibi, alüminyum cevherleri yerkabuğunun % 7,9'u oluşturur ve yaklaşık 250 çeşit alüminyum minerali vardır. Bunlardan en önemli gruplar oksit hidratlar ve silikatlardır. Bu minerallerden bazıları nefelin, lösit, labradorit, andaluzit, kriyolit, alunit, montmor ulonit, kaolinitir (Özdemir 1975).

Çizelge 2.5 Yeryüzünde en çok bulunan on elementin bulunma oranları (Burgucu 2011).

Element	Kimyasal sembol	Doğada bulunabilirlik (%)
Oksijen	O	47,3
Silis	Si	27,7
Alüminyum	Al	7,9
Demir	Fe	4,5
Kalsiyum	Ca	3,5
Sodyum	Na	2,5
Potasyum	K	2,5
Magnezyum	Mg	2,2
Titanyum	Ti	0,5
Hidrojen	H	0,1

2.2.3 Alüminyum Alaşımları ve Kullanım Alanları

Diğer metallerle kıyaslandığında saf alüminyum, daha yumuşak ve iletkenliği yüksektir. Yüksek sünekliğe sahip olan alüminyum aynı zamanda ısı ve elektriği bakırdan daha iyi iletmektedir. Sahip olduğu doğal oksit tabakası sayesinde alüminyum, korozyona karşı daha dayanıklı bir metaldir. Saf metalin döküm kabiliyeti düşükken, dövülebilirliği ve temel yöntemlerle işlenebilirliği kolaydır (Anonim 1999).

Çizelge 2.6 Saf alüminyumun kimyasal ve fiziksel özellikleri (Wessel 2004).

Fiziksel Özellikler	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Yoğunluğu	2,7 g/cm ³
Ergime Noktası	660°C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-300
Buharlaştırma Noktası	2450°C
Poison Oranı	0,33
Elastisite Modülü	72x10 ³ MPa
Çekme Mukavemeti	40-90 MPa
Akma Mukavemeti	10-30 MPa
Kopma Uzaması	%30-40

Saf alüminyumun Çizelge 2.6’da verilen mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda magnezyum, bakır, çinko ve silisyum gibi elementlerle alaşımlandırma yapılmaktadır. Böylece alüminyumun mukavemeti artırılıp kullanım alanları genişlemiş olmaktadır (Eker 2009, Fakıoğlu 2012).

Magnezyum alaşım elementi eklenen alüminyumun işlenebilme ve şekillendirilebilme özelliği artmakta ve korozyon direnci yükselmektedir. Alaşım elementi olarak kullanılan bakır ve çinko ise alüminyumun dayanımını ve sertliğini artırmaktadır. Ayrıca çinkonun alaşımdaki dezavantajı olan alüminyumun sıcak yırtılma eğiliminin artmasını bakır elementinin ilavesiyle azaltmak mümkündür. Silisyum ilave edilen sıvı alüminyumda da akışkanlık, kaynak kabiliyeti ve korozyon direnci artmaktadır (Tan 2011).

Saflık derecelerine göre sınıflandırılan alüminyumun, eklenen alaşım elementleri ile verilen isimleri aşağıda gösterilmiştir (Yıldırım 2006).

- 1xxx : En az 99% saflıkta alüminyum
- 2xxx : Alüminyum ve bronz alaşımları
- 3xxx : Alüminyum ve mangan alaşımları
- 4xxx : Alüminyum ve silikon alaşımları
- 5xxx : Alüminyum ve magnezyum alaşımları
- 6xxx : Alüminyum, magnezyum ve silisyum alaşımları
- 7xxx : Alüminyum, çinko ve magnezyum alaşımları
- 8xxx : Diğer alaşımlar

Alüminyumun mekanik özellikleri yapılan şekil verme işlemine göre büyük ölçüde değişmektedir. Alüminyum alaşımları Amerikan Alüminyum Birliği (AA – Aluminum Association) sistemine göre uluslararası standartlarda sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma sistemine göre temelde döküm ve dövme olarak iki sınıfa ayrılan alüminyum alaşımlar yine bu standartlarda isimlendirilmektedirler (ASM International, 1991).

Dövme alüminyum alaşımlarında 1xxx saf alüminyum alaşımları ifade ederken, 2xxx ile başlayarak 8xxx’e kadar alaşım elementine göre dört basamaklı numaralandırma sistemi ile isimlendirilirler. Amerikan Alüminyum Birliğince yapılan bu sınıflandırmaya

göre, birinci sırada temel alaşımlar ve ikinci sırada alaşımların modifikasyonları gösterilir. İkinci sıradaki rakam sıfır ise modifikasyon yapılmamış demektir. Son iki rakam da farklı alaşımları ayırmak için kullanılmaktadır.

Alaşımların simgelerinin yanında eğer kısa çizgi ile ayrılan bir harf ve bazen de harfin devamında rakamlar var ise bunlar da esas ve özgül işlemleri ifade etmektedir. ASTM standartlarında bulunan bu sınıflandırmalardan bazıları şu şekildedir;

- F ilk elde edildiği gibi,
- O tavlama
- H yoğrulma ile sertleşmiş,
- H1 sadece yoğurulmuş sertleşmiş
- H2 yoğurulmayla sertleşme sonrası kısmen tavlama
- W eriyik ısı işlem görmüş,
- T çöktürme ısı işlemi veya çöktürme soğuk işlemi ile sertleşmiş.

Örneğin 1100-H14 şeklinde gösterilen alüminyum için; 1100 rakamları alüminyumun saf olduğunu ve şekillendirilebilir olduğunu, -H1 ifadesi sadece yoğurulma işlemi ile sertleştirildiğini, 4 rakamı ise çekme mukavemetinin en yumuşaktan en sert doğru sıralamaya göre ortada olduğunu ifade etmektedir (Burhan 1990).

Amerikan Alüminyum Birliğine göre döküm alüminyum alaşımlarının tanımlanması da yine alüminyum dövme alaşımlardaki gibi dört basamaklıdır. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterilmesinden tek farkı, alaşımların döküm veya ingot halinde olduğunu gösteren son basamağın ayrı gösterilmesidir. Örneğin 2.xx.x Alüminyum – bakır alaşımını, 5.xx.x ise alüminyum – magnezyum alaşımını ifade etmektedir.

Alüminyum ve alaşımlarının, kimya, gıda, havacılık ve taşıt endüstrisinden mutfak eşyalarına kadar günümüzde çok geniş bir kullanım alanı vardır. Bu kullanım alanlarından bazıları Çizelge 2.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.7 Alüminyum ve alaşımlarının başlıca endüstriyel kullanım alanları (Dedeoğlu 2019).

Alüminyum Alaşımı	Ürün Biçimi	Uygulama Alanı
Saf alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon ürünleri	Ambalaj malzemesi ve folyo, çatı kaplama, zırhlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımı
2000 serisi (Al-Cu alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar	Çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt tekerlek jantları, silindir kafaları, pistonlar.
3000 serisi (Al-Mn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar	Ambalaj malzemesi, çatı kaplama ve zırhlama, kimyasal madde varilleri ve tankları, kimyasal madde ve gıda taşıma ekipmanları
4000 serisi (Al-Si alaşımları)	Tel, döküm parçalar	Kaynak telleri, silindir kafaları, motor blokları, supap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
5000 serisi (Al-Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular	Zırhlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanlar, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
6000 serisi (Al-Si- Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar
7000 serisi (Al-Mg- Zn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri.

2.2.4 Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum Kullanımı

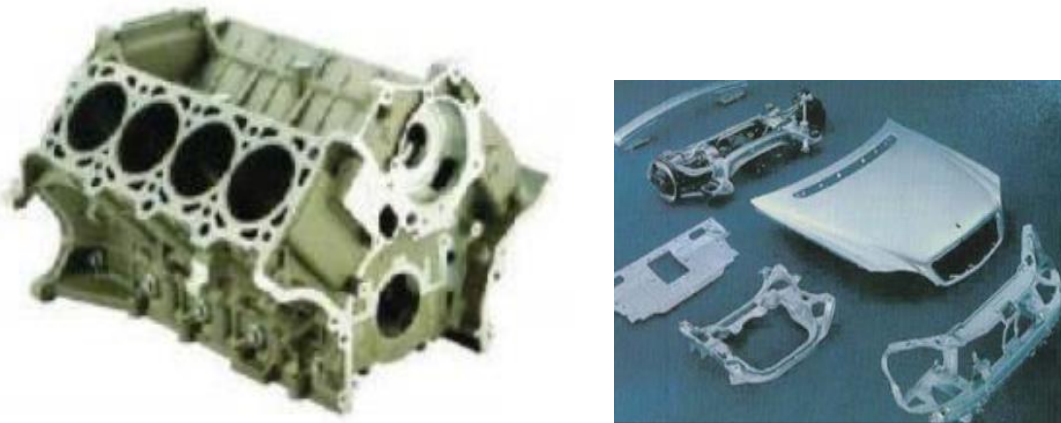
Otomotiv endüstrisi her geçen gün artan araç sayısının da gösterdiği üzere en gelişmiş ve gelişmeye devam eden sektörlerden biridir. Bu gelişim, ihtiyaçların karşılanmasının yanı

sıra dünyanın kaynaklarının da korunmasını da ele almaktadır. Bu sebeple otomotiv üretiminde kullanılacak malzemeler birçok etkene göre değerlendirilip seçilir ve geliştirilirler (Jovanovic ve Teodorovic 2019).

Bir otomobilin kolay üretilebilirliği, ekonomik, doğayla barışık, dayanıklı, emniyetli, ergonomik ve konforlu olması için çalışan otomotiv endüstrisi çelik, alüminyum, plastik, magnezyum gibi malzemeleri tercih etmektedir. Araç ağırlığının azaltılması sayesinde yakıt tüketiminde tasarruf sağlanması ve böylece doğal kaynakların korunmasını sağlamak için özellikle yoğunluğu düşük malzemeler üzerinde çalışılmaktadır (Todor ve Kiss 2016).

Düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, yüksek özgül mukavemet gibi özelliklerinden ve şekillendirilirken daha az enerji ihtiyacından dolayı otomotiv endüstrisinde en çok tercih edilen malzemelerden birisi alüminyum alaşımlarıdır. Yapılan çalışmalar, çelik yerine alüminyum parçaların kullanımının araç ağırlığında yaklaşık %50 azalmayı ve yakıt tasarrufu sağladığını göstermiştir. Böylece sera gazı emisyonu azaltılarak doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır (Musfirah 2012).

Mekanik aksamlar olan motor bloklar, şanzıman gövdeleri, silindir kapaklar, radyatörler ve yakıt sisteminde; hareket aksamları olan tekerlek jantları, süspansiyon elemanları, direksiyon sistemleri ve şaselerde; dış aksam olan kapak, kiriş, kaporta, kapılar ve diğer pek çok parçada alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır (Kahraman 2009). Alüminyumdan üretilen bazı otomobil aksamları Resim 2.2’de gösterilmiştir.



Resim 2.2 Alüminyumdan üretilen motor blok ve dış aksamlar (Başer 2013).

2.2.5 Alüminyumun Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum ve alaşımlarının, çeliklere nazaran yüksek elektrik iletkenliği özelliğinden dolayı kaynak işlemi sırasında yüksek kaynak akımına ihtiyaç duyulmaktadır (AWS). Daha çok ergitme kaynak yöntemleri ile kaynaklanan alüminyum alaşımları, havayla temasıyla oksijene maruz kaldığı için yüzey oksitlenmesi artmaktadır. Bu nedenle kaynak öncesinde yüzeyin kimyasal ve mekanik yollarla temizlenmesi ve oksit tabakasının giderilmesi gerekmektedir (Philips 1970).

1xxx, 3xxx, 5xxx seri alaşımlar ısıtılma işlemi tabi tutulamazken, ısıtılma işlemi görebilen ve yüksek mukavemetli 2xxx, 4xxx ve 7xxx serileri kaynak edilebilmektedir. 6xxx serisinde ise ısıtılma işlemi tabi olmayan alaşımlara kolayca kaynak yapılabilir (Oğuz 1990).

Her tür hafif metale uygulanabilen gaz ergitme kaynak yöntemi ile alüminyumun kaynaklanmasında oksitlenmeden alevli hidrojen-oksijen alevine nazaran daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü hidrojen-oksijen alevli hafif alaşımlı malzemelerde kuvvetli oksitlenmeye neden olmaktadır (Senyen 2001).

Alüminyumlarla ısıtılma sırasında sertleşmeyen alaşımları, örtülü elektrot kaynağı ile kaynaklanırken kaynak öncesi yüzey temizliği ve ön ısıtma önemli etkenlerdir (Çam 2001).

Günümüzde en çok kullanılan alüminyum kaynak yöntemi olan MIG (Metal İnert Gaz) kaynağı, koruyucu gaz atmosferi sayesinde ve robot kullanma imkânıyla her pozisyonda hızlı ve kolayca uygulanabilmektedir (Çam 2001).

TIG (Tungsten İnert Gaz) kaynağı hem doğru hem de alternatif akım ile yapılırken alüminyum ve magnezyum alaşımlarında sadece alternatif akım kullanılmaktadır (Oğuz 1990). Ayrıca koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılmalıdır. Kalınlığı 12 mm'den yüksek olan malzemelerin TIG kaynağı, düşük ısı yoğunluğu sebebiyle maliyeti artırırken böyle çok pasolu kalın malzemelerde MIG kaynağı uygulanmalıdır (Senyen 2001).

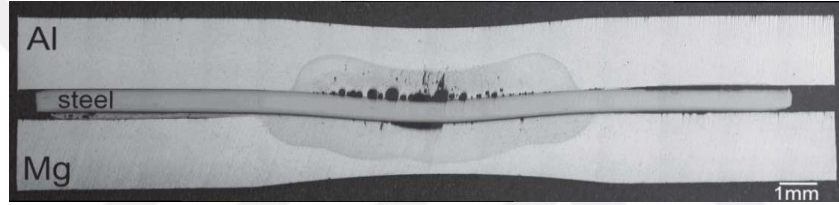
Alüminyum alaşımlardan tüm dövme alaşımlar, kum döküm ve sürekli döküm alaşımlar başarıyla direnç kaynağı ile kaynaklanabilirken kalıp döküm alaşımlarının direnç kaynağı

zordur. Alüminyum alaşımların imalinde punta direnç kaynağı pratik bir birleştirme yöntemidir (AWS 1972).

Kahraman (2009) yaptığı çalışmasında, alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ve elektrik nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesini karşılaştırmıştır. Nokta direnç kaynağı ile kaynak yapılacak alüminyum malzemelerin bazısının yüzeyini zımpara ile temizlenirken bazısına hiçbir işlem yapmamıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılacak alüminyum sacların ise yüzeyini mirlon ile temizleyerek oksitlerden arındırmıştır ve pim yüksekliklerini farklı seçmiştir. Nokta direnç kaynağı deneylerinden zımpara ile yüzeyi pürüzlendirilen alüminyum sacların kesme makaslama yükü, yüzeyine işlem yapılmamış olan alüminyum saclara göre daha yüksek çıkmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı deneylerinde ise 1,4 mm yükseklikte pime sahip takımla kaynak yaptığı alüminyum alaşımların kesme makaslama yükü, 1,5 mm pim yüksekliğine sahip takımla kaynak yaptığı alüminyum alaşımlarinkinden daha düşük çıkmıştır. Daha sonra bu iki kaynak yöntemini karşılaştırmış ve sürtünme karıştırma nokta kaynağından elde edilen kaynak bağlantılarının mukavemet değerlerinin daha başarılı olduğunu, kesme makaslama yükü değerlerinin ise direnç nokta kaynağı ile kaynaklanan numunelerden daha yüksek olduğunu saptamıştır. Sonuç olarak numunelerin birleşme özellikleri ve maliyet açısından sürtünme karıştırma nokta kaynağının daha avantajlı olduğunu, dezavantajının ise direnç nokta kaynağından daha yavaş kaynak yapmasıyla işlem süresinin daha uzun olduğunu belirlemiştir.

Şafak (2011), uçak sanayinde önemli kullanım alanına sahip AA5754 ve AA6061 alüminyum alaşımların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi üzerine çalışma yapmıştır. 1 mm kalınlığındaki levhalar uluslararası standartlar doğrultusunda 45 x 105 mm ebatlarında kesilmiş ve farklı parametreler seçilerek kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Sağlıklı birleşmenin gerçekleştiği en alt değerler 8 kA ve 10 periyot olurken 10 kA ve 14 periyot değerlerinin üstündeki değerlerde malzemenin delindiği gözlenmiştir. Çalışmaların sonucunda çevrim süresinin ve ısı miktarının artmasının kaliteli bir birleşmede etkili olduğu saptanmıştır. Ayrıca mikro sertlik deneylerinin sonucunda ise AA6061 serisi numunenin kaynak çekirdeğinin sertliğinin AA5754 serisi numuneye göre daha sert olduğu, çelik malzemelere göre alüminyumun kaynak çekirdeğinde sertliğin düştüğü görülmüştür.

Penner ve arkadaşları (2014), 5754 Al alaşımlarının AZ31B Mg alaşımına punta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde Zn folyo ve Zn kaplamalı çelik ara katmanlar kullanarak kaynağın mikro yapılarını incelemişlerdir. 2 mm kalınlığında hazırlanan numuneler ile 0,25 mm saf Zn folyo ve 0,7 mm kalınlığında sıcak daldırma galvanizli HSLA çelik kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Zn folyo ara katmanı Al ve Mg alaşımlarının karışmasını yeterince önleyemediği için mukavemet düşük olmuştur. Zn kaplı çelik kullanıldığında ise kaplama arayüzünde bulunan ince FeAl katmanı, hem Al hem de Mg alaşımı tarafında metalürjik bağlanmayı sağlamış ve kaynak bağlantılarının mukavemetini artırmıştır. Şekil 2.10'da kaynak görüntüsü verilen Zn kaplı çelik ara katmanlı punta kaynağına göre alüminyumun çelik ile temas eden yüzeyinde daha çok gözenek olduğu ve bu durumun kaynak kırılmasını kolaylaştırdığı saptanmıştır.



Şekil 2.10 Zn kaplamalı çelik ara katmanla 28 kA kaynak akımı değerinde yapılan Al-Mg kaynağı.

Mutlusu ve Ertan (2020), alüminyum ve titanyum alaşımların nokta direnç kaynağı ile IF çelik saclarla birleştirilmesini araştırmışlardır. Her biri 1 mm kalınlığında seçilen 5754 alüminyum alaşımı, ticari saf titanyum ve IF 180 çelik sacları, farklı kaynak akımı ve kaynak sürelerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda kaynak süresi, kaynak akımı ve elektrot kuvvetindeki artışa bağlı olarak kaynakların çekirdek çapında artış olduğu belirlenmiştir. Çelik sacın alüminyum alaşımıyla olan kaynağında, çekirdek çapındaki artış çeliğin titanyumla olan kaynağından daha belirgin olmuştur. Özellikle elektrot kuvveti ve kaynak akımı değerlerinin kaynak çekirdeği çapında, kaynak süresine nazaran daha çok etkisi olduğu saptanmıştır. Sertlik değerlerine bakıldığında ise her iki kaynak çiftinde de en yüksek değerler kaynak çekirdeğinde ölçülmüştür. Maksimum çekme kuvveti, titanyum ve çelik çiftinde elektrot kuvvetinin artışı ile artarken, alüminyum ve çelik sac çiftinde azalmıştır. Ayrıca yüksek akım değerlerinde (12,5 kA ve 15 kA) kaynak yapılan her iki numune çiftinde de düğme tipi kopma gözlenirken düşük akımda (10 kA) kaynaklanan numunelerde ayrılma tipi kopma gözlenmiştir.

