



**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SAC METAL MALZEMELERİN
FARKLI TEKNİKLER İLE OLUŞTURULAN BİRLEŞİMLERİNİN YORULMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz BAYDEMİR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

Bu tez çalışması **22.Fen.Bil.01** numaralı proje ile Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SAC METAL
MALZEMELERİN FARKLI TEKNİKLER ile OLUŞTURULAN
BİRLEŞİMLERİNİN YORULMA ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Yılmaz BAYDEMİR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Yılmaz BAYDEMİR tarafından hazırlanan “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Sac Metal Malzemelerin Farklı Teknikler ile Oluşturulan Birleşimlerinin Yorulma Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18 / 07 / 2023 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 : Doç. Dr. Halil AYTEKİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi **İmza ...**

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rıza KARA
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu **İmza**

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

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
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.

18 / 07 / 2023

İmza

Yılmaz BAYDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SAC METAL MALZEMELERİN FARKLI TEKNİKLER ile OLUŞTURULAN BİRLEŞİMLERİNİN YORULMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yılmaz BAYDEMİR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Bu araştırmada, Otomotiv sanayinde araç komponentlerinde kullanılmakta olan ve birbiriyle metalürjik olarak uyumsuz olan Erdemir 1314 kalite galvanize çelik sac levha ile Al 5052 H32 alaşımı sac levha, otomotiv sanayinde tercih edilen sac levha birleştirme metodlarından üç farklı metot kullanılarak tek noktadan olmak üzere birleştirilmiş ve yorulma davranışları araştırılmıştır. Bu araştırma için belirlenen üç farklı birleştirme metodu sırasıyla; Form Punta (FP), Elektrik Direnç Kaynağı (EDK) ve Kendiliğinden delen perçinleme (KDP) metottur. Bu araştırmada, yorulma deneyleri öncesi, Erdemir 1314 kalite galvanize çelik ile Al 5052 H32 alaşımından oluşan sac metal malzemeler, mekanik özellikleri belirlemek amacıyla TSE EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testi uygulandı. Çekme testleri öncesi alüminyum ve çelikten oluşan sac levha numunelerden oluşan malzemelerin içyapısında elementlerin varlığı firmaların bize sunduğu özelliklerde olup olmadığı belirlemek amacıyla OES (Optik Emisyon Spektroskopisi) ile analiz edildi. EDK ile birleştirilen numuneler üzerinde Enerji Dağılım Spektrometresi (EDX) ile kaynak bölgesindeki dağılımları ve bu dağılımın oransal yapısı belirlendi. Çelik ve alüminyum alaşımı sac levha numuneleri, bu araştırmada belirlenen üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TS EN ISO 14273 kesme deneyi standardına göre birleştirilmiştir ve ayırma kuvvetleri belirlenmiştir. Yorulma deneyleri için, çelik ve alüminyum sac levha numuneler bu araştırmada belirlenen üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14324 standardına göre birleştirilip yorulma deneyleri yapıldı. Elde edilen deney verileri neticesinde yorulma ömür grafikleri oluşturuldu. Yorulma çevrim sınırı olarak $N=10^6$ çevrim sayısına karşılık gelen değerler alınmıştır.

Ayrıca sac levha bağlantı metotları ile birleştirilen numunelerin metalografik cihazlar kullanılarak hazırlanan kesit görünüşleri optik mikroskoplar yardımıyla fotoğrafları çekilerek, kesit görünüşlerde FP ve KDP birleşim formlarının yapısı incelenmiştir. Yorulma deneylerine başlanabilmesi için gerekli olan kesme ayırma dayanımlarının değerlendirmesinde EDK metot ile yapılan birleştirmeler diğer bağlantı metotlarına göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük kesme ayırma değerleri FP metodunda gözlemlenmiştir. Daha esnek bir birleştirme yapısına sahip olan FP tekniğinin yorulma ömürleri, diğer birleştirme metotlarına göre daha üstün değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

2023, xvi + 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektrik Direnç Kaynağı, Form Punta, Kendiliğinden Delen Perçinleme, Sac Levha Birleştirme Metodu, Yorulma

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF FATIGUE PROPERTIES OF JOINTS OF SHEET METAL MATERIALS USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY WITH DIFFERENT JOINING TECHNIQUES

Yılmaz BAYDEMİR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ahmet ÇETKİN

In this research, Erdemir 1314 quality galvanized steel sheet and Al 5052 H32 alloy sheet metal sheet, which are used in vehicle components in the automotive industry and are metallurgically incompatible with each other, were combined from one point using three different methods, one of the preferred sheet metal joining methods in the automotive industry, and their fatigue behavior was investigated. Three different joining methods determined for this research are respectively; Clinching, Resistance Spot Welding (RSW) and Self-Pierce Riveting (SPR) are methods. In this research, before the fatigue tests, sheet metal materials consisting of Erdemir 1314 quality galvanized steel and Al 5052 H32 alloy were subjected to tensile test according to TSE EN ISO 6892-1 standard in order to determine their mechanical properties. Before the tensile tests, the presence of elements in the internal structure of the materials consisting of sheet metal samples consisting of aluminum and steel was analyzed with OES (Optical Emission Spectroscopy) in order to determine whether they are in the properties offered to us by the companies. The distributions in the source region and the proportional structure of this distribution were determined by Energy Dispersive Spectrometer (EDX) on the samples combined with RSW. Steel and aluminum alloy sheet metal samples were combined with three different sheet metal joining methods determined in this research, according to the TS EN ISO 14273 shear test standard, and the separation forces were determined. For fatigue tests, steel and aluminum sheet metal samples were combined with three different sheet metal joining methods determined in this study according to TSE EN ISO 14324 standard and fatigue tests were performed.

Fatigue life graphs were created as a result of the experimental data obtained. The values corresponding to $N=10^6$ cycles were taken as the fatigue cycle limit. In addition, the cross-sectional views of the samples, which were joined by sheet metal connection methods, prepared using metallographic devices, were photographed with the help of optical microscopes, and the structure of clinching and SPR joint forms in cross-sectional views were examined. It has been determined that the joints made with the RSW method have higher strength compared to the other connection methods in the evaluation of the shear-separation strengths required to start the fatigue tests. The lowest shear separation force values were observed in the clinching method. It has been determined that the fatigue life of the clinching technique, which has a more flexible joining structure, has superior values compared to other joining methods.

2023, xvi + 113 pages

Keywords: Resistance Spot Welding, Clinching, Self Pierce Riveting, Sheet Metal Joining Method, Fatigue

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr yesi Ahmet ÇETKİN'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez aşaması sürecinde, sac levha malzeme temini konusunda karşılaştığım sorunda gösterdiği ilgi ve gayretten dolayı Aydemir Metal ve elik rnleri San ve Tic.A.Ő firmasına ve değerli alışanları Halil ALTIN ve ağlar ÇELEBİ'ye teşekkür ederim.

Özellikle deney numunelerinin Self Piercing Riveting Metot ile birleştirilmesi imkanını bizlere sağlayan Atlas Copco Türkiye firmasına ve değerli alışanları Alper IRMAK,Oğuz Can SAZLI ve Uğur ŐİMŐEK'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında 22.Fen.Bil.01 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı babam Turgut BAYDEMİR annem Advıye BAYDEMİR ve kardeşim Fatma ERBABA'ya teşekkür ederim.

Yılmaz BAYDEMİR
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Yorulma	17
2.1.1 Yorulma Mekanizmasının Tarihçesi	17
2.1.2 Yorulma ile İlgili Kavramlar	18
2.1.3 Yorulma Olayında Tekrarlı Yükler Gerilme Tipleri	21
2.1.4 Yorulma Mekanizması	22
2.1.4.1 Yorulma Çatlak Başlangıcı	23
2.1.4.2 Yorulmada Çatlak İlerlemesi	24
2.1.4.3 Nihai Kırılma	25
2.1.5 Yorulmayı Etkileyen Faktörler	25
2.1.5.1 Malzemenin Çekme Mukavemeti	26
2.1.5.2 Çentik Faktörü	26
2.1.5.3 Korozyonlu Ortamın Etkisi	27
2.1.5.4 Yükleme Şeklinin Etkisi	28
2.1.5.5 Frekans Etkisi	28
2.1.5.6 Parça Büyüklüğünün Etkisi	28
2.1.5.7 Sıcaklığın Etkisi	29
2.1.5.8 Yüzey İşlemlerinin Etkisi	29
2.1.5.9 Gerilme Genliği Etkisi	29
2.2 Sac Levha Birleştirme Yöntemleri	29

2.2.1 Elektrik Direnç Kaynağı.....	30
2.2.1.1 Elektrik Direnç Kaynağı Çeşitleri.....	31
2.2.1.2 Nokta Direnç Kaynağı.....	32
2.2.1.3 Direnç Kaynağı Parametreleri.....	34
2.2.1.4 Kabartılı Nokta Kaynağı.....	37
2.2.1.5 Dikiş Direnç Kaynağı.....	38
2.2.1.6 Direnç Alın Kaynak Yöntemi.....	40
2.2.2 Form Punta Metodu.....	41
2.2.2.1 Form Punta Metodu Uygulama Aşamaları.....	43
2.2.2.2 Form Punta Birleştirme Teknikleri.....	44
2.2.2.3 Form Punta Birleştirme Tipleri.....	48
2.2.2.4 Form Punta Birleştirme Tekniğinin Avantajları.....	49
2.2.2.5 Form Punta Uygulama Alanları.....	50
2.2.3 Kendiliğinden Delen Perçinleme Metodu.....	51
2.2.3.1 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Aşamaları.....	52
2.2.3.2 Kendiliğinden Delen Perçinleme Tekniğinin Avantajları.....	53
2.2.3.3 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Alanları.....	53
2.3 Mekanik Testler.....	54
2.3.1 Çekme Deneyi.....	54
2.3.1.1 Çekme Deneyi Tanımlamaları.....	55
2.3.2 Yorulma Deneyi.....	58
2.3.2.1 Yorulma Deneyi Türleri.....	58
2.3.2.2 Yorulma Deneylerinin Yapılışı.....	60
3. MATERYAL ve METOT.....	62
3.1 Malzeme Seçimi.....	62
3.1.1 Sac Levhaların Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.....	62
3.1.2 Numunelerin OES Analizi ile Kimyasal Bileşiminin Belirlenmesi.....	64
3.2 Deneyler için Kullanılacak Malzemelerin Hazırlanması.....	65
3.3 Deney Numunelerinin Birleştirilmesi.....	68
3.3.1 Deney Numunelerinin Elektrik Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesi.....	68
3.3.2 Deney Numunelerinin Form Punta ile Birleştirilmesi.....	70
3.3.3 Deney Numunelerinin Kendiliğinden Delen Perçinleme ile Birleştirilmesi.....	71

3.4 Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	73
3.5 Form Punta Metot ve Kendiliğinden Delen Perçinleme Metot ile Birleştirilen Numunelerin Kesit Görünüşlerinin Elde Edilmesi.....	76
3.6 EDK Metodu Uygulanan Numunenin Metalografik İncelenmeye Hazırlanması.....	78
4. BULGULAR.....	80
4.1 Deney Numunelerinin TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Deneyi.....	80
4.2 TSE EN ISO 14273 Standardına göre Numunelerin Kesme Deneyi.....	83
4.3 FP ve KDP Metot ile Birleştirilen Numunelerin Kesit Görünüşlerinin İncelenmesi	86
4.4 EDK Metodu Uygulanan Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	88
4.5 EDK Metodu Uygulanmış Numunelerin EDS Analizi.....	89
4.6 TSE EN ISO 14324 Standardına göre Numunelerin Yorulma Deneyi.....	91
4.7 Yorulma Deneyi Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları.....	95
4.7.1 EDK Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları.....	95
4.7.2 FP Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları.....	98
4.7.3 KDP Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları.....	100
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	101
6.KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	Üst Üste Binme Mesafesi
Al	Alüminyum
b	Genişlik
E	Elastisite Modülü
σ_{\checkmark}	Çekme Gerilmesi
σ_k	Kopma Gerilmesi
σ_{\max}	Maksimum Gerilme
σ_{\min}	Minimum Gerilme
σ_{ort}	Ortalama Gerilme
HV	Hardness Vickers
Hz	Hertz
I	Akım (Amper)
J	Joule
kN	KiloNewton
L_0	İlk Ölçü Uzunluğu
L_c	Paralel Uzunluk
l_f	Saclar arasındaki serbest uzunluk
l_s	Toplam Uzunluk
l_t	Her bir Sac Uzunluğu
L_t	Toplam Uzunluk
Mg	Magnezyum
N	Newton
Q	Üretilen Isı Enerjisi (Joule)
R	Direnç (Ω Ohm)
R	Gerilme Oranı
t	Kalınlık
t	Süre (s)
Zn	Çinko

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Al 5052	5xxx serisi alüminyum magnezyum alaşımı
DX54D+Z	Soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu çelik
EDK	Elektrik Direnç Kaynağı
EDS	Energy Dispersive Spectrum
EN	European Norm
FP	Form Punta
ISO	International Organization for Standardization
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
KD	Yüzde kesit daralması
KU	Yüzde kopma uzaması
RSW	Resistance Spot Welding
SPR	Self Pierce Riveting

Kısaltmalar (Devam)

TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TUAM	Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Üç Farklı Sac Birleştirme Metodu İle Birleştirilen Al 5052 Sac Levha Numunelerin Çekme Kesme Testlerinde Elde Edilen Yük-Strok Eğrileri.....	5
Şekil 2.2 Üç Farklı Sac Birleştirme Metodu İle Birleştirilen Al 5052 Sac Levha Numunelerin Yorulma Testlerinde Elde Edilen Yük-Döngü Sayısı İlişkisi.....	5
Şekil 2.3 JAC 980 Y Ve JSC 980 Y Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Levhaların Form Punta Metot ve Elektrik Direnç Kaynağı ile Birleşimlerinin Çekme-Kesme Testinde Elde Edilen Yük-Strok Eğrileri.....	6
Şekil 2.4 JAC 980 Y ve JSC 980 Y Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Levhaların Form Punta Metot ve Elektrik Direnç Kaynağı ile Birleşimlerinin Yorulma Testinde Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları.....	7
Şekil 2.5 Soğuk Haddelenmiş SPCC Çelik Sac Levhanın Form Punta Yöntemle Birleşiminin Çekme-Kesme Testinde Elde Edilen Yük-Deplasman Eğrileri....	8
Şekil 2.6 Soğuk Haddelenmiş SPCC Çelik Sac Levhanın Form Punta Yöntemle Birleşiminin Yorulma Testinden Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları.....	8
Şekil 2.7 Düşük Karbonlu 1008 Çeliği Sac Levha Numunelere EDK ve EDK Sonrası Soğuk İşlem Uygulamasının Şematik Gösterimi.....	10
Şekil 2.8 Düşük Karbonlu 1008 Çeliği Sac Levha Numunelerin Sadece EDK Uygulaması ve EDK Sonrası Uygulanan Soğuk İşlem ile Birlikte Yorulma Grafiklerinin Yük-Döngü Sayılarının Karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.9 Elektrik Direnç Kaynağı ve Sürtünme Direnç Nokta Kaynağı İle Birleşimleri Yapılan Al-Mg-Si Alaşımı Sac Levhanın Yorulma Testlerinde Yük-Döngü Sayıları Bakımından Karşılaştırılması.....	12
Şekil 2.10 Çekme-Kesme ve Soyma Konfigürasyonlarına göre Birleştirilen AA6022-T4 ile IF Çeliği Sac Levhaların ve Sadece AA 6022-T4 Sac Levhaların Kendi Aralarındaki Birleşimlerinin Yorulma Testlerinden Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları.....	13
Şekil 2.11 Farklı Sac Kalıklarındaki Numunelerin SPR Metot ile Birleşimlerinin Yorulma Testi Sonrası Elde Edilen Kuvvet -Döngü Sayısı Eğrileri.....	14
Şekil 2.12 Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sisteminin Fikstürü ve Zımbası: (a) Fikstür; (b) Armatürün Kesit Görünüşü.....	16
Şekil 2.13 Numunelere Uygulanan Darbelerin KDP Bağlantılarının Üzerinde Yorulma Ömrüne Etkisi.....	16
Şekil 2.14 Yorulma Testlerinden Elde Edilmiş Wöhler Diyagramı.....	20
Şekil 2.15 Yorulma Testlerinde Gerilme-Zaman Diyagramı.....	21
Şekil 2.16 Tekrarlı Gerilme - Zaman Eğrileri.....	22
Şekil 2.17 Yorulma Çatlak Oluşum Aşamaları.....	22

Şekil 2.18 Yorulma Çatlak Yüzeyleri.....	23
Şekil 2.19 Çevrimsel Kayma ile Çatlak Başlangıç Aşamaları.....	24
Şekil 2.20 Mikro Ölçekte Gerçekleşen Çatlak İlerlemesi.....	24
Şekil 2.21 Kırılma Modları a) Mod I b) Mod II c) Mod III.....	25
Şekil 2.22 Çentik Etkisi.....	27
Şekil 2.23 Nokta Direnç Kaynağı Makinesine Ait Temel Bileşenler ve Kaynak Bölgesinin Detail Görünüşü.....	32
Şekil 2.24 Nokta Direnç Kaynağı Uygulama Aşamaları.....	33
Şekil 2.25 Kabartılı Kaynak Yöntemi Şematik Resim ; a) Tekli Kabartılı Kaynak b) Çoklu Kabartılı Kaynak.....	38
Şekil 2.26 Dikiş Kaynağı Devresi ve Folyo Uygulama İşlemi.....	39
Şekil 2.27 Form Punta Kesit Görünüşü.....	43
Şekil 2.28 Form Punta Aşamaları.....	44
Şekil 2.29 Dairesel Birleştirme Prosesi.....	45
Şekil 2.30 Düz Birleştirme Prosesi.....	46
Şekil 2.31 Hareketli Birleştirme Prosesi.....	46
Şekil 2.32 Çift Etkili Birleştirme Prosesi.....	47
Şekil 2.33 Özel Birleştirme Prosesi.....	48
Şekil 2.34 Dairesel Birleştirme Tipi.....	48
Şekil 2.35 Dikdörtgensel Birleştirme Tipi.....	49
Şekil 2.36 Kendiliğinden Delen Perçinleme Kesit Görünüşü.....	52
Şekil 2.37 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Aşamaları.....	53
Şekil 2.38 Çekme Deneyi Gerilme -Uzama Grafiği.....	55
Şekil 2.39 Çekme Deney Numunelerinin Kırılma Davranışları a) Gevrek Malzemelerin Kırılma Şekli b) Sünek Malzemelerin Kırılma Şekli.....	58
Şekil 2.40 Bazı Yorulma Test Cihazlarının Çalışma Şematikleri a) Tek Uç Kısmından Yüklenmiş Dönel Eğmeli Tip b) İki Ucundan Yük Uygulanmış Dönel Eğmeli c)Eksenel Gerilmeye Maruz Bırakılmış.....	59
Şekil 3.1 TSE EN ISO 6892-1 Standardına Uygun Çekme Deneyi Numune Örneği.....	66
Şekil 3.2 TSE EN ISO 14273 Standardına Uygun Birleştirilmiş Kesme Deneyi Numune Örneği.....	67
Şekil 3.3 TSE EN ISO 14324 Standardına Uygun Birleştirilmiş Yorulma Deneyi Numune Örneği.....	68
Şekil 4.1 Erdemir 1314 Galvanize Çelik için Farklı Çekme Hızlarında Gerçek Gerilme- Birim Şekil Değişirme Grafiği.....	81

Şekil 4.2 Al 5052 Alaşımı için Farklı Çekme Hızlarında Gerçek Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği.....	81
Şekil 4.3 Kaynak Akımının Maksimum Ayırma Kuvvetine Etkisi.....	84
Şekil 4.4 Farklı Sac Birleştirme Metotları ile Birleştirilen Numunelerin Kesme Deneyi ile Elde Edilen Ayırma Kuvvet-Uzama Grafiği.....	85
Şekil 4.5 EDK Metot ile Birleştirilen Numuneler için Çizgi EDS Analizleri.....	90
Şekil 4.6 EDK Metot ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.....	91
Şekil 4.7 Form Punta Metot ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.....	92
Şekil 4.8 KDP Metodu ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.....	93
Şekil 4.9 Üç farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için Ayırma Kuvveti-Çevrim Sayısı Yorulma Grafiği.....	94
Şekil 4.10 Üç Farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için Ayırma Kuvvet Yüzdesi -Çevrim Sayısı Yorulma Grafiği.....	94
Şekil 4.11 EDK Metot ile Birleşimin Makro Yapısı.....	96
Şekil 4.12 Form Punta Yorulma Hasar Modu.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yorulma Gerilmesi Oranları	19
Çizelge 2.2 Çentik Boyut ve Şeklinin Yorulma Dayanımına Etkisi	27
Çizelge 2.3 Malzeme Birleştirme Yöntemleri.....	30
Çizelge 2.4 Nokta Direnç Kaynağında Sac Levha Kalınlıkları için Tavsiye Edilen Kaynak Parametreleri.....	36
Çizelge 3.1 Erdemir 1314 Galvanize Çelik Mekanik Özellikleri.....	63
Çizelge 3.2 Erdemir 1314 Galvanize Çelik Kimyasal Bileşimi.....	64
Çizelge 3.3 Al5052 Alaşımı Mekanik Özellikleri.....	64
Çizelge 3.4 Al 5052 Alaşımı Kimyasal Bileşimi.....	64
Çizelge 3.5 OES Cihazı ile Belirlenmiş Erdemir 1314 Galvanize Çelik Kimyasal Bileşimi.....	65
Çizelge 3.6 OES Cihazı ile Belirlenmiş Al 5052 Alaşımı Kimyasal Bileşimi.....	65
Çizelge 3.7 TSE EN ISO 6892-1 Standart Ölçü Değerleri.....	65
Çizelge 3.8 TSE EN ISO 14273 Standart Ölçü Değerleri.....	66
Çizelge 3.9 TSE EN ISO 14324 Standart Ölçü Değerleri.....	67
Çizelge 3.10 Elektrik Direnç Kaynağı Parametreleri.....	70
Çizelge 4.1 Deney Malzemelerinin Farklı Hızlarda Gerçekleştirilmiş Mekanik Özellikleri.....	82
Çizelge 4.2 Üç Farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için TSE EN ISO 14273 Kesme Deneyi Ortalama Ayırma Kuvveti Verileri.....	85
Çizelge 4.3 Alüminyum Sac Levha Üst Konumda Form punta Sac Levha Birleştirme Metodu için TSE EN ISO 14273 Kesme Deneyi Ortalama Ayırma Kuvveti Verileri.....	87

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Elektrik Direnç Kaynağı Çeşitleri.....	31
Resim 2.2 Direnç Alın Kaynağı Makinesi ve Kaynak Bölgesinin Detay Görünüşü	41
Resim 2.3 1982 Senesinde Üretimi Gerçekleştirilmiş İlk Form Punta Pensesi	43
Resim 2.4 Bir Araba Kaputunda Form Punta (Clinching) Bağlantıları.....	51
Resim 2.5 Otomobil Sac Panelinde KDP Uygulaması.....	54
Resim 3.1 Otomobillerde Çelik ile Alüminyum Malzemelerin Birlikte Kullanımı.....	63
Resim 3.2 Al5052 Alaşımı Sac Levha Numunelerin Yüzeylerindeki Oksit.Tabakaların Giderilmesi.....	69
Resim 3.3 Elektrik Direnç Kaynağı Makinesi ve EDK ile Birleştirilmiş Numuneler.....	70
Resim 3.4 TOX Form Punta Makinesi ve Form Punta Metot ile Birleştirilen Deney Numuneleri.....	71
Resim 3.5 KDP Makinesi Numunelerin Birleştirilmesine ait Uygulama Bilgi Ekranı...72	
Resim 3.6 KDP Makinesi ve KDP ile Birleştirilen Deney Numuneleri.....	73
Resim 3.7 Instron 8801 Mekanik Test Cihazı Genel Görünüş.....	74
Resim 3.8 TSE EN ISO 6892-1 Standardına Göre Hazırlanmış Çekme Deneyi Numuneleri ve Numunelere Çekme Testi Uygulanması.....	74
Resim 3.9 TSE EN ISO 14273 Standartlarında Birleştirilmiş Kesme Deneyi Numuneleri a) EDK Metot b) Form Punta Metot c) KDP Metot.....	75
Resim 3.10 TSE EN ISO 14324 Standartlarında Birleştirilmiş Yorulma Deneyi Numuneleri a) EDK Metot b) Form Punta Metot c) KDP Metot.....	76
Resim 3.11 Metacut Numune Kesme Makinesi.....	77
Resim 3.12 Numune Parlatma Cihazı ve Numune Kesit Yüzeylerinin Parlatılması.....	77
Resim 3.13 Leica DMS 300 Dijital Mikroskop ile Numune Kesit Görünüş İncelenmesi.....	78
Resim 3.14 Sıcak Bakalite Alma Cihazı ve Numune Dağlama İşlemi.....	79
Resim 4.1 a) Erdemir 1314 çelik numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri b) Al 5052 alaşımı numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.....	82
Resim 4.2 a) Çelik Sac Levha Üst konum Alüminyum Sac Levha Alt Konum Kesit Görünüş b) Alüminyum Sac Levha Üst Konum Çelik Levha Alt Konum Kesit Görünüş.....	86
Resim 4.3 a) Çelik Sac Levha Üst konum Alüminyum Sac Levha Alt Konum Kesit Görünüş b) Alüminyum Sac Levha Üst Konum Çelik Levha Alt Konum Kesit Görünüş.....	88
Resim 4.4 EDK ile Birleştirilmiş Numune Kesiti.....	89

Resim 4.5 EDK Metot Yorulma Hasarları a) Arayüz Hasar Modu b) Çekme Hasar Modu c) Levha Yırtılma Modu.....	98
Resim 4.6 Form Punta Metot Yorulma Hasarları a) Alüminyum Sacdan Hasar b) Çelik Sacdan Hasar.....	99
Resim 4.7 KDP Metot ile Birleştirilen Numunelerde Yorulma Hasarları.....	100



1. GİRİŞ

Günümüzde Dünya nüfusu Birleşmiş Milletler tarafından Kasım 2022’de açıklanan verilere göre 8 milyarı geçmiştir. Artan aşırı insan nüfusu kaçınılmaz olarak fosil enerji kaynaklarının hızla tüketimini beraberinde getirmiştir (İnt. Kyn. 1). Bilhassa petrol bazlı yakıtlar ile çalışan araçlar dünya atmosferine zarar verecek şekilde ciddi miktarlarda karbon salınımında bulunmaktadır. CO₂ emisyonu olarak adlandırılan bu sorun, küresel ısınma sürecini daha da hızlandırarak Dünya üzerindeki mevcut buzulların erimesine ve eriyen buzullardan dolayı Dünyadaki su seviyesinin artmasına ve asit yağmurlarının oluşumuna sebebiyet vermiştir (İnt. Kyn. 2). Dünyada özellikle taşıtlardan kaynaklı CO₂ emisyonunun Dünya atmosferine ve iklimine verdiği olumsuz etkiler üzerine taşıt üreticileri bu kapsamda karbon salınımı azaltıcı faaliyetlerde bulunmak için taşıt ağırlıklarını azaltma çalışmalarına yönelmişlerdir. Taşıt üreticileri özellikle taşıt ağırlığı azaltma çalışmalarında en ideal ve ekonomik malzeme olarak alüminyum alaşımları üzerinde yoğunlaşmışlardır. Belirtmek gerekirse alüminyumun özgül ağırlığı çelikten hemen hemen üç kat daha hafiftir. Otomobil toplam ağırlığında gerçekleştirilen her % 10’luk ağırlık azaltma çalışması yakıt tasarrufunda % 5-10 bandında avantaj sağlar. Yine takribi 1400 kg ağırlık kapasitesine sahip bir aracın üretiminde alüminyum alaşımlarına yer verilirse aracın ağırlığında 300 kg civarında azalma sağlanacaktır. Bu da taşıt ağırlığının % 20’lik oranda azalmasına imkân sağlamaktadır (Çağlayan 2020). Ayrıca araç üretimlerinde kullanılan her 1 kg çelik malzemenin tasarımlar sonucu 500 gr alüminyum ile yer değiştirmesi ise aracın kullanım ömrü boyunca Dünya atmosferine 10 kg daha az CO₂ emisyonuna sebep olacaktır (Başer 2012).

Araç hafifletme çalışması faaliyetleri fosil kaynaklı yakıtlar ile çalışan taşıtların yanı sıra elektrikli araçlar içinde yapılmaktadır. Günümüz teknoloji koşulları içerisinde halen batarya sistemleri maliyetli olan elektrikli araçlarda özgül ağırlığı çeliğe göre düşük malzemeler ile mevcut tasarımın ağırlığı hafifletilip mevcut batarya kapasitesi ile aracın gidebileceği menzilin artması hedeflenmektedir (Güven ve Rende 2017). Tüm bu süreçte optimum şartlarda araç üretimi için; ideal mekanik özellikleri, çeliğe göre düşük özgül ağırlığının olması, korozyona karşı mukavemeti, enerjiyi absorbe etme yeteneği, kolay işlenebilmesi ve şekil verilebilmesinin yanı sıra geri dönüştürülebilirlik özelliğinin olması nedeniyle alüminyum en ideal tercih edilecek malzeme gruplarının başlarında

gelmektedir. Fakat alüminyum alaşımları yorulma dayanım değerleri çelik malzemelere göre daha düşüktür ve sonlu ömre sahip olmaları en büyük zaafiyetleridir (Başer 2012, Akdı ve Demirpolat 2019). Alüminyuma kıyasla çelik malzemelerin araç üretiminde tercih edilmesinin en büyük nedenleri yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra piyasadan temin edebilme kolaylığı, korozyona karşı direnç, işlenebilirlik ve şekillenebilirlik özelliklerine pozitif yanıt vermesidir (Seyitoğlu 2013). Ancak çelik malzemelerin özgül ağırlıklarının alüminyum alaşımlarının özgül ağırlığının üç katına yakın olması araç tasarımlarını daha ağır hale getirmektedir. Daha ağır tasarım fosil yakıt ile çalışan araçlar için daha fazla yakıt tüketimi bunun yanı sıra daha fazla CO₂ emisyonu demektir. Yine elektrikli araçlarda daha ağır tasarım mevcut batarya menzilin azalması demektir.

Araç üretiminde görülen lüzum üzerine mevcut malzemelerin tek başlarına gösterdiği fiziksel ve mekanik özellik koşullarını yerine getirmede yetersiz kalması bilhassa taşıt üretiminde farklı malzeme türlerinin birlikte kullanılmasını kaçınılmaz bir sürece getirmiştir. Otomotiv endüstrisinden örnekler sunmak gerekirse tavan uygulamalarının alüminyum alaşımlardan oluştuğu ve gövde bağlantı bölgeleri (Pillar) yüksek mukavemetli çeliklerden oluştuğu örnekler mevcuttur. Farklı örnekler sunmaya devam etmek gerekirse yine araç kaput ve bagaj bölümlerinde alüminyum alaşımların ve çeliklerin birlikte kullanıldığı örnekler mevcuttur (Yüce 2018).

Günümüz otomotiv endüstrisinde, araç seri üretimlerinde tercih edilen en önemli yapı malzemelerinden olan alüminyum ve çelik malzemelerin birleşimlerinde ise bazı problemler vardır. Özellikle iki malzeme arasındaki büyük erime noktası ve termal genişleme farkından dolayı otomotiv endüstrisinde özellikle sac levha birleştirmede yoğun olarak kullanılan elektrik direnç kaynağı yetersiz kalabilmektedir (Du vd. 2019). Bu sebepten dolayı mühendisler sac levha birleştirme yöntemleri üzerinde elektrik direnç kaynağına alternatif olarak mekanik birleştirme yöntemlerine odaklanmıştır. Bu mekanik birleştirme yöntemlerinden bazıları bizim çalışmamızda kullandığımız FP ve KDP metottur. Bilhassa Otomotiv endüstrisinde taşıt komponentlerinin alüminyum ve çelik malzemelerin birleşiminde kullanılan bu sac levha birleştirme metotlarının, özellikle araçların seyir esnasında değişken kuvvetler altında periyodik olarak zorlandığı ortamda yorulma davranışlarının incelenmesini önemle gerektirmektedir.

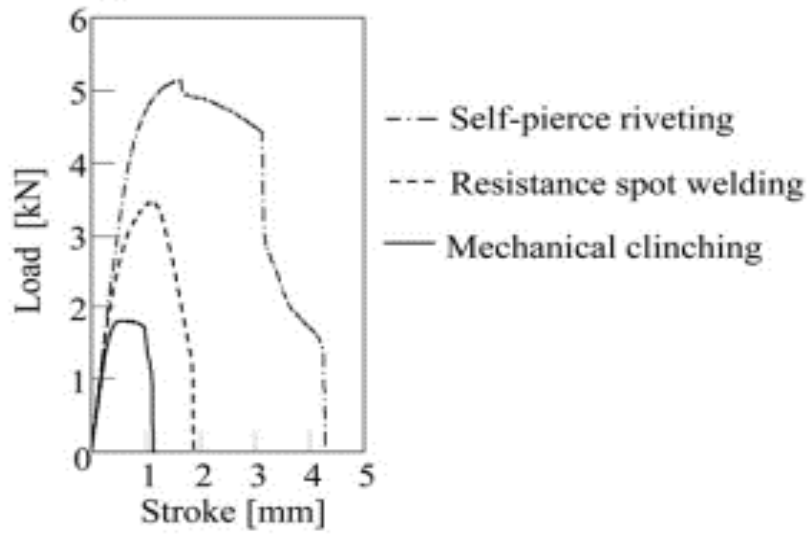
Literatürde alüminyum alaşım sac levha ile çelik sac levhaların birleşimlerinin yorulma davranışlarının incelenmesi genelde bir veya iki farklı sac levha birleştirme metoduna göre incelenmiştir.

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde tercih edilen ve metalürjik olarak birbirinden farklı malzemeler olan 5000 serisi Al 5052 alaşımı sac levha ile Erdemir 1314 kalite düşük karbonlu galvanize çelik sac levhayı, otomotiv endüstrisinde tercih edilen 3 farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14273 standardında belirtilen kesme deneyi formuna uygun olarak tek nokta üzerinden birleştirerek bu sac levha bağlantı metotlarını da sırayla belirtmek gerekirse; Form Punta (FP), Elektrik Direnç Kaynağı (EDK) ve Kendiliğinden Delen Perçinleme (KDP) metodudur. Bu sac levha bağlantı metotlarıyla kesme deneyine uygun formda tek nokta üzerinden birleştirilen numunelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Yorulma ömür grafikleri oluşturulmuştur.

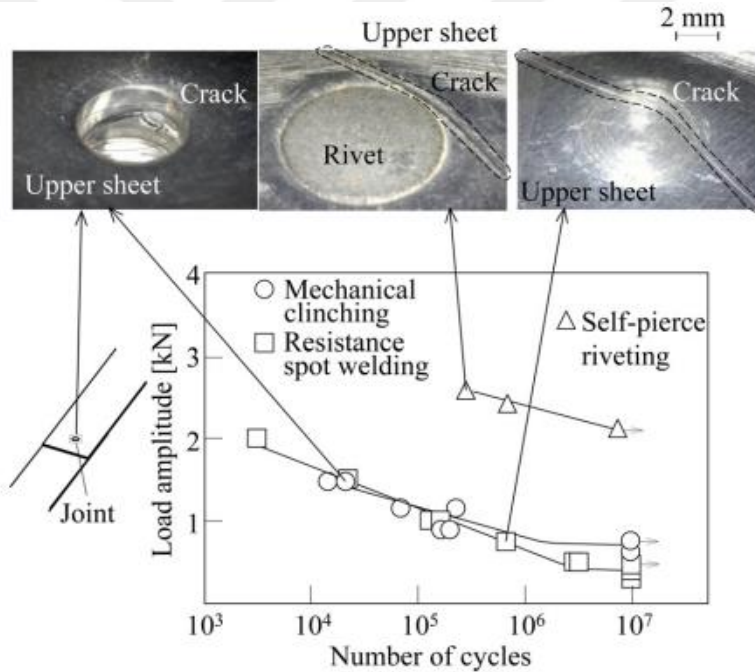
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Literatür araştırmalarında farklı türlerde alüminyum ve çelik sac levha malzemelerden oluşan deney numunelerinin birleşimlerinin farklı gerilim seçenekleri olan kesme, soyma ve çapraz gerilime maruz bırakılarak incelenen yorulma davranışları genellikle bir veya iki farklı sac levha birleştirme metodu üzerinden incelenmiştir. Özellikle otomotiv sanayinde tercih edilen üç farklı sac birleştirme metodu olan; FP, EDK ve KDP metot ile birleştirilen deney numunelerinin aynı çalışma içerisinde detaylı bir şekilde yorulma davranışlarının incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Gerek aynı tür sac levha malzemelerin gerek farklı metalürjik özelliklere sahip sac levha malzemelerinin farklı gerilim türlerinde farklı sac levha birleştirme metotlarıyla yorulma davranışlarının incelendiği literatür çalışmaları da mevcuttur.

Mori vd. (2012), Otomobil panellerinde kullanılan Al 5052 sac levhayı sac levha birleştirme metotlarından FP, KDP ve EDK ile birleştirmiş ve sac levha numuneleri kesme ve çapraz gerilmeye maruz bırakarak çekme testleri ve yorulma testleri uygulamıştır. Çekme testleri ve yorulma testlerinde KDP metot hem statik hem de yorulma dayanımları diğer iki sac levha birleştirme metoduna göre daha yüksek değerler almıştır. FP metotta birleştirilen sac levha numunelerin çekme testleri neticesinde elde edilen statik mukavemet değerleri EDK ile birleşimleri yapılan numunelerin yaklaşık yarısı olmasına rağmen yorulma dayanımı açasından birbirlerine yakın performans göstermiştir (şekil 2.1 ve şekil 2.2).Yapılan çalışma neticesinde KDP metot ile yapılan birleşimlerin hem statik hem yorulma dayanımları en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan otomotiv sanayinde gövde panellerinin birleşimlerinde sık kullanılan EDK ile yorulma dayanımı açasından benzer paralellik gösteren FP metodun düşük işletme maliyeti açasından EDK ile yapılan birleşimlere karşın uygun bir alternatif olduğu kanısına varılmıştır.



