



**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞINDA KULLANILAN
PİMİN OMUZ PROFİLİ TASARIMI VE BİRLEŞTİRİLEN MAGNEZYUM
LEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ahmet ATAK

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ ÜRÜNLERİ TASARIMI ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Ahmet ATAK tarafından hazırlanan “SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞINDA KULLANILAN PİMİN OMUZ PROFİLİ TASARIMI VE BİRLEŞTİRİLEN MAGNEZYUM LEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Aydın ŞIK

Endüstri Ürünleri Tasarımı Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Termodinamik ve Isı Tekniği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Hüseyin Güçlü YAVUZCAN

Endüstri Ürünleri Tasarımı Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tarsus Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet ATAĞ

26/07/2019

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞINDA KULLANILAN PİMİN OMUZ
PROFİLİ TASARIMI VE BİRLEŞTİRİLEN MAGNEZYUM LEVHALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Ahmet ATAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Magnezyum alaşımının ağırlık kazancı ve yakıt tüketiminde tasarruf sağlaması özellikle otomotiv ve havacılık alanındaki düşük ağırlıklı mühendislik malzemelerinin geliştirilmesinde kullanımını da artırmaktadır. Magnezyum; alüminyum'a göre %35, titanyuma göre de %65 daha hafif bir metal olsa da ergitme esaslı birleştirme yöntemleri ile birleştirmelerde problemler yaşanmasına da neden olabilmektedir. Ergitme birleştirme yöntemleri ile magnezyum levhaların birleştirilmesi zor olması nedeni ile son yıllarda alüminyum ve magnezyum levhaların birleştirilmesinde sıkça kullanılan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) bir katıhal birleştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada SKK yöntemi ile malzemelerin birleştirilmesi için vidasız (pimsiz) sürtünme karıştırma karıştırıcı uç omuz profili tasarımları ve bu uçlarla birleştirilen Magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin ve metalografik yapısının incelenmesi amaçlanmıştır. Karıştırıcı uç ve ucun omuz profili tasarımları yapılarak, birleştirme bölgesi vidasız pim ile karıştırılarak otomotiv ve havacılık alanında kullanılan ince Magnezyum levhaların birleştirilmesi mümkün hale getirilmiştir. Magnezyum levhaların rahatlıkla birleştirilebildiği, yapılan deneyler ve mühendislik uygulamalarıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel ve teorik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan vidasız karıştırıcı uç omuz profili tasarımı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemiyle birleştirilen magnezyum malzemelerin mekanik özelliklerden; çekme-kesme dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, yorulma dayanımı, sertlik ölçümleri, X-Ray görüntüleri alınmış ve metalografik yapı incelenmiştir.

Bilim Kodu : 80308
Anahtar Kelimeler : Vidasız karıştırıcı uç omuz profil tasarımı, sürtünme karıştırma nokta kaynağı, hafif malzemelerden Magnezyum alaşımı levhaların birleştirilmesi.
Sayfa Adedi : 176
Danışman : Prof. Dr. Aydın ŞIK

INVESTIGATION OF SHOULDER PROFILE DESIGN OF THE SCREWLESS
STIRRING TOOL AND THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE JOINED
MAGNESIUM PLATES WITH FRICTION STIR SPOT WELDING

(Ph. D. Thesis)

Ahmet ATAĞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

The weight gain of the magnesium alloy and the savings in fuel consumption also increase its use in the development of low-weight engineering materials, especially in the automotive and aviation sectors. Even though magnesium is 35% lighter than aluminum and 65% lighter than titanium, it can still cause problems in joining with melting based welding methods. Due to the fact that magnesium plates are difficult to join with melting based welding methods, the friction stir welding (FSW) method, which is frequently used in joining of aluminum and magnesium plates, has been used in recent years. In this investigation, it is aimed to investigate the mechanical features and metallographic structure of the screwless friction stir tool shoulder profile designs for joining the materials by the FSW method used in recent years and magnesium plates joined with these tools. Joining the magnesium plates used in automotive and aviation sectors has been made possible through making stirring tool shoulder profile designs and stirring joining with screwless tool. Thus, the fact that magnesium plates can be easily joined and their usability in engineering applications were evaluated experimentally and theoretically by using finite element method and the experiments. Of the mechanical features of the magnesium materials joined with the screwless stirring tool shoulder profile design and the Friction Stir Spot Welding (FSSW) method; tensile-shear strength, bending strength, fatigue strength, hardness measurements, X-Ray scans and metallographic structure were investigated.

Science Code : 80308

Key Words : Screwless stirring tip shoulder profile design, friction stir spot welding, joining magnesium alloy plates from light materials.

Page Number : 176

Supervisor : Prof. Dr. Aydın ŞİK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, yıllarca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, şeffaf ve dürüstlüğünü, çalışkanlığını, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam; Prof. Dr. Aydın ŞIK'a, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarımdan Prof. Dr. Hüseyin Güçlü YAVUZCAN'a, Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ'e, bana yönlendirmeler yapan arkadaşım Fatih GÖKÇE'ye, eğitim ve öğrenime çok önem veren çocuklarının diplomalarını duvarlara asan, onlarla gurur duyan sevgili babama ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli hayat arkadaşım ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	5
2.1. Birleştirilebilecek Metaller	5
2.2. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları	6
2.3. Magnezyum'un Otomotiv Sektöründeki Önemi	13
2.4. Magnezyum Kaynakları	20
2.5. Metallerin Birleştirme Yöntemleri ve Sınıflandırılması	21
2.6. Isı Girdisi.....	25
2.7. Metallerin Kaynak Kabiliyeti.....	26
2.8. Elektrik Direnç Nokta (Punta) Kaynağı	27
2.9. Sürtünme Kaynağı ve Çeşitleri	28
2.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	30
2.11. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	35
2.12. Geliştirilmiş SKK Makineleri ve Robotları	38
2.13. Karıştırıcı Uç Tasarımı ve Malzeme Seçimi	42
2.13.1. Süper aşındırıcı poli-kristalin kübik bor nitrür uçlar.....	46
2.13.2. Refrakter metal uçları.....	47

	Sayfa
2.13.3. Süper alaşım uçlar	48
2.14. Karıştırıcı Uçun Geometrik Tasarımı	48
2.15. Karıştırıcı Uç Detay Tasarımları	52
2.16. Omuz Tasarımları	53
2.17. Karıştırıcı Uç Omuz Profili Tasarımları	55
3. MALZEME VE METOT	59
3.1. Malzeme.....	59
3.2. Metot	62
3.2.1. Metalografik yapı incelemesi için numune hazırlama işlemleri	62
3.2.2. Analitik ve nümerik ısı- mekanik analizler	64
3.2.3. Isıl model.....	66
3.2.4. Isıl alanın nümerik çözümü	70
3.2.5. Mekanik alanın nümerik çözümü.....	78
3.2.6. Isıl-mekanik analizlerin sonucunda geliştirilmiş karıştırıcı uç tasarımları.....	86
3.2.7. Torna tezgâhında ilk birleştirme numuneleri	87
3.2.8. Magnezyum deney numunelerinin hazırlanması ve SKNK birleştirmelerinin yapılması.....	88
3.2.9. Deneylerin planlanması.....	92
3.2.10. Çekme testi düzeneği	93
3.3. Ana Malzeme Çekme Testleri.....	93
3.4. Vidasız Karıştırıcı Uç Omuz Profili Tasarımının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi	95
3.4.1. Çekme-kesme testi	95
3.4.2. Üç nokta eğme testi	98
3.5. Test Sonuçlarına Göre En İyi Karıştırıcı Uç Omuz Profilinin Belirlenmesi	103
3.6. Karıştırıcı Uç Devir Sayısının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi	103

	Sayfa
3.6.1.Çekme-eğme testi.....	105
3.6.2.Üç-nokta eğme testi.....	107
3.6.3.Mekanik testlerin değerlendirilmesi.....	108
3.7. SKNK’da Karıştırıcı Ucun Malzemeye Dalma Yüksekliğinin Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi	109
3.7.1.Çekme-kesme testi	110
3.7.2.Üç-nokta eğme testi.....	111
3.7.3.Mekanik testlerin değerlendirilmesi.....	115
3.8. Malzeme Kalınlığının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi	115
3.8.1.Çekme-kesme testi	116
3.8.2.Üç-nokta eğme testi.....	118
3.8.3.Mekanik testlerin değerlendirilmesi.....	119
3.9. Birleştirme Süresinin Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi	120
3.10. Çizelge 3.9’da Gösterilen En İyi Parametreler İle Gerçekleştirilen Birleştirmenin Mekanik Özelliklerinin ve Metalografik Yapısının İncelenmesi	121
3.10.1. Çekme-kesme testi	121
3.10.2. Çekme-kesme testinin analitik ve FEM-analizi ile karşılaştırması.....	125
3.10.3. AZ31B ana malzeme çekme test sonuçları ve FEM-malzeme modeli	128
3.10.4. Elastik-elastik gerilim mekanizmalarının analizi.....	130
3.10.5. Elastik-plastik gerilim mekanizmalarının analizi	134
3.10.6. Çekme-kesme testinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile doğrulanması.....	137
3.10.7. FEM-Analizi sonuçlarının yorumlaması.....	139
3.10.8. Çekme-kesme testi doğrulama çalışması verileri	141
3.10.9. Üç-nokta eğme testi	142

	Sayfa
3.10.10. Sertlik testi	145
3.10.11. X-RAY testi	146
3.10.12. Yorulma dayanımı testi.....	147
3.10.13. Metalografik yapı incelemesi.....	151
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	159
4.1. Sonuçlar.....	159
4.2. Öneriler	162
KAYNAKLAR	165
ÖZGEÇMİŞ	175

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı metal ve bileşiklerin özellikleri	5
Çizelge 2.2. Mg ve Al alaşımları ile dökme demirin özgül sönümlene kapasiteleri (%)	10
Çizelge 2.3. Tasarıma uygunluk açısından Magnezyum.	10
Çizelge 2.4. Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi	11
Çizelge 2.5. İşlenebilirlik açısından bazı metallerin kıyaslaması	13
Çizelge 2.6. Saf magnezyum ve alüminyum'un fiziksel özellikleri.....	17
Çizelge 2.7. Bir otomobil üretiminde Magnezyum'dan yapılan parçalar.....	18
Çizelge 2.8. Metallerin kaynaklı birleştirme yöntemlerine göre detaylı bir sınıflandırması	24
Çizelge 2.9. Kullanılan karıştırıcı uç malzemeleri	45
Çizelge 3.1. Magnezyum alaşımı AZ31B'nin kimyasal özellikleri.....	59
Çizelge 3.2. Magnezyum alaşımı AZ31B'nin mekanik özellikleri	59
Çizelge 3.3. Omuz profil alanı oranları	70
Çizelge 3.4. Modelde kullanılan malzemelerin ısı özellikleri	71
Çizelge 3.5. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile gerçekleşen çekme testine göre mekanik özellikleri	94
Çizelge 3.6. AZ31B Magnezyum alaşımı numunelerinin omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi ölçüm sonuçları.	101
Çizelge 3.7. Devir sayısı 1500 devir/dak ve 2000 devir/dak ile birleştirilen malzemelerin çekme-kesme maksimum kuvvetleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C")	106
Çizelge 3.8. Devir sayısı 1750 dev/dak ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliğinde birleştirilen malzemelerin çekme-kesme maksimum kuvvetleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C")	111
Çizelge 3.9. Numune kalınlığı (t)'na bağlı en iyi birleştirme parametreler olarak dalma yüksekliği (Hw) ve dönme sayısı (RPM)	120

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.10. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B Magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra testlerde elde edilen maksimum çekme kesme kuvveti (Fu) ve ortalaması.....	122
Çizelge 3.11. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B Magnezyum alaşımı 1,75 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme maksimum kesme kuvvetleri ve ortalaması.	122
Çizelge 3.12. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B Magnezyum alaşımı 1,5 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra maksimum çekme kesme kuvvetleri ve ortalaması.	123
Çizelge 3.13. Önerilen sac levha kalınlığına (t) bağlı nokta kaynağı çap (ød) ölçüleri (Matek ve diğerleri, 2000).....	127
Çizelge 3.14. AZ31B Magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1); *zaman aşımı.	147
Çizelge 3.15. AZ31B Magnezyum alaşımı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1)	148
Çizelge 3.16. AZ31B Magnezyum alaşımı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1)	150

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme Kaynak Yöntemleri; (a) Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), (b) Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), (c) Lineer Sürtünme Kaynağı (LSK) ve (d) Rotasyon Sürtünme Kaynağı (RSK).....	29
Şekil 2.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi.....	32
Şekil 2.3. SKK ile yapılabilen birleştirme tasarımları.....	33
Şekil 2.4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi.....	36
Şekil 2.5. Omuz tasarımları.....	54
Şekil 2.6. Farklı omuz profili tasarımları; a) Kaydırmalı, b) Tırtıklı, c) Sırtlı, d) Yivli, e) Eşmerkezli daireler	55
Şekil 3.1. ISO 6892-1'e uygun çekme deneyi numune ölçüleri.....	59
Şekil 3.2. Nokta kaynağı için ISO 14273'e uygun çekme-kesme deneyi numune ölçüleri.....	60
Şekil 3.3. a) Farklı karıştırıcı uç omuz tasarımları b) karıştırıcı uç tasarımı.....	66
Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında ısı oluşumunun ısıl-mekanik modeli.....	67
Şekil 3.5. SKNK'nda mekanik sürtünme yüzeyinde “sonsuz küçük alan” modeli.....	68
Şekil 3.6. Tip A'da zamana bağlı olarak nümerik çözülen omuz yüzeyindeki maksimum sıcaklık oluşumu.....	72
Şekil 3.7. Omuz profil tipi A örneğinde; birleşme düzleminde ve birleştirme merkezinden dışa doğru yarıçap'a bağlı 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 3.8. Omuz profil tipi A örneğinde; alt yüzeyden üst yüzeye doğru toplam 4mm kalınlığa bağlı 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 3.9. Magnezyum'un sıcaklığa bağlı E-Modül verileri (Alüminyum alaşımının 6061-T6 verileri kullanılmıştır.....	79
Şekil 3.10. Magnezyum'un sıcaklığa bağlı gerilim σ [MPa] elastik-plastik modeli alüminyum alaşımının 6061-T6 verileri kullanılmıştır	79
Şekil 3.11. Karıştırıcı ucun ilk tasarımı (A) ile ısıl-mekanik analizler sonunda son tasarımı	86
Şekil 3.12. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile çekme testi sonuçları	94

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Çekme-kesme testi sonucu kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü.	97
Şekil 3.14. ISO 7438'e göre üç nokta eğme deneyi için kullanılan düzenek ölçüleri....	98
Şekil 3.15. Magnezyum alaşımı AZ31B 1,5 mm numunelerin 3000 dev/dak ile ve 0,6 mm dalma yüksekliğinde farklı omuz profilleri (A, B, C, D ve E) ile birleştirilerek üç nokta eğme testinde eğme kuvvetinin eğilmesine bağlı grafikleri.....	102
Şekil 3.16. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1500 devir/dakika'da birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2, 3 ve 4 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	105
Şekil 3.17. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 devir/dakika'da birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (5, 6, 7 8 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	106
Şekil 3.18. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 devir/dakika'da birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	107
Şekil 3.19. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1500 devir/dakika da birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümü (4 ve 5 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	108
Şekil 3.20. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (Hw)'nde birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (Hxx-x nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	110
Şekil 3.21. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,0 mm daldırma yüksekliği (Hw)'de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	112
Şekil 3.22. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,2 mm daldırma yüksekliği (Hw)'de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").....	113

Şekil	Sayfa
Şekil 3.23. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,3 mm daldırma yüksekliği (Hw)'de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1 ve 2 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C")	114
Şekil 3.24. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (Hw)'de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1 ve 2 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C")	115
Şekil 3.25. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 3500 dev/dak, 0,6 mm daldırma yüksekliği ve karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ve "D" ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (Axx ve Dxx nolu numuneler)	116
Şekil 3.26. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 0,6 mm daldırma yüksekliği, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak'da karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu numuneler).....	116
Şekil 3.27. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 devir/dakika, 1,0 mm ve 1,2 mm daldırma yüksekliğin de karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (H10-x ve H12-y nolu numuneler)	117
Şekil 3.28. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 3500 devir/dakika, 0,6 mm daldırma yüksekliği ve karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ve "D" ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü.....	118
Şekil 3.29. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 0,6 mm daldırma yüksekliği, 1500 devir/dakika ve 2000 devir/dakika da karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü	118
Şekil 3.30. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 devir/dakika, 1,0 mm ve 1,2 mm daldırma yüksekliğinde karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2, 3 nolu numuneler).....	119

Şekil	Sayfa
Şekil 3.31. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (a_{xx} nolu numuneler)....	121
Şekil 3.32. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (b_x nolu numuneler).....	122
Şekil 3.33. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (C_x nolu numuneler)	123
Şekil 3.34. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile farklı karıştırıcı uç omuz profil tasarımları ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (A_x , B_x , C_x , D_x ve E_x nolu numuneler)	124
Şekil 3.35. Nokta kaynağı tasarımı için yaygın kullanılan kesme gerilimine dayalı gerilim mekanizması	126
Şekil 3.36. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile çekme testi sonuçları (c ve d nolu numuneler).....	129
Şekil 3.37. SKNK ile birleştirilmiş Çekme-Kesme numunesinin geometrik modeli ve parametreleri.....	130
Şekil 3.38. Bağlantı ara-yüzünde oluşan elastik kesme gerilimi.....	130
Şekil 3.39. Üst levhada oluşan y-yönündeki kesme gerilimi	131
Şekil 3.40. Üst levhada oluşan çekme yönüne dik eğme gerilimi.....	132
Şekil 3.41. Üst levhada oluşan y-yönündeki kesme gerilimi	133
Şekil 3.42. Birleşme silindirlerindeki tam-plastik iç kuvvetlerin statik dengesi.....	134
Şekil 3.43. Malzemenin kopma gerilimi ile analitik olarak hesaplanan ve kopmasına sebep olan minimum Çekme-Kesme-Kuvveti ($F_{min.}$, kopma = 1931 N) ve yeri	136
Şekil 3.44. Çekme-kesme test numunesinin statik geometrik modeli.....	137
Şekil 3.45. Çekme testi numunesinin sonlu elemanlar model ağı (mesh).....	137

Şekil	Sayfa
Şekil 3.46. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki levhaların SKNK yöntemi ile birleştirmesinden sonra çekme-kesme testleri sonuçlarının (C5-C9 numuneleri için) FEM-Analizi sonucu ile karşılaştırma grafiği (Burada: t kalınlık, Hw karıştırıcı uç dalma derinliği, RPM karıştırıcı uç devir-dakika olarak dönme hızını, Tw saniye (s) olarak dalma süresini ve Te bekleme süresini ifade eder)	140
Şekil 3.47. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 1,16 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (5, 6, 7 ve 8 nolu numuneler)	143
Şekil 3.48. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 1,0 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (9, 10 ve 11 nolu numuneler).	144
Şekil 3.49. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 0,87 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (1, 2, 3 ve 4 nolu numuneler)	145
Şekil 3.50. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 devir/dakika da, 0,87 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üst ve alt levha yüzeyindeki enine doğru sertlik değerlerinin HR15T grafikleri (Omuz profil tipi "C")	146
Şekil 3.51. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği.....	147
Şekil 3.52. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği.....	148
Şekil 3.53. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği.....	149
Şekil 3.54. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği.....	149
Şekil 3.55. Karıştırma ucu çapı 8 mm ile SKNK uygulanmış 1,75 mm ve 30 mm eninde AZ31B magnezyum alaşımı ince levhalarda, malzemede çentik faktörünün yorulmaya etkisi.....	151

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. 1955 model Mercedes 300SLR LeMans'da Magnezyum alaşımları levha şeklinde kullanılışı	15
Resim 2.2. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar	17
Resim 2.3. Magnezyum'dan yapılmış çeşitli ürünler	19
Resim 2.4. EDNK'nda uygulanan işlem basamakları: a). Basma süresi: Elektrot kuvvetinin ilk uygulandığı an ile kaynak akımının verildiği ilk an arasında geçen süredir, b). Kaynak süresi: Kaynak akımının geçtiği zaman aralığıdır, c). Tutma süresi: Kaynak akımının kesilmesinden sonra elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği süredir, d). Ölü süre: Elektrotların iş parçası ile temasta olmadığı, zaman aralığıdır	27
Resim 2.5. EDNK'nda oluşan dikişin kesit görüntüsü	27
Resim 2.6. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak üretilmiş Mazda RX-8'in yan kapı paneli ve noktalarının görünüşü	35
Resim 2.7. SKNK yönteminin spor model otomobil gövde panellerinin ve arka kapılarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanımı	38
Resim 2.8. (a) SKK makine ve taşıma robotu, tamamen otomatik bir hattın parçası olarak arka koltuk çerçeveleri üretmek içindir. (b) Kaynak sonrası arka koltuk çerçevesi görünümüdür	39
Resim 2.9. Hitachi America, Ltd. Ar-Ge Bölümü tarafından geliştirilen Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinaları; a) 1 Eksenli SKK-Makinası, b) 2 Eksenli SKK-Makinası , c) 3 Eksenli SKK-Makinası , c) Çok eksenli (Robotik) SKK-Makinası	39
Resim 2.10. ESAB Şirketinin geliştirdiği SKK-Makine ve robotları ve kaynak örnekleri.....	40
Resim 2.11. ABB robotik IRB6400 robot	40
Resim 2.12. Taşınabilen yüksek hızlı SKK makinesi.....	41
Resim 2.13. PCBN karıştırıcı uç tasarım evrimi: a) Normal tasarım, b) Adım spiral tasarımı ve c) Dışbükey kaydırmalı omuz adım spiral tasarımı	44
Resim 2.14. Yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç pim geometrileri: a) silindirik vida, b) üç vidalı üçgen, c) vidalı üçgen, d) dışbükey vidalı üçgen e) konik vida, f) üç oluklu konik vida.....	52
Resim 2.15. Karıştırıcı uç parça bölge tanımlarının gösterimi	53

Resim	Sayfa
Resim 2.16. Bakavas ve diğerkleri, (2011)'in çalışmalarında kullandıkları farklı omuz profil tasarımlarının görüntüsü	56
Resim 3.1. Magnezyum alaşımı AZ31B-O için ISO 6892-1'e uygun çekme deneyi numune görüntüleri.....	60
Resim 3.2. Magnezyum alaşımı AZ31B malzemesi ile ISO 14273'e uygun çekme-kesme deney numunelerinin, A ve B tipi omuz profiline sahip karıştırıcı uçlarıyla birleştirilmiş görüntüleri.	61
Resim 3.3. a) Östenik ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) paslanmaz çeliğinden üretilen pimler (sertleştirilememiştir) b) AISI 1040 (DIN C40) karbon çeliğinden üretilen karıştırıcı uçları (30 HRC sertleştirilmiştir).....	62
Resim 3.4. Vidasız karıştırıcı uç omuz profili tipleri "A", "B", "C", "D" ve "E" ile gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin hazırlanan bakalit görüntüleri.	63
Resim 3.5. SKNK yöntemi şematik gösterimi a) dalma, b) birleşme, c) geri çekilme.....	65
Resim 3.6. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki omuz profil yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.	72
Resim 3.7. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki omuz profillerindeki sıcaklık dağılımı.	74
Resim 3.8. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki Magnezyum levhalarındaki sıcaklık dağılımı.....	75
Resim 3.9. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki Magnezyum levhalarındaki sıcaklık dağılımı.....	76
Resim 3.10. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki toplam yer değıştirme dağılımı [mm].	80
Resim 3.11. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki plastik yer değıştirme [mm] dağılımı.....	80
Resim 3.12. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki elastik yer değıştirme [mm] dağılımı (Kesit görünüm)	81
Resim 3.13. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki plastik sehım ϵ % dağılımı (Kesit görünüm)	82
Resim 3.14. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki kesme gerilimi τ [MPa] dağılımı (Kesit görünüm)....	83

Resim	Sayfa
Resim 3.15. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki eşdeğer gerilimi σE [MPa] dağılımı	83
Resim 3.16. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki kesme gerilimi τ [MPa] dağılımı (Kesit görünüm)	84
Resim 3.17. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki eşdeğer gerilim σE [MPa] dağılımı (Kesit görünüm)	85
Resim 3.18. İlk tasarımla son tasarımın ısı analiz sonucu sıcaklık dağılımları	87
Resim 3.19. Çelik malzeme AISI 1040 (DIN C40)'dan serleştirilmiş (30HRC) karıştırıcı ucun birleştirmeden sonraki (4 tane SKNK) görüntüsü.	88
Resim 3.20. SKNK ile birleştirilen Magnezyum levha deney numuneleri ve ölçüleri.	89
Resim 3.21. SKNK yöntemiyle ve E omuz tipi karıştırıcı uç tipi kullanılarak birleştirilen 1,5 mm kalınlığındaki Magnezyum levha numune görüntüsü.	89
Resim 3.22. SKNK yöntemiyle birleştirilmiş ve 180 derece bükülüp bırakılan 1,5 mm Magnezyum numune	90
Resim 3.23. Hatalı birleştirme numunesi (E tipi karıştırıcı uç kullanılmıştır).....	90
Resim 3.24. Omuz profil tiplerine göre AISI 1040 (DIN C40) malzemeden üretilen karıştırıcı uçlarının ortalama 20 birleştirme yapıldıktan sonraki görünümü.....	91
Resim 3.25. INSTRON 3369 Çekme deneyi testi makinası	93
Resim 3.26. AZ31B Magnezyum alaşımı levhaların birleştirme parametresi karıştırıcı uç omuz profili A, B, C, D ve E tipleriyle birleştirilmiş ve çekme deneyi sonucunda kopartılmış kesme yüzeyleri örnek görüntüleri.	95
Resim 3.27. ISO 7438'e uygun üç nokta eğme deney düzeneği	98
Resim 3.28. AZ31B Magnezyum alaşımı numuneleri omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi sonucu üstten görüntüleri.	99
Resim 3.29. AZ31B Magnezyum alaşımı numuneleri omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi sonucu yandan görüntüleri.	100
Resim 3.30. Kalınlığı 1,75 mm Magnezyum alaşımı AZ31B sac malzemenin 1500 ve 2000 devir/dakika da birleştirilip, çekme kesme deneyi ile kopartılan birleşme ara yüzeyi görüntüleri	104