2.3 Düşük Karbonlu Galvaniz Kaplı Çelik

2.3.1 Demirin Özellikleri ve Tarihçesi

Kimyasal simgesi Fe ve atom numarası 26 olan demir, yeryüzünde en çok bulunan dördüncü elementken metaller içinde de alüminyumdan sonra en çok bulunan ikinci metaldir (Yurdagül vd. 2005). Çizelge 2.8’de özellikleri verilen demir elementi, doğada nabit adı ile serbest halde bulunabildiği gibi genelde bileşikler halinde bulunmaktadır. Nabit demiri doğada çeşitli kayalarda ve meteorların bünyesinde bulunmaktadır. Resim 2.3’te gösterilen demir oksit, siderit, hematit, manyetit, limonit ve pirit ise başlıca demir bileşikleridir (Dinlen 2022).



Resim 2.3 Demir bileşikleri a) Hematit b) Siderit c) Manyetit d) Limonit (Dinlen 2022).

Çizelge 2.8 Demir elementinin özellikleri (Dinlen 2022).

Simgesi	Mg
Atom Numarası	26
Atom Ağırlığı	55,85
Yoğunluğu	7.87 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	1535 °C
Kaynama Noktası	2750 °C
Ergime Isısı	13,81 kJ/mol
Kristal Yapı	Kübik
Vickers sertliği	608 MPa
Çekme mukavemeti	150-400 N/mm ²

Malzeme bilimini demir ve demir dışı metaller olarak ikiye ayıracak kadar önemli bir yere sahip olan demirin ilk kullanımına dair veriler, bıçak, mızrak, ok uçları (Resim 2.4) ve süs eşyalarının yapımında kullanan Sümerler ve eski Mısırlılara dayanmaktadır. MÖ Mezopotamya, Mısır, Anadolu ve Orta Doğu'da demirin kullanımı giderek artarken, bronzdan demire geçişin yaşandığı bu süreç Demir Çağı adı verilen dönemin başlangıcı sayılmaktadır.



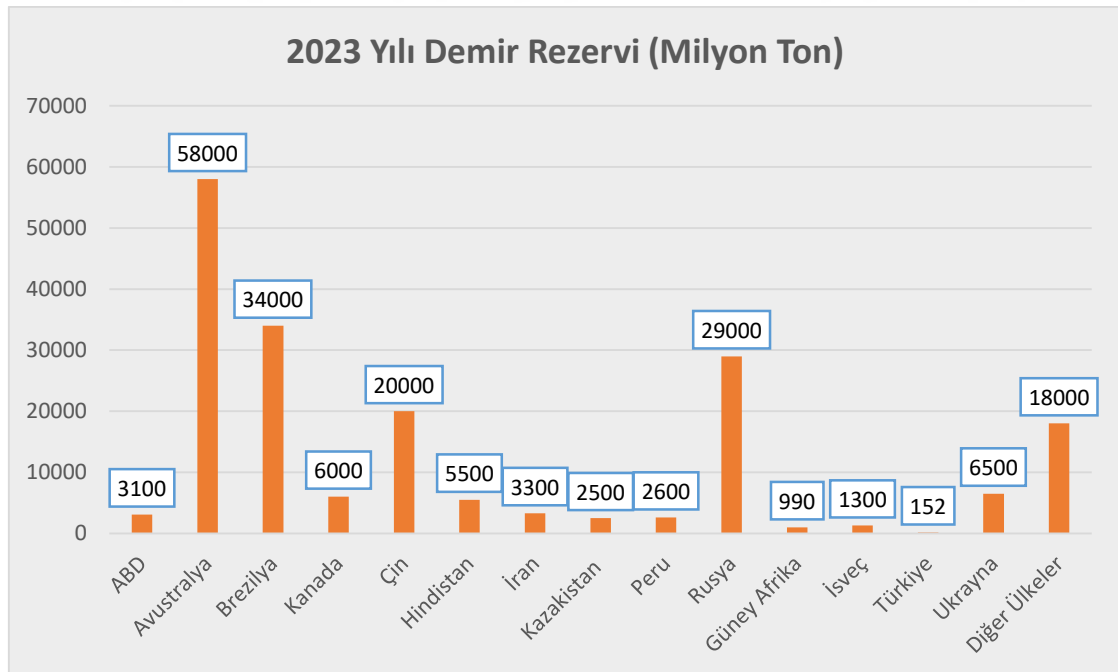
Resim 2.4 Bern Doğa Tarihi Müzesi'nde sergilenen demirden yapılmış ok ucu (İnt.Kyn.3).

MÖ 550 yıllarında Çinliler oldukça gelişmiş bir yöntem olan ocak teknolojisiyle demir üretimini bulmuşlar ve sıvı dökme demir yani pik demir üretmişlerdir. Demirin işlenirliğinin tarihsel gelişimine bakıldığında demir ocak ve fırınlarıyla başlayan süreç, odun kömürü ve kok ile çalışan yüksek fırınlar ve izabe tesisleriyle devam etmiştir (Dinlen 2022).

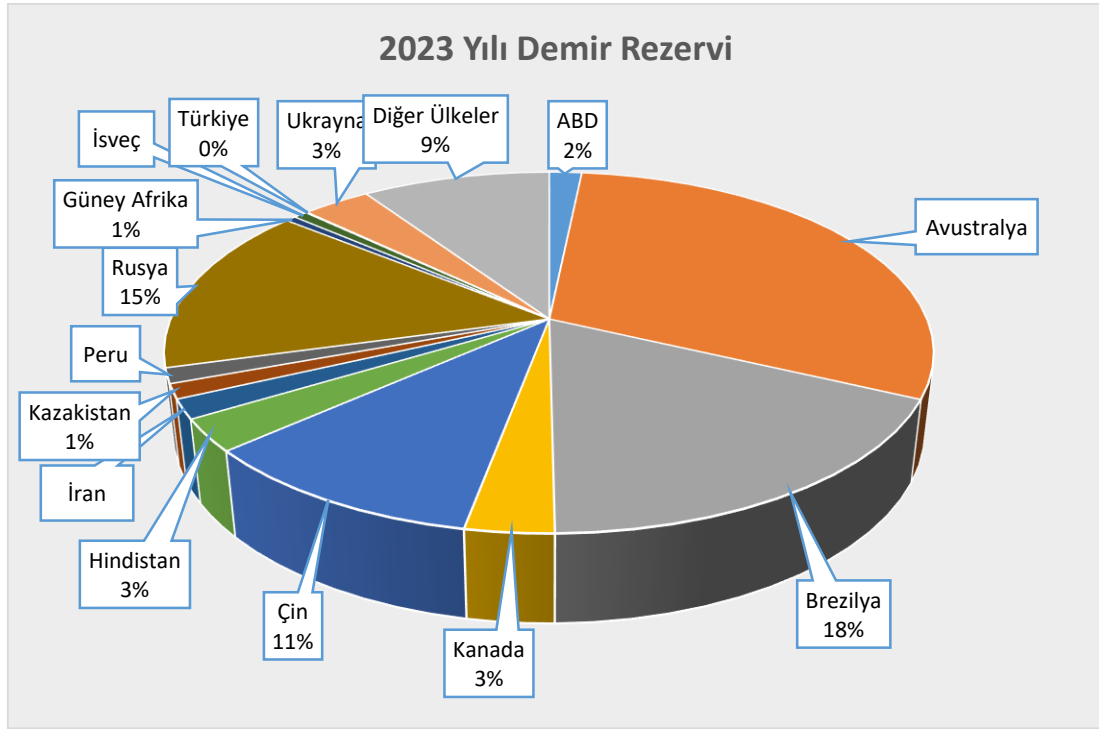
1780’li yıllarda çelik sanayinin babası olarak adlandırılan John Wikinson demir ve dökme demirin öncüsüdür ve çoğu teknik onun sayesinde ortaya çıkmıştır. Araç gereçlerin yanında köprüler, makineler, kubbeler gibi önemli teknik uygulamalara rağmen, 18.yy sonlarında demirin en önemli kullanım alanı askeri gereçler olmuştur. Ordunun artan ihtiyaçlarından dolayı olağanüstü gelişimini sürdüren demir sayesinde, silah imalatçıları ve top dökümcüleri de sanayide önemli yerlere gelmiştir (Yıldız 2013).

2.3.2 Demir Kaynakları ve Çelik Üretimi

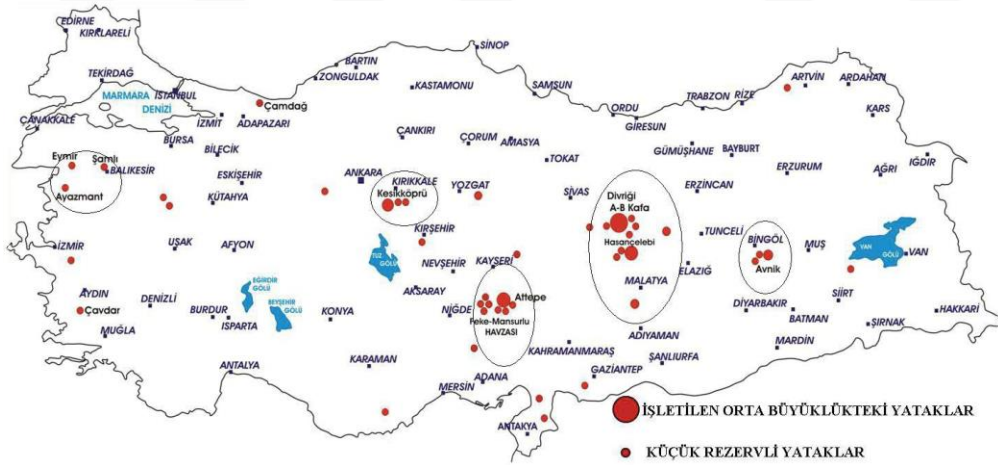
Ülkemizde ise demir-çelik üretimindeki ilk gelişmeler Cumhuriyet döneminde olmuştur. 1932’de Kırıkkale’de kurulan ilk tesisin ardından, 1937 yılında enerji kaynağına yakın olması için kömür havzasının yakınında bulunan Karabük’te Kardemir adı verilen fabrika kurulmuştur. Günümüzde ülkelerin kalkınmışlık ve sanayileşme düzeyleri ile doğrudan ilişkili olan demir-çelik sektörü, ülkemizin de sanayi ve ekonomisinin başını çekmektedir. Şekil 2.11’de gösterildiği üzere dünyada en çok demir madeni Avustralya, Rusya ve Brezilya’dan sonra Çin’de bulunurken dünya geneli toplam rezerv 190 milyar tondur (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.11 2023 Dünya demir rezervleri (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.12 2023 Dünya demir rezervleri dağılım grafiği (İnt.Kyn.2).



Şekil 2.13 Türkiye demir yataklarının dağılımı haritası (Dinlen 2022).

Ülkemizdeki demir maden yataklarının önemli bir bölümü Şekil 2.13'te verildiği üzere Sivas Divriği, Malatya ve Bingöl'de bulunmaktadır.

Çelik üretim yöntemleri entegre ve yarı entegre olmak üzere iki tip üretim üzerine şekillenmiştir. Entegre tip tesisler topraktan çıkarılan demir madeninin

redüklenerek sıvı demire ve çeliğe dönüştürüldüğü sistemlerdir. Yarı entegre tesisler ise kullanılmış çelik hurdaların elektrik akımıyla ergitilmesi sonucu çelik üreten sistemlerdir. Doğrudan redüklenmiş veya sıvı haldeki metalin içindeki karbon ve elementlerin uzaklaştırılması çelik üretiminin temelini oluşturmaktadır. Yüksek fırınlarda kok (karbon) ve hava kullanılarak indirgenen demir cevherinden elde edilen sıvı dökme demirdeki yüksek karbon içeriği, oksijen fırınında verilen oksijen ile indirgenmesiyle sıvı çelik elde edilmektedir. Sıvı metalde öncelikle kükürt uzaklaştırılırken bazen de fosfor ve silis uzaklaştırma işlemleri yapılmaktadır. Bu sayede, uygulanacak olan rafinasyon işlemi de kolaylaşmış olur. Ayrıca işlenebilirlik, korozyon dayanımı, yüksek çekme dayanımı veya yüksek sıcaklık mukavemeti gibi özellikler kazandırmak için de alaşım ilavesi yapılmaktadır (Yıldız 2013).

2.3.3 Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler bileşimlerine göre; sade karbonlu çelikler, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılmaktadır (Yıldız 2013).

- Sade Karbonlu Çelikler (Alaşımsız Çelikler) : İçerisinde sadece karbon (C) elementi bulunan ve belirlenen üst sınırlara kadar Si, Mn, Al, Ti gibi alaşım elementleri bulundurabilen çeliklerdir. Sade karbonlu çelikler bulundurdıkları karbon oranına göre kendi içinde üçe ayrılmaktadır.
 - Düşük karbonlu çelikler; içerisinde %0,20 oranına göre karbon bulunduran çeliklerdir. Yumuşak çelikler olarak da isimlendirilen bu çelikler dünya çelik üretiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe kullanılan çelik çubuk ve profiller, otomobil kaportaları ve boru hatlarında kullanılan yassı ürünler bu sınıfta yer almaktadır.
 - Orta karbonlu çelikler; %0,20 ile % 0,50 arasında karbon oranına sahip çeliklerdir. Düşük karbonlu çeliklere göre işlenebilme, şekil alma ve kaynak kabiliyetleri düşüktür. En önemli özellikleri olan ısıtma işlemiyle yüksek oranda sertleştirilebilmeleri sayesinde makine imalat sanayinde çoğunlukla tercih edilmektedirler. Genellikle cıvata, somun, dişli çark, dingil, transmisyon mili,

uskur mili, gemi şaftı, yük kancası, ray, manivela mili, kazma ve kürek gibi araç gereçlerin üretiminde kullanılmaktadırlar.

- Yüksek karbonlu çelikler ise % 0,50'den fazla karbon içerirler ve bu değer Fe-C denge diyagramına göre % 2,1'e kadar çıkabiliyor görünse de gerçekte % 1,2 – 1,4 sınırına kadar anca uygulanmaktadır. Sünekliği düşük olan bu gruptaki çelikler yüksek mukavemete sahiptirler ve ısıtılma ile sertleştirilme kabiliyetleri oldukça yüksektir. İşlenme, şekil alma ve kaynak kabiliyetleri düşük olduğu gibi en az uzama gösteren çelikler de bunlardır. Sert olmalarından kaynaklı işlenebilirliği az olan bu çelikler daha çok yüksek aşınma direnci ve mukavemet gerektiren yerlerde kullanılırlar. Özellikle kalıp ve takımların üretiminde kullanılan yüksek karbonlu çelikler; kesme aparatları, jilet, testere, zimba, greyder bıçağı, yüksek dayanımlı kablolar, şaft, mil, ege, keser, cıvata, somun, spiral ve yaprak yayların yapımında kullanılmaktadırlar.
- Düşük Alaşımlı Çelikler: İçerisinde toplamda % 5'ten az alaşım elementi bulunduran çeliklerdir. Makine parçaları ve yapı çeliği üretiminde elverişlidirler.
- Yüksek Alaşımlı Çelikler: Alaşım elementlerinin toplamı %5'ten fazla olan çeliklerdir ve özel amaçlarla kullanılmaktadırlar (Yıldız 2013).

Alaşımlandırma sırasında kullanılan bazı elementlerin çeliğe kazandırdıkları özellikler şu şekildedir:

- 1) Karbon, çeliğin sertlik ve çekme dayanımını artırırken dövme ve kaynak kabiliyetini düşürmektedir.
- 2) Krom, çeliğin korozyon direncini, sertliğini ve aşınma direncini artırır, yüksek sıcaklıklardaki dayanımı sağlar.
- 3) Nikel, sünekliği azaltmadan çeliğin dayanımını artırır.
- 4) Mangan, dövme ve kaynak kabiliyetini artırırken karbon miktarına bağlı sertlik sağlar.
- 5) Silisyum, çelik üretim aşamasında oksijen giderici olarak kullanılır.

- 6) Alüminyum, ısıtıl işlem ve şekillendirme sırasında tane büyüklüğünü kontrol amaçlı kullanılır.
- 7) Bakır, korozyon direncini, çekme ve akma dayanımını artırdığı çeliğin elastikliğini azaltmaktadır (Yılmaz 2013).

Günümüzde tahminen 2000 civarı çelik türünün olduğu bilinirken doğru malzeme seçebilmek için de birçok çelik norm ve simgeleri vardır. Çelikler için kullanılan bazı standartlar şu şekildedir; AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü), SAE (Otomotiv Mühendisleri Birliği), ASTM (Amerikan Malzeme Test Birliği Standartları), ISO (Uluslararası Standartlar Organizasyonu), DIN (Alman Standartları Enstitüsü), TSE (Türk Standartları Enstitüsü) gibi (Yılmaz 2013).

2.3.4 Galvanizli Çelikler

Endüstrilerde korozyona karşı direnci yüksek malzeme kullanımı giderek önem kazanırken bu alanda çeşitli araştırmalar yapılarak yeni yöntemler geliştirilmektedir. Yaygın bir kullanım alanı olan çelik malzemelerde de farklı teknikler kullanılarak korozyona karşı dayanımları artırılmak istenmektedir. Alaşım elementi eklenerek dirençli hale getirilen çeliklere en güzel örnek paslanmaz çeliklerken, yüzeyin bir tabaka ile kaplanarak korozyonun önlenmeye çalışılmasına ise galvanizli çelikler örnek olarak gösterilebilir (Vural 1992).

Karbonlu çeliklere eklenen alaşımlar, çeliğin yorulma sınırını ve çekme dayanımını önemli ölçüde artırırken korozyona karşı dayanımında görülen belirgin bir iyileştirme etkisi yoktur. Bu sebeple galvaniz kaplı saclar, düşük karbonlu sacların kaplanmasıyla yapılmaktadır (Akkuş 2006).

Galvanizleme uygulamalarında çeliğin bileşimi değiştirilmeden yüzeyine korozyona dayanıklı bir tabaka oluşturulmaktadır. Bunu uygulama yöntemlerinden biri, erimiş çinko banyosuna yüzeyi temizlenen çelik sacın daldırmasıdır. Daha ince çinko kaplamaların istendiği durumlarda, giderek kullanım alanı da artan, elektroliz yöntemi kullanılmaktadır. Difüzyon esaslı kaplama yönteminde ise toz haline getirilen çinko metali, yüksek sıcaklıklarda çelik üzerine uygulanır ve kaplama işlemi gerçekleştirilir. Kaplamanın kalın olması istendiğindeyse metal püskürtme yöntemi denilen ve eriyik

haline getirilen kaplama metalinin özel bir üfleç ile esas metale püskürtülmesi işlemi kullanılmaktadır (Aydın ve Gülenç 2003).

Metalik kaplama için çeşitli teknikler kullanılırken bu işlem sırasında iki önemli hususa dikkat edilmektedir. Bunlardan biri, kaplama yapılan metalin mekanik olarak korozyon ortamdan yalıtılması, diğeri ise esas tabaka ile kaplama arasındaki galvanik ilişkidir. Eğer kaplama için kullanılacak metalin galvanik özelliği daha yüksek ise esas metal kaplama sırasında katodik durumda olur ve korunur. Çelik metalini kaplamada çinko ve kadmiyum, galvanik koruma sağlayan iki örnektir (Aslanlar 1999).