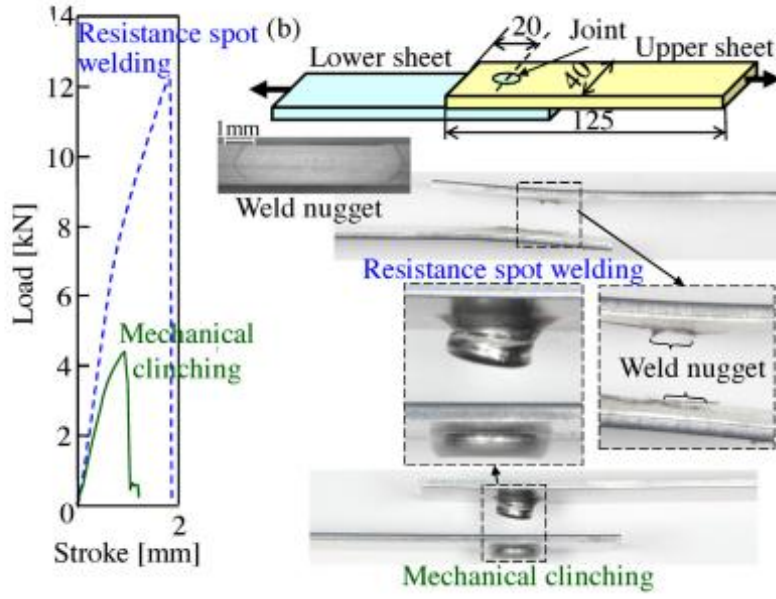
Şekil 2.1 Üç Farklı Sac Birleştirme Metodu ile Birleştirilen Al 5052 Sac Levha Numunelerin Çekme-Kesme Testlerinde Elde Edilen Yük-Strok Eğrileri (Mori vd.2012).



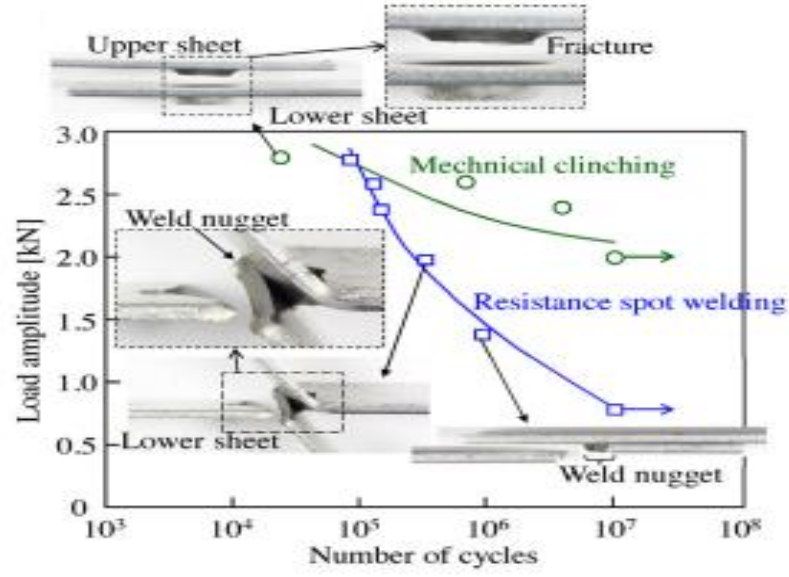
Şekil 2.2 Üç Farklı Sac Birleştirme Metodu ile Birleştirilen Al 5052 Sac Levha Numunelerin Yorulma Testlerinde Elde Edilen Yük-Döngü Sayısı İlişkisi (Mori vd. 2012).

Abe vd. (2014), yapmış oldukları çalışmada 1.2 mm kalınlıkta düşük süneklikte yaklaşık 1000 MPa çekme mukavemetine sahip ultra yüksek mukavemetli çelik sac lar olan galvanize çelik JAC 980Y ve kaplanmamış JSC 980Y (Japon Demir ve Çelik Federasyonu) çelik sac levhaları FP metot ve EDK ile birleştirmişler. Çalışmalarında statik ve yorulma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. FP yöntemde birleştirilen

numunelerde ise sac levhaların kırılmasını önlemek ve sac levhaların deformasyon konsantrasyonunu azaltmak için kalıbın çapı ve derinliği optimize edilerek tasarlanmıştır. Yapılan çekme-kesme testleri neticesinde EDK ile birleştirilen numunelerin statik bağlantı yük değerleri daha yüksek çıkmıştır. Yorulma testlerinde ise 10^7 döngü sayısında FP metot ile yapılan birleştirmelerin yük genliği çekme-kesme testindeki elektrik direnç kaynağı ile birleşimleri yapılan numunelerin yaklaşık 2.5 katı olduğu belirlenmiş (Şekil 2.3 ve Şekil 2.4) de sırasıyla çekme-kesme testi ile yorulma testi sonuçları gösterilmiştir.

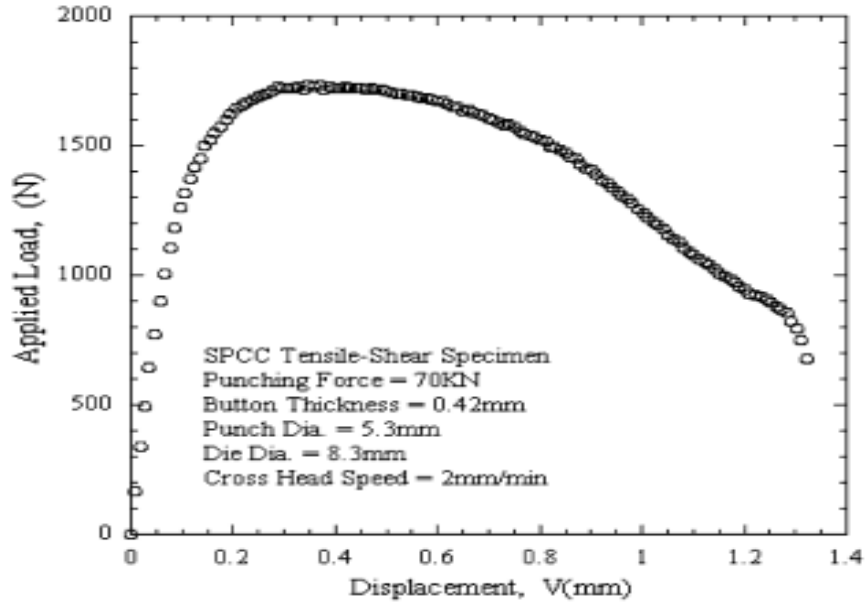


Şekil 2.3 JAC 980Y ve JSC 980 Y Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Levhaların FP Metot ve EDK ile Birleşimlerinin Çekme-Kesme Testinde Elde Edilen Yük Strok Eğrileri (Abe vd. 2014).

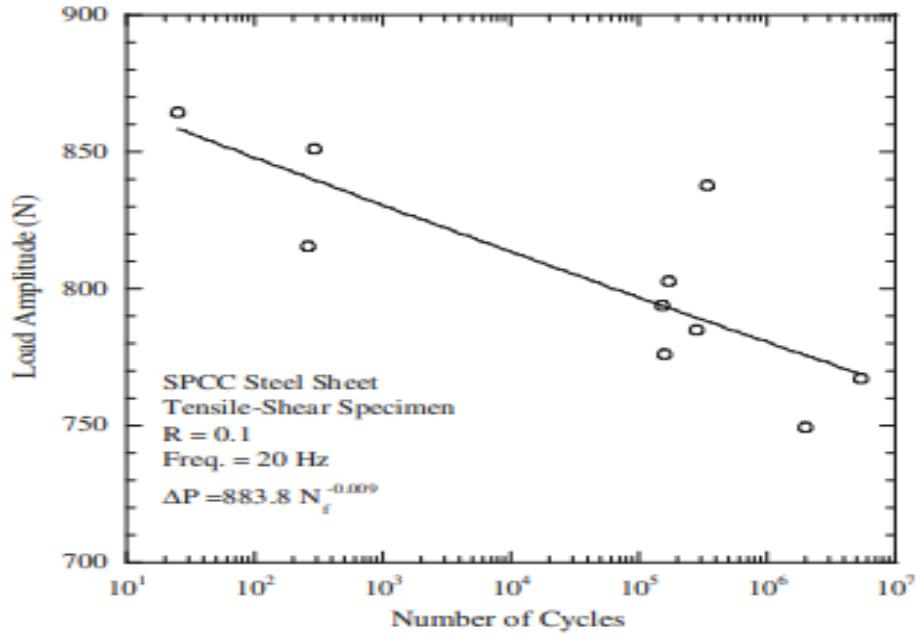


Şekil 2.4 JAC 980Y ve JSC 980Y Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Levhaların Form Punta Metot ve Elektrik Direnç Kaynağı ile Birleşimlerinin Yorulma Testinde Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları (Abe vd.2014).

Kim (2012), çalışmasında otomotiv endüstrisinde kullanılan 0.8 mm kalınlığında SPCC Soğuk haddelenmiş hafif çelik sac levhaları FP metot ile birleştirerek statik çekme ve yorulma testlerini gerçekleştirmiştir. Çekme testleri 0.2 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. FP uygulamasında farklı zımba kuvvetleri ile birleşimleri sağlanan numuneler çekme testi sonuçlarına göre 70 kN bulunan optimal zımba kuvvetine göre yorulma testine 20 Hz frekansta ve R=0.1 yük oranında hazırlanmıştır. Çekme-Kesme Testinde numunelerde üst sac boyun kısmında çatlaklar gerçekleşerek üst ve alt levhaların 1750 N da ayrıldığını tespit etmişlerdir. Yorulma testleri sonucunda ise yorulma dayanım sınırına 760 N mertebelerinde 10⁷ lik bir döngü sayısında ulaşılmıştır. Bu da çekme - kesme testinde belirlenen maksimum çekme kuvveti 1750 N'luk değerinin yaklaşık % 43'üne yaklaşmıştır. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sırasıyla çekme-kesme testi ve yorulma testi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Soğuk Haddelenmiş SPCC Çelik Sac Levhanın Form Punta Yöntemle Birleşiminin Çekme-Kesme Testinde Elde Edilen Yük-Deplasman Eğrileri Kim (2012).

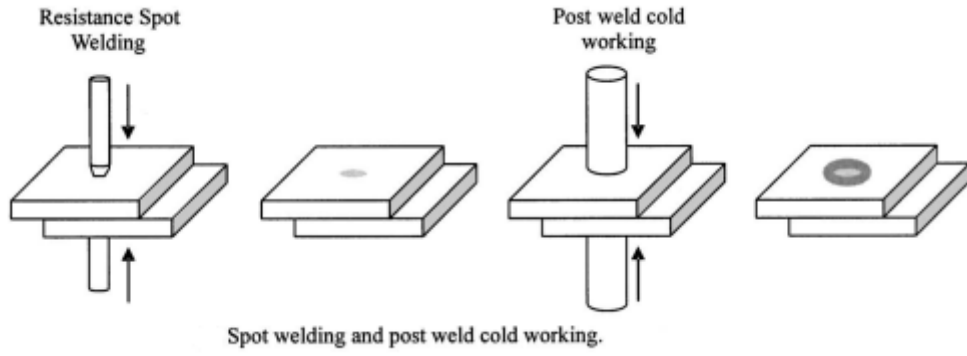


Şekil 2.6 Soğuk Haddelenmiş SPCC Çelik Sac Levhanın Form Punta Yöntemle Birleşiminin Yorulma Testinden Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları Kim (2012).

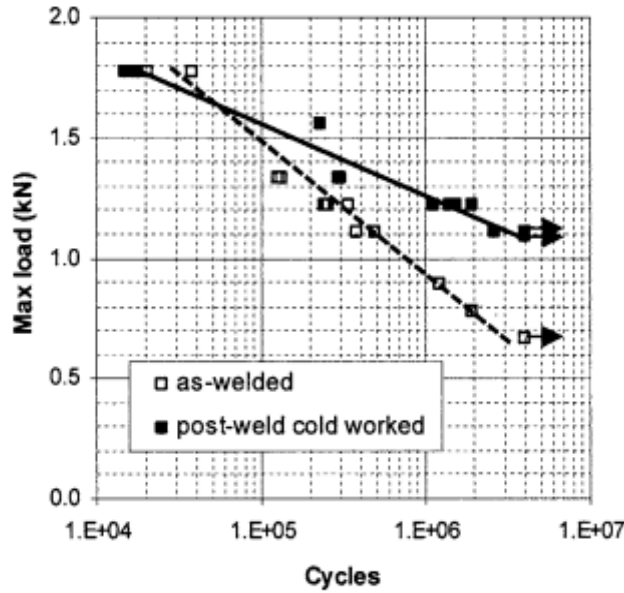
Zhou vd. (2022), yapmış oldukları çalışmalarında araç ağırlığı hafifletme çalışmaları kapsamında ilgi gören alüminyum alaşımı sac levhalar ile yüksek mukavemetli çelik sac levhaların KDP metot ile birleşimlerinin kalitesini perçin yüksekliklerinin etkisi ve sac levhaların birbirlerine göre alt üst konumda birleştirme konumuna göre incelemiştir.

Çalışmada materyal olarak Al 5052 alaşımı sac levha ile yüksek mukavemetli çelik sac levha olan SPFC 440 kullanılmışlardır. Alüminyum alaşımı sac levha için 2.5 mm kalınlık çelik sac levha için 2 mm kalınlık belirlemiştir. Birleşim kalitesi için belirlenen perçin yükseklikleri 7, 8 ve 9 mm ve perçin çapı ise 5.3 mm seçilmiştir. Yorulma testleri R=0.1 yük oranında ve 88 Hz frekansta gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Al 5052 ile SPFC levhaların birleşim performanslarının uygun olduğunu görmüşlerdir. Perçin yüksekliği metal sac levhaların toplam kalınlığından 2 ile 3 mm yüksek olduğunda burkulma ve çatlak olmadan perçinin simetrik olarak genişlediğini görmüşlerdir. Perçin yüksekliği sac levhaların toplam kalınlığını 4 ile 5 mm geçer ise bu sefer perçin kesitlerinde çatlaklar gözlemlenmiştir. Çelik ve Alüminyum sac levhaların serilme sırasına göre KDP ile birleşiminde alt taraftaki sac levhanın alüminyum ve perçin yüksekliğinin 8 mm seçildiğinde diğer perçin yüksekliklerine göre en iyi çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Sac levha birleşimlerinde kullanılan KDP perçinlerinin sac levha toplam kalınlığını 2.5 mm geçmesi durumunda ise yorulmaya karşı daha iyi bir direnç gösterdiği belirlenmiştir.

Spitsen vd. (2005), yapmış oldukları çalışmada düşük karbonlu 0.82 mm kalınlığındaki 1008 çelik sac levhayı EDK ile çekme-kesme numuneleri formunda birleştirip yorulma dayanımını artırmak amacıyla EDK işlemi sonrasında literatürde “Cold welding” olarak geçen soğuk işlem uygulamasını özel olarak tasarlanmış bir cihaz kullanılarak kaynak bölgesinde düzenli basınç bölgesi oluşturarak gerçekleştirmişlerdir. Soğuk işlem sonrası elde edilen numunelerin punta kaynağının mikro yapı ve mikro sertliğinde önemli ölçüde değişmediği ve çekme-kesme testlerinde sadece EDK ile birleştirilen numunelerle aynı verileri aldığı görülmüştür. Ayrıca soğuk işlem uygulanan numunelerin yorulma mukavemetlerinin 4 milyon döngü sayısında % 67 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Şekil 2.7 de soğuk işlem sürecine şematik olarak değinilmiştir. Şekil 2.8 de ise düşük karbonlu 1008 çeliğinin sadece EDK ile birleştirilen yorulma test sonuçları ile EDK sonrası soğuk işleme tabi tutulan yorulma test sonuçları birlikte verilmiştir.



Şekil 2.7 Düşük Karbonlu 1008 Çeliği Sac Levha Numunelere EDK ve EDK Sonrası Soğuk İşlem Uygulamasının Şematik Gösterimi (Spitsen Vd. 2005).



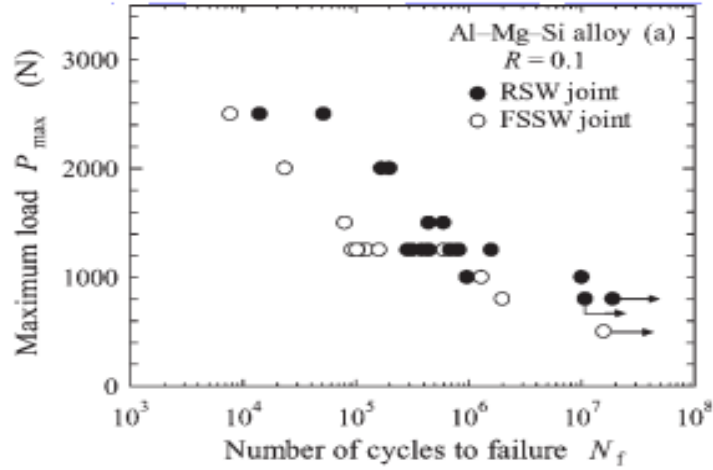
Şekil 2.8 Düşük Karbonlu 1008 Çeliği Sac Levha Numunelerin Sadece EDK Uygulaması ve EDK Sonrası Uygulanan Soğuk İşlem ile Birlikte Yorulma Grafiklerinin Yük -Döngü Sayılarının Karşılaştırılması (Spitsen Vd. 2005).

Pasarkar vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada özellikle otomotiv endüstrisinde araç parçalarının birleşimlerinin % 90 oranlarında tercih edildiği elektrik direnç kaynağının döngüsel yükler altında karşılaştığı yorulma hasarlarına karşı daha dayanıklı tasarımlar gerçekleştirmek için elektrik direnç kaynağında yorulma performansını etkileyen kaynak akımı, kaynak süresi, sac kalınlığı, çekirdek boyutu gibi parametreleri incelemişlerdir. Araştırmalarında elde ettikleri bulgular ise sac kalınlığı ile çekirdek boyutlarının artış göstermesi ile yorulma ömürlerinin artış sağladığını görmüşlerdir. Bunun nedenini ise çekirdek alanlarındaki stres konsantrasyonlarındaki azalmadan kaynaklandığını tespit

etmişlerdir. Farklı metalürjik özellik gösteren malzemelerin birleşimlerinde ise farklı termal katsayı genleşmesinden mütevellit daha düşük yorulma ömrüne sahip birleşimler gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Kaynak süreleri ve kaynak akımında yapılan değişikliklerin yorulma mukavemetinde önemli değişiklikler olmadığı sonucuna varmışlardır. Nokta çekirdeklerinde artık basma gerilmelerindeki artışın ise yorulma ömrünün arttırdığını tespit etmişlerdir.

Daneshpour vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada 2 mm kalınlıklarda çift fazlı yüksek dayanımlı çelik sac levha (DP780) ile derin çekme çeliği (DC04) sac levhayı çekme-kesme konumunda üst üste bindirerek tek nokta üzerinden EDK ve Lazer nokta kaynağı uygulayarak çekme-kesme kuvvetleri altında levhaların yorulma dayanımlarını incelemişlerdir. EDK ile birleşimi yapılan numunelerin kırılma davranışları ve yorulma ömürlerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Yorulma deneyleri sonucunda Lazer nokta kaynağı ile birleşimi gerçekleştirilen sac levha numunelerin yorulma mukavemetlerinin EDK ile birleşimi gerçekleştirilen numuneler kadar iyi olduğunu hatta EDK metodundan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Uematsu ve Tokaji (2009), yapmış oldukları çalışmada T4 ısıl işlemi yapılmış 2 mm kalınlığında Al-Mg-Si alaşımı levhaları elektrik direnç kaynağı ve sürtünme direnç karıştırma nokta kaynağı ile üst üste bindirerek çekme-kesme yorulma testleri üzerine çalışmışlardır. Yapılan yorulma testleri neticesinde yük açısından değerlendirilen yorulma mukavemeti EDK ile yapılan numunelerin birleşimler sürtünme direnç nokta kaynağı ile yapılan birleşimlerden daha yüksek çıktığı görülmüştür. Şekil 2.9 da yapılan yorulma testi çalışması neticesinde elde edilen yük-döngü sayısı grafiğinde açıkça görülmektedir. Uygulanan yükü etkin performansla taşıyan çekirdek alanına göre değerlendirdiklerinde sürtünme direnç karıştırma nokta kaynağı ile oluşturulan numune bağlantılarının yorulma mukavemetleri daha üstün çıkmıştır. Makroskopik kırılma modları ise her iki kaynak bağlantı türünde aynı özelliği göstermiştir. Çekirdek kesme kırılmaları yüksek uygulanan yük alanında, ana sac kırılmaları ise düşük uygulanan yük alanında gerçekleşmiştir.

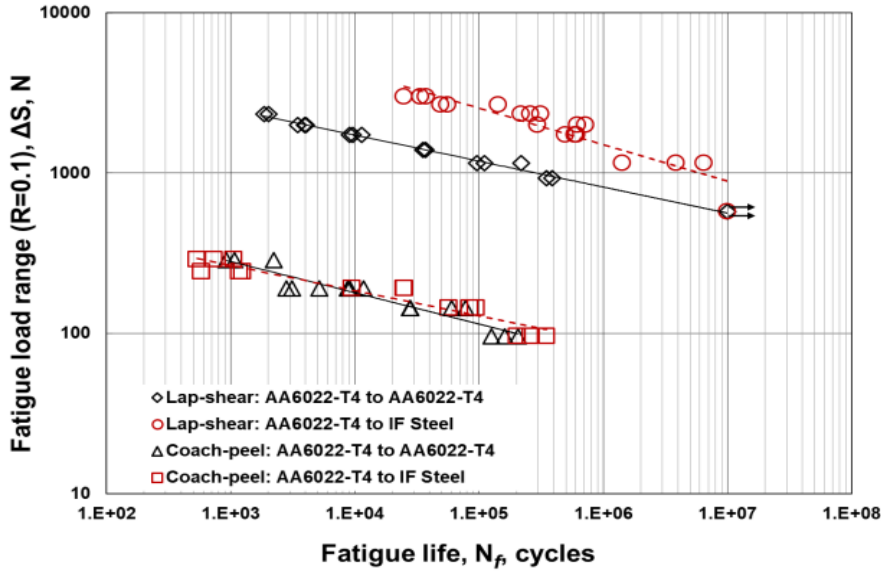


Şekil 2.9 Elektrik Direnç Kaynağı ve Sürtünme Direnç Nokta Kaynağı İle Birleşimleri Yapılan Al-Mg-Si Alaşımı Sac Levhanın Yorulma Testlerinde Yük-Döngü Sayıları Bakımından Karşılaştırılması (Uematsu ve Tokaji 2009).

Duric vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada otomotiv ve havacılık sanayinde hafif tasarımların gereği olan farklı malzemelerin tek bir yapıda birleştirilmesinde malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin farklılığından kaynaklanan birleştirilme zorluğunda bu endüstrilerde sık kullanılan elektrik direnç kaynağının iyi cevap vermemesinden dolayı son zamanlarda EDK 'ye alternatif olarak geliştirilen Direnç elemanı kaynağı ile 1 mm kalınlığında AW 5754 H22 alüminyum alaşımı sac levha ile 1.5 mm kalınlığında DP500 çelik sac levhanın birleşimlerinin tepe yükünü, mikro yapısını, mikro sertliğini ve yorulma dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada direnç elemanı kaynağı ile birleştirilen numunelerin EDK 'ye göre birleştirilen numunelere göre daha düşük kaynak akımlarında daha emniyetli birleştirildiğini göstermiştir. Tepe yükünü bağlantıda 2300 ile 2500 N değerleri arasında bulmuşlardır. Yorulma sınırını 882 N değerlerinde tespit etmişlerdir.

Rao vd. (2018), yapmış oldukları çalışmalarında General Motors'un alüminyum sac levha ile çelik sac levhaların birleşimleri için özel olarak tasarladıkları Çoklu Halka Kubbeli (MRD) elektro geometri kullanan tescilli bir elektrik direnç kaynağında 1.2 mm kalınlığında 6022-T4 alüminyum sac levhalar ile 2 mm kalınlığında IF çeliği sac levhaları çekme-kesme testlerine ve soyma testlerine uygun birleştirip yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Test sonuçlarını 1.2 mm kalınlığında 6022-T4 alüminyum sac levha ile 2 mm kalınlığında 6022-T4 sac levhanın EDK ile yapılan birleşmeleriyle

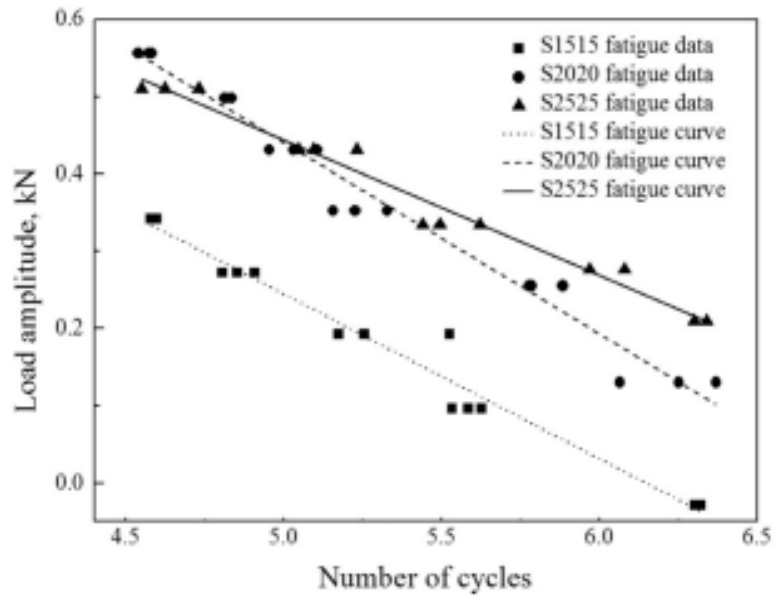
karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda GM (General Motor) için tasarlanan MRD elektrodu kullanılarak tasarlanan EDK'nın 6022-T4 sac levha ile IF çeliği sac levhanın kaynaklı birliğinin mümkün olduğunu göstermiştir. Yapılan çekme testlerinde çekme-kesme konfigürasyonunda gerçekleştirilen bağlantılar ile soyma konfigürasyonunda birleştirilen bağlantılarında 6022-T4 ile IF çeliğinin bağlantılarının sadece 6022 -T4 alaşımı sac levhaların kendi aralıklarında yapılan bağlantılarından daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir. Yorulma testinde de yorulma ömürleri çekme testinde olduğu gibi benzer şekilde 6022-T4 alüminyum alaşımı ile IF çeliği bağlantılarının sadece 6022-T4 alüminyum alaşımı sac levha bağlantılarından daha yüksek yorulma ömürlü olduğu belirlenmiştir. Yapılan yorulma testi çalışmalarına Şekil 2.10 da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Çekme-Kesme ve Soyma Konfigürasyonlarına göre Birleştirilen AA6022-T4 ile IF Çeliği Sac Levhaların ve Sadece AA 6022-T4 Sac Levhaların Kendi Aralarındaki Birleşimlerinin Yorulma Testlerinden Elde Edilen Yük-Döngü Sayıları (Rao vd. 2018).

Zhao vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada Al 5052 alaşımı sac levhayı çekme kesme konfigürasyonunda üst üste bindirmeli bir şekilde tek nokta üzerinden KDP sac bağlantı metodu ile birleştirip bağlantıların yorulma davranışlarını farklı sac kalınlıklarında birleşimi yapılan numunelere göre incelemişlerdir. Çalışmada sac levha kalınlıkları 1.5, 2 ve 2.5 mm seçilmiştir. Ayrıca KDP metot için perçin boyları da 1.5 mm sac levha kalınlığı için 5 mm, 2 mm sac levha kalınlığı için 6 mm ve 2.5 mm sac levha kalınlığı için 7 mm seçilmiştir ve perçin çapı ise 5.3 mm'dir. Sac levha bağlantılarının yorulma

testi neticesinde elde edilen yorulma ömürleri, arıza modları, arıza konumları ve aşınma hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde sac kalınlığının artması ile mevcut bağlantıların yorulma ömründe artış olduğunu fakat yorulma ömründeki artışın kısıtlı olduğunu görmüşlerdir. Sac levha bağlantı noktalarının yorulma arıza modları ise sac kalınlığından etkilenmemiştir. Sac levha bağlantı noktaları levha ara yüzlerinde aşınma meydana geldiği için kırılmıştır. Bu süreç yorulma testi esnasında sac levha ara yüzlerinde çatlakların başlayıp ilerlemesine neden olmuştur. Şekil 2.11’de yorulma grafiği verilmiştir.



Şekil 2.11 Farklı Sac Kalınlıklarındaki Numunelerin SPR Metot ile Birleşimlerinin Yorulma Testi Sonrası Elde Edilen Kuvvet-Döngü Sayısı Eğrileri (Zhao Vd.2015).

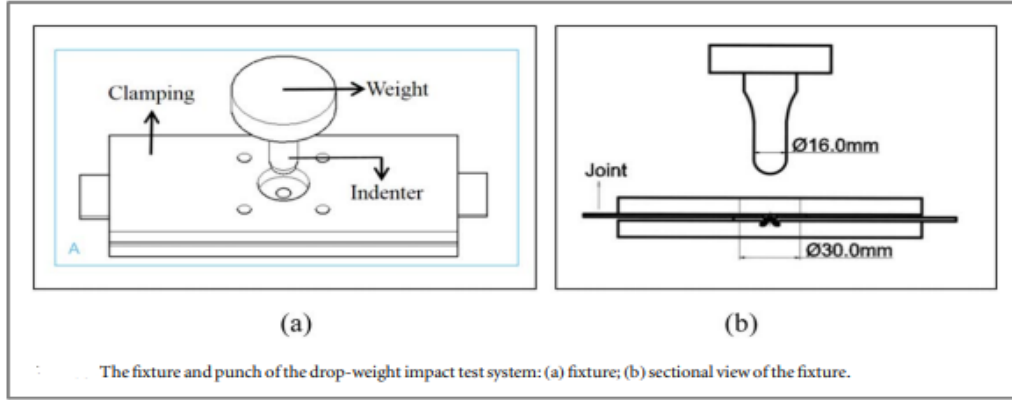
Su vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada alüminyum sac levhaların özellikle EDK ile yapılan birleştirmelerde çekirdek içlerinde boşluklar ve hatalar oluşması nedeniyle oluşan zayıf kaynak bağlantılarına alternatif olarak düşünülen KDP yöntemi ve FP yöntemi ile farklı kalınlıklardaki 6111-T4 alüminyum alaşımı sac levhaların bindirmeli kesme konfigürasyonunda birleştirerek yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yarı statik ve periyodik yükleme şartları altında bağlantıların uğradıkları hasardan önce ve sonra optik mikro grafiklerini incelemişlerdir. Yarı statik yükleme şartları altında hasar modları KDP metot için perçinin bağlantı noktasından ayrılması FP metotta ise birleşim bölgesinin düğme formunu andıran yapısının çözülmesi ile oluşmuştur. Döngüsel olmayan yükleme

koşullarında ise her iki bağlantı için yorulma çatlakları üst konumdaki levhaların arayüz bölgelerinde başlar ve üst tabakaya doğru ilerleyerek büyüdüğü görülmüştür. Çalışmada 6111-T4 alaşımı levhanın gerilim ömrü ve yorulma ömürlerini tahmin etmek için Tran ve Pan (2014)'ın son çalışmalarındaki yapısal stres modelini referans almışlardır. Yorulma ömrü tahminlerinin yapılan yorulma testleriyle uyum açısından paralellik gösterdiğini tespit etmişlerdir.

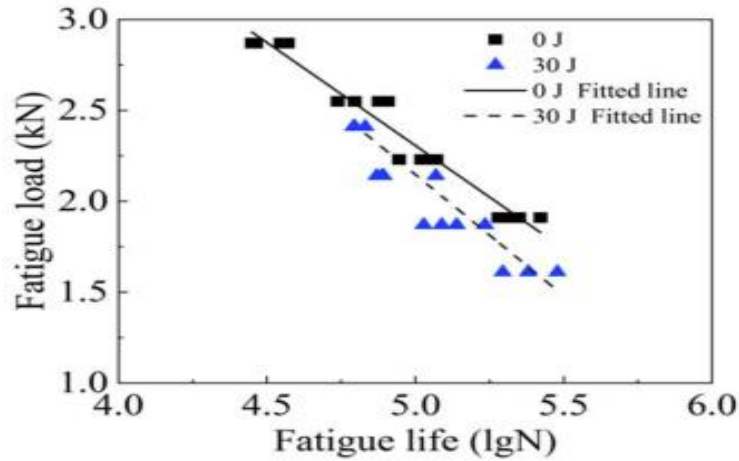
Kang ve Kim (2015), yapmış oldukları çalışmada 1.5 mm kalınlığında Al 5052 alaşımı sac levhaları soyma, çapraz germe ve çekme-kesme konfigürasyonlarında birleştirerek yorulma mukavemetlerini belirlemişlerdir. Birleştirme konfigürasyonları için yorulma ömrünü 10^6 çevrim döngüsü olarak kıstas almışlardır. Yapılan yorulma testlerinde yorulma dayanım sınırlarının statik dayanım sınırlarına oranları bağlantı konfigürasyon sıralarına göre % 11, % 14 ve % 34 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar özellikle soyma ve çapraz germe konfigürasyonlarının yorulma dayanımlarının çok düşük olduğunun göstergesidir. Yorulma çatlağı başlangıçları ise üst ve alt sacların arasında aşındırma hasarı sebebiyle gerçekleşmiştir.

Zhao vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada araç gövde yapılarının seyir esnasında karşılaştığı genelde düşük hızlı darbelerin çarpışma, yağmur ve dolunun araç panellerine düşmesi, yollardan sıçrayan taşlar vb. etkilerini 2 mm kalınlığında 6061-T651 alüminyum sac levhaların ve 1.5 mm kalınlığında yüksek dayanımlı çelik DP 590 sac levhayı KDP metot ile birleştirerek bağlantıları düşük hızlı 5J, 10J, 20J ve 30J darbe enerjilerinde 25°C oda sıcaklığında yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Şekil 2.12 de düşük hızlı darbe testinin şematik olarak gösterimi gösterilmiştir. Yapılan testler neticesinde KDP bağlantılarının soğurduğu darbe enerjisi 30J darbe enerjisinde kritik değerlere ulaştığı görülmüş Bağlantıların büyük darbe enerjilerini soğurması sonucu levhalarda çatlaklar gözlemlendiği ve kenetlenme performansının azaldığını tespit etmişlerdir. Bağlantıların ise 30 J darbe alması durumunda bağlantının statik dayanım özelliğinin % 16 oranında azaldığı ve absorbe edilen enerjinin % 36 oranında azaldığı tespit edilmiştir. KDP bağlantılarında ise yorulma ömürlerinin düşük darbe hızlarında azaldığı ve periyodik yüklemelere karşı daha duyarlı olduğu yapılan yorulma testlerinde görülmüştür.

Şekil 2.13 te bu sonucu açıklayan yorulma testinden elde edilen yük-döngü sayısı grafikleri görülmektedir. Yorulma hasarları ise sünek kırılma ve yorulma kırılması türünde gerçekleşmiştir.



Şekil 2.12 Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sisteminin Fikstürü ve Zımbası: (a) Fikstür; (b) Armatürün Kesit Görünüşü (Zhao Vd. 2022).



Şekil 2.13 Numunelere Uygulanan Darbelerin KDP Bağlantılarının Üzerinde Yorulma Ömrüne Etkisi (Zhao Vd. 2022).

Woo (2022), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında çevre sorunları gidermek amacıyla yapılan araç hafifletme çalışmaları kapsamında farklı malzemeli otomotiv yapılarının birlikte kullanılmasının kaçınılmaz hale gelmesi sebebiyle geleneksel sac bağlantı yöntemlerinden elektrik direnç kaynağının bağlantı performanslarında da eksik kalmasından dolayı farklı sac levhaların birleştirilmesinde gerek mukavemet gerek ekonomik açıdan iyi bir alternatif sunan KDP metot ile farklı kalınlıklarda tek eksen ve çok eksen çapraz germe ve çekme kesme konfigürasyonunda birleştirilen Al 6016

alaşımı sac levha ile DX54D çelik sac levhanın yorulma ömürlerini tahmin etmek için yorulma testleri gerçekleştirdiler. Çalışmada sonlu elemanlar metodu yaklaşımıyla özellikle endüstride yaygın olarak kullanılan EDK'nin yorulma ömür tahminlerinde iyi cevap veren diğer bir modeli baz alan "ncode DesignLife" ticari yazılımıyla analizler yapıp bağlantıların KDP metot ile EDK metodun yorulma ömürleri açısından uyumluluğunu ölçmüşlerdir. Yapılan analizler neticesinde diğer bir modelinin tek eksenli KDP numuneleri ile uyumlu ilerlediği tespit edildi.

2.1 Yorulma

Makine sistemlerini oluşturan parçalar, sistemin çalışması esnasında periyodik olarak ve değişkenlik gösterebilen birbirini tekrar eden yükler ve titreşim etkisi çerçevesinde çalışmaktadır. Makinenin çalışma süresi esnasında makine parçalarında oluşan gerilmeler malzemenin akma dayanımından daha düşük bir değerde oluşmasına rağmen belirli bir tekrar sayısı dâhilinde makine parçalarını oluşturan malzemelerin yüzeyinde genelde bir çatlak başlangıcı ile malzeme iç kısmına doğru çatlağın yayılması sonucu malzemede kopma gerçekleşir bu olaya ise yorulma denir. Makine parçalarında kırılma olaylarının % 90 ile % 95'i yorulmadan kaynaklanmaktadır. Yorulma olayında makine parçalarının çalışma esnasında değişken yük zorlamalarına ve parçaları oluşturan malzemelerin davranışlarına matematiksel olarak yanıt verebilecek kabul edilebilir bir çalışma da henüz tamamlanmamıştır (Öztürkler 1998).

2.1.1 Yorulma Mekanizmasının Tarihçesi

Makine sistemlerinde genelde beklenmedik bir süreçte hasarlara yol açan yorulma olayı ilk kez 1830 senesinde W.A. Albert ile incelenmiştir. Fakat tekrarlı değişebilen gerilmeler sebebiyle oluşan ilk büyük tahribat 1840'lı senelerde demiryolu endüstrisinde gerçekleşmiştir. Oluşan kırılma tahribatlarının tren vagonlarının aks kısımlarında kesit değişiminin olduğu bölgelerde gerçekleştiği dikkatlerden kaçmamıştır. Kırılma olayının gerçekleştiği parçaların görevlerini belirli bir süreç dâhilinde yerine getirdiği bakış açısı ile tekrarlı bir şekilde uygulanan yüklere karşı makine parçalarını oluşturan malzemelerin dayanım gücünün düştüğü ve bunun sonucu çerçevesinde malzemenin yorulmaya uğradığı düşünce ilk kez 1840 ile 1850 yılları arasında ortaya sürülmüştür. Yorulma ile

İlgili ilk sistemli çalışmalar ise 1850 ile 1860 seneleri arasında Almanya 'da Agust Wöhler tarafından gerçekleştirilmiştir. Tren vagonlarının aksları ile gerçekleştirilen bu sistemli çalışmalarda Wöhler, kendisinin geliştirdiği yorulma cihazı ile çalışmıştır. Metal malzemeler ile yapılan deney çalışmalarında tatbik edilen yüklerin büyüklük değerleri üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından faydalanarak yorulma olayında tatbik edilen üst limit gerilmeden ziyade gerilme aralığının önemli olduğu tespit edilmiştir. İlk kez Wöhler'in katkıları ile gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramı kullanılarak belirli bir gerilme verisi altındaki değerlerde deney numunelerinin kırılmaya uğramadığı belirtilmiştir. 1850 ile 1865 seneleri arasında “ Hodgkinson ve Fairbain tarafından kiriş sistemleri üzerinde tekrarlı eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Statik yükleme sonucunda 120 kN altındaki değerlerde kırılma olayı gerçekleşirken tekrarlı yükleme durumunda 30 kN değerinde yük, kırılmanın gerçekleşmesine yeterli gelmiştir. 1870 ile 1890 'lı senelerde gerçekleştirilen Wöhlerin klasik deney çalışmaları farklı araştırmacılar tarafından genişletilerek devam ettirilmiştir. 1900'lü senelere gelindiğinde yorulma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için optik mikroskoplardan faydalanılmıştır. Mikro çatlakların oluşmasından kaynaklı bölgesel kayma doğrultuları ve kayma bantlarının önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Sayaca 2010).