Resim	Sayfa
Resim 3.31. AZ31B Magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 ve 1500 devir/dakikada birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyi sonundaki görünüşleri.	104
Resim 3.32. AZ31B Magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 devir/dakika (RPM) ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (Hw)'de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinden sonraki görünüşleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi "C").	111
Resim 3.33. Çekme-Kesme testinde oluşan hasar tipleri: a) Çevresel olarak kaynaktan hasar, b) Kaynak dikişinden çekerek yırtılma, c) Üst levhadan çekerek çıkarma hasarı, d) Alt levhadan çekerek çıkarma hasarı, e) Tüm parçalardan hasar	127
Resim 3.34. SKNK ile birleştirilmiş numunenin üstten görünümü.	130
Resim 3.35. Global deformasyon [mm].....	138
Resim 3.36. Global deformasyonun birleşme bölgesindeki detay görünümü.	138
Resim 3.37. Çekme yönündeki (x yönü) uzaması.	138
Resim 3.38. Von MISES karşılaştırma gerilimi [MPa]	138
Resim 3.39. Birleştirme bölgesindeki 1766 N çekme kuvveti sonunda elde edilen plastik gerinim görüntüsü.	139
Resim 3.40. Von MISES Karşılaştırma gerilimi detay görüntüsü [MPa]	140
Resim 3.41. AZ31B Magnezyum alaşımı 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 devir/dakika da, Çizelge 3.9'da verilen dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra X-RAY ile çekilen görünüşleri.	146
Resim 3.42. Vidasız karıştırıcı uç omuz profili tipi "C" ile gerçekleştirilen SKNK birleştirmesinin makro yapı görüntüsü.	152
Resim 3.43. Mikro yapı görüntüsü alınan bölgelerin görüntüsü.	152
Resim 3.44. Omuz profil tipleri "A", "B", "C", "D" ve "E" nin birleştirmeden etkilenmeyen sol (L) veya ağ (R) bölgedeki (NAZ) mikro yapı görüntüleri.	154
Resim 3.45. Omuz profil tipleri "A", "B", "C", "D" ve "E" nin birleştirmenin gerçekleştiği bölgedeki (SZ) mikro yapı görüntüleri.	155

Resim**Sayfa**

- Resim 3.46. Omuz profil tipleri “A”, “B”, C”, “D” ve “E” nin birleştirmenin gerçekleştiği arayüzde ve sol (L) veya sağ (R) taraftaki ısıl-mekanik etki alanındaki (TMAZ1) mikro yapı görüntüleri. 156



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
1, 2, ...; $a_i, b_i, \dots; A_i, B_i, \dots$	Test numunesinin adlandırmaları (i: indeks)
ASTM	American Society for Testing and Materials
C_p	Malzemenin ısı kapasitesi
d_1	Birleşme çapı
d	Karıştırıcı uç ucu çapı
E	Malzemenin elastisite modülü
F	Statik Kuvvet
F_a	Çevrim kuvveti
H_w	Karıştırıcı uç malzemeye dalma yüksekliği
Hz	Hertz
I	Karıştırıcı uç kesitinin momenti
k_A	Karıştırıcı ucun temas eden alanın toplam alana oranı
m^2	Metrekare
m^3	Metre küp
M	Mekanik moment
MPa	Megapaskal, Gerilim birimi
n	Karıştırıcı uç devir sayısı
N	Çevrim Sayısı veya kuvvet birimi (Newton)
P	Mekanik enerji
Q	Isıl enerji
s	Saniye
t_1	Üst levhanın birleştirme bölgesindeki kalan kalınlığı
t	Levha kalınlığı
T	Sıcaklık veya Zaman
T_w	Karıştırıcı uç malzemeye dalma zamanı
T_e	Karıştırıcı uç malzemeye dalma zamanı

Simgeler**Açıklamalar****vd**

Ve diğerleri

 α

Açı veya malzemenin ısı genleşme katsayısı

 γ

Malzemenin Poisson oranı

 μ

Sürtünme katsayısı

 μm

Mikro metre

 σ

Malzemenin normal gerilimi

 σ_{kopma}

Malzemenin kopma gerilimi

 σ_{akma}

Malzemenin akma gerilimi

 ϵ

Malzemenin gerinimi

 τ

Malzemenin kesme gerilimi

 ω

Açısal hız

Kısaltmalar**Açıklamalar****DNK**

Direnç nokta kaynağı

HR15T

Sertlik ölçüm birimi

NAZ

Isıl-mekanik etkilenmeyen bölge

PCBN

Poli-kristalin kübik bor nitrür

RPM

Karıştırıcı uç dakikada dönme sayısı

SEM

Sonlu Elemanlar Metodu

SKK

Sürtünme karıştırma kaynağı

SKNK

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı

SZ

Karıştırma bölge

TMAZ

Isıl-mekanik etki bölge

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın özgün değeri, otomotiv ve havacılık sektöründe, hafifliği sebebi ile kullanılmaya başlayan ve birleştirilmesinde sıkıntı yaşanan magnezyum levhaların farklı bir birleştirme yöntemi ile çözülmesidir. Seçilen Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yönteminin özgün değeri dayanımı yüksek kaynak dikişi, hızlı birleştirme ve çevreye zararı olmamasıdır. Günümüzde ve gelecek yıllarda giderek artan ve artacak olan Magnezyum malzeme üretimi Türkiye’de yapılamamaktadır. Çağımızın malzemesi olarak bilinen Magnezyum malzemenin ülkemizde bulunmasına rağmen bunun teknolojisi ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi önemlidir. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ve SKNK gelişimine paralel olarak bu çalışmanın konusu olan karıştırıcı uç tasarımları da önemli derecede gelişme katetmiştir. Çünkü SKK veya SKNK yöntemiyle yapılan birleştirmelerde karıştırıcı uç geometrisi ve tasarımı oldukça önemli bir parametredir.

Problem durumu / Konunun tanımı

Otomotiv veya havacılık endüstrisinin günümüzde karşılaştığı en önemli sorunlar arasında yakıt tasarrufunun artırılması gibi mühendislik için aşılması gerekli engeller öne çıkmaktadır (Nicholas ve Thomas, 1998). Son yıllarda güvenlik ve konfordan ödün vermeden daha az yakıt tüketen otomobillerin veya hava araçlarının üretilmesi için hafif, fakat mukavemeti yüksek alaşımların ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, üreticilerin en önemli hedefleri ve Ar-Ge konuları arasında yer almaktadır. Kullanılan bu hafif malzemelerin birleştirilmelerin de çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirme konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa birleştirme süresi, işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, birleştirme bölgesinde ince taneli yapı oluşumu, mekanik özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans gösteren birleştirme elde edilir. Hatasız birleştirme dikişi elde edilmesi ve düşük distorsiyon ve düşük kalıntı gerilimleri oluşması gibi avantajları ile öne çıkan bir birleştirme yöntemidir.

Araştırmanın amacı

Alüminyum ve magnezyum alaşımların ergitme esaslı birleştirme yöntemlerinde problemler yaşandığından sürtünme karıştırma birleştirme yöntemlerinde bu malzemelerin

birleştirilmelerinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bakır ve bakır alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları gibi metallerin kaynakla birleştirmesinde de kullanılabilir. Bu çalışmanın çıktısı olan yeni dış yüzey ve omuz tasarımı vidasız (pimsiz) karıştırıcı uç ile yapılan birleştirmelerin mekanik özelliklerinden özellikle yorulma dayanımı test sonucu önemlidir. Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerinde Magnezyum kullanılması nedeni ile kaynaklı bağlantılar taşıtın hareket halindeyken çeşitli mekanik yorulmaya bağlı zorlanmalarına, özellikle de dinamik yüklere maruz kalır. Bu dinamik yükler nedeniyle birleştirme bölgeleri kırılabilir. Literatür araştırma sonucunda vidasız karıştırıcı uç omuz tasarımları ile yapılan çok az sayıda yayına rastlanmıştır (Rohani-Yazdi, Beidokhti, Haddad-Sabzevar, 2019; Chu, Li, Yang, Shen, Li, Wang, 2017; Bakavos, Chen, Babout, Prangnell, 2011; Külekçi, 2008; Külekçi, Şık, Kaluç, 2008; Özdemir ve diğerleri, 2007).

Pimsiz farklı omuz profili tasarımları olan karıştırıcı uç kullanan çok az sayıdaki çalışmalarda 1 mm çelik malzeme ve alüminyum alaşımı malzemelerin birleştirmeleri yapılmış ve incelenmiştir. Başarılı birleştirmelerin olacağı sonucuna varılmıştır (Rohani-Yazdi, Beidokhti, Haddad-Sabzeva, 2019; Chu, Li, Yang, Shen, Li, Wang, 2017; Bakavos, Chen, Babout, Prangnell, 2011). Ancak pimsiz farklı omuz profili tasarımına sahip karıştırma ucu kullanarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilen Magnezyum levhaların birleştirilebilirliğini inceleyen bir çalışmaya literatür çalışmalarında rastlanmamıştır. Özellikle hafifliği sebebi ile havacılık ve otomotivde kullanımını kolaylaştırmak için Magnezyum ve Magnezyum alaşımlarını daha detaylı olarak incelemek gerekmektedir.

Bu çalışmada hafif olması nedeni ile özellikle taşıt endüstrisinde kullanılmaya başlanan magnezyum levhaların birleştirilmesi için, yeni tasarlanan çeşitli vidasız karıştırıcı uç ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılması amaçlanmıştır. Magnezyum alaşımı hafif ince sacların (1-2 mm kalınlık) ileriki başlıklar altında açıklanmış olan, bir katı hal birleştirme yöntemi olarak SKNK işlemi ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, magnezyum seçilmiş ve dinamik yüklere maruz kalması nedeni ile de yorulma dayanımı yanında; standart çekme-kesme deneyi, üç nokta eğme deneyi, sertlik ölçümleri, X-Ray incelemesi ve mikro yapı, karıştırıcı uç omuz profili tasarımlarına bağlı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda birleştirmeye etki eden en iyi parametreler yanında en iyi omuz profil tasarımının hangisi olduğu belirlenmiştir.

Araştırmanın önemi

Ülkemizde yeraltında bulunan magnezyum madeninin öneminin farkına varılması, magnezyum malzemesinin çağımızın malzemesi olduğunun kanıtlanması, üretilen levhaların alüminyum, çelik, gibi malzemelerden daha kısa sürede üretililebileceği, kullanıldığı alanların çoğunda magnezyum’unda kullanılabileceği, geri dönüşümlü bir malzeme olduğu, dünyada çelik ve alüminyum’dan sonra en çok bulunan malzeme olduğu, mükemmel sönümleme kapasitesi nedeniyle titreşim ve gürültüyü azaltabilmesi, plastiklerle karşılaştırılması halinde daha katı ve daha çok geri dönüşüme fırsat vermesi, alüminyum ve çelik ile karşılaştırıldığında çok daha hafif ve yeterli dayanıma sahip bir malzeme olması, ulusal bilgi ve teknoloji eksikliğini gidererek çağımızın yeni malzemesi olarak bilinen magnezyum metal taleplerine uygun yeni alanlarda kullanımı ile ulusal bilimsel bilgi birikimine, ekonomiye ve yeniliğe katkı sağlayacağı düşüncesi bu çalışmanın önemini göstermektedir.

Çağımızın malzemesi olarak isimlendirilen magnezyum metalinden ürüne yönelik ülkemizde çok fazla bir çalışma yapılmamıştır (Külekçi, 2008). Türkiye’deki sanayi kuruluşlarından yaptığımız araştırmalara göre magnezyum metali üretimi ve kullanımı hakkında sanayinin de çok fazla bilgi sahibi olmadığı, magnezyum malzemesi denildiğinde ilk alınan cevaplardan birinin yanan malzeme olarak bilinmesinden de anlaşılmıştır. Sevindirici bir haber olarak; Türkiye’nin ilk Avrupa’nın tek birincil magnezyum üretim tesisi 21.07.2016 tarihinde MetalDünyası dergisinin internet sayfasından duyurulmuştur (<https://metaldunyasi.com.tr>). Şüphesiz ki bu çalışma ülke sanayisinde Mg-üretim ve kullanımına yönelik önemli derecede katkıda bulunacaktır.

Otomotiv ve havacılıkta amaçlanan hafif ve ince levhalardan ve saclardan oluşan konstrüksiyonların kısa sürelerde birleştirilmeleri, vidasız pim kullanarak SKNK ile mümkün hale gelmiştir. Henüz endüstriyel kullanımı bulunmayan SKNK-Vidasız karıştırıcı uç yüzey tasarımı ve prototip üretimi yapılması ile yaygın endüstriyel kullanıma katkıda bulunacaktır. Çalışmadan elde edilecek sonuçların elektriksel induktif/direnç nokta kaynağına karşı rekabet edip endüstriyel kullanımını yaygınlaştırmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, ince hafif malzemelerin (<3mm) SKNK ile birleştirilme kalitesine yönelik bilimsel çalışmalara ve bilgi birikimine katkıda bulunulacağı da düşünülmüştür (Külekçi, 2008).

Yöntem

Bu çalışmanın amacına mevcut literatür araştırması, termo-mekanik nümerik simülasyonlar, mekanik deneyler ve ölçümler gerçekleştirilerek ulaşılmıştır. Ön araştırmalar ve termo-mekanik simülasyonlarla SKNK’da kullanılan karıştırıcı uç tasarımları yapılmış ve en iyi ısı girdisi sağlayan, dolayısı ile en iyi birleştirmeyi yapması gereken karıştırıcı uç geometrisi ve malzemesi seçilmiştir. Farklı omuz profili tasarımlarına sahip pimsiz beş farklı karıştırıcı uç üretilmiş ve ısıl işlem uygulayarak sertleştirilmiştir. Tasarlanan ve üretilen bu beş farklı uçlarla önce ön deneme SKNK 1,5 mm magnezyum alaşımı levhaların birleştirilmesi başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Burada 3500dev/dak yapabilen standart torna tezgahı kullanılmıştır. Ön çekme-kesme deneylerinde 1500N civarında kopma-kesme kuvvetleri elde edilmiştir.

Yapılan ön çalışmalar ve literatür araştırmalarına uygun olarak SKNK’na etki eden parametreler belirlenmiş ve bu parametreler sırası ile testlerle incelenmiştir. Bu parametre test ve incelemeleri sonucunda pimsiz karıştırıcı uç ile gerçekleştirilen en iyi parametreler kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen en iyi SKNK parametreler ile yeniden beş farklı omuz profil tasarımına sahip karıştırıcı uçlar ile birleştirmeler yapılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen mekanik testler, yorulma dayanımı, sertlik ölçümleri, X-Ray görüntüleri ve mikroyapı incelemeleri sonucunda en iyi, tekralanabilen ve homojen birleştirmeyi omuz profil tipi “C” ile gerçekleştiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler son bölümde ele alınmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Birleştirilebilecek Metaller

Bazı metallerin özgül ağırlığı ve kaynaklı birleştirme için oldukça önemli olan ergime dereceleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Burada alüminyum ve magnezyum’un ergime dereceleri 630 ve 651 derece ile birbirine çok yakın olmakla birlikte, magnezyum %35 daha hafif bir malzeme olduğu görülmektedir. Bu da magnezyum’un alüminyum ve çelik malzemelere kıyasla otomotiv ve havacılık gibi sektörler için yakıt tasarrufu gereksinimi sebebiyle çok daha çekici kılmaktadır (Küleççi, 2008; Kaluç ve Taban, 2007; Kafalı ve Ay, 2014; Li, 2004)

Çizelge 2.1. Bazı metal ve bileşiklerin özellikleri (Kurt, 2013)

Metal veya Bileşimi	Kimyasal Sembolü	Özgül Ağırlığı [t/m ³]	Ergime Derecesi [°C]
Alüminyum	Al	2,7	630
Antimuan	Sb	6,618	630,5
Baryum	Ba	3,78	850
Bizmut	Bi	9,781	271
Bor	B	2,535	2300
Pirinç	---	8,60	995
Bronz	---	8,78	1005
Kadmiyum	Cd	8,648	321
Kalsiyum	Ca	1,54	810
Krom	Cr	6,93	1615
Kobalt	Co	8,71	1480
Bakır	Cu	8,98	1083
Altın	Au	19,3	1063
Demir – Döküm	---	7,03 – 7,73	1088 – 1260
Dövme Demir	---	7,80 – 7,90	1510 – 1537
Kurşun	Pb	11,34	327
Magnezyum	Mg	1,74	651
Molibden	Mo	10,2	2620
Nikel	Ni	8,8	1455
Platin	Pt	21,37	1773
Potasyum	K	0,870	62,2
Gümüş	Ag	10,42 – 10,53	960,5
Tantalyum	Ta	16,6	2850
Telluryum	Te	6,25	452
Kalay	Sn	7,29	231,6
Titanyum	Ti	4,5	1800
Wolfram	W	18,6 – 19,1	3370
Uranyum	U	18,7	1710
Vanadyum	V	5,6	1710
Çinko	Zn	7,04 – 7,16	420
Manganez	Mn	7,3	1260

Birleştirme yöntemleri üretim teknikleri alanına girmektedir. Bir birleştirme yöntemi altında incelenen metallerin birleştirme işlemlerini iki ana gruba ayrılır:

1. Demir-Çelikli (ağır) Metaller:

- Dökme demirler
- Çelikler

2. Demir-Çelik Dışı (hafif) Metaller:

- Alüminyum ve alaşımları,
- Magnezyum ve alaşımları,
- Berilyum, Titan ve alaşımları
- Bakır ve alaşımları

Demir-Çelik metaller ağır metaller sınıfında olup otomotiv ve havacılık gibi yakıt tasarrufu sebebi ile ağırlıktan tasarruf edilmesi gerektiğinden diğer metallere göre kullanımından kaçınılmaktadır. Diğer Demir-Çelik dışı metaller genellikle hafif metaller olduğundan özellikle havacılık ve otomotivde kullanımı yaygınlaşmıştır. Çelik malzemelerin özgül ağırlığı 7850 kg/m^3 iken hafif metallerde alüminyum'un özgül ağırlığı 2770 kg/m^3 ve magnezyum'un özgül ağırlığı ise 1850 kg/m^3 civarındadır.

2.2. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımlarının elde edilebilirlik bakımında önemli derecede bir sıkıntı olmayan alaşımlardandır. Örneğin yer kabuğunun % 2,7'sinin magnezyum'dan oluşması ve deniz suyunun % 0.13 magnezyum içermesi elde edilebilirlik derecesini yükseltmektedir. Magnezyum ve alaşımları, aynı ürün formunda (döküm ya da dövme gibi) diğer metaller ile karşılaştırmak gerekirse mükemmel denebilecek bir sönümlene kapasitesine sahip olduğu ve birçok uygulamada titreşim ve gürültünün azalmasını sağladığı söylenebilir.

Bilindiği üzere bir ürünün tasarımında kullanılabilmesi için aşağıdaki şartları taşıyıp taşımadığına bakılması gerekir:

- Uygun tasarımsal özellikleri bulunmalıdır,

- Üretilabilir özelliği bulunmalıdır,
- Rekabetçi bir maliyete sahip olmalıdır.

Bu özelliklere sahip olan magnezyum hem bir plastik kadar hafiftir hem de bir metal kadar da dayanımlı yapıya sahiptir, ayrıca metal tasarım malzemelerinin içerisinde de en hafifi olarak bilinir.

Magnezyum ve alaşımlarının talaşlı şekillendirilmesi:

- Magnezyum ve alaşımları talaşlı şekillendirilmesi bakımından en kolay metallere dendir. Magnezyum'un hafifliği ve kolay şekillendirilebilirliği tasarımlarda tercih edilmesine ve yüksek hacimli üretimlerde avantaj sağlanmasına sebep olur.
- Magnezyum talaşlı şekillendirilirken nikel alüminyum veya dökme demir ile karşılaştırıldığında daha az güce ihtiyaç duyulur.
- Magnezyum şekillendirme işlemini, düşük kapasiteye sahip manuel tezgâhlarla birlikte yüksek kapasiteli otomasyon tezgâhlar aracılığıyla yapmak da mümkündür.

Alüminyum ya da titanyum gibi zor şekillendirilen metallerle karşılaştırıldığında magnezyum'un mükemmel bir şekillendirilebilirliğe sahip olması önemli avantajlar sağlamaktadır. Düşük kesme basıncı ve yüksek ısıl iletkenliği, hızlı bir ısı dağılımına yol açar. Bu nedenle kesici karıştırıcı uçlarının ömrü uzarken karıştırıcı uç değiştirme zamanlarının da azalması sağlanmış olur. Magnezyum ve alaşımları birleştirilmesi işleminde genellikle sürtünme karıştırma kaynağının çok büyük bir kullanım alanı olduğu bildirilmektedir (Zeytin, 1999).

Magnezyum ve alaşımlarının talaşlı şekillendirilmesi sırasında yüzeyinde magnezyum oksit oluşması, metal ve alaşımın kaynağa elverişli olmamasına neden olur. Magnezyum oksit dikişinin devamlı olmasını sağlayan erimiş damlacıklar, magnezyum'un bağ oluşturmaya engel olabilmektedir. Bu zorluğun ortadan kaldırılabilmesi magnezyum oksit eriten ve temizlenmesi kolay olan bir cüruf oluşturan özel bir örtü kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Bazı alaşımlar, birleştirme yapılırken ısıl çevrim, ana katı çözeltideki bileşenlerin, erimiş bölge ya da esas malzeme üzerine çökmesine neden olması mekanik özellikleri ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığın azalmasına yol açmaktadır (Duygulu, 2009).

Sürekli döküm tekniğinde, döküm ve sıcak haddeleme tek adımda gerçekleşir. Magnezyum alaşımları levha dökümünde alternatif ekonomik bir yöntem olup mikro yapı üzerinde, yapıdaki alaşımların katılaşması aşamasında oluşan ve alaşım elementlerinin in-homojen dağılımı sonucu döküm parçasında ortaya çıkan bileşim değişimleri olarak ifade edilebilen ayrışma oranının azaltılmasında, yapı içerisinde oluşan kalıntı boyut dağılımı ve mikro-yapısal homojenliğin iyileştirilmesinde faydalı etkilere sahiptir.

Magnezyum üstün niteliklere sahip olsa da magnezyum levhalar hali hazırda geniş çaplı bir endüstriyel tüketimde kullanılmaması geleneksel külçe haddesi ve levha üretimi maliyetinin pahalı olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan ikiz merdaneli direkt levha dökümü haddeleme kademesini en aza indirebilecek ve ekonomik fayda oluşturabilecek yöntemlerden biridir. Bu sistemde, sıvı metalin homojen sıcaklık dağılımıyla katılaşma oluşacak merdane yüzeye taşınması ve burada hem sürekli katılaştırılması hem de levhanın sarıma girmesi gerçekleşmekte, direkt levha elde edildiğinden külçe haddelemesiyle elde edilen geleneksel levha üretim teknolojisine göre daha ekonomik üretim yapılabilmektedir. Magnezyum alaşımları için sürekli döküm teknolojisine yönelik birçok endüstriyel kurumun, üniversitenin ve araştırma merkezlerinin laboratuvar deneyleriyle araştırmalar yaptığı bilinmektedir. Özellikle Kore, Çin, Almanya, Japonya, Avustralya, Norveç'in yanı sıra birçok ülkede sürekli döküm tekniğiyle magnezyum alaşımı levhaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Dünya çapında sürekli döküm tekniğiyle şimdiye kadar elde edilen en geniş magnezyum alaşımı levhanın genişliği 700 mm iken ülkemizde ise magnezyum alaşımı levhalar 1500 mm genişliğinde üretilenmiştir (Duygulu, 2009).

Magnezyum'un en önemli avantajlarından biri de dökülebilirlik ve talaşlı işlenebilirlik açısından alüminyum'a göre daha avantajlı olmasıdır. Magnezyum'un akıcılığı alüminyum'a göre daha kolay dökülmesine ve daha dar toleransları barındırmasına neden olmaktadır. Döküm yapıldıktan sonra çoğunlukla talaş kaldırmaya bile gerek kalmayabilir. Ek işleme adımlarına ihtiyacın kalkması parça maliyetlerinin de düşmesini sağlayacaktır. Magnezyum mükemmel derecede işlenebilirliği yüksek kesme hızını ve büyük ilerlemeleri mümkün kılan bir metaldir. Alüminyum ile kıyaslandığında ortalama olarak 4 kat yüksek işleme hızlarına ulaşılması, aynı işin daha az maliyetle yapılmasını sağlayacak bir fırsat oluşturmaktadır. Diğer yandan düşük kesme basınçları, yüksek ısı iletkenliği ve hızlı ısı dağılımıyla alüminyum'dan 4-5 kat daha fazla karıştırıcı uç ömrüne yol açacaktır. Pratikte verimliliğin arttırabilmesi için mümkün mertebede yüksek hızda çalışılması istense de

yüksek hız özellikle ince talaşların tutuşmasına yol açacaktır. 0,025 mm'nin altındaki ilerleme veya iş parçasına sürtünmekte olan kesici karıştırıcı uçlarının talaşların tutuşmasını sağlayan bir ısı oluşturması kaçınılmaz bir durumdur. Her bir kesici karıştırıcı ucun dakikada 15-19 l/dk kesme sıvısı kullanması iyi bir soğutma sağlayabilir, ancak iş parçası veya tezgah özelliği bakımından kesme sıvısı kullanılamaması durumunda kesme hızının 150 m/dk olması sağlanmalıdır (Centro Ricerche FIAT, 2003; Centro Ricerche FIAT, 2005; DTI, 2004; Erdoğan, 2001; Fan, 2005; Fent, 2005; Hsiang and Liang Kuo, 2003; Kaya, Özdoğru, Abanoz, Yiğit, Yücel, 2002; Kalmbach, 2005; Kleiner, Beffort, Wahlen, Uggowitzer, 2002; Krallics, Horvath, Fodor, 2004; Li, 2004; Meridian Magnesium Products Corp., 2006; Rausch and Ziese, 2003; Xia, Wang, Wu, Chen, Gurvan, 2005; Webb, 2005; Vinarcik, 1989; Volvo Car Corporation, 2003).