2.3.5 Otomotiv Endüstrisinde Galvanizli Çelikler

Günümüzde devamlı gelişim halinde olan otomotiv endüstrisinde özellikle dayanım, mukavemet, ucuzluk ve hafiflik parametreleri üzerinde durulmaktadır. Önceki yıllarda sadece düşük karbonlu çeliklerin kullanıldığı otomotiv sektöründe elde edilen gelişmelerle beraber artık korozyona karşı direnci artırılan galvanizli çelik sac lar kullanılmaktadır. Özellikle çamurluk ve otomobilin alt kısmında bulunan ekipmanlarda korozyona karşı dayanıklılık daha önemli olduğu için galvanizli çelik sac lar tercih edilmektedir (Llewellyn 1992).

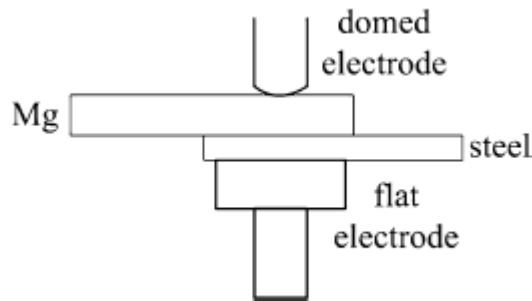


Resim 2.5 Otomobil alt kısmında galvanizli çelik kullanımı (İnt.Kyn.4).

2.3.6 Galvanizli Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Galvanizli çeliklerde kaynak gereksinimleri galvaniz işlemi yapılmamış çeliklerdeki ile aynıdır. Kaynak uygulamasında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta galvanizleme için kullanılan çinkonun yüksek sıcaklıklarda buharlaşmasıdır. Bu durumda malzemenin yüzeyi korumasız kalır ve oksitlenmeye açık hale gelir. Bu sorunu gidermek için oksitlenme sebebiyle oluşan asit buharını ortamdan uzaklaştırmak ve kaynak hızını düşük seçmek gerekmektedir. Galvanizli çelik saclar için en ideal kaynak yöntemi elektrik punta direnç kaynağıdır (Oğuz 2018).

Lıu ve arkadaşları (2010), 1,5 mm çinko kaplı DP600 çelik levhaların çift rulo döküm AZ31B Mg alaşımı ile punta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. 25x100 mm ebatlarındaki numuneleri aseton içinde ultrasonik olarak 5 dk bekletmişlerdir. Ayrıca magnezyumun oksit tabakasını en aza indirmek için %2,5 kromik asit çözeltisi ile temizlemişlerdir. Deneylerde Şekil 2.14'te gösterildiği gibi; magnezyum tarafında küre çaplı elektrot kullanılırken çelik tarafında düz yüzeyli elektrot kullanılmıştır.



Şekil 2.14 Punta kaynağı için numune ve elektrotların şematiği.

Kaynak akımı 4.0 kN ve kuvveti de 20 kA olarak seçilmiş ve sabit tutulmuştur. Kaynak süresi ise 1'den 16 periyota (saniyede 60 periyot) kadar değiştirilerek kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak bağlantı yerleri incelendiğinde dıştan merkeze doğru bölgelere ayrıldığı görülmüştür. Şekil 2.15'te gösterilen bölgelerden bölge II çinko bazlı dolgu malzemesinin ana metallerle olan lehimlenmesi, bölge III magnezyumun çeliğe katı halde bağlanması ve bölge IV ise kaynağın merkezinde magnezyumun çeliğe kaynak lehimleme ile birleştirilmesidir.

Kaynak numunelerinin kesitleri incelendiğinde çatlak yüzeylerin çapının kaynak süresiyle arttığı ve 8 periyottan sonra sabitlendiği görülmüştür. Erime bölgesinin çapının ise 16 periyota kadar artmaya devam ettiği belirlenmiştir. Çeliğin elektriksel iletkenliği magnezyumdan çok daha düşük olduğu için çelik tarafındaki ısı üretimi daha yüksektir ve akım yoğunluğunu azaltmak için düz bir elektrot tercih edilmiştir. Bu sayede çelik levhaların sıcaklığı erime noktasının altında tutulmuş ve kaynak süresi 16 döngü olsa bile çelik tarafında girinti meydana gelmediği saptanmıştır.

Akkuş (2006), östenitik paslanmaz çelik sac ve galvanizli çelik sacların nokta direnç kaynağı üzerine çalışma yapmıştır. Hem aynı numuneleri kendi arasında hem de farklı numuneleri kaynakla birleştirmiş yorulma davranışlarını incelemiştir. Deneylerde 0,93 mm kalınlığında düşük karbonlu galvanizli çelik saclar ve 1,03 mm kalınlığında AISI 304 östenitik kromlu paslanmaz çelik saclar kullanılmıştır. Numuneler standartlara uygun kesildikten sonra %96 saflıktaki etil alkol ile yıkanmıştır. Nokta direnç kaynağı işlemi sırasında elektrot kuvvetleri, kaynak yapılacak numune çiftine göre belirlenmiştir. Bu kuvvetler; galvanizli saclarda 280 kg, galvanizli çelik ve östenitik çelik saclarda 340 kg, östenitik sacların kaynağında ise 450 kg olarak seçilmiştir. Ayrıca her çift için ayrı çekirdek çapı belirlenmiş (4,5 ve 6 mm) ve bu değerlere ulaşana kadar farklı kaynak akımlarında bir dizi deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kaynak akımının artmasıyla çekirdek çapının arttığını ve buna bağlı olarak yorulma ömürlerinin arttığını saptamıştır. Yorulma ömrü en yüksek olan kaynak çifti galvanizli sacların kendi arasındaki kaynak bağlantısında olurken yorulma sınırı en düşük olan çift ise paslanmaz çelik sac ve galvanizli sac arasındaki kaynakta meydana gelmiştir.

Oğuz (2018) ise yaptığı çalışmada paslanmaz çelik ve galvanizli çelik sacların elektrik nokta direnç kaynağı parametrelerinin mikroyapı ve dayanım üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneylerde 1 mm kalınlığında galvaniz kaplı çelik, 304 kalite östenitik ve 430 kalite ferritik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Numuneler 30x100 mm ebatlarında kesilerek yüzeyleri alkollü bir bezle temizlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında elektrot kuvveti sabit tutulurken kaynak süresi ve kaynak akımı kademeli olarak artırılmıştır. İşlemlerin sonucunda yapılan incelemelerde, düşük akım şiddetinde kaynak çekirdeği kesitinin küçük olduğu ve dayanıklılığın daha az olmasından kaynaklı ayrılma kopması gözlenmiştir. Akım şiddetinin kademeli artırılmasıyla önceleri numunelerde düğme şeklinde kopma oluşurken daha yüksek akımlarda yırtılma şeklinde kopma meydana

gelmiştir. Ayrıca akım şiddetinin artmasıyla yüzeylerde fışkırmalar artmıştır. Çekme-makaslama dayanımları incelendiğinde ise dayanımı en yüksek olan malzeme çifti 304 kalite paslanmaz çelik saclar olurken, en düşük dayanım galvanizli çelik sacların kaynağında olmuştur. Analizler sonucunda ayrıca, kaynak süresinin artmasıyla artan ısı girdisinin çekme makaslama dayanımını artırdığı saptanmıştır.

2.4 Kaynak ile Birleştirme

2.4.1 Kaynak ve Başlıca Kaynak Yöntemleri

Kaynak ile birleştirme yöntemi çok eski zamanlardan beri yaygın şekilde uygulanan bir yöntemdir. Prensip olarak kaynak; parçaların yeterli ısı, basınç veya her ikisine maruz bırakılarak, ilave malzemeli ya da malzemesiz birleştirilmesi işlemidir.

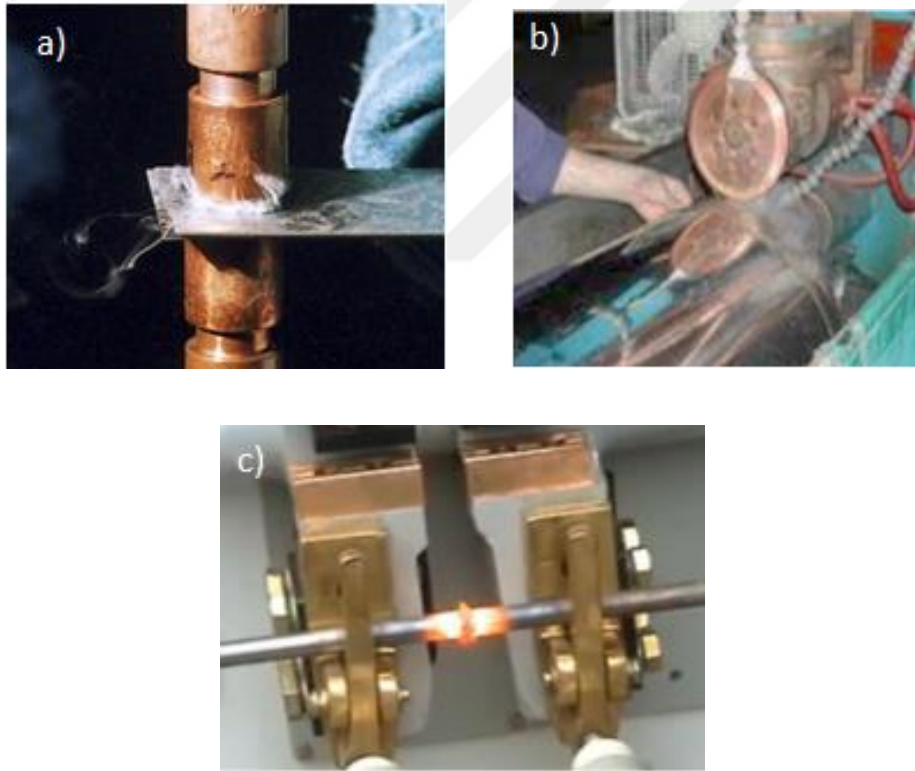
Günümüz endüstrisinde, kullanım alanlarına ve amaçlarına göre duyulan ihtiyaç doğrultusunda birbirinden farklı kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; kaynak yapılan malzeme cinsine, kaynak işleminin maksadına ve kaynağın uygulanış şekline göre çeşitli bakımlardan sınıflandırılmaktadır. Genel olarak kaynak yöntemlerini şu şekilde sınıflandırmak mümkündür (Bal 2011):

- Ark Kaynağı
 - Elektrik Ark Kaynağı
 - Mig/MAG Kaynağı
 - Tig Kaynağı
 - Özlü Telle Ark Kaynağı
 - Plazma Kaynağı
 - Saplama Kaynağı
- Oksi-Yanıcı Gaz Kaynağı
 - Oksi-Asetilen Kaynağı
 - Gaz-Basınç Kaynağı
- Direnç Kaynağı
 - Direnç Nokta (Punta) Kaynağı
 - Direnç Dikiş Kaynağı
 - Alın Kaynağı
- Katı Hal Kaynağı
 - Dövme Kaynağı
 - Soğuk Basınç Kaynağı
 - Sürtünme Kaynağı
 - Ultrasonik Kaynağı
 - Patlama Kaynağı
 - Haddeleme Kaynağı
- Birleşik Yöntemi
 - Termit Kaynağı
 - Lazer Işın Kaynağı
 - Yakma Alın Kaynağı
 - İndüksiyon Kaynağı
 - Elektron Işın Kaynağı

Kaynak yapılırken yeterli ısı-basınç dışında dikkat edilmesi gereken diğer hususlar metalin temizlenmesi ve metalurjik etkilerden korunması için gerekli ortam koşullarıdır. Bunun için gerekli durumlarda koruyucu gazlar kullanılabilir. En yaygın argon gazı kullanılırken bazı özel hallerde helyum gazı da koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır.

2.4.2 Nokta (Punta) Direnç Kaynağı

Basınç kaynağı çeşitlerinden olan direnç kaynağı Resim 2.6’da gösterildiği üzere punta, dikiş ve alın direnç kaynağı olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe geniş kullanım alanıyla önemli yere sahip olan punta direnç kaynağı, güncel çalışmalarla geliştirilmeye devam etmektedir.



Resim 2.6 Bazı direnç kaynağı uygulama çeşitleri a)Punta b)Dikiş c)Alın (MEB, 2012).

Direnç nokta kaynağı 1877 yılında Amerika’da tesadüfen bulunmuş ve oldukça tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle fazla kalın olmayan sacların birleştirilmesinde kullanılan punta direnç kaynağının seri üretime uygun olması da tercih edilme sebeplerindendir. Kullanım yeri ve amacına göre seyyar, robotik, pres tipi ve çoklu

kaynak gibi çeşitlerde üretilen punta direnç kaynağı makineleri Resim 2.7’de gösterilmiştir. Yerinde kaynak yapmak için seyyar yani el punta makinesi kullanılırken malzemenin sabit olmadığı durumlarda ayaklı punta makinesi tercih edilmektedir. Zamandan tasarruf sağlayan robotik punta kaynak makineleri ise özellikle otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bir otomobilde bulunan yaklaşık 5000 adet nokta kaynağını robotik makinelerle saniyeler içinde yapmak mümkündür. El (seyyar) punta kaynak makineleri ise imalat sırasında çalışma esnekliği sağlamaktadır.

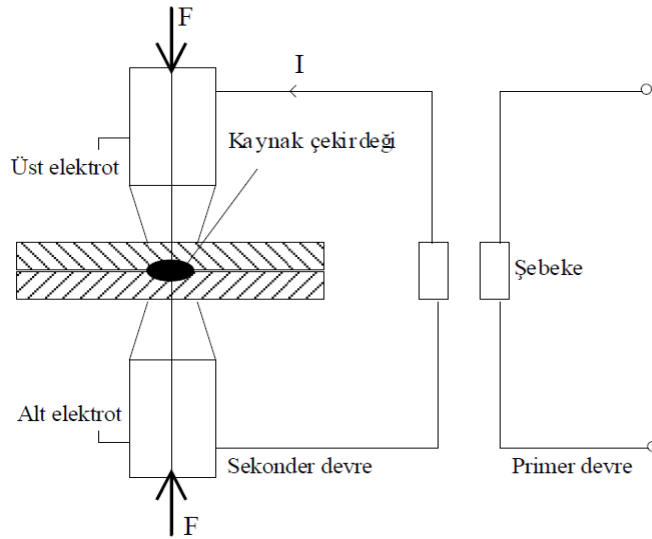


Resim 2.7 Punta direnç kaynak makine çeşitleri **a)** Seyyar tip (İnt.Kyn.5) **b)** Robot kollu (İnt.Kyn.6) **c)** Pres tipi (İn.Kyn.5) **d)** Çoklu kaynak (İnt.Kyn.7).

Tez çalışmamızda Şimşek marka pres tipi kaynak makinesi kullanılmıştır.

Pres tipi kaynak makinelerinde, üst elektrotu taşıyan kafa kızaklar üzerinde dikey ve doğrusal hareket ederken alt elektrotu taşıyan kol dikey hareket etmektedir. Üst elektrotu taşıyan kafanın hareketi hidrolik silindir ve hava ile sağlanmaktadır (Aslanlar 2016).

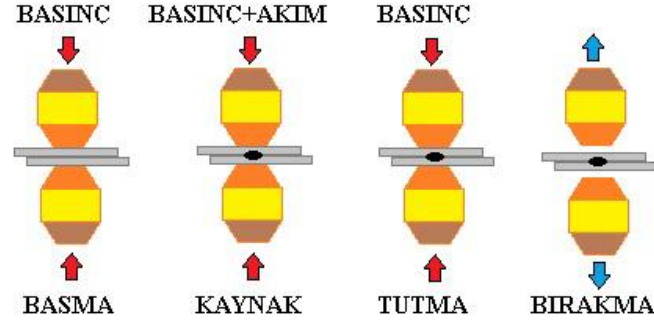
Kaynak makineleri elektrik devresi, kontrol cihazı ve mekanik kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan elektrik devresi ise akım ileten elektrotları, yüksek şebeke akımını düşüren transformatörü, primer sargı sayısını değiştiren anahtarı ve sekonder devreyi kapsamaktadır (Tezcan 2017).



Şekil 2.15 Elektrik nokta direnç kaynağı prensibi (Anık 1983).

İdeal bir kaynak işleminde, akım şiddeti ve kaynak süresi kombinasyonu uygun şekilde belirlenmeli, kullanılan elektrotlar ve bu elektrotların uyguladığı kuvvetler doğru seçilmelidir. Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilen elektrik nokta direnç kaynağında prensip; kaynak yapılacak plakaları tutan elektrotlardan geçirilen elektrik akımı, malzemenin direnciyle karşılaşır ve ısıya dönüşür. Bu direnç, elektrotlarla malzeme arasında olduğu gibi aynı zamanda malzemeler arasında da vardır (Alcini 1990). Baskı ve ısıyla, bir veya daha fazla noktadan birleştirilen plakalarda kaynak işlemi gerçekleşmiş olur. Yüksek akım şiddeti ile elektrotların plakaya temas yüzeyindeki karşılaşılan direnç ile malzeme ertilir ve kaynak çekirdeği oluşur. Kaynak süresinin ardından elektrik akımı kesilir ve plakalar hızla soğur ve katılaşır. Hala tutmaya devam eden elektrotlar ise

bir süre sonra plakaları serbest bırakır. Birbirini takip eden bu aşamalar Şekil 2.16’da görüldüğü gibi dört adımda meydana gelmektedir (Jawad vd. 2012).



Şekil 2.16 Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları (Akyol 2001).

1. Basma Zamanı: Elektrotların iki plakaya sıkıp kuvvet uygulamasıyla başlayıp akım verilene kadar geçen süredir
2. Kaynak Zamanı: Birleştirilen plakalara düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde uygulanana akımın süresidir.
3. Tutma Zamanı: Elektrotların uyguladığı kuvvet devam ederken elektrik akımının kesildiği bu süreçte plakalar soğutulur ve katılaşır.
4. Bırakma Zamanı: Tutma zamanının bitimiyle elektrotların ayrılarak plakalarla teması bitirdiği zaman aralığıdır. Bir sonraki nokta kaynağının basma zamanına kadar bu süreç devam eder (Esendir 2009).

Nokta direnç kaynağı işleminde kaynak kalitesini etkileyen başlıca değişkenler şunlardır:

-Elektrot malzemesi, yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip, düşük temas direncinde ve kaynak kuvvetine karşı mukavemetli olmalıdır. Elektrot kuvveti de akım geçişini değiştirdiği için kaynak kalitesini etkilemektedir (Aslanlar 2016).

-Kaynak akımının küçük seçilmesi ısıtılan bölgenin genişlemesine sebep olurken, fazla seçilen kaynak akımı da ark ve çatlaklara sebep olmaktadır (Akyol 2001).

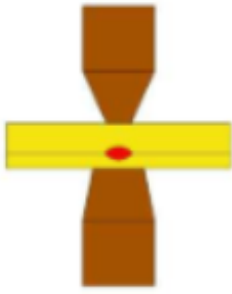
-Kaynak zamanı ile ısı doğru orantılı olduğundan, kısa süreli kaynaklarda malzemeler tutunamayabilirken uzun süreli kaynakta da malzemede deformasyon oluşabilir (Yavuz 2015).

-Isıl iletkenliği fazla olan malzemelerde ergime oluşumu az olduğundan punta direnç kaynağı kabiliyeti daha düşük olmaktadır (Hayat 2005).

-Kaynak yapılacak malzemelerin yüzeylerinin temizlenmesi hem kaynak kalitesini artırır hem de elektrotlarda oluşabilecek oksit ve pas tabakasını azaltır. Ayrıca malzemenin öz direnci de kaynak kalitesini etkileyen bir diğer parametredir (Esendir 2008).

Otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak, beyaz eşya, çelik yapı ve elektronik endüstrisi gibi pek çok sektörde punta direnç kaynağı kullanılmaktadır (Esendir 2008). Özellikle bindirme bağlantılarının gerektiği, sızdırmazlığın aranmadığı durumlarda tercih edilen direnç nokta kaynağıyla, 3 mm kalınlığına kadar olan sac lar rahatça kaynaklanabilmektedir. Çelik, alüminyum, bakır, magnezyum ve bunların alaşımlarında direnç nokta kaynağı yapılmaktadır (Uijl 2010).

Punta kaynak makinesi ile aynı kalınlık ve özellikteki malzemelerin kaynaklanması sırasında ısı dengeli dağıldığı için kaliteli bir kaynak işlemi yapılabilmektedir. Ancak



punta kaynak makinesi ile farklı özellik ve kalınlıktaki malzemeler de kaynaklanabilmektedir. Bu işlem sırasında malzemelerin elektriksel dirençleri farklı olduğundan istenilen kalitede kaynak elde edilebilmesi için elektrotların malzemesi ve şekli uygun seçilmelidir. Farklı kalınlıklardaki malzemelerin punta kaynak ile kaynaklanması Şekil 2.17’de gösterilmiştir (Anonim, 2012).

Şekil 2.17 Farklı kalınlıkta malzemelerin punta direnç kaynağı.

Nokta direnç kaynağı, hızlı sonuç verdiği ve otomasyona uygun olduğu için diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha çok tercih edilmektedir (Marashi vd. 2007). Diğer tercih sebeplerinden bazıları ise üretim proseslerine entegre edilebilmesi ve fazla tecrübe gerektirmemesidir. Ayrıca, birleştirme işleminden sonraki süreçlerde de bakım ve onarım için sökmenin gerekli olmadığı durumlarda kullanılması hem daha hızlı hem de ekonomik olmaktadır (Uijl 2010).

2.5 Kaynakta Koruyucu Gazların Etkisi

Kaynak uygulamalarında özellikle kaynak bölgesinin kalitesini artırmak için koruyucu gazlar kullanılmaktadır. Koruyucu gazlar kaynak sırasında ark kararlılığını, birleşme derinliğini, yüzey görünümünü, maliyeti ve insan sağlığını etkilemektedirler. Özellikle

ark kaynağında kullanılan koruyucu gazlar; inert (pasif), aktif ve indirgeyici olmak üzere temelde üç grupta toplanırlar. İnert gazlardan en önemlileri argon ile helyum, aktif gazlardan önemlileri ise karbondioksit ile oksijenken hidrojen de önemli bir indirgeyici gazdır (Sevim 2017).

Argon (Ar) gazı havadan ağır inert bir gazdır. Tek başına veya başka gazlarla (helyum, karbondioksit, oksijen, hidrojen gibi) karışım olarak kullanılmaktadır. Özellikle alüminyum, magnezyum, nikel ve alaşımlarının kaynağında argon gazı kullanılırken, sac kalınlığı 3mm'den büyük durumlarda ise argon gazı helyum ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Yaptığımız bu çalışmada oksitlenmeyi önlemek amacıyla ortamdaki oksijen gazını sıfırlayabilmek için argon gazı kullanılmıştır.

Helyum (He) gazı ise kaynak birleşme derinliğini artıran havadan hafif olan inert bir gazdır. İnert gazlar dışındaki gazlar oksitleyici özelliğe sahiptir (Palani ve Murugan 2006).

Aktif gazların en önemli özelliği oksitleyici özellikte olmalarıdır. Karbondioksit hem tek başına kullanılırken hem de karışım gazı olarak en çok tercih edilen gazdır. Oksijenin ise diğer gazlarla karışım olarak kullanılması sınırlıdır.

Mukhopadhyay ve Pal yaptıkları çalışmada; düşük alaşımlı ve mukavemeti yüksek (HSLA) çeliği, argon, karbondioksit ve oksijen koruyucu gazlarını kullanarak masif ve özlü telle ark kaynağı ile birleştirmiş ve koruyucu gazdaki oksijen ve karbondioksit içeriğinin mikroyapı bileşenlerini etkilediğini bulmuşlardır.

Liao ve Chen (1998), MIG kaynağı ile östenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde argon koruyucu gazına farklı miktarlarda karbondioksit ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada karbondioksit miktarının artmasıyla sıçrama miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Ebrahimnia ve arkadaşları (2009), koruyucu gaz karışımlarının St37-2 çeliğine etkileri üzerine etkisini araştırmak için argon gazına farklı oranlarda karbondioksit gazı eklemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre karışımdaki karbondioksit gazının artmasıyla kaynak metalinin sertliği ve gözeneklilik azalmıştır.

3.MATERYAL VE METOD

3.1 Genel

Yapılan literatür araştırmalarında, magnezyum alaşımların punta kaynaklı birleşimleri için yeterli çalışma bulunmadığı için yaptığımız punta kaynak deneylerinde kullanılmak üzere AZ31B magnezyum alaşımı ve 1314 galvanizli çelik sac seçilmiştir. Kimyasal özellikleri ve kaynak kabiliyetleri bakımından birbirinden farklı olan bu malzemelere punta kaynak ile birleştirme işlemi uygulanarak, çekme deneyleri, mikro yapıları ve sertlik değerleri elektron mikroskopunda incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca magnezyum alaşımlara benzer özelliklere sahip ve otomotiv sanayinde yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarla karşılaştırma yapabilmek için AA1050 serisi alüminyum alaşımı ve 1314 galvanizli çelik saclara da punta kaynak uygulanarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Deneylerde kullanılan AZ31B Magnezyum alaşımın kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve 3.2’de, Erdemir 1314 Galvanize çeliğin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3 ve 3.4’te, AA1050 Alüminyum alaşımın kimyasal ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 AZ31B Magnezyum alaşımın kimyasal bileşimi (Çelik vd. 2021).

Kimyasal Bileşim AZ31B (%)							
Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
3,2	0,42	1,03	0,019	0,0008	0,0006	0,0020	Denge

Çizelge 3.2 AZ31B Magnezyum alaşımın mekanik özellikleri (Çelik vd. 2021).

Mekanik Özellikler AZ31B			
Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik HV
174	258	15	76

Çizelge 3.3 Erdemir 1314 Galvanize çeliğin kimyasal bileşimi (Baydemir 2023).

Standart Karşılığı		Erdemir Kalite No	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Ti max.
Standart	Kalite							
EN10346	DX54D+Z	1314	0.12	0.50	0.60	0.10	0.045	0.30

Çizelge 3.4 Erdemir 1314 Galvanize çeliğin mekanik özellikleri (Baydemir 2023).

Standart Karşılığı		Erdemir Kalite No.	Garanti Süreleri		Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %
Standart	Kalite		Mekanik Değerler	Akma İzi Oluşmaması			
DIN EN 10346	DX54D+Z	1314	6 Ay	6 Ay	120-220	260-350	36

Çizelge 3.5 AA 1050 Alaşımın kimyasal bileşimi (İnt.Kyn.8).

Kimyasal Bileşim AA 1050 H111 (%)								
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Diğerleri	Al
0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,15	Denge

Çizelge 3.6 AA 1050 Alaşımın mekanik özellikleri (İnt.Kyn. 8).

Mekanik Özellikler AA 1050 H111			
Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik HV
20-35	65-80	38	67

3.2 Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada deney malzemesi olarak; soğuk haddelenmiş, ticari, 2 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımı, 1,5 mm kalınlığında Erdemir 1314 düşük karbonlu galvanizli çelik ve 1,5 mm kalınlığında AA1050 serisi alüminyum alaşım sac kullanılmıştır. Çelik malzemenin ince seçilmesiyle ısı akışının artması hedeflenmiştir. Kullanılmak üzere hazırlanan malzemelerin kimyasal ve mekanik özelliklerini kontrol etmek için analizler yapılmıştır. Seçilen magnezyum alaşımın analiz sonuçları internetten alınmış, galvanize çelik ve alüminyum alaşımın analizi ise Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM)’nde Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) cihazında belirlenmiştir. Numunelerin analizlerinden elde edilen kimyasal sonuçlar Çizelge 3.7, 3.8 ve 3.9’da gösterilmiştir. Alınan bu verileri, bir önceki başlıkta belirtilen literatür bilgileriyle karşılaştırıldığında benzer oranlarda olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.7 AZ31B magnezyum alaşımlı numunenin kimyasal analizi (Luo vd. 2014).

Malzeme	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Sn	Cu	Mg
AZ31B	2,9	1,1	0,3	0,019	0,002	0,0015	0,0008	95,72

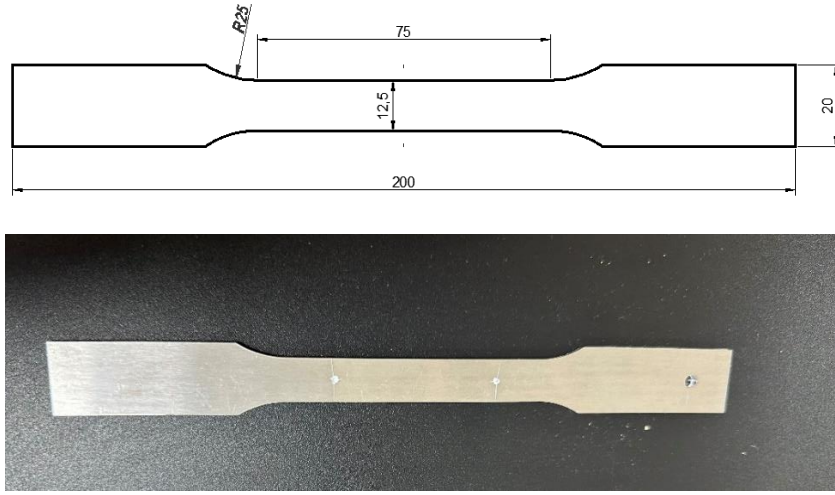
Çizelge 3.8 Erdemir 1314 Galvanize çelik numunenin kimyasal analizi.

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Nb%
Rapor	<0.001	<0.001	0.068	0.010	0.016	0.006	<0.002	<0.002	0.010
	Al%	Cu%	Co%	B%	Ti%	V%	W%	Sn%	As%
Rapor	0.136	0.024	<0.002	0.0008	0.035	0.008	<0.005	<0.001	<0.005
	Ca%	Mg%	Ce%	La%	Pb%	Sb%	Te%	Zr%	Fe%
Rapor	0.0011	<0.0005	0.034	<0.005	<0.002	<0.005	<0.001	<0.001	99.641

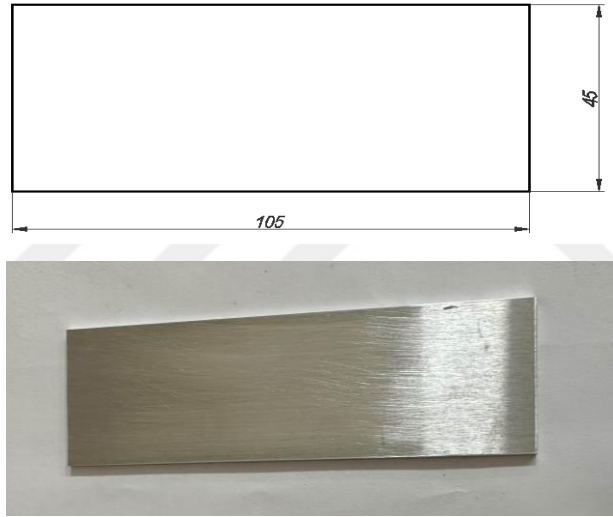
Çizelge 3.9 AA1050 Serisi alüminyum alaşımlı numunenin kimyasal analizi.

	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ni%	Ti%
Rapor	0.062	0.240	0.018	0.007	<0.0001	<0.001	0.01	0.037	0.014
	V%	Pb%	Sn%	Sr%	Be%	Ca%	Co%	B%	Ag%
Rapor	0.018	0.018	0.006	0.0001	0.002	0.0007	<0.0005	<0.0001	<0.0005
	Bi%	Ga%	Sb%	P%	Zr%	Al%			
Rapor	0.0043	0.025	0.008	0.006	<0.005	99.521			

Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için yapılacak olan çekme testlerinde kullanılmak üzere TS EN ISO 6892-2 uluslararası standardına uygun numuneler kestirilmiştir. Ayrıca sac levhalarda hadde yönünün etkisini gözlemleyebilmek için çekme testi numuneleri hadde yönünde, hadde yönüne 45° açıyla ve hadde yönüne dik şekilde kestirilmiştir. Numunelerin ayırt edilebilmesi için hadde yönüne dik olan numunelere tek delik, hadde yönüne 45° açıyla kesilen numunelere çift delik delinmiş ve hadde yönünde kesilen numunelere delik delinmemiştir. Punta kaynak işleminde kullanılacak numuneler ise TS EN ISO 14273 uluslararası standardına göre kesilmiş şekilde temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak numunelerin boyutları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 TS EN ISO 6892-2 Standardına göre hazırlanmış çekme deneyi numunelerinin boyutları.



Şekil 3.2 TS EN ISO 14273 Standardına göre hazırlanmış nokta kaynak deneyi numunelerinin boyutları.

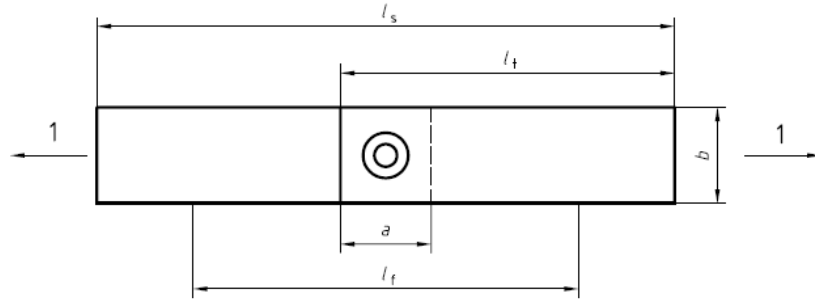
3.3 Numunelerin Nokta Direnç Kaynak ile Birleştirilmesi

Magnezyum alaşımlı numunelerin galvanizli çelik sacarla olan punta direnç kaynaklı birleşim işlemleri için, sabit kaynak süresi ve sıkıştırma süresinde farklı kaynak akımları belirlenerek, her bir parametre için yeterli sayıda numune temin edilmiştir. Kaynak işlemi öncesinde, numunelerin yüzeylerinde bulunan ve kaynak kalitesini olumsuz yönde etkileyecek çapak, kir, yağ, oksit gibi maddeler 400, 800 ve 1200 mesh'lik zımpara ve aseton ile temizlenmiştir.

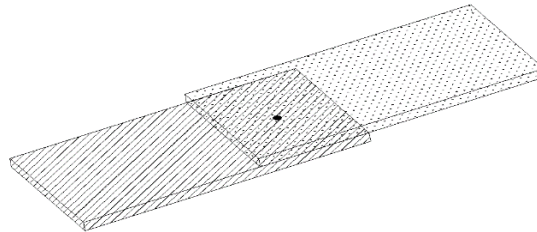
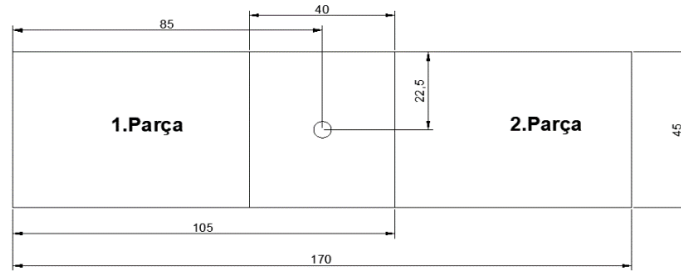
Çizelge 3.10’da verilen TS EN ISO 14273 standardına göre 45x105 mm ebatlarında hazırlanan ve temizlenen levhalar, yine aynı standarda göre Şekil 3.3’te gösterildiği gibi bindirme pozisyonunda kaynak yapılabilmesi için uygun mesafeler belirlenip işaretlenmiştir.

Çizelge 3.10 TSE EN ISO 14273 Standart ölçü değerleri.

Test Tipleri	Kalınlık T	Üst Üste Binme Mesafesi a	Genişlik b	Toplam Uzunluk ls	Saclar Arasındaki Serbest Uzunluk Lf	Her Bir Sac Uzunluğu lt
1	$0,5 \leq t \leq 1,5$	35	45 (30)	175	95	105
2	$1,5 \leq t \leq 3$	46	60 (30)	230	105	138
3	$3 \leq t < 5$	60	90 (55)	260	120	160
4	$5 < t \leq 7,5$	80	120 (80)	300	140	190
5	$7,5 < t \leq 10$	100	150 (100)	320	160	210



Şekil 3.3 TSE EN ISO 14273 Standardına göre birleştirilmiş kesme deneyi numune örneği.



Şekil 3.4 Nokta direnç kaynak numunesi çifti ve kaynak pozisyonu görünüşleri.

Deneylerde Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan Şimşek Kaynak Makine San. Ve Tic. Ltd. Şti marka nokta direnç kaynak makinesi kullanılmıştır. Bu kaynak makinesinde elektrot baskı kuvveti, kaynak süresi ve kaynak akımı gibi kaynak parametreleri ayarlanabilmektedir. Kaynak işlemlerinde kullanılan punta direnç kaynağı makinesinin görüntüsü Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 AKÜ Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan nokta direnç kaynak makinesi.

Kaynak işlemi sırasında kullanılan elektrotlar, bakır malzemeden üretilmiş 6 mm çapında bombeli olarak tercih edilmiştir. Her 5 kaynak işleminden sonra elektrot ucu zımpara ile temizlenmiştir. Deneyler esnasında elektrot basma kuvveti, sıkıştırma süresi ve kaynak süresi sabit tutulurken kaynak akımı kademeli olarak artırılarak uygulanmıştır. Ancak normal oda koşullarında yapılan deneylerde magnezyum alaşımın hızlı oksitlenmesinden dolayı kaynak işlemi sağlıklı yapılamamıştır. Kaynak akımının kademeli olarak artırılarak yapıldığı kaynak işleminde ara ara bazı değerlerde birleşmenin olmadığı, bazılarında ise oksitlenmeden kaynaklı elektrot ucunun numuneye yapıştığı gözlenmiştir. Bu görseller Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Normal oda koşullarında yapılan punta kaynak kusurları.

Normal oda koşullarında magnezyum alaşımın hızlı oksitlenmesinden dolayı punta kaynak işleminden istenilen sonuçlar alınamamıştır. Yapılan literatür araştırmalarında ara katman olarak farklı metaller kullanılarak kaynak işlemi yapılmış ancak oksijensiz ortamda punta kaynak yapılmasıyla alakalı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada oksijensiz ortam oluşturularak bu şartlarda punta kaynağı uygulaması çalışılmıştır.

Kaynak yapılacak ortamın oksijenini kesmek için, punta kaynak makinesinin boyutlarına uygun 5 mm şeffaf pleksiglas levhalar kestirilmiştir. Yaptırılan levhalar Resim 3.1’de gösterildiği gibi cihaza monte edilmiş ve kabin tamamlanmıştır. Kabinin içerisine tüm numuneler, zımpara, aseton ve yedek bakır elektrot uçları düzenli olarak yerleştirilerek sızdırmazlık sağlanacak şekilde kapatılmıştır. İçeride deneyleri ergonomik şekilde yapabileceğimiz uzunluktaki yanmaz eldivenler de kabindeki yerlerine sıkı bir şekilde montaj yapılmıştır. Zımpara ve asetonla yüzey temizliği kabinin içerisinde yapılarak oksitlenme riskinin önüne geçilmiştir. Ayrıca elektrot uçları da yine her 5 kaynak işleminden sonra zımpara ile temizlenmiştir.