2.1.2 Yorulma ile İlgili Kavramlar

Yorulma mekanizması araştırmalarında özel terimler mevcuttur. Yorulma konusunun iyi anlaşılabilmesi için bu terimleri tanıtmak fayda sağlayacaktır.

Çevrim: Yorulma cihazlarında zamanla sinüzoidal bir değişme gösteren yük (gerilme) deney numunelerine uygulanır Şekil 2.15'te belirtildiği üzere (gerilme-zaman) eğrisinin periyodik bir şekilde tekrar eden en küçük parçasına çevrim denir.

Maximum Gerilme (σ_{max}): Deney aşamasında tatbik edilen gerilmeler içerisinde cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmedir. Gerilmeler çekme türünde olduğunda pozitif (+) işaret, basma türünde olduğunda ise negatif (-) işaret değerleri ile sembolize edilir.

Minimum Gerilme (σ_{min}): Deney aşamasında tatbik edilen gerilmeler dahilinde cebirsel olarak en küçük değere sahip olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme (σ_{ort}): Maksimum ve minimum gerilmelerin ortalamasıdır.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$

Gerilme Aralığı (σ_r): Maksimum gerilme ile minimum gerilmeler arasındaki farktır.

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Gerilme Genliği (σ_a): Maximum ile minimum gerilmeler arasındaki farkın yarısıdır.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \text{ (MPa)} \quad (2.3)$$

Gerilme Oranı (R): Maksimum gerilme değerinin minimum gerilme değerine oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (2.4)$$

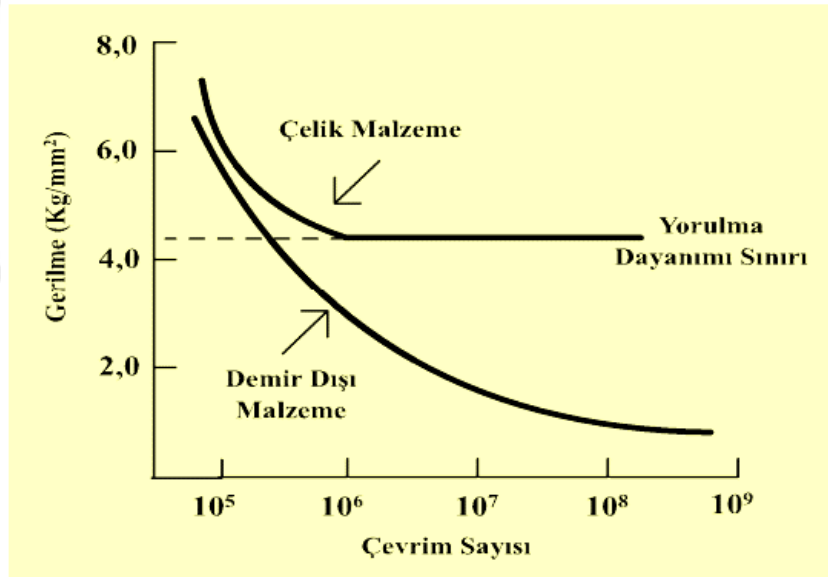
Çizelge 2.1 Yorulma Gerilmesi Oranları (Sakin 2004).

Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yüğü Modu
R=1	Statik
R=0	Çekme -Yüksüz
0<R<1	Çekme-Çekme
R= -1	Çekme-Basma, Tam Değişken
-1<R<0	Çekme-Basma

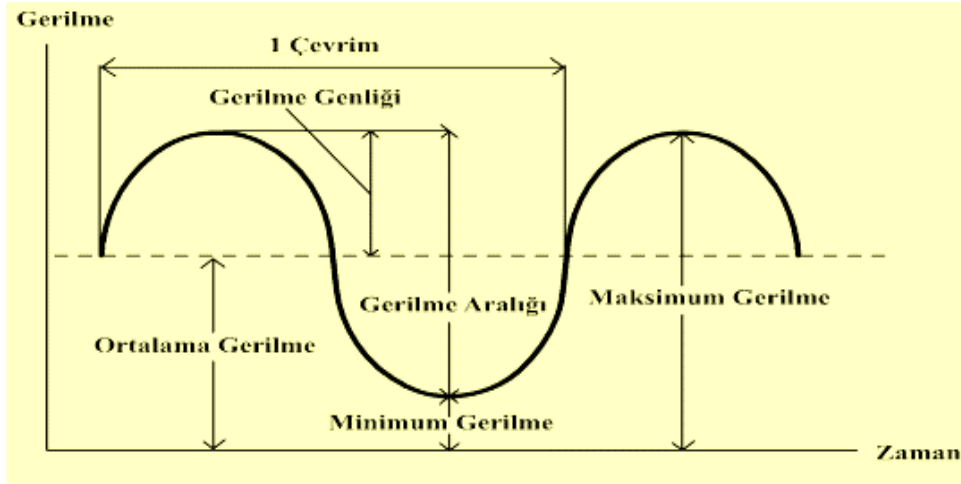
S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)

S-N diyagramı yorulma testlerinde farklı sabit gerilme değerleri içerisinde deney numunelerinde, kaç çevrim işlemi sonucunda çatlak oluşacağına ya da kırılma olacağını belirten bağıntıyı sunar. S-N eğrilerinin oluşturulması yorulma testlerinde genelde sekiz ile on iki adet birbirine benzer deney numuneleri kullanılır. Tüm deneylerde deney süresince ortalama gerilme değeri sabit kalmak şartıyla deney numunelerinin her bir adetine farklı periyodik gerilme değerleri uygulaması yapılarak deney numunelerinin

çatlama ya da kırılma sürecine kadar oluşan çevrim sayısı (N) tespit edilmeye çalışılır. Deneyselerde küçük gerilme değerleri içerisinde çatlamların oluşacağı çevrim sayısı büyük değerler alacağından, önceden tespit edilmiş çevrim sayısına kadar deney süreci sürdürülerek deney numunelerinin malzeme davranışları gözlem yapılır. Yapılan deneylerin tamamında gerilme genlik değerleri sabit alınır. Gerilme eksenini olarak sembolize edilen ordinatta genel olarak doğrusal bazen ise logaritmik skala tercih edilir. Yine bu ekseninde ya maksimum gerilme ya da minimum gerilme ya da gerilme genliğinden biri kayıt altına alınır. Deneyde çevrim sayısı olan apsiste ise genel olarak logaritmik skala tercih edilir. S-N eğrileri genel olarak 10^6 çevrim sayısından sonra asimptotik bir hal alırlar. Şekil 2.14'te yorulma deneylerinde meydana gelmiş Wöhler eğrisi gösterilmiştir (Kılıç 2008).



Şekil 2.14 Yorulma Testlerinden Elde Edilmiş Wöhler Diyagramı (Kılıç 2008).



Şekil 2.15 Yorulma Testlerinde Gerilme-Zaman Diyagramı (Kılıç 2008).

Yorulma Ömrü: Deney numunelerini periyodik tekrarda gerilime tabi tutulduğunda numunelerin ne kadarlık bir zaman dilimi içerisinde dayanabileceğinin ölçüsüdür.

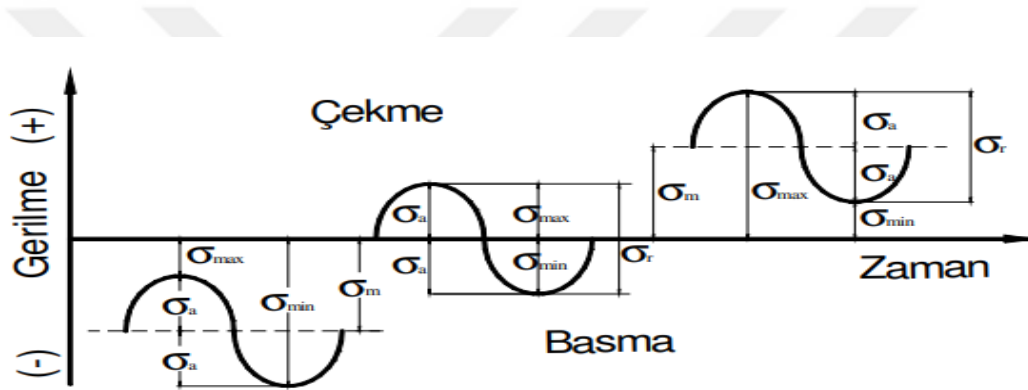
Yorulma Sınırı: Yorulma mekanizması ile kopmanın hiçbir türlü gerçekleşmediği gerilim değeridir. Tatbik edilen gerilim değeri (S) ve döngü sayısı (N) paralel bir seyir alır.

Yorulma Dayanımı: Genelde alüminyum alaşımlarının birçoğu ve çeşitli materyaller gerçek yorulma sınır değerlerine sahip değildir. Bu materyaller için minimum yorulma ömrü tayin edilebilir. Bu durum sonucu içerisinde yorulma dayanımı zaman periyodu içerisinde yorulmanın gerçekleşmediği yorulma dayanım değerinin altında yer alan gerilim değeridir. Alüminyum alaşımlarında 500 milyon çevrim, yorulma dayanımı için referans alınır (Sayaca 2010).

2.1.3 Yorulma Olayında Tekrarlı Yükler ve Gerilme Tipleri

Mühendislik malzemeleri üzerindeki yükler, belirli zaman diliminde ve belirli sürelerde tatbik ediliyorsa bu tarz yüklemelere tekrarlı yükler, meydana gelen gerilmelere ise tekrarlı gerilmedir. Örnek sunmak gerekirse; araba aksları, motor şaftları, dişliler, yaylar vb. makine elemanlarının maruz kaldığı yükler ve gerilmeler, tekrarlı yükler ve gerilmelerdir.

Bu sebepten dolayı tekrarlı yük ve gerilmenin gerçekleşmesi yorulma olayını meydana getirir. Tekrar eden etki altında gerilmelerin oluştuğu maksimum ve minimum değer aralıklarının basınç ya da çekme olmasına göre Şekil 2.16’da belirtildiği gibi karakteristik açıdan üç farklı çevrim bölgesi düşünülebilir. Bu bölgelerden birincisi, uygulanan kuvvetin negatif değerden bir diğer negatif değere geçtiği bölgedir. Bu bölgeye negatif tekrar bölgesi ya da basma tekrar bölgesi denilir. Bu bölgelerin ikincisinde uygulanan gerilme, çekme ile basma değerleri arasında değişim gösterir bu da alternatif bölge olarak isimlendirilir. Üçüncü bölgede uygulanan gerilme pozitif bir değerden yine başka bir pozitif değere geçiş gösterir. Bu bölgeye de pozitif tekrar bölgesi ya da çekme bölgesi denir (Eskizeybek 2006).



Şekil 2.16 Tekrarlı Gerilme - Zaman Eğrileri (Eskizeybek 2006).

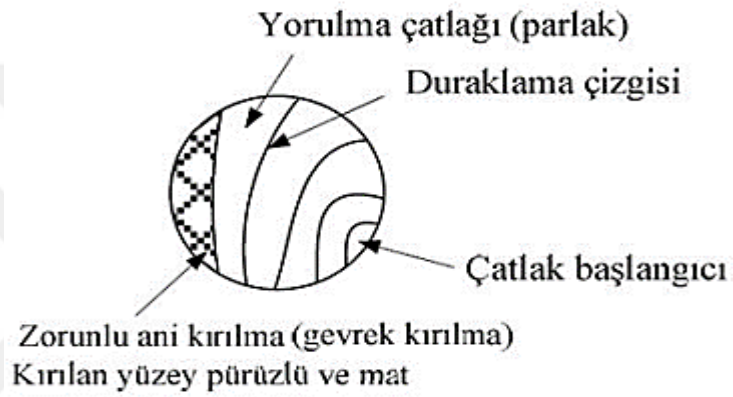
2.1.4 Yorulma Mekanizması

Yorulma mekanizmasını üç farklı aşamada tanımlamak gerekirse; çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılmadır. Şekil 2.17’de yorulma çatlak oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 2.17 Yorulma Çatlak Oluşum Aşamaları (Efe 2018).

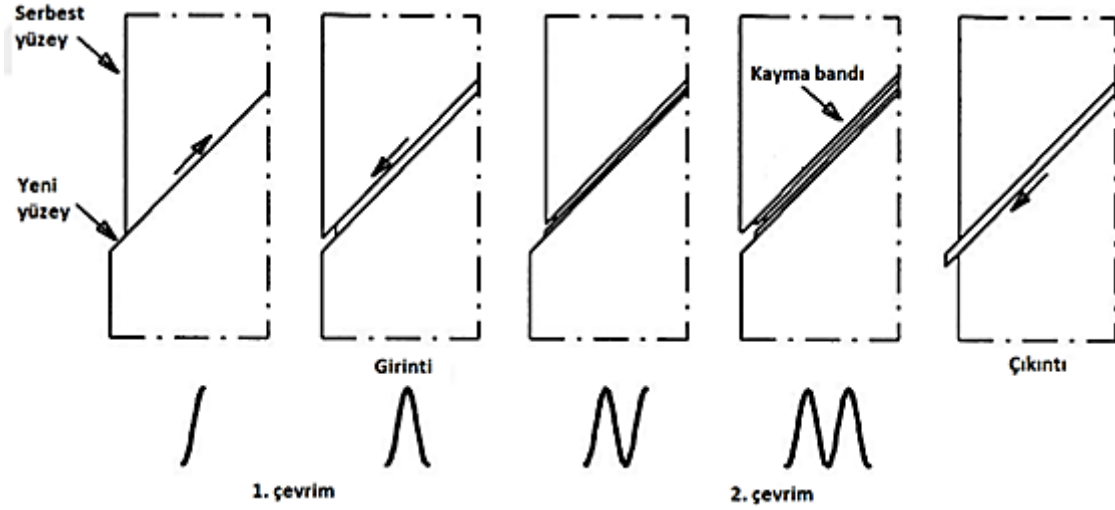
Yorulma temelli kırılmalar, rutin gerçekleşen kırılmalardan farklıdır. Makine bileşeni veya deney numunelerinde çatlak yüzeyinin bütünlüğü gevrek ya da sünek olarak gerçekleşen kırıklarla mukayese edildiğinde farklılıklar sergilemektedir. Makro gözlem ile Şekil 2.18’de çatlak başlangıç aşamaları, çatlak büyüme bantları ile nihai kırılma gözlemlenmektedir. Yorulmada nihai kırılma, deney numunesi veya makine bileşeninin yüzey durumu ile kullanılan materyalin süneklik yâda kırılmalık özelliğinden dolayı farklılık gösterebilir (Efe 2018).



Şekil 2.18 Yorulma Çatlak Yüzeyleri (İnt. Kyn. 3).

2.1.4.1 Yorulmada Çatlak Başlangıcı

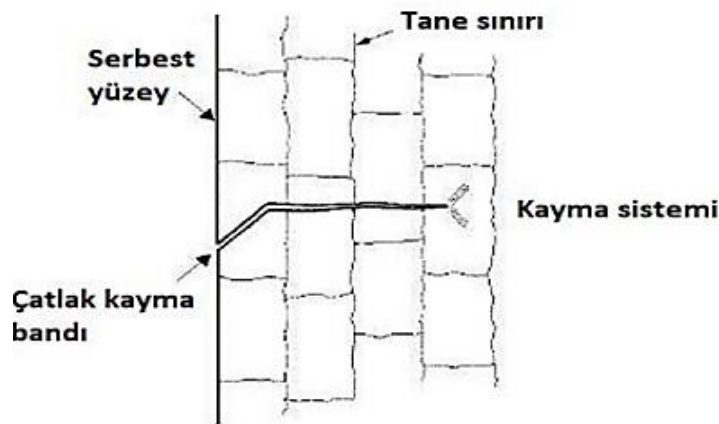
Yorulma sürecinde ilk aşama çatlak başlangıcı olarak isimlendirilir. Yorulma olayı materyalin serbest yüzeylerinden kaynaklanır. Plastik deformasyon sınırları altında kuvvetler yalnızca belirli sayıda tanelerde etkilidir. Yorulma aşamasında her bir gerilme çevrimi, Şekil 2.19’da gözlemlendiği üzere kayarak tanenin serbest yüzeylerinde bir plastik deformasyon çevrimine sebep olur. Tekrarlanan yükleme, yeni serbest yüzeylere ve yorulma çatlak başlangıç sürecinin devam etmesine sebep olur. Çatlak başlangıcı periyodu materyalin yüzey şartlarına bağlıdır (Efe 2018).



Şekil 2.19 Çevrimsel Kayma ile Çatlak Başlangıç Aşamaları (Efe 2018).

2.1.4.2 Yorulmada Çatlak İlerlemesi

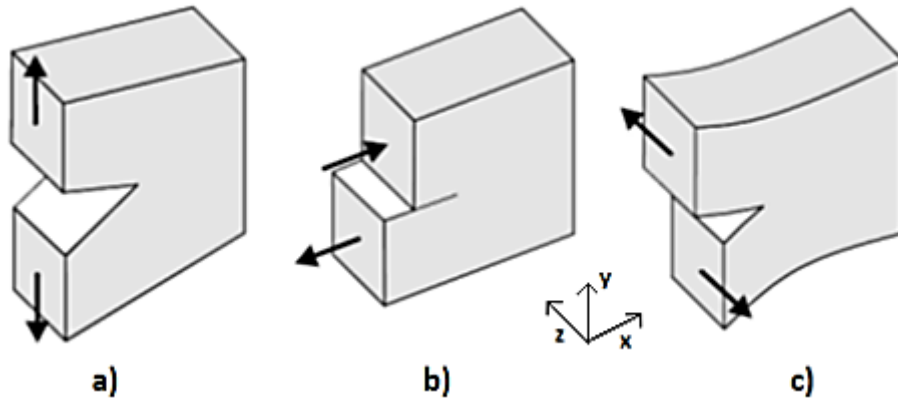
Mikro yapı ölçeklerinde tane kayma bantlarının serbest yüzeylerinde oluşmaya başlayan yorulma çatlak oluşumları, gerilme şiddet değerlerinin artmasını sağlamakta ve bu yük şartlarında kayma düzlemi istikametinde çatlakların büyümesine sebep olmaktadır. Kayma bantı istikameti doğrultusunda çatlak ilerlemesine birinci aşama ilerleme denir. İkincil aşamayı ise maksimum gerilme istikametinde normal bir şekilde ilerlemeye başlayan kayma bantları doğrultusunda ilerleyen çatlaklar olarak tanımlamak mümkündür. Yorulma çatlak ilerlemeleri mikro ölçekte Şekil 2.20’de şematik olarak gösterilmiştir (Efe 2018).



Şekil 2.20 Mikro Ölçekte Gerçekleşen Çatlak İlerlemesi (Efe 2018).

2.1.4.3 Nihai Kırılma

Malzeme boyunca çatlak oluşumlarının ilerlemesi durumunda kesit alanı azalır, çevrimsel yükleme ile tatbik edilen kuvvet gerilme sınır değerlerini aşarak sünek ya da gevrek kırılma meydana gelir. Kırılma modları Şekil 2.21’de şematik bir şekilde gösterimi sunulan 3 ana gruba ayrılır. Sınıflandırma işleminde yükleme yönü ve malzemenin tepkisi önemsenmiştir. Mod I (Açma Modu), malzemenin y yönündeki doğrultuda çekme kuvvetleri tarafından yüklenmesi ve çatlak yüzeylerinin aynı yön doğrultusunda birbirinden ayrılma göstermesidir. Mod II’de (Kayma Modu) malzeme çatlak yüzeylerine paralel olan kesme kuvvetleri vasıtasıyla yüklenir. Çatlak yüzeyleri birbiri üzerinde x doğrultusunda kayma gösterir. Mod III’te (Yırtılma Modu), malzeme z yönündeki kesme kuvvetleri ile yüklenir. Çatlak yüzeyleri yükleme yön doğrultusunda birbiri üzerinde kayma gerçekleştirir (Efe 2018).



Şekil 2.21 Kırılma Modları a) Mod I b) Mod II c) Mod III (Şen 2015).

2.1.5 Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Makine parçalarının yorulma hasarına karşı gösterdiği performansı birçok parametre belirler. Bunlar, gerilme (yük), parçaların geometrik şekilleri ve özellikleri ve dış ortam ile alakalı parametrik değerlerdir. Gerilme parametrelerini genişletmek gerekirse; gerilmenin durumu, gerilme oranı, gerilme genliği, sabit veya değişken yükleme frekansı ve maksimum gerilmeyi kapsar.

Parçaların geometrik şekilleri ve özellikleri parametrelerini de genişletmek gerekirse; gerilim arttırıcılar, gerilim eğimi, boyut, esas metal ve ilave olarak kaynak işlemlerinin metalürjik ve mekanik özelliklerini içerir Dış ortam parametreleri ise sıcaklık ve agresif çevre koşullarıdır (Yıldırım 2010).

2.1.5.1 Malzemenin Çekme Mukavemeti

Genelleme yapmak mümkünse malzemelerin çekme mukavemetleri artış gösterdikçe yorulma dayanımlarında da artış olur. Örnek vermek gerekirse; demir alaşımları ve titanyum alaşımlarındaki ara yer atomu durumundaki alaşım elementleri malzemenin çekme mukavemet değerlerini artırarak malzemenin yorulma dayanımını da artırır. Malzemelerde sadece yorulma dayanımında artış sağlayan bir alaşım elementi mevcut bulunmamaktadır. Malzemelerin çekme dayanımlarını yükselten uygulamalar aynı süreç içerisinde yorulma dayanımlarını da yükseltir. Bilhassa ideal su verme ve menevişleme sonrasında sertlik ve çekme dayanımı yükselen çelik malzemelerin yorulma dayanımları da yükselir. Su alma derinlikleri alaşım elementleri vasıtası ile artış gösteren çelik malzemelerde ısıl işlem ile yorulma dayanımında yükseliş görülmektedir. Ayrıca sünek malzemelerde inklizyon ve segregasyon gibi çekme mukavemet dayanımlarını düşüren olumsuz durumların önlenmesi de yorulma dayanım değerlerini artırır. Özet olarak malzemelerin mekanik mukavemetlerini yükselten uygulamaların tümü yorulma dayanımını da yükseltir (Özçelik 2013).

2.1.5.2 Çentik Faktörü

Yorulma sonucu gerçekleşen kırılmalar, mutlaka gerilmelerin yoğunlaştığı noktalardan başlar. Malzeme kesitlerinde delik işlemi, çentik, kama yuvaları gibi ani kesit değişimleri malzemelerde gerilme yığılmalarına neden olduğundan dolayı yorulma dayanımı performansını azaltır. Yine malzeme üretim sürecinde yüzeylerde oluşan pürüzlülükler çentik etkisi meydana getirebilir. Bu durumları önlemek için malzeme ana çekme gerilmesi istikametinde taşlama işlemine tabi tutulurlar. Çizikler gerilme eksenine paralel doğrultuda olunca gerilme dayanım değeri en yüksek değerine çıkar. Çizelge 2.2’de çentiklerin boyut ve şeklinin yorulma dayanımına etkisi verilmiştir (Özçelik 2013).

2.1.5.4 Yükleme Şeklinin Etkisi

Yorulma safhasında üç ana yükleme şekli vardır bunlar; aksenal, eğilme ve burulmadır. Tam değişken aksenal yorulma ile tespit edilen yorulma dayanımı eğilme ile tespit edilen değer % 85'ine tekabül etmektedir. Tam değişken burulmada saptanan bu değer ise % 58 dir. Bu sebeple teste tabi tutulacak numune, servis şartlarında hangi tür yükleme tipine tabi olacaksa ona göre yükleme tipi seçilmesi gereklidir. Ayrıca numunelerin tek tip yüklemelere tabi kalmadığı da dikkatlerden kaçmamalıdır. Bu sebep ile ilgili numunelerin servis şartlarında hangi yükleme tiplerine tabi tutulduğu kayıt edilip teknolojisi gelişmiş yorulma deney cihazlarında deneyler yapılabilir (Özçelik 2013).

2.1.5.5 Frekans Etkisi

Normal şartlar altında frekansın, yorulma dayanımı üzerinde etkisi önem arz etmediğinden dolayı belirlenememiştir. Bu nedenden ötürü yorulma testlerini uygularken test sürelerini azaltmak istersek yüksek frekans değerleri uygulayan test cihazlarından faydalanılabilir. Düşük karbonlu çelikler ile alüminyum alaşımı ve bakır gibi malzemelerde frekans değerlerinin yükseltilmesi yorulma dayanım sınırını yükselttiği belirlenmiştir. Buna rağmen yüksek frekans değerlerinde çalışmada malzeme üzerinde ısıl gerilmeler oluşabileceğinden dolayı deney sonuçları olumsuz bir hal alabilir (Yılmaz 2020).

2.1.5.6 Parça Büyüklüğünün Etkisi

Genel olarak, çelik parçaların büyüklüğü artış gösterdikçe yorulma dayanımları düşüş gösterir. Yorulma testlerinde deney çubuklarının çap ölçüsü 6 mm'yi geçtiği takdir küçük çaplı deney çubuklarına oranla yorulma kesitinin % 20'lik bir azalma gözlemlenir. Büyüklüğün malzeme yorulmasına olumsuz bir şekilde tesir eden iki ana sebebi vardır. Birinci olanı boyut büyüdükçe yüzey alanı artış gösterdiğinden dolayı yüzey kusurlarının bulunma ihtimalinin artmasıdır. İkinci olan ise burma ve bükme tipindeki yüklemelerde çap artış gösterdikçe gerilim eğiliminde artış göstermekte bu sebepten dolayı çelik malzemelerde gerilimli bölgelerin sayısında artış gözlemlenir (Sayaca 2010).

2.1.5.7 Sıcaklığın Etkisi

Yorulma dayanım performansları malzemelerde, sıcaklığın düşme göstermesiyle artış göstermektedir. Yorulma dayanımı, oda sıcaklık değerlerinin üstündeki sıcaklık değerlerinde düşüş göstermektedir. Sıcaklık değerleri 400°C üzerini gördüğünde yorulma olayı yerine sürünmeden bahsedilmektedir. Yorulma kırılmaları tane içi kırılma ile gerçekleşirken, sürtünme kırılmaları ise tane sınırı kırılması formunda olmaktadır. Yüksek sıcaklık değerlerinde yorulmaya sebep olan gerilmelerin mekanik yüklerden dolayı gerçekleşmesi gerekmez. Değişkenlik gösteren ısıl gerilmelerden dolayı da çelik malzemelerde yorulma gözlemlenebilir. Bu tarz yorulmalara ise ısıl yorulma denilmektedir (Doruk 2018).

2.1.5.8 Yüzey İşlemlerinin Etkisi

Yorulma olaylarında çatlama, her daim malzeme yüzeyinden içeri yönde artarak gerçekleşir. Pürüzlülük ise çentik etkisine sebebiyet vereceğinden dolayı çatlakların oluşumu ve ilerlemesi kolay hale gelir. Bu nedenle yüzey işleme kalitesi artırılmış malzemenin yorulma dayanımı da artırılmış olur. Malzemenin yüzey kısımlarındaki düzensizlikler çentik etkisine sebebiyet verdiği için dolayı bu kısımlarda gerilme yığılmaları oluşur bu nedenden yüzeyde çatlak oluşumları meydana gelir. Bu durumu önlemek amacıyla malzemelerin yüzeyleri torna işlemine tabi tutulduktan sonra parlatma uygulanarak yorulma dayanım sınırı % 15 ile % 40 arasında artırılmış olur (Yılmaz 2020).

2.1.5.9 Gerilme Genliği Etkisi

Yorulma olayında gerilme genliği en önemli değişkendir. Gerilme genliği parametrelerinde gerçekleştirilecek en küçük bir farklılık yorulma ömründe büyük değişime neden olacaktır (Özçelik 2013).

2.2 Sac Levha Birleştirme Yöntemleri

Bir sistemler bütünü olan makinelerde, makinelerin işlevini yerine getirebilmesi maksadı ile bir araya getirilen genelde farklı malzemeler grubundan oluşan makine parçalarının

birbirleriyle birleştirilmesi, malzemelerin makinedeki kullanım amacına göre sökülebilir veya sökülemez olarak gerçekleşmektedir. Gelişen teknoloji paralelinde çok sayıda sökülebilir veya sökülemez malzeme birleştirme metodu mevcuttur. Örnek olması nedeniyle Çizelge 2.3'te malzeme birleştirme metotları genel hatlarıyla gösterilmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe bilhassa gövde panellerinde yoğun olarak kullanılan sac levhaların birleştirilmesi genelde sökülemez sac bağlantı teknikleri ile gerçekleşmektedir. Bu tez kapsamında sac levha birleştirme metotları olarak; EDK, FP ve KDP yöntemine değinilecektir.

Çizelge 2.3 Malzeme Birleştirme Yöntemleri.

Malzeme Birleştirme Yöntemleri		
Çözülebilir Birleştirme Yöntemleri	Çözülemeyen Birleştirme Yöntemleri	Ergitmesiz Kaynak Yöntemleri
Cıvatalı Bağlantılar	Oksi-gaz Kaynağı	Ultrasonik Kaynağı
Pimli Bağlantılar	Elektrik Ark Kaynağı	Difüzyon Kaynağı
Pernolar	Gazaltı Kaynağı (Tig, Mig, Mag)	Sürtünme Kaynağı
Kamalar	Tozaltı Kaynağı	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
Sıkı Geçme	Direnç Kaynağı	Patlatma Kaynağı
Perçinleme	Elektron Işın Kaynağı	
Lehimleme	Plazma Kaynağı	
	Lazer Kaynağı	
	Termit Kaynağı	

2.2.1 Elektrik Direnç Kaynağı

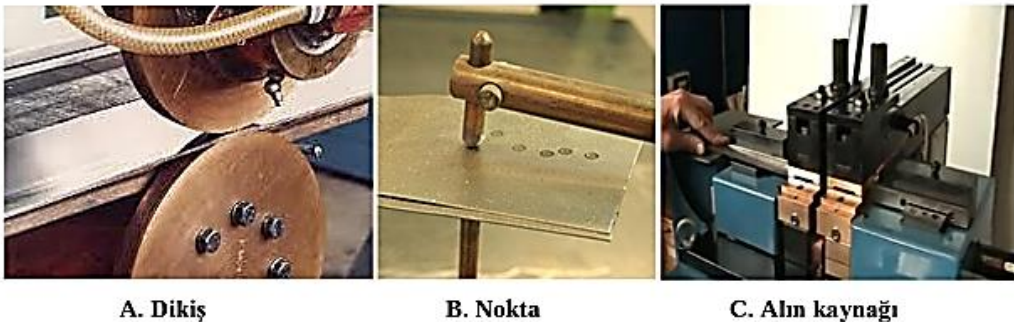
1877 senesinde bir rastlantı sonucu Amerika Birleşik Devletlerinde bulunan ve 1. Dünya savaşına kadar uzanan süreçte endüstride kullanımı yaygın olmamıştır. Özellikle 2.Dünya savaşıdan sonraki süreçte EDK uygulamaların da bilhassa elektrik devreleri ve zaman kontrol cihazlarında teknolojik gelişmeler artmıştır. EDK uygulanması oldukça basit olup seri üretimde avantaj sağlaması, otomasyon sistemlere adaptasyonu ve hızlı bir metal birleştirme sağlamasından dolayı otomotiv sanayinde en çok tercih edilen sac levha birleştirme metotlarından biridir. Bir otomobil montajı sürecinde 3000 den fazla direnç nokta kaynağı işlemleri mevcuttur. EDK'nin bir diğer avantajı ise diğer kaynak yöntemlerine

göre ilave malzemeye ihtiyaç duymadan sac malzeme birleştirme işlemlerini yapabilmektedir (Esendir 2008, Bulca 2019). EDK genel tanım itibariyle birbirine temas ettirilen iki veya daha fazla sac levha katmanlı malzemelerin aralarında gerçekleştirilen termo-elektrik bir süreçle sac levhaların birbiriyle birleştirilmesidir. Birleşimi yapılacak sac levhalardan elektrot vasıtasıyla elektrik akımı geçirildiğinde; elektrotlar, sac levhalar ve sac levhalar arasındaki boşluk direnç elemanı gibi davranır. Bu direnç elemanlarının ısınması vasıtasıyla en yüksek ısı değerleri sac levhaların temas eden yüzeylerinde oluşur. Oluşan bu yüksek ısı sayesinde sac levhaların birbirlerine elektrot vasıtasıyla temas eden bölgesinde sac levhalar ergir ve bir kaynak banyosu oluşur. Elektrik akımının kesilmesiyle oluşan kaynak banyosu uygulanan basınç altında katılaştır ve sac levhaların birbirine birleşimi gerçekleşir. Günümüzde EDK metodu başta otomotiv sanayi olmak üzere makine imalat, beyaz eşya ve çeşitli endüstri faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tezcan 2017).

2.2.1.1 Elektrik Direnç Kaynağı Çeşitleri

Elektrik direnç kaynağı yapılış metoduna göre ve endüstride en fazla kullanım sahalarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

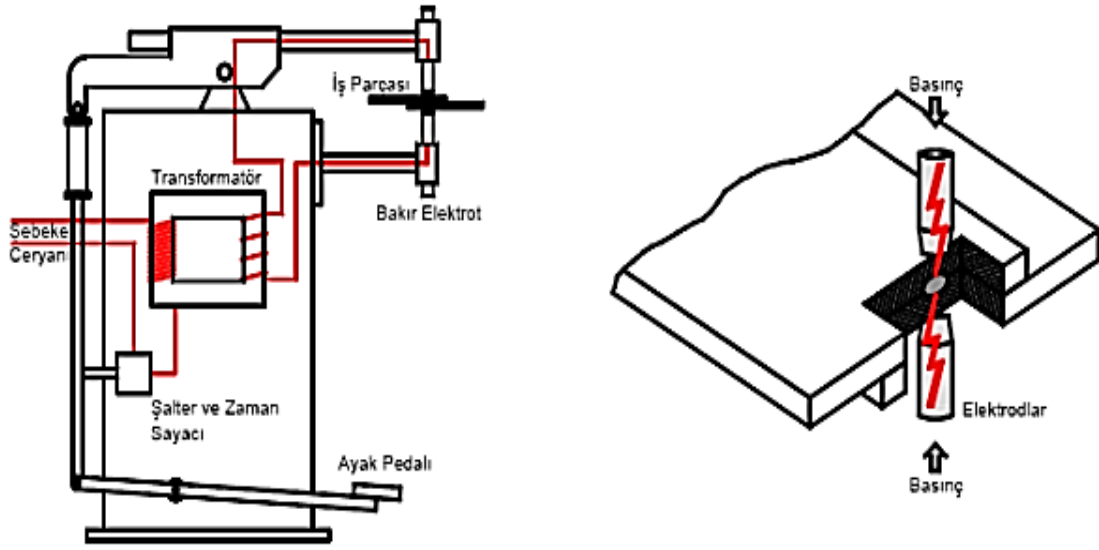
- Nokta Direnç Kaynağı
- Kabartılı Nokta Kaynağı
- Dikiş Direnç Kaynağı
- Direnç Alın Kaynağı



Resim 2.1 Elektrik Direnç Kaynağı Çeşitleri (İnt. Kyn. 4).

2.2.1.2 Nokta Direnç Kaynağı

Nokta direnç kaynağı elektrik direnç kaynakları içerisinde en çok tercih edilen türdür. Birleşimi yapılacak sac levhalar iki bakır elektrot alınarak ve sac levhalara belirli bir baskı kuvveti uygulanması suretiyle elektrik akımının geçişi sağlanır. Şekil 2.23'te nokta direnç makinesine ait temel bileşenler ve kaynak makinesi gösterilmiştir (Esendir 2008).



Şekil 2.23 Nokta Direnç Kaynağı Makinesine Ait Temel Bileşenler ve Kaynak Bölgesinin Detay Görünüşü (İnt. Kyn. 5).

Nokta direnç kaynağı yönteminde kullanılan ısı enerjisi eşitlik (2.5) de gösterilmiştir.

$$Q = I \cdot R^2 \cdot t \quad (2.5)$$

Q = Üretilen ısı enerjisi (Joule)

I = Akım (Amper)

R = Direnç (Ω Ohm)

t = Süre (s)

Birleştirme için gerekli Akım (A) transformatörlerde üretilir. Direnç (R) sac levhaların elektrik akımına karşı göstermiş oldukları dirençtir. Süre parametresi ise elektrik akımının sac levhalar üzerinden geçtiği zaman aralığıdır. Nokta direnç kaynağında kaynak parametreleri yüksek gerilim-düşük akım prensibi uygulanarak tercih edilmektedir. Elektrotların sac levhalara uyguladığı kuvvet hidrolik veya mekanik tahrik uygulanarak elde edilmektedir. Şekil 2.24'te nokta direnç kaynağının uygulama aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Nokta Direnç Kaynağı Uygulama Aşamaları (Yeşildal 2008).

Nokta direnç kaynağının uygulanışı şekil 2.24'te gösterildiği gibi dört farklı aşamadan geçerek gerçekleşmektedir.

- ✓ Sıkıştırma Zamanı; elektrotun sac levhalara uyguladığı ilk kuvvet zamanı ile elektrik akımının ilk verildiği zaman arasındaki geçen süredir. Sıkıştırma zamanı, elektrot kuvvetinin sac levhalar üzerinde istenilen değerlere gelmesine kadar uygulanacak kaynak akımının geciktirilmesi için önem arz etmektedir.
- ✓ Kaynak Zamanı; uygulanan kaynak akımının sac levhalara uygulandığı sürece geçen zamandır.
- ✓ Tutma Zamanı; uygulanan kaynağı soğutmak için elektrotların sac levhalara halen kuvvet uyguladığı kaynak sonrasındaki süreçtir.
- ✓ Ölü Zaman; elektrotların sac levhalar ile temasının kesildiği zaman aralığıdır (Anık 1991).

2.2.1.3 Direnç Kaynağı Parametreleri

Etkili bir nokta direnç kaynağı yapabilmek için aşağıda belirtilen parametre şartlarını sağlamak gerekir.