Bir metalin titreşim enerjisini yutma ve metal yapılarda iletilen titreşimleri tutma özelliği sönümleme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Bu bakımdan da magnezyum ve alaşımları mükemmel bir özelliğe sahip olduğundan titreşim ve gürültünün azalmasını sağlamaktadır. Magnezyum metali gibi katı malzemelerde dislokasyon adı verilen kristal yapıya sahip bir hata türü sayesinde atom düzlemleri birbirleri üzerinde kayarak, malzemelerin şekillerini kalıcı olarak değiştirmeleri sağlanabilmektedir. Malzemenin yapısında dislokasyonların hareket etmesiyle, dislokasyonların birbirleriyle olan etkileşimleri ve dislokasyon yapısının karmaşıklığı artacağından sönüm özelliğinin iyileşmesi sağlanır. Tüm malzemeler bakımından sönümleme özelliği, bir noktada maksimum değere ulaştıktan sonra azalacaktır (Paramsothy ve diğerleri, 2011; Kandemir ve Can, 2003; Zeytin, 1999). Magnezyum ve alaşımlarına ait sönümleme kapasiteleri yüzdelik oranlarının diğer malzemeler ile karşılaştırması Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Mg ve Al alaşımları ile dökme demirin özgül sönümlleme kapasiteleri (%)

Malzeme	Uygulanan gerilme değeri (MPa)				
	7 MPa	14 MPa	20 MPa	25 MPa	35 MPa
Magnezyum Alaşımları					
AM60 A,B-F	5,33	13,33	24	35	52
AS21 A-F	16	33,33	48	53,33	60
AZ31B-F	1,04	1,57	2,04	2,38	2,72
AZ91A,B,D-F	2,67	5,33	12	16	29,33
HK31-T6	0,37	0,66	1,12	-	-
Alüminyum Alaşımları					
355-T6	-	0,51	0,67	1	-
356-T6	0,3	0,48	0,62	0,82	1,2
Dökme demir	-	5	12,2	14,2	16,5

Magnezyum alaşımlarının diğer metallerle karşılaştırılması halinde döküm ve dövme gibi aynı ürün formu için mükemmel sönümlleme kapasitesine sahip olduğu görülecektir. Kum döküm ürünler en yüksek sönümllemeye sahip olmasına rağmen dövme ürünlerin sönümlleme kapasitesi düşük olacaktır. Sönümlleme kapasitesinin yüksek olması parçada kalıcı uzamalara yol açan titreşimleri azaltırken, magnezyum'un düşük yoğunluğunun olması daha az titreşen ve sessiz çalışan kalın parça üretimlerini de mümkün kılacaktır (Kaya ve diğerleri, 2002).

Magnezyum alaşımlarının elde edilebilirliği de oldukça kolaydır. Özellikle yerkabuğunun % 2,7'sinin magnezyum'dan oluşması ve deniz suyunda % 0,13 oranında magnezyum bulunması elde edilebilirlik problemlerini en aza indirmektedir. Hafif alaşım olarak birbirine rakip olan magnezyum ve alüminyum alaşımlarının tasarım gerekleri açısından üstünlükleri ve zayıflıkları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Tasarıma uygunluk açısından magnezyum

Özellik	Hafiflik	Özgül dayanım	Özgül rijitlik	Geri dönüşüm	İşlenebilirlik	Dökülebilirlik	Sönümlleme	Elde edilebilirlik	Korozyon özelliği	Sürünme direnci	Yorulma direnci	Tutuşma
Durum	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-

Magnezyum alaşımlarının alüminyum ve çeliğe göre yüksek akıcılığının olması ince cidarlı ve karışık parçaların dökümünün yapılmasını daha da kolaylaştırmaktadır. Çelik ile

karşılaştırıldığında üstün dökülebilirliği, parçaların birçok bileşenden ziyade, bütün olarak dökümü sağlanabildiği için montaj ve iskarta maliyetleri de düşecektir. Alüminyum ve çinko ile karşılaştırıldığında magnezyum alaşımlarının hacimsel öz ısısının daha düşük olduğu, bu nedenle dökümün daha hızlı soğumasına, daha yüksek çalışma hızına ve daha az kalıp aşınmasına neden olacağı söylenebilir. Bunlardan başka;

- Soğuma sırasında kızgın noktaları önlemek için her yerinde aynı kesit kalınlığı,
- Uygun parça çıkarma açıları,
- Yuvarlak köşeler, takviye edilmiş ince kesitler, kaçınılan düz yüzeyler,
- Mümkün olduğunca büyük yarıçap kullanımı,

bu yöntemin uygulanması sırasındaki tasarım gerekleri olarak sıralanması mümkündür.

Magnezyum alaşımlarına uygulanan farklı döküm yöntemleri, elde edilen özellikler, üretilebilen parça boyutları, yüksek üretim hacmine uygunluk vb. yönlerden kıyaslanması sonucunda yöntemlerin birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri Çizelge 2.4’de gösterilmiştir (Duygulu, 2009; Zeytin, 1999).

Çizelge 2.4. Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi

Karşılaştırılan özellikler	Basınçlı döküm	Kum kalıba döküm	Hassas döküm	Sürekli döküm
Uygun alaşım çeşitliliği	+	+	+	+
Değişken boyutlu parça üretilebilirliği	+	+	-	-
Yüzey bitirme özellikleri	+	-	+	+
Yüksek üretim hacmine uygunluk	+	+	-	-
Parça başına birim maliyetler	+	+	-	-
Hassas ölçü toleranslarının elde edilebilirliği	+	-	+	+
İyi mekanik özelliklerin elde edilebilirliği	+	+	+	+
Karmaşık şekilli parça üretilebilirliği	+	-	+	-

Magnezyum ve alaşımlarının ekstrüzyonu ılık ya da daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Alaşımlar hidrolik preslerde çubuk, tüp ve çeşitli şekillerde profiller oluşturmak üzere şekillendirilir. Magnezyum ve alaşımları için ekstrüzyon sıcaklığı 300-450°C arasında değişmektedir. Çalışma sıcaklığı, alaşıma ve arzu edilen şekle göre belirlenir. Şekillendirme kullanılan kalıplar genellikle alaşımlı çelikten imal edilir. Kalıplar sürekli temiz koşullarda

tutulur. Ekstrüzyon ürünü parçalar da mekanik parlatma veya dekapaj çözeltileri ile temizlenebilir. Dövme operasyonuna benzer şekilde, ekstrüzyon kalıpları da iş parçasının soğumasını önlemek için, iş parçasına benzer sıcaklık değerlerine ısıtılmadır. Şekillendirmede oluşan ısı soğutma ile giderilmez ve alaşımın katılaşma sıcaklığı aşılsa, sıcak kırılma görülür.

Magnezyum alaşımları, 160-300 N/mm² çekme dayanımı, 80-190 N/mm² % 0,2 akma dayanımı ve % 2-15 kopma uzamasına sahip alaşımlardır. Bu alaşımlar kara taşıtlarında, elektronik, bilgisayar ve spor gereçleri endüstrisinde kullanım alanı bulmaktadır. Geleneksel magnezyum alaşımları geçtiğimiz yüzyılda geliştirilmeye başlanmıştır. Bugün, plastik ve fiberle güçlendirilmiş plastiklerle birlikte kullanılan magnezyum alaşımları yine gündemdedir. Bu alaşımların dayanımlarının artırılması alaşımlama, pekleşme, tane boyutu küçültülmesi ve çökme sertleşmesi ile sağlanır.

Magnezyumu endüstride çekici kılan diğer bir önemli faktör ise imal edilebilirliğinin kolay olmasıdır. Aynı ağırlıktaki başlangıç malzemesinden, parça boyutu sabit kalmak şartı ile elde edilebilecek basınçlı döküm ürünü sayısı çinko için 1, alüminyum için 2,5, magnezyum için ise 3,75'tir. Bu noktada basınçlı döküm yöntemiyle magnezyum üretiminin, son yıllarda otomotiv sektörü için yapılan tüm magnezyum üretiminin de büyük bir kısmını oluşturduğu belirtilmelidir.

Genel olarak malzeme fiyatı Mg için eşdeğer malzemelerden % 60 daha fazladır. 2018'de fiyatlar Çin ve Avrupa pazarında 3900-5500 \$/ton seviyelerindeydi. Ancak yüksek hızlarda ve yekpare üretim kolaylığı sağladığı için hacimsel bazda düşünüldüğünde uygun denilebilecek fiyatlara sahiptir.

Mükemmel sönümleme kapasitesiyle birçok uygulama için titreşim ve gürültüyü azaltabilirler. Bu uygulamalardan biri de titreşime duyarlı elektronik ekipmanların bağlandığı montaj bloklarında yapılan titreşim testleridir.

Magnezyum'un elastik enerji absorblama karakteristiği, iyi darbe mukavemeti ve çökme direnci sağlar.

İşlenebilirliği iyidir ve kuru olarak da işleme yapılabilir. Talaşlı imalatı konvansiyonel, düşük hacimli bir tezgâhta olabileceği gibi, yüksek kapasiteli bir CNC tezgâhta da olabilir. Çünkü kesme karakteristikleri istenildiği gibi seçilebilmekte ve talaşların kırılması konusunda herhangi bir sorun yaşanmamaktadır. Gerektirdiği güç bakımından işlenebilirliği diğer bazı metallerle mukayesesi Çizelge 2.5’deki gibidir.

Çizelge 2.5. İşlenebilirlik açısından bazı metallerin kıyaslaması (Paramsothy ve diğerleri, 2011)

Metal	Mg alaşımları	Al alaşımları	Pirinç	Dökme demir	Yumuşak çelik	Ni alaşımları
Gereken göreceli güç	1	1,3	2,3	3,5	6,3	10

2.3. Magnezyum’un Otomotiv Sektöründeki Önemi

Küresel rekabetin hızla arttığı son yıllarda müşteri memnuniyetinin ve güvenliğinin artırılması için otomotiv sektöründe daha avantajlı hale gelebilmek yeni malzemelerin geliştirilmesi ve özellikle sürtünmeye bağlı yakıt tüketimini azaltmaya yönelik projelerin geliştirilmesine başlanmıştır. İnsanların beklentilerinin ve ihtiyaçların artması, özellikle emniyet tedbirlerinin arttırılmaya çalışılması bazen otomobil ağırlığında artışlara, atmosfere salınan CO₂ gazının da artmasına yol açmaktadır. Petrol ürünlerinin pahalılığı, yakın gelecekte çevreyle ilgili Kyoto hükümlerinin yürürlüğe girecek olması son yıllarda otomotiv sektörünün bu konuya önem vermesine ve daha hafif malzemeler kullanarak daha az yakıt tüketiminin yolları araştırılmaya başlanmıştır. Bu kapsam da en dikkat çekici metallerden birisi magnezyum’dur. Magnezyum, üretim sürecindeki problemlerin çözülmesi ve güvenilir bir malzeme olduğunun testlerle anlaşılması sonrasında geleceğin yüksek teknolojik malzemesi olarak konstrüksiyonlarda yerini alacağına neredeyse kesin gözüyle bakılmaktadır. Bu nedenle dünyadaki büyük otomobil üreticilerinin magnezyum üretimine yönelik yeni anlaşmalar ve yatırımlara yönelmeleri magnezyum üretiminin de artışına sebep olmuştur (Paramsothy ve diğerleri, 2011; Çakır, 1999; Duygulu, 2009; Kandemir ve Can, 2003; Kaya ve diğerleri, 2002; Krallics ve diğerleri, 2004; Webb, 2005; Zeytin, 1999).

Magnezyum’un düşük ağırlığının yanı sıra geri dönüştürülebilirliği de dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması açısından metal malzeme seçimi sırasında önemli bir faktördür. Avrupa komisyonu tarafından Avrupa’daki otomobillerin 2015 yılına kadar

%95'inin geri dönüşebilir malzemeden üretilmesi şart koşması, magnezyum'un otomobillerde kullanımı açısından da önemli bir avantaj sağlamaktadır. Magnezyum'un geri dönüştürülebilmesi, hurda değerinin olması, dökümden artan parçaların, baskı ıskartalarının, ömrünü tamamlamış magnezyum parçalarının veya magnezyum talaşlarının da geri dönüşüm sürecinde sorunsuz bir şekilde değerlendirilebilmesi de magnezyum'un araçlarda kullanımında tercih nedenleri arasındadır. Ayrıca, farklı alaşım türlerinin bir arada ergitilmesinde de sorun çıkmamaktadır. Yalnızca ömrünü tamamlayan parçaların üzerinde bulunan cıvata ve somun gibi elemanların belirli bir ağırlığı olması taşıma problemini çıkarabilir. Demirin ergiyik magnezyum içerisindeki düşük çözünürlüğüne sahip olması bu elemanların herhangi bir kirlenmeye yol açmasını da engellemiş olmaktadır (Çakır, 1999; Duygulu, 2009; Kalmbach, 2005; Kaya ve diğerleri, 2002; Krallics ve diğerleri, 2004; Erdoğan, 2001; Webb, 2005; Zeytin, 1999).

21. yüzyılın otomobil malzemeleri arasında bulunan magnezyum alaşımlarının 1,78 g/cm³'lük öz kütlesinin olması alüminyum'a göre % 36, çeliğe göre % 78 daha hafif olmasına yol açmaktadır. Ayrıca, yüksek çok özel mukavemetinin, bükülmezliğinin, elektromanyetik faktörlere karşı iyi bir kalkan olmasının, iyi döküm ve işlenebilirliğinin olması, ısının çok iyi derecede dağılmasını sağlaması, iyi sönümleme kapasitesinin bulunması da magnezyum alaşımlarının otomobillerde kullanımında tercih edilebilirliğini artıran nedenlerdir. Hammadde ve enerji kaynaklarının korunabilmesi açısından geri dönüşebilirlik özelliği de, otomotiv sanayisinde malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmektedir. Magnezyum alaşımlarının çok iyi dökülebilirlik özelliğinin bulunması alüminyum göre % 50 daha ince (1-1,5 mm) kalınlıkta dökülmesini de sağlamaktadır (Atalay, 2006; Çakır, 1999; Duygulu, 2009; Fan, 2005; Fent, 2005; Hsiang and Liang Kuo, 2003; Kleiner ve diğerleri, 2002; Xia ve diğerleri, 2005).

Otomotiv sektörünün magnezyum ile tanışması 1920 yılına kadar dayanmaktadır. Alman Büssing ve Adlerwerke, İngiliz Thornicroft firmaları otobüs ve kamyon üretiminde motorlarda magnezyum kullanan ilk işletmelerdir. 1930 yılında Maserati firması da yarış arabasında magnezyum kullanmıştır. Bazı otomotivlerin üretiminde profil ve bunları örten saclar magnezyum alaşımlarıyla kaplanmıştır. 1939 yılında Bugatti 57C Atlantic prototip arabasında levha biçiminde magnezyum kullanmıştır. Mercedes 300SLR (Resim 2.1), Corvette, Era-Bristol, LeSabre, Porsche 962 ve birçok yarış arabasında magnezyum levha alaşımlarının kullanılarak daha hızlı olmaları amaçlanmıştır. Otomobillerin dışında

magnezyum alaşımlarına motosikletlerin özellikle jantlarında da rastlanmaktadır. Magnezyum'un otomobil sektöründeki en önemli örneğini Volkswagen'in Beetle modeli oluşturmaktadır. Bu modelde toplamda 17 kg'lık magnezyum alaşımı kullanılarak önemli kazanımlar elde edilmiştir.

Magnezyum alaşımlarının otomobillerde kullanımına yönelik ilgi 1990'lı yıllarda tekrar gündeme gelmiş, magnezyum döküm alaşımları direksiyon simitlerinden motor bloğuna kadar çoğu parçada kullanılmaya başlanmıştır. Magnezyum döküm alaşımları özellikle ABD'de, Batı Avrupa ve Asya'da birbirine paralel bir şekilde %100 artışa geçeceği tahmin edilmektedir. ABD'deki otomobillerin yakıt tüketimine 8,9 l/100 km ile sınırlandırma getirilmesi otomobil endüstrisinde kullanılan malzemelerin seçimi adına daha seçici olunmasını gerekli kılmıştır.

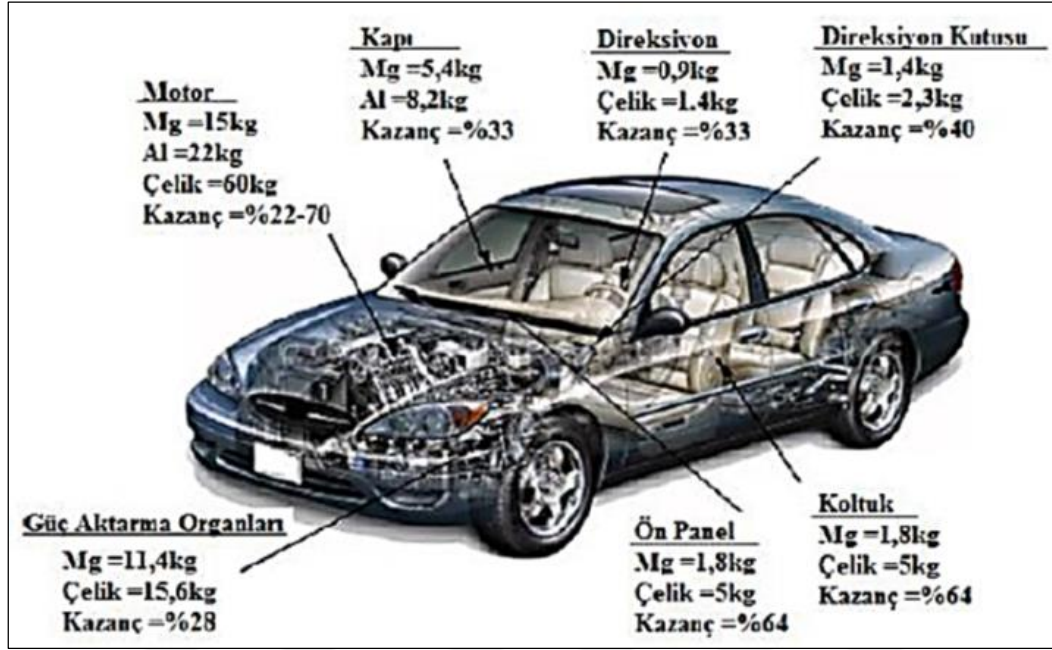


Resim 2.1. 1955 model Mercedes 300SLR LeMans'da magnezyum alaşımları levha şeklinde kullanılışı (Fent, 2005)

Diğer yandan Avrupa Birliği'nin yakıt tüketimi bakımından 3 l/100 km hedefini ortaya koyması magnezyum dökümdeki gelişmelerin daha fazla dikkat çekmesine yol açmıştır. Örneğin, Almanya tarafından üretilen Mercedes-Benz SL arabalarında koltuklar AM50/20 kodlu % 5 ya da % 2 alüminyum ve % 0,5 mangana sahip magnezyum alaşımlarından üretilmeye başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan uygulamalarda önemli olan ölçüt düşük yoğunluk ve imalatın gerektirdiği gibi dökülebilirliğe sahip olmaktır. Bu bakımdan

düşünüldüğünde üstü açılabilen otomobillerde yeni geliştirilen modellerde magnezyum'dan yararlanılması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Diğer yandan Japonya ürettiği arabaların çoğunda direksiyon simidini magnezyum alaşımlarından üretmeye başlamıştır. Bunun en önemli nedeni AM60HP kodlu % 6 alüminyum ve % 0,5 Mangan içerikli magnezyum alaşımının sağlam olması, mukavemeti ve şok enerjiyi emme kabiliyeti, ağırlığının az olmasıdır. Magnezyum alaşımları özellikle geleneksel kullanım malzemelerine göre % 30 ağırlık tasarrufu sağlamakta çeliğe göre de en az % 75 daha hafif olabilmektedir. Magnezyum döküm alaşımlarıyla ilgili en iyi kullanım örneğinden biri de BMW'nin magnezyum-alüminyum kompozit motor bloğu üretmeye başlayarak magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık motor uygulamalarında da kullanılabileceğini göstermiştir. Plaka, folyo, levha, çubuk, boru, profil ve dövme mamullerin çoğu magnezyum yoğurma alaşımlarından üretilmektedir. Bu alaşımlar, döküm alaşımları ile karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özelliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Magnezyum yoğurma alaşımlarının mukavemetlerinin ve sünekliklerinin döküm alaşımlar ya da diğer rakip malzemelere göre daha yüksek olması da tercih edilebilirliğini yükseltmektedir. Diğer yandan magnezyum yoğurma alaşımlarının yüksek eğme dayanımı ve bükülmezlik özelliği bulunması gereken kapılar, kaput ve bagaj kapağı saclarında kullanılması çeliğe göre % 50, alüminyum'a göre de % 20 ağırlık kazancı oluşturmaktadır. Magnezyum yoğurma alaşımlarının mekanik özellikleri ikiz merdaneli döküm sistemleri ve direkt levha üretim çalışmalarında da kullanılmasına imkan vermektedir (Centro Ricerche FIAT, 2005; DTI, 2004; Meridian Magnesium Products Corp., 2006; Li, 2004; Rausch and Ziese, 2003; Vinarcik, 1989).

Otomobillerde kullanılan ön panel çelik ve plastik teknolojisi ile üretildiğinde 25-30 kg ve yaklaşık 60 parçadan oluşur. Magnezyum kullanılarak üretilen parça tek bir parça olduğunda ağırlığı sadece 10 kg dır. Otomobilin her bir parçası böylesi uygulamalar için uygundur. Resim 2.2'de bir otomobilin değişik kısımlarında magnezyum kullanımıyla elde edilen ağırlık kazancını göstermektedir (Centro Ricerche FIAT, 2003; Fan 2005; Fent 2005; Kleiner ve diğerleri, 2002; Vinarcik, 1989; Volvo Car Corporation, 2003).



Resim 2.2. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar (Atalay, 2006)

Otomotiv sektöründe kullanılabilecek malzemelerden plastiklerle karşılaştırıldığında magnezyum'un daha katı olması ve geri dönüşümünün daha fazla olmasıdır. Alüminyum ve çelik ile karşılaştırılması halinde de magnezyum'un daha hafif ve yeterli dayanıma sahip olduğu ile ilgili bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.6'da, otomobillerde kullanılabilecek magnezyum alaşımlarından yapılacak parçalar da Çizelge 2.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Saf magnezyum ve alüminyum'un fiziksel özellikleri (Zeytin, 1999)

Özellik (200 C)	Magnezyum	Alüminyum
Atom numarası	12	13
Atom ağırlığı	24,3	26,98
Kafes tipi	SPH	YMK
Ergime noktası (0C)	650	659
Kaynama noktası (0C)	1103±8	2447
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,738	2,699
Elektrik iletkenliği (m/ΩK)	22,2	37,6
Isıl iletkenlik (W/m.K)	154	222
Özgül ısı kapasitesi (J/kg.K)	1047	930
Ort. Isıl gen. Kats. (μm/(m.0C)	(0-1000C)26	(0-1000C)23,86
Elastisite modülü 103N/mm ²	44,5	69,6

Çizelge 2.7. Bir otomobil üretiminde magnezyum'dan yapılan parçalar

Tekerlekler	ABS fren destek ve tutma braketi	Geçme hava yastığı tutucuları
Debriyaj gövdesi	Koltuk yükselticisi	Koltuk kızıakları
Orta konsol	Kapı içi koruyucu kirişler	Tekerlek göbeği
İç kapı kolları	Kol dayama yerleri	Kapı kilidi gövdeleri
Motor destek braketleri	Endüksiyon sistemi yuvası	Karter taban kısmı
Silindir kapağı	Yanma odaları	Gösterge paneli destek kirişi
Şanzıman gövdesi	Emme manifoldu	Far mesnedi
Açılır tavan iskeleti	Ventil	Hava Filtresi
Soğutma peteği	Araç ön paneli	Travers
Kaporta		



Resim 2.3. Magnezyum'dan yapılmış çeşitli ürünler (Şık, 2002)

Magnezyum'dan yapılabilecek çeşitli parçalar ise Resim 2.3'te gösterilmiştir. Gümüş beyazı rengine sahip magnezyum metal alaşımları otomotivdeki en parlak yıllarını popüler "VW Beetle" a borçludur. Türkçedeki takma adıyla "VW kaplumbağa", arkadan motorlu olduğu için arka aksa gereksiz yük bindirmemek amacı ile hafif magnezyum alaşımlarının

kullanımını gerekli kılmıştır. 1980'lerin başlarına kadar 19 milyondan fazla Beetle'da yaklaşık 480 bin ton magnezyum kullanılmıştır. Beetle'da sadece transmisyon gövdesi ve karterlerde kullanılan magnezyum parçalar 17 kg gelirken, aynı parçaların dökme demirden yapılması durumunda 50 kg'lık bir ağırlık avantajı sağlandığı görülmüştür. Bununla birlikte 1976 yılında kadar magnezyum fiyatları iki katına çıkması bir dezavantaj olmuş, diğer yandan alüminyum'un fiyatlarının değişmemesi magnezyum'un popülerliğini azaltmış ancak 1990'lı yıllarda magnezyum tekrar popüler hale gelmiştir. (Xiuqing, Lihua, Naiheng, Haowei, 2006). Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi de kolay olmamış, alüminyum'a göre daha maliyetli olmasından dolayı magnezyum'un kabul görmesi uzun zaman almıştır. Devamında düşen maliyetler neticesinde magnezyum da endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır (Krallics ve diğerleri, 2004).

2.4. Magnezyum Kaynakları

Alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan yapı metali özelliğine sahip magnezyum, tuzlu su tortularında, tuz göllerinde ve okyanuslarda magnezyum çok yoğun miktarda bulunan bir metaldir. Amerikan araştırma enstitülerine göre dünya üzerinde 330 milyon mil küp deniz suyu bulunur. 1 mil küp deniz suyunda ise 6 milyon ton magnezyum bulunmaktadır. Magnezyum bol miktarda bulunan bir metal olmasına karşın yıllık magnezyum üretimi sadece 550.000 metrik ton iken alüminyum' üretimi 22.000.000 metrik tona ulaşmaktadır.

Hemen her gün elimizi değdiğimiz cinsten metaller kadar karşımıza çıkmasa da magnezyum, doğada son derece yaygın olarak bulunmaktadır. Cevher olarak dolomit ve magnezit adıyla sırasıyla $MgCO_3$, $CaCO_3$, $MgCO_3$ formunda mevcutken, deniz suyunda, tuzlu yer altı sularında ve yer üstü tuz çökeltilerinde klorür bileşiği halinde bulunmaktadır. Bunlardan sadece deniz suyu bile aslında tükenmez bir kaynak olarak düşünülebilir. Deniz suyundaki % 0,13 oranında magnezyum bugünkü kullanım miktarları üzerinden hesaplandığında, sadece İsrail'deki Ölü Deniz'de yaklaşık 20.000 yıl dünyaya yetecek kadar magnezyum bulunduğu söylenebilir. 1980'li yıllarda tüm dünyada magnezyum üretimi 200 bin ton iken 2005'de 500 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Gelecek döneme ait kısa vadeli kapasite artırım

çalışmaları ise bu üretim miktarının 2 katına çıkmasına çıkacak şekilde gerçekleşmektedir (Xiuqing ve diğerleri, 2006).

Yıllık magnezyum üretimiyle ilgili rakamlarda farklı kaynaklara göre çelişkilidir. Bununla birlikte yıllık 500.000 tonluk rakam farklı kaynaklarca doğrulanmış bir değer olarak kabul edilir. Iskartaların geri dönüşümünün hesaba katılmadığı belirtilen raporlara göre yıllık 900.000 ton seviyelerinde üretim yapılmaktadır.