Resim 3.3 Kabin montajı yapılan nokta direnç kaynak makinesi ve birleştirilen numune.

Montajı tamamlanan kabinin sızdırmazlığı sağlandıktan sonra içerisine argon gazı verilerek içerideki oksijen giderilmeye çalışılmıştır. Argon gazı havadan ağır olduğu için argon gazı tüpünden gelen hortum kabinin en alt noktasına bırakılmış, oksijenin ortamdan uzaklaştırılabilmesi için kabinin üst kısmına hortum bırakılmıştır. Gaz seviye ölçüm cihazının probu kabine uygun şekilde montaj yapılmış ve ölçülen değerleri gösteren ekran ile kabinin oksijen seviyesi ölçülmüştür. Kabinin içindeki oksijen değerinin sıfırlandığı zaman kaynak işlemine başlanmıştır, sırasıyla zımpara ve aseton ile yüzey temizlendikten sonra kaynak işlemleri yapılmıştır. Gaz seviye ölçüm cihazı Resim 3.4'te gösterilmiştir.



Resim 3.4 Gaz seviye ölçüm sensörü.

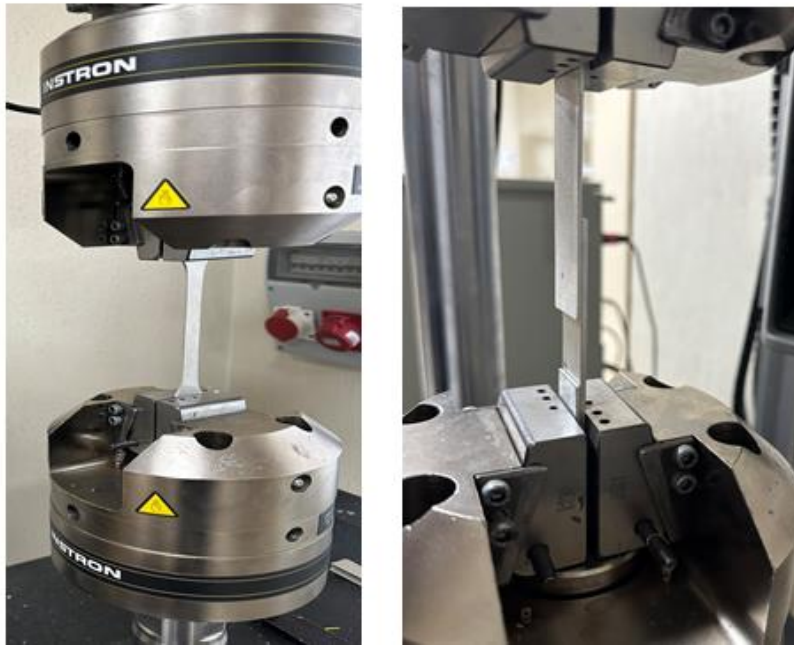
Kaynak işleminin tamamı argon gazı verilerek oksijen seviyesi takip edilerek yapılmıştır. Yapılan kaynakların parametreleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.11 Oksijensiz ortamda yapılan kaynak parametreleri.

Elektrot Baskı Kuvveti (kN)	Bekleme Süresi (Cycle)	Kaynak Süresi (Cycle)	Kaynak Akımı (kA)
2,5	25	8	6,8
2,5	25	8	7
2,5	25	8	7,2
2,5	25	8	7,4
2,5	25	8	7,6
2,5	25	8	7,8
2,5	25	8	8.0

3.4 Deney Numunelerinin Mekanik Testleri

Hem punta direnç kaynağı öncesi hem de kaynakla birleştirme işleminden sonra numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Resim 3.5’te çekme deneylerine ait görseller verilmiştir. Kaynak yapılan numunelerin kalınlıkları farklı olduğu için deney sırasında dönme efektini engellemek için numunelerle aynı kalınlıktaki levhalarla desteklenmiştir.



Resim 3.5 a) Çekme deneyi yapılan çekme testi numunesi **b)** Çekme testi yapılan kaynaklı numuneler.

Üniversitemizin Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında bulunan 100 kN yük kapasiteli Instron 8801 marka test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Çekme testlerinin yapıldığı test cihazı Resim 3.6’da gösterilmiştir.



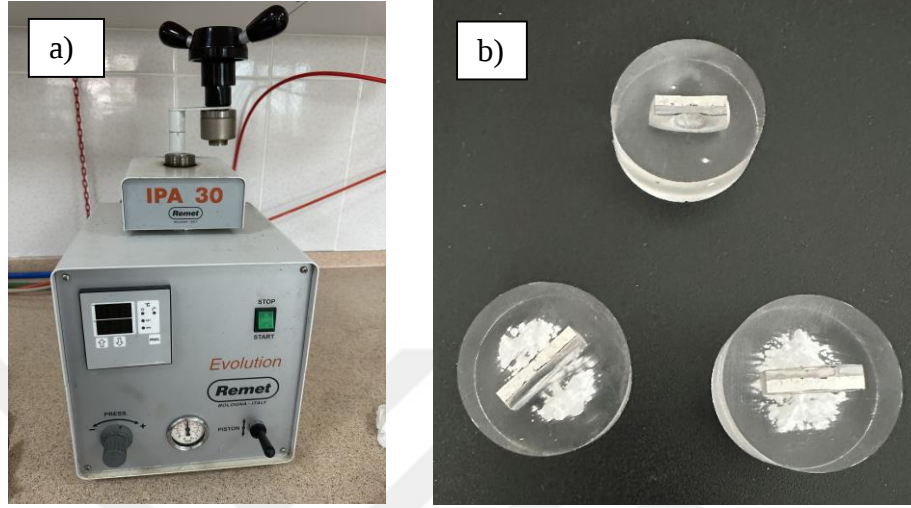
Resim 3.6 Instron 8801 Çekme test cihazı.

Bağlantı noktasının kesit görüşlerinin incelenmesi için numuneler, kaynak bölgesinin orta hizasından kesilmiştir, AKÜ Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan cihazlarla kesme, bakalite alma ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Kesme işlemi için çalışma kapsamında yapılan 3 kaynak numunesi laboratuvarında bulunan ve Resim 3.7’de gösterilen Metkon Metacut M250 manuel kesme cihazı ile çekirdek ortasından kesilmişlerdir.



Resim 3.7 Metkon Metacut 250 manuel kesme cihazı görselleri.

Kesilen numuneler çok küçük olduğu için, kolay işlem görmesi ve incelenebilmesi için Resim 3.8’de gösterilen Remet Evolution IPA 30 marka bakalite alma cihazı ile bir plastik içine yataklanmışlardır. Böylelikle yapılacak olan sertlik deneyleri ve SEM analizleri için numune daha kolay parlatılabilecek ve ölçüm yapılabilecektir.



Resim 3.8 a) Remet Evolution IPA30 Bakalite alma cihazı **b)** Bakalite alınan nokta kaynaklı numuneler.

Bakalite alınan numunelere AKÜ Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan ve Resim 3.9’da gösterilen Metkon Gripo 2V zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemi uygulandıktan sonra daha net görüntüler alabilmek için dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemleri için, hazırlanan % 3 nital çözeltisi kullanılmıştır.



Resim 3.9 Metkon Gripo 2V marka zımparalama ve parlatma cihazı.

Kaynaklı numunelerin esas metal mikroyapılarını, kaynak bölgesini ve ısı tesiri altında kalan bölgeleri (ITAB) detaylı inceleyebilmek için AKÜ Optik Mineraloji Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.10'da gösterilen Leica DMS 300 marka dijital mikroskop ile mikro fotoğrafları çekilmiş ve kaynak sonrası meydana gelen içyapı değişimleri irdelenmiştir.



Resim 3.10 Lecia DMS 300 Mikroskop görseli ve kaynak bölgesinin mikroskop altındaki görüntüsü.

Yine aynı numuneler AKÜ TUAM'da bulunan ve Şekil 3.11'de gösterilen LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) analiz edilerek çekirdek yapısı, içeriği ve dayanım değerleri incelenmiştir.



Resim 3.11 LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM).

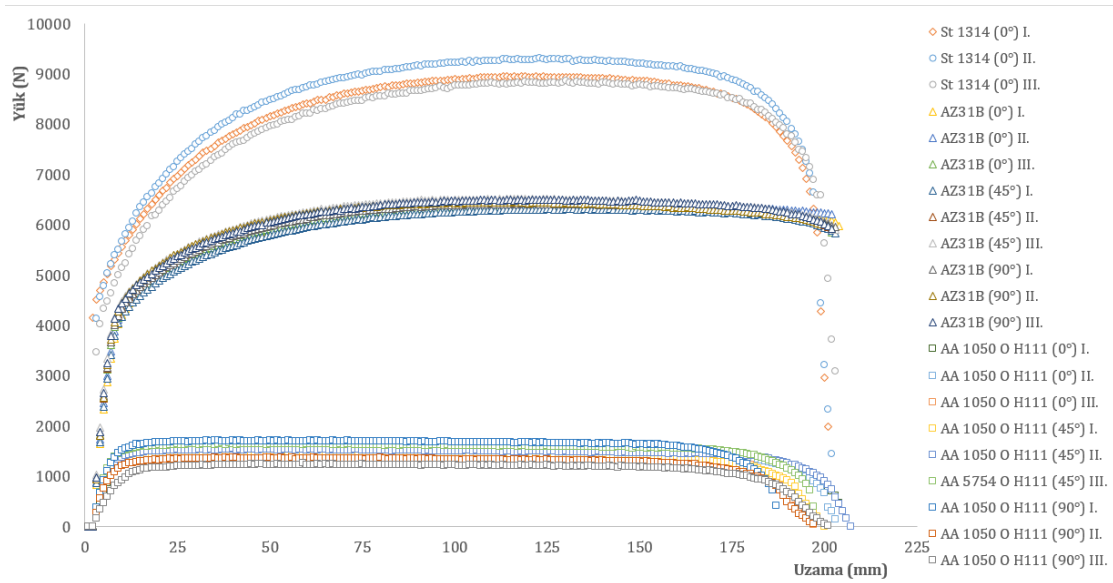
Kaynak yapılan numunelerin sertlik dağılımını belirlemek için parlatılan numunede üç farklı bölge belirlenmiştir. Resim 3.12’de görseli verilen Metkon marka Vickers sertlik ölçme cihazında 5 kat büyütülen görüntüde HV 0,1 yük altında sertlik ölçümü yapılmıştır. Kare tabanlı piramit elmas ucun numuneye belirli aralıklarla batırılarak oluşan izin köşegenlerinden ölçülmesi prensibine dayanan Vickers sertlik ölçümüne göre sertlik değerleri bulunmuştur.



Resim 3.12 Metkon Vickers sertlik ölçüm cihazı

4.BULGULAR

Çalışmamızda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için TS EN ISO 6892-2 standardına göre kesilen numunelere çekme deneyleri yapılmıştır. AZ31B Mg alaşım ve AA1050 Al alaşım için temin edilen hadde yönünde kesilen, hadde yönüne 45° açı ile kesilen ve hadde yönüne dik kesilen numuneler ile Erdemir 1314 galvanize çelik sac numunelerden üçer adet çekme deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 TS EN ISO 6892-2 Standardına göre hazırlanan çekme deneyi ile elde edilen yük-uzama grafiği.

Çekme testlerinin sonuçlarını incelediğimizde maksimum çekme dayanımı magnezyumda olurken alüminyumun dayanımı en düşük olmuştur. Uzama yüzdesi en yüksek olan malzeme ise %23,27 ile çeliktir.

Çizelge 3.12 Deney malzemelerinin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri.

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Max Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama %	Kopma Uzaması %
Erdemir 1314 Galvanize Çelik	108,52	224,66	23,27	37,96
AZ31B Magnezyum Alaşım	165,33	256,38	11,25	17,78
Al 1050 Alüminyum Alaşım	33,55	85,27-220	1,65	6,02

Hızı 0,01 mm/s olarak sabit tutularak yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen ve Şekil 4.1 ile Çizelge 3.12’de gösterilen numunelerin mekanik özelliklerinin materyal metot bölümünün girişinde belirtilen malzemelerin literatür verileriyle benzer aralıklarda olduğu tespit edilmiştir.

Çekme deneyi sonrası kopan numunelere ait görseller Resim 4.1, 4.2 ve 4.3’te verilmiştir. Numunelerin görsellerine bakıldığında, % uzama oranı en yüksek olan 1314 galvanize çelik numunede boyda uzama ve kesitte daralma belirgin şekilde görülmektedir. Uzama oranı en düşük olan alüminyumda ise boyda uzama çok az olurken maksimum çekme kuvvetinden sonra numunede çentik şeklinde çatlak oluşmuş ve bir süre sonra o çatlak boyunca kopmuştur. Magnezyum alaşımda da boyda uzama çelikten daha az olurken alüminyumdan fazla olmuş ve maksimum çekme kuvvetinden sonra ani şekilde kırılma gerçekleşmiştir. Literatür taraması verilerine göre en yüksek % uzama galvanize çelikte olurken en düşük uzama magnezyumda olduğu ve deney sonuçlarımızla uyduğu gözlenmiştir. Ayrıca hadde yönünün farklı olduğu deney kesitlerinin sonuçlarına bakıldığında önemli bir fark görülmemiştir. Galvanize çelik, magnezyum alaşım ve alüminyum alaşım numunelere yapılan bu çekme deney sonuçları Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4’te ayrı ayrı grafiklerde gösterilerek karşılaştırılmıştır.



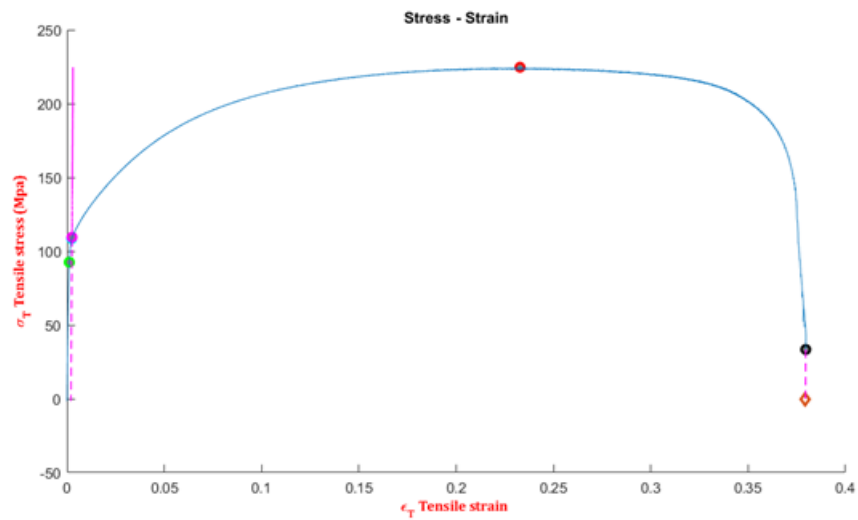
Resim 4.1 Çekme deneyi sonrası Erdemir 1314 Galvanize çelik numunesine ait görsel.



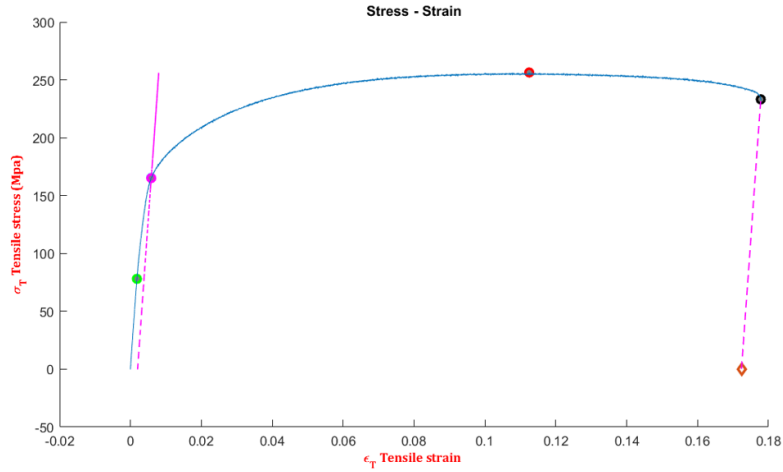
Resim 4.2 Çekme deneyi sonrası AA 1050 alüminyum alaşım numunesine ait görsel.



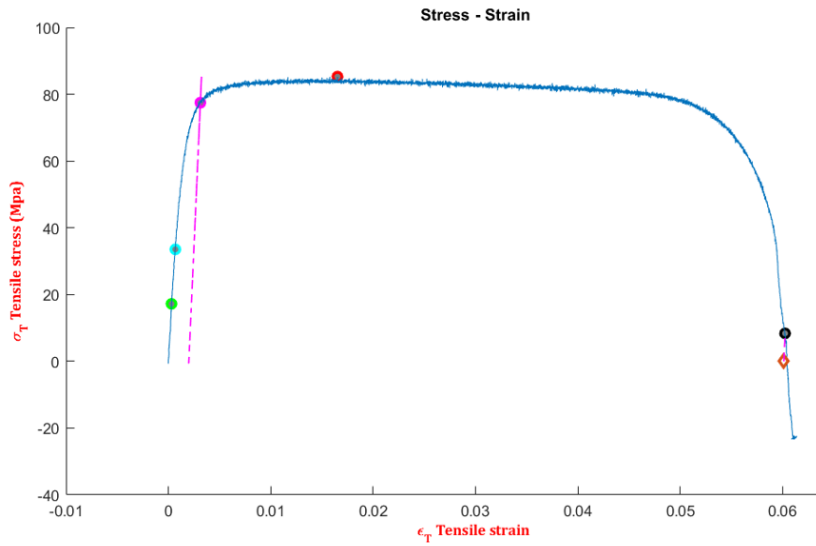
Resim 4.3 Çekme deneyi sonrası AZ31B magnezyum alaşım numunesine ait görsel.



Şekil 4.2 Galvanize çelik numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği.



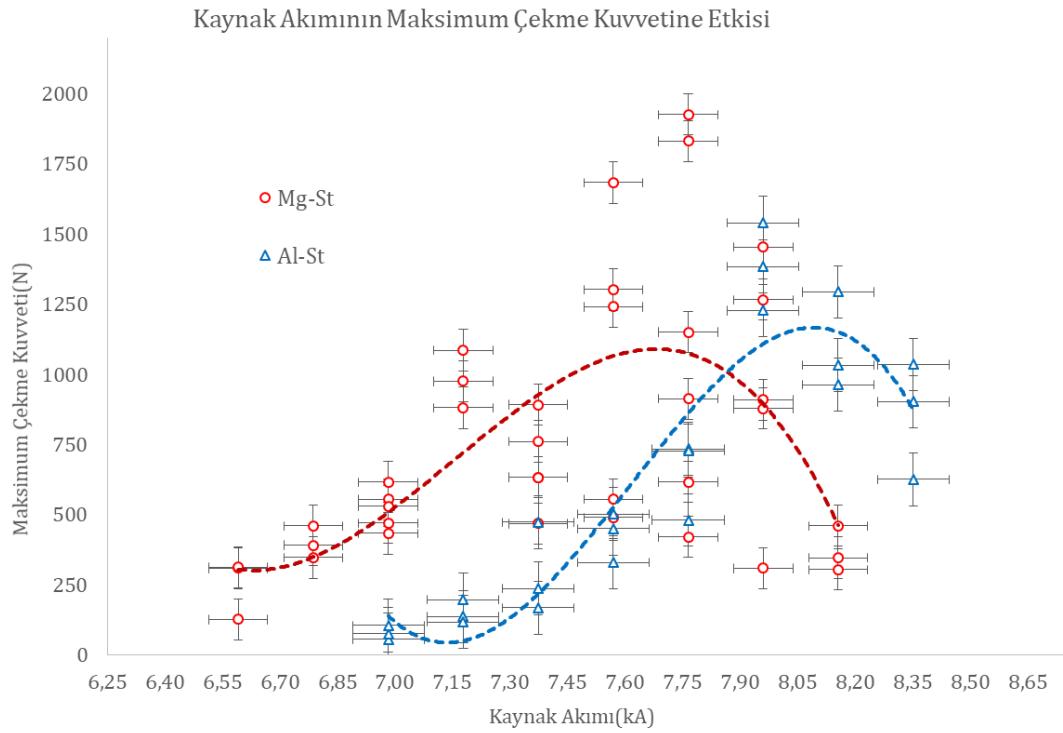
Şekil 4.3 Magnezyum numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği.