- ✓ Elektrot Baskı Kuvveti: Elektrot kuvvetinin kaynak bölgesinde sac levhaları birbirine sıkı bir şekilde birleştirmektir. Sıkı birleştirme yapılmadığı takdirde uygulanan kaynak kalitesi istenilen seviyeye gelmeyecektir. Ancak kaynak bölgesinde uygulanacak elektrot kuvveti çeşitli problemlere sebep olmayacak kadar da büyük seçilmemelidir. Elektrot kuvvetinin artırılması durumunda sac levhaların birleşmesi için gerekli olan ısı enerjisinde azalma meydana gelecektir. Bu durum daha büyük kaynak kuvvetleri ile daha büyük kaynak akımları gerektirecektir. Kaynak akımının çok büyük olduğu durumlarda sac levhalar ile elektrotlar arasında sıçramalara sebebiyet vermektedir. Bu sıçramalar elektrotlar ile sac levhaların yapışmasına neden olmaktadır. Mukavemetli sağlam bir sac bağlantısı için nokta direnç kaynaklarında amaçlanan elektrot basınç değeri 90 N/mm²'dir. Bağlantılarda karşılaşılabilecek sorunlardan bir tanesi de kaynak işlemi uygulama esnasında temas yüzey alanının artmasıdır. Bütün kaynak uygulama sürecinde aynı şartları sağlamak için uygulanan elektrot kuvveti de kademeli bir şekilde artırılmalıdır. Fakat bu süreçte zor olan elektrotların mantarlaşma hızları ile kuvvet artırma hızlarının aynı oran değerlerinde değiştirilmesinin güçlüğüdür ve genel olarak ortalama değerler tercih edilmektedir (Yeşildal 2008).
- ✓ Elektrot Temas Çapı: Nokta direnç kaynaklarında kullanılan elektrot temas yüzey çapları $5 \cdot t^{1/2}$ dir (t=sac levha kalınlığı). Bu sebeple her biri 1 mm kalınlığa sahip olan iki sac levhanın nokta kaynağı esnasında çekirdek çapı, bu formülüne göre 5 mm olmalıdır. Sağlıklı bir nokta direnç kaynağı için örnek vermek gerekirse 1 mm kalınlığa sahip sac levhaların birleşiminde 6 mm'lik elektrot çapına ihtiyaç duyulmaktadır. 6 mm'lik elektrot temas çapı 0.5 ile 1.25 mm arası sac levhaların birleşimi için standartlaştırılmıştır ve ISO standartlarına uygun hale getirilmiştir (Yeşildal 2008).

- ✓ Sıkma Süresi: Sac levhaların üzerine kaynak elektrotunun etki ettiği ilk kuvvet zamanı ile kaynak akımının ilk verildiği zaman arasında geçen süredir. Sıkma zamanı, nokta direnç kaynağı süresince elektrot kuvvetinin kaynak bölgesinde istenilen seviyeye gelmesine kadar kaynak akımının geciktirilmesi için önem arz etmektedir (Yeşildal 2008).
- ✓ Kaynak Süresi: Nokta direnç kaynaklarında kaynak süresi kaynak akımının sac levhaya uygulandığı süre boyunca geçen zamandır. Kaynak zamanı ölçümü yapılır ve elektrik hat montajının çevrimleri içerisinde ayarlanır. 50 Hz'lik güç şebekelerinde bir çevrim saniyenin 1/ 50'si anlamına gelir. Nokta direnç kaynağı işlemlerinde kaynak süresi fazla veya eksik olması durumunda uygun bir kaynak süresi değeri belirlemek güçtür. Uygulamada uygulanan kaynak süreleri oldukça kısa tutulmalıdır.
 - Kaynak akımı birleştirmelerde imkân dâhilinde en iyi kaliteyi vermelidir.
 - Nokta direnç kaynağı için belirlenen kaynak parametreleri elektrotlarda aşınmaya sebebiyet vermeyecek şekilde seçilmelidir.
 - Kalın sac levhalarda kaynak esnasında kaynak süresi düğme çapının artmasına sebebiyet vermektedir.
 - Mevcut kaynak donanımının kaynak akımı ve elektrot kuvveti verilerini sağlayamaması durumunda kaynak süresi ayarlanmalıdır.
 - Kaynak işlemi esnasında elektrot çapı mümkün olduğunca küçük seçilmelidir aksi bir durumda elektrot girintileşmeye sebep olacaktır.

2 mm'den daha kalın sac levhaların nokta direnç kaynaklarında kaynak süresinin darbe sayılarına bölünmesi ısı enerjisinin yükselişini önlemek amacıyla avantajlı olabilir. Fakat bu yöntem bağlantıda iyi bir görünüm vermesine rağmen mukavemet açısından düşük dirençli nokta kaynakları verecektir. Sac levha kalınlıklarının 10 katı ile çarpılması işlemi ile kaynak süresi ile optimum değerler sağlanabilir. Her biri 1 mm kalınlığa sahip sac levhalar için optimum kaynak süresi 50 Hz'de 10 periyot olması gerekmektedir (Yeşildal 2008).

- ✓ Tutma Soğuma Süresi: Tutma süresi nokta direnç kaynaklarında elektrotların kaynak sonrasında yapılan kaynağı soğutmak için uygulanan süredir.

Kaynak tekniği perspektifi ile yaklaşıldığında tutma süresi en ilginç nokta direnç kaynağı parametresidir. Tutma süresi sac levhaların kaynak makinesinden alınmadan önce kaynak düğmesinin katılaşması için gerekli olan bir süredir. Bu süre uzun tutulduğu takdirde kaynak noktasındaki ısının elektrotta nüfuz etmesine sebep olur. Böyle bir durum elektrotun daha çabuk aşınmasına sebebiyet verecektir. Galvanizli karbon çeliklerinin nokta kaynağında ise daha uzun kaynak süreleri tavsiye edilmektedir (Yeşildal 2008).

- ✓ Kaynak Akımı: Kaynak akımı nokta direnç kaynağı işlemlerinde kaynak işlemini sağlamak için devreden geçen akımdır. Kaynak akım miktarları iki seçenek ile kontrolü sağlanmaktadır. Birincisi trafo ayar şalteri ikincisi kaynak operasyonunu gerçekleştirmek için optimum akımın yüzdesinin kontrolüdür. Düşük yüzdeli akım ayarları normal şartlarda kaynak kalitesini azalttığından dolayı tercih edilmemektedir. Trafo ayar şalteriyle ve % 70 -% 90 optimum akımla doğru akım miktarını sağlamak mümkündür. Nokta direnç kaynaklarında kaynak akımı mümkün olduğu sürece düşük değerlerde tutulmalıdır. Kullanılacak akımın belirlenmesi sürecinde metal ve sac levhalar arasında sıçramalar gözlemlenene kadar akım artırma işlemi kademeli bir şekilde artırılmalıdır. Optimum kaynak akımına ulaşıldığı bu şekilde anlaşılır (Yeşildal 2008). Çizelge 2.4'te Nokta direnç kaynağı uygulamalarında sac levha et kalınlıkları için tavsiye edilen kaynak parametreleri gösterilmiştir.

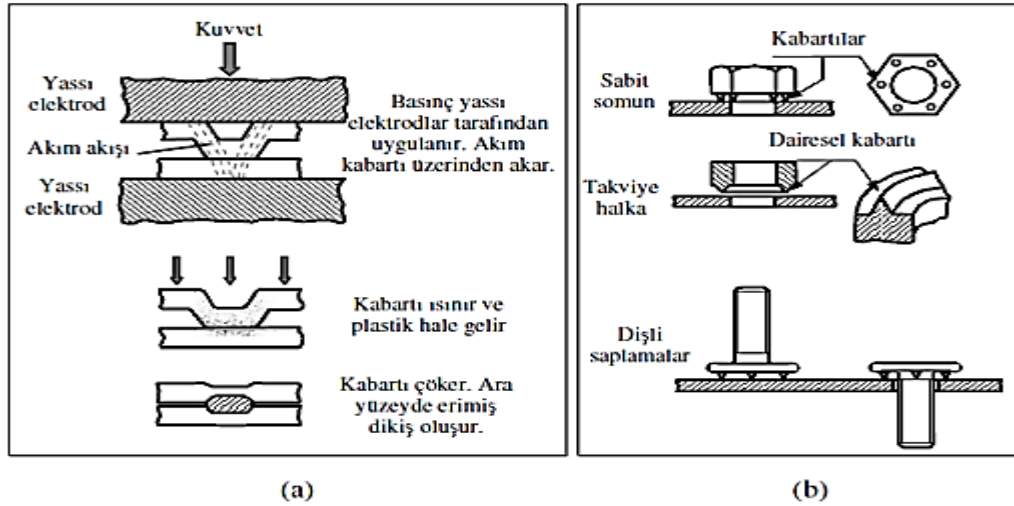
2.2.1.4 Kabartılı Nokta Kaynağı

Direnç nokta kaynakları ve dikiş kaynak metotlarının her ikisinde ara yüzeylerde meydana gelen elektrik akımı yoğunlaşması kaynak elektrotlarını şekillendirerek yapılmakta veya temas durumundaki yüzey alanı üzerinde sınırlandırma yapılarak kaynak işlemi gerçekleşmektedir. Kabartı kaynak yönteminde ise yapılacak kaynağın konumu, sac levhalardan birinin yüzeyinde yükseliş gösteren bir kabartı yoluyla tespit edilmektedir. Şekil 2.25 a) üzerinde şematik gösterilmiştir. Kabartı kaynağı işlemi yapılacak sac levhalar, sadece kabartının mevcut olduğu nokta üzerinden birbirleriyle temas halindedirler. Ara yüzeyler boyunca iletilen elektrik akımı kabartı boyunca yoğunlaşmakta ve bu sebepten dolayı kabartı hızlı bir süreçle ısınmaktadır. Mevcut

kabartı plastik duruma gelmeye başlar ve bunun sonucu olarak ergidiğinden çökme gösterir. Bu sonuçla ara yüzeyde ergimiş bir alan oluşur. Birleştirmede ulaşılan sonuç nokta direnç kaynağına benzerlik göstermektedir (Aras 2016). Kabartı nokta kaynağı genel olarak iki veya üç kabartı zamanda gerçekleşmektedir. Kaynak makineleri ana hatlarıyla direnç nokta kaynağı işlemleri için kullanılmakta olan makinelere benzerlik gösterir. Fakat elektrotların yerine birleşim bölgesinde düzenli bir basınç işlemi gerçekleştiren düz formlu bakır tablalar monte edilir. Kabartıların şekil ve boyutları, daha önce imalat safhasında elde edilen tecrübelerle ilgili olarak veya deneme yöntemi ile seçilmelidir. Kabartı kaynak metodu uzun birleştirmeler için tercih edilmez (Aras 2016). Kabartı kaynağı metodu küçük boyutlu bağlantı elemanlarının sac levhalara birleştirilmesi için daha çok tercih edilir. Bu yöntem otomobil gövdeleri, ev aletleri, büro mobilyaları ve çeşitli makine parçalarının birleştirilmesinde daha çok tercih edilir. Örnek sunmak gerekirse sabit somunların araç şaselerinde kaynak işleminin gerçekleştirilmesi için yüzey kısımlarda oluşturulan küçük kabartıların üretilmesi yöntemi ile gerçekleştirilir. Şekil 2.25 b) üzerinde şematik gösterilmiştir (Aras 2016).

Çizelge 2.4 Nokta Direnç Kaynağında Sac Levha Kalınlıkları için Tavsiye Edilen Kaynak Parametreleri (Yeşildal 2008).

Sac Kalınlığı t (mm)	Elektrot Baskı Kuvveti, F (kN)	Kaynak Akımı, I (A)	Kaynak Süresi (Çevrim)	Tutma Süresi (Çevrim)	Elektrod Çapı, d (mm)
0.63+0.63	2.00	8500	6	1	6
0.71+0.71	2.12	8750	7	1	6
0.80+0.80	2.24	9000	8	2	6
0.90+0.90	2.36	9250	9	2	6
1.00+1.00	2.50	9500	10	2	6
1.12+1.12	2.80	9750	11	2	6
1.25+1.25	3.15	10000	13	3	6 7
1.40+1.40	3.55	10300	14	3	6 7
1.50+1.50	3.65	10450	15	3	6 7
1.60+1.60	4.00	10600	16	3	6 7
1.80+1.80	4.50	10900	18	3	6 7
2.00+2.00	5.00	11200	3x7+2	4	7 8
2.24+2.24	5.30	11500	3x8+2	4	7 8
2.50+2.50	5.60	11800	3x9+3	5	8
2.80+2.80	6.00	12200	4x8+2	6	8
3.00+3.00	6.15	12350	4x9+2	6	8
3.15+3.15	6.30	12500	4x9+2	6	8



Şekil 2.25 Kabartılı Kaynak Yöntemi Şematik Resim; a) Tekli Kabartılı Kaynak b) Çoklu Kabartılı Kaynak (Kaya 2010).

2.2.1.5 Dikiş Direnç Kaynağı

Dikiş direnç kaynağında elektrik akımı ve kuvvet, disk formundaki bir çift elektrot veya bir disk elektrot ile bir örs ya da düz elektrot vasıtasıyla iletilir. Sac levhaların birbirlerine baskı uygulanan yüzeyleri, basınç etkisiyle uygun derecede ısıtıldıktan sonra kaynak işlemi yapılır. Sac levhalar üzerine yapılan kaynak noktaları arasındaki mesafe uzaklıklarına göre sızdırmaz dikişler veya kesikli dikişler uygulanabilir. Bu metot ile iki sac levha ısınarak birbirleri içerisinde eriyerek kaynar ve birleşim gerçekleşmiş olur (Tezcan 2017).

Avantajları:

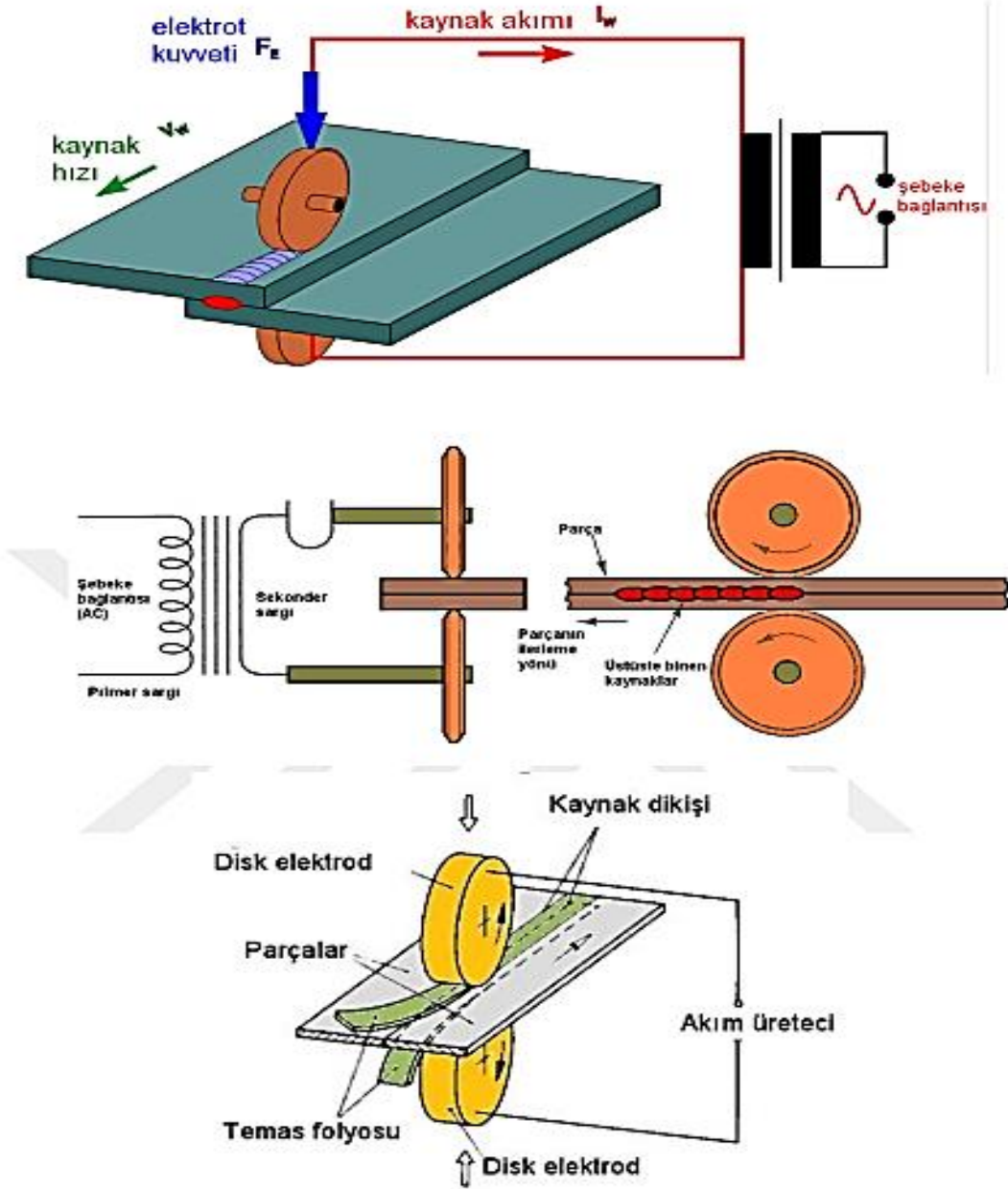
- ✓ Birleştirmede yüksek kaynak hızına sahip olunması
- ✓ Temiz birleşim yüzeyleri elde edilmesi
- ✓ Birleşimlerde sızdırmazlık sağlanması

Dezavantajları:

- ✓ Direnç nokta ve kabartılı punta kaynağı metotlarına göre daha ince kalınlıkta sac levhalar birleştirilebilir.
- ✓ Kaynaklı birleştirme esnasında yüksek ısı miktarı açığa çıkar. Disklerin soğutulması iyi yapılmaz ise dikiş dayanımındaki performans düşük olur.
- ✓ Bu metodun donanım maliyeti işletmeler için yüksektir.

Kullanım alanları:

- ✓ KONSERVE KUTUSU VE ÇEŞİTLİ KUTULARIN KAYNAĞINDA
- ✓ BORU İMALATLARINDA
- ✓ RADYATÖR İMALATINDA
- ✓ OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE (TEZCAN 2017).



Şekil 2.26 Dikiş Kaynağı Devresi ve Folyo Uygulama İşlemi (Tezcan 2017).

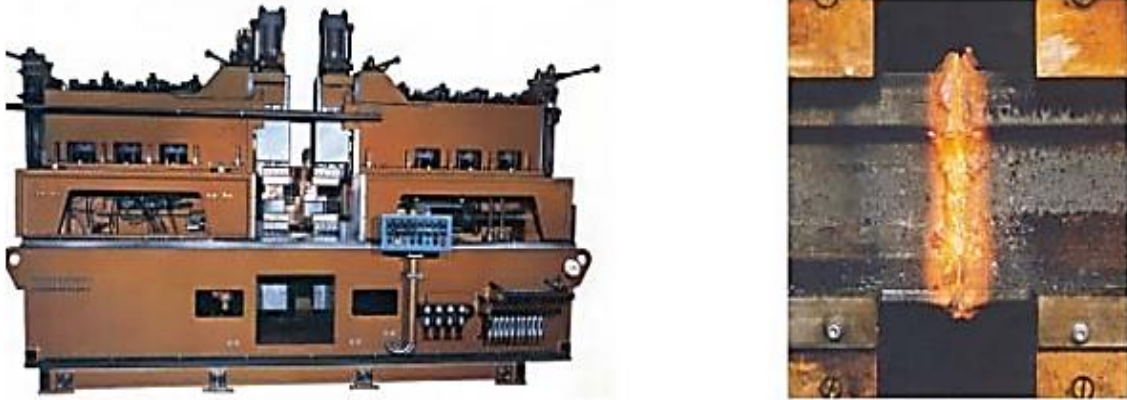
2.2.1.6 Direnç Alın Kaynak Yöntemi

Direnç alın kaynağı metodunda kaynak işlemi gerçekleştirilecek parçalar hareketli olan bakır alaşımlı bağlantı çenelerine sıkıca bağlanır. Bu metotta da elektrik akımı hareketli çeneler vasıtasıyla parçalara iletilir. Kaynak operasyonunun başlangıcında elektrik akım devresi açılır hareketli bakır alaşımlı bağlantı çeneleri ile kaynağı yapılacak iş parçaları birbirlerine yüzeyleri arasında çok küçük bir boşluk miktarı kalıncaya kadar yakınlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Düzgün olmayan yüzeylerdeki birkaç çıkıntıdan parçaların birbirine teması sağlanmış olur. Parçaların teması sağlanan bu noktalarından 17 şiddetli elektrik akımı geçerek teması gerçekleşen noktalarda ergime ve kısmen de olsa buharlaşma oluşur. Temas halindeki noktalar kıvılcım ve patlamalar şeklinde parçalanır ve oluşan metal damlacıkları dışarı doğru fırlatılır. Kaynağı yapılacak parçaların yüzey kısımlarını ısıtan arklar bu şekilde meydana gelir. Aynı süreçte oluşan metal buharı kaynak bölgesine nüfuz ederek havanın kaynak bağlantısı için olumsuz etkisini korur. Parçaların hareketli çeneler vasıtası ile yavaş yavaş birbirlerine yaklaştırılması ile meydana gelen yeni temas noktaları da yanarak tüm kesitte kaynak ısısına erişilir. Bu süreçten sonra hareketli çeneler basınç yardımıyla itilerek birleşecek parçalar birbirine bastırılır ve elektrik akımı kesilir. Kaynak işlemi için geçen süre birkaç saniyedir ve elektrik akımı kesildikten sonra bir süre daha basınç uygulaması işleminin devamı sağlanarak kaynak operasyonu bitirilmiş olur (Esendir 2008). Direnç Alın Kaynağı metodunun çeşitleri:

- ✓ Basıncılı Direnç Alın Kaynağı
- ✓ Ön Isıtmasız Yakma Alın Kaynağı
- ✓ Ön Isıtmalı Yakma Alın Kaynağı

Basıncılı alın kaynağı metodunda birleşimi yapılacak parçalar yüksek basınç değerlerinin etkisi ile temas etmiş olmadan parçalara elektrik akımı uygulanmaz. Yakma alın kaynağı metodunda ise birleşimi yapılacak parçalar birbirine temas etmeden elektrik akımı uygulanmaya başlar. Direnç alın kaynağı metodu genel olarak boruların, yuvarlak kesite sahip malzemelerin, kare kesitli malzemelerin ve düz sac levhaların birleştirilmesi işlemlerinde kullanılır. Bu kaynak metodu çelik ve alaşımlarının birleştirilmesine iyi cevap vermektedir. Kaynak işlemi esnasında dikkat edilecek en önemli etken birleştirilecek parçaların aynı doğrultu hizasında olmasıdır.

Aynı doğrultuda gerçekleştirilemeyen kaynak bağlantıları aksel kaçıklık sebebiyle kaynak kalitesinin düşmesine sebep olacaktır. Kaynak işlemi için elektrik akımını ileten, doğru ve kaynak operasyonu için gerekli basıncı sağlayan hareketli çenelerin, birleşimi yapılacak parçaları bağlama ve hareket ettirme olanağı vardır. Kaynak esnasında oluşan yoğun akımdan dolayı bu çeneler ısınır ve soğutulmalarının sağlanması gerekir. Kaynak makinesi üzerinde mevcut bulunan bir su dolaşım tertibatı ile hareketli çenelerin soğutulması sağlanır (Esendir 2008).

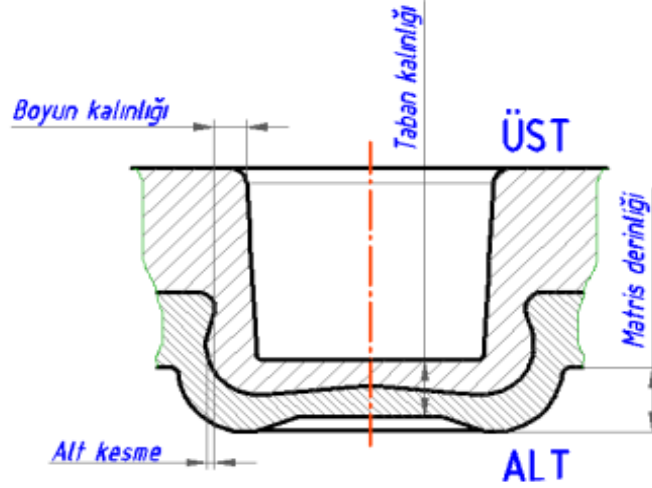


Resim 2.2 Direnç Alın Kaynağı Makinesi ve Kaynak Bölgesinin Detay Görünüşü (Esendir 2008).

2.2.2 Form Punta Metodu

Günümüz otomotiv endüstrisinde EDK özellikle düşük karbonlu ve yüksek mukavemetli çeliklerin birleştirilmesinde tercih edilen en yaygın birleştirme metodudur. Bununla birlikte otomotiv endüstrisinde çelik malzemeler ile birlikte kullanılan alüminyum malzemelerin birleşiminde, alüminyumun çelikten daha iyi elektriksel ve ısı iletkenliği yeteneğine sahip olmasından dolayı, Ohm yasası prensiplerinin temeline dayanarak alüminyumu eritmek için gerek duyulan ısının daha yüksek amper seviyelerinde üretilmesi gerektiğini göstermektedir. Birçok alüminyum alaşımlı malzemenin kaynağının EDK metot ile yapılabilmesi için 20 kVA'dan daha büyük EDK makinelerine ihtiyaç duyulur. EDK kaynak makineleri ise alüminyum alaşımlarını eritmek ve mukavemetli düzgün bir kaynaklı birleştirme gerçekleştirmek için yüksek elektrik akım değerleri ve doğru basınçlar sağlamalıdır. Fakat bu parametreler elektrotun uç aşınmasını hızlandırmaktadır (Kurt vd. 2018).

Bu noktada alüminyum alaşımları ve çelik malzemelerin kaynağında EDK'ya alternatif olarak mühendisler bilhassa farklı malzeme grubundan sac levhaların birleşimi için çeşitli mekanik birleştirme yöntemleri geliştirmişlerdir. Bunlardan biri de literatürde FP olarak geçen mekanik birleştirme yöntemidir. Bu yöntem perçin, vida ve diğer mekanik bağlantı elemanlarına ihtiyaç duymadan sac levhaları, bölgesel olarak meydana getirilen deformasyon işlemi ile birleştirir. FP metotta dışarıdan bir ek malzemeye ihtiyaç duyulmaksızın birleşimi yapılacak sac levhalar bir kalıp vasıtası ile birleştirilecekleri forma getirilir. Bu yöntemde işlem esnasında levhalara ısı işlem uygulanmaksızın soğuk forma getirilme kabiliyetleri sayesinde sac levhalar birbirleri içerisinde kenetlenebilecek tarzda bir form meydana getirirler. FP yöntem ile birleşimi yapılan sac levhalara ait Şekil 2.27'de birleşim noktalarının kesit görünüşünde kenetlenmiş formun geometrisi gösterilmiştir. Ayrıca kaplanmış sac levha veya galvanizli sac levhaların yanı sıra alüminyum alaşımı ve magnezyum levhaların birleştirmelerinde çok başarılı sonuçlar verir. FP metot uygulamaları ilk olarak otomotiv endüstrisi ve cihaz üretiminde uygulanmıştır. İlk olarak 1981 senesinde Almanya'da faaliyet gösteren Eckold firması soğuk birleştirme işlemi gerçekleştirmek için çalışmalar yapmış yapılan çalışmalar neticesinde ilk form punta FP pensesini geniş kitlelere tanıtmışlardır. Resim 2.3'te ilk FP makinesi örneği gösterilmiştir. Bu metot ayrıca kolay şekillendirilme avantajıyla galvanizli saclar üzerinde denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. İlk zamanlarda klima ve havalandırma sistemleri alanında kullanılması düşünülen bu metot günümüzde çelik konstrüksiyondan otomotiv endüstrisine kadar farklı endüstri kollarında başarı ile kullanılmaktadır. Geçmiş yıllarda basit yapılı el ile uygulaması gerçekleşen uygulamalardan bugün robot kollara aparatlar vasıtası ile bağlanarak otomasyon işlemlerine uygun hale de getirilmişlerdir. Ayrıca farklı uygulamalar için tasarımı yapılmış FP teknikleri de mevcuttur. Örnek vermek gerekirse özel olarak tasarlanmış sac kalıplar, özel montaj masaları, FP presleri vb. (Kaya 2012).



Şekil 2.27 Form Punta Kesit Görünüş (Çetkin 2010).



Resim 2.3 1982 Senesinde Üretimi Gerçekleştirilmiş İlk Form Punta Pensesi (Çetkin 2010).

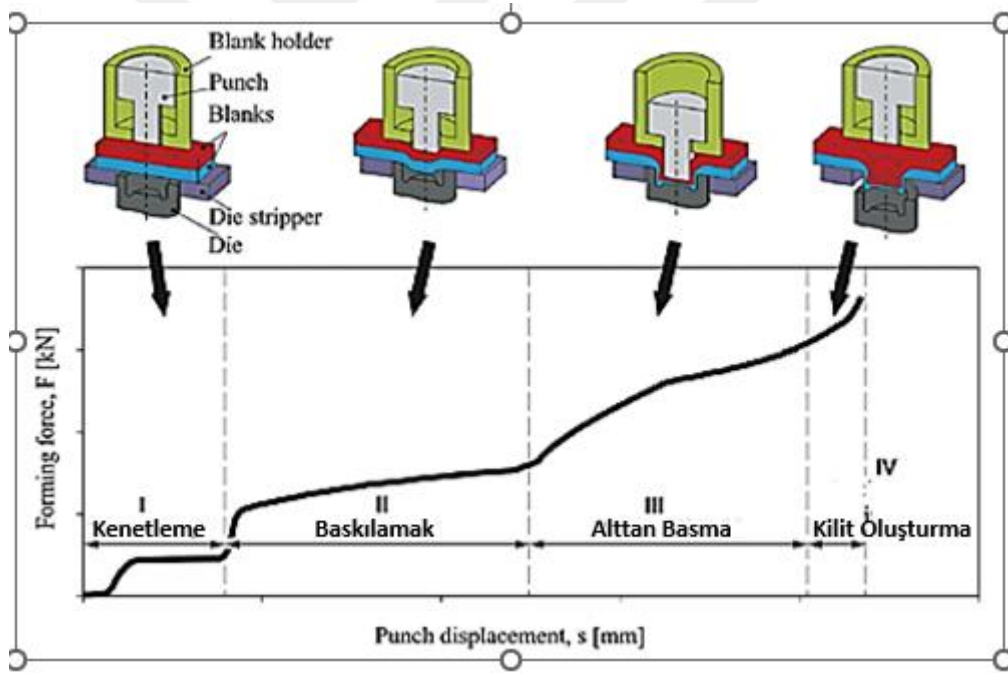
2.2.2.1 Form Punta Metodu Uygulama Aşamaları

Form punta yöntemi sac levhaları nokta birleştirme şeklinde yüksek hızda mekanik olarak birbirlerine birleştirir. Bu metot ile 0.5 mm ile 3 mm kalınlık skalasında toplam derz kalınlığı olarak ta 6 mm'ye kadar olan sünek metal sac levhalar için uygun bir tercihtir. Tescilli olan bu birleştirme tekniğinin uygulama aşamaları dört aşamadır. Bu aşamaları detaylandırmak gerekirse;

- ✓ Birinci aşamada; sac levhalar başlangıçta boşluk tutucu ve kalıp tertibatı arasında kenetlenir.

- ✓ İkinci aşamada; zımba sac levha tabakalarına doğru zorlanır ve levhaları kalıbın içerisine doğru iter.
- ✓ Üçüncü aşamada; deforme olan sac levhalar kalıp tabanı ile temasında zımbanın aşağı yöndeki hareketi malzemeyi radyal olarak akmaya ve bir düğme formu oluşturmaya zorlar.
- ✓ Dördüncü aşamada; Kalıp tertibatının yaylı kısımları tarafından müsaade edilen bu malzeme akışı sac levhaları sıkıca bir arada tutan mekanik kilitleme sağlamış olur. Son olarak ta zımba geri çekilir.

Bazı form punta metotlarında yaylı tip yerine sabit kalıplarda kullanılır. Yine levhaları kısmen delen dikdörtgen zımbalarda kullanılabilir. Şekil 2.28'de dört aşamada gerçekleşen detayları şematik olarak gösterilmiştir (İnt. Kyn. 6).

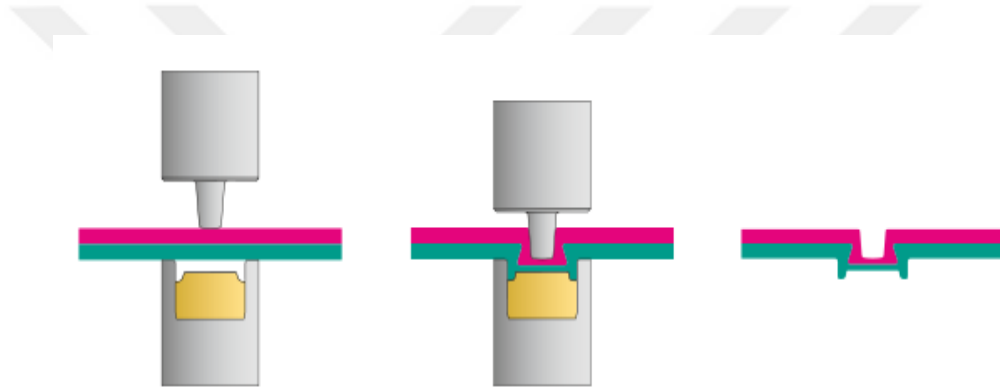


Şekil 2.28 Form Punta Aşamaları (Mucha 2017).

2.2.2.2 Form Punta Birleştirme Teknikleri

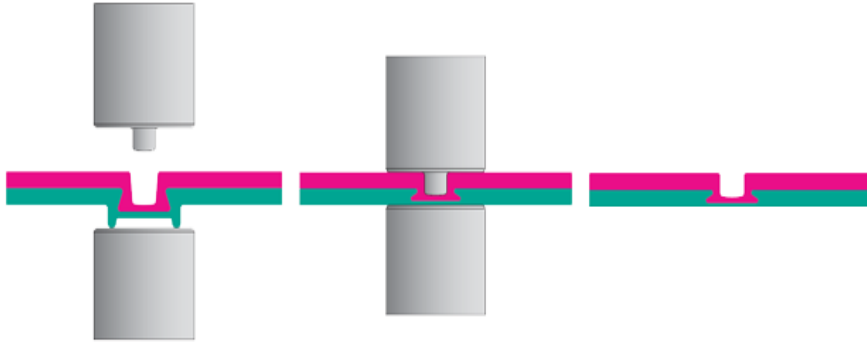
FP birleştirme yöntemlerinde birleşimi yapılacak sac levhaların malzeme cinsi dâhil sac levha bağlantıları üzerinde oluşan kabartı formların geometrisine değin farklı parametreler için birleştirme teknikleri geliştirilmiştir.

- ✓ **Dairesel Birleştirme:** Basit geometrili bir dairesel formdaki zımba yardımı ile birleştirilecek sac levhalar kalıp boşluğuna bastırılır. Uygulanan kuvvetin etkisi arttıkça, zımba yan malzemesi kalıp yan malzemesi içerisinde dışarı istikamette yayılma etkisi ile zorlanır. Korozyon oluşturabilecek etkilere sebep olmadan çapak ve keskin kenar oluşturmayan estetik görünüm açısından başarılı dairesel birleşme sağlar. Alüminyum alaşımlar ve galvaniz kaplı çelik levhaların birleşiminde dahi koruyucu tabaka malzemeler ile birlikte aktığından dolayı korozyon önleyici özelliği bozmaz. Bu yöntem ileri teknoloji üretim ve yüzey kaplama teknikleri üretilir ve uzun ömürlü yüksek kaliteli birleştirme sağlar. Şekil 2.29’da dairesel birleştirme tekniğine şematik olarak gösterilmiştir (Turan 2019).



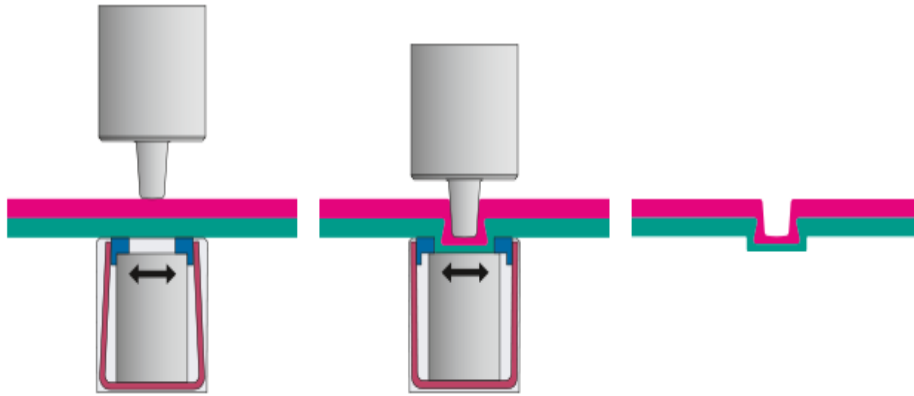
Şekil 2.29 Dairesel Birleştirme Prosesi (İnt. Kyn. 7).

- ✓ **Düz Birleştirme:** Düz birleştirme tekniği, yuvarlak birleştirmenin devamı olarak ikinci işlem basamağına sahip bir birleştirme tekniği olarak düşünülebilir. Birleştirme sırasında oluşan çıkıntılar bazı durumlarda istenmeyebilir bu durumda çıkıntılara düz bir zımba yardımı ile müdahale edilerek oluşan çıkıntı düzleştirilir. Bu süreç Şekil 2.30’ da şematik olarak gösterilmiştir (Turan 2019).



Şekil 2.30 Düz Birleştirme Prosesi (İnt. Kyn.7).

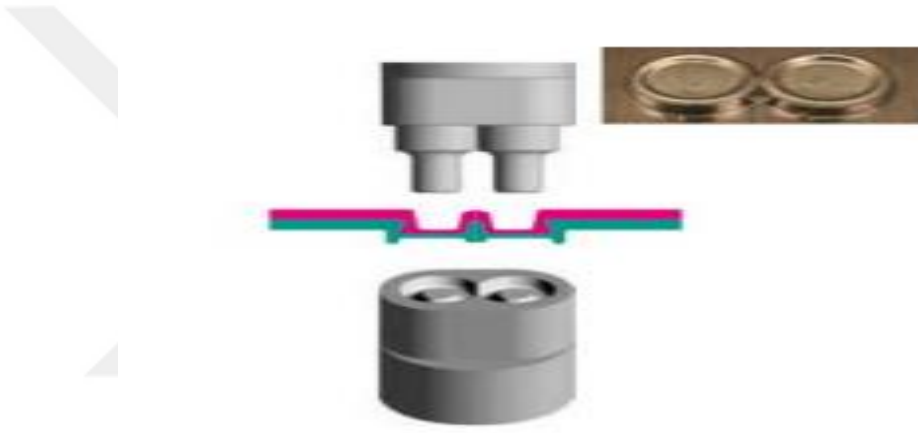
- ✓ Hareketli Birleştirme: Sabit ve hareketli bileşenlere sahip özel bir kalıptır. Birleşimi yapılacak malzemeler ve zımba sabit parçalar vasıtasıyla ortalanır. Bundan dolayı bağlantı oluşumunun mükemmel yakın bir şekilde eş merkezli olduğunu garanti eder. Sabit kısımlar arasında yer alan hareketli kısımlar, eklemdaki birleştirilecek malzemelerin birbirlerine kenetlenmesini sağlar. Ayrıca dairesel ve düz birleştirme metoduna sahip işlemleri tek süreçte gerçekleştirir. Şekil 2.31’de hareketli birleştirme tekniğine şematik olarak gösterilmiştir (Turan 2019).