Tüm dünyada magnezyum üretimi 1986'da 322.000 ton'dan 1990 yılına kadar 360.000 ton'a çıkmıştır. 2000 yılında bu miktarın 436.000 ton, 2028'de ise hedefin 498.000 ton olacağı belirtilmektedir. Bu tahminler Feichtinger ve Koltermann tarafından 1990 yılında yapılmış tahminlerdir. Ancak günümüzde dünyadaki hızlı gelişmelere paralel olarak magnezyum üretimindeki artış hedeflerinin anormal boyutlara ulaştığı görülmektedir. 1998 yılında bir araştırma firması olan Roskill'in yayınladığı raporlar 2005 yılında 895.000 ton/yıl gibi rakamlardan söz etmektedir. Dünya magnezyum üretiminde 1998 yılının ilk çeyreğinde ise bir rekora ulaşılmıştır Toplam magnezyum üretimi 89.300 ton olmuştur. Yine Roskill'in raporuna göre 1998 yılında toplam magnezyum üretimi 480.000 ton olacaktır. Bu rakamlar 5 ana üretim alanına bölünmüş olan toplam dünya üretimidir. Tüm tahminlerin üzerinde gerçekleşerek 536.000 ton olmuştur (<http://malzeme-bilimi-ve-muhendisligi.blogspot.com/2010/01/magnezyum.html>).

Büyük otomotiv şirketlerinin yakın zamanda yapmış olduğu anlaşmalar incelenecek olursa Volkswagen'in İsrail'de yaptığı yaklaşık 200 milyon dolarlık büyük bir yatırımın olduğu göze çarpmaktadır. Ford'un Avustralya Queensland fabrikasında ve Toyota'nın yeni Noranda projesi için Kanada'da yaptığı yatırımlardan başka General Motors şirketinin Norsk Hydro ve Solikamsk ile magnezyum tedarik anlaşması imzaladığı görülecektir (Paramsothy ve diğerleri, 2011).

2.5. Metallerin Birleştirme Yöntemleri ve Sınıflandırılması

Bilindiği gibi, bir üretim teknolojisi olarak metallerin birleştirilmesi sökülebilen ve sökülemeyen olarak ikiye ayrılır. Sökülebilen birleştirme yöntemlerine vidalı bağlantılar, kamalı bağlantılar vb. örnek gösterilebilir. Sökülemeyen bağlantılara ise kaynaklı

birleştirme, perçinli birleştirme vb. örnek verilebilir. Metalleri, birbirleri ile çözülemez biçimde birleştirme yöntemlerinden biri kaynaklı birleştirmedir.

Çeşitli kaynak yöntemiyle üretilen çelik parçalar, döküm ve dövme yöntemiyle üretilen parçalardan daha hafif ve daha dayanıklıdır. Eskiye göre günümüzde, uçak, gemi ve otomotiv endüstrilerinde en önemli montaj yöntemi olarak kaynaklı birleştirme yöntemi uygulanmaktadır.

Parçaların kaynakla birleştirilmesinin öneminin kavranabilmesi için, diğer birleştirme yöntemleri ile karşılaştırılması şöyledir (Anık, 1991; Kahraman ve Gülenç, 2009):

Kaynak ile perçinin karşılaştırması

- Kaynak, ağırlık ve işçilikten tasarruf sağlar. Ağırlıktan sağlanan tasarruf, % 10 ile % 30 arasındadır. İşçilikten sağlanan tasarruf ise, % 20–35 civarındadır.
- Kaynak ile perçine göre daha iyi bir sızdırmazlık elde edilir.
- Kaynaklı bağlantıların mukavemeti, perçinli birleştirmelerden daha yüksektir. Perçinde esas malzemenin mukavemetine erişilmemesine rağmen, kaynakta %100'üne erişilir.
- Kaynak ile perçine göre daha kolay ve ucuz bağlantılar elde edilir.
- Gemi inşaatlarında kaynaklı birleştirmelerin suya karşı dirençleri daha azdır. Dolayısıyla geminin hızını azaltmazlar.

Kaynak ile dökümün karşılaştırması

- Kaynakta model masrafı yoktur.
- Cidar kalınlıkları 6 mm'den az olan parçaların dökümü güçlük arz ederken, kaynakla imalatında bir zorluk yoktur.
- Çelik malzemedan dökümle parça yapımında bazı zorluklar ortaya çıkarken, aynı parçanın kaynakla imalatı kolaydır.
- Kaynak, döküme göre ağırlık tasarrufu sağlar. Ağırlıktan sağlanan kazanç % 30 civarındadır.
- Çok sayıda üretimde, döküm daha üstündür.

Sökülemeyen birleştirme teknolojisi açısından metal kaynak çeşitleri

İşlem cinsine göre iki ana sınıfa ayrılırlar (Geliş, 2014; Kahraman ve Gülenç, 2009). Basınç kaynakları:

- Ultrasonik kaynak
- Sürtünme kaynakları
- Döküm basınç kaynağı
- Gaz basınç kaynağı
- Elektrik direnç kaynağı
- Elektrik ark basınç kaynağı
- Difüzyon kaynağı

Ergitmeli kaynaklar:

- Direnç eritme kaynakları
- Gaz eritme (Oksi-Gaz) kaynakları
- Ark kaynak teknikleri
- Elektron ışıın kaynak tekniği
- Lazer ışıını kaynak tekniği

Basınç kaynağı, malzemenin genellikle ilave metal katılmaksızın basınç altında bölgesel olarak ısıtılıp birleştirilmesi işlemidir. Elektrik direnç kaynağı, iş parçalarının elektrik akımına karşı gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanması ile yapılan kaynak işlemidir. Elektrik direnç kaynağı nokta, dikiş ve projeksiyon kaynağı olmak üzere üçe ayrılır. Ancak bu çalışmanın konusu olan ve diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantajı olan sürtünme kaynağı ise; birleştirilecek parçalardan birisinin sabit tutulup diğerinin dönme hareketine maruz bırakılması sayesinde, hareketsiz parçaya kesit alanına dik yönde bir kuvvetin uygulanmasıyla (sürtünmenin arttırılmasıyla) birleşmenin sağlanmasıdır.

Ergitme kaynağı, sıcaklık etkisiyle bölgesel olarak ergitilen metalik malzemeye ilave metal katılarak gerçekleştirilen birleştirme işlemidir. Ergitme kaynağı gaz ergitme, ark, elektron demet ve plazma kaynağı olmak üzere dört gruba ayrılır.

Ergitme kaynağının genelde dezavantajları

- Genellikle ergime sonucu iç gerilmeler ve çarpılmalar oluşur.
- Ergime-katılaşma sonucunda içyapıda değişiklikler söz konusu (gevrekleşme).
- Boyut toleransları bakımından sınırlamalar vardır.
- Her mühendislik malzemesi kaynağa uygun değildir.
- Gerilme giderme tavlama ilave maliyet getirir.

Çizelge 2.8. Metallerin kaynaklı birleştirme yöntemlerine göre detaylı bir sınıflandırması (Geliş, 2014)

Kaynak Yöntemleri	Ark kaynak yöntemleri	1. Elektrik ark kaynağı 2. MIG/MAG gazaltı kaynağı-masif elektrot 3. MIG/MAG gazaltı kaynağı-özlü elektrot 4. TIG/WIG gazaltı kaynağı 5. Tozaltı ark kaynağı 6. Plazma ark kaynağı 7. Saplama ark kaynağı
	Oksi-Gaz kaynak yöntemleri	1. Oksi-asetilen kaynağı 2. Oksi-hidrojen kaynağı 3. Oksi-propan kaynağı 4. Gaz basınç kaynağı
	Direnç esaslı kaynak yöntemleri	1. Direnç nokta kaynağı 2. Direnç dikiş kaynağı 3. Direnç alın kaynağı 4. Kabartılı direnç kaynağı 5. Yüksek frekans direnç kaynağı
	Basınç kaynak yöntemleri	1. Sürtünme kaynağı 2. Sürtünme karıştırma kaynağı 3. Patlamalı kaynak 4. Dövme kaynağı 5. Ultrasonik kaynak 6. Soğuk basınç kaynağı
	Sert lehimleme yöntemleri	1. Üfleç ile sert lehimleme 2. Fırında sert lehimleme 3. İndüksiyonla sert lehimleme 4. Daldırma ile sert lehimleme 5. Direnç sert lehimlemesi 6. Elektron ışını sert lehimlemesi 7. Lazer ışını sert lehimlemesi 8. Ark sert lehimlemesi 9. Optik sert lehimlemesi
	Özel kaynak yöntemleri	1. Lazer ışın kaynağı 2. Elektron ışın kaynağı 3. Elektro-curuf kaynağı 4. Termit kaynağı 5. İndüksiyon kaynağı 6. Difüzyon kaynağı

Metallerin kaynaklı birleştirme yöntemlerine göre detaylı bir sınıflandırması Çizelge 2.8’de toplu olarak verilmiştir.

Kaynak sembolleri

Çizimlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş kaynak sembolleri Türk Standartlar Enstitüsü’nün TS3004/EN22553 nolu katalogunda belirtilmiştir.

2.6. Isı Girdisi

Başarılı bir kaynak işlemi diğer faktörlerin yanında bağlantıdaki ısı girdisine önemli derecede bağlıdır. Isı ne şekilde sağlanırsa sağlanmış olsun, kaynaklanacak alana ısı verilir verilmez metalde en düşük sıcaklıkta olduğu için, bu ısı her iki yöne doğru metal yoluyla iletilerek uzaklaşmaya başlar ve sonuçta ısı girdi bölgesinden dışa doğru sıcaklık gradyanı oluşur. Metalde bir ergime elde edebilmek için ısı girdisi hızının ısı iletimi hızından daha yüksek olmalıdır. Bu açıklamadan da anlaşıldığı gibi; birleştirilecek levhaların ısı iletkenlik özelliği kaynak şartlarının belirlenmesinde en önemli faktörlerdendir. Üretimde kullanılan metallerin ısı iletkenlikleri farklılık gösterirler. Bir kaynak işlemi esnasında ısı, bakırda çeliğe göre çok daha hızlı bir şekilde iletilir ve uzaklaşır. Bu da, ergimenin oluşabilmesi için ısının aynı kalınlıktaki bakır bağlantıda çelik bağlantıya göre daha yüksek hızla verilmesi gerektiğini gösterir. Tabiki birleştirilecek metallerin ergime sıcaklık seviyesi de önemlidir. Örneğin alüminyum’ veya magnezyum yüksek ısı iletkenliğine sahip olmakla birlikte, ergime sıcaklığı 660 °C civarında olduğundan, ergimeyi oluşturmak, 1080 °C eriyen bakıra göre, daha kolaydır. Buna karşın ergiyen bölgenin büyüklüğünü daraltmak zor olabilmektedir. Birleştirilecek malzemeleri kaynak işleminden önce ön ısıtmaya (tavlama) tabi tutmak ergime sıcaklığına hızlı ulaşmayı ve daha iyi bir birleştirme elde etmeye yardımcı olabilmektedir (Kurt, 2013; Kahraman ve Gülenç 2009).

Isı oluşumu için dikkat edilmesi gereken bir başka önemli faktör ise, birleştirme metalinin enine kesit alanıdır. Kaynaklı birleştirmelerde normalde, kesit alanından çok kalınlıkla daha çok ilgilenilir ve genel olarak kaynak yapılan eleman ne derece kalınsa, bağlantı çizgisinden ısının iletilerek uzaklaştırılması o derece hızlı olur. Genelde bir bağlantı sistemi, her biri ısı akışı için yol oluşturan, en az iki veya daha fazla elemandan meydana gelmiştir. Örneğin T

bağlantısı üç yönde ısı akışına sahiptir ve bu sebeple iki ısı akış yolu olan alın kaynağından daha hızlı soğur (Kurt, 2013; Kahraman ve Gülenç 2009).

Bu açıklamaları topluca sıralarsak, esas metalin kaynak sırasında erimesini etkileyen parametreler şunlardır:

- Bağlantı elemanı metallerin kalınlığı, bağlantı tipi, ısı iletkenlik özelliği, kaynak işlemi öncesi sıcaklığı (ön tavlama) ve ergime sıcaklık seviyesi,
- Isı kaynağının yönü ve hareketi,
- Kaynak bölgesine yüklenen ısı girdisi.

2.7. Metallerin Kaynak Kabiliyeti

Metaller, kaynak işlemi ile şekillendirmeye farklı derecelerde yatkınlık gösterirler. Metallerin her birinin kaynak kabiliyeti teknolojik açıdan kaynağa elverişlilik olarak tanımlanabilir. Bu teknolojik kabiliyet, bir birleştirme veya dolgu işleminde seçilen malzeme, uygulanan yöntem ve konstrüksiyon ile kalınlık faktörleri birlikte düşünülür. Bir metalin kaynak kabiliyetinin yüksek olmasından, belirlenen birleştirme yöntemiyle, herhangi bir önlem almadan tasarlanan tasarıma uygulanabilmesi beklenir. Bu yöntemle gerçekleşen bağlantı kaynak dikişinin ise beklenen kalitede olması ön koşul olacağı açıktır. Örneğin alaşımlı ve alaşımsız çeliklere baktığımızda, kimyasal bileşimlerinde bulunan elemanların, basınç ve ergitme esaslı kaynak uygulamalarında, kaynak kabiliyetlerine etkileri farklı farklıdır (Kurt, 2013; Kahraman ve Gülenç 2009).

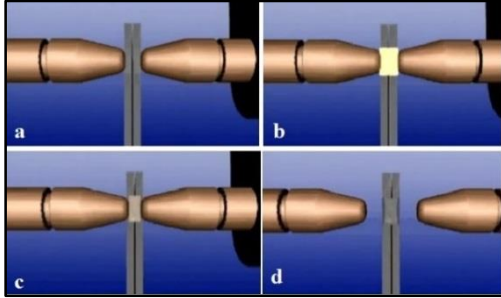
Tasarım, bir yapının mimarisi, boyutları, biçimi ve kesitleri ile tanımlanabilir. Bir tasarımda önceden belirlenmiş bu boyut, biçim ve kesitlere uygun seçilen malzemeyle üretilmesi, mekanik ve diğer dayanım özelliklerini de sağlayabilmesi beklenir. Bu ise seçilen kaynak yönteminin bu tasarıma uygulanabilmesini, yani kaynak kabiliyetinin olmasını gerekli kılar.

Kaynak kabiliyeti içinde kaynak yöntemleri özel bir yere sahiptir ve birbiri ile ilişkilidir. Günümüz teknolojisinde birbirlerine benzerde olsa türev olan yüze yakın kaynak yöntemi uygulamasından yararlanılmaktadır. Bu kaynak işlemi uygulamasının geliştirilmesindeki temel sebep; malzemelerin kaynak kabiliyetlerini çoğaltmaktır.

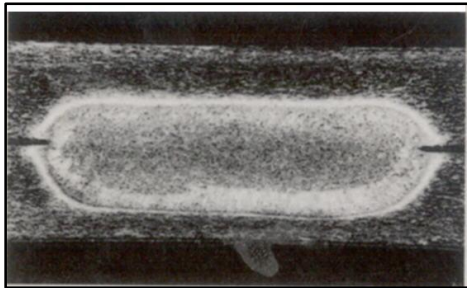
2.8. Elektrik Direnç Nokta (Punta) Kaynağı

Otomotiv ve havacılıkta olduğu gibi, özellikle ince sac parçaların seri üretiminde sorunsuz olarak kaynaklı birleştirme yapılabilmesi, Elektrik Direnç Nokta Kaynağı (EDNK)'nın sac işleyen tüm atölyelerde kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Bir nokta kaynağı aşağıda sıralanan işlem basamakları ile gerçekleşmektedir (Resim 2.4):

- Uçları, yapılacak kaynak işlemine uygun olarak biçimlendirilmiş, silindirik gövdeli iki elektrot arasına yerleştirilen iki parça üzerine önce basınç uygulanarak sıkıştırılır.
- Basınç devam ederken kaynak akımının elektrotlar aracılığıyla iş parçalarından geçmesi sağlanır ve bu sırada parçalar ergime noktalarına yakın derecelerdeki sıcaklığa ulaşır.
- Sıcaklığın etkisiyle iş parçaları, kaynaklı birleştirme yapılabilecek dokuya sahip olur.
- Basınç bir miktar artırılarak kaynak gerçekleştirilir.
- Parça kalınlığıyla bağlantılı olarak birleşmenin sağlanmasını takip eden kısa bir zaman içerisinde elektrotların iş parçası üzerindeki basıncı devam ettirilir.



Resim 2.4. EDNK'nda uygulanan işlem basamakları: a). Basma süresi: Elektrot kuvvetinin ilk uygulandığı an ile kaynak akımının verildiği ilk an arasında geçen süredir, b). Kaynak süresi: Kaynak akımının geçtiği zaman aralığıdır, c). Tutma süresi: Kaynak akımının kesilmesinden sonra elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği süredir, d). Ölü süre: Elektrotların iş parçası ile temasta olmadığı, zaman aralığıdır. (MEB-Kaynak Teknolojisi/Elektro Direnç Kaynağı 2012)



Resim 2.5. EDNK'nda oluşan dikişin kesit görüntüsü (MEB-Kaynak Teknolojisi/Elektro Direnç Kaynağı 2012)

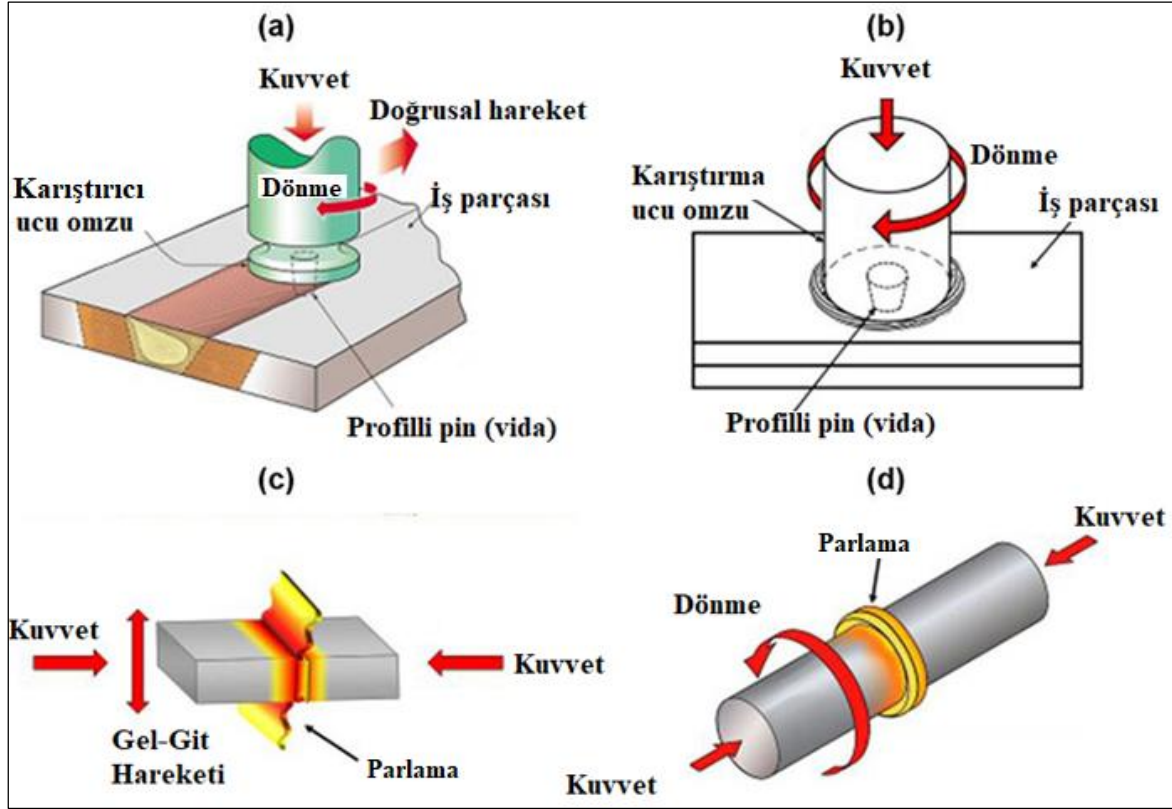
Resim 2.5’te görüldüğü gibi basınç uygulamasından dolayı birleştirme bölgesi kesit kalınlığı küçülmüştür. Malzeme ergitmeli kaynak yöntemi sebebi ile malzeme yapısında ciddi değişim ve gevrekleşme nedeniyle kırılmaya daha elverişli hale gelmiştir. Buda malzemenin ergitmeli kaynak yöntemi uygulanmasından gevrekleşmesi ile beraber yorulma dayanımında oldukça düşüşe neden olmaktadır. Birçok araştırmacı nokta kaynağında oluşan gerilimleri ve hasar sebeplerini incelemişlerdir (Zhang, 2001; Radaj ve Zhang, 1993; VandenBossche, 1977; Ewing, Cheresch, Thompson ve Kukuchek, 1982).

EDNK’nın birçok dezavantajları yanında özellikle yorulma dayanımının düşüklüğü sebebiyle ergitmeli diğer kaynak yöntemleri daha fazla incelenmeyerek, buradan itibaren bir katı hâl birleştirme yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ve çeşitleri incelenmiştir.

2.9. Sürtünme Kaynağı ve Çeşitleri

Sürtünme kaynağı, iş parçalarını mekanik sürtünme yoluyla ısı üreterek yapılan katı hal birleştirme tekniğidir. Görünüşte pürüzsüz bir yüzey, büyütüldüğünde gerçekte pürüzlülük denilen birçok mikroskobik çıkıntı ve girintiden oluşur. Bir yüzey diğerine göre hareket ettiğinde bu pürüzlerin etkileşime girmesi, yani sürtünme yoluyla iki etkileşimli yüzey arasında kuvvete dirençli hareket meydana gelerek ısı oluşur. Bu pürüzlükler vasıtası ile elastik ve plastik etkileşim ısı üretir. Sürtünme kaynağı bu olguyu malzemelerin katı hal birleştirme yöntemi için kullanır. Sürtünme kaynağının indüklenen mekanik hareketi, sürtünme vasıtası ile ısı enerjisine dönüşür ve sürtünen malzemelerin yumuşamasına ve viskoz olmasına neden olur. Yumuşatılmış halde iken, işlemin mekanik hareketi ve basınç iş parçalarında bir bağ oluşturmak için kullanılır. Sürtünme ısı ve malzeme karışımının oluşma şekline göre, kullanılan dört çeşit sürtünme işlemi ile birleştirme yöntemi vardır (TWI Ltd):

1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK),
2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK),
3. Lineer Sürtünme Kaynağı (LSK) ve
4. Rotasyon Sürtünme Kaynağı (RSK).



Şekil 2.1. Sürtünme Kaynak Yöntemleri; (a) Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), (b) Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), (c) Lineer Sürtünme Kaynağı (LSK) ve (d) Rotasyon Sürtünme Kaynağı (RSK); (TWI Ltd)

SKK ve SKNK, sürtünme ısısı ve mekanik karışımı üretmek için özel bir karıştırıcı uç kullanır. SKK, döndürülen ve iki iş parçasının birleştirildiği bölgeye batırılmış olan karıştırıcı uç kullanarak çalışır. Karıştırıcı uç daha sonra arayüz boyunca hareket eder ve sürtünme ısısı malzemenin ısınmasına ve yumuşamasına neden olur. Dönen karıştırıcı uç daha sonra bir bağ oluşturmak için yumuşatılmış malzemeyi mekanik olarak karıştırır (Şekil 2.1(a)). SKNK, SKK'nın bir çeşididir ve sarf malzemesi olmayan bir aleti, karıştırıcı ucu bir "nokta" kaynağı yapmak için bir bindirme tasarımında döndürerek, daldırıp geri çekerek çalışır. SKNK sırasında, takımın iş parçaları arasında geçişi yoktur (Şekil 2.1(b)). LSK ve RSK sarf malzemesi olmayan bir alet, yani karıştırıcı uç gerektirmez, birleştirilecek olan tek tek iş parçaları sürtünme ısısı ve mekanik karışım üretmek için kullanılır. LSK, bir basınç kuvveti altında iken bir iş parçasını diğerine göre doğrusal olarak salındırarak çalışır. Salınımlı yüzeyler arasındaki sürtünme, ısı üreterek arayüz malzemesinin yumuşamasına ve mekanik olarak karışmasına neden olur (Şekil 2.1(c)). RSK, iş parçalarının genellikle yuvarlak olması ve birbirine göre döndürülmesi dışında LSK'ye benzer (Şekil 2.1(d)). LSK ve DSK sırasında iş parçaları, parlama oluşturan basınç kuvveti yönünde tipik olarak kısılanır.

Yanma arayüzü sırasında, oksit ve yabancı parçacıklar gibi kirletici maddeler parlamanın içine atılır. Kirletici maddelerden kurtulduktan sonra, saf metalden metale karışması meydana gelir ve bu da integral bir bağ oluşturur. Sürtünme kaynağı sırasında üretilen sıcaklıklar çok sıcak olmasına rağmen, malzemede erime olmaz katı halde kalır (TWI Ltd; Mishra, Ma, 2005; Thomas, Nicholas, Needham, Murch, Templesmith, Dawes, 1995; Dawes, Thomas, 1996; Thomas, Nicholas, Watts, Staines, 2002).

Bu çalışmada magnezyum alaşımı ince levhaların SKNK ile birleştirilmesi amaçlanmış olduğundan, otomotiv sektöründe yaygın kullanımı olan EDNK uygulamasını da bu araştırma kapsamında incelenmiştir.

Sürtünme kaynağı, imalat sektörüne birçok avantaj sunar (TWI Ltd):

- Katı halde kalır, bu nedenle gözenekler ve katılaşma çatlakları gibi füzyon kaynağıyla ilişkili birçok hatadan kaçınır.
- Füzyon kaynağı ile karşılaştırıldığında nispeten düşük sıcaklıklar üretmek, bunlar arasında metaller arası oluşumları azaltarak çok çeşitli benzer ve farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlar.
- 2000 ve 7000 serilerindeki birçok "kaynak yapılamayan" alüminyum alaşımlar birleştirilebilir.
- Dolgu metal, elektrik akımı ve koruyucu gaz gerektirmez.
- Çoğu uygulamada kaynak ağzı açılmaz.
- Kolayca otomatik hale getirilmesi, işlemi yüksek oranda tekrarlanabilir kılar ve insan etkisine bağımlı olmadığından dolayı, çok düşük hatalara neden olur.
- Üstün mekanik özelliklere sahip kaynaklar yapılabilir.
- Bir ön form üretmek için daha küçük iş parçalarını birleştirerek bir bileşen oluşturmak için gereken malzemeleri azaltabilmek, daha sonra istenen boyutlarda işlemek.