Şekil 4.4 Alüminyum numunenin çekme gerilimi ve uzama grafiği.

Punta direnç kaynağı uygulamalarında, en etkili parametre olan kaynak akımı ardışık olarak artırılmış, sıkıştırma ve kaynak süreleri sabit tutulmuştur. İlk olarak normal oda koşullarında yapılan punta kaynak deneylerinde, magnezyum alaşımlı numunenin yüzeyinde oluşan ve dengesiz dağılım gösteren oksit yapısından dolayı birleşme işlemlerinde sağlıklı veriler elde edilememiştir. Dayanıklı birleşmelerin elde edildiği bazı değerler tekrar uygulandığında yine aynı sonuçların alınmadığı görülmüştür. Bazı ara değerlerde birleşme sağlanamazken bazı değerlerde de elektrot numuneye yapışmıştır. Ayrıca yapılan çoğu kaynak işleminde yüzeydeki dengesiz oksit yapısının neden olduğu zayıflıklar ve eşit dağılmayan basınçtan dolayı sıçramalar oluşmuştur.

Normal oda şartlarında beklenen sonuçlar alınamadığından oksijenin en aza indirildiği bir ortamda deneylerimiz tekrarlanmıştır. Kaynak makinesinin üstüne sızdırmazlığı sağlanarak monte edilen 5 mm şeffaf pleksiglas levhalardan oluşturduğumuz kabinin içine Argon gazı verilmiştir. Kabinin üst noktalarında bırakılan ve oksijenin dışarıya atılmasını sağlayan bir hortum yardımıyla içerideki oksijen seviyesi düşürülmüştür. Bu ortamda yapılan deneyler, kademeli olarak artan kaynak akımı değerlerinde ve diğer kaynak parametreleri sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Yaptığımız punta direnç kaynaklı bağlantılar için yapılan çekme deneylerinde elde edilen değerler program tarafından otomatik kayıt edilmiş ve Şekil 4.5'te grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Kaynaklı bağlantıların maksimum çekme kuvveti-kaynak akımı grafiği.

Galvanize çeliğin hem magnezyumla hem de alüminyumla olan punta kaynaklı birleşiminde kaynak akımının artmasıyla çekme dayanımının arttığı gözlenmiş, magnezyum ile olan kaynaklı bağlantısında daha yüksek çekme kuvvetlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre galvanize çelik ve magnezyum çiftinin çekme dayanımının ortalama değerlerine bakıldığında en yüksek çekme dayanımı 7,6 kA kaynak akımında yapılan kaynakta olurken galvanize çelik ve alüminyum çiftinde ise 8,1 kA kaynak akımında olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.5'te de görüleceği üzere ortalamanın

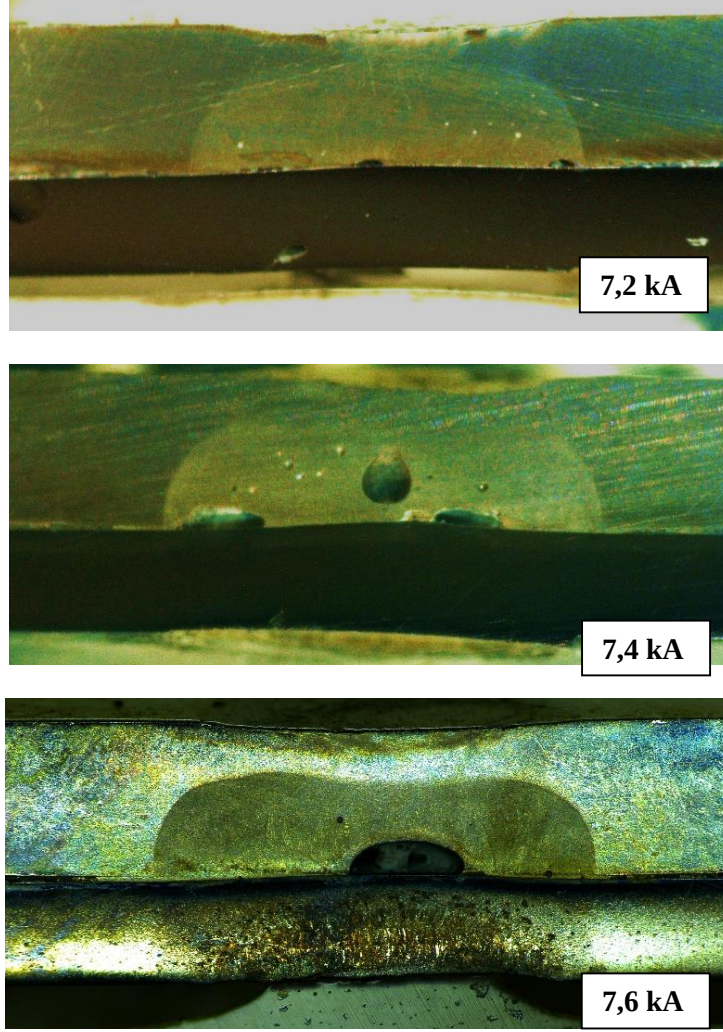
dışında kalan değerler incelendiğinde, magnezyum alaşımın yaptığı kaynak bağlantılarında daha yüksek dayanımlı bağlantıların yapılabileceği görülmüştür.

Punta direnç kaynağı ile birleştirilen Mg ve 1314 kalite galvanize çelik saclara yapılan çekme deneylerinde numunelerin hepsi kaynak bölgesinden ayrılmıştır. Şekil 4.6’da görseli verilen ayrılmış numunenin kaynak bölgesinin yüzeyinde metalin sıçradığı ve gözenekler oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6 Çekme deneyi sonunda ayrılan Mg numunenin ara yüzey görüntüsü.

TS EN ISO 14273 standardına uygun hazırlanarak punta direnç kaynağı yapılan numunelerin çekirdek yapılarını incelemek için 7,2 kA, 7,4 kA ve 7,6 kA kaynak akımında birleştirilen numuneler çekirdek boyunca kesilmiştir. Kesilen numuneler bakalite alınarak yüzey parlatma işlemleri yapılmıştır. Dijital mikroskop ile çekirdek bölgesi incelenen numunelere ait görüntüler 4.7’de verilmiştir. Bu numuneler aynı zamanda sertlik ölçümü ve SEM analizlerinde de kullanılmıştır.

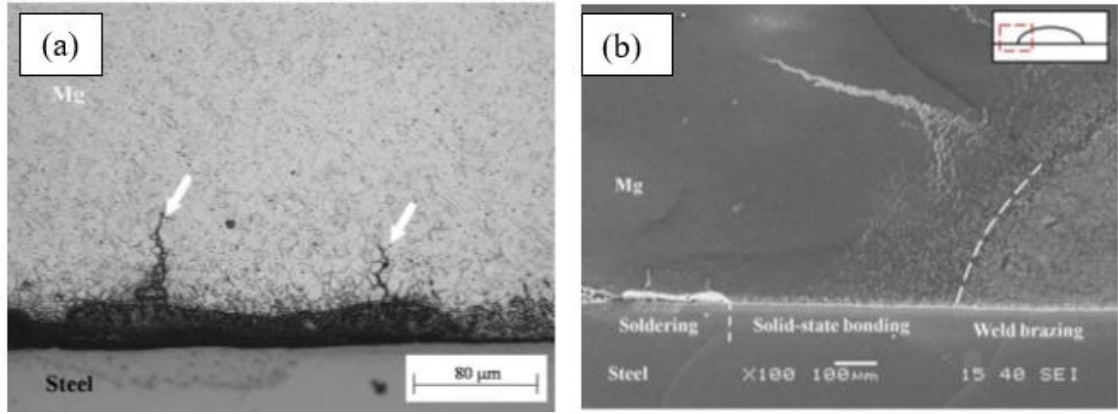


Şekil 4.7 7,2 kA 7,4 kA ve 7,6 kA'lık kaynak çekirdeklerinin mikro görüntüleri.

Farklı kaynak akımlarına ait 3 punta kaynaklı numunenin mikro fotoğraflarında görüldüğü üzere simetrik yapıda çekirdek oluşmamıştır. Ergime sıcaklıkları farklı olan magnezyum ve galvanize çelik numunelerden ergime sıcaklığı düşük olan magnezyum daha erken erirken galvanize çelik daha erimeye başlamamıştır. Bu sebeple magnezyum tarafında yarım çekirdek yapısı görülürken galvanize çelik tarafında çekirdek yapısı gözlenmemiştir. Daha önceki yapılan araştırmalar incelendiğinde yine benzer sonuçlar elde edilen çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir.

Liu ve arkadaşlarının (2013) yaptıkları çalışmada magnezyum alaşım ve çelik sacların punta kaynak ile birleştirilmesini incelemiş ve kaynak bölgesinde simetrik bir çekirdek yapısının oluşmadığını gözlemlemişlerdir. Çeliğin erimediğini ancak yüzeyindeki çinkonun eriyerek magnezyum alaşımındaki ergime boyunca nüfuz ettiğini tespit etmişlerdir. Şekil 4.8 a'da Zn ve magnezyumun eriyik oluşturduğu bölge gösterilmiştir.

İncelemelerde Mg ve çeliğin birleşim arayüzünü 3 bölgeye ayıran Liu ve arkadaşları, bu bölgelere sağdan sola doğru sırasıyla; magnezyum alaşımın eriyerek çelik ara yüzüne kaynak lehimlenmesinin olduğu bölge, magnezyum ve çeliğin katı halde birleştiği bölge ve Zn kaynaklı lehimlenme bölge olarak isimlendirmişlerdir. Şekil 4.8 b’de verilen resimde bu bölgeler görülmektedir. Ayrıca lehimlenme bölgesinin kimyasal analizine baktıklarında bölgenin yaklaşık olarak %52 Mg, %42 Zn ve %6 Al içerdiğini, Zn nüfuz eden bölgenin ise yaklaşık olarak %92 Mg, %6 Zn ve %2 Al içerdiğini tespit etmişlerdir.



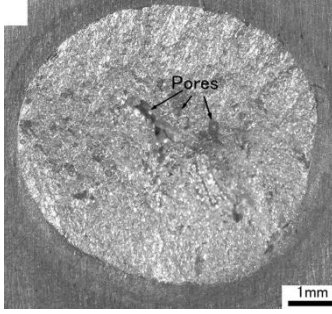
Şekil 4.8 a) Zn elementinin Mg alaşımıyla ergimesi **b)** Mg ve çelik birleşim arayüzünün ayrıldığı 3 bölge.

Yaptığımız deney sonuçları ve literatür taramaları incelendiğinde AZ31B magnezyum alaşım ve 1314 kalite galvanize çeliğin normal oda koşullarında ve oksijensiz ortamda yapılan punta kaynak uygulamaları sonucu ergime sıcaklıkları farkından dolayı simetrik kaynak çekirdek yapısının oluşmadığı görülmüştür. Galvanize çeliğin yüzeyindeki Zn kaplamanın da ergime sıcaklığının farklı olması çekirdeğin yapısının oluşumunu etkileyen bir diğer faktör olmuştur.

Punta kaynaklı bağlantıların çekirdek yapısı incelemesinde ayrıca gözeneklere rastlanılmıştır. Şekil 4.7’de verilen çekirdek mikro görüntülerinde anlaşılaçağı üzere kaynak akımının artmasıyla gözenekler belirginleşmiştir.

Shi ve arkadaşlarının (2010) magnezyum alaşımlı numunelerin soğuk haddelenmiş çelik kapak levha arasında yaptıkları punta kaynak çalışmasında bahsettikleri üzere RSW ısınma sürecinde magnezyum metali eriyerek genişlemiş ve çevreleyen katı metal ile sınırlandırılarak çekme gerilimine maruz kalmıştır. Bu yüzden kaynak boşluğunda yetersiz kalan erimiş magnezyum metalinin daha sonra katılaşmasıyla kaynak çekirdek

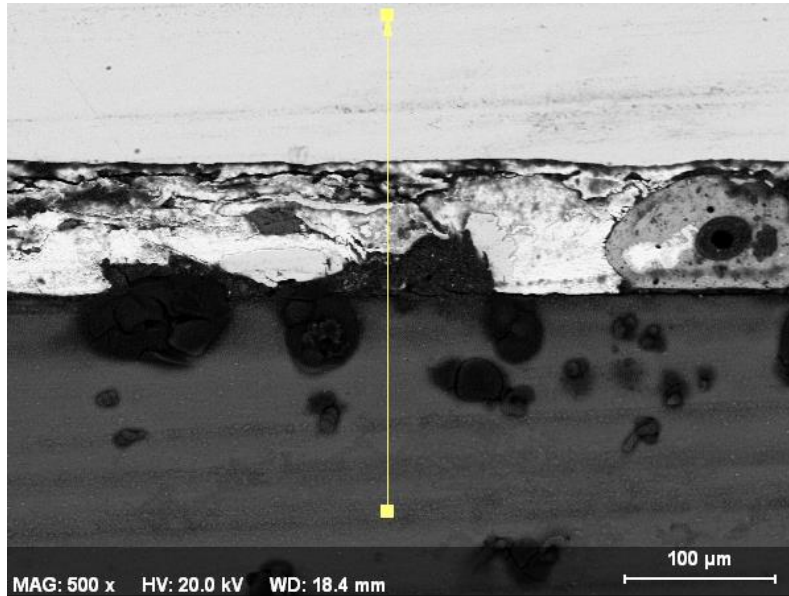
yapısında gözenekler oluşmuştur. Shi ve arkadaşları yaptıkları deneyler sonucu yüksek elektrot kuvveti altında yapılan punta kaynak işlemlerinde ergimiş çekirdekten gelen karşı kuvvetin aşıldığı ve böylece ergimiş magnezyum alaşımının atılmasının ve kaybının önleneyeceği bulunmuştur.



Şekil 4.9’da kapak plaka ile yapılan Mg levhaların RSW ile kaynaklanmış numunelerinin kesmeyle kırılan yüzeyinin morfolojisi gösterilmiştir. Bu görünen gözeneklerin çekme yükünün alanını azalttığı için kesme doğrultusunu olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

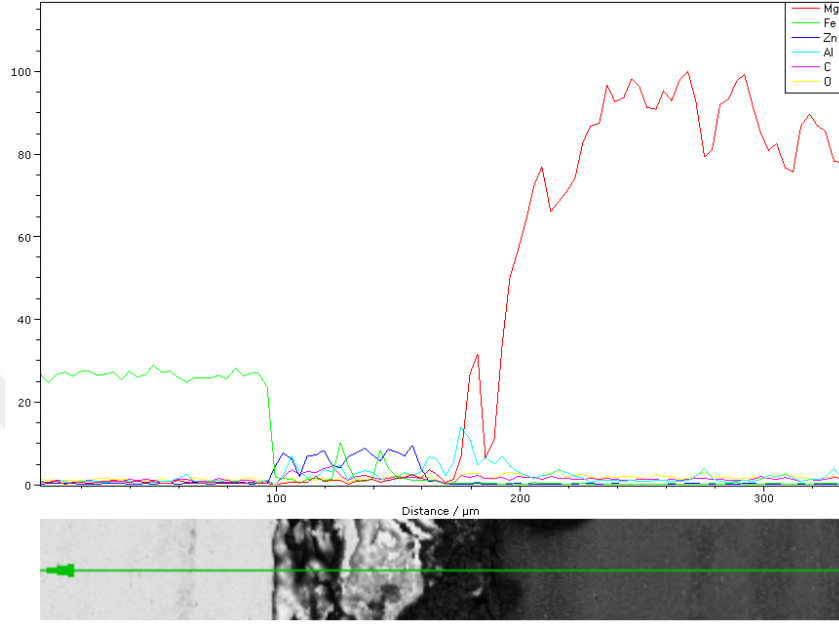
Şekil 4.9 Kesme ile kırılan yüzeyin morfolojisi.

Birleşim yerinin detaylı analizinin araştırılması için kesilen ve parlatılan çekirdek numunesinin farklı iki bölgesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı görüntü elde edilmiştir. Çekirdek yapısının sınırında yapılan ve Şekil 4.10’da SEM görüntüsü verilen ilk çizgisel incelemede (Enerji Dağılım Spektroskopisi) EDS ve (X ışını ile Enerji Dağılım Spektroskopisi) EDX analizi yapılmıştır.

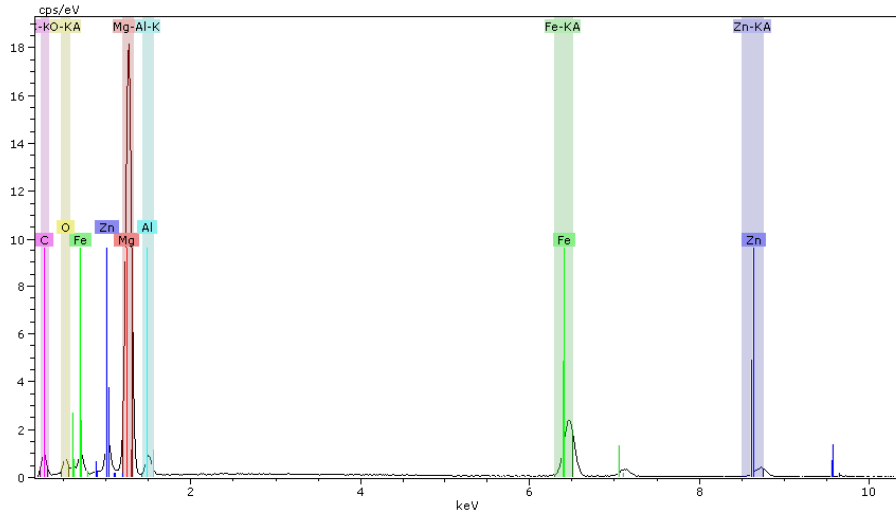


Şekil 4.10 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak SEM görüntüsü.

EDX analizi ile kaynak bölgesinin elementel dağılımı Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Birleşim bölgesinde ana metallerin hemen hemen aynı oranda bulunduğu, ayrıca az miktarda Al, C ve O bulunduğu ve galvanize çelik yüzeyinde bulunan kaplama elementi olan Zn elementinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.