Şekil 2.31 Hareketli Birleştirme Prosesi (İnt. Kyn. 7).

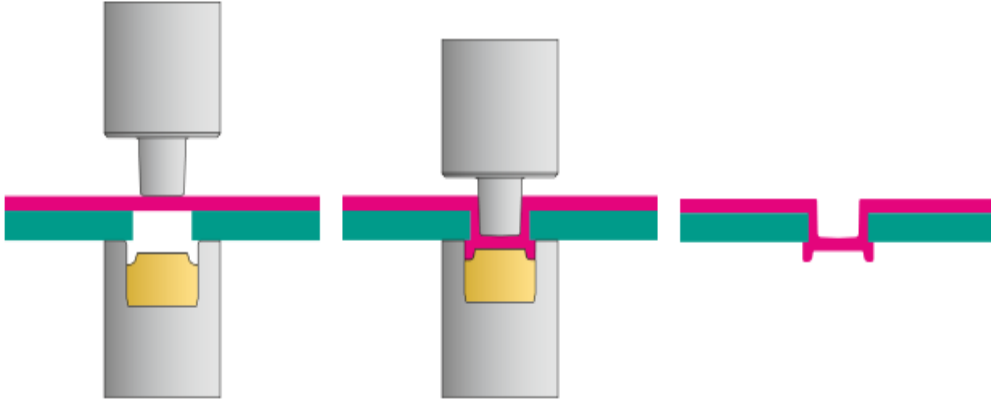
- ✓ Çift Etkili Birleştirme: Çift etkili sac levha birleştirme metodu, kaynak ve perçinleme gibi sökülemez malzeme birleştirme metotlarına alternatif bir metottur.

Birçok süreçte bükme ve vidalama gibi bağlantı tekniklerinin yerini de alır. İlk bağlantı noktası ve çeşitleri ile beraber sac levhaları birleştirmek için geniş bir seçenek sunar. Bu birleştirme tekniği ikisi bir arada bir çözüm olarak yer alır. Birleştirmede bir takım zımba ve kalıp seti kullanılarak presin oluşturduğu bir darbesi ile oluşan iki adet birleştirme oluşturur. Çift etkili birleştirmenin en belirgin özelliği kayma ve çekme mukavemetlerini artırmaktır. Oluşan iki birleştirme boşluğunun çok yakın konumlandırılması sebebiyle birleştirmelerin arka arkaya konumlandırıldığı uzun bileşenlerde oluşabilecek deformasyonların etkilerini azaltır Şekil 2.32’ de çift etkili birleştirme prosesi gösterilmiştir (Turan 2019).



Şekil 2.32 Çift Etkili Birleştirme Prosesi (İnt. Kyn. 7).

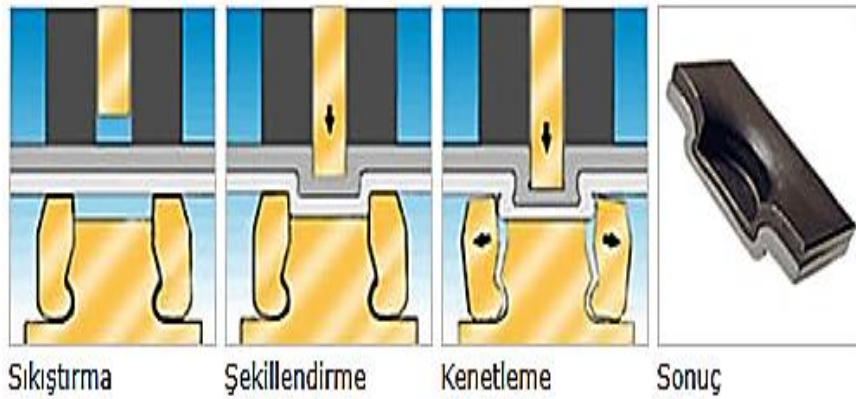
- ✓ Özel Birleştirme: Özel bir birleştirme tekniğidir. Bu birleştirme tekniğinin amacı bir sac levhanın diğer sac levhaya lokal olarak katlanarak veya sıvanarak birleştirilmesidir. Sac kalınlıklarında büyük fark olan levhaların birleştirilmesinin yanı sıra sünek olan malzemeler ile sünek olmayan yüksek çekme mukavemetine sahip malzemelerin birleştirilmesinde örneğin sac ve çelik döküm, yay çeliği gruplarının birleştirilmesinde yine sac metaller ile metalik özellik taşımayan malzeme gruplarının birleştirilmesinde plastik, elastomerler, kâğıt ve karton malzemeler gibi bu metot kullanılır. Şekil 2.33’ te özel birleştirme metodunun şematığı gösterilmiştir (Turan 2019).



Şekil 2.33 Özel Birleştirme Prosesi (İnt. Kyn. 7).

2.2.2.3 Form Punta Birleştirme Tipleri

FP sac levha birleştirme tekniğinde iki tip bağlantı seçeneği mevcuttur. Bunlar; Dairesel geometrili birleştirme ile dikdörtgen geometrili birleştirmedir. Dairesel geometrili birleştirmede sac levhalar lokal bir deformasyona maruz bırakılarak kalıplar vasıtasıyla birbirine kenetlenmektedir. Soğuk şekillendirmenin uygulanmasıyla birbirine kenetlenen sac levhalar ile başarılı bağlantı sonuçları elde edilir. Şekil 2.34'te dairesel geometrili birleştirme gösterilmiştir (Kaya 2012).



Şekil 2.34 Dairesel Birleştirme Tipi (İnt. Kyn. 8).

Dikdörtgen geometrili birleştirmelerinde sert çelik ve paslanmaz materyaller tercih edilmektedir. Uygulama doğrultusuna bağlı olarak değişen mekanik özelliklerine ilave olarak estetik özellikler ve bunun yanı sıra yan kesme birleştirmeleri gibi özel uygulama

sahalarında kullanılmaktadır. Şekil 2.35’de dikdörtgen geometrili birleştirmenin şekli gösterilmiştir (Çetkin 2010).



Şekil 2.35 Dikdörtgen Birleştirme Tipi (İnt. Kyn. 8).

2.2.2.4 Form Punta Birleştirme Tekniğinin Avantajları

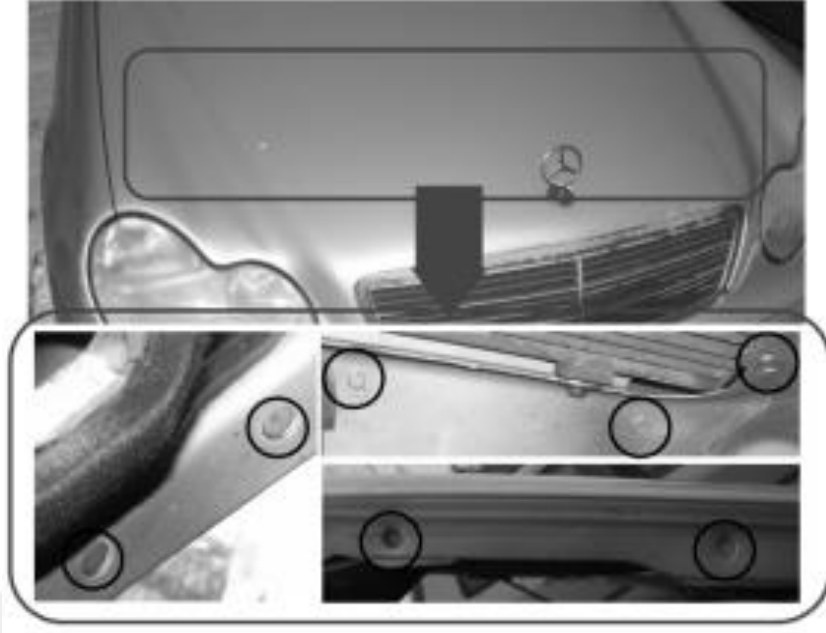
FP metot tekniğinin avantajlarını sıralamak gerekirse;

- ✓ Diğer sac levha birleştirme tekniklerine göre vidalama ve perçinleme yöntemlerinden daha seri ve hızlıdır.
- ✓ Sac levha bağlantıları herhangi bir deformasyona sebep olmadan kontrolü sağlanabilir.
- ✓ Birleşimi yapılan sac levhaların üzerinde bitmiş yüzeylerde herhangi bir hasar meydana gelmez.
- ✓ Birleşme bölgelerinde soğuk şekillendirme uygulandığından dolayı termal yükler meydana gelmez.
- ✓ Kaynak işlemlerinde olduğu gibi koku, duman ve gaz faktörleri oluşmaz.
- ✓ Birleştirme için herhangi bir ilave malzeme gerektirmez.
- ✓ Atık malzeme sarfiyatı yoktur.
- ✓ Çevre Dostu bir birleştirme teknolojisidir.
- ✓ Bakım maliyetleri düşüktür.
- ✓ Birbiri ile aynı özellikleri taşımayan farklı malzeme gruplarının birleşiminde diğer birleşim metotlarına göre avantaj sağlar.
- ✓ Kaplanmış ve boya uygulaması yapılmış yüzeylere birleştirme uygulamasından sonra zarar vermez
- ✓ Kullanım basitliğinden dolayı uygulamayı yapacak kalifiye bir operatöre gerek duymaz (Kaya 2012).

2.2.2.5 Form Punta Uygulama Alanları

FP metot hızlı ve güvenilir birleştirme özelliklerinin yanı sıra kullanım kolaylığı, ek malzemeye ihtiyaç duymaması vb. parametrelerden dolayı birçok farklı endüstri dalında sac birleştirme metodu olarak tercih edilir. Bazı endüstri faaliyetlerindeki kullanımlarından örnekler vermek gerekirse;

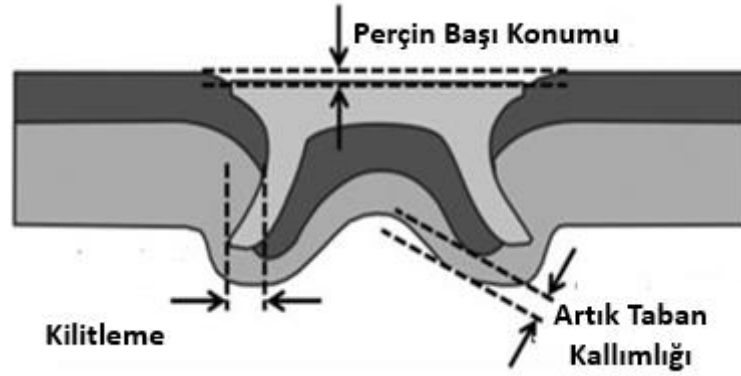
- ✓ Yapı endüstrisinde: Kapı ve pencere çerçevelerinde, zemin ve çatı malzemelerinde, oluk ve kablo kanallarında, hafif çelik doğramalar, asansör havalandırma bileşenlerinde, aydınlatma, garaj kapılarında ve posta kutularında
- ✓ Beyaz Eşya ve Havalandırma endüstrisinde: Buzdolapları, çamaşır ve bulaşık makinelerinde, mikrodalga fırınlarda, sobalarda, sıcak su kazan imalatında, güneş kolektörlerinde, klimalarda, ısı eşanjörlerinde.
- ✓ Otomotiv Endüstrisinde: Ön ve arka kanat uygulamalarında, alüminyum ön kaput ve gövdelerde, alüminyum gövde bileşenlerinde, cam mekanizmalarında, silecek sistemlerinde, ayna desteklerinde, ısı kalkanlarında ve pedallarda.
- ✓ Soğutma Endüstrisinde: Şişe soğutucularda, hava filtrelerinde, otomatlarda, dondurucularda vb.
- ✓ Elektrik ve Elektronik Ekipman Endüstrisinde: Bilgisayar muhafazaları, kablo muhafazaları, kontaktörler vb.
- ✓ Mobilya Endüstrisinde: Mutfak dolapları, çekmeceler çeşitli dolaplar (İnt. Kyn. 9).



Resim 2.4 Bir Araba Kaputunda Form Punta (Clinching) Bağlantıları (Balawender 2016).

2.2.3 Kendiliğinden Delen Perçinleme Metodu

KDP teknolojisi özellikle sac levhaların birleştirilmesinde tercih edilen bir mekanik birleştirme metodu olup, bir ara eleman ile yüksek basınç değerlerinde sac levhaları çok katmanlı olarak sorunsuz bir şekilde birleştirmesine olanak sağlar. Bu yöntem kendinden delmeli bir perçinleme yapan form punta yöntemi olup, Bilhassa günümüze kadar yaygın olarak tercih edilen EDK ve kör başlı veya tam perçin metotlarına göre umut vermektedir. EDK'nın tersine KDP metotta kullanılan perçin, ince cidarlı sac levhaların bitmiş yüzeylerinde herhangi bir deformasyon bozukluklarına neden olmadan birleştirmesine olanak sağlar (Çekiç 2007). Şekil 2.36'da KDP metot kesit görünüşünün detayı gösterilmiştir.



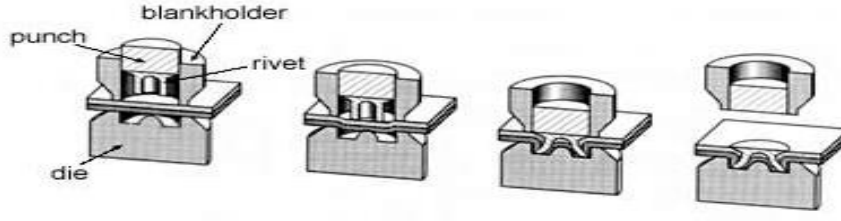
Şekil 2.36 Kendiliğinden Delen Perçinleme Kesit Görünüşü (Silva 2017).

2.2.3.1 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Aşamaları

KDP yöntemi genel olarak çelik ve alüminyum alaşımı sac levhaları birleştirme noktalarından yüksek hızda birleştiren bir mekanik tutturma tekniğidir. Tek adımda uygulanan bir tekniktir. Genelde sac levhaları mekanik bir bağlantıda perçinleme işlemi için yarı boru perçinler kullanılır. Yine yekpare perçin kullanan bir başka proses opsiyonu da mevcuttur. Bu metotta önceden delinmiş deliklere gerek yoktur. Bu da birleştirme işlem basamağının tek bir işlemle yapılmasına olanak tanır. KDP metot 4 aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar detaylandırılırsa;

- ✓ Birinci aşamada: Sac levhalar kalıp ile boş tutucu arasında sıkıştırılma uygulanır.
- ✓ İkinci aşamada: Yarı boru formundaki perçin, makinede mevcut bulunan bir pres yardımıyla sac levhalara zımba ile kalıp arasında birleştirilecek konumda yönlendirilerek çakılır.
- ✓ Üçüncü aşamada: Perçin üst tabakadaki sac levhayı deler ve kalıbın formu, perçinin alt tabakadaki sac levha içerisinde mekanik bir kilit oluşturmak üzere genişlemesini sağlar. Ayrıca kalıbın şekli alt tabakadaki sac levhanın alt kısmında bir düğme formu oluşturur.
- ✓ Dördüncü aşamada: Birleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra zımba sac levhalar üzerinden geri çekilir (İnt. Kyn. 10).

Bu süreç şekil 2.37’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.37 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Aşamaları (İnt. Kyn. 10).

2.2.3.2 Kendiliğinden Delen Perçinleme Tekniğinin Avantajları

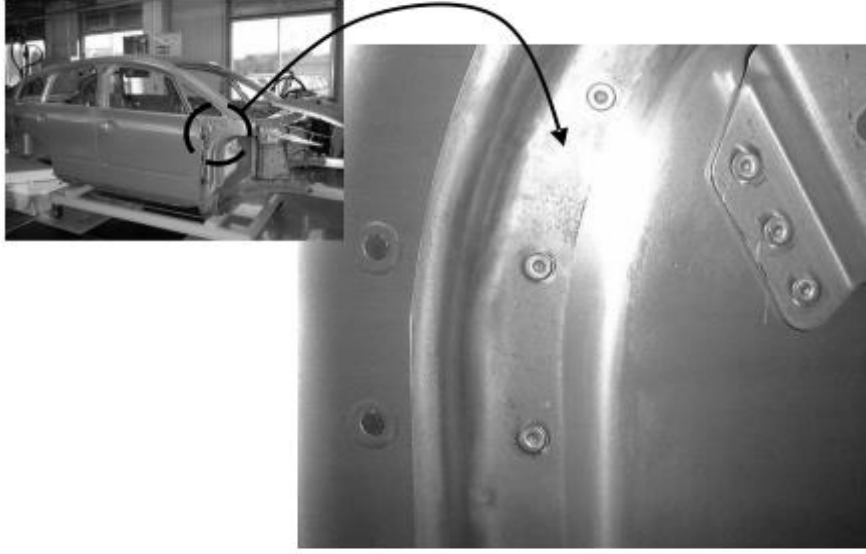
KDP metodun avantajlarını sıralamak gerekirse;

- ✓ Perçin işlemi için önceden delik delme işlemleri gerektirmez.
- ✓ Uygulama işlemleri basittir, kalifiye operatöre gerek duyulmaz.
- ✓ Çok iyi tekrarlanabilirdik özelliği ile kolay otomasyon ve 1-4 sn arası hızlı çevrim süreleri
- ✓ Kaynak operasyonlarından kaynaklı toz, talaş ve ısı dumanlarının olmaması
- ✓ Diğer kaynak yöntemlerine ile karşılaştırıldığında daha düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet
- ✓ Çevre dostu ve atık malzeme sarfiyatı yoktur.
- ✓ Birleşim işleminden sonra kaplanmış malzeme yüzeylerinde hasar bırakmaması
- ✓ Farklı malzemelerin birlikte birleştirilme imkânı sağlaması karbon fiber kompozitler, titanyum, bakır, alüminyum alaşımları vb. (Haque 2018).

2.2.3.3 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Alanları

Birçok malzeme grubunu seri ve güvenilir şekilde birleştirme yeteneğine sahip KDP metod endüstrinin farklı alanlarında başarı ile kullanılmaktadır. Uygulama örneklerine yer vermek gerekirse;

- ✓ Otomotiv Endüstrisi için: Pencere aralıkları, kapı bağlantı aralıkları, kanatlar, ön ve arka motor kapağı, süspansiyon tutturma braketleri, ısı kalkanları, açılır tavan uygulamaları ve akü bağlantılarında başarı ile uygulanır.
- ✓ Isıtma, Klima ve Havalandırma Sistemlerinde: Havalandırma kanalı boruları, Radyatör montajlarında, ventilasyon borularında vb. uygulanır (Çekiç 2007).



Resim 2.5 Otomobil Sac Panelinde KDP Uygulaması (Mori 2014).

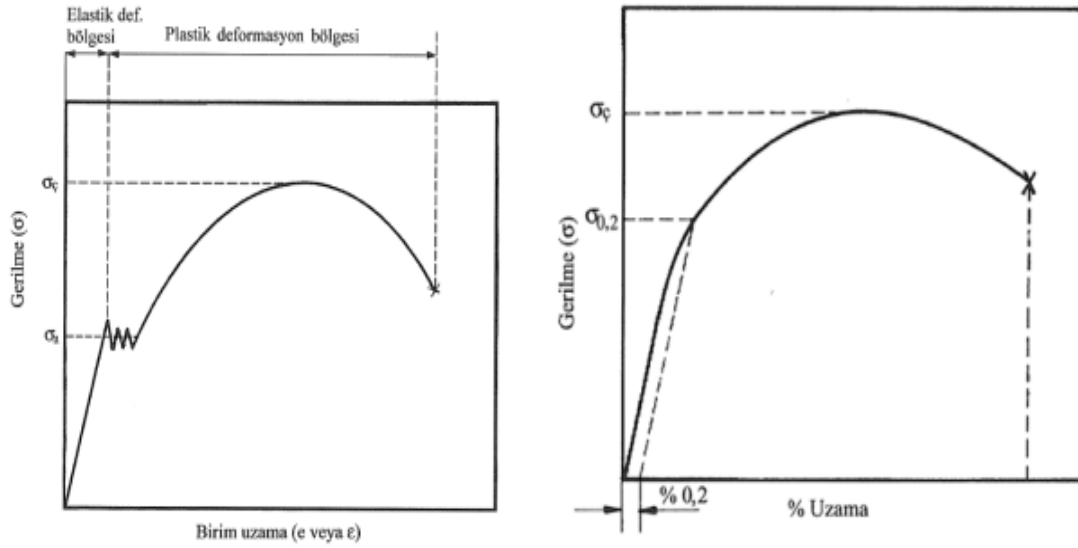
2.3 Mekanik Testler

Mekanik testler, bir materyalin veya bileşenlerinin kullanım amaçlarına uygun olup olmadığını belirleyen farklı türde mukavemet testleri uygular. Materyal veya materyal bileşenlerinin; uzama, esneklik, gerilme dayanımı, gerilim kırılması, sertlik, darbe direnci, tokluk ve yorulma limiti gibi parametrelerini inceler (İnt. Kyn. 11).

2.3.1 Çekme Deneyi

Mühendislik tasarımında kullanılan malzemeler genelde rijit olmadığından dolayı kuvvetler altında deformasyona uğrayıp şekil ve boyut değişiklikleri gösterirler. Bu durumda malzeme özelliklerini anlamak için mekanik test çalışmaları yapılır. Bunlardan en önemlisi çekme deneyidir (İnt. Kyn. 12). Çekme deneyinde elde edilen veriler mühendislik hesaplamalarında direkt kullanılabilir. Çekme deneyi sonucunda kuvvet (F) ve Uzama (Δl) eğrisi sağlanmış olur. Ancak daha çok kabul gören Gerilme-Uzama eğrisidir. Bu sebeple uygulanan kuvvet, deney numunesinin ilk kesitine bölünerek ($\sigma = F/A_0$), uygulanan kuvvet değerleri gerilme değerlerine dönüşümü gerçekleşir ve Gerilme-Uzama grafikleri oluşur. Oluşan gerilme-uzama grafiklerinde düşük karbonlu çelik numunelerde akma bölgesinde bir dalgalanma oluşurken yüksek karbonlu çeliklerde düz bir hat formu oluşur. Bu sebepten dolayı yüksek karbonlu çeliklerde akma bölgesinin

tespitinin zor olmasından sebep elastik bölge çizgisi % 0,2 ötelenerek ana çizgiyi kestiği nokta akma noktası olarak tayin edilir. Şekil 2.38’de çekme testleri için Gerilme-Uzama grafikleri gösterilmiştir. Ayrıca çekme deneyleri sonucunda malzemelerin; Elastisite modülleri, akma dayanımı, kopma dayanımı gibi mukavemet değerleri ve kopma büzülmesi ile tokluk gibi süneklik değerleri belirlenir. Tüm bu özellikler malzemenin cinsine, kimyasal ve metalografik yapısına bağlıdır. Bu değinilen parametrelerden çekme deneyi için önem arz edenler aşağıda belirtilmiştir (İnt. Kyn. 13).



Şekil 2.38 Çekme Deneyi Gerilme -Uzama Grafiği (İnt. Kyn. 13).

Çekme deneyinde ortaya çıkan mekanik özellikler;

- ✓ Akma Dayanımı (σ_a) (Yield Strength)
- ✓ Elastisite Modülü (E) (Young Modulus, Elasticity Modulus)
- ✓ Çekme Dayanımı (σ_c) (Tensile Strength)
- ✓ Kopma Uzaması (ϵ_{rp})
- ✓ Kopma Daralması

2.3.1.1 Çekme Deneyi Tanımlamaları

Gerilme (σ): Birim alana etkiyen kuvvet anlamına gelir. Aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (2.6)$$

Birim Şekil Değişirme (ϵ) : Deney numunesine kuvvet uygulandığı zaman oluşan boy değişiminin kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy olan oranı

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.7)$$

Elastisite Modülü (E): Malzemenin dayanımının bir ölçüsüdür. Birim uzama ve normal gerilme (çekme veya basma gerilmesi fark etmez) arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucu olarak oluşur. Bir başka ifade ile birim uzama başına karşılık gelen gerilme olarak da tanımlamak mümkündür. Birim uzama ile normal gerilme (Çekme veya basma gerilmesi) arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlamak gerekirse: Malzemeye kuvvet uygulandığında malzemede oluşan uzamalar elastik sınırlar dâhilinde gerilmeler ile orantılıdır. Buna literatürde “Hook Kanunu” adı verilmektedir. Elastisite modülü malzemelere ait karakteristik bir özelliktir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (Mpa)} \quad (2.8)$$

Akma Dayanımı (σ_a): Deney aşamasında uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit bir değer almasına karşın, plastik deformasyonun önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünlük sergilediği bölüme tekabül eden gerilme değeridir.

$$\sigma_a = \frac{P_a}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (2.9)$$

Çekme Dayanımı (σ_{ζ}): Bir malzemenin kopuncaya ya da kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek gerilme değeri olup çekme diyagramında da en yüksek gerilme değerini alır. Aşağıda verilen formül yardımı ile bulunur.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{max}}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (2.10)$$

Kopma Gerilmesi (σ_k): Deney numunelerinin koptuğu andaki gerilmedir.

$$\sigma_k = \frac{P_k}{A_0} \text{ (Mpa)} \quad (2.11)$$

Yüzde Kopma Uzaması (KU) : Çekme deney numunelerinin boyunda oluşan en yüksek yüzde plastik oranıdır. Çekme deneyi uygulanan numunelerin kopan kısımlarının tekrar bir araya getirilmesi ile son boy bir kez daha ölçülür ve numune boyunda oluşan uzama $\Delta L = L_k - L_0$ işlemi ile bulunur. Burada L_0 deney numunesinin ilk boyudur. L_k ise deney numunesinin çekme deneyine tabi tutulduktan sonraki boyudur. Kopma uzaması ise;

$$KU = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (2.12)$$

işlemi ile belirlenir. Bulunan değer malzemenin sünekliğini gösterir.

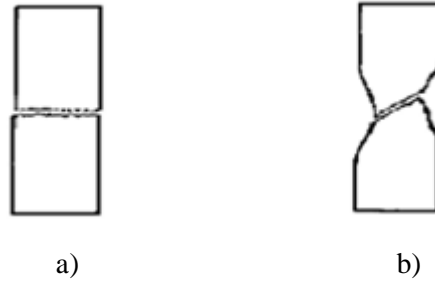
Yüzde Kesit Daralması (KD) : Çekme numunelerinin kesit alanında oluşan en büyük yüzde daralma veya başka bir ifade ile büzülme oranı olup;

$$KD = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100 \quad (2.13)$$

İşlemi ile belirlenir. Burada A_0 deney numunesinin deneyden önceki ilk kesit alanını A_k ise deneyde kırılma anındaki kesit alanını veya kırılma yüzey alanını gösterir. A_k değerinin hesaplanması için numune hacminin sabit kalacağı ifadesi kullanılır.

$$V_0 = V_k \Rightarrow A_0 L_0 = A_k L_k \Rightarrow A_k = A_0 L_0 / L_k \quad (2.14)$$

Kesit daralması da tıpkı kopma uzaması gibi sünekliğin bir göstergesidir. Sünek malzemelerde çekme deneyi esnasında belirgin bir şekilde büzülme veya boyun verme gerçekleşirken, gevrek malzemeler büzülmeye uğramazlar. Gevrek ve sünek çekme deney numunelerinin kırılma davranışları Şekil 2.39'da şematik olarak gösterilmiştir (İnt. Kyn. 14).



Şekil 2.39 Çekme Deney Numunelerinin Kırılma Davranışları a) Gevrek Malzemelerin Kırılma Şekli b) Sünnek Malzemelerin Kırılma Şekli (İnt. Kyn. 14).

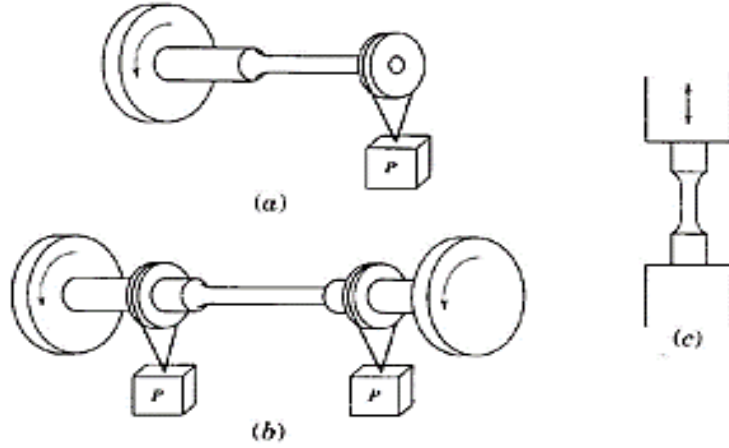
2.3.2 Yorulma Deneyi

Yorulma deneyleri bir materyalin döngüsel olarak uygulanan yükleme koşullarında hasara uğramasına karşı dayanabileceği yeteneğin bulunmasına yardımcı olur. Tasarım koşullarınca yorulma deneyleri işlemlerinde tahmin edilen servis yüklerine dayanabilecek veya aşabilecek bir materyal seçilir. Çevrimli yorulma deneyleri; gerilme, basma, eğme, burulma ya da bu uygulanan gerilme türlerini bir arada içeren tekrarlı bir şekilde yükleme ve yük boşanımlarını gerçekleştirir. Yorulma deneyleri genel kapsamda çekme-çekme, basma-basma şeklinde gerçekleşen yüklemelere ilave olarak basma ve tersine çekme yükleme koşullarında da gerçekleştirilir (İnt. Kyn. 15).

2.3.2.1 Yorulma Deneyi Türleri

Yorulma deneylerinde uygulanan gerilme türleri yorulma deneylerinin türünü belirlemektedir. Yorulma deney türleri genel itibari ile dört ana grupta toplanır bunlar;

- ✓ Aksenal (Çekme-Basma) Gerilmeli Yorulma Testleri
- ✓ Eğme Gerilmeli Yorulma Testleri
- ✓ Burulma Gerilmeli Yorulma Testleri
- ✓ Birleşik Gerilmeli Yorulma Testleri



Şekil 2.40 Bazı Yorulma Test Cihazlarının Çalışma Şematikleri a) Tek Uç Kısmından Yüklenmiş Dönel Eğmeli Tip b) İki Uçundan Yük Uygulanmış Dönel Eğmeli c)Eksenel Gerilmeye Maruz Bırakılmış (Çeki-Bası) (İnt. Kyn. 16).

Eksenel Gerilmeli Yorulma Testleri: Bu test metodunda deney numunesine uzunluğu boyunca çeki veya bası türünde gerilmeler uygulanır. Deney esnasında etki eden gerilmeler numunenin eni doğrultusunda homojen bir şekilde dağılımı gerçekleşir.

Eğme Gerilmeli Yorulma Testleri: Bu test metodu da kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır;

- ✓ Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Testi
- ✓ Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma Testi

Belirtilen birinci test türünde deney numunesi nötr tarafsız bir düzleme yada eksene göre tekrar gösteren gerilmelere maruz bırakılmaktadır. Otomotiv endüstrisinden örnek vermek gerekirse yaprak yağları bu metot ile yüklemek iyi bir deney örneğidir. Belirtilen ikinci test türünde ise deney numuneleri sürekli dönen bir nötr eksene göre tekrarlanan gerilmelerin etkisi altındadır. Bu deney türüne otomotiv endüstrisinden örnek vermek gerekirse taşıt aksları bu yükleme metodu için ideal bir örnek teşkil edebilir.

Burma Gerilmeli Yorulma Testi: Bu test metodunda, deney numuneleri sabit bir eksen takımına göre tekrarlı bir şekilde burulma gerilmesine maruz bırakılır. Taşıtların süspansiyon yağları yine çeki-bası kuvvetlerinin etki ettiği helisel yay gruplarında bu tarz gerilmeler meydana gelir.

Birleşik Gerilmeli Yorulma Testi: Yukarıda yer alan maddelerde söz konusu geçen gerilme türlerinin ikisinin ya da daha fazlasının birlikte olduğu durumlara birleşik gerilme durumu denilmektedir. Pratikte en fazla eğme-burma gerilmeli ve eksenel -burma gerilmeli bileşik gerilmeler görünmektedir. Bu gerilme türüne örnek vermek teşkil ederse, motorlarda yer alan krank mili başlıklarındaki gerilme, eğme ve burma gerilme türlerinin birlikte yer aldığı gerilme türlerine verilebilecek en güzel örneklerdendir (İnt. Kyn. 16).

2.3.2.2 Yorulma Deneylerinin Yapılışı

Yorulma deneylerinde, yorulma dayanımının tespiti Wöhler eğrileri ile tespit edilir. Bu metotta deneye tabi tutulacak numunelere farklı gerilme seviyeleri uygulanarak kırılmanın meydana geldiği çevrim sayıları tespit edilir. Bir yorulma deneyinde aynı özellikler içerisinde 6 ile 8 adet deney numunesi ile deney gerçekleştirilir. Wöhler yaklaşımında bir deney esnasında tüm numuneler için ortalama gerilme (σ_{ort}) ya da alt gerilme değeri (σ_{alt}) sabit kalması sağlanarak yapılan her bir deney için ayrı gerilme genliği (σ_a) belirlenir. Yapılacak ilk deneyde üst gerilme değeri genelde akma sınırı değerine yakın bir değerde seçilir ve deney numunesi zorlanır. Bir sonraki deney numunelerinde azalan şekilde gerilme değerleri uygulayarak kırılma çevrim sayı değerinin çok yüksek değerlere erişmesi elde edilir. Numunelere uygulanan bu deney serisince uygulanan gerilme genlikleri ve kırılma olayının gerçekleştiği çevrim sayı değerlerinin bir eğri olarak çizimi olan Wöhler eğrisi (S-N, Gerilme-Ömür Eğrisi) oluşmuş olur. Deneyde sonsuz çevrim sayısı dâhilinde kırılma olayının görülmediği en büyük gerilme genliği bir başka ifade ile oluşan eğrinin asimptotuna tekabül olan değer, yorulma dayanımına karşılık gelir ve σ_y ile sembolize edilir. Ayrıca belirli bir çevrim sayısı değerinden sonra oluşan eğri sonsuz çevrim sayısı değerine yaklaşmış kabul edilebilir. Yorulma deneylerinde sınır çevrim sayısı oda sıcaklığı şartlarında çelik malzemeler için $10 \cdot 10^6$ yine düşük ve yüksek özgül ağırlığa sahip metaller ile yüksek sıcaklık ortamında çelik malzemeler için $100 \cdot 10^6$ çevrim sayısı baz alınabilir. Lakin bu çevrim süreleri bilhassa deney sürelerini gereğinden fazla uzatabileceği için olağan deney sürelerini kısaltmak maksadıyla çelik malzemeler için $2 \cdot 10^6$ çevrim sınır sayısı, düşük özgül ağırlığa sahip metaller içinde $10 \cdot 10^6$ ile $50 \cdot 10^6$ çevrim sınır sayıları arasındaki değerler uygulanır.

D deney süresince numuneler yorulma cihazına dairesel kesite sahip iseler salgısız bağlanmalıdır. Numunelere uygulanan gerilme değeri, akma gerilme değeri altında ve farklı gerilmeler altında deney süresince sabit tutularak kırılmanın gerçekteştiği N tekrar sayısı tespit edilir ve süreçle Wöhler Eğrisinin oluşumu tamamlanmış olur (İnt. Kyn. 17).

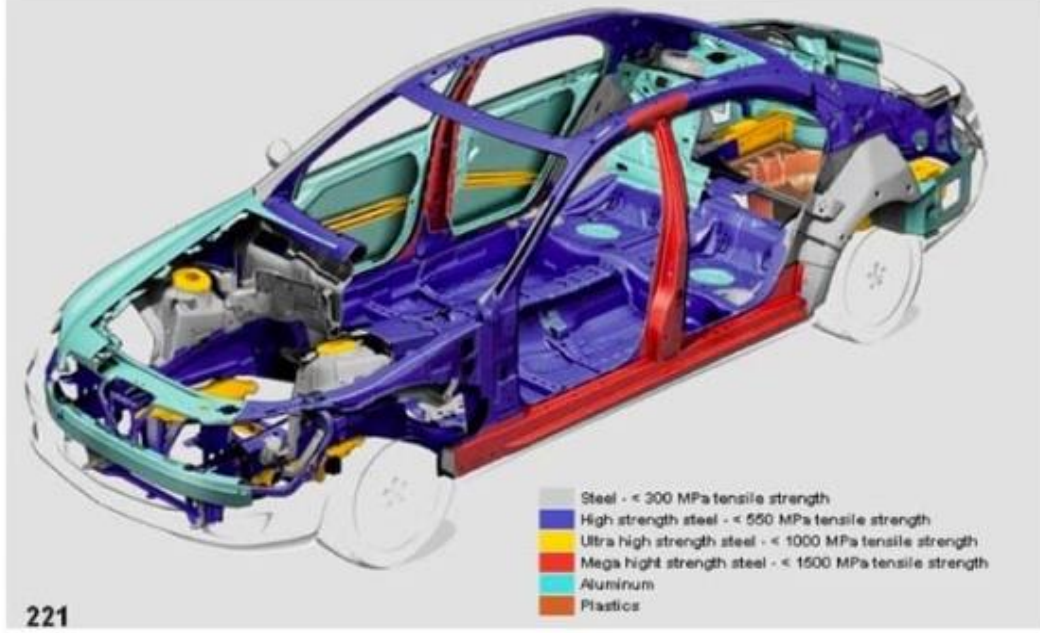


3. MATERYAL ve METOT

3.1 Malzeme Seçimi

Galvanize yassı çelik mamullerin, soğuk haddeleme metodundan geçirilmiş ruloların yüzeylerine elektroliz ya da sıcak daldırma metodu ile çinko ve alaşımlarının kaplanması yoluyla üretimi gerçekleştirilir. Galvaniz mamulün kullanılacağı bölgenin atmosfer ortam şartlarına göre ve istenmekte olan korozyon direncine göre 600 gr/m²'ye kadar değişebilen kalınlık değerlerinde uygulama yapmak mümkündür. Galvanize çelikler; katlandıkları esnada çinko kaplamaları dökülmez, mukavimliğini sürdürür, derin çekme ile sıvama metotlarında işlenmeye uygundur, ateşe karşı dayanıklıdır, korozif ortamlarda 20 ile 50 yıl dayanım gösterir, boyanabilirliği ve lehim tutması kolaydır. Beyaz eşya, otomotiv, çatı ve kapı üretimi, boru profillerin üretiminde kullanımı yaygındır (İnt. Kyn. 18). Bu tez çalışmasında yorulma deneylerinde kullanılacak malzeme seçiminde çelik malzeme olarak Erdemir 1314 kalite 1 mm kalınlığa sahip düşük karbonlu galvanize çelik sac levha kullanılacaktır. Bilhassa soğuk şekillendirme kabiliyetinden dolayı (BMC, Ford, Mercedes, Renault) gibi otomotiv firmalarında yaygın olarak kullanılan bir galvanize çelik sac malzemedir (Yıldız 2006). İncelenecek bir başka malzeme olan alüminyum alaşımı, çelikten sonra en çok rağbet gören endüstriyel ya da endüstriyel olmayan işlerde tüketicilerin son yıllarda tercih ettiği metal olarak kabul görmektedir. Günlük yaşamda; otomotiv, inşaat, havacılık, enerji, gıda ve birçok farklı endüstri grubunda alüminyum alaşımlarını tercih etmekteyiz. Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde; motor blokları, radyatörler, jantlar ve gövde parçaları olarak; levha ve profil formlarda tercih edilmektedir. Yaygın bir şekilde üretim için 5000 ve 6000 serisi alüminyum alaşımları yüksek korozyon direnci, yüksek tokluk ve kaynak kabiliyeti ile yeterli uygunluğu sağlar (İnt. Kyn.19). Bu tez çalışmasında yorulma deneylerinde kullanılacak alüminyum alaşım ise 1 mm kalınlığa sahip 5000 serisi Al 5052 alaşımı sac levha kullanılacaktır. Yapısında % 2,5 magnezyum (Mg) içeren Al 5052 alaşımı korozyona karşı direnci yüksektir, kaynaklanabilir ve soğuk şekillendirme kabiliyetine sahip olmanın yanı sıra yüksek yorulma dayanımı ve orta statik dayanıma sahiptir (İnt. Kyn. 20).