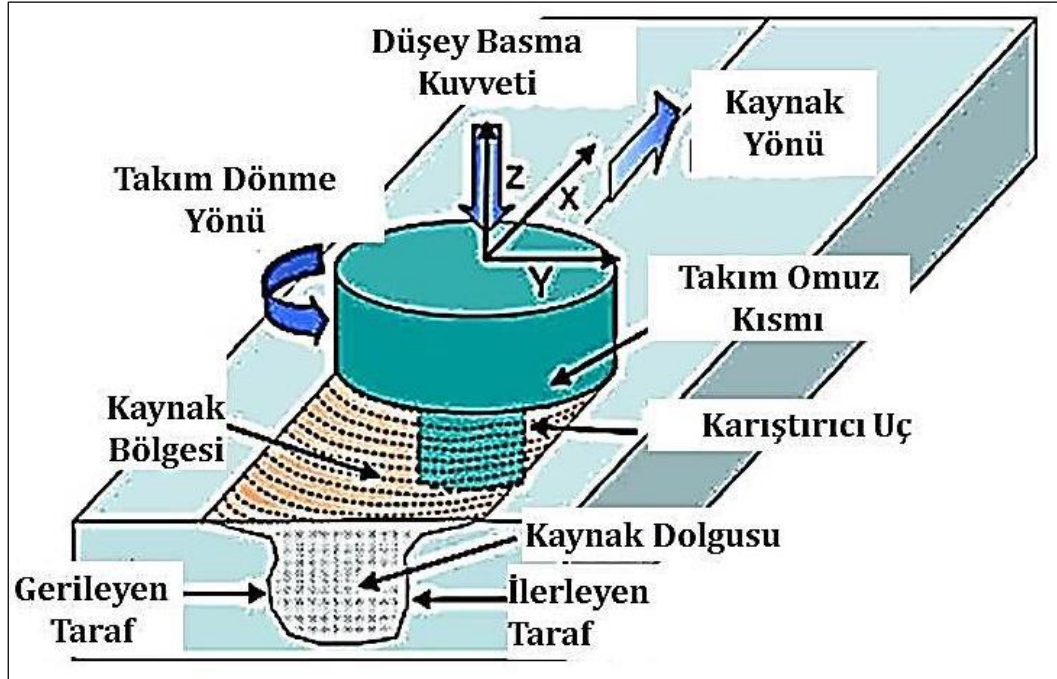
2.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

SKK İngiltere’de 1991 yılında TWI’de (The Welding Institute, Abbingdon) geliştirilmiştir. Yöntem ile ilgilenen bazı sanayi kuruluşlarının desteğiyle pratik uygulamalar bulunmuş ve test edilmiştir. ESAB şirketi, 1995 yılında Norveçli bir müşteri için ilk olarak 16m Friction Stir Welding (FSW) yani SKK portalını üretmiştir. Tipik uygulamalar; gemi inşa panelleri,

alüminyum'dan yapılmış deniz üstyapıları, havacılık, tank, vagon, araç yapımı, demleme tankı, hafif köprü, geçit, elektrikli motor gövdesi, askeri bina, soğutma elemanları vb. olarak sıralanabilir.

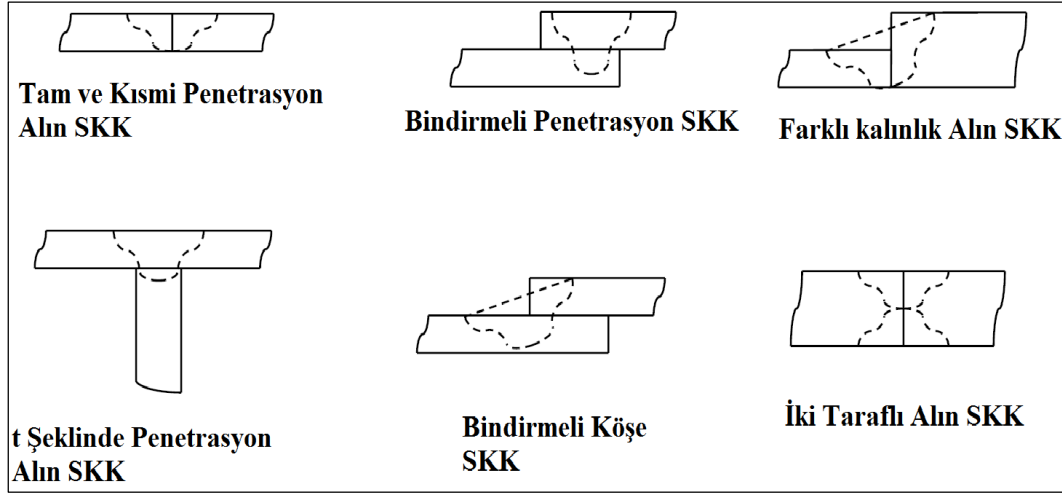
Uçak gövdesi, panelleri ve araç kaportası gibi hafif yapılar dizayn etmek için artan bir gereksinim ve araştırma-geliştirme ihtiyacı vardır. Gelişmiş bağlantı teknolojisi, hafif yapıların üretim süreçlerinin tamamlayıcı bir parçasıdır. Farklı metal bağlantı süreçlerini iyileştirmek ve hafif yapılarda kullanıma uygunluğunu değerlendirmek için önemli çabalar harcanmıştır. Farklı metal bağlantısı yapmanın, genel olarak pratik uygulamalarda devasa maliyet ve ağırlık tasarrufuna neden olan perçinli bağlantıların yerini alması açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu açıdan bakıldığında özellikle katı hal kaynak işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağının SKK'nın daha iyi bağlantı uyumu açısından kayda değer avantajları vardır. SKK işlemi katı fazda, benzer veya farklı malzemelerin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Özellikle, yüksek mukavemetli uçaklarda kullanılan alüminyum bileşiklerini ve geleneksel ergitme kaynağı ile kaynak yapılmasının zor diğer metalik bileşiklerini birleştirmek ve işlemek için kullanılmıştır. SKK'nın temel konsepti olağan dışı bir şekilde kolaydır (Türker ve Tosun, 2017).

Kulekci, Esme, ve Buldum,, (2016), SKK'nın endüstriyel kullanımı ve üretim prosesleri açısından kritik incelemeler yapmışlardır.



Şekil 2.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Türker ve Tosun, 2017)

SKK yöntemi temelde Şekil 2.2’de gösterildiği gibi; özel olarak tasarlanmış bir pim (karıştırıcı uç) ve omuz destek parçasına sahip tükenmez döner bir mekanizma, bağlantı hattı boyunca birleştirilir ve travers edilen levhaların veya plakaların bitişik kenarlarına yerleştirilir. SKK makinasına takılan karıştırıcı uç iki temel fonksiyona yardımcı olur: (a) iş parçasının ısıtılması ve (b) bağlantının imalatı için malzemenin hareketi. Isıtma, karıştırıcı uç ile iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasının plastik deformasyonu ile elde edilir. Lokal ısıtma, karıştırıcı uç pimi etrafındaki malzemeyi yumuşatır ve cihazın döndürme ve çevirme kombinasyonu, malzemenin pimin önünden pimin arka tarafına hareketine yol açar. Bu işlem sonucunda bağlantı "katı halde" üretilir. Cihazın çeşitli geometrik özellikleri sayesinde, pim etrafındaki malzeme hareketi oldukça karmaşık olabilir. SKK işlemi sırasında, malzeme yüksek sıcaklıkta aşırı plastik deformasyona uğrar ve ince ve eş eksenli yeniden kristalleşmiş tanelere sahip olur. Sürtünmeli karıştırma kaynaklarındaki ince yapı, iyi mekanik özellikler sağlar (Türker ve Tosun, 2017).



Şekil 2.3. SKK ile yapılabilen birleştirme tasarımları

Şekil 2.3'te yaygın kullanılan SKK uygulaması ile gerçekleştirilebilir çeşitli kaynak tasarımları gösterilmiştir.

SKK'nın avantajları

SKNK yöntemi, SKK yönteminden türetilmiş ve son zamanlarda sadece otomobil sektöründe değil diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çeken yeni bir birleştirme yöntemi olmuştur (Liyanage, Kilbourne, Gerlich, North, 2013; Mitlin ve diğerleri, 2006). SKNK yöntemi otomasyona yatkınlığı sayesinde, robot ve otomasyon sistemlerine entegre edilerek geliştirilmiş ve bu sayede kısa işlem süresi ile etkili bindirme bağlantıları elde etmeye imkan vermiştir (Bufa, Fratini, Piacentini, 2007; Rosendo ve diğerleri, 2013; Santella, Grant, Feng, Carpenter, Sklad, 2005).

Metallerin ve polietilen gibi katı malzemelerin ergitilmeden SKK yöntemiyle birleştirilmesi, ergitmeli birleştirme yöntemlerine göre oldukça önemli avantajları vardır (Feng, Diamond, Santella, Pan, Li, 2004; Şık ve Kayabaş, 2003; Şık, 2010).

Bu avantajlar:

- Kısa birleştirme süresi, minimum yüzey hazırlama süresi ve otomasyon kolaylığı,
- Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ısı oluşmaması,
- Koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması,
- Kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi,

- Tüm pozisyonlarda birleştirme yapılabilmesi,
- Daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması (özellikle yorulma dayanımı)
- Daha az artık gerilimler ve daha az birleştirme kusurları oluşmasıdır.
- Otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Şık, Ertürk ve Önder, 2010).

SKK'nın uygulama parametreleri

SKK uygulama parametreleri birçok çalışma ve araştırmada incelenmiş olup başlıcaları şunlardır:

- Dönme hızı ve karıştırıcı ucundan uygulanan basınç (Kulekci, Şık ve Kaluç, 2008),
- Birleştirme hızı (SKNK: Birleştirme ve bekleme süresi),
- Karıştırıcı uç tasarımı (pim formu, omuz profili, ucun malzeme ve ölçüleri),
- Bileşen malzeme çeşitleri ve ölçüleri (Kesit ölçüleri, Kalınlık),
- Uçun malzemeye dalma yüksekliği,
- Uçun bileşenlere olan açısı

Yüzyılımızın en genç metali olan magnezyum'un insanların ihtiyaçlarını karşılamak için, endüstri ve teknolojiye paralel olarak otomotiv ve havacılık sektörü yanında kullanım alanı genişlemekte ve gittikçe önemi artmaktadır. Daha hafif, daha mukavemetli, daha verimli, daha uzun ömürlü ve sonuçta daha ekonomik ürünler için magnezyum ve alaşımları ilk tercih sıralarında yer almaktadır. Magnezyum'daki bu gelişmelere paralel olarak birleştirme tekniğinde de bir karıştırıcı uç tasarımında da gelişmeler olmaktadır. Magnezyum levhaların kaynağı ergitme birleştirme yöntemleri ile birleştirme yapılmasının zorluğu, havacılıkta çok kullanılan perçinli birleştirme ve otomotivde de EDNK yerine geçebilecek ve birleştirme yapıldıktan sonra istenilen mekanik özelliklerin elde edilememesi Al ve Mg levhalarına uygun olan SKNK yöntemini zorunlu hale getirmektedir. SKNK alanında son yıllarda SKK kadar olmasada araştırmalar yapılmıştır. Ancak SKNK uygulamasının endüstriyel uygulaması henüz yaygınlaşamamıştır (Santella, Hovanski, Frederick, Grant, Dahl, 2010; Khan, Kuntz, Su, Gerlich, North, Zhou, 2007; Elangovan, Balasubramanian, 2008; Arora, De, DebRoy, 2011).

SKK işlemi ile birçok metal malzemelerin birleştirilmesi hem araştırma çalışmalarında hemde endüstriyel robotlar ile yapılabilmektedir. Farklı iki metalin birleştirilmesi dahil SKK yöntemi ile başarıyla birleştirilebilmektedir (Lee, Yeon ve Jung, 2003; Miles, Feng, Kohkonen, Weickum, Steel ve Lev, 2010).

2.11. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

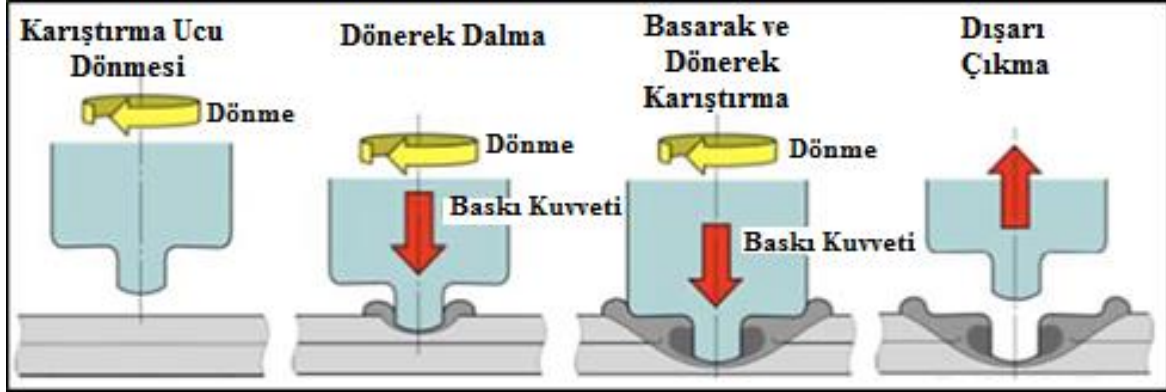
Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), ince metal levhaları birleştirmek için kullanılabilecek yeni bir kaynak işlemidir. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin bir başka çeşidi ve katı hal niteliğinde olan bu işlem, gözeneklilik ve katılaşma çatlaklarını giderir. İşleme, geleneksel olarak kaynak yapılması zor olan alüminyum ve magnezyum alaşımlarını kaynak kabiliyeti nedeniyle havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrileri gibi geniş mühendislik uygulamalarında ilgi duyuluyor (Padmanaban, 2016; Feng, Santella, David, Steel, Packer, Pan, Kuo ve Bhatnagar, 2005; Sato, Shiota, Kokawa, Okamoto, Yang ve Kim, 2010).

Literatüre ilk kez 2000 yılında giren SKNK'nın temel prensibi ile ilgili rapor 2001 yılında yayınlanmıştır. Bu yöntemi 1999 yılında Japon otomobil kuruluşu Mazda geliştirmiş ve daha sonra patentli bir şekilde literatürde yayınlayarak dünyaya tanıtmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ilk defa 2003 yılında Mazda RX-8'in yan kapı panel nokta kaynağında kullanılmıştır (Resim 2.6), (Badarinarayan, Hunt, Okamoto, 2007; Gerlich, Su, North, 2005; Kaluç ve Taban, 2007).



Resim 2.6. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak üretilmiş Mazda RX-8'in yan kapı paneli ve noktalarının görünüşü (Badarinarayan ve diğerleri, 2007)

SKNK, direnç nokta kaynağı (DNK) uygulamasına göre birçok üstünlükleri bulunur. Bunları, maliyetinin % 90 daha tasarruflu olması, daha yüksek mekanik özellikler elde edilmesi, metal buharı çıkışının olmaması, birleştirme yapılan noktalar arasının daha dar olması, levhalar arası ısı girdisinin çok düşük olmasından dolayı çarpılmaların yok denecek kadar düşük seviyede olması sayılabilir (Çam, 2007).



Şekil 2.4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi (Cao ve diğerleri, 2015)

SKNK yönteminin, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takımla, yani karıştırıcı uç ile daldırma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademede gerçekleştirilen Şekil 2.4’de gösterildiği gibi bir uygulaması vardır. Bu üç aşama sırasıyla aşağıdaki gibidir:

Daldırma aşaması: Belirli bir devirle döndürülen kaynak takımının uç kısmı, bindirme kaynağı pozisyonundaki parçalara temas ettiği anda daldırma aşaması başlamış olur. Takımın uyguladığı kuvvet, birleştirilecek parçalar ile takım ucu arasında sürtünme ısısının ortaya çıkmasını sağlar. Sürtünme ısısı ile bu bölgede yumuşayan malzeme, takım ucunun iş parçasına dalmasına izin verir ve daldırma aşaması, takım omzunun üst parça yüzeyine temas etmesiyle sona erer.

Karıştırma/Birleştirme aşaması: Karıştırma (birleştirme) aşamasında ise, kaynak takımının omuz kısmı üst parça yüzeyine temas etmesiyle, bu bölgede de sürtünme ısısı ortaya çıkmakta ve kaynak bölgesine daha fazla miktarda ısı girişi sayesinde daha geniş bir bölgede malzeme yumuşaması sağlanmaktadır. Yumuşayan malzeme karıştırılarak, takım ucu etrafında ve malzemeler arasında kaynak bağlantısı oluşmaktadır. Bu sırada, takım omuzu parçalara kuvvet uygulamaya devam ederek iki parça arasındaki birleşme ara yüzeyinin tam

temasta olmasını sağlar. Karıştırma safhasında yumuşayan malzemenin, eksenel doğrultuda yumuşamış malzeme hareketi ve dönme yönünde yumuşamış malzeme hareketi olmak üzere iki türlü hareketi mevcuttur.

Geri çekilme aşaması: Son aşama olan geri çekilme aşamasında ise, kaynak takımı, birleştirme işlemi tamamladıktan sonrada dönmeye devam ederek geri çekilir. Kaynak takımı parçalardan tamamen uzaklaştığında, kaynak bölgesinin ortasında karakteristik bir boşluk oluştuğu görülür.

Şekil 2.4'de verilen SKNK prensibine göre, yöntem bindirme pozisyonunda bulunan malzemelerin hem alt hem de üst bölgelerine uygulanmaktadır. Dönen uçlu aparat malzemeye sürtünme ısısı oluşturmak için üst yüzeyinden bir süre uygulandıktan sonra dönen aparat bitişik olan ısınmış ve yumuşamış olan malzemede plastik akışa neden olur. Bununla birlikte karıştırıcı uç omuzu malzemeye baskı verir, belirli bir süre sonra karıştırıcı uç malzemeden uzaklaştırıldıktan sonra nokta biçiminde karakteristik şekilde birleştirme oluşur (Gerlich, Yamamoto, North, 2007).

SKNK, nokta kaynak uygulamaları için SKK işleminin bir çeşididir. Şekil 2.4'de SKNK işleminin şematik olarak gösterildiği gibi; sarf malzemesi olmayan bir döner karıştırıcı uç, birleştirilecek olan iş parçalarına daldırılır. Seçilen dalma derinliğine ulaşıldığında, dönen karıştırıcı uç, bazen bekleme süresi olarak adlandırılan önceden belirlenmiş bir süre boyunca bu konumda tutulur. Daha sonra, dönen karıştırıcı uç bir sürtünme karıştırma noktası kaynağının gerisini geride bırakarak kaynaklı bağlantıdan geri çekilir. SKNK sırasında, karıştırıcı uç penetrasyonu ve bekleme süresi temel olarak ısı oluşumunu, pimin çevresinde malzeme plastikleşmesini, kaynak geometrisini ve dolayısıyla kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini belirler (Mubiayi ve Akinlabi, 2015).

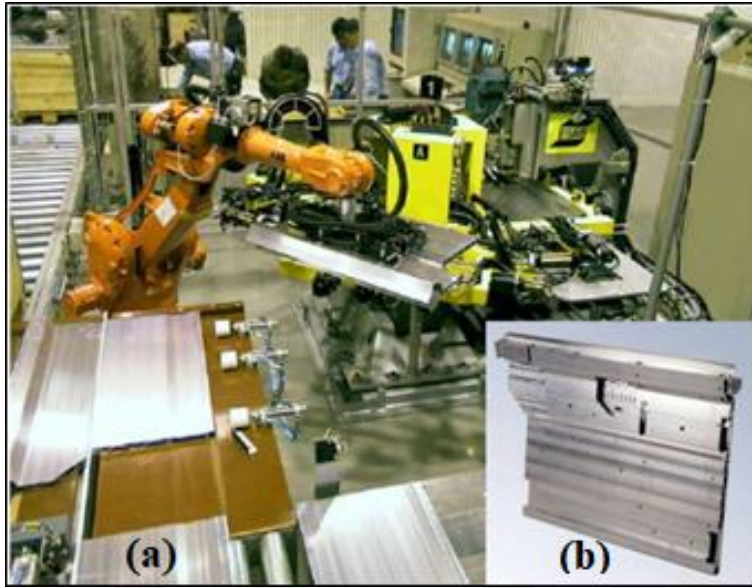


Resim 2.7. SKNK yönteminin spor model otomobil gövde panellerinin ve arka kapılarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanımı (Badarinarayan ve diğerleri, 2007)

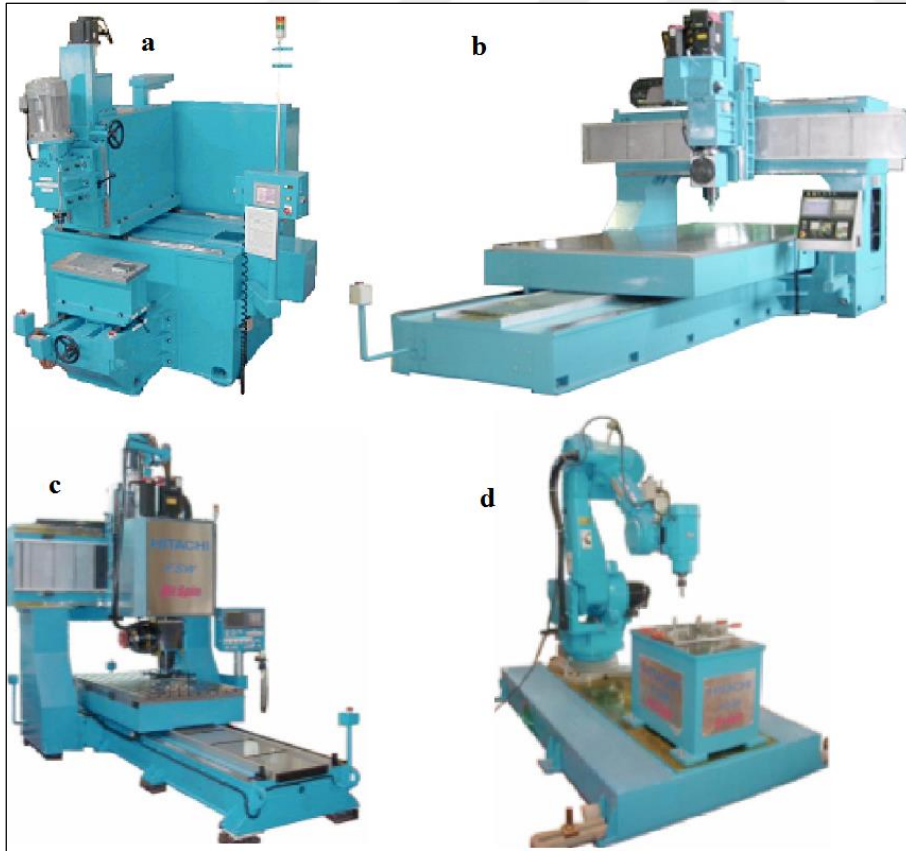
Yöntemi geliştiren ve ilk kullanan Japon otomobil kuruluşu, yöntemin uygulanmasında bu yöntem için özel olarak geliştirilen birleştirme robotunu kullanarak üretmekte olduğu spor model otomobillerin arka kapılarını ve motor kaputlarını üretmiştir. Ekipman fiyatları bakımından sürtünme karıştırma nokta birleştirme yöntemi, direnç nokta kaynağına göre % 40 daha az yatırım masrafı gerektirdiği de belirtilmektedir. Resim 2.7’de birleştirme robotuyla yapılan SKNK birleştirme uygulaması görülmektedir (Badarinarayan ve diğerleri, 2007; Gerlich ve diğerleri, 2007; Kaluç ve Taban, 2007).

2.12. Geliştirilmiş SKK Makineleri ve Robotları

SKNK yönteminin otomasyon yatkınlığı vardır. Çünkü “SKNK yöntemi, donanım açısından incelendiğinde, yöntemin oldukça basit bir donanıma sahip olduğu görülmektedir” (Mert ve diğerleri, 2013). Bu yöndeki gelişme hızla ilerlemiş olup, robotik ve otomasyona sistemsel olarak uyumu kolaylıkla sağlanabilmiştir. SKNK işlemi ile kısa işlem zamanı ve etkin bindirme bağlantıları gerçekleştirilebilir. SKNK işlemi için donanım ve yazılım yanında işlem parametreleri geliştirilerek endüstrideki standart bir robot kullanılabilir. Robotikte son yıllarda çok ilerlemeler kaydedilmiş olup örneğin 3B yazıcılarda olduğu gibi SKNK içinde masaüstü birleştirme makine ve robotları geliştirilebilir. Mevcutta yöntem için kullanılan makine ve robotlar ana hatlarıyla aynı kontrol sistemlerine sahip olsalar da, mekanik donanımları farklıdır. SKNK yöntemi için masa üstü SKNK makinası, sabit tipte veya pres tipi SKNK makinaları ve SKNK robotları gibi üç farklı tipte makina tasarımlarından bahsedebiliriz (Resim 2.8, Resim 2.9 ve Resim 2.10).



Resim 2.8. (a) SKK makine ve taşıma robotu, tamamen otomatik bir hattın parçası olarak arka koltuk çerçeveleri üretmek içindir. (b) Kaynak sonrası arka koltuk çerçevesi görünümüdür (Version 2002 © European Aluminium Association)



Resim 2.9. Hitachi America, Ltd. Ar-Ge Bölümü tarafından geliştirilen Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinaları; a) 1 Eksenli SKK-Makinası, b) 2 Eksenli SKK-Makinası, c) 3 Eksenli SKK-Makinası, d) Çok eksenli (Robotik) SKK-Makinası (Hitachi America Ltd., 2019)



Resim 2.10. ESAB Şirketinin geliştirdiği SKK-Makine ve robotları ve kaynak örnekleri (ESAB Ltd. SKK Teknik el kitabı, 2019)



Resim 2.11. ABB robotik IRB6400 robot (Smith ve diğerleri, presentasyon 2002)

Resim 2.10’de ABB şirketi tarafından geliştirilen ve SKK birleştirmeleri yapabilen standart endüstriyel bir robot görülmektedir. Markası ABB Robotik IRB6400 Robot olan ve çok eksenli (6 Yön), düşük sertlikteki çelikler için, büyük çalışma alan zarfı olan, 2D ve 3D kaynak kabiliyetli, özel geliştirilmiş yazılım ile kuvvet kontrolü ve 2 m/dk’da 2 mm malzemeden kaynak yapabilme özelliklerine sahiptir. Birçok dikiş kaynaklı boşlukları ve

diğer test uygulamalarını kaynak yapmak içinde kullanılır (Smith ve diğerleri, prezantasyon 2002).

Özellikle ülkemizdeki sanayicilere, yöntemin makina ve ekipman olarak da ulaştığı nokta ve yöntemin önemi vurgulanmalıdır. Robotiğin ulaştığı noktaya bakıldığında SKK makineleri ve robotları alandaki çalışmaların oldukça geriden geldiği söylenebilir. SKNK ve otomotiv endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılan Elektrikli Direnç Nokta Kaynağı (EDNK) yöntemi, kullanılan donanım açısından karşılaştırıldığında, SKNK yönteminin oldukça basit bir donanıma sahip olduğu görülmektedir (Mert ve diğerleri, 2013).