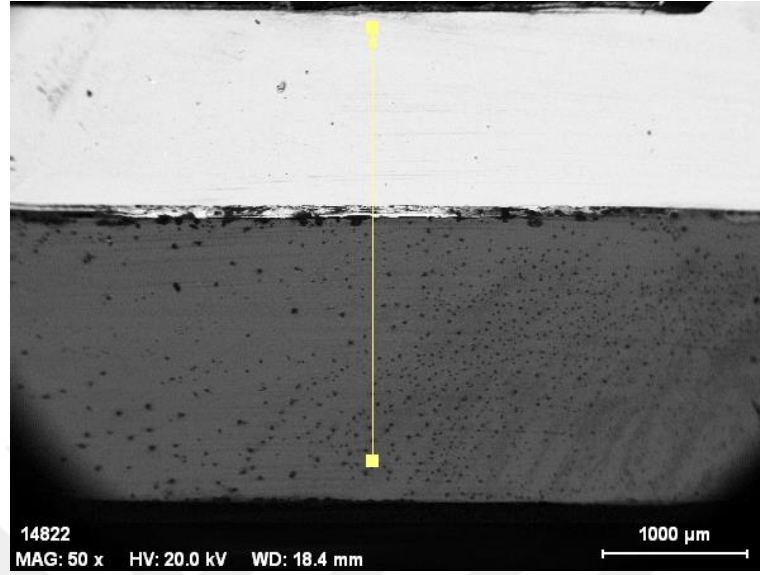
Şekil 4.11 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDX grafiği.



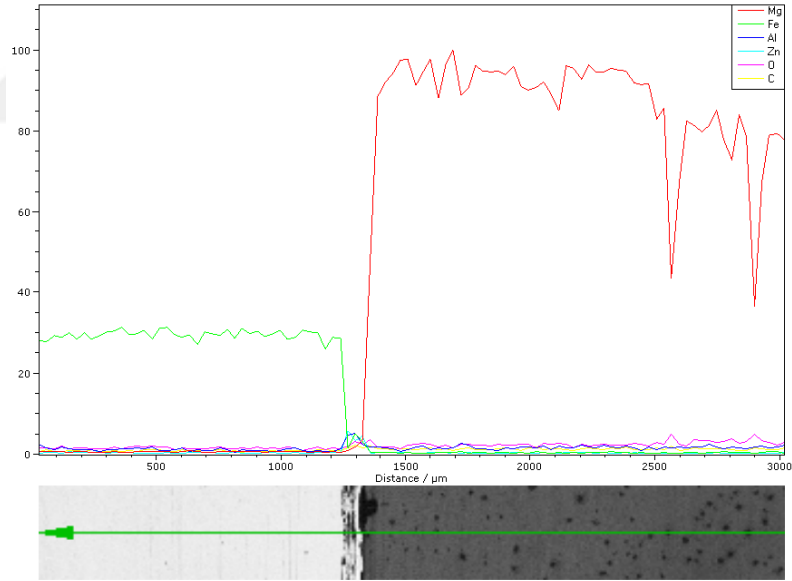
Şekil 4.12. Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDS grafiği.

Çekirdek yapısı içinde belirlenen bölgede yapılan çizgisel EDS ve EDX analizleri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir. Birleşim bölgesinde ana metallerin neredeyse

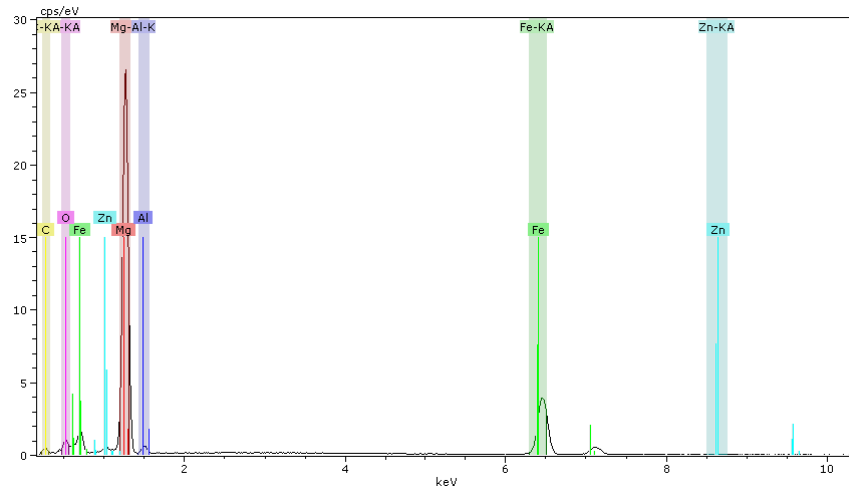
eşit olduğu ve galvanize çeliğin kaplama malzemesi olan Zn elementinin daha çok olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.13 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak SEM görüntüsü.

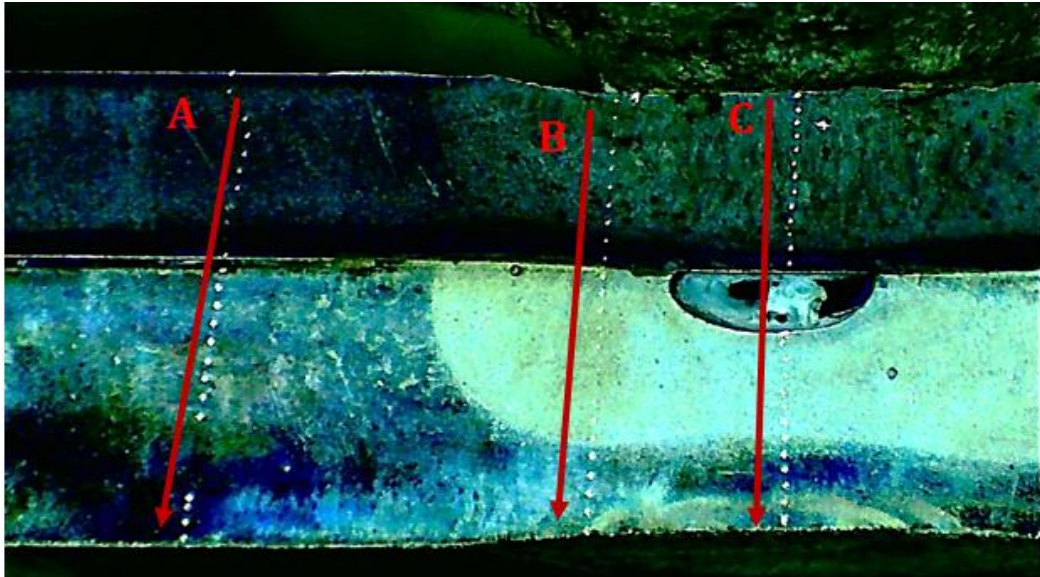


Şekil 4.14 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDX grafiği.



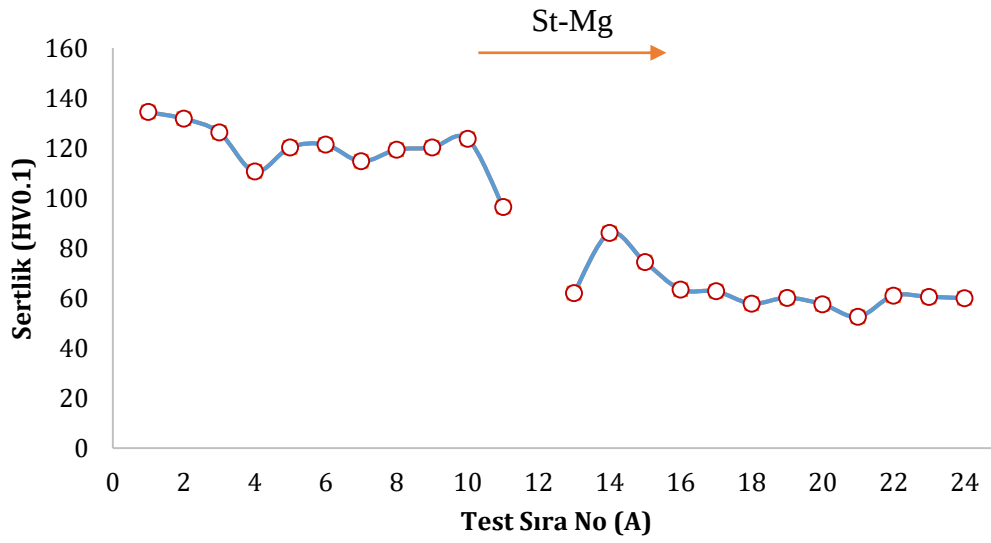
Şekil 4.15 Magnezyum ve 1314 galvanize çelik sacların punta kaynak EDS grafiği.

Kaynak işlemi sonrası hazırlanan magnezyum ve galvanize çelik kaynaklı bağlantının sertlik değerlerini analiz etmek için çekirdek kesitine Vickers sertlik deneyi yapılmıştır. Çekirdek kesitine dikey yönde belirlenen 3 farklı bölgenin sertlik değişimi analiz edilmiştir. Şekil 4.16’da gösterilen sertlik ölçümü yapılan bölgelerin, ölçüm sonrası elde edilen değerleri Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da grafikler halinde verilmiştir. A ve B ile gösterilen doğrultularda birleşim arayüzünde vuruş izi görülemediği için sertlik değeri belirlenememiştir.

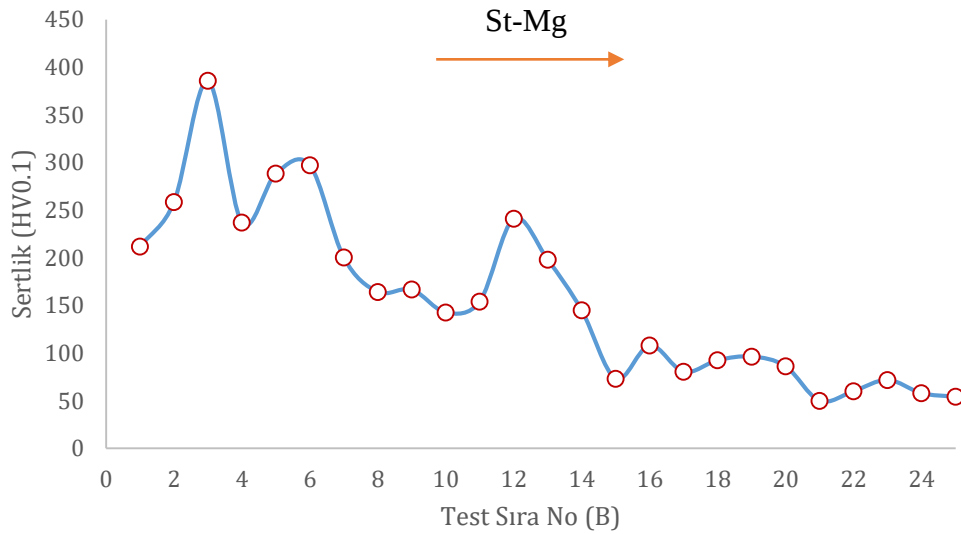


Şekil 4.16 Çekirdek kesitinde üç farklı doğrultuda uygulanan sertlik testi görüntüsü.

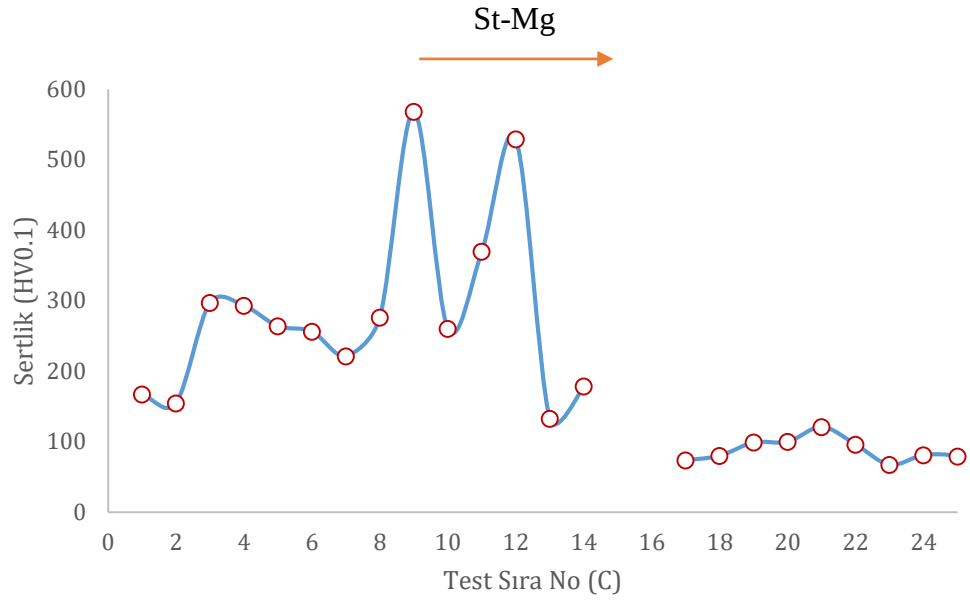
Yapılan sertlik deneyi sonuçlarına göre çekirdek yapısının dışındaki alınan değerlerde birleşim arayüzeyine doğru iki ana metalin sertlik değerlerinin arasında bir değer saptanmıştır. Şekil 4.17’de sertlik değerleri grafiği verilen A doğrultusunun, birleşim bölgesinde görüntü alınamadığı için sertlik değeri ölçülememiştir. Kaynak çekirdeğinin merkezine yakın bölgede belirlenen ve Şekil 4.18’de grafiği verilen B doğrultusu boyunca yapılan sertlik ölçümünde ise birleşim noktasında yükselme meydana gelse de galvanize çeliğin sertliğinden düşük kalmıştır. Çekirdek merkezinde bulunan C doğrultusu boyunca alınan verilere bakıldığında ise en yüksek sertlik değerleri elde edilmiş ve bu verilerin garfiği Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.17 A doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları.



Şekil 4.18 B doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları.



Şekil 4.19 C doğrultusunda yapılan sertlik testi sonuçları.

5.TARTIŞMA VE SONUÇ

Otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde uygulanan punta direnç kaynağı, metallerin birleştirilmesinde kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Özellikle sac metal montajlarında tercih edilen punta kaynağı, seri üretim gerektiren yerlerde de ucuz ve verimli çalışma imkânı sağladığı için günümüzde önemini korumaktadır. Otomotiv sanayinde farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip birçok malzemenin kullanımı ile daha hafif, ergonomik, maliyetli ve güvenli taşıt üretilmesi amaçlanırken pek çok özelliğin iyileştirilmesi için de çalışmalar her geçen gün devam etmektedir. Kullanılan farklı malzemelerin, uygulanan farklı montaj işlemlerine uygunluğu sürekli kendini güncelleyen bir araştırma konusu olmaktadır. Farklı metalürjik özelliklere sahip metallerin punta kaynak ile birleştirilmesinde; nikel ara katmanı, çinko kaplı çelik ara katmanı ve kalay kaplı çelik ara katmanı kullanılması araştırılmış, kaynak numunelerinin dışına çelik kapak levha ve farklı geometrik şekillerde elektrot uç denemeleri yapılmıştır.

Araç ağırlığının azaltılması ile yakıt tasarrufu sağlandığı ve böylece doğal çevrenin korunduğu bilinen bir gerçektir. Bu doğrultuda sanayide kullanılan en hafif metallerden olan magnezyum ile otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan çelik malzemenin punta direnç kaynak tekniği ile birleştirilmesinin araştırılması yeterince önem arz etmektedir. Farklı metalürjik özelliklere sahip bu iki metalin punta direnç kaynağı ile birleştirilmesi üzerine farklı araştırmalar olsa da bunlar yeterli değildir. Çünkü magnezyum alaşımının punta kaynakla birleştirilmesi esnasında hala oksitlenme tamamen giderilememekte ve farklı ergime noktaları olan metallerle olan bağlantılarında problemler oluşmaktadır. Bu çalışmada kaynak makinesi bir kabin içine alınmış ve argon gazı verilerek ortamdaki oksijen uzaklaştırılmaya çalışılmıştır. TS EN 14273 standardına göre hazırlanan AZ31B magnezyum alaşımı ve Erdemir 1314 kalite galvanize çelik saclar standarda uygun şekilde punta direnç kaynağı ile birleştirilmiş ve incelenmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme deneyi ve sertlik deneyi uygulanmış, mikroyapısının incelenmesi için SEM analizi yapılmıştır.

TSE EN ISO 14273 standartlarına göre gerçekleştirilen ve normal oda koşullarında yapılan nokta direnç kaynak deneylerinde birleşmelerin tutarsız olduğu kimi değerlerde sağlam kaynak bağlantısı olurken kimisinde ise birleşme olmadığı görülmüştür. Bu durumun etkenlerinden birisi olan yüzeydeki oksit tabakası giderilerek deneyler

tekrarlanmıştır. Yeni deneyler için punta kaynak makinesine sızdırmazlığı sağlanan şeffaf pleksiglas malzemeden kabin monte edilmiştir. Kabinin içerisine yanıcı özelliği olmayan asal gaz olan Argon gazı verilerek ortamdaki oksijen seviyesi giderilmeye çalışılmıştır. Gaz seviye ölçüm cihazı ile kabinin oksijen seviyesi ölçülmüş ve % 21 civarı olan oksijen oranı 0,13 seviyelerine kadar düşürülmüştür. Bu şartlar altında yapılan punta kaynak deneylerinde elektrot baskı kuvveti 250 kgf, kaynak süresi 8 cycle, bekleme süresi 25 cycle olarak sabit tutulmuş, kaynak akımı ise 6,8 kA'dan başlayarak kademeli olarak artırılmıştır. Kaynaklı bağlantılara yapılan çekme deneyi sonuçlarına göre kaynak akımının artmasıyla çekme dayanımı artarken maksimum yük 7,6 kA kaynak akımında gerçekleşen kaynaklı bağlantıda olmuştur. Deneylerde tüm kopmalar numunelerin arayüzünün ayrılması şeklinde olurken kaynak bölgesinin yüzeyi incelendiğinde, galvaniz kaplama elementi olan çinkonun da eriyerek magnezyum metalinin yüzeyine dağılması ile kaynak bölgesinde boşluklar oluşurken magnezyum alaşımının birleşim bölgesinin etrafında sıçramalar yaptığı görülmüştür.

Elde edilen kaynak bölgesi görüntülerine göre simetrik bir kaynak çekirdeği oluşmazken birleşim yerlerinde gözenekler görülmüştür. Bu durumun sebebi ise numunelerin ergime noktalarının farklı olmasından dolayı olduğu tespit edilmiştir. Galvanize çeliğin kaplama malzemesi olan çinkonun ergime sıcaklığının çelik ve magnezyumdan düşük olmasından dolayı diğer malzemelerden daha önce eriyerek buharlaştığı ve kaynak çekirdeğinde gözenekli yapıyı oluşturduğu anlaşılmıştır. Magnezyum alaşımlı malzemenin ergime noktası çelikten düşük olduğu için, özellikle çelik yüzeyindeki çinkonun eriyerek magnezyum tarafına nüfuz etmesiyle magnezyum tarafında yarım çekirdek çapı oluşmuştur.

Kaynak yapılan numunelerin çekirdek bölgesinden elde edilen kesite uygulanan Vickers sertlik deneylerine bakıldığında kaynak çekirdeği dışında alınan sertlik sonuçları 100 HV-0,1 olduğu saptanmıştır. Bu değer her iki ana metalin ölçülen sertlik değerlerinin arasında olan bir değerdir. Kaynağın merkezinde dikey doğrultuda yapılan sertlik ölçümünde ise en yüksek değerler ölçülürken çekirdek kısmında dengesiz artışlar görülmüş ve yaklaşık 550 HV-0,1 sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu durumun sebebinin tam oluşmayan çekirdek yapısı ve içerideki gözeneklerden dolayı ara ara gerçekleşen birleşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Gözenekli yapının engellenebilmesi için farklı ara katmanlar ile punta direnç kaynak deneyleri tekrarlanabilir, daha yüksek kaynak akımları denenebilir.