5XXX serisi alaşımlar bilhassa taşıt gövdelerinin iç paneli gibi kompleks şekillere sahip bileşenler için kullanılmaktadır. Acura NSX araba gövdesi olarak Al 5052 alaşımını kullanmaktadır (İnt. Kyn. 21). Resim 3.1’de alüminyum alaşımları ile çelik malzemelerin araç şasesi üzerinde birlikte kullanıldığı bölgeler gösterilmiştir.



Resim 3.1 Otomobillerde Çelik ile Alüminyum Malzemelerin Birlikte Kullanımı (İnt. Kyn. 22).

3.1.1 Sac Levhaların Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

Bu tez çalışmasında, soğuk şekillendirme kabiliyetlerinin yüksek olmasının yanı sıra korozyon dirençleri de yüksek olan düşük karbonlu galvanize çelik Erdemir 1314 ile Al 5052 alaşımlarımdan oluşan sac levhaların mekanik özellikleri ve kimyasal özellikleri aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Erdemir 1314 Galvanize Çelik Mekanik Özellikleri (İnt. Kyn. 23).

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

Çizelge 3.2 Erdemir 1314 Galvanize Çelik Kimyasal Bileşimi (İnt. Kyn. 23).

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

Çizelge 3.3 Al5052 Alaşımı Mekanik Özellikleri (İnt. Kyn. 24).

Mekanik Özellikler Al 5052		
Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
≥ 65	170 -305	≥ 5

Çizelge 3.4 Al 5052 Alaşımı Kimyasal Bileşimi (İnt. Kyn. 24).

Kimyasal Bileşim Al 5052									
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti	Diğerleri	Al
0.25	0.4	0.1	2.2-2.8	0.1	0.1 - 0.35	0.1	–	0.15	Denge

3.1.2 Numunelerin OES Analizi ile Kimyasal Bileşiminin Belirlenmesi

Deneylerde kullanılan Düşük Karbonlu Galvanize Çelik Erdemir 1314 ile Al 5052 alüminyum alaşımı deney numunelerinin kimyasal bileşimleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji ve Uygulama Merkezi (TUAM)'nde Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) cihazında belirlenmiştir. OES bilhassa metal malzemelerin nitelik ve nicelik karakterlerinin belirlenmesinde kullanımı olan bir tekniktir. Bu teknik, numunelerde yer alan her elementin alev ile ısıtılmaya tabi tutulduğunda belirli frekans değerlerinde karakteristik özelliklerde spektral çizgiler yayması prensibine dayanmaktadır. OES cihazlarında uyarma iki elektrot arasında oluşturulan akım darbesi ya da elektrik boşalımı ile gerçekleştirilir. Bu şekilde oluşturulan spektral çizgilerin büyük kısmı mor ötesi (UV) aralığında yer almaktadır. Oluşturulan spektral çizgilerin birbirinden ayırt edilebilmesi için ızgara reflektör kullanılır. Çizgilerin şiddetleri CCD sensörler yardımı ile ölçülür. Böylece numune içerisinde yer alan elementler ve elementlerin yüzde değerleri belirlenmiş olur (İnt. Kyn. 25). Bu yöntem ile detaylı bir şekilde belirtilen deney numunelerinin içerisindeki element ve yüzdeleri, galvanize çelik Erdemir1314 için Çizelge 3.5'de Al 5052 alaşımı için ise Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 OES Cihazı ile Belirlenmiş Erdemir 1314 Galvanize Çelik Kimyasal Bileşimi.

	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 3.6 OES Cihazı ile Belirlenmiş Al 5052 Alaşımı Kimyasal Bileşimi.

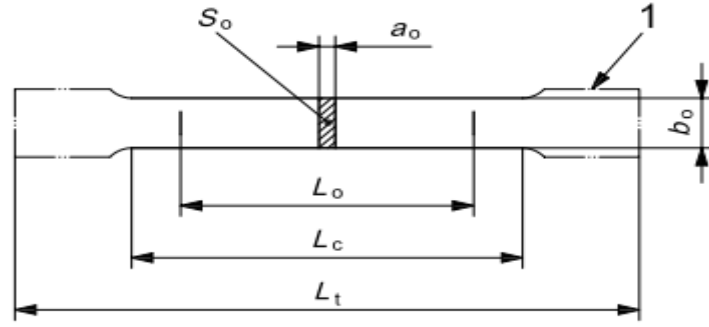
	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ni%	Ti%
Rapor	0.041	0.227	0.022	0.198	13.862	0.032	0.009	0.016	0.031
	V%	Pb%	Sn%	Sr%	Be%	Ca%	Co%	B%	Ag%
Rapor	0.007	0.014	0.008	0.0002	0.0008	0.0005	<0.0005	0.0005	<0.005
	Bi%	Ga%	Sb%	P%	Zr%	Al%			
Rapor	<0.0005	0.011	0.015	<0.005	<0.005	97.976			

3.2 Deneyler için Kullanılacak Malzemelerin Hazırlanması

Deneyler için otomotiv endüstrisinde tercih edilen 1mm kalınlıklarda 1314 kalite düşük karbonlu galvanize çelik sac ile Al 5052 alaşımı sac levha kullanılmıştır. Bu malzemeler TSE EN ISO 6892-1 (Çizelge 3.7) standartlarına göre baz alınarak belirlenen ölçü değerlerinde ve Şekil 3.1'e uygun olarak CNC lazer makinelerinde, çekme deneylerine hazır hale getirmek için kesilmiştir. Çekme deneylerinde numune ölçüsü olarak Çizelge 3.7 'deki Tip 2 ölçüleri baz alınmıştır. Yapılan çekme deneylerinde ise belirtilen standarda göre kesilen numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çizelge 3.7 TSE EN ISO 6892-1 Standart Ölçü Değerleri.

Test Tipleri	Genişlik b_0	İlk ölçü Uzunluğu L_0	Paralel Uzunluk L_c		Toplam Uzunluk L_t
			Minimum	Tavsiye Edilen	
1	12,5	50	57	75	87,5
2	20	80	90	120	140
3	25	50	60		Tanımlanmamış

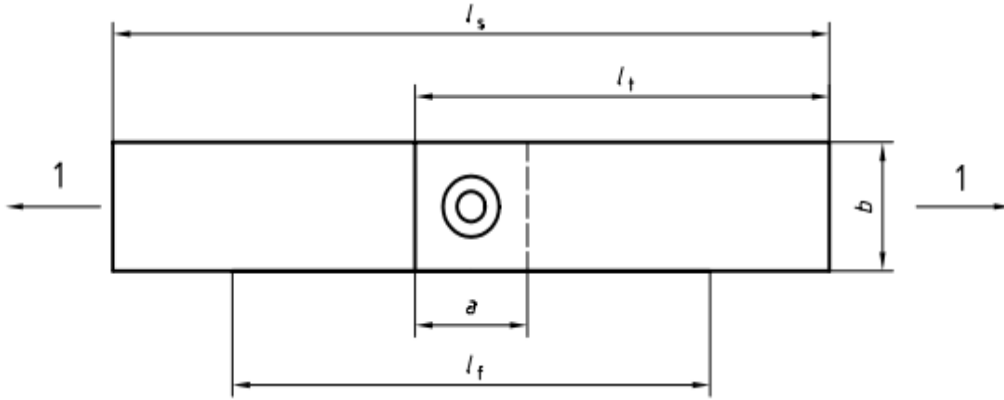


Şekil 3.1 TSE EN ISO 6892-1 Standardına Uygun Çekme Deneyi Numune Örneği.

Deney için kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla TSE EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilecek çekme deneyi için CNC lazer makinesinde kesilen numunelerden sonraki adım ise yorulma deneyini başlatabilmek için gerekli olan kuvvet değerlerini tespit etmek amacıyla numuneler bu tez için belirlenen üç farklı sac levha birleştirme metodu; EDK, FP ve KDP ile kesme deneyi için TSE EN ISO 14273 standardında birleştirilir. TSE EN ISO 14273 standardı ölçü değerleri Çizelge 3.8’de gösterilmiştir. Sac levhaları birleştirme için hazırlanan kesme deneyi numune örneği ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Kesme deneylerinde numune ölçüleri olarak Çizelge 3.8’deki Tip 1 ölçüleri baz alınmıştır.

Çizelge 3.8 TSE EN ISO 14273 Standart Ölçü Değerleri.

Test Tipleri	Kalınlık t	Üst Üste Binme Mesafesi a	Genişlik b	Toplam Uzunluk l_s	Sac Arasındaki Serbest Uzunluk l_f	Her Bir Sac Uzunluğu l_t
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

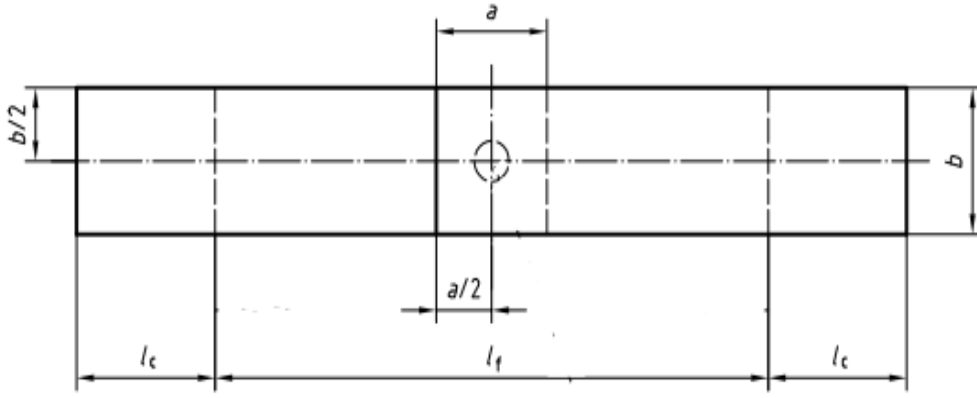


Şekil 3.2 TSE EN ISO 14273 Standardına Uygun Birleştirilmiş Kesme Deneyi Numune Örneği.

TSE EN ISO 14273 standardına göre birleşimleri, bu tez çalışmasında belirtilen üç farklı sac levha birleştirme metoduna göre yapılan numunelerden kesme deneyi sonucu elde edilen maksimum çekme kuvvetleri verileri doğrultusunda çelik ve alüminyum alaşımı sac levha numunelerimiz, yorulma testlerinde EDK için tavsiye edilen TSE EN ISO 14324 standartlarında birleştirilip yorulma deneyleri için hazır hale getirilmiştir. TSE EN ISO 14324 standardı ölçü değerleri Çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Sac levhaları birleştirmek için hazır hale getirilen yorulma deneyi numune örnekleri ise Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Yorulma deneylerinde numune ölçüleri olarak Çizelge 3.9'daki Tip 1 baz alınmıştır.

Çizelge 3.9 TSE EN ISO 14324 Standart Ölçü Değerleri.

Test Tipi	Kalınlık t_1	Genişlik b	Üst Üste Binme Binme Mesafesi a	Saclar Arasındaki Serbest Uzunluk l_f
1	$0,5 \leq t_1 \leq 1,5$	45	35	160
2	$1,5 \leq t_1 \leq 3$	60	45	200
3	$3 \leq t_1 \leq 6$	90	60	240



Şekil 3.3 TSE EN ISO 14324 Standardına Uygun Birleştirilmiş Yorulma Deneyi Numune Örneği.

3.3 Deney Numunelerinin Birleştirilmesi

Bu tezde uygulanan her üç sac bağlantı metotlarına göre birleşimleri yapılan numuneler, kesme deneyleri için Şekil 3.2'deki görseldeki gibi tek nokta üzerinden birleştirildi. Yorulma deneyleri içinde numuneler Şekil 3.3'teki gibi yine tek nokta üzerinden birleştirildi.

3.3.1 Deney Numunelerinin Elektrik Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesi

EDK uygulanan birleştirmelerde numunelerin alüminyum alaşımı olması durumunda numune yüzeylerinde yer alan uniform olarak dağılmayan oksit tabakası oldukça yüksek elektrik direncine sahiptir ve yüksek sıcaklık noktalarında ergimesi gerçekleşir. Numune yüzeylerindeki bu oksit tabakası EDK uygulamasından önce uzaklaştırılmalı ve bu katman uniform bir düzende elektrik direncine sahip bir duruma getirilmelidir. EDK uygulamasında oksit tabakası giderilmediği takdirde elektrot ömrü azalır daha önemlisi verimli bir kaynak uygulaması gerçekleşmez. Alüminyum alaşımı numunelerin yüzeylerinde oksit tabakasını temizlemek mekanik ve kimyasal yollarla gerçekleştirilir. Kimyasal yollar ile temizlik; kütle halindeki üretim ve büyük yüzeylerin temizliğinde tercih edilir. Kimyasal temizlik metodunda çözelti bileşenleri % 12 Nitrik asit ve % 0.4 hidroklorik asitten oluşmaktadır. Numunelere bu çözelti 2-6 dakika arasında kimyasal banyo şeklinde uygulandıktan sonra temiz su ile durulama işlemleri gerçekleştirilir (Kahraman 2009).

Alüminyum alaşımı deney numunelerindeki oksit tabakalarını gidermek amacıyla uygulanan kimyasal çözelti ve hazırlanan çözelti ile kimyasal banyosu gerçekleştirilen numuneler Resim 3.2’de gösterilmiştir.



Resim 3.2 Al 5052 Alaşımı Sac Levha Numunelerinin Yüzeylerindeki Oksit Tabakalarının Giderilmesi.

TSE EN ISO 14273 ile TSE EN ISO 14324 standart ölçülerine göre CNC lazer makinesinde kesilen 1 mm kalınlığa sahip Erdemir 1314 kalite galvanize çelik sac levha ile Al 5052 alaşımı sac levhanın birleştirmeleri ise Afyon Kocatepe Üniversitesi (A.K.Ü) makine elemanları laboratuvarında bulunan 30 kVA DC elektrik direnç nokta kaynağı makinasında, konik uçlu % 99 bakır oranına sahip elektrot ile yapıldı. Deney numunelerine uygulanan kaynak parametrelerinde; kaynak süresi ve 1 mm saclar için tavsiye edilen elektrot baskı kuvveti sabit tutularak farklı kaynak akımlarında numune birleştirmeleri, en yüksek çekme mukavemetini yakalamak dolayısıyla en ideal yorulma ömrünü tespit etmek amacıyla gerçekleştirildi. EDK ile numune birleştirme uygulamalarından önce alüminyum sac levhalarda Çizelge 3.10’da kaynak parametreleri gösterilmiştir. Numunelerin EDK metodu ile birleşimleri Resim 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.10 Elektrik Direnç Kaynağı 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



Resim 3.3 Elektrik Direnç Kaynağı Makinesi ve EDK ile Birleştirilmiş Numuneler.

3.3.2 Deney Numunelerinin Form Punta ile Birleştirilmesi

EDK metodu ile gerçekleştirilen birleştirmelerde olduğu gibi yine TSE EN ISO 14273 ile TSE EN ISO 14324 standart ölçülerine göre belirlenmiş 1 mm kalınlığa sahip Erdemir 1314 kalite galvanize çelik sac levha ile Al 5052 alaşımı sac levhanın form punta ile birleştirmeleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi (A.K.Ü) makine elemanları laboratuvarında bulunan TOX firması tarafından üretilen 45 kN güç kapasiteli yarı pnömomatik yarı hidrolik prensipte çalışan form punta makinesinde gerçekleştirilmiştir. Makinenin sac levhaları birleştirmesi için 6 Bar basınçlı havaya gereksinim duymaktadır.

Mevcut kalıplar ideal olarak 2ve 4 mm kalınlığa kadar olan sac levha birleştirmelerine müsaade etmektedir. Birleştirme esnasında emniyet açısından makineyi harekete geçirmek için kollarda bulunan dört butona aynı anda basmak gerekir. Form punta makinesi ve bu makine ile gerçekleştirilen deney numunelerinin birleşimleri Resim 3.4'te gösterilmiştir.



Resim 3.4 TOX Form Punta Makinesi ve Form Punta Metot ile Birleştirilen Deney Numuneleri.

3.3.3 Deney Numunelerinin Kendiliğinden Delen Perçinleme ile Birleştirilmesi

Özellikle otomotiv endüstrisinde farklı metal malzeme gruplarının birleştirilmesinde elektrik direnç kaynağına alternatif olarak sunulan KDP metot ülkemizde kullanımı henüz yaygın değildir. Bu metot ile TSE EN ISO 14273 ve TSE EN ISO 14324 standartlarına göre hazırlanan deney numuneleri, özel sektöre hizmet veren bir firmanın yardımı ile birleştirilmiştir. Birleştirmelerde perçin 55,9 kN'luk bir kuvvet ile 230 mm/s ekleme hızında ve 0,051 s bekleme süresinde deney numunelerine nüfuz ederek numuneleri birleştirmiştir. Makinenin numune birleştirme esnasındaki veriler KDP makinesine ait bilgi ekranında Resim 3.5'te bilgi ekranı görülmektedir.

Ayrıca KDP makinesi genel görünüm ve KDP metot ile birleştirilen deney numuneleri Resim 3.6’da verilmiştir.



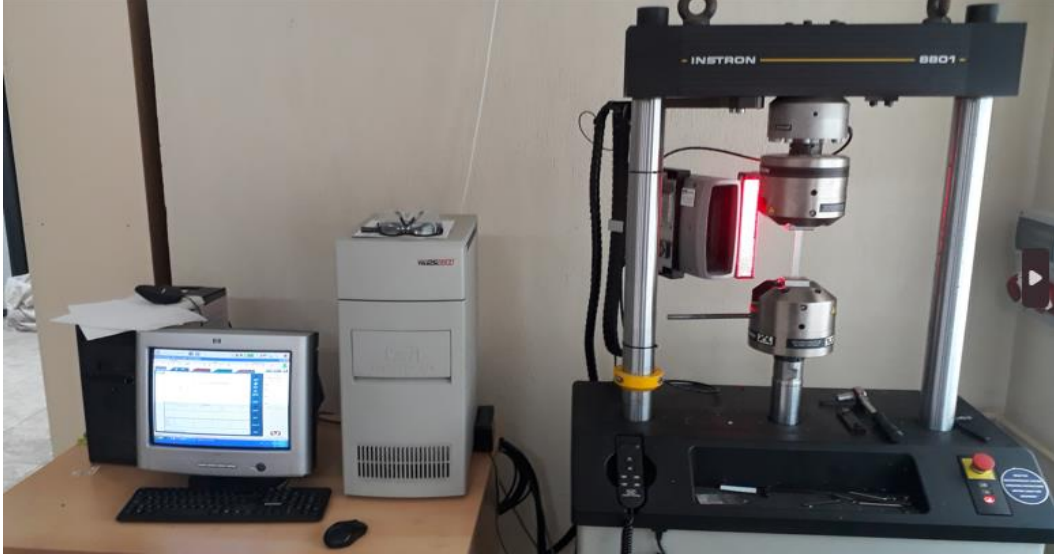
Resim 3.5 KDP Makinesi Numunelerin Birleştirilmesine ait Uygulama Bilgi Ekranı.



Resim 3.6 KDP Makinesi ve KDP ile Birleştirilen Deney Numuneleri.

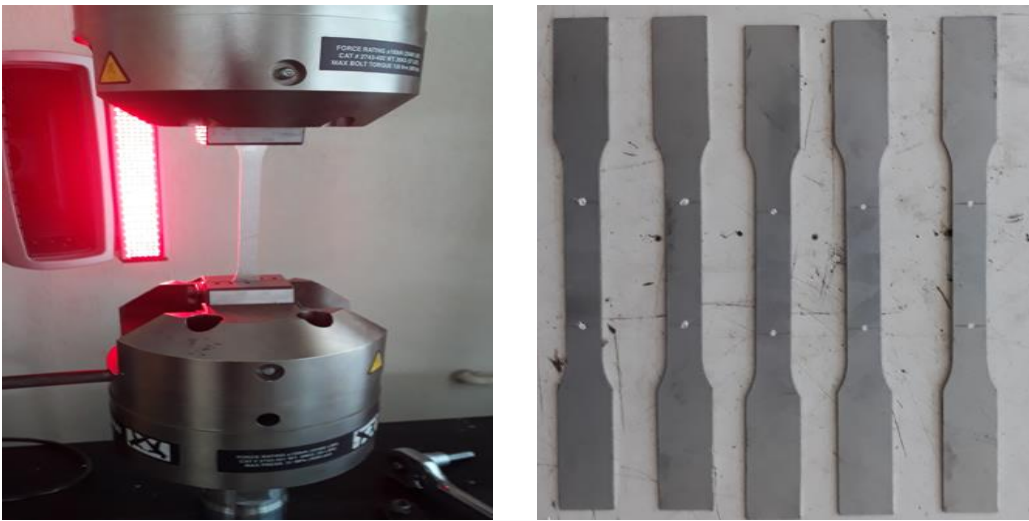
3.4 Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Çekme ve yorulma deneylerinin uygulanması Resim 3.7’de görseli bulunan A.K.Ü Makine Elemanları Laboratuvarında mevcut olan Instron marka 8801 model çekme ve yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın kapasitesi 100 kN olup servo hidrolik test sistemi statik ve dinamik testlerle beraber düşük ve yüksek frekanslarda yorulma deneylerine imkan tanımaktadır.



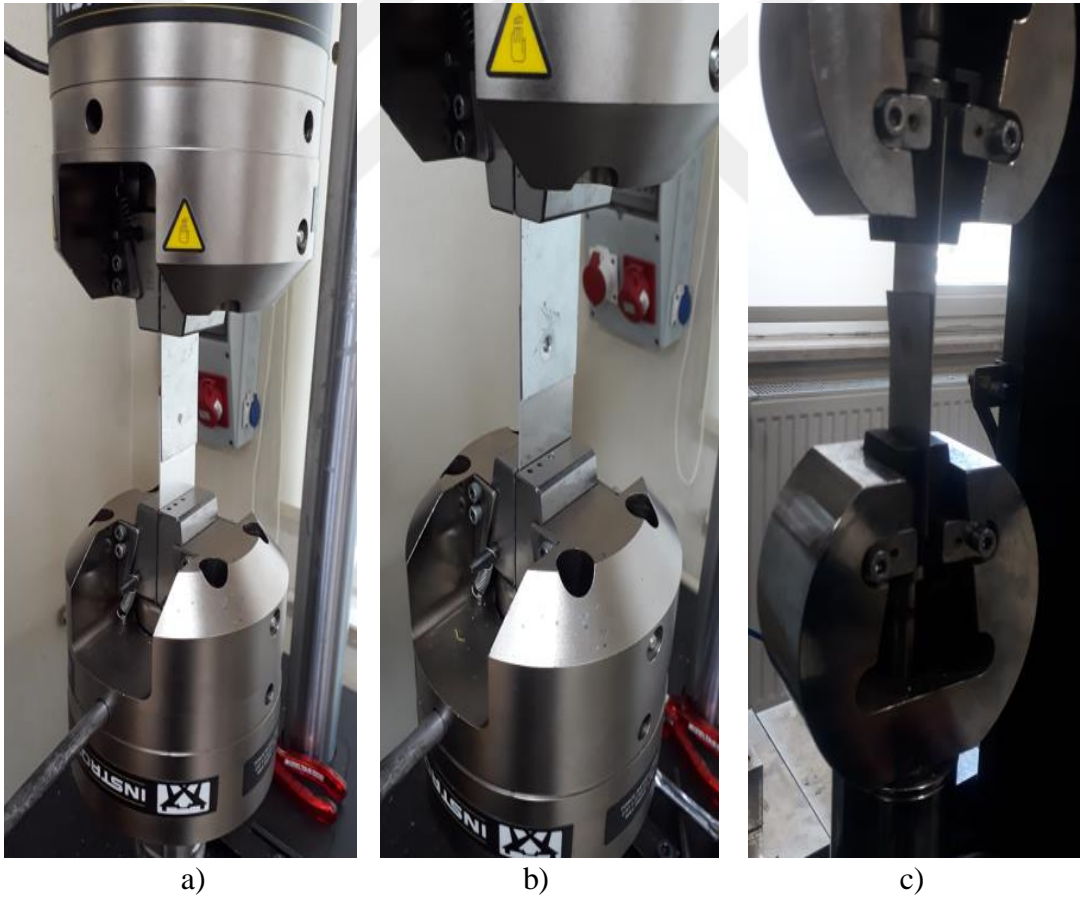
Resim 3.7 Instron 8801 Mekanik Test Cihazı Genel Görünüş.

Deneylere ilk önce bu çalışmada kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla TSE EN ISO 6892-1 standardına göre hazır edilmiş deney numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Numunelerden her bir malzeme grubu için beşer adet numuneye çekme deneyi uygulanarak, deneylerde kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Resim 3.8’de TSE EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmış çekme deneyi numuneleri ve numunelerin çekme cihazı üzerinde çekme deneyine tabi tutulduğu bir süreçte ait fotoğraflar görülmektedir.



Resim 3.8 TSE EN ISO 6892-1 Standardına Göre Hazırlanmış Çekme Deneyi Numuneleri ve Numunelere Çekme Testi Uygulanması.

Deneilerde kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri TSE EN ISO 6892-1 standardına göre belirlendikten sonra alüminyum alaşımı ve galvanize çelikten oluşan deney malzemeleri üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14273 standardında birleştirilerek bağlantıların dayanabileceği maksimum çekme kuvveti değerleri belirlendi. Resim 3.9'da üç farklı sac levha birleştirme metodu ile kesme gerilmesi uygulanan numunelerin kesme deneyi uygulanırken görselleri verilmiştir. Son aşamada ise elde edilen maksimum çekme kuvvet verileri doğrultusunda numuneler yine belirlenen üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14324 standartlarında birleştirilerek yorulma deneylerine geçilip bağlantıların yorulma ömürleri tespit edilir. Resim 3.10'da yine üç farklı sac levha birleştirme metodu ile birleştirilen numunelerin yorulma deneyleri esnasındaki görselleri verilmiştir.



Resim 3.9 TSE EN ISO 14273 Standartlarında Birleştirilmiş Kesme Deneyi Numuneleri
a) EDK Metot b) Form Punta Metot c) KDP Metot.



Resim 3.10 TSE EN ISO 14324 Standartlarında Birleştirilmiş Yorulma Deneyi Numuneleri
a) EDK Metot b) Form Punta Metot c) KDP Metot.

3.5 Form Punta Metot ve Kendiliğinden Delen Perçinleme Metot ile Birleştirilen Numunelerin Kesit Görünüşlerinin Elde Edilmesi

FP ve KDP metot ile birleştirilen deney numunelerinin kesit görünüşlerinde belirli olan mekanik bağlantı formlarını incelemek için numuneler, birleşim noktalarının orta hizasından AKÜ Metalurji ve Malzeme laboratuvarında mevcut bulunan Metacut-M250 kesme makinesinde kesilmiştir (Resim 3.11). Kesilen deney numunelerinin kesit görünüşleri optik mikroskop eşliğinde daha kaliteli görülebilmesi için numunelere Metkon marka numune parlatma cihazında sırasıyla numunelere 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 kum su zımparası tutularak numune kesit görünüşleri daha hassas yüzey kalitesine sahip olmuştur. Numune parlatma cihazının Resim 3.12’ de fotoğraflar verilmiştir.



Resim 3.11 Metacut Numune Kesme Makinesi.



Resim 3.12 Numune Parlatma Cihazı ve Numune Kesit Yüzeylerinin Parlatılması.

Numune kesit yüzeyleri parlatıldıktan sonra numune kesit görünüşleri ile belirli olan birleştirme formundaki bölgelerde çatlaklar veya kopmaların olup olmadığının gözlemlenmesi, şekil değişimleri ve deformasyonların incelenmesinin yanı sıra FP yönteminde mekanik kilitleme için S formunun oluşup oluşmadığı, KDP metot için ise perçinin alt sac levhaya da nüfuz ederek mekanik kilitleme oluşturacak kadar genişlemesinin yeterli olup olmadığının incelenmesi AKÜ mineraloji laboratuvarında yer alan Leica DMS 300 ile gerçekleştirilmiştir (Resim 3.13).



Resim 3.13 Leica DMS 300 Dijital Mikroskop ile Numune Kesit Görünüş İncelenmesi.

3.6 EDK Metodu Uygulanan Numunenin Metalografik İncelenmeye Hazırlanması

EDK ile birleşimi gerçekleştirilen numunelerde meydana gelen çatlak, yetersiz nüfuziyet gibi hataları tespit etmek için metalografik inceleme uygulanmaktadır. Birleşim bölgesinin içyapı incelemelerinde optik mikroskop ile inceleme yapmadan önce sağlıklı görüntü almak için hazırlıklar yapılmalıdır. Bu hazırlık işlemlerinin başlangıcı numunenin bakalite alınması işlemidir. Numune el ile parlatma işlemi gerçekleştirilecek boyutta AKÜ Metalürji ve Malzeme Laboratuvarında bulunan Remet IPA 30 sıcak bakalite alma cihazında sıcaklık ve basınç altında kalıplama tekniği ile bakalite alınarak, numune parlatma cihazında su zımparaları yardımıyla parlatma işlemlerine geçilir. Parlatma işlemi sona erdikten sonra numune yüzeylerine nital dağılayıcı uygulanarak numune optik mikroskopta incelenmek için hazır hale getirilir ve çatlak gözenek gibi hatalar tespit etmeye çalışılır (Demirkesen 2020). Resim 3.14'te sıcak bakalite alma cihazı ve numune dağlama işlemi birlikte gösterilmiştir.

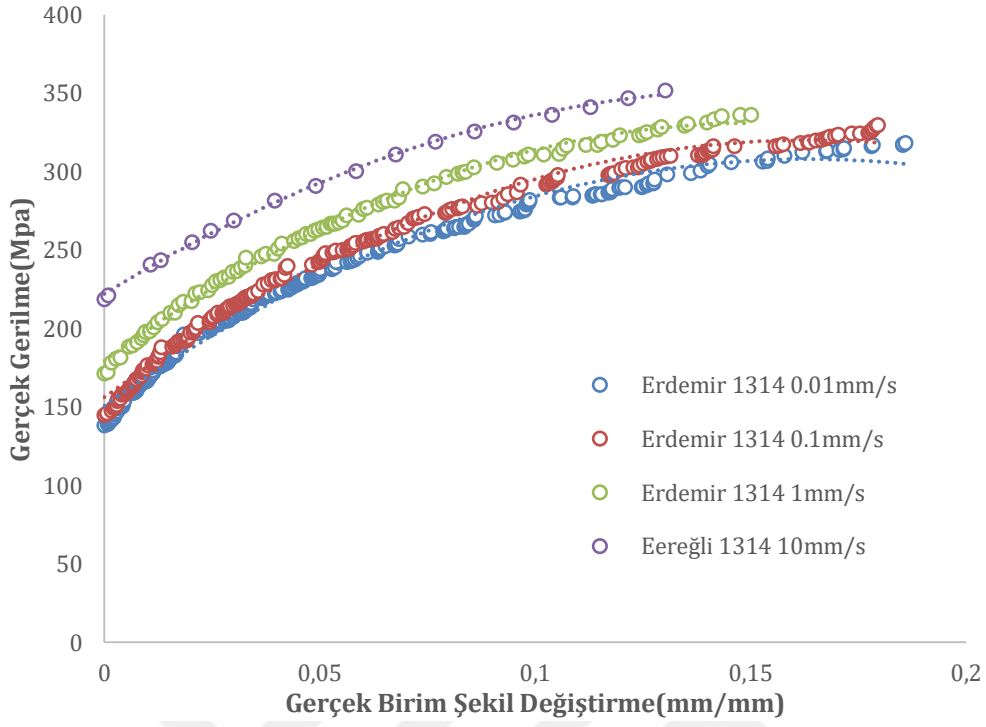


Resim 3.14 Sıcak Bakalite Alma Cihazı ve Numune Dağlama İşlemi.

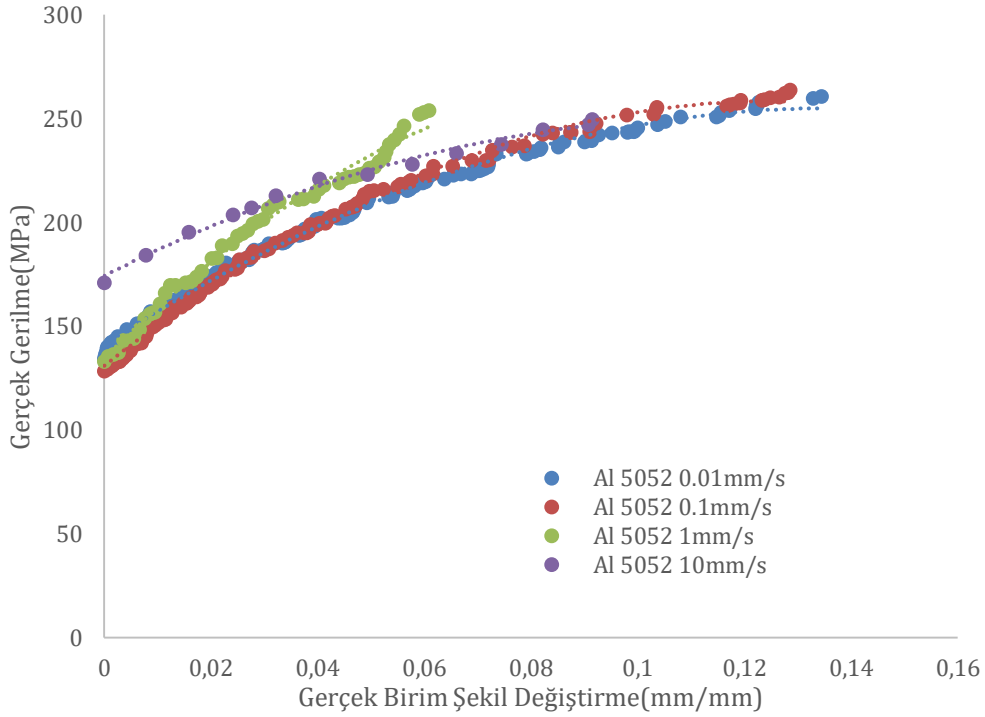
4. BULGULAR

4.1 Deney Numunelerinin TS EN ISO 6892-1 Standardına Göre Çekme Deneyi

Bu tez çalışmasında otomotiv endüstrisinde tercih edilen 1 mm kalınlıklara sahip düşük karbonlu galvanize çelik Erdemir 1314 ile Al 5052 alaşımı sac levhanın mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla farklı çekme hızlarında, TSE EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmış sac levha numunelere çekme deneyleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çekme deneyleri neticesinde gerçek gerilme birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çekme hızları her bir galvanize çelik ve alüminyum alaşımından oluşan malzeme grupları için 0.01mm/s, 0.1mm/s, 1mm/s, 10mm/s hızlarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri farklı çekme hızlarının birlikte gösterimi, erdemir 1314 çelik sac levha için; Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Al 5052 alaşımı için gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri farklı çekme hızlarında birlikte gösterimi; Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Farklı çekme hızlarında çekme deneyleri gerçekleştirilen numunelerin akma dayanımları, maksimum çekme dayanımları ve % uzama değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Ayrıca Resim 4.1’de TSE EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmış çelik ve alüminyum numunelerin 1mm/s çekme hızında çekme deneyine tabi tutulan numunelerin bazı fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.1 Erdemir 1314 Galvanize Çelik için Farklı Çekme Hızlarında Gerçek Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği.

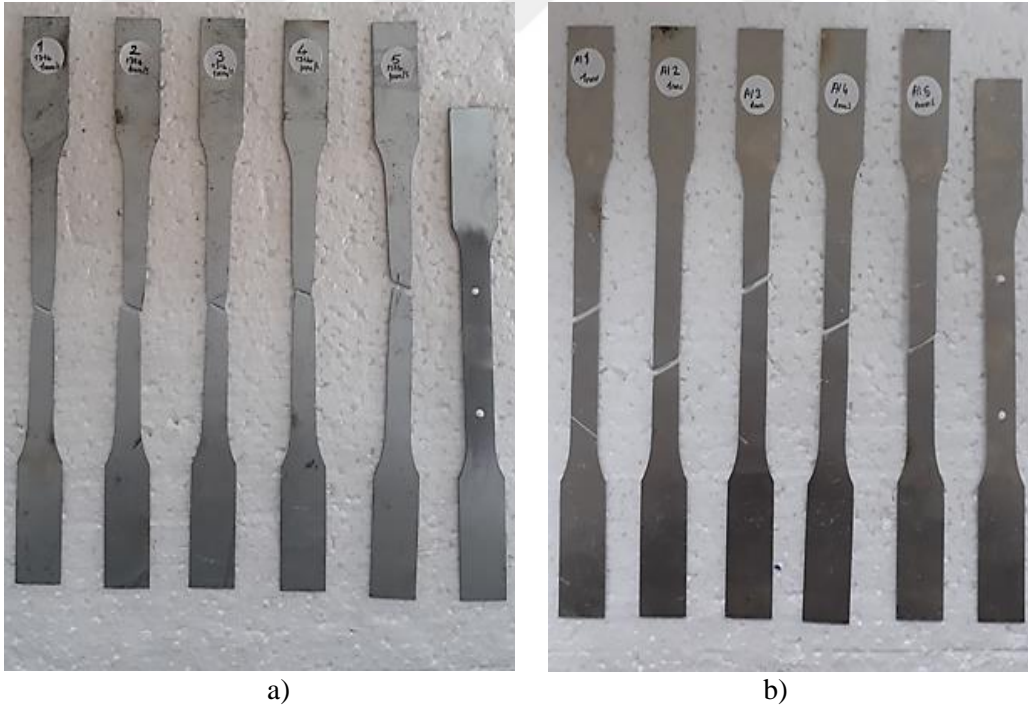


Şekil 4.2 Al 5052 Alaşımı için Farklı Çekme Hızlarında Gerçek Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği.

Çizelge 4.1 Deneysel Malzemelerin Farklı Hızlarda Gerçekleştirilmiş Mekanik Özellikleri.