SKK işlemlerinin önemli parametrelerinden kuvvet ve kaynak hızına göre, geliştirilmiş SKK makine ve robotları düşük hız SKK ve yüksek hız SKK makineleri şeklinde iki sınıfta değerlendirilebilir (Arbor, 2011):

Düşük Hızlı SKK:

- Yüksek Kuvvetler: 1000-3000 lb aşağı ve 500-1000lb. Hareket yönünde.
- Büyük kuvvetleri dengelemek için geniş sıkma gerekir.

Yüksek Hızlı SKK:

- Düşük kuvvetler: 100-400 lb aşağıya doğru; hareket yönünde: 100-250 lb.
- Düşük güçleri dengelemek için basit “hızlı kelepçeler” gerekir.



Resim 2.12. Taşınabilen yüksek hızlı SKK makinesi (Whita State University, 2011)

Yüksek hız geliştirmesinin arka planı 2005 yılından itibaren 5 yıldır. Wihita Eyalet Üniversitesi'nde önce dinamik kontrollü beş eksenli MTS makine ile, bir mil hızlandırıcı kullanarak 12.000 rpm'e kadar dönme hızı yapabilen kurulum kullanılarak laboratuvar araştırmaları yapılmıştır. Bu süreçte özel taşınabilen portal yüksek hızlı SKK makineleri geliştirmiştir (Resim 2.12).

2.13. Karıştırıcı Uç Tasarımı ve Malzeme Seçimi

SKK alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi yumuşak malzemeler için oldukça yaygın olarak kullanılan bir katı hal birleştirme işlemidir. Ergitmeli birleştirme yönteminin (füzyon kaynağının) birçok ortak sorunlarını SKK'ında, ergime noktasının oldukça altında gerçekleşen katı hal birleştirme olduğundan göremeyiz. SKK işleminin çelikler ve titanyum alaşımları gibi daha sert alaşımlar için de kullanımı ve ticari olarak uygulanabilirliği, henüz maliyet etkin ve dayanıklı araçların geliştirilmesini beklemektedir.

Karıştırıcı uç malzemesi ve tasarımı, bu karıştırıcı uçlarının performansını, kaynak kalitesini ve maliyetini derinden etkilemektedir (Rai, De, Bhadeshia ve DebRoy, 2011; Gan, Li ve Khurana, 2007).

SKK alüminyum ve diğer yumuşak alaşımlar için uygun maliyetli ve uzun ömürlü karıştırıcı uçlar bulunmaktadır. Mukavemet, kırılma tokluğu, sertlik, ısı iletkenlik ve ısı genleşme gibi karıştırıcı uç malzemesi özellikleri katsayı kaynak kalitesini, karıştırıcı ucun aşınmasını ve performansını etkiler. Karıştırıcı uç malzemesinin atmosferden oksijenle ve iş parçasıyla reaktivitesi de önemlidir. Poli-kristalin kübik bor nitrür (PCBN) ve Wolfram (W) bazlı alaşımlar, yüksek dayanımlı malzemelerin SKK'ı için önemli aday malzemelerdir. PCBN'nin yüksek mukavemet, sertlik ve yüksek sıcaklık kararlılığı diğer karıştırıcı uçlara kıyasla çok daha küçük aşınma sağlar. Düşük kırılma tokluğu ve yüksek PCBN maliyeti, dikkat gerektiren hususlardır. W bazlı alaşımlar, sert olması ve aşınmaya dayanıklı olmamasına rağmen, daha uygun fiyatlı seçeneklerdir ve çeliklerin ve Titanyum (Ti) alaşımlarının kaynatılması için sınırlı bir ölçekte kullanılmıştır. Si_3N_4 'e potansiyel bir karıştırıcı uç malzemesidir. Çünkü PCBN karıştırıcı uçlarıyla karşılaştırılabilir kaynaklar çok daha düşük bir maliyetle üretilmiştir. Daha sert alaşımların kaynak yapılması sırasında düşük karıştırıcı uç ömrü ile yüksek karıştırıcı uç maliyeti sorununu gidermek için SKK karıştırıcı uç malzemelerinde daha ileri gelişmelere ihtiyaç bulunmaktadır. İş parçasındaki

ısı üretim hızı ve plastik akış, karıştırıcı uç omzunun ve piminin şeklinden ve boyutundan etkilenir. Karıştırıcı uç tasarımı kaynak özelliklerini, kusurlarını ve karıştırıcı uç üzerindeki kuvvetleri etkilese de, şu anda özellikle deneme yanılma ile tasarlanmıştır. Bilimsel ilkeleri kullanarak araçların sistematik tasarımı üzerinde çalışmak daha yeni başlıyor denebilir. Son çalışmaların örnekleri arasında farklı karıştırıcı uç geometrileri için akış alanlarının hesaplanması ve karıştırıcı uç omuz boyutlarına dayalı hesaplamalar yer almaktadır. Pim kesit geometrisi ve vidaları gibi yüzey özellikleri, ısı üretim hızlarını, karıştırıcı uç üzerindeki eksenel kuvvetleri ve malzeme akışını etkiler. Karıştırıcı uç aşınması, deformasyon ve arıza karıştırıcı uç omzuna kıyasla karıştırıcı uç piminde çok daha belirgindir. Karıştırıcı uç üzerindeki eksenel, uzunlamasına ve yanal kuvvetler, işlem parametrelerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir veya ölçülen verilerden değerlendirilebilir. Bükme ve burulmanın birleşik etkileri nedeniyle, karıştırıcı uç pimindeki maksimum gerilmeler dikkate alınarak karıştırıcı uç piminin yük taşıma yeteneğinin tahmini gereklidir. SKK'nın sert mühendislik alaşımlarına ticari uygulaması için uygun maliyetli dayanıklı araçların geliştirilmesine yönelik ortak araştırma çabalarına ihtiyaç vardır (Rai ve diğerleri, 2011; Prado, Murr, Soto ve McClure, 2003; Fernandez ve Murr, 2004; Shindo, Rivera ve Murr, 2002; Konig ve Neises, 1993).

Yüksek yumuşama sıcaklıklı alaşımlı malzemelerin karıştırıcı uç olarak kullanımı açısından bakıldığında, 900⁰C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mükemmel özellikler gösterir. Yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık, yorulma ve bazı kırılma tokluğu gerekliliklerine ek olarak, karıştırıcı uç malzemeleri de hem mekanik hem de kimyasal aşınmaya karşı dirençli olabilmelidir.

Son on yılda en başarılı olanı gösteren iki birincil malzeme sınıfı, PCBN ve yüksek ısı dayanımı olan refrakter metallerdir (Liua, Hovanskib, Milesb, Sorensena ve Nelsona, 2017).



Resim 2.13. PCDN karıştırıcı uç tasarım evrimi: a) Normal tasarım, b) Adım spiral tasarımı ve c) Dışbükey kaydırmalı omuz adım spiral tasarımı (Liua ve diğerleri, 2017)

Resim 2.13'te bir karıştırıcı uç tasarımının son on yılda (2007-2017) geliştirilmesi esnasında uğradığı tasarım evreleri gösterilmiştir.

Karıştırıcı uç malzemesinin seçiminde; kaynak kalitesi ve karıştırıcı uç aşınması, ısı üretimini ve dağılımını etkileyerek kaynak kalitesini etkileyebilecek iki önemli faktördür. Kaynak mikro yapısı, aşınmış bir karıştırıcı uç yüzünden ısı üretimi ve dağılımı ile aynı anda etkileşimin bir sonucu olarak etkilenmektedir. Kaynak mikro yapısı üzerinde potansiyel olarak istenmeyen etkilerin yanı sıra, karıştırıcı uç aşınması SKK'nın işleme maliyetini de artırır. SKK sırasında şiddetli bir şekilde ısınması nedeniyle, karıştırıcı uç malzemesi yüksek sıcaklıklarda düşük akma dayanımına sahipse, önemli derecede aşınmalar meydana gelebilir. Karıştırıcı uç tarafından yaşanan ısı gerilmeleri, SKK koşullarında ortak olan yüksek sıcaklıklarda iş parçasının dayanım gücüne bağlıdır. İş parçasındaki sıcaklıklar belirli bir iş parçası ve işleme parametreleri için karıştırıcı ucun ısı iletkenlik gibi malzeme özelliklerine bağlıdır. Termal genleşme katsayısı, karıştırıcı uçdaki termal gerilmeleri etkileyebilir. Karıştırıcı uç malzemesi seçimini etkileyebilecek diğer faktörler sertlik ve süneklik yanında iş parçası malzemesi ile reaktivite olma özelliğidir. Karıştırıcı uç sertliği, iş parçasındaki parçacıklı madde ile etkileşime girmesi nedeniyle yüzey erozyonunun azaltılması da önemlidir. PCDN gibi seramiklerin kırılgan doğası, titreşimlerden veya yüklerde istenmeyen ani yükselmelerden kaynaklanan kırılma olasılığı varsa bu istenmeyebilir. Karıştırıcı uç malzemesi ve iş parçası istenmeyen fazlar oluşturmak için reaksiyona girerse, bozunmalar ve kopmalar ve uç'ta aşınmalar artabilir.

Çizelge 2.9. Kullanılan karıştırıcı uç malzemeleri (Meilinger ve Török, 2013)

Kaynak yapılacak alaşımlar	Kalınlık (mm)	Takım malzemesi
Alüminyum alaşımları	3 – 50	Takım çelikleri, Co-WC kompozit
Magnezyum alaşımları	3 – 10	Takım çeliği, WC kompozit
Bakır alaşımları	3 – 50	PCBN, W alaşımları, Takım çelikleri
Titanyum alaşımları	3 – 10	W alaşımları
Paslanmaz çelikler	3 – 10	PCBN, W alaşımları
Düşük alaşımlı çelikler	3 – 10	WC kompozit, PCBN
Nikel alaşımları	3 – 10	PCBN

Yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç malzemelerinin bazılarının özellikleri, özel malzemelerin kaynağına uygun olmalarına ilişkin açıklamalar ile birlikte Çizelge 2.9'da verilmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımlarından dolayı, PCBN ve W bazlı alaşımlar, sert alaşımların SKK için yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç malzemeleridir. Her iki karıştırıcı uç malzemesi için çeliklerin kaynak uygulamalarında kaliteli kaynaklar elde edilmiştir. W -% 25- En yaygın W esaslı karıştırıcı uç malzemesi olan alaşım, üstün aşınma direnci ve aşındırıcı özelliklere sahip PCBN karıştırıcı ucuna kıyasla belirgin bir aşınmaya maruz kalır. Karıştırıcı uç malzemesinin ısı iletkenliği, ısının çıkarılma hızını belirler ve sıcaklık alanlarını, akış gerilmelerini ve kaynak mikro yapısını etkiler. PCBN'nin yüksek termal iletkenliği, karıştırıcı ucunda sıcak nokta oluşumunu önler ve sıvı soğutmalı karıştırıcı uçlarının tasarımında yardımcı olur. Bununla birlikte, karıştırıcı uç/iş parçası ara yüzünden aşırı ısının çıkarılması çok yüksek karıştırıcı uç dönme hızları gerektiriyorsa, yüksek bir ısı iletkenliği istenmeyebilir iş parçasını uygun şekilde yumuşatmak ve karıştırıcı uç gerilmelerini azaltmak gerekebilir. Uygun termal iletkenlik değeri proses değişkenlerine, iş parçası malzemesine ve diğer karıştırıcı uç malzemesi özelliklerine bağlıdır. SKK koşulları altında karıştırıcı uç erozyonu, genellikle karıştırıcı ucun atmosferdeki iş parçası veya oksijenle reaksiyonları nedeniyle daha da kötüleşir. Karıştırıcı ucun oksidasyonu hem dalma aşamasında hem de sıcak karıştırıcı uç çevreye maruz kaldığında bir kaynak işleminden sonra oluşabilir. Krom ve Titanyum gibi madenler, yüzeyi daha fazla oksidasyondan koruyan sağlam ve tutarlı bir oksit tabakası oluşturur. Öte yandan, tungsten üzerinde oluşan WO₃, bir yüzey olarak buharlaşarak yüzeyi korumasız bırakır. Oksit tabaka yeterince sağlam değilse ve SKK'ındaki ağır termomekanik koşullar altında bozulursa, karıştırıcı ucun reaktivitesi, karıştırıcı uç malzemesinin seçiminde önemli bir husus olacaktır. Yüksek sertlik, düşük oksijen ile reaksiyona girme ve tungsten, molibden ve iridyum gibi metallerin yüksek sıcaklık dayanımı, bunları karıştırıcı uç malzemesi olarak kullanılması için iyi bir seçim yapar. Bu karıştırıcı uç özellikleri, alaşım elementlerinin eklenmesi veya karıştırıcı

ucun sert, aşınmaya dayanıklı bir malzeme ile kaplanmasıyla daha da artırılabilir (Rai ve diğerleri, 2011; Nabhani, 2001; Poulachon, Moisan ve Jawahir, 2001; Zimmermann, Lahres, Viens ve Laube, 1997).

Çelik karıştırıcı uçlar, alüminyum veya magnezyum alaşımları ve alüminyum matris kompozitler gibi malzemeler genellikle çelik karıştırma uçlar kullanılarak kaynak yapılır. Alın kaynağı tasarımında, sert iş parçası genellikle ilerleyen tarafa yerleştirilir ve karıştırıcı uç, ara yüzden yumuşak iş parçasına doğru hafifçe kaydırılır. Soğuk işlenmiş, X155CrMoV12-1 karıştırıcı uç çeliği, % 99,5'lik saf Bakır (Cu)'ın CuZn30 pirinçli CuZn30 pirinçle kaynak yapılması için kullanılmıştır. Al-6061z20 hacim-% Al₂O₃ MC9 ve Al 359z20 hacim-% SiC AMC.11 başarıyla kaynak yapmak için yağda sertleştirilmiş (62 HRC) çelik karıştırıcı uç olarak kullanılmıştır. Metal matris kompozitlerin kaynak yapılması sırasında karıştırıcı uç aşınması yumuşak alaşımların kaynağı ile karşılaştırıldığında kompozitlerdeki sert, aşındırıcı fazların varlığı nedeniyle daha fazladır. Matris kompozitlerin SKK için, bazı çalışmalar da, karıştırıcı ucun başlangıçta yıprandığını ve kendinden optimize edilmiş bir şekil elde ettiğini ve sonrasında aşınmanın daha az belirgin hale geldiğini göstermiştir. Proses parametrelerine bağlı olan ve genellikle dış açmadan pürüzsüz olan bu kendi kendine optimize edilmiş son şekil ilk karıştırıcı uç şekli olarak kullanıldığında aşınmayı azaltır. Toplam aşınmanın dönme hızı ile arttığı ve daha düşük ilerleme hızında azaldığı bulundu, bu da işlem parametrelerinin karıştırıcı uç ömrünü artırmak için ayarlanabileceğini göstermektedir (Rai ve diğerleri, 2011).

2.13.1. Süper aşındırıcı poli-kristalin kübik bor nitrür uçlar

Sentetik bir süper aşındırıcı malzeme olarak Poli-kristalin kübik bor nitrür (PCBN), bir ultra-yüksek basınçta ve yüksek bir sıcaklıkta oluşturulur. PCBN'nin daha küçük kristali, sinterleme işlemi sırasında katalizör görevi gören ikinci bir faz malzemesi ile birlikte bağlanır. PCBN sadece elmasa ikincil sertlik verir, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve sertlik sergiler ve elmastan daha fazla termal ve kimyasal kararlılık sunar. SKK karıştırıcı uç malzemelerinin PCBN ailesi, östenitik paslanmaz çelikler, dupleks paslanmaz çelikler, süper martensitik paslanmaz çelik, nikel alaşımları gibi bir dizi yüksek yumuşatılmış sıcaklık alaşımının birleştirilmesinde başarıyla kullanılmıştır. Karıştırıcı uç performansı, hem karıştırıcı uç aşınması hem de kırılmalar tarafından belirlenir. Fiziksel ve kimyasal aşınma, hem kaynak yapılan taban malzemesine ve hemde kaynak parametrelerine bağlıdır. Başarılı

bir şekilde kaynak yapılan malzeme olarak östenitik paslanmaz çelikler genellikle en yüksek karıştırıcı uç aşınma oranlarını verir. Bununla birlikte, kaynak parametreleri aşınma oranında önemli bir rol oynamaktadır. Karıştırıcı uç sıcaklıklarını azaltan kaynak parametrelerinin kullanılması, karıştırıcı ucun aşınmasını önemli ölçüde azaltma eğilimindedir. Genel kural olarak, PCBN tabanlı karıştırıcı uçları için karıştırıcı uç sıcaklıkları 900°C'yi geçmemelidir. Özellikler incelendiğinde, PCBN-WR-karıştırıcı uçları aynı zamanda belirli bir karıştırıcı ucun ömrünü uzatarak birkaç kez yeniden profilenebilir. Karıştırıcı uç kırılması aynı zamanda PCBN karıştırıcı uçları için de temel bir sorundur. Kaynak, kırılmaya birincil katkıda bulunur. PCBN uçlarında kırılma eğilimlerini azaltmak için, dalma alanındaki pilot delikler önerilir. Ek olarak, boylamasına (hareket yönü) karıştırıcı uç kuvvetlerini azaltmak için parametrelerin seçimi de etkilidir. PCBN-WR-karıştırıcı uç malzemeleri sınıfı, PCBN sınıfına göre çok daha iyi kırılma dayanımı sergiler (Liua ve diğerleri, 2017).

2.13.2. Refrakter metal uçları

Tungsten ve molibden gibi yüksek ısı dayanımı olan refrakter metaller her ne kadar bu eşdeğerlerin kaynak için yeterli olduğu kanıtlanmış olsalar da, işlemin bu aşamasına bağlı olarak yüksek yükler ve karıştırıcı uç malzemesinin yüksek sünek-kırılmalık geçiş sıcaklıkları nedeniyle dalma aşamasında deformasyon ve kırılmalar olmaktadır. Bu kırılma eğilimlerini azaltmak için pilot deliklerin kullanılması ve ön ısıtmanın kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, malzemelerin yüksek aşınma oranı, bunların kullanışlılığını sınırlar. Tungsten-Rhenium (W-25 % Re), son on yılda tercih edilen refrakter malzemesi haline gelmiştir. Bu Karıştırıcı uç malzemesi kırılma eğilimini azaltan sünekten kırılmalık bir geçiş sıcaklığına (~ -50 °C) sahiptir. Ek olarak, Renyumun üçlüsü, malzemenin sıcak gücünü önemli ölçüde artırdı; bu, dalma işlemi sırasında ucun deformasyonunu azalttı ve aşınma direncini geliştirdi. Bununla birlikte, aşınma oranı, pim veya omza uygulanan herhangi bir özelliği hızlı bir şekilde bozmak için hala yeterince yüksektir. Bu nedenle, bu karıştırıcı uçları tipik olarak omuzlarından ve basit bir düz kesik koni sondasından oluşur. Küçük fraksiyonlar (% 1 - % 10) hafniyum karbür (HfC) W-Re esaslı karıştırıcı uçlarına eklenmiştir. HfC, aşınma direncini artırır, ancak moleküller arası kırılmalık teşvik eder. SKK karıştırıcı uçları olarak kullanılmış olan diğer metalik karıştırıcı uç malzemeleri; tungsten karbit (WC), WC-Co alaşımı, tungsten lantanit (W-La), W-1 % La₂O₃ ve Si₃N₄ içerirler. Her ne kadar bu karıştırıcı uç malzemeleri kullanılarak başarılı kaynaklar elde

edilmiş olsa da, karıştırıcı uç ömrü ve / veya karıştırıcı uç gideri, kullanım alanlarını öncelikle araştırma amaçları ile sınırlandırmıştır (Liua ve diğerleri, 2017).

2.13.3. Süper alaşım uçlar

Nitriyum Wolfram (NiW) veya Kobalt (Co) bazlı süper alaşımlar da SKK çelikleri için karıştırıcı uç malzemesi olarak kullanılmıştır. 150 mm'lik bir kaynak uzunluğundan sonra iyi aşınma direnci gösteren, çok yüksek karbonlu çeliği kaynak yapmak için Co-bazlı süper alaşımdan yapılmış bir SKK karıştırıcı uç kullanılmıştır. 500 mm uzunluğundaki AISI304 paslanmaz çelikten kaynaklandıktan sonra, İridyum (Ir) içeren Nitriyum (Ni) bazlı süper alaşımdan yapılmış bir SKK karıştırıcı ucunda ciddi aşınma görülmedi. DP590 çeliğinin 600 deneme SKNK'ndan sonra İridyum içeren Nitriyum bazlı süper alaşım karıştırıcı ucunda ciddi aşınma meydana gelmedi. Tüm bu karıştırıcı uçları, özelliiksiz bir omuzdan ve basit, düz kesikli bir konik pimden oluşmaktadır. Bu süper alaşımların her birinin çeşitli çelikler için kaynak yapma yeteneğine sahip olduğunu bildirmekle birlikte, her bir karıştırıcı uç malzemenin çeşitli nedenlerden dolayı henüz ticari olarak kanıtlanamadığı bilinmektedir. Bunun nedenleri, Ir içeren materyallerin temin edilememesindeki eksiklikten, zararlı aşınma olmadan ticari olarak uygulanabilir kaynak uzunluklarının (yüzlerce metre) üretilmemesinden kaynaklanmaktadır (Liua ve diğerleri, 2017; Rowe ve Thomas, 2005).

2.14. Karıştırıcı Ucun Geometrik Tasarımı

Karıştırıcı uç geometrisi, karıştırıcı ucun yaşadığı ısı üretim hızını, hareket kuvvetini, torku ve termomekanik özelliklerini etkiler. Birleştirilecek iş parçasındaki plastikleştirilmiş malzemenin akışı, karıştırıcı uç geometrisinden ve ayrıca karıştırıcı ucun doğrusal ve dönme hareketinden etkilenir. Karıştırıcı uç ile ilgili önemli faktörler aşağıdaki gibidir (Kumar, Kailas ve Srivatsan, 2008); Hattingh, Blignault, van Niekerk ve James, 2008; Fujii, Cui, Maeda ve Nogi, 2006);

- Omuz çapı,
- Omuz yüzey açısı,
- Omuz profil tasarımı,
- Pim şekli,
- Pim büyüklüğü ve

- Karıştırıcı uç yüzeylerinin doğasıdır (Sertlik, pürüzlük v.b.).

Karıştırıcı uç omzunun çapı önemlidir, çünkü omuz ısının çoğunu oluşturur ve plastikleştirilmiş malzemeler üzerindeki tutuşu büyük ölçüde malzeme akış alanını oluşturur. İyi bir SKK uygulaması için, malzeme akış için yeterince yumuşatılmalı, karıştırıcı uç plastikleştirilmiş malzeme üzerinde yeterli tutuşa sahip olmalı ve toplam tork ve ilerleme kuvveti aşırı olmamalıdır. Deneysel araştırmalar göstermiştir ki optimum omuz çapına sahip karıştırıcı uç, AA 6061 SKK bağlantılarının en yüksek mukavemetini sağlar. Her ne kadar optimum omuz çapını belirleme ihtiyacı literatürde kabul edilmiş olsa da, optimum omuz çapının belirlenmesi için uygun bir prensip arayışı yeni başlıyor (Rai ve diğerleri, 2011; Hirasawa, Badarinarayan, Okamoto, Tomimura ve Kawanami, 2010; Sun, Yin, Gerlich ve North, 2009).

Karıştırıcı uç omuz yüzeyinin yapısı (omuz profil tasarımı), karıştırıcı uç tasarımının önemli bir özelliğidir. Düz, dışbükey ve içbükey karıştırıcı uç omuzlarını ve silindirik, konik, ters konik ve üçgen pim geometrileri incelenmiştir. İçbükey omuzlara sahip üçgen pimleri yüksek mukavemetli SKNK uygulamaları ile sonuçlanmıştır. Dışbükey omuz spiral basamağı (CS4) karıştırıcı uçlarının geometrik parametrelerinin rolü incelenmiş ve karıştırıcı uç omzunun eğrilik yarıçapını ve basamak sarmalının perdesini önemli geometrik parametreler olarak tanımlanmıştır. Seçilen karıştırıcı uç omuzu düz yerine içbükey ise, bir kaynağın mikro yapısı, geometrisi ve kırılma modu önemli ölçüde değişebilmiştir. Bazı sonlu eleman modellemesi sonuçları omuz yüzey açısının eksenel kuvveti etkilediğini göstermiştir. Kaydırmalı bir dışbükey omuzun SKK işlem kararlılığını artırdığı gösterilmiştir. Bir dışbükey kaydırmalı omuz sabit eksenel kuvvet modunda kullanıldığında, dalma derinliğindeki herhangi bir artışın normal değerinden herhangi bir artışın omuz ile iş parçası arasında daha fazla temas alanı ile sonuçlandığı iddia edilmiştir. Sonuç olarak, eksenel basınç azalır ve dalma derinliği orijinal değerine düşer. Benzer şekilde, dalma derinliğindeki herhangi bir düşüş, omuz / iş parçası temas alanını düşürür ve daha yüksek eksenel basınç ve bunun sonucu olarak dalma derinliğinin normal değerine geri dönmesini sağlar. Bu nedenle, dışbükey kaydırma omuzlu SKK işlemi neredeyse sabit bir dalma derinliği ile kararlı olma eğilimindedir. Dışbükey kaydırma omuzunun minimum parlamayla sonuçlandığını ve iç bükey omuzunun aksine orta parlama ve bazı kusurlarla sonuçlanan hiçbir kusur olmadığı da tespit edilmiştir. Geleneksel döner omuz karıştırıcı uçları, düşük termal iletkenlik alaşımlarının SKK'ği sırasında kaynak kalitesinin bozulmasına neden olan

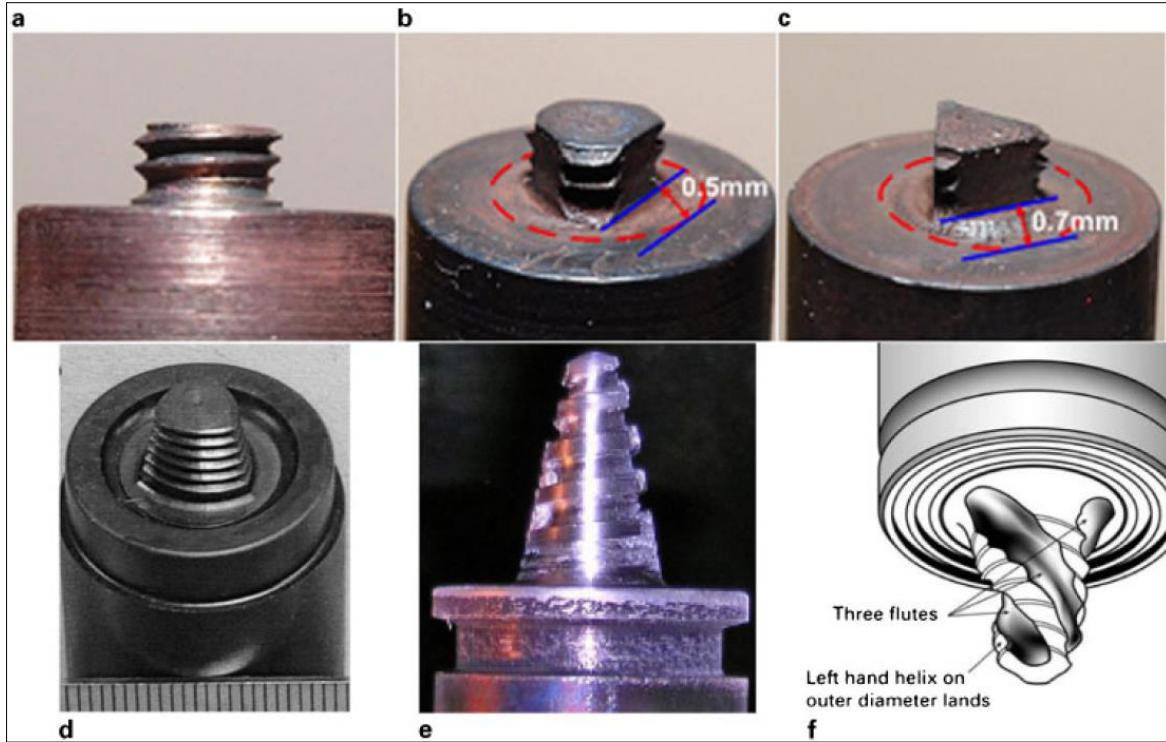
yüksek termal gradyanlar ve yüksek yüzey sıcaklıkları ile sonuçlanabilir. Dönen pim ileri hareket ederken dönen olmayan omuzun iş parçası yüzeyinde kaydığı sabit bir omuz SKK işlemi geliştirilmiştir (Rai ve diğerleri, 2011; Tozaki, Uematsu ve Tokaji, 2007; Lammlein, DeLapp, Fleming, Strauss ve Cook, 2009; Yin, Sun, North ve Hu, 2010; Badarinarayan, Shi, Li ve Okamoto, 2009; Padmanaban ve Balasubramanian, 2009; Chen ve Nakata, 2009).