Kaynak yapılan malzemelerden kesilen ve parlatılan çekirdek numunesinin detaylı incelenmesi için taramalı elektron mikroskobunda (SEM) analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen EDS ve EDX grafikleri incelendiğinde galvanize çeliğin yüzeyindeki kaplama malzemesi olan çinko elementinin ergime noktası daha düşük olduğu için miktarının çekirdek bölgesinde daha yüksek olduğu gözlenmiştir. EDX grafikleri incelendiğinde kaynaklı birleşme bölgesinde demir, çinko ve magnezyum elementleri dışında alüminyum, oksijen ve karbon elementlerine de rastlanmıştır. Elde edilen SEM görüntülerinde ise kaynak ana metallerinin ergime sıcaklıklarının farklı olmasından dolayı çelik yüzeyinde çekirdek yapısının oluşmadığı sadece magnezyum tarafında yarım çekirdek yapısının oluştuğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, literatürde kısıtlı veri bulunan magnezyum alaşımlarının galvanize çelik sac levhalarla olan punta direnç kaynak bağlantıları detaylı bir şekilde incelenmiş olup gelecekte yapılacak benzer araştırmalara da katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Magnezyum alaşımının hızlı oksitlenmesi ve galvanize çelik sac ile farklı ergime sıcaklıklarına sahip olmaları sebebiyle kaynak bölgesinde oluşan gözenek ve asimetrik çekirdek yapısı kusurlarının giderilmesi üzerine çalışmalar geliştirilerek kullanım alanı geliştirilebilir. Punta direnç kaynağı sonucu elde edilen bağlantının kaynak kalitesinin ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için bu deney verilerinde sabit tutulan kaynak süresi ve elektrot kuvveti, ilerideki çalışmalarda değiştirilerek uygulanabilir ve böylece oluşan kaynak kusurlarının da önüne geçilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Akkuş A, 2006, Galvanizli ve Ostenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Yorulma Dayanımlarının Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 112s, İstanbul.
- Akyol M, 2001. Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 144s, İstanbul.
- Anık S, 1991, Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Eğitim Vakfı, 244s, İstanbul.
- Anonim, 1999, Resources and Production of Aluminium, Geoff Budd (Ed), TALAT Lecture 1101, European Aluminium Association, 25p, Birmingham.
- Anonim, 2012, Metal Teknolojisi, Elektrik Direnç Kaynağı, MEB, Ankara.
- Anonim, 2024, Mineral Commodity Summaries 2024, U.S. Geological Survey, 212, Virginia.
- Arıkan M M, Yıldız İ, 2004, Türk Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı Artan Çelik Kaliteleri Ve Pazar Durumu, Ereğli Demir Ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. 67330 Kdz. Ereğli/Zonguldak.
- Aslan U E, 2001, Farklı Metallerin Birleştirilmesinde Kullanılan Kaynak Yöntemlerinin Genel İncelenmesi ve Endüstriyel Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 143s, İstanbul.
- Aslanlar S, 1999, Galvanizli Kromatlı Mikro Alaşımlı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Uygun Hasar Modunun Tespiti, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 102s, Sakarya.
- ASM International, 1991, ASM Handbook Vol. 4: Heat Treating, ASM International, 1861-1960, USA
- ASTM B93/B93M-21, 2021, Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form for Sand Castings, Permanent Mold Castings, and Die Castings, United States.
- ASTM B94-18, 2018, Standard Specification for Magnesium-Alloy Die Castings, United States.

- Atak A, Şık A, Özdemir V, 2016, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) Yöntemi ile Otomotiv Sektöründe Kullanılan Magnezyum Alaşımlarının Birleştirilmesi, 8.Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON 2016, 23-24 Mayıs, Bursa, 1225-1234.
- AWS, 1972, Welding Handbook, 1972, Section Four Metals and Their Weldability. American Welding Society, 582p, USA.
- Aydın M, Gülenç B, 2003, Elektro Ve Sıcak Daldırma Metodlarıyla Galvaniz Kaplanmış Çelik Sacların Paslanmaz Çeliğe Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliği, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 16(1), ISSN: 2147-1762.
- Babu N K, Brauser S, Rethmeier M, Cross C E, 2012, Characterization of Microstructure and Deformation Behaviour of Resistance Spot Welded AZ31 Magnesium Alloy, Materials Science and Engineering A, 549, 149– 156.
- Bal E, 2012, Doğal Gaz boru Hatları İçin Yüksek Gerilimli Kaynak Ana Malzemesi Teknolojisinin Geliştirilmesi (BORKAY), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İstanbul.
- Başer T A, 2012, Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, Mühendis ve Makine, 53, 51-58.
- Baydemir Y, 2023, Otomotiv Sektöründe Kullanılan Sac Metal Malzemelerin Farklı Teknikler ile Oluşturulan Birleşimlerinin Yorulma Özelliklerinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 133s, Afyonkarahisar
- Bolstad J, 2000, Magnesium Alloy Development For Intelligent Magnesium Designs, SinoMaG Seminar, Beijing-China, 8-14.
- Burgucu S, 2011, 7075 Alüminyum Alaşımlarının Üretimi ve Karakterizasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, İstanbul.
- Çam G, 2001, Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 19-20 Ekim, İstanbul, 3- 13.
- Çelik M, 2014, AZ91 Magnezyum Alaşımlarında Soğuma Hızlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Bilecik.

- Çelik S, Oral A, Gündoğmuş A, 2021, AZ31B-H24 Magnezyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23 (2), 402-413,
- Çelikten E, 2021, Robotik Doğru Akım ve Robotik Darbeli Doğru Akım Kaynağının Termomekanik Haddelenmiş Çelik Malzemelerin Sertlik ve Mikroyapısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Sakarya.
- Çelikyürek I, Önal E, 2016, Effects of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded AZ91 Mg Alloy, Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 17(3), 563 – 571.
- Davis J R (Ed), 1998, Magnesium and Magnesium Alloys, Metals Handbook, Second Edition, 558-570, ASM International, ISBN: 0-87170-654-7, 1521p, Ohio.
- Dedeoğlu O, 2019, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan AL5754 Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi, Mekanik ve Mikro Yapı Özelliklerinin Araştırılması, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Bursa.
- D'Errico F, Plaza G G, Giger F, Kim S K, 2013, Final Assessment of Preindustrial Solid-State Route for High-Performance Mg-System Alloys Production: Concluding the EU Green Metallurgy Project, The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society, 65(10), 1293-1302.
- Deschamps A, Dumont D, Brechet Y, Sigli C, Dubost B, 2001, Process Modeling of Age-Hardening Aluminum Alloys: From Microstructure Evolution to Mechanical and Fracture Properties, In Proceedings from Materials Solutions Conference, 5-8 November, Indianapolis, USA, 298-305.
- Dinlen İ, 2022, Dünyada ve Türkiye’de Demir, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- Ebrahimnia M, Goodarzi M, Nouri M, Sheikhi M, 2009, Study of The Effect of Shielding Gas Composition on The Mechanical Weld Properties of Steel ST 37-2 in Gas Metal Arc Welding, Materials and Design, 30(9), 3891–3895.

- Eker I, Sevim I, 2009, 6061 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2), 137-14.
- Enz J, Konovalova A, Schultz M, Riekehr S, Ventzke V, Kashaev N, 2017, Laser Metal Deposition of Magnesium Alloys, Lasers in Manufacturing Conference 2017, Germany.
- Eroğlu G, Şahiner M, 2018, Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- Eroğlu G, 2022, Dünyada ve Türkiye’de Magnezyum, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- Esendir E, 2009, Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 104s, İstanbul.
- Fakıoğlu A, 2012, Yaşlandırılan AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Karabük.
- Gaines L, Cuenca R, Stodolsky F, Wu S, 1996, Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys, Automotive Technology Development Conferefnce, Michigan, 1-7.
- Gedik D, 2008, Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Sodyum Dikromat ve Sülfürik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 182s, Adana.
- Goede M, Stehlin M, Rafflenbeul L, Kopp G, Beeh E, 2009, Super Light Car-Lightweight Construction Thanks to A Multimaterial Design and Function Integration, European Transport Research Review, 1, 5-10.
- Gras C, Meredith M, Hunt J D, 2005, Microdefects Formation During the Twin-Roll Casting of Al-Mn-Mg Aluminum Alloys, Journal of Materials Processing Technology 167(1), 62-72.
- Gülenç, B, 2005, Nokta Direnç Kaynağında Baskı Kuvveti, Kaynak Akımı ve Baskı Zamanının ITAB’a Etkisi, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Proje ve Tezler Koordinasyon Merkezi, Ankara. Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, 2004 – 2007.

- Hamidinejad S M, Kolahan F, Kokabi A H, 2012, The Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Galvanized Steel Sheets Used in Car Body Manufacturing, *Materials Design*, 34, 759–767.
- Hayat F, 2005, Çift-Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağında MHO İle Kaynak Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Zonguldak.
- Hayat F, 2011, Comparing Properties of Adhesive Bonding, Resistance Spot Welding and Adhesive Weld Bonding of Coated and Uncoated DP 600 Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(9), 70-78.
- Hayat F, 2012, Effect of Aging Treatment on The Microstructure and Mechanical Properties of The Similar and Dissimilar 6061-T6 / 7075-T651 RSW Joints, *Materials Science and Engineering: A*, 556, 834-843.
- Hongfeng W, Dunwen Z, Shengrong L, Weiwei S, 2019, Analysis of Metallographic Structure and Hardness of Magnesium Alloy Area Using Friction Stir Welding, *Advanced Composites Letters*, 28, 1-7.
- Jawad S, Majid A, Bertilsson K, Carlberg T, 2012, Nugget Formation during Resistance Spot Welding, *World Academy of Science*, 67, 707-709.
- Jovanović A, Teodorović D, 2019, Multi - Criteria Optimization of Single Intersection Under Over-Saturated Conditions, *Mobility And Vehicle Mechanics*, 45 (3), 1–11.
- Kaçar İ, Öztürk F, 2006, Magnezyum Alaşımlarının Şekillendirilmesindeki Son Gelişmeler, *Timak Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, 26-28 Nisan, Balıkesir, 354-361.
- Kahraman B, 2009, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Kocaeli.
- Kazdal H K, 1999, Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği, TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, 3-39.

- Liu L, Xiao L, Feng J C, Tian Y H, Zhou Q, Zhou Y, 2010, The Mechanisms of Resistance Spot Welding of Magnesium to Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41(10), 2651-2661.
- Li Y, Wei Z, Li Y, Shen Q, Lin Z, 2013, Effects of Cone Angle of Truncated Electrode on Heat And Mass Transfer in Resistance Spot Welding, *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 65, 400–408.
- Liao M T, Chen W J, 1998, The Effect of Shielding-Gas Compositions on The Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Weldments, *Materials Chemistry and Physics*, 55(2), 145-151.
- Liu L, Xiao L, Chen D L, Feng J C, Kim S, Zhou Y, 2013, Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds, *Materials and Design*, 45, 336-342.
- Llewellyn D T, 1994, *Steels Metallurgy and Applications*, Second Edition, Routledge, 320p, Oxford.
- Longworth S J P, 2001, *The Bolting of Magnesium Components in Car Engines*, University of Cambridge, Master, 71p, Cambridge.
- Luo Y, Li J, 2014, Analysis of Nugget Formation During Resistance Spot Welding on Dissimilar Metal Sheets of Aluminum and Magnesium Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 5107-5113.
- Maguteesewaran R, Sivasubramanian R, Suresh V, 2012, Methodology Study and Analysis of Magnesium Alloy Metal Matrix Composites, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 3 (2), 217-224.
- Manladan S M, Yusof F, Ramesh S, 2016, A Review on Resistance Spot Welding of Magnesium Alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82, 1805–1825.
- Mert F, Özdemir A, Karataş Ç, 2010, Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 13(3), 165-176.
- Mordike B L, Ebert T, 2001, *Magnesium: Properties-Applications-Potential*, *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.

- Mukhopadhyay S, Pal T K, 2006, Effect of Shielding Gas Mixture On Gas Metal Arc Welding of HSLA Steel Using Solid And Flux-Cored Wires, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29(3), 262-268.
- Musfirah A H, Jaharah A, 2012, Magnesium and Aluminum Alloys in Automotive Industry, Journal Of Applied Sciences Research, 8 (9), 4865–4875.
- Mutlusu Ö, Ertan R, 2020, Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların IF Çelik Saclarla Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması, Politeknik Dergisi, 23(4), 1003-1013.
- Oğuz B, 1990, Demir Dışı Metallerin Kaynağı Metalurji-Uygulama, Oerlikon Yayını, 868s, İstanbul.
- Oğuz H, 2018, Paslanmaz Çelik-Galvanizli Çelik Çiftinin Elektrik Nokta Direnç Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynaklı Birleştirmenin Dayanım ve Mikro Yapı Özellikleri Üzerine Etkisi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İzmir.
- Orlowicz A W, Mroz M, Tupaj M, Trytek A, 2015, Materials Used in The Automotive Industry, Archives of Foundry Engineering, 15(2), 75–78.
- Özdemir S, 1975, Türkiye’de Alüminyum Endüstrisi Kurulurken, Scientific Mining Journal, 14(3), 7-10.
- Öztürk F, Kaçar İ, 2012, Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 12-20.
- Palani P, Murugan N, 2006, Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, Journal of Materials Processing Technology, 172 (1), 1-10.
- Penner P, Liu L, Gerlich A P, Zhou Y, 2014, Dissimilar Resistance Spot Welding of Aluminum to Magnesium with Zn Coated Steel Interlayers, Welding Journal, 93(6), 225S-231.
- Philips A L, 1970, Welding Handbook, Section Two, Welding Process: Gas, Arc and Resistance, American Welding Society, 736p, U.S.A.
- Pouranvari M, Asgari H R, Mosavizadch S M, Marashi P H, Goodarzi M, 2007, Effect of Weld Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Welds, Science and Technology of Welding and Joining, 12(3), 217–225.

- Prasanna V, Kumar A S, Babu P R, 2016, Friction Stir Welding of Magnesium Alloys – A Review, International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), 3(12), 111-114.
- Rausch G, Ziese A, 2003, Advanced Manufacturing Technology for Automotive Chassis Components Through Extensible and Sustainable Use of Mg-Alloys, MgChassis Project Report, Orbassano, Italy.
- Schwam D, Wallace J F, Zhu Y, Viswanathan S, Iskander S, 2000, Enhancements in Magnesium Die Casting Impact Properties, OSTI ID:803212, 160s.
- Seçgin G O, 2012, İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş AZ31 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 170s, İstanbul.
- Senyen C, 2003, Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Dikkat Edilecek Hususlar, TMMOB Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 24-25 Ekim, Kocaeli, 42-54.
- Sevim B, 2017, Endüstriye Gazların Kaynak ve Kesim Uygulamalarındaki Kullanım Alanları, X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi, 17-18 Kasım, Ankara.
- Shi H, Qiu R, Zhu J, Zhang K, Yu H, Ding G, 2010, Effects of welding parameters on the characteristics of magnesium alloy joint welded by resistance spot welding with cover plates, Materials and Design 3(1), 4853-4857
- Smith W F, 2000, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Çev.: Erdogan M, Nobel Yayın Dağıtım, 338s, Ankara.
- Smith S, Uijl N J den, T. Okada, Van der Veldt T, Uchihara M, Fukui M, 2010, The Effect of Ageing on The Spot Weld Strength of AHSS and The Consequences for Testing Procedures, Welding in The World, 54(1), R12–R26.
- Sun M, Niknejad S T, Gao H, Wu L, Zhou Y, 2016, Mechanical Properties Of Dissimilar Resistance Spot Welds Qf Aluminumto Magnesium With Sn-Coated Steel Interlayer, Materials and Design, 91, 331-339.
- Şafak A S, 2011, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, Sakarya.

- Şık A, 2010, Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilen Magnezyum Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, SAÜ, Fen Bilimleri Dergisi, 14(2), 134-140.
- Tan E, 2011. Alüminyum Alaşımlarında Blister Oluşumu, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 174s, Denizli.
- Tezcan T, 2017, Elektrik Direnç Kaynağı, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Bursa.
- Todor M P, Kiss I, Systematic Approach on Materials Selection in The Automotive Industry for Making Vehicles Lighter, Safer and More Fuel-Efficient, Applied Engineering Letters, 1(4), 91-97.
- TS EN ISO 14273, 2016, Nokta, Dikiş ve Projeksiyon Kaynaklarının Kesme Deneyi için Numune Boyutları ve Yöntem, Ankara
- TS EN ISO 6892-2, 2018, Metal Malzemeler-Çekme Deneyi Bölüm 2:Yüksek Sıcaklıkta Deney Metodu, Ankara.
- Uijliden N, 2012, Resistance Spot Welding of A Complicated Joint in New Advanced High Strength Steel, Tata Steel RD and T, Mumbai.
- Ünal M, 2008, Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 138s, Ankara.
- Vural M, 1992, Galvanizli Çelik Sacların Karbonlu ve Ferritik Paslanmaz Çelikler ile Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Davranışına ve Bağlantının Dayanımına Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 119s, İstanbul.
- Wang Y R, Feng J C, Zhang Z D, 2006, Microstructure Characteristics of Resistance Spot Welds of AZ31 Mg Alloy, Science and Technology of Welding and Joining, 11(5), 555-560.
- Wang P C, Cao R, Chen J H, 2013, Cold Metal Transfer Joining of Magnesium AZ31B to Aluminum A6061-T6, Materials Science and Engineering:A, 560, 256-266.
- Wessel J K, 2004, Handbook of Advanced Materials, Wiley-Interscience Publication, 656p, USA.
- Yavuz B, 2015, Nokta Direnç Kaynağında Isıl ve Yapısal Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, İstanbul.

- Yıldırım H, 2006, Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, İstanbul.
- Yıldırım H, 2018, AZ31 Magnezyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, Elazığ.
- Yıldız K, 2013, Demir Çelik Metalurjisi Ders Notları, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Yurdagül A, Güngör Y, Laçın D, 2005, Demir Jeokimyası ve Cevher Minerallerinin Özellikleri, Türkiye Demir Yatakları Jeolojisi, Madenciliği ve Mevcut Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 23-25 Haziran, İstanbul, 408-417.
- Zhang J, Niua X, Qiua X, Liu K, Nan C, Tang D, Meng J, 2009, Effect of Yttrium Rich Metal on The Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Die Cast AZ91 Alloy, Journal of Alloys and Compounds, 471(1,2), 322-330.
- Zivic F, Grujovic N, Manivasagam G, Richard C, Landoulsi J, Petrovice V, 2014, The Potential of Magnesium Alloys as Bioabsorbable / Biodegradable Implants for Biomedical Applications, Tribology in Industry, 36(1), 67-73.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf> , 02.02.2024
- 2- https://talsad.org.tr/wpcontent/uploads/2023/12/TALSAD_Dunyada_ve_Turkiyede_Aluminyum_Sektor_Raporu_Ozet_2022.pdf , 10.02.2024
- 3- https://www.arkeolojisanat.com/shop/blog/demir-cagindan-once-kullanilmis-demir-ok-ucunun-gokten-dustugu-anlasildi_3_1377552.html, 20.02.2024
- 4- <https://www.enerjipaslanmaz.com/otomotiv-sanayinde-paslanmaz-celik-kullanimi/> , 01.03.2024
- 5- <https://www.demirizelektrik.com.tr/tr-punta-kaynak-makinalari.html> , 04.04.2024
- 6- https://tr.made-in-china.com/co_nbxinchang/image_Pneumatic-Servo-Resistance-Robot-Spot-Welding-Gun-with-Electric-Cylinder_yseghnenig_2f1j00kcqoEDHzhvbb.html , 04.04.2024
- 7- <https://www.saglammakina.com/tr/urun/punta-kaynak-makineleri/coklu-punta-kaynak-makineleri/pn400-coklu-punta-kaynak-makinesi/?v=ebe021079e5a>, 04.04.2024
- 8- <https://seykoc.com.tr/icerik/1050?dil=tr>, 10.04.2024