Malzeme	Erdemir 1314 Galvanize Çelik				Al 5052 Alaşımı			
	0,01	0,1	1	10	0,01	0,1	1	10
Çekme Hızları (mm/s)								
Akma Dayanımı (MPa)	125,3	165,7	224,1	292,1	147,1	193	142,1	213
Max Çekme Dayanımı (MPa)	256,7	285,1	297,1	305,1	234,7	231,2	219,7	219,7
Uzama %	32,9	32,8	27,8	15,9	17,6	16,9	15,8	14,1

Deneysel numune malzemelerinin TSE EN ISO 6892-1 standartlarına göre gerçekleştirilen ve Çizelge 4.1’de belirtilen çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri olan; akma dayanımları ile maksimum çekme dayanımları ve % uzama değerlerinin uygunluğu materyal metot bölümünde Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.3’te belirtilen literatür verileri ile karşılaştırıldığında benzer değer aralıkları tespit edilmiştir.



Resim 4.1 a) Erdemir 1314 çelik numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri b) Al 5052 alaşımı numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.

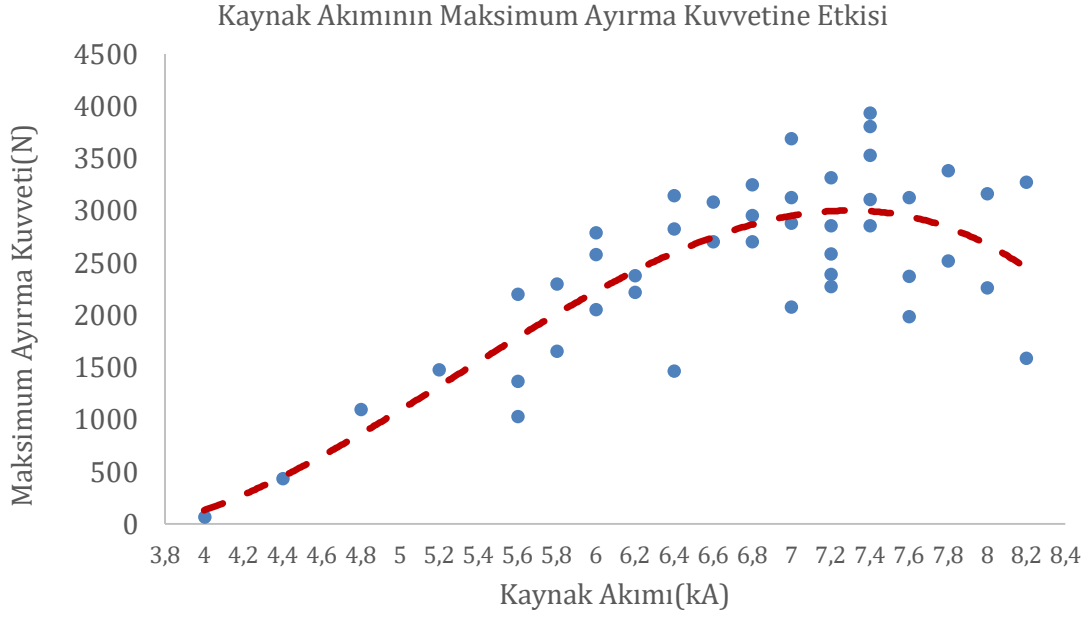
Deney numune malzemelerine uygulanan tek yönlü çekme geriliminde Resim 4.1'den anlaşılacağı üzere sünek malzemelerin karakteristik özelliği olan kesitte azalma ve boyda uzama ve uygulanan tek yönlü çekme gerilimi neticesinde meydana gelen yaklaşık 45°'lik maksimum kesme gerilimi ile numunelerin kopması bariz şekilde gözlenmektedir.

4.2 TSE EN ISO 14273 Standardına göre Numunelerin Kesme Deneyi

Deney numunelerinin mekanik özelliklerinden olan akma dayanım ve maksimum çekme dayanımlarının belirlenmesindeki aşamadan sonraki süreçte bu tez çalışmasında belirlenen sac levha birleştirme metotları ile numuneler TSE EN ISO 14273 standart ölçülerinde birleştirilerek kesme deneyine tabi tutulur. Yorulma deneylerine başlayabilmemiz için kesme deneyi ile tespit edilen sac levha bağlantılarının dayanabileceği maksimum kesme geriliminden oluşan kuvvet değerlerini elde etmeye çalıştık. Bu kuvvet değerlerinin optimum değerini yakalayabilmek için elektrik direnç kaynağı ile yapılan birleştirmelerde en mukavemetli birleştirmeyi yakalayabilmek için birleştirmeler farklı kaynak elektrik akımlarında birleştirilmiştir. 1 mm saclar için Çizelge 2.4'te literatürde tavsiye edilen 2.5 kN değerindeki elektrot baskı kuvveti uygulanarak Çizelge 3.10'da belirtilen farklı kaynak elektrik akımları ile yapılan birleştirmelerde en yüksek ayırma kuvvet değerleri 7.4 kA akım değerlerinde elde edilmiştir.

Yapılan araştırmalar üzere özellikle çelik malzemelerde EDK uygulamalarında kaynak akımı artışı ile paralel olarak ısı girdisi artışı ile çekirdek çapında bir artış söz konusudur. Bu artma kaynak bölgesi yük taşıma kesit alanında artış sağlayarak EDK ile birleştirilen numunelerin mukavemetinde yükselme sağlamaktadır. Fakat akım arttıkça akımla birlikte artan ısı girdisi, EDK ile yapılan birleştirmelerde kaynak üzerinde çökme miktarının artmasına sebebiyet vermektedir. Bu da kaynak bölgesinde kesit incilmesi ile birlikte çentik etkisi oluşturarak kaynak dayanım değerlerinde düşüşe sebebiyet vermektedir (Tutar vd. 2018).

Bu araştırmayı destekler nitelikteki grafik, gerçekleştirmiş olduğumuz Şekil 4.3'de belirtilen EDK ile birleştirilen numunelerin kaynak akımının maksimum ayırma kuvvetine olan etkisi de görülmektedir.



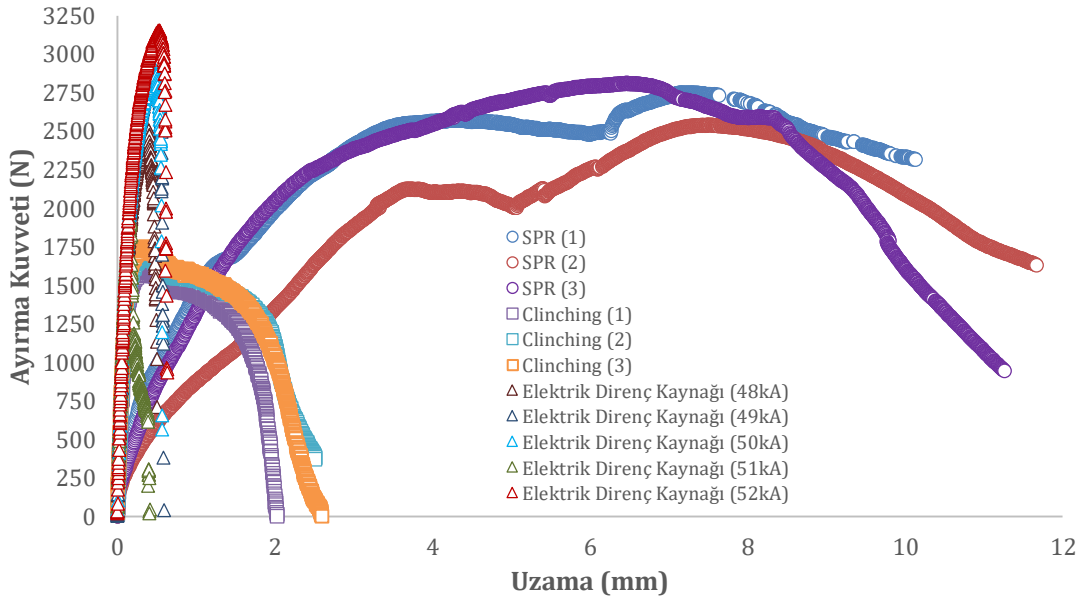
Şekil 4.3 Kaynak Akımının Maksimum Ayırma Kuvvetine Etkisi.

Yorulma deneylerine optimum şartlarda başlanabilmesi için EDK ile birleştirilen numunelerin kesme deneylerinden uygun kaynak akımı ile elde edilen ayırma kuvvetlerinin belirlenmesinden sonra yine bu tez çalışmasında tercih edilen diğer sac bağlantı metodları olan FP metot ve KDP metot ile numuneler TSE EN ISO 14273 standardına göre birleştirilir ve kesme deneylerinden maksimum ayırma kuvvetleri 1 mm/dk çekme hızında belirlenir. Kesme deneyi birleşimi yapılan numunelerin birbirinden ayrılmasına kadar uygulanır. Yorulma deneyine başlayabilme safhasında optimum ayırma kuvvetlerini belirleyebilmek için her bir sac levha birleştirme metodu ile birleştirilen numuneler metotların kendisi içerisinde aynı şartlarda kesme deneyine tutularak; Form punta metot için yirmi adet, EDK metot için yirmi adet ve SPR metot için yirmi adet olmak üzere kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sac levha birleştirme metodu için gerçekleştirilen kesme deneylerinden elde edilen maksimum ayırma kuvvetlerinin ortalama değerleri alınarak, yorulma deneylerine başlanabilmesi için optimum ayırma kuvveti değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.2’te yapılan kesme deneyleri doğrultusunda her bir sac levha birleştirme metodu için elde edilen maksimum ayırma kuvvet değerlerinin ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Üç Farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için TSE EN ISO 14273 Kesme Deneyi Ortalama Ayırma Kuvveti Verileri.

Sac Levha Birleştirme Metodu	Ortalama Çekme Kuvveti
EDK	3451,1 N
SPR	2848,7 N
Form Punta	1848,6 N

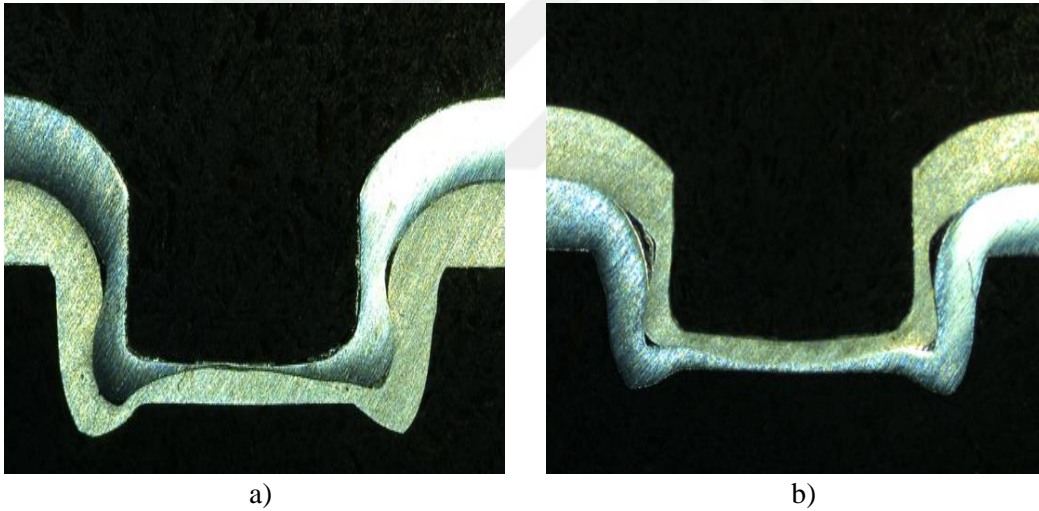
Üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14273 standart ölçülerine göre birleştirilen numunelerle gerçekleştirilen kesme deneylerinde, maximum ayırma kuvvet değerleri EDK metot ile yapılan birleştirmelerde tespit edilmiştir. İkinci maximum ayırma kuvvet değerleri KDP metot ile yapılan birleştirmelerde tespit edilmiştir. En düşük ayırma kuvvet değerleri ise FP metot ile yapılan birleştirmelerde tespit edilmiştir. Şekil 4.4’de üç farklı sac birleştirme metodu ile birleştirilen numunelerin Ayırma Kuvveti-Uzama grafikleri birlikte verilmiştir. Bağlantılarda EDK metodun maximum ayırma kuvvet değerleri FP ve KDP metoda göre daha yüksek değerler almasına rağmen bağlantı noktalarının FP ve KDP metoda göre daha az sünek yapıda olmasından kaynaklı uzama değerleri daha düşük değerler almıştır.



Şekil 4.4 Farklı Sac Birleştirme Metotları ile Birleştirilen Numunelerin Kesme Deneyi ile Elde Edilen Ayırma Kuvveti-Uzama Grafiği.

4.3 FP ve KDP Metot ile Birleştirilen Numunelerin Kesit Görünüşlerinin İncelenmesi

FP metot ile birleştirilen numuneler şiddetli yerel plastik deformasyona maruz kalırlar. Birleşim için üst ve alt sac levhalar arasındaki bağlantı, üst sac levhanın alt sac levha ile kenetlenmesi ile gerçekleşir. FP metot bağlantısını tanımlayan ana bölüm parametreleri ; alt kesme, boyun kalınlığı ve taban kalınlığı Şekil 2.27’de tanıtılmıştı. Alt kesme ve boyun kalınlığı parametreleri FP metot ile gerçekleştirilen bağlantının gücünü belirlerken taban kalınlığı ise bağlantı kalitesinin bir göstergesidir. Bağlantılarda daha az sünek malzemeler bağlantının üst kısmında tercih edilmez. Sünek ve mukavemeti daha yüksek malzemeler bağlantıda üst kısımda tercih edilir (Çetkin 2010, Jiang vd. 2015). Resim 4.2’ de Form punta metot ile birleştirilen deney numunelerinin bağlantı merkez noktalarından geçen enine kesit düzlemleri verilmiştir.



Resim 4.2 a) Çelik Sac Levha Üst konum Alüminyum Sac Levha Alt Konum Kesit Görünüş
b) Alüminyum Sac Levha Üst Konum Çelik Levha Alt Konum Kesit Görünüş.

Literatürde de belirtildiği gibi sünek ve mukavemeti daha yüksek malzemeler gevrek kırılmalara karşı daha dirençli olduklarından dolayı FP metot ile birleştirmelerde kesme-ayırma deneyleri için üst konumda tercih edilir. Nitekim literatürü de destekler nitelikte kesit görüntüleri incelediğimizde Resim 4.2’de a) bölümünde gösterimi verilen çelik malzemenin üst konumda, alüminyum malzemenin alt konumda olduğu durumda, boyun kalınlıkları ve alt kesme değerleri makroskopik incelemede dahi Resim 4.2 b) bölümünde

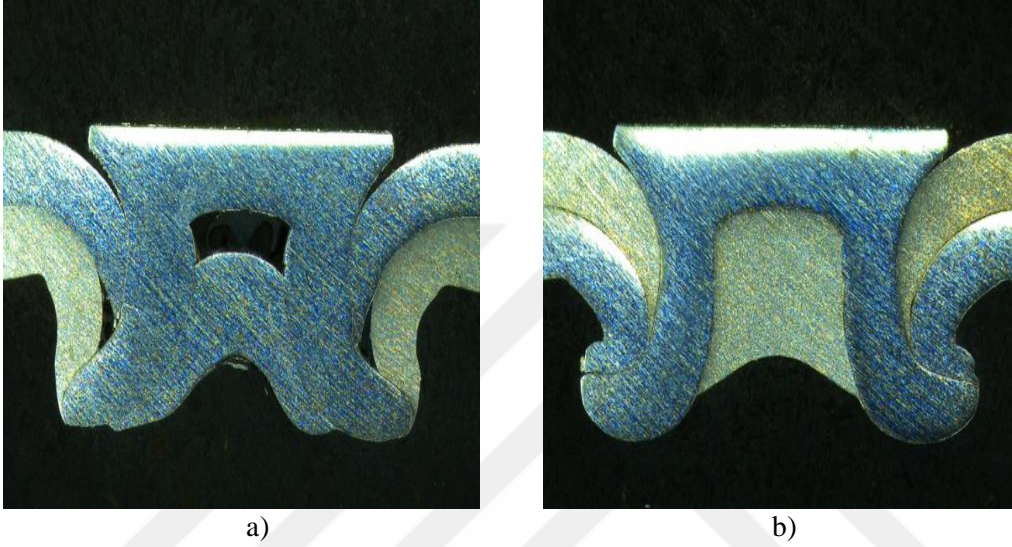
gösterilen alüminyum sac levhanın üst konumda çelik levhanın alt konumda olduğu bağlantıya göre daha iyi form aldıkları ve daha iyi dayanıma sahip olması için önerilen S formlarının daha belirgin olduğu bariz şekilde görülmektedir. Yine FP yöntemde alüminyum sac levhanın çelik sac levhaya göre üst konumda olduğu birleştirmeler TSE EN ISO 14273 standardına göre kesme deneyleri yirmi adet numune ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarının da çelik sacın üst konumda birleştirildiği FP metot için kesme deneyi ortalama ayırma kuvvetleri verilerinin yer aldığı Çizelge 4.2 deki ortalama ayırma kuvveti değeri olan 1848,61 N değerinin altında 833,2 N değerinde kaldığı görülerek, çelik sacın üst pozisyonda birleşimlerinin, yorulma testine başlayabilmek için daha iyi ayırma dayanımı gösterdiği deneysel olarak görülmüştür. Alüminyum sacın üst konumda birleştirildiği kesme deneyi ortalama ayırma kuvveti verisi Çizelge 4.3'te bulunmaktadır. Bu çalışmadaki diğer birleştirme tekniklerinde de çelik sac levha alüminyum sac levhanın üzerinde bindirmeli bir şekilde tek nokta üzerinden birleşimleri ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3 Alüminyum Sac Levha Üst Konumda Form punta Sac Levha Birleştirme Metodu için TSE EN ISO 14273 Kesme Deneyi Ortalama Ayırma Kuvveti Verileri.

Konum	Form Punta Ortalama Ayırma Kuvveti
Çelik Üst Alüminyum Alt	1848,61 N
Alüminyum Üst Çelik Alt	833,2 N

KDP metot ile birleştirilen numunelerde perçin, üst sacı delip geçerek alt sacda perçinin uç kısımları alt saca kılavuzluk eden kalıbın eşliğinde etek formunda genişleyerek alt ve üst sac levhaların birleşimleri gerçekleşir. Daha yüksek dayanımlı bir birleştirme için kullanılan perçinin üst sac levhayı delemek kadar güçlü ve uç kısımlarının etek formunu alt sac levha içerisinde alacak kadar esnek olması istenir. Bu özelliklerde birleştirme yapmak için kullanılan yüksek mukavemetli bor çeliklerinin sertliği 400-500 HV arasında değişir (Mori 2014). Perçinin uç kısımlarının alt sac levhada etek formunda birleşebilmek için gerekli olan kilit mesafesi (Interlock) parametresi Şekil 2.36'da belirtilmiştir. Kesit görünüşte sağlıklı bir birleştirmeyi incelemek için bu kilit mesafesine bakılır. SPR metot ile yapılan kesit görünüş incelemesinde, çelik ve alüminyum sac levha yerleşimlerinin birbirlerine göre alt ve üst konumda birleşimlerinde her iki seçenekte de 5 mm boya sahip yüksek mukavemetli çelikten oluşan perçinin etek uçlarının alt saclarda iyi bir genişleme

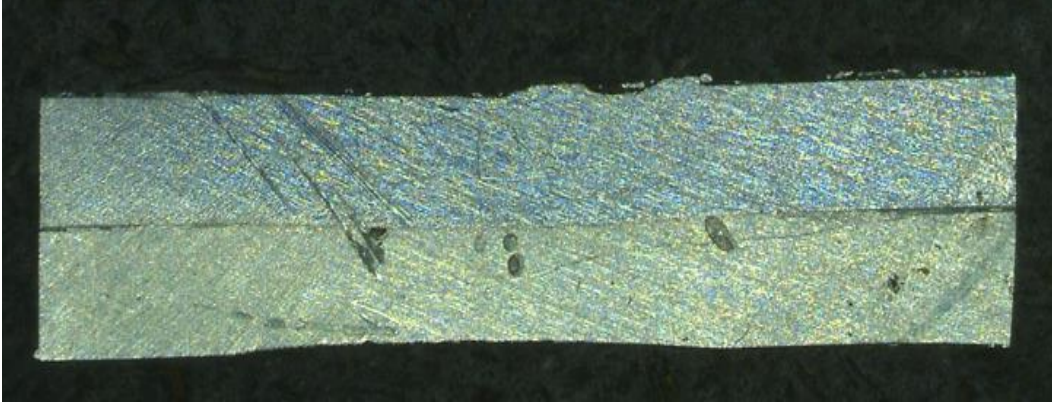
sağlayarak kilitleme mesafelerinin (Interlock) belirgin olduğu gözlenmiştir. Çalışmada özellikle mekanik birleştirme yöntemlerinden FP metot ve EDK metot ile gerçekleştirilen birleştirmelere uyum olması açısından birleştirmelere çelik malzemenin üst konumda olduğu durumda devam edilmiştir Yapılan kesme deneylerinden elde edilen ortalama ayırma kuvvetleri 2848.7 N olarak hesaplanmıştır.



Resim 4.3 a) Çelik Sac Levha Üst konum Alüminyum Sac Levha Alt Konum Kesit Görünüş
b) Alüminyum Sac Levha Üst Konum Çelik Levha Alt Konum Kesit Görünüş.

4.4 EDK Metodu Uygulanan Numunenin Metalografik İncelenmesi

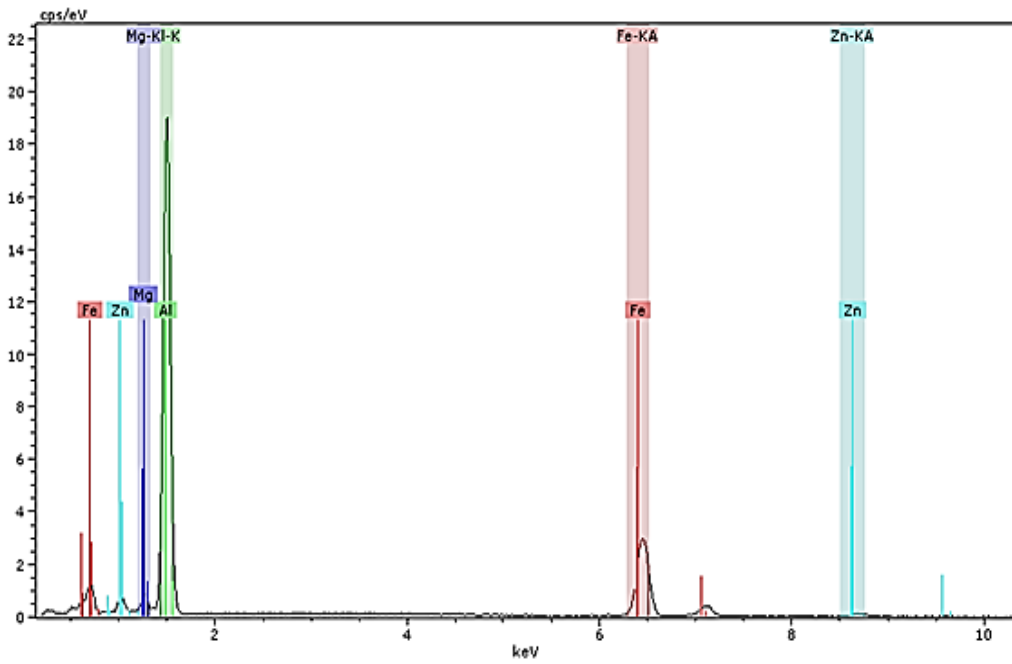
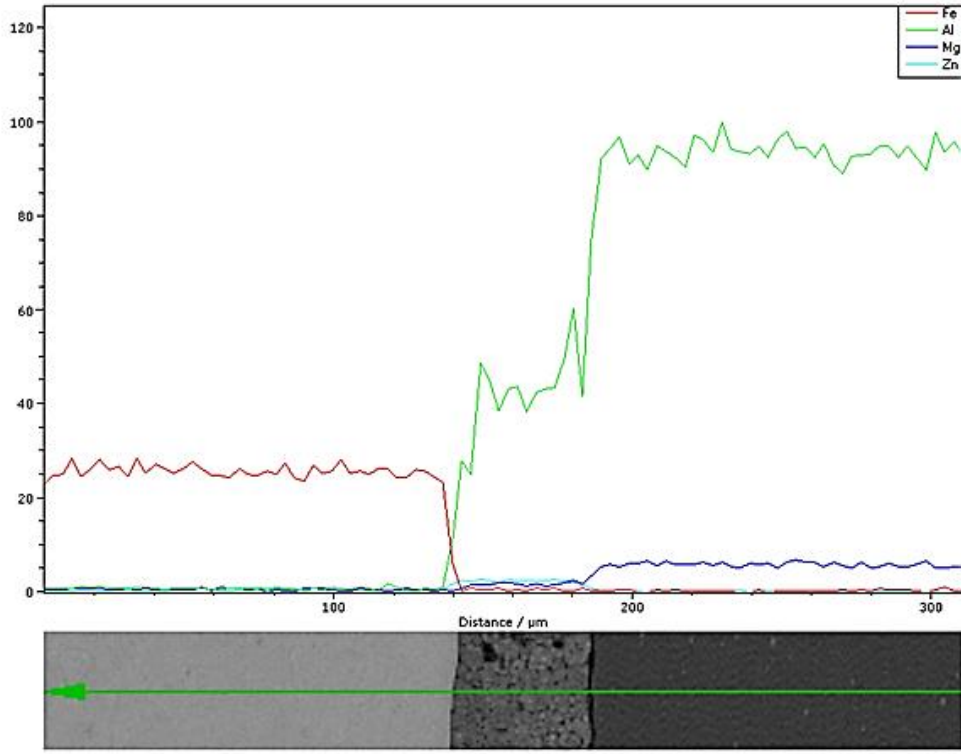
EDK metot ile birleştirilen numuneler kaynak birleşim noktasının merkezinden geçecek şekilde eni doğrultusunda kesildi. Su zımparaları ile kesit alınan yüzeylere numune parlatma cihazı ile yüzey parlatılması uygulandı. Daha hassas yüzey kalitesi için numune kesit yüzeylerine alümina süspansiyon uygulaması yapıldı. Kesit yüzeylerin dağlama işlemi öncesi iyice parlatılmasından sonra son olarak kesit yüzeylerin optik mikroskopla mikro yapılarının daha belirgin gözükmesi amacı ile % 2 nital çözelti ile dağlama işlemi uygulandı. Resim 4.4'te yapılan mikro yapı incelemesinde ayırt edici düzeyde büyük merkezi bir kaynak çekirdeği gözlenmemiştir. Burada ki bağın daha çok kaynak-lehimleme bağlantısı olduğu düşünülmektedir. Resim 4.4'te EDK metot ile birleşim yapılan numunelerin kaynak bölgelerinin kesit görünüşleri görülmektedir.



Resim 4.4 EDK ile Birleştirilmiş Numune Kesiti.

4.5 EDK Metodu Uygulanmış Numunelerin EDS Analizi

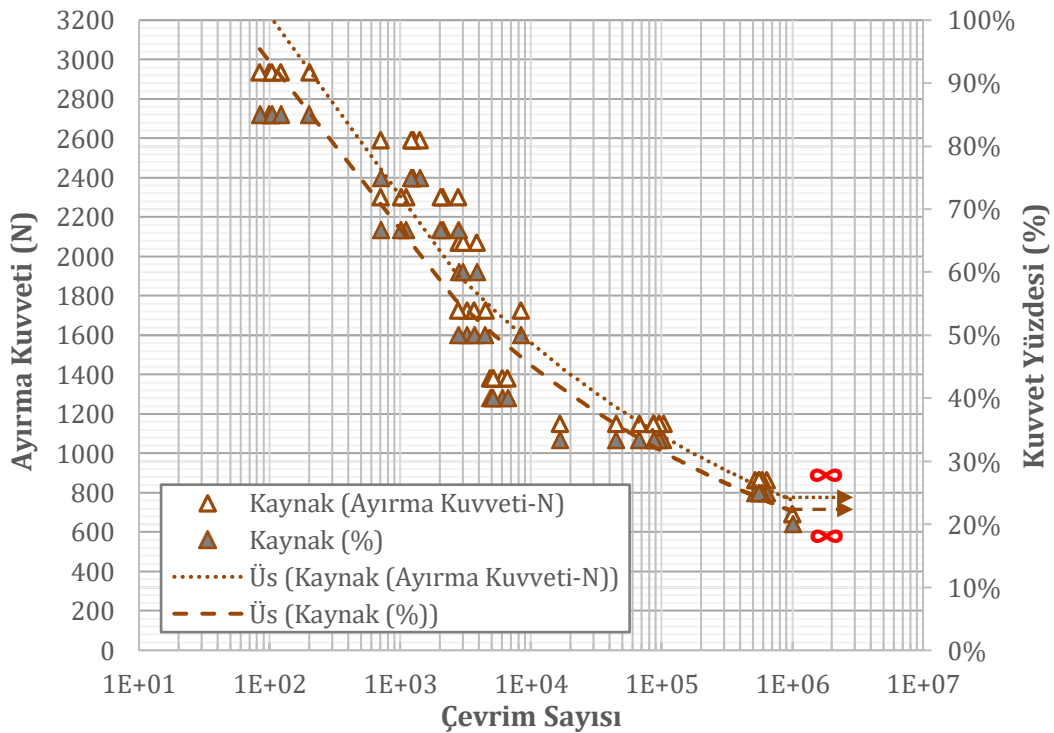
Elektron mikroskobu ile senkronize Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ile numune yüzeyinde yer alan atomların elektron demeti ile uyarılması ile meydana gelen karakteristik X ışınlarının enerji miktarı ile incelenen noktanın element içeriğini hesaplar (Akyay vd. 2014). EDS analizi ile incelenen noktanın element içerikleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji ve Uygulama Merkezi (TUAM)'nde bulunan (EDX - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü yardımıyla tespit edilmiştir. Üst ve alt tabakalar arasındaki arayüz açık bir şekilde gözlemlenmekte ve düz bir formdadır. Malzemelerin birleşim bölgelerinin ara yüzünde ergime sıcaklığının demir elementinden daha düşük olduğundan dolayı alüminyum elementinin, demir (Fe) elementine göre daha zengin olduğu tespit edilmiştir. Arayüzde oluşan intermetalik faz da çeliğin korozif ortama karşı korumasını sağlayan kaplama elementi çinko (Zn) ve alüminyum alaşımının içeriğinde bulunan Magnezyum (Mg) elementi de tespit edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 EDK Metot ile Birleştirilen Numuneler için Çizgi EDS Analizleri.

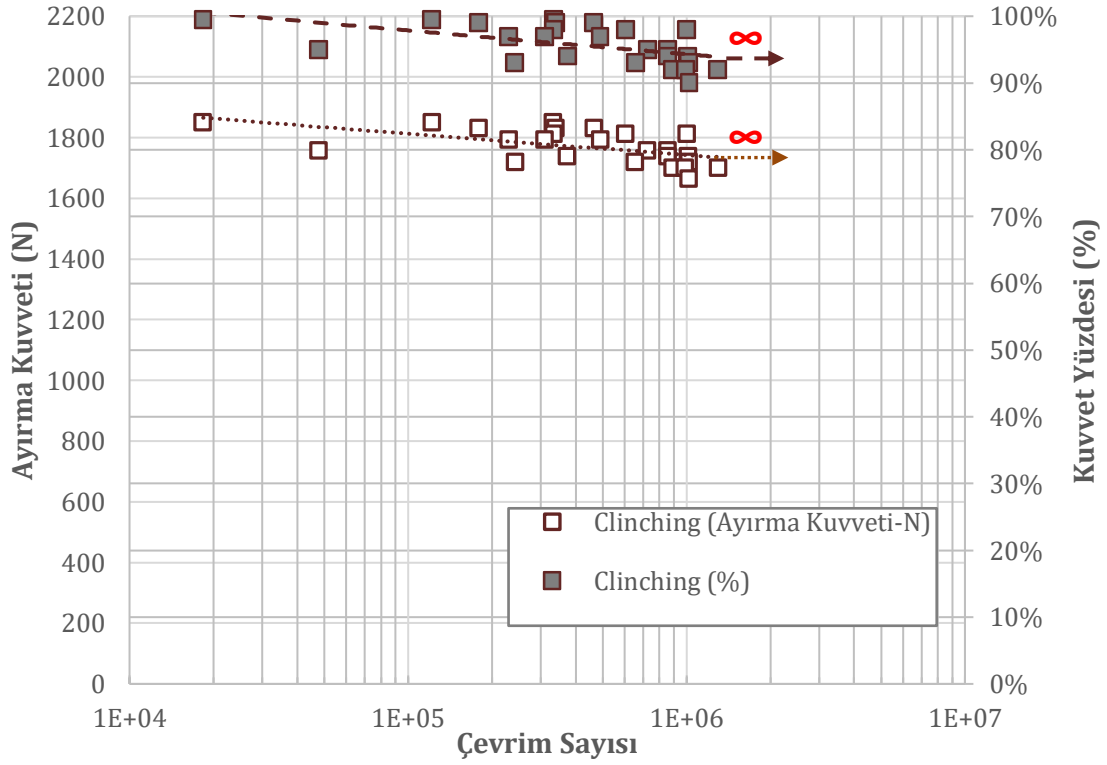
4.6 TSE EN ISO 14324 Standardına göre Numunelerin Yorulma Deneyi

Deney numunelerinin TSE EN ISO 14273 standartlarına göre birleşimleri, üç farklı sac levha birleştirme metodu ile gerçekleştirilip kesme deneyine tabi tutulan numunelerden her bir sac levha birleştirme metodu için elde edilen ortalama ayırma kuvvet değerleri ile yorulma deneylerine geçildi. Sac levha numuneler yorulma deneyleri için tavsiye edilen TSE EN ISO 14324 standardına göre birleştirildi. Yorulma deneyleri, AKÜ Makine Elemanları Laboratuvarında mevcut bulunan 100 kN kapasiteli Instron marka 8801 model çekme ve yorulma cihazında $R= 0,1$ gerilme oranında çekme-çekme gerilme tipinde 10 Hz frekans düzeyinde gerçekleştirildi. Deneylerde yorulma çevrim sınırı 10^6 çevrim sayısı olarak alındı. Yorulma deneyleri ilk olarak EDK metot ile birleştirilen numuneler için uygulandı. Deney numunelerine EDK metot için kesme deney verilerinden elde edilen ortalama ayırma kuvvet değerinin giderek azalan % değerlerinde yükler uygulandı elde edilen değerler; ayırma kuvveti ve çevrim sayısı (N), EDK metotlu birleştirmeler için oluşturulan yorulma grafikleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



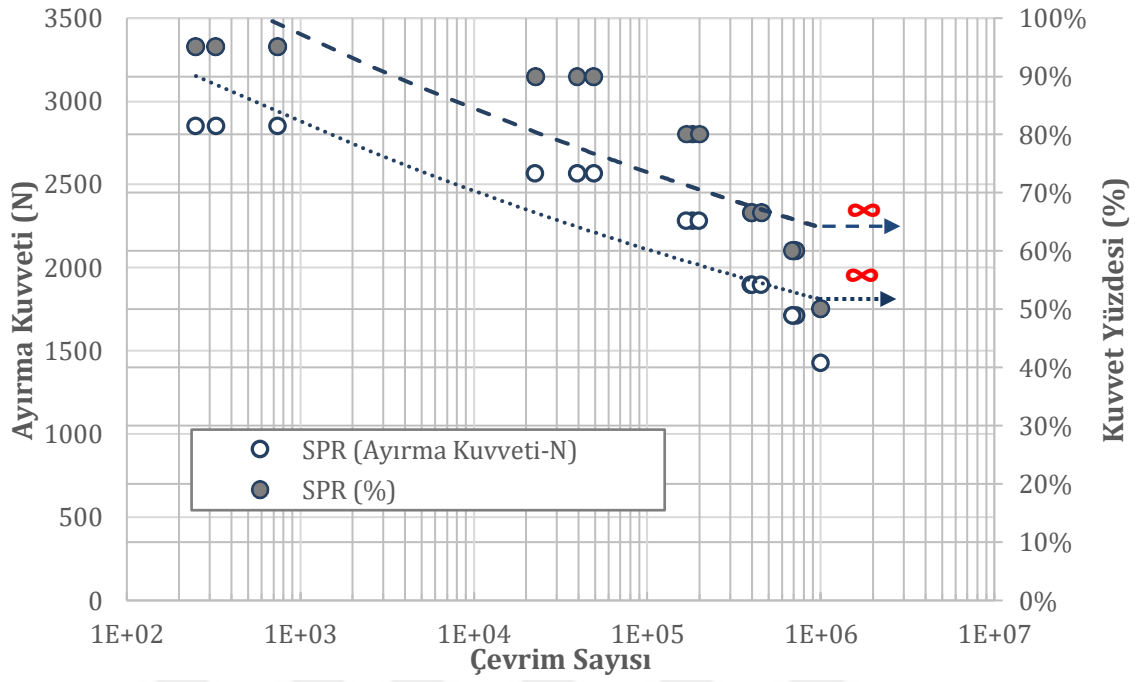
Şekil 4.6 EDK Metot ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.

Deney numunelerine FP metot için kesme deney verilerinden elde edilen ortalama ayırma kuvvet değerinin giderek azalan % değerlerinde yükler uygulandı elde edilen değerler; ayırma kuvveti ve çevrim sayısı (N), FP metodlu birleştirmeler için oluşturulan yorulma grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



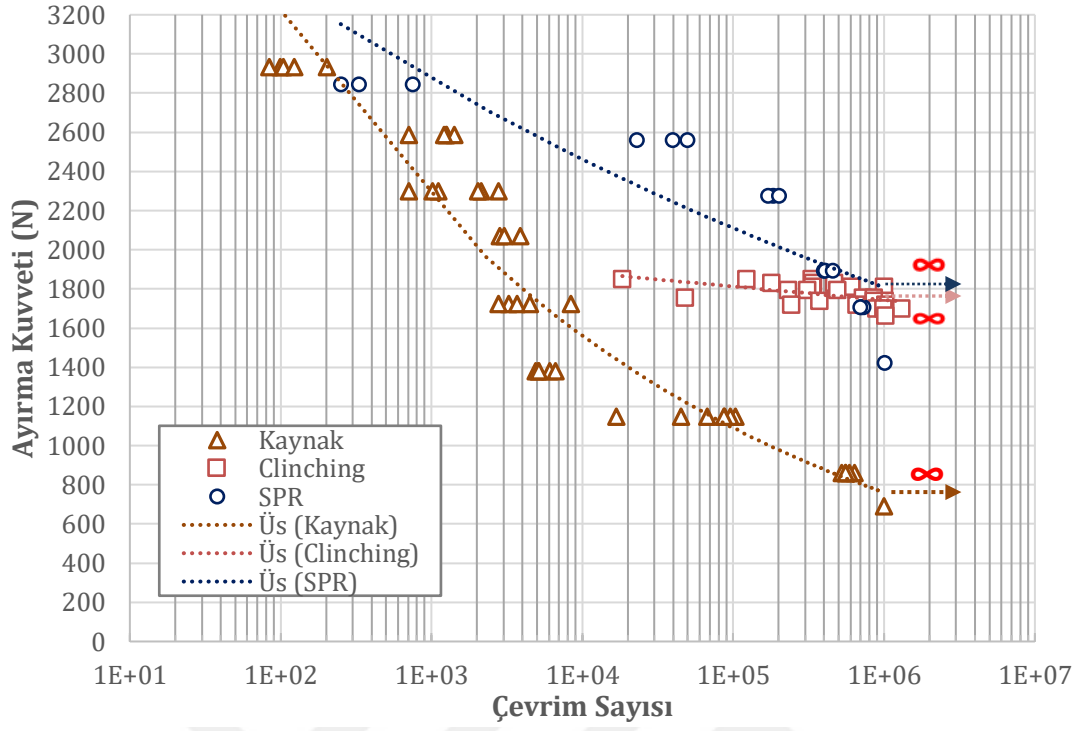
Şekil 4.7 Form Punta Metot ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.