Karıştırıcı uç piminin şekli plastikleştirilmiş malzemenin akışını ve kaynak özelliklerini etkiler. Karıştırıcı uç omzunun dökme malzemenin akışını kolaylaştırırken, pimin bir katmana yardım ettiği öne sürülmüştür. Resim 2.14 yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç pimlerinin bazılarının şekillerini göstermektedir. Üçgen bir karıştırıcı uç pimi, silindirik bir pime kıyasla malzeme akışını artırır. İş parçası malzemesi üzerindeki eksenel kuvvet ve karıştırıcı ucun yakınındaki malzeme akışı, pim yüzeyindeki liflerin yönünden etkilenir. AA 1050 gibi daha yumuşak alaşımlarda hatasız kaynaklarla herhangi bir lifin olmadığı karıştırıcı uç pimi kullanılarak ulaşılmıştır. Üçgen prizma şeklindeki bir karıştırıcı uç piminin AA 5083 gibi daha sert alaşımlar için uygun olacağı önerilmiştir. Hem dişli hem de dişsiz - konik pimlerde kullanılmış ve vida dişi olan konik pimli profilin AA 2014'teki minimum hatalar oluşturmuştur. Pim çapının yaklaşık % 10'u ve plaka kalınlığının % 15'i kadar bir diş eğimine sahip üç uçlu bir konik pimin hatasız kaynaklar ürettiği gözlemlenmiştir. Dışbükey bir üçgen karıştırıcı uç kullanımından kaynaklanan ve hesaplanan malzeme akış alanlarını karşılaştırılmıştır. Yüzeyler dönmeli ve üç oluklu karıştırıcı uç pimi ve kuvvetli burgulama etkisinden dolayı ikincisinin aşağı doğru kuvveti artırdığı ileri sürülmüştür. Pim üzerindeki dişler ve oluklar gibi özelliklerin, daha büyük ara yüzey alanından dolayı ısı üretim hızını artırdığına, malzeme akışını iyileştirdiğine, eksenel ve enine kuvvetleri etkilediği düşünülmektedir. Zilisyum-Karbon SiC ile güçlendirilmiş alüminyum kompozitin sürtünme karıştırma işlemlerini dört karıştırıcı uç şekli kullanarak (dişsiz dairesel, dişliler ile dairesel, üçgen ve kare) incelemiştir. Kare pim, diğer karıştırıcı uçlarından daha homojen SiC partikül dağılımına neden olurken, dairesel karıştırıcı uç düz yüzü karıştırıcı uçlardan çok daha az aşınma meydana gelmiştir. AA 6061 alüminyum alaşımının kaynağı için düz silindirik, dişli silindirik, konik silindirik, kare ve üçgen olmak üzere beş karıştırıcı uç profili incelemiş ve kare pimli profilin karıştırıcı uçlarının kullanılan tüm eksenel kuvvetler için hatasız kaynaklar yapıldığı bulunmuştur. Bununla birlikte, proses kararlılığı, kaynak çizgisi hizalaması ve kaynak kökü kusurları önemli konulardır. İlerleyen zamanlarda, özellikle düşük işlem sıcaklıklarında, yetersiz malzeme akışı, çoğunlukla solucan delikleri gibi hataların oluşmasına neden olmuştur. Bu sorunu gidermek için

periyodik olarak rotasyon yönünü tersine çeviren artırıcı (rester) pim geliştirilmiştir. Pimin konik yüzeyi ile eksen arasındaki açıdaki bir artış, dikey doğrultuda daha iyi bir sıcaklık dağılımına yol açmış ve bozulmanın azaltılmasına yardımcı olmuştur. Pim açısındaki artışın tepe sıcaklığını artırdığı görülmüştür. Ayrıca, bir konik pimin sarmal hareketinin, malzemeyi önden aşağıya ve arkadan yukarıya ittiği öne sürülmüştür. Geliştirilmiş malzeme akışı, iş parçası kalınlığı boyunca daha homojen özelliklere neden olur. Sonuç olarak, kalın levhaları kaynak yaparken konik karıştırıcı uçlar tercih edilir (Rai ve diğerleri, 2011; Zhao, Lin, Wu ve Qu, 2005; Mahmoud, Takahashi, Shibayanagi ve Ikeuchi, 2009; Elangovan, Balasubramanian ve Valliappan, 2008).

SKNK için kullanılan karıştırıcı uçlar, hem eğilme momenti hem de doğrusal ve burulma nedeniyle bükülmeye maruz kalan SKK için kullanılan karıştırıcı uçlarının aksine, dönme hareketi nedeniyle sadece burulma yaşarlar. SKNK ve SKK arasındaki farklara rağmen, iki işlem için kullanılan uçlar benzerdir. SKNK uygulanan alüminyum alaşımlarında karıştırıcı uç geometrisinin mikroyapı ve statik kuvvet üzerindeki etkisini anlamak için üç farklı pim uzunluğuna sahip silindirik pimleri olan karıştırıcı uçlar kullanılmıştır. Daha uzun karıştırıcı uç pimleri kullanıldığında kaynakların gerilme kayma dayanımının arttığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan magnezyum alaşımı malzeme, AZ31 Mg levhalarının bağlantı tasarımında kaynak yapılması için dairesel ve üçgen kesitli karıştırıcı uç pimlerini ve malzeme akışını incelemek için izleyici malzeme olarak Cu kullanılmıştır. Başlangıçta üst yüzeyden sabit bir mesafede bulunan referans parçacıkların konumunu izleyerek, çeşitli omuz ve pim geometrileri için bağlantılardaki malzeme akışını analiz etmek için parçacık yöntemi kullanılmıştır. Silindirik pim olan karıştırıcı uç için, malzeme akışı pim çevresinin yukarısına doğru hareket ederken, omuzun altındaki malzeme omuzdan gelen eksenel kuvvet nedeniyle aşağı doğru itilmiştir. Böylece, pim çevresinden uzağa doğru hareket ederken, parçacıkların referans çizgisi yukarı doğru kıvrılmış ve daha sonra aşağı doğru bükülmüş ve bir 'kanca' adı verilen oluşumu ile sonuçlanmıştır. Kanca bölgelerinin karakteristiklerinin, bağlantıların mekanik özellikleri ile ilişkili olduğu görülmüştür. Kanca oluşumunun doğasının pim ve omuz geometrilerinden etkilendiği bulunmuştur. Kullanılan düşük karbonlu çelik silindirik pimi olan karıştırıcı uçlar SKNK sırasında sürtünme aşınmasını değerlendirmek için iki farklı malzemeden yapılmıştır. SKNK'nın merkezinde genel olarak geride bırakılan deliği önlemek için pimi olmayan bir karıştırıcı uç önerilmiştir. Bu çalışmada da bu öneriye dikkate alarak pimsiz bir karıştırıcı uç tasarlanmış ve kullanılmıştır. Bu karıştırıcı uç 2 mm kalınlığındaki AA 6061-T4 levhalarda kullanıldığında,

geleneksel bir karıştırıcı uç ile yapılanlarla karşılaştırılabilir kesme kuvvetine sahip kaynaklar elde edilmiştir. Omuz daldırması, karıştırma işlemi, karıştırıcı uç omzunda kaydırılarak gerçekleştirildiği için önemli bir parametredir (Rai ve diğerleri, 2011; Vijay ve Murugan, 2010; Badarinarayan, Yang ve Zhua, 2009; Sorensen ve Nielsen, 2009; Choi, Ahn, Lee, Yeon, Song ve Jung, 2010).



Resim 2.14. Yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç pim geometrileri: a) silindirik vida, b) üç vidalı üçgen, c) vidalı üçgen, d) dışbükey vidalı üçgen e) konik vida, f) üç oluklu konik vida (Rai ve diğerleri, 2011)

Resim 2.14 yaygın olarak kullanılan karıştırıcı uç pimlerinin bazılarının şekillerini göstermektedir.

2.15. Karıştırıcı Uç Detay Tasarımları

Sürtünme karıştırıcı uç parça bölge olarak bir pim ve birde omuzdan oluşur. Pim iş parçasına dönerek dalan ve sıcaklıkla karıştırmayı yani birleştirmeyi sağlayan bölgedir. Omuz ise karışan bölgeye hem haznelik yapan hemde baskı uygulayarak birleştirmeyi iyileştiren bölgedir. Özellikle bu çalışmanın konusu olan omuz profili, birleştirilen malzemede birleştirme sırasında plastik şekil değiştiren metali aşağıya doğru bastırarak kaynak dikişinin oluşmasını sağlamaktadır. Bu nedenle omuz şekilleri (düz, konveks veya konkav) ve omuz

profili tasarımlarını (omuz yüzeyine işlenen tasarım çeşitleri) detaylı olarak incelemek gerekmektedir.



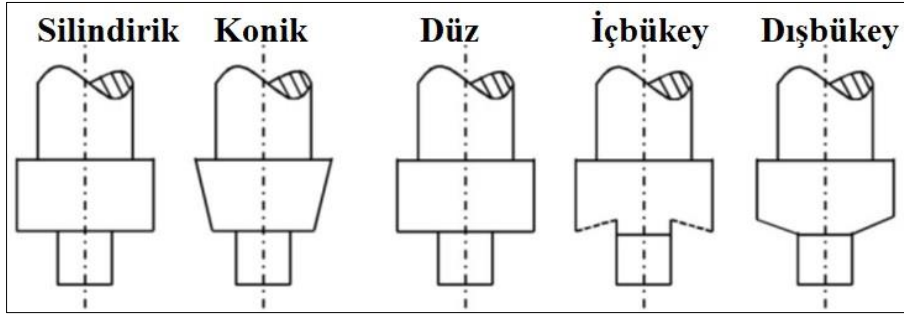
Resim 2.15. Karıştırıcı uç parça bölge tanımlarının gösterimi (Meilinger ve Török, 2013)

Resim 2.15'te karıştırıcı ucun omuz ve pim bölgesi gösterilmiştir. Pimin iş parçası ile teması sürtünme ve deforme ısınma yaratır ve iş parçası malzemesini yumuşatır; omzun iş parçasına temas ettirilmesi iş parçası ısıtmasını artırır, yumuşatılmış malzemenin bölgesini genişletir ve deforme olmuş malzemeyi sınırlar. Sürtünme parçalarını karıştıran kaynak karıştırıcı ucun doğal olarak, kaynak işlemi sırasında aşındırma ve aşınma, yüksek sıcaklık ve dinamik önemli etkileri vardır. Bu nedenle, iyi karıştırıcı uç malzemeleri aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- İyi aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Temper direnci,
- İyi tokluk.

2.16. Omuz Tasarımları

Takım omuzları, iş parçasının yüzey bölgelerini sürtünerek ısıtmak, kaynak konsolidasyonu için gerekli aşağı doğru dövme işlemini üretmek ve alt omuz yüzeyinin altındaki ısıtılmış metali sınırlandırmak için tasarlanmaktadır.



Şekil 2.5. Omuz tasarımları (Zhang, Cao, Larose ve Wanjara, 2012)

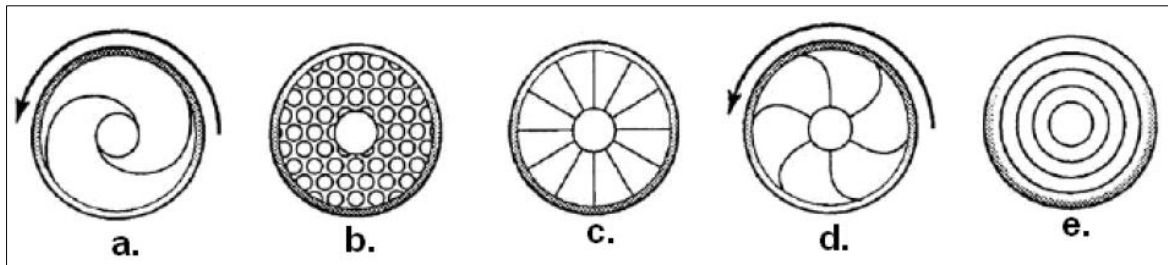
Şekil 2.5'te tipik omuz dış yüzeyleri ve uç özellikleri özetle gösterilmiştir. Omuzun dış yüzeyi genellikle silindir şeklindedir, ancak zaman zaman konik bir yüzey de kullanılmaktadır. Genel olarak, omuzun dış yüzeyinin şeklinin (silindirik veya konik) kaynak kalitesi üzerinde önemsiz bir etkisi olması beklenir çünkü omuz dalma derinliği tipik olarak küçüktür. Ancak kaydırılmış omuz yüzeyi özelliğinin malzemelerin karıştırılmasında önemli bir rol oynadığı pimsiz bir omuz aleti kullanılarak birleştirmeler elde edilebildiği dikkat çekicidir. Bu durumda, omuz dış yüzey şekli ve özelliği de önemli olabilir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, üç tip omuz dış yüzeyi tipik olarak kullanılır. Bunlardan, düz omuz alın yüzeyi en basit tasarımıdır. Bu tasarımın ana dezavantajı, düz omuz alın yüzeyinin, akan metal malzemenin alt omuz altında tutulması için etkili olmaması ve aşırı üretime yol açması ve malzeme parlamasıdır. Bu amaçla, içbükey bir omuz şekli tasarlanmış ve şimdi omuz kenarlarından malzeme ekstrüzyonu sınırlandırmak için popüler hale gelmiştir. Bu basit şekil, işlenmesi kolaydır. İçbükey omuz, düz omuz şeklinden sadece küçük bir açı eğim yapar. Takım daldırma işlemi sırasında malzeme pim üzerinden karıştırıcı uç omuz boşluğuna beslenir. Dolayısıyla, takım omzunun içbükey şekil tasarımı, pim ile yerinden çıkarılan malzeme için bir çıkış hacmi veya rezervuar olarak işlev görür. Alet üzerine aşağı doğru uygulanmış bir baskı uygulayarak, içbükey omuz profilinde tutulan yer değiştiren malzeme, malzeme üzerinde bir dövme hareketi sağlar. Ardından takımın ileri hareketi, yeni malzemeyi omuz altındaki boşluğa zorlar ve mevcut malzemeyi pimin arkasına iter. Bu omzun uygun şekilde çalışması, aletin normalden çalışma yönüne doğru 1–3 derece eğilmesini gerektirir. Bu karıştırıcı ucun omuz arka kenarının kaynak üzerinde bir sıkıştırma dövme kuvveti üretmesini sağlamak için ve malzeme haznesi oluşturmaya yaramaktadır. Aynı zamanda malzemenin karışmasını artıran ve külçe bütünlüğünü artırabilen daha yüksek dövme ve hidrostatik basınçlara yol açabilir. Başka bir mümkün omuz şekli dışbükey bir profildir. Dışbükey uç yüzey için TWI şirketinde ön denemeler başarısız olmuştur. Çünkü dışbükey profil malzemeyi pimdten uzağa itmeye çalışmaktadır. Ancak, düz bir dışbükey

ucun olduğu belirtilen 5 mm çapındaki bir yüzey omuzu, 0 ila 4 mm kalınlığındaki AZ31 Mg alaşımlı levhaların kaynak yapılmasında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemenin kalınlığı (1 mm) ince olması omuzun uç şeklinin önemsiz hale gelmesine neden olmuştur. Dışbükey omuz profilinin ana avantajı, dışbükey uç yüzeyi boyunca herhangi bir yerde iş parçası ile temasa geçebilmesi ve böylece iş parçası ile uyum sağlamasıdır. İki bitişik iş parçası arasındaki yassılık veya kalınlıktaki farklılıklar, pürüzsüz uç yüzeyinin pimden uzağa yerleşmesini engelleyememesi kaynak bütünlüğü sorunlarına neden olmaktadır (Zhang ve diğerleri, 2012).

2.17. Karıştırıcı Uç Omuz Profili Tasarımları

Sürtünme karıştırma nokta birleştirme yöntemi üzerine yapılan çalışmalar, malzemeye basınç uygulayan omuzlu karıştırıcı ucun omuz profillerinin birleştirme kalitesi üzerinde etkisi olduğunu göstermiş, bu amaçla Şekil 2.6’da gösterilen çeşitli omuz profillerine sahip karıştırıcı uçları tasarlanmıştır (Kaluç ve Taban, 2007; Tozaki ve diğerleri, 2010; Scialpi, de Filippis ve Cavaliere, 2007).

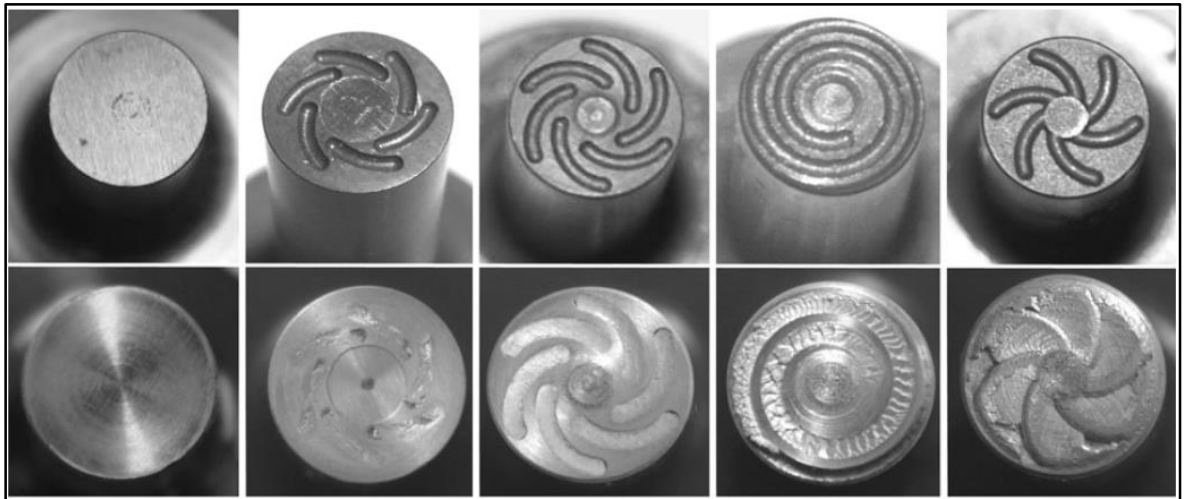
SKK ve SKNK karıştırıcı uç omuzları ayrıca, omuz tarafından üretilen malzeme deformasyon miktarını artıracak özellikler içerebilir, bu da iş parçası karışımının artmasına ve daha yüksek kalitede sürtünme karışımı kaynaklarına neden olur. Bu özellikler, kaydırmalı, sırtlar veya tırtıl, oluklar ve eşmerkezli dairelerden oluşabilir (Şekil 2.6) ve herhangi bir takım omuz profili üzerine işlenebilir. Kaydırmalı en sık görülen omuz tasarımıdır. Kanallar deforme olmuş malzemeyi omuz kenarından pime yönlendirir, böylece aleti eğme gereksinimini ortadan kaldırır.



Şekil 2.6. Farklı omuz profili tasarımları; a) Kaydırmalı, b) Tırtıklı, c) Sırtlı, d) Yivli, e) Eşmerkezli daireler

Sürtünme karıştırma kaynağı karıştırıcı ucu tasarlamak için sayısız faktör göz önünde bulundurulmalıdır, bu yüzden oldukça karmaşık bir iştir. Takım önemli bir yüke sahip olduğundan, tasarımcılar malzemeye, yüzey kalitesine ve takım geometrisine dikkat etmelidir. Ayrıca, teknolojik parametrelerin alet ve ömrü üzerinde önemli bir etkisi vardır, bu nedenle aralarında uygunluk oluşturmak önemlidir. 1991'den beri takım geometrisi kayda değer bir şekilde gelişmiş ve karıştırıcı uç malzemesi daha iyi ve daha iyi tasarım özelliklerine sahip olmuştur. Ancak evrim bitmedi; Bu alanda daha fazla iyileştirme yapılması gerekiyor. Yüksek erime sıcaklığına, yüksek mukavemet ve sertleşmeye sahip karıştırıcı uç malzemelerine artan bir talep vardır ve burada anahtar rol karıştırıcı uç ve tasarımıdır (Meilinger ve Török, 2013).

Yapılan literatür taramalarında yalnız omuz profili olan ve pimsiz bir karıştırıcı uç ile yapılan çok az sayıda SKNK çalışması bulunmuştur. Hem pimsiz uç hemde magnezyum malzeme birleştiren bir SKNK çalışmasına rastlanamamıştır. Chiou ve diğerleri, (2013), yaptıkları SKK'da adapte edilmiş bir tür pimsiz karıştırıcı uç kullanmışlardır. Ancak çalışma bindirme kaynağı olmayıp yöntem olarak SKNK işlemi değildir. Bakavas ve diğerleri, (2011), çalışmalarında SKNK ile alüminyum alışımsı sac malzemelerin olarak ve farklı pimsiz omuz profil tasarımları olan karıştırıcı uç kullanarak malzeme akışı ve kaynak oluşum mekanizmalarını incelemişlerdir (Resim 2.16).



Resim 2.16. Bakavas ve diğerleri, (2011)'in çalışmalarında kullandıkları farklı omuz profil tasarımlarının görüntüsü (Bakavas ve diğerleri, 2011).

Çalışmada elde edilen sonuçlar oldukça iyidir. ~ 3,5 kN civarında yüksek kesme kayma mukavemeti ve 1 saniyeden daha az kaynak döngüsü süresi olan ince, ~ 1 mm kalınlığında

bir alüminyum otomotiv levhalarında birleştirilebilmiştir. Kaynaklar, anahtar deliği olmadan tabaka üzerinde minimum bir yüzey izi bırakmıştır (omuz dalma 0,2 mm). X-ışını tomografisi, optimize edilmiş kaynakların birkaç kusuru koruduğunu göstermiştir.

Pimsiz bir SKNK işleminin "basit" olmasına rağmen, kaynak bölgesindeki malzeme akışının şaşırtıcı derecede karmaşık olduğu ve bunun da kısmen geçici koşullardan kaynaklandığı bulunmuştur. Genel olarak, kaynak, karıştırıcı uç yüzeyinde işlenen oluklu özelliklerle daha hızlı ve başarılı olmuştur. Profillenmiş omuzlarla, şaşırtıcı derecede kısa kaynak süreleri için yüksek deformasyon bölgesine nüfuz etme derinliği ve güçlü bir araya getirilmiş ara yüz olduğu gözlenmiştir. Çalışmada başarılı birleştirmeler elde edilmiş olmasına karşın, magnezyum alaşımı çalışılmamış ve malzeme kalınlığı çok ince (1 mm) seçilmiş olarak değerlendirilmiştir.



3. MALZEME VE METOT

3.1. Malzeme

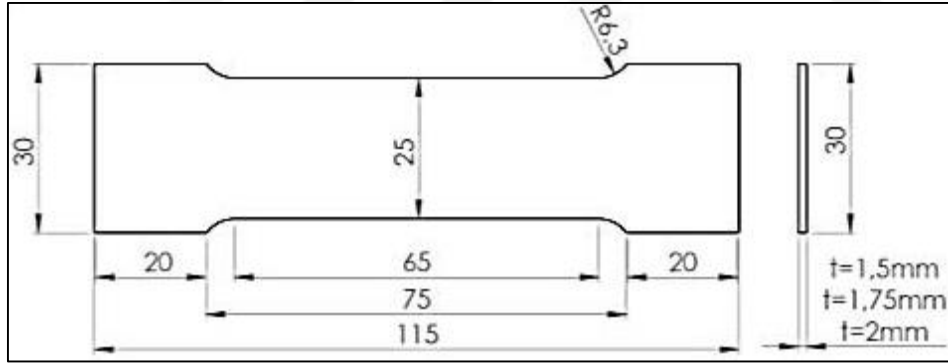
Bu çalışmada farklı karıştırıcı uç ve omuz profili tasarımları ile 1mm'den büyük AZ31B magnezyum alaşımı levhalar (1-2 mm) birleştirilmesi incelenmiştir. AZ31B magnezyum alaşımı malzemenin ASTM standardına göre kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Magnezyum alaşımı AZ31B'nin kimyasal özellikleri (ASTM, 2010)

Alaşım	Al	Ca	Cu	Fe	Mn	Ni	Si	Zi	Mg
%	2,5-3,5	0,04	0,05	0,005	0,2-1,0	0,005	0,1	0,6-1,4	Kalan

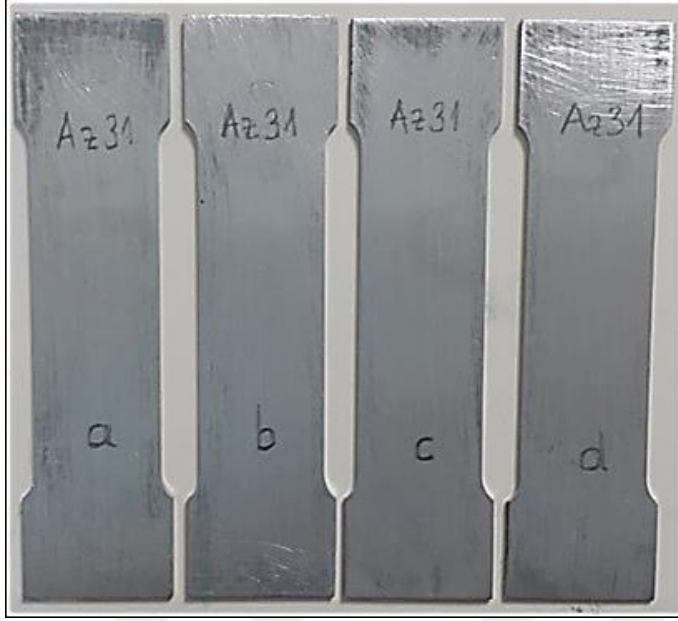
Çizelge 3.2. Magnezyum alaşımı AZ31B'nin mekanik özellikleri (ASTM, 2010)

Temper	Çekme Gerilimi [MPa]	Akma Gerilimi [MPa]	Uzama (%)
T4	240	145	≥ 7



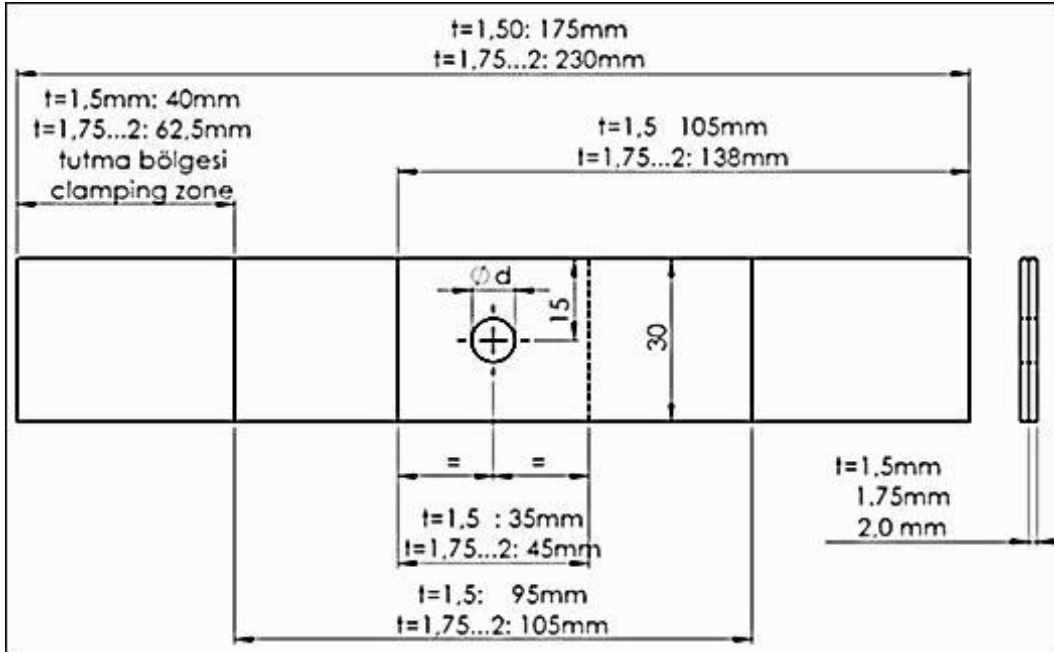
Şekil 3.1. ISO 6892-1'e uygun çekme deneyi numune ölçüleri

AZ31B magnezyum alaşımı ana malzeme çekme testinde kullanılan numune ölçüleri Şekil 3.1 ve birleştirme resimlşeri ise Resim 3.1'de gösterilmiştir.



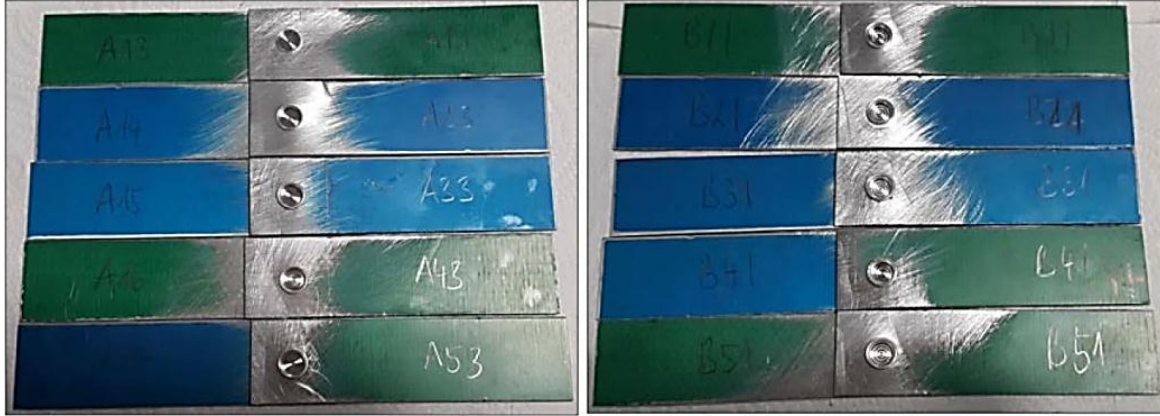
Resim 3.1. Magnezyum alaşımı AZ31B-O için ISO 6892-1'e uygun çekme deneyi numune görüntüleri

Gerçekleştirilen ISO 14273'e uygun çekme-kesme ve üç nokta eğme deneyi kapsamında SKNK uygulanan numune ölçüleri Şekil 3.2'de ve SKNK ile birleştirmesi yapılmış numunelerin resim örnekleri Resim 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Nokta kaynağı için ISO 14273'e uygun çekme-kesme deneyi numune ölçüleri

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bu çalışmada AZ31B magnezyum alaşımı levhalar 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm kalınlıklarda numuneleri üretilmiş, birleştirilmiş ve testleri yapılmıştır.



Resim 3.2. Magnezyum alaşımı AZ31B malzemesi ile ISO 14273’e uygun çekme-kesme deney numunelerinin, A ve B tipi omuz profiline sahip karıştırıcı uçlarıyla birleştirilmiş görüntüleri

Karıştırıcı ucun Şekil 3.11’de gösterilen son tasarımı yapılarak üretimine geçilmiştir. Pimlerin üretimi için gereken tolerans ve hassasiyetler belirlenerek, hem karbon çeliği olarak AISI 1040 (DIN C40) hem de östenik tip çelik grubundan ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) olarak bilinen iki tür malzeme kullanılmıştır. Beş eksenli CNC-makinesi pimlerin üretimi için kullanılmıştır. Her iki malzemedenden de ve her bir profil tasarımı için ikişer tane üretilmiş ve tümünde sertliklerin 13 HRC civarında olduğu belirlenmiştir. Daha sonra karbon çeliğinden üretilen karıştırıcı uçlara ısıtıl işlem uygulanarak 30 HRC olacak şekilde sertleştirilmiştir.



Resim 3.3. a) Östenik ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) paslanmaz çeliğinden üretilen pimler (sertleştirilememiştir) b) AISI 1040 (DIN C40) karbon çeliğinden üretilen karıştırıcı uçları (30 HRC sertleştirilmiştir)

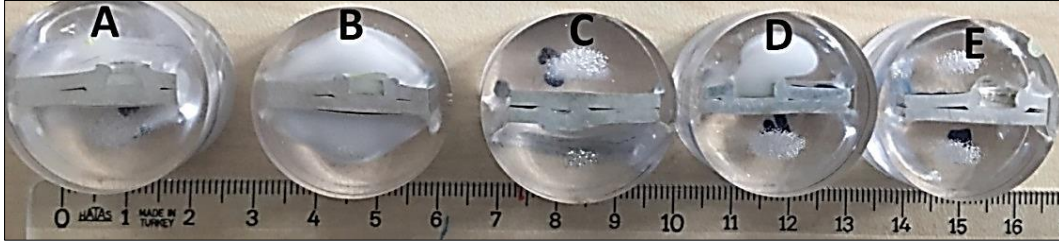
Resim 3.3’de tasarlanan omuz profillerine göre ikişer tane üretilen karıştırıcı uçlar gösterilmiştir. Yani 20 tane östenik ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) paslanmaz çeliğinden ve 20 tane AISI 1040 (DIN C40) karbon çeliğinden üretilmiş ve 30HRC derecesinde ısıtılma işlemiyle sertleştirilmiştir.

3.2. Metot

Çalışmada AZ31B magnezyum alaşımı malzemelerin SKNK yöntemi uygulanarak tasarlanan 5 farklı karıştırıcı uç ile mekanik dayanıklı ve tekrarlanabilir birleştirmelerinin yapılması ve en iyi uç tasarımının yanında en iyi SKNK parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

3.2.1. Metalografik yapı incelemesi için numune hazırlama işlemleri

Beş farklı omuz profil tasarımlarına sahip karıştırıcı uç (“A”, “B”, “C”, “D”, “E”) ile SKNK yöntemi ve en iyi parametreler uygulanarak birleştirilmiş AZ31B numuneler, birleşme bölgesine yakın ATM Brilliant 250 cihazı ile kesilmiş, kaba zımparalama ile (P180) orta bölgesine kadar zımparalanmıştır. Daha sonra bu numuneler, Struers CitoPres-1 marka bakalitleme cihazı ile kesit inceleme amacıyla bakalite alınmıştır (Resim 3.4).



Resim 3.4. Vidasız karıştırıcı uç omuz profili tipleri “A”, “B”, “C”, “D” ve “E” ile gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin hazırlanan bakalit görüntüleri

Bakalit çapı 30 mm’dir. Bakalitlenen numuneler Struers LaboForce-100 otomatik zımparalama/parlatma cihazı ile aşağıda verilen sıralama ve parametreler ile zımparalanmıştır.

- a) P180- süre-2.30 dk- kuvvet 25 N-300 rpm
- b) Ara yıkama (Su)
- c) P320- süre-2.30 dk- kuvvet 25 N-300 rpm
- d) Ara yıkama (Su)
- e) P500- süre-2.30 dk- kuvvet 25 N-300 rpm
- f) Ara yıkama (Su)
- g) P1000- süre-2.30 dk- kuvvet 25 N-300 rpm
- h) Yıkama (Su/etanol)

Zımparalama işlemi bittikten sonra, aynı cihazda parlatma keçeleri takılarak parlatma işlemi sıra ile şöyle yapılmıştır:

- a) 3 μ elmas süspansiyon- süre-4 dk- kuvvet 25 N-150 rpm
- b) Ara yıkama (etanol)
- c) 1 μ elmas süspansiyon- süre-4 dk- kuvvet 25 N-150 rpm
- d) Ara yıkama (etanol)
- e) 0,2 μ silika - süre-2 dk- kuvvet 12 N-150 rpm
- f) Yıkama (etanol)

En son basamakta ise tane yapılarını görmek amacıyla numuneler dağlanmıştır. Dağlama süresi 3 sn olarak gerçekleşmiştir. Dağlanan numuneler ivedilikle etanol ile yıkanıp, kurutulmuştur.

Dağlayıcı: Acetic-picral (3-5 sn tutulmuştur)
 10 mL acetic acid,
 4.2 g picric acid,
 10 mL H₂O,
 70 mL ethanol (95%)

Bu amaca yönelik karıştırıcı ucun tüm geometrisi ile omuz profilleri tasarlanıp üretilmesi yapılmış ve çalışmada aşağıdaki adımsal yöntem uygulanmıştır.

1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile Isıl-Mekanik Simülasyonlar ile pimlerin son tasarımları,
2. Pimlerin ve magnezyum levhaların hazırlanması, üretimi ve kaynağın yapılması,
3. Deney numunelerinin hazırlanması ve deneylerin gerçekleştirilmesi,
4. Deneylerin incelenmesi ve yorumlanması.

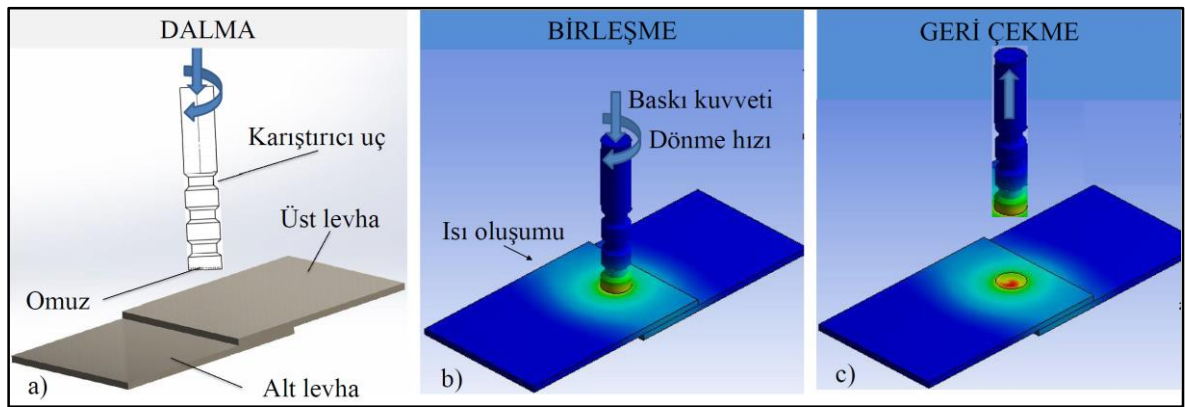
3.2.2. Analitik ve nümerik ısıl-mekanik analizler

Isıl-Mekanik simülasyon alanında yayınlar incelenmiş ve ilgili konu başlıkları altında yararlanılmıştır. Magnezyum levhaların SKNK ile birleştirilmesi sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanılan karıştırıcı uçların omuz çeşitleri farklı parametreler olarak seçilmiştir. Karıştırıcı uç omuzunun farklı tasarımlara sahip olmasından dolayı ısı durumlarının farklılık gösterdiği yapılan ısı simülasyonlarda görülmüştür. Nümerik modele girdi teşkil eden ısı enerjisi (Q) modeli analitik olarak çözümlenmiş ve çeşitli parametre değerlerine göre hesaplanmıştır. Oluşan sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösteren malzemelerin ısı özellikleri, sürtünme faktörü ve yüzey basıncı değerleri dikkate alınmıştır. Isıl alan nümerik olarak çözülmüş ve sonuçlar gösterilmiştir.

SKNK tekniği, geleneksel ergitmeli birleştirme teknikleri ile karşılaştırıldığında en önemli avantajlarından biri ana metalin ergimeden birleştirme işleminin gerçekleşmesidir. Birleştirme işleminde kullanılan kaynak karıştırıcı uç, karıştırıcı uç ve omuz olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Belirli bir hızda dönen ve dikey yönde ilerleyen kaynak karıştırıcı ucun, üst üste yerleştirilmiş iş parçalarına belirli bir derinliğe kadar dalması ve belirlenen derinlikte belirli bir süre dönmesi ile sürtünme ısı oluşur (Bozkurt ve Bilici,

2013; Külekçi ve diğerleri, 2008; Su, Gerlich, North ve Bendzsak, 2005; Tozaki ve diğerleri, 2007).

Kaynak karıştırıcı ucun dönmesi ile oluşan bu ısı ile yumuşayan malzeme plastik olarak deformasyona uğrar. Belirlenen dönme süresi sonunda kaynak karıştırıcı uç geri çekilerek üst ve alt levhalar arasında katı hal birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Resim 3.5a’da kaynak karıştırıcı ucun birleştirilecek levhalara doğru dalma işlemi, Resim 3.5b’de birleşme ve Resim 3.5c’de karıştırıcı ucun geri çekilmesi gösterilmektedir.

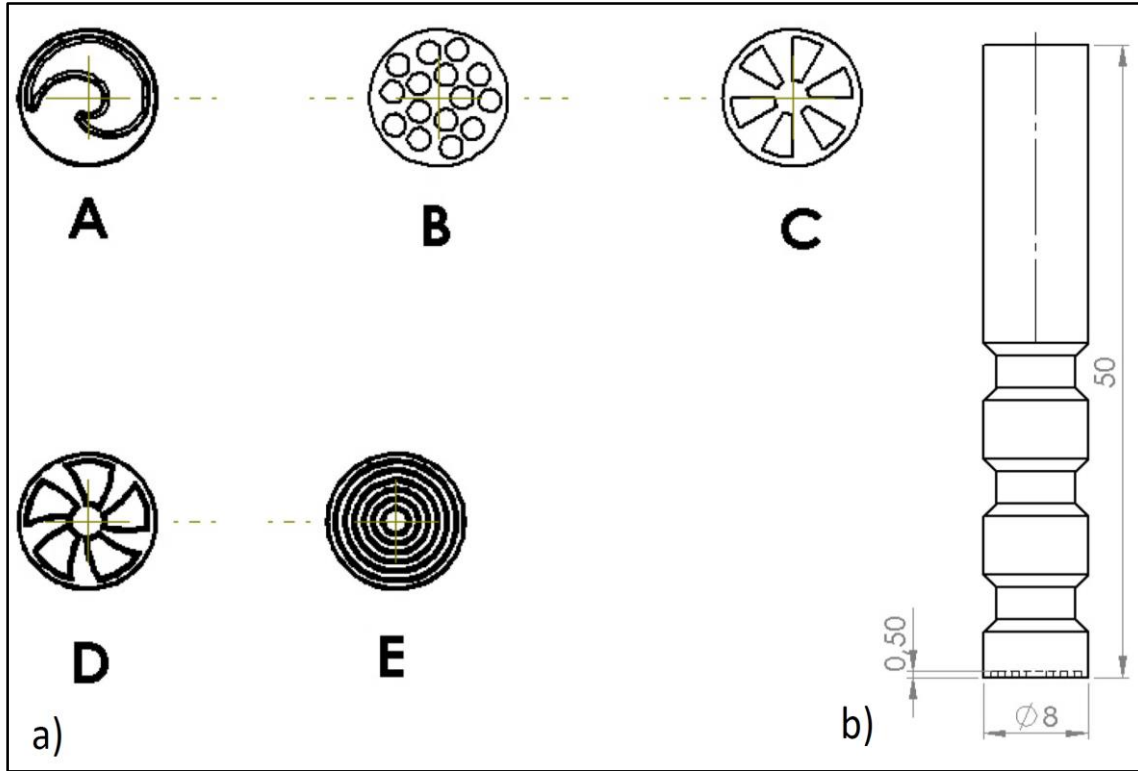


Resim 3.5. SKNK yöntemi şematik gösterimi a) dalma, b) birleşme, c) geri çekilme

SKNK’da kaynak karıştırıcı ucu ve omuz tasarımı, çapı ve uzunluğu birleştirilecek malzemenin ısınmasını ve karıştırma hareketini direkt olarak etkilemektedir. Kaynak karıştırma uç geometrisi, birleştirme dikişi oluşumunu etkileyerek kaynağın kopma kuvvetini değiştirmektedir. Uygun olmayan karıştırıcı uç uçları ile yapılan birleştirmelerde düşük kopma kuvveti ve birleştirme hataları oluşmaktadır. Bu yüzden SKNK işleminde karıştırıcı uç özellikleri ve birleştirme parametreleri çok önemlidir (Bilicim, Bakır, Bozkurt ve Çalış, 2016; Lathabai, Painter, Cantin ve Tyagi, 2006).

Bu başlık altında, önce karıştırıcı uçların farklı omuz profilleri ile 2 mm kalınlığındaki magnezyum (AZ31B) levhaların birleştirilmesinin termal simülasyon analizleri yapılmıştır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)’de, SKNK yöntemi uygulanarak birleştirilen magnezyum alaşımı levhaların analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.3. a) Farklı karıştırıcı uç omuz tasarımları b) karıştırıcı uç tasarımı

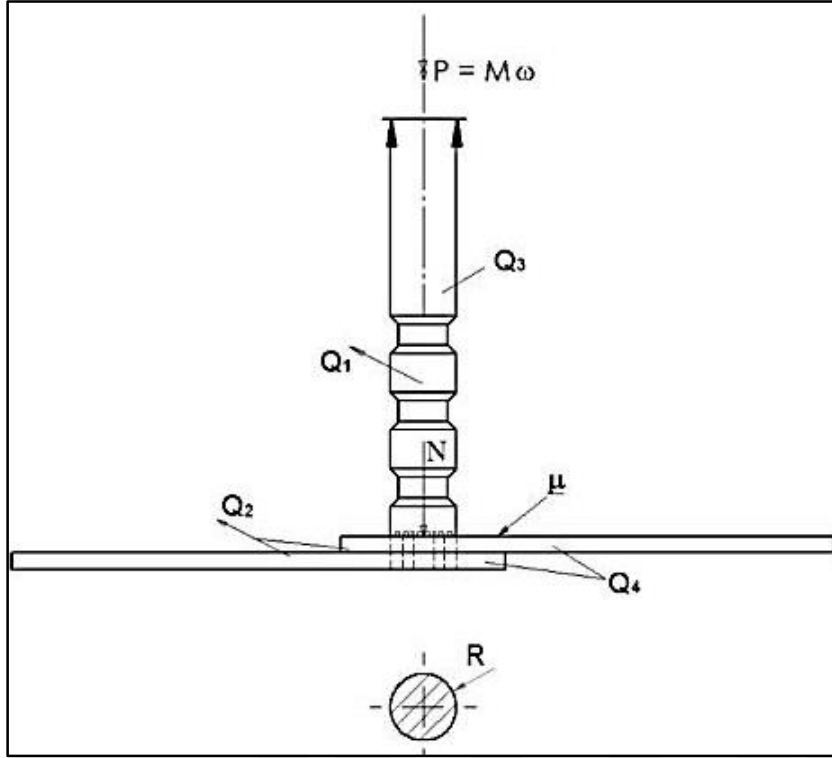
Şekil 3.3’de bu çalışmada SKNK uygulamalarında kullanılan farklı karıştırma ucu tasarımları ve omuz profilleri görülmektedir.

Temelde SKNK fiziksel olarak mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi olayıdır. Oluşan ısıl girdi analitik olarak bir sonraki ana başlık altında modellenmiştir. Hesaplanan ısı enerjisi sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik olarak çözümlenen ısıl alan probleminin girdi parametresini oluşturmaktadır. Bu ısıl girdi, karıştırıcı ucun dönme hızı, basınç kuvveti, sürtünme faktörü ve karıştırıcı ucun yarıçapına bağlı ve doğru orantılıdır. Bileşke malzemelerde ısı kapasitesi oluşurken çevreye de ısı atılmaktadır (Kafalı ve Ay, 2014).

Gerekli olan ısıl değer ve sınır şartları sonlu elemanlar yönteminde kullanılarak ısıl alan probleminin nümerik çözümü yapılmıştır.

3.2.3. Isıl model

SKNK yapılırken ısı oluşumunu etkileyen faktörlerin başında karıştırıcı uçların omuz tasarımı, sürtünme faktörü, baskı kuvveti ve karıştırıcı ucun dönme hızı gelmektedir (Shin ve De Leon, 2016).



Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında ısı oluşumunun ısıl-mekanik modeli

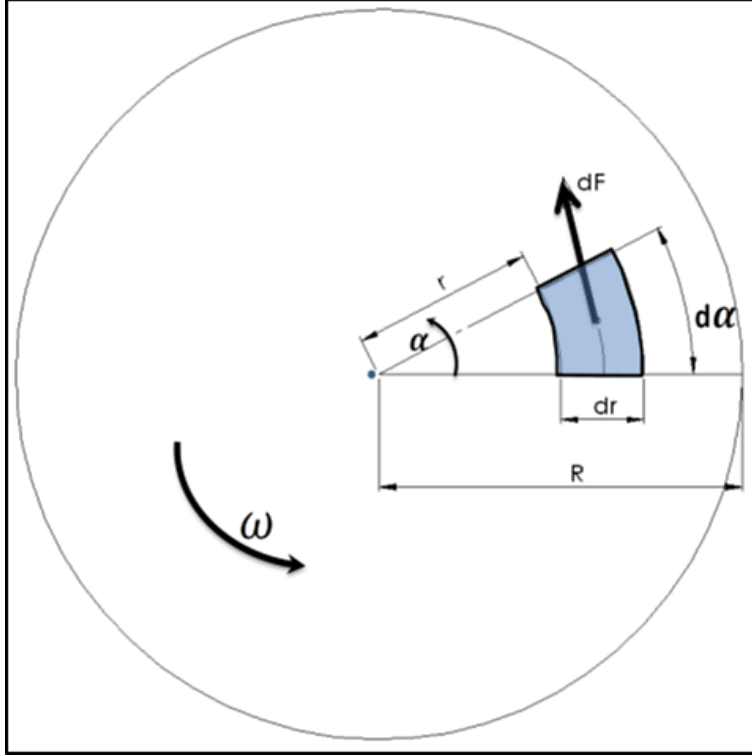
Şekil 3.4'de tahrik sisteminden karıştırıcı uç vasıtasıyla birleştirme yapılacak malzemeye uygulanan mekanik enerjinin (P) sürtünme yoluyla oluşan ve birleştirme işlemi için gerekli olan ısı enerjisine (Q) dönüştürülmesinin ısıl-mekanik modeli ve parametreleri gösterilmektedir. Analitik olarak hesaplanan ısı enerjisi, sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik olarak çözümlenen ısı alan probleminin girdi parametresini oluşturmaktadır. Bu ısı girdi, karıştırıcı ucun dönme hızına (ω), basınç kuvvetine (N), sürtünme faktörüne (μ) ve karıştırıcı ucun yarıçapına (R) doğru orantılı olarak bağlıdır. Bileşke malzemelerin ısı kapasitesi (Q_3 ve Q_4) artarken çevreye de ısı atılmaktadır (Q_1 ve Q_2). Karıştırıcı uçta meydana gelen (Q_3) ısıнын hızlıca atılması (Q_1) istenirken, birleştirilen malzemelerde ise (Q_4) ısıısının hızlıca oluşması ve meydana gelen (Q_2) ısıısının korunması istenir.

Şekil 3.4'de gösterilen modelin mekanik enerjinin sıcaklık enerjisine dönüşüm dengesi aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$Q = P \quad (3.1)$$

Burada; (P) tahrik sisteminden gelen mekanik enerjiyi ve (Q) oluşan ısıнын toplam değerini $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ denklemi ile ifade eder. Malzemeler de oluşan ısı ve çevreye

atılan ısı (Q_1, Q_2, Q_3 ve Q_4) nümerik olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü göz önünde bulundurularak ısıl modeldeki ısı girişi değeri (Q) bulunmuştur.



Şekil 3.5. SKNK’ında mekanik sürtünme yüzeyinde “sonsuz küçük alan” modeli

Şekil 3.5’te gösterilen mekanik sürtünme “sonsuz küçük alan” modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$dP = \omega \left(r + \frac{dr}{2} \right) dF = \omega \left(r + \frac{dr}{2} \right) \tau dr \left(r + \frac{dr}{2} \right) d\alpha = \omega \tau \left(r + \frac{dr}{2} \right)^2 dr d\alpha$$

Parantezin karesini aldığımızda ise:

$$dP = \