Deney numunelerine KDP metot için kesme deney verilerinden elde edilen ortalama ayırma kuvvet değerinin giderek azalan % değerlerinde yükler uygulandı elde edilen değerler; ayırma kuvveti ve çevrim sayısı (N), KDP metodlu birleştirmeler için olan oluşturulan yorulma grafikleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

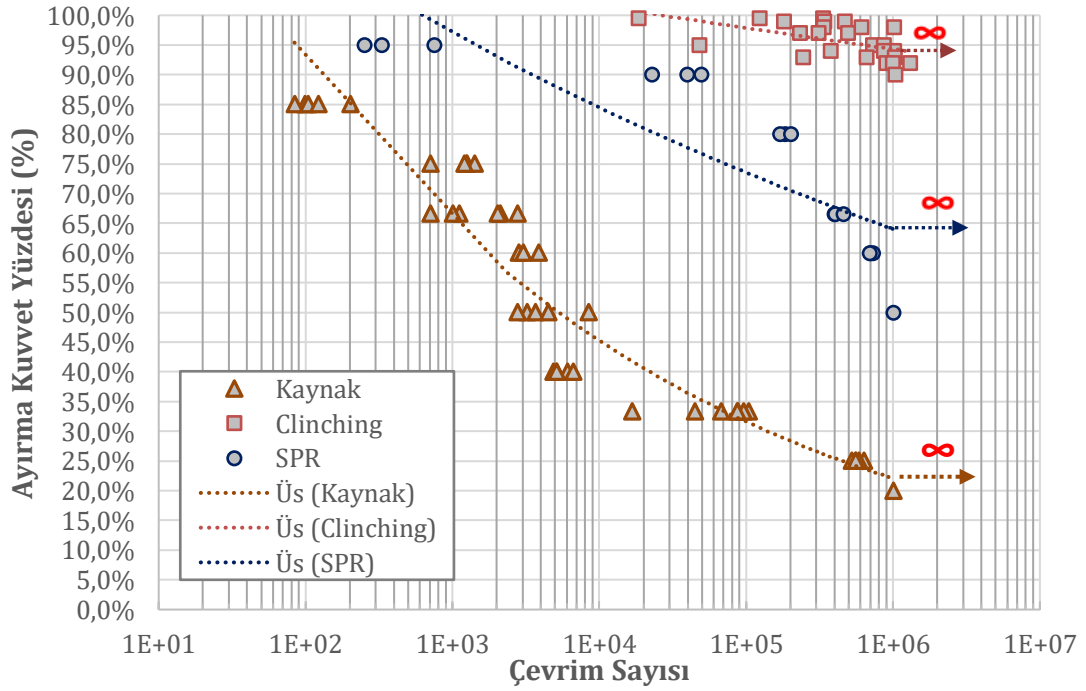


Şekil 4.8 KDP Metodu ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Grafiği.

Deney numunelerinin üç farklı sac levha birleştirme metoduyla TSE EN ISO 14324 standardına göre gerçekleştirilen yorulma deneyleri verileri, yorulma ömürlerinin her bir sac levha birleştirme metodunun birbirlerine göre karşılaştırılması için Şekil 4.9'da Ayırma kuvveti-Çevrim sayısı ve Şekil 4.10'da Ayırma kuvveti yüzdesi-Çevrim sayısı grafikleri olarak verilmiştir.



Şekil 4.9 Üç farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için Ayırma Kuvveti -Çevrim Sayısı Yorulma Grafiği.



Şekil 4.10 Üç Farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için Ayırma Kuvvet Yüzdesi -Çevrim Sayısı Yorulma Grafiği.

Bu tez çalışmasında kullanılan üç farklı sac levha birleştirme metoduna göre birleşimleri yapılan numunelerde yorulma dayanımlarının değerlendirilmesinde FP metot ile birleştirilen numuneler, SPR metot ve EDK metot ile birleştirilen numunelere göre daha üstün yorulma özelliği taşıdığı, yapılan yorulma deneylerinde elde edilen verilerle elde edilen Şekil 4.9'daki yorulma grafiğinden gözlemlenmektedir. Literatürde genel olarak bu tez çalışmasında belirlenen sac levha birleştirme metotlarından olan EDK ,FP ve KDP metot ile çelik ve alüminyum sac levhaların birleşimlerinin bir arada yapıp yorulma deneylerini, ayırma kuvvetlerine göre baz alınarak gerçekleştirilen çalışmalara rastlanılmamıştır. Literatürde sadece bu konuda Mori vd.(2012) yapmış oldukları çalışmada mekanik sac levha birleştirme tekniği olan FP ve KDP metodun yorulma dayanımlarının, EDK metot ile birleşimi yapılan sac levhalara göre daha üstün olmasının, sac levhaların arayüzlerindeki hafif kaymadan dolayı gevşeyen gerilim konsantrasyonlarından kaynaklanmakta olduğunu belirlemişlerdir. Bu tez çalışmasında da yorulma dayanım değerlerinin sac levhaların ayırma kuvvetine göre karşılaştırılmasında Mori vd. (2012) yapmış oldukları çalışmaya paralellik gösterdiği deneysel çalışma neticesinde anlaşılmıştır. Mekanik sac birleştirme metotlarından olan Form punta metodun bilhassa EDK metot ile yapılan birleştirmelere göre yorulma ömürlerinin daha yüksek olduğu deneysel olarak çalışmamızda belirlenmiştir.

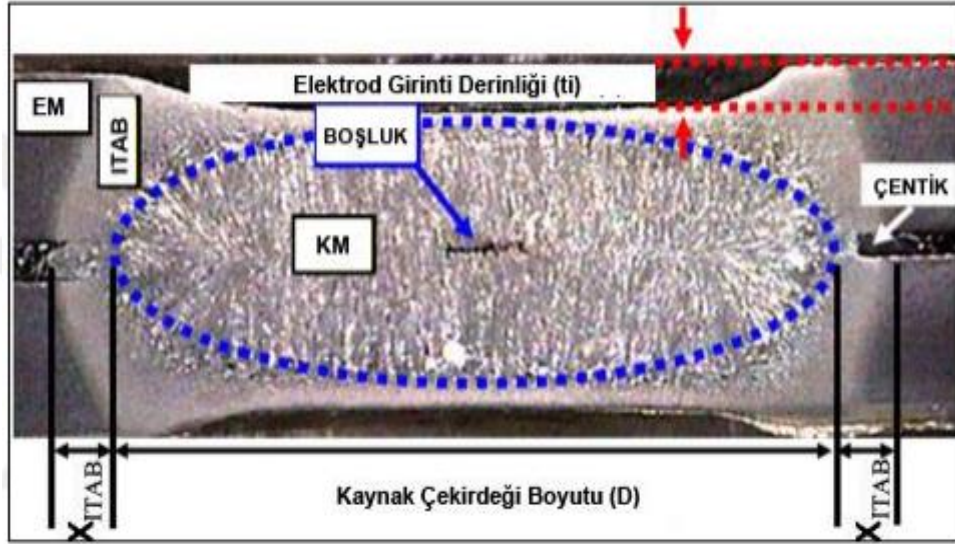
4.7 Yorulma Deneyi Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları

Üç farklı sac levha birleştirme metoduna göre yapılan ve birleşimleri tek noktadan ayırma kuvvetlerine tabi tutularak gerçekleşen yorulma hasar mekanizmaları, Her bir sac levha birleşim metodunun teknik farklılıklarından dolayı yorulma deneyleri sonucunda farklı kombinasyonlarda yorulma hasar mekanizmaları gerçekleşmiştir. Her bir metodun temel yorulma hasar mekanizmalarının oluşum nedenleri aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

4.7.1 EDK Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları

EDK ile yapılan bağlantılarda gerçekleşen yorulma hasar mekanizmalarının oluşumlarının açıklanması için yorulma hasar mekanizmalarının oluştuğu kaynak ve kaynak bölgesini tanımlamak gerekir.

EDK metot termal çevrim sebebiyle homojen olmayan üç farklı mikroyapı alanı oluşturur. Bu alanlar; kaynak metali, ITAB ve esas metaldir. Bu alanların oluşumundaki parametreler ; kaynak çekirdeği boyutu D , elektrot girinti derinliği t_i ve ITAB 'ın genişliği X_{ITAB} olarak belirtilmiştir (Elitaş 2018). Şekil 4.11'de EDK metot ile oluşturulan kaynak bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 4.11 EDK Metot ile Birleşimin Makro Yapısı (Elitaş 2018).

EDK metot ile birleşimleri gerçekleştirilen yorulma deney numunelerinde genel olarak düşük yüklerde tabaka yırtılma modu oluşurken daha yüksek yük değerlerinde çekme hataları gözlemlenir. EDK metot ile birleşimleri gerçekleştirilen yorulma deneylerinde meydana gelen hasar modları şu şekildedir;

- ✓ Arayüz Hasar Modu : Yüzler arası modda kopma, kaynak çekirdeğini orta kısımdan ayırmasıyla gerçekleşir. Hasar çekirdeğin kökünden başlar ve çekirdek boyunca yayılarak devam eder.
- ✓ Çekme Hasar Modu : Kaynak çekirdeğinin bir sacdan çekilmesi ile kırılmanın gerçekleştiği hasardır. ITAB veya kaynak çekirdeği bölgesinden başlayabilir.
- ✓ Levha Yırtılma Modu: Yorulma çatlakları ITAB'da veya kaynak çekirdeği kökünde başlar levha kalınlığı boyunca ilerleyerek uygulanan yük yönüne dik olarak sac levhanın eni boyunca yay formunda yayılır (Pereira vd.2012).

Bu tez çalışmasında da EDK metot ile birleşimi yapılan yorulma numunelerinde gerçekleşen hasar mekanizmaları Pereira vd.(2012) belirttiği yorulma hasar modları ile paralellik göstermektedir. Yüksek yüklerle yapılan yorulma deneylerinde genel olarak görülen yorulma hasar modları arayüz ve çekme hasar modu şeklindedir. Düşük yüklerle yapılan yüklerde sac levhalarda enlemesine yırtılmalar görülmüştür. Kesme deneyinden elde ettiğimiz ayırma kuvvet değerinin % 75'inin alınarak gerçekleştirilen yorulma deneyinde 1400 çevrim sayısında arayüz hata modu gerçekleşmiştir. Ayırma kuvvetinin % 66,66'sının alınarak gerçekleştirilen yorulma deneyinde ise 2769 çevrim sayısında çekme hasar modu gerçekleşmiştir. Düşük yük uygulamasında ise ayırma kuvvetinin % 25'inin uygulanarak gerçekleştirilen deneyde 635110 çevrimde levha yırtılma modu gözlemlenmiştir. Resim 4.5'te EDK metot ile birleştirilen numunelerin hasar modları gösterilmiştir.



a)



b)



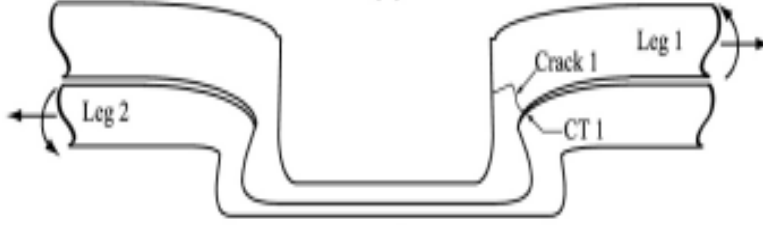
c)

Resim 4.5 EDK Metot Yorulma Hasarları a) Arayüz Hasar Modu b) Çekme Hasar Modu
c) Levha Yırtılma Modu.

4.7.2 FP Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları

FP metotta mekanik kilit oluşturma esnasında hem üst saclar hemde alt saclar plastik ve elastik deformasyona uğrar. FP metotta hasarlar genel olarak üst konumdaki sac levhada düğme boynuna yakın kavisli formdaki arayüzden bir yorulma çatlak başlar ve üst tabaka kalınlığına doğru büyür. Üst sac levhaya doğru büyüdüktan sonra yorulma çatlak düğme merkezine doğru kıvrılır. Bu süreçten sonra çatlak üst konumdaki sac levhanın düğme boynunun çevresi boyunca yayılma gösterir (Lin vd. 2013). Şekil 4.12’de FP metotta en temel karşılaşılan hasar modu verilmiştir. Bu çalışmada yorulma hasarı alt konumdaki alüminyum sac levhalarda daha çok meydana gelmiştir. Üst konumdaki galvanize çelik sacdan daha yumuşak ve daha az sünek olan alüminyum sac levhanın alt konumda aşırı plastik deformasyona maruz kalarak pekleşip ve daha gevrek davranış gösterip alt boyun bölgelerinde çatlak oluşturup oluşan çatlakın malzeme kalınlığı boyunca ilerleyerek alt düğme çevresinde uygulanan yüke dik bir şekilde yayılarak yay formunda hasar mekanizmasının gerçekleştiği düşünülmektedir. Ayırma deneylerinden elde edilen ayırma kuvvetinin % 94’ünün alınarak uygulanan yorulma deneyinde 373717 çevrimde üst çelik sacın düğme çevresinden malzemenin enine doğru genişleyen yay formunda çatlak oluşmuştur. Deneyler neticesinde alt konumdaki alüminyum sacın olduğu bir deneyde ise kesme deneyinden elde edilen ayırma kuvvetinin % 92’sinin uygulandığı ve 604859 çevrim sayısında alüminyum sac levhanın düğme merkezinden başlayan ve sac

levhannın enine doğru genişleyen yorulma çatlağı tespit edilmiştir.Yorulma hasarına uğrayan numuneler Resim 4.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Form Punta Yorulma Hasar Modu (Lin vd. 2013).



a)



b)

Resim 4.6 Form Punta Metot Yorulma Hasarları a) Alüminyum Sacdan Hasar b) Çelik Sacdan Hasar.

4.7.3 KDP Metot ile Birleşimi Yapılan Numunelerin Yorulma Hasarları

KDP metot ile birleşimi yapılan deney numunelerinde yorulma kırılma modları çelik ve alüminyum sac levhalar arasındaki perçinin yakınında meydana geldiği ve levha boyunca yayıldığı arayüz hata modlarıdır. Alüminyum ve çelik sac levhalar arasındaki sürtünmeden dolayı çatlaklar meydana gelir mukavemeti düşük olan sacda çatlaklar başlar. Oluşan yorulma çatlakları yükleme yönüne dik olarak perçin çevresi boyunca ilerler (Chung vd. 2016). Perçin ile temas bölgelerinde yorulma çatlaklarının oluşup levha üzerinde yayılmasının uygulanan kuvvete dik bir şekilde perçin çevresinde gerçekleştiği hasar, diğer sac levhada da perçin vasıtasıyla oluşur. Resim 4.7’de KDP metot ile yorulma hasarına uğramış görsel verilmiştir. Görseldeki yorulma hasarı, kesme deneylerinden elde edilen ayırma kuvvetinin % 66,6’sının alınarak 397081 çevrim sayısında perçin çevresinde yay tipi çatlakların oluşması ile gerçekleşmiştir.



Resim 4.7 KDP Metot ile Birleştirilen Numunelerde Yorulma Hasarları.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Otomotiv endüstrisinde ergonomik ve güvenilir taşıt üretimi için taşıt yapı malzemelerinde aranan; dayanım, kolay şekillendirilebilirlik, hafiflik, maliyet, estetik vb. özelliklerin tek bir taşıt yapı malzemesinden karşılanması güçtür. Özellikle çelik malzemelerin mukavemet ve şekillendirilebilmesinin yüksek olması, alüminyum malzemelerin ise araç hafifletme kapsamında düşük özgül ağırlığa sahip olmasından dolayı daha düşük yakıt tüketimi ve elektrikli araçlar için menzil artırımında avantaj sağlaması nedeniyle bu iki malzemenin birlikte kullanımı gerekir hale gelmiştir. Fakat farklı metalurjik özelliklere sahip olan çelik ve alüminyum malzemelerinin birleşiminde problemler mevcuttur. Bilhassa otomotiv endüstrisinde oldukça rağbet gören EDK metodu ile gerçekleşen birleşimler alüminyum alaşımlarının çelikle birleşimlerinde iki malzeme grubu içerisinde termal genleşme ve büyük erime noktası farklılıklarından dolayı problemler çıkarmaktadır. Otomotiv endüstrisinde EDK metodu ile sac levha birleşim tekniklerine alternatif olarak çeşitli mekanik sac birleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışma da otomotiv sanayi için artık bir gereksinim haline gelen alüminyum alaşımları ile çelik malzemelerin birleşimleri, EDK metodunun yanı sıra mekanik sac birleştirme metodlarından FP ve KDP metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada belirlenen bu üç metot ile TSE EN ISO 14273 standartlarına göre kesme deneyleri gerçekleştirilmiş kesme deneylerinden elde edilen maksimum ayırma kuvvet verileri herbir sac levha birleştirme metodu için belirlenmiştir. Bu verilerle TSE EN ISO 14324 standartlarına göre belirlenen bu sac levha birleştirme metodları ile yorulma deneyleri gerçekleştirilerek bu üç sac birleştirme metodunun yorulma dayanımları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda;

- ✓ EDK metodu ile TSE EN ISO 14273 standartlarına göre gerçekleştirilen kesme deneylerine geçilmeden önce optimum EDK bağlantısını gerçekleştirmek için ; 2.5 kN sabit elektrot kuvveti, 25 cycle sabit bekleme süresi, 8 cycle sabit kaynak süresinde farklı elektrik akımı altında gerçekleştirilen EDK bağlantılarında en yüksek ayırma kuvvet değeri 7.4 kA kaynak akımında gerçekleşmiştir. Yorulma deneylerinden elde edilen yorulma ömür sınır değerlerinin en uygun şartlarda belirlenmesi için numune birleştirmeleri 7.4 kA kaynak akımında gerçekleştirilmiştir.

- ✓ Kaynak akımının arttıkça ayırma kuvvetinin arttığı gözlemlenmiş fakat aşırı kaynak akımı aşırı elektrot batma derinliği oluşturmuş, kaynak bölgesinde sıçramalar meydana gelmiş ve ayırma kuvvet değerlerini düşürmüştür.
- ✓ Üç farklı sac levha birleştirme metodu için TSE EN ISO 14273 standartlarında kesme deneyleri gerçekleştirilmiş yapılan deneyler neticesinde en yüksek ayırma kuvveti değerleri EDK metot ile yapılan sac levha birleştirmelerinde tesbit edilmiştir. EDK metot ile yapılan sac levha birleştirmelerinde 3451.1 N ortalama ayırma kuvvet değeri elde edilmiştir.
- ✓ KDP metot ile yapılan sac levha birleştirmelerinde 2848.7 N ortalama ayırma kuvvet değerleri elde edilmiştir.
- ✓ En düşük ayırma kuvvet değerleri yapılan kesme deneyleri neticesinde 1848.6 N ortalama değeri ile FP metot ile birleştirilen sac levhalarda görülmüştür.
- ✓ Üç farklı sac levha birleştirme metodu için TSE EN ISO 14324 standartlarında yorulma deneyleri gerçekleştirilmiş yorulma ömür sınır değeri olarak belirlenen 10^6 çevrim sayısı; FP metot ile gerçekleştirilen sac levha birleştirmelerinde kesme deneyinden FP için elde edilen ortalama 1848.6 N değerinin % 90 oranı olan 1663.75 N değerinde görülmüştür.
- ✓ Yorulma ömür sınır değeri olan 10^6 çevrim sayısı KDP metot ile gerçekleştirilen sac levhalarda kesme deneylerinden elde edilen ortalama 2848.7 N değerinin % 50 oranı olan 1424.3 N değerinde görülmüştür.
- ✓ Yorulma ömür sınır değeri olan 10^6 çevrim sayısı EDK metot ile birleştirilen sac levhalarda kesme deneyinden elde edilen 3451,1 N değerinin % 20 oranı olan 690.22 N değerinde görülmüştür.
- ✓ Üç farklı sac levha birleştirme metotları ile yapılan yorulma deneylerinde yorulma ömürü en yüksek FP metodu olarak belirlenmiştir. EDK metot ile yapılan birleştirmelerin yorulma ömürleri FP metoda göre daha düşük değerdedir.

- ✓ Mekanik sac levha birleştirme metodları olan FP metot ve KDP metot ile ayırma kuvveti uygulanacak şekilde yorulma deney standardına uygun yapılan birleştirmelerin EDK metot ile yapılan birleştirmelere göre daha yüksek yorulma ömrüne sahip olması FP ve KDP metodlarda saclar arasındaki arayüzünde meydana gelen hafif deplasmanlar ile gerçekleşen gerilim yoğunluğunun azalmasından ileri geldiği düşünülmektedir.
- ✓ EDK ile gerçekleştirilen bağlantıların ayırma kuvvet değerleri bu tez çalışmasında uygulanan diğer iki bağlantı metoduna göre daha yüksek olmasına rağmen, daha az rijit yapıdaki diğer bağlantıların yorulma ömür değerleri ayrılma uzaması kriterine uygun biçimde düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ EDK metot ile gerçekleşen çekme kesme tip bağlantılarda genel olarak üç farklı yorulma hasarı gerçekleşmiştir. Bu hasar tipleri Pereira vd.(2012) çalışmalarında belirttiği gibi arayüz hasar modunda, kopma kaynak çekirdeğini orta kısmından ayrılması ile gerçekleşir. Hasar çekirdeğin kökünden başlayarak çekirdek boyunca yayılarak devam eder. Çekme hasar modunda ise kaynak çekirdeğinin bir sacdan çekilmesi ile kırılmanın gerçekleştiği hasardır. Alüminyum sac levhalarda düğme deliğini andıran bir form bırakmıştır. Levha yırtılma modunda ise yorulma çatlakları kaynak çekirdeği köklerinde levha kalınlığı boyunca ilerleyerek uygulanan yük yönüne dik bir şekilde sac levhanın eni doğrultusunda yay formunda yayılarak gerçekleşmiştir
- ✓ FP ile yapılan birleştirmelerde çekme kesme tip bağlantının alt konumunda yer alan alüminyum sac bağlantılarda oluşan hasar, üst konumdaki çelik sac levhaya göre daha çok sayıda meydana gelmiştir. Üst konumdaki çelik sac levhadan daha az sünek olan alüminyum sac levhanın alt konumda aşırı plastik deformasyona maruz kalarak pekleşip daha gevrek davranış gösterip alt boyun bölgelerinde çatlak oluşturup oluşan çatlağın malzeme kalınlığı boyunca ilerleyerek alt çekirdek çevresinde uygulanan yüke dik bir şekilde yayılarak yay formunda hasar mekanizmasının gerçekleştirdiği düşünülmektedir.

- ✓ KDP metot ile birleşimi yapılan deney numunelerinde yorulma kırılma modları çelik ve alüminyum sac levhalar arasındaki perçinin yakınında meydana geldiği ve levha boyunca yayıldığı arayüz hata modlarıdır (Chung vd. 2016). Alüminyum ve çelik sac levhalar arasındaki birleşim bölgesinde gerilim konsantrasyonu nedeni ile çatlaklar meydana gelmiş mukavemeti daha düşük olan sacda çatlaklar oluşmuştur. Oluşan yorulma çatlakları yüklenme yönüne dik olarak perçin çevresi boyunca ilerlemiştir. Perçin ile temas bölgelerinde yorulma çatlaklarının oluşup levha üzerinde yayılmasının uygulanan kuvvete dik bir şekilde perçin çevresinde gerçekleştiği hasar, aynı süreçte diğer sac levhada da perçin ile temasın kesilmemesinin sonucu olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.
- ✓ Araç gövde birleştirmelerinde bilhassa sac levhaların birleşiminde her yıl gelişen teknolojiye paralel olarak yeni bağlantı teknikleri geliştirilmektedir. Otomotiv endüstrisinde seri bir şekilde imalata uygulanmasının yanı sıra ekonomikliği bakımından da halen revaçta olan EDK kaynağının yorulma ömür performansları, gerek bu çalışmada gerek literatürdeki diğer çalışmalarda düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir. EDK metoda alternatif olarak geliştirilen sac levha bağlantı metodları olan FP ve KDP metodun yorulma ömür performanslarının daha başarılı olması sebebiyle otomotiv endüstrisinin üretim hatlarında bu metodların kullanımı günden güne daha tercih edilir konuma gelecektir.
- ✓ Bu çalışmanın, literatürde son derece kısıtlı olan alüminyum çelik malzemelerin farklı sac levha birleştirme teknikleriyle gerçekleştirilen birleşimlerinin yorulma davranışlarının incelenmesinde araştırmacılara bir kaynak oluşturacağı kanısındayız.

6. KAYNAKLAR

- Abe Y, Kato T, Mori K, Nishino S, 2014, Mechanical Clinching of Ultra-High Strength Steel Sheets and Strength of Joints, Journal of Materials Processing Technology, In Press.
- Akdı S, Demirpolat H, 2019, Farklı Malzemelerden Üretilen Otomotiv Parçalarının Teknik ve Ekonomik Karşılaştırılması, The Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, 21-23 Haziran 2019, Kapadokya/Türkiye.
- Akyay E, Çubukçu H E, Artuner H, 2014, Enerji Dağılım Spektroskopisi Kullanılarak Gerçek Zamanlı Otomotik Mineral Sınıflandırılması, 67. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 14-18 Nisan 2014, Ankara/Türkiye.
- Anık S, 1991, Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Eğitim Vakfı, 244s, İstanbul.
- Aras S, 2016, Nokta Direnç Kaynağı Uygulanan Farklı Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, Bursa.
- Balawender T, 2016, Low Fatigue Strength of Clinch Joints, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 6, 277-281.
- Başer T A, 2012, Alüminyum Alaşımları ve Otomobil Endüstrisinde Kullanımı, Mühendis ve Makina, 53, 51-58.
- Başuslu O, 1999, 1,2080(X210Cr12) 1,7225(42CrMo4) ve Ck45 Çeliklerinin Yorulma Dayanımı Açısından Optimum Isıl İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 37s, Bursa .
- Chung C S, Kim H K, 2016, Fatigue Strength of Self-Piercing Riveted Joints In lap-Shear Specimens of Aluminium and Steel Sheets, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 00, 1-10.
- Çağlayan R, 2020, Taşıtlarda Ağırlık Azaltımında Hafif Malzeme Olarak Alüminyum Kullanımı ve Optimizasyon, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Bursa.

- Çekiç İ, 2007, Otomobillerde Gövde Birleştirme Teknolojileri ve Bir Uygulama, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Bursa
- Çetkin A, 2010, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Galvanizli Çelik-Alüminyum Sac Form Punta Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 25-38.
- Daneshpour S, Riekehr S, Koçak M, Gerritsen C H J, 2009, Mechanical and Fatigue Behaviour of Laser and Resistance Spot Welds in Advanced High Strength Steels Science and Technology of Welding and Joining, 14, 20-25.
- Demirkesen A, 2020, Otomotiv Gövdesinde Kullanılan JAC270C VE JAC590R Sac Levha Malzemelerin Nokta Direnç Kaynağının Mukavemet Analizi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, Kocaeli.
- Doruk E, 2018, Bir Binek Araç Gövdesindeki Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynaklı Birleştirmelerinin Yorulma Dayanımlarının Parametrik Olarak İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 89s, Sakarya.
- Du G, Xing Y, Li X, 2019, Fatigue Properties of Self-Piercing Riveted Multi-Rivet Joints in Steel and Aluminum Sheets, Materialwiss. Werkstofftech, 50, 1495-1502.
- Duric A, Milcic D, Burzic Z, Klobcar D, Milcic M, Markovic M, Krstic V, vd., 2022, Microstructure and Fatigue Properties of Resistance Element Welded Joints of DP500 Steel and AW 5754 H22 Aluminum Alloy, Crystals, 12, 1-15.
- Efe Y, 2018, AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Farklı Tip Yüzey İşlemleri İle Yorulma Davranışlarının İyileştirilmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Karabük.
- Elitaş M, 2018, Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilen İleri Dayanımlı Otomotiv Sac Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 166s, Karabük.
- Esendir E, 2008, Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93s, İstanbul.

- Eskizeybek V, 2006, Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 143s, Konya.
- Güven F, Rende H, 2017, Elektrikli Araçların Tasarımında Malzeme Seçiminin Önemi, Mühendis ve Makina, 58, 81-95.
- Haque R, 2018, Quality of Self-Piercing Riveting (SPR) Joints From Cross-Sectional Perspective: A Review, Archives Civil and Mechanical Engineering, 18, 83-93.
- Jiang T, Liu Z X, Wang P C, 2015, Quality Inspection of Clinched Joints of Steel and Aluminum, Int J Adv Manuf Technol, 76, 1393-1402.
- 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, 98s, Kocaeli.
- Kang S H, Kim H K, 2015, Fatigue Strength Evaluation of Self-Piercing Riveted Al-5052 Joints Under Different Specimen Configurations, International Journal of Fatigue, 80, 58-68.
- Kaya Y, 2010, Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, Karabük.
- Kaya H, 2012, Form Punta (Clinching) Yöntemiyle Birleştirilmiş İnce Sac Levhaların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, Afyon.
- Kılıç E, 2008, 14NiCr10–14NiCr14 Çeliklerinin Uygulanacak Sementasyon İşlemine Bağlı Olarak Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Kırıkkale.
- Kim H K, 2012, Fatigue Strength Evaluation of the Clinched Lap Joints of a Cold Rolled Mild Steel Sheet, Journal of Materials Engineering and Performance, 22, 294-299.
- Kurt Z B, Albak B, Esen K E, 2018, Direnç Punta Kaynağı ve Tox-Perçinleme Yöntemiyle Birleştirilen AA 6016-T4 Alaşım Plakaların Karşılaştırılması, 6 th

- International GAP Engineering Conference, 23-25 Ekim 2018, Şanlıurfa/Türkiye.
- Lin P C, Su Z M, Lai W J, Pan J, 2013, Fatigue Behavior of Self-Piercing Rivets and Clinch Joints in Lap-Shear Specimens of Aluminum Sheets, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 6, 293-298.
- Mori K, 2014, Assessing the Suitability of Materials for Self- Piercing riveting (SPR), Woodhead Publishing Limited, 232p, Cambridge.
- Mori K, Abe Y, Kato T, 2012, Mechanism of Superiority of Fatigue Strength for Aluminium Alloy Sheets Joined by Mechanical Clinching and Self-Pierce Riveting, Journal of Materials Processing Technology, 212, 1900-1905.
- Mucha J, 2017, Clinching Technology in the Automotive Industry, The Archives of Automotive Engineering, 76, 75-94.
- Özçelik S, 2013, Mantarı Sertleştirilmiş Raylarda Yorulma Davranışı İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86s, İstanbul.
- Öztürkler C, 1998, Yüzey Çatlaklarının Yorulmaya Etkisi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s, Erzurum.
- Pasarkara A, Maneb A, Singhc N, Datarkard A, Raut N, 2022, A Review Behaviour of Resistance Spot Welds, Research on Engineering Structures & Materials, 9, 181-194.
- Pereira A M, Ferreira J A M, Antunes F V, Bartolo P J, 2012, Assessment of the Fatigue Life of Aluminium Spot-Welded and Weld-Bonded Joints, Journal of Adhesion Science and Technology, 28, 1432-1450.
- Rao H M, Kang J, Shi L, Sigler D R, Carlson B E, 2018, Effect of Specimen Configuration on Fatigue Properties of Dissimilar Aluminum to Steel Resistance Spot Welds, International Journal of Fatigue, 116, 13-21.
- Sakin R, 2004, Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 152s, Balıkesir.
- Sayaca T, 2010, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 2000 Serisi Alüminyum

- Alaşımların Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, Bursa.
- Seyitoğlu N M, 2013, TIG Kaynağı ile Kaynatılmış Otomotiv Saclarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Ankara
- Silva E L, Höche D, Bouali A C, Serdechnova M, Sesenes R L, Scholz C S vd, 2017, Digital Modelling of The Galvanic Corrosion Behaviour of a Self-Piercing Riveted AZ31 - AA5083 Hybrid Joint, Mat.-wiss. u. Werkstofftech, 48, 529-545
- Spitsen R, Kim D, Flinn B, Ramulu M, Easterbrook E T, 2005, The Effects of Post-Weld Cold Working Processes on the Fatigue Strength of Low Carbon Steel Resistance Spot Welds, Asme Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127, 718-723.
- Su Z M, Lin P C, Lai W J, Pan J, 2015, Fatigue Analyses of Self-Piercing Rivets and Clinch Joints in Lap-Shear Specimens of Aluminum Sheets, International Journal of Fatigue, 72, 53-65.
- şen G, 2015, Determination of Fracture and Fatigue Behaviours of 4340 Steel, Middle East Technical University, M.Sc. Thesis, 95p, Ankara.
- Tezcan T, 2017, Elektrik Direnç Kaynağı, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Bursa.
- Turan M, 2019, Perçinsiz Sac Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, Afyon.
- Tutar M, Aydın H, Bayram, 2018, Elektrik Direnç Punta Kaynağı ile Kaynak Edilmiş TWIP Çeliklerinde Kaynak Parametrelerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24, 650-657.
- Uematsu Y, Tokaji K, 2009, Comparison of Fatigue Behaviour Between Resistance Spot and Friction Stir Spot Welded Aluminium Alloy Sheets, Science and Technology of Welding and Joining, 14, 62-71.

- Woo A, 2022, Resistance Spot Weld Fatigue Life Prediction Method Compatibility with Self-Piercing Rivets, The University of Waterloo, M.Sc. Thesis, 98p, Waterloo Ontario.
- Yeşildal C, 2008, Otomotiv Sektöründeki Birleştirmelerde Seçilen Kaynak Parametreleri ve Kullanılan Teknolojiler: Geleneksel Yöntemler ve Laser Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, İstanbul.
- Yıldırım M T, 2010, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 3000 Serisi Alüminyum Alaşımların Yorulma Davranışının İncelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, Bursa.
- Yıldız İ, 2006, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sacların Şekillenebilirlik Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, İstanbul.
- Yılmaz M, 2020, Tekrarlı Eğilme Yorulmasında Çatlak İlerleme Hızının İncelenmesi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 30s, İstanbul.
- Yüce C, 2018, Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 166s, Bursa.
- Zhao L, He X, Xing B, Lu Y, Gu F, Ball A, 2015, Influence of Sheet Thickness on Fatigue Behavior and Fretting of Self-Piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 5052, Materials and Design, 87, 1010-1017.
- Zhao Y G, Huang Z C, Jiang Y, 2022, Effect of Low-Velocity Impact on Mechanical Property and Fatigue Life of DP590/AA6061 Self-Piercing Riveted Joints, Materials Research Express, 9,2-13.
- Zhou Z J, Huang Z C, Jiang Y Q, Tang N L, 2022, Joining Properties of SPFC440/AA5052 Multi-Material Self-Piercing Riveting Joints, Materials, 15, 2-17.

İnternet Kaynakları

- 1- https://tr.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCnya_n%C3%BCfusu, 16.06.2023
- 2- <https://www.ikinciyezi.com/blog/iyi-surucu-rehberi-detay/co2-emisyonu-hakkinda-merak-edilen-her-sey>, 21.09.2021
- 3- <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/naci.kurgan/126929/09.%20Yorulma%20Hasarlar%C4%B1.pdf>, 16.06.2023
- 4- http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Elektrik%20Direnc%20Kaynagi.pdf, 17.06.2023
- 5- <https://atelim.com/1-olcme-olcmenin-tanm-ve-onemi.html?part=6>, 17.06.2023
- 6- <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-Form-punta-and-how-does-it-work>, 17.06.2023
- 7- <https://tr.tox-pressotechnik.com/applications/Form-punta/sheet-metal-Form-punta-shapes/sheet-metal-Form-punta-shapes/>, 17.06.2023
- 8- dkPOWER - BTM (dk-power.com), 17.06.2023
- 9- <https://clinchsystems.com/Form-punta-applications-examples/>, 17.06.2023
- 10- <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-self-piercing-riveting-and-how-does-it-work>, 17.06.2023
- 11- <https://kingcert.com/blog/urun-belgelendirme/mekanik-test/tr/#:~:text=Mekanik%20test%2C%20bir%20malzemenin%20veya,yorulma%20limiti%20gibi%20%C3%B6zellikleri%20%C3%B6l%C3%A7er.>, 17.06.2023
- 12- https://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/MekanikDeneyFoyu_1.pdf
17.06.2023
- 13- [https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ksu%20cekme%20\(1\)_1702221612397020.pdf](https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ksu%20cekme%20(1)_1702221612397020.pdf),
17.06.2023
- 14- <https://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2021/10/2Cekme.pdf>, 17.06.2023
- 15- <https://malzemetest.com/kategori17-yorulma-fatigue-testi-nedir-ve-nasil-yapilir.html>,
17.06.2023

- 16-[https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/Metalik%20Malzemelerde%20Yorulma%20Deneyi\(1\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/Metalik%20Malzemelerde%20Yorulma%20Deneyi(1).pdf), 17.06.2023
- 17- https://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/89610_20471920831.pdf, 17.06.2023
- 18- <https://www.focussan.com/galvaniz-yassi-celikler-hdg>, 17.06.2023
- 19- <https://aluminumburada.com/blog?p=al%C3%BCminyum-ala%C5%9F%C4%B1mlar%C4%B1-nerelerde-kullan%C4%B1%C4%B1r>, 17.06.2023
- 20- <https://turkish.aluminumsheetcoil.com/sale-11224004-5052-h32-aluminum-sheet-plate-highlights-5mm-alloy-plate-for-truck-body.html>, 17.06.2023
- 21- <https://www.autoaluminumsheet.com/a/the-aluminum-alloy-5052-used-in-automotive-industry.html>, 17.06.2023
- 22- <https://malzemebilimi.net/otomotiv-sektorunde-kullanilan-malzemeler.html>, 17.06.2023
- 23- https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_Katalogu-2017-1269.pdf, 17.06.2023
- 24- <http://turkish.aluminumalloyplates.com/sale-13159804-anti-corrosion-automotive-grade-5052-aluminum-sheet.html>, 17.06.2023
- 25- https://www.atum.itu.edu.tr/tr/?page_id=758, 17.06.2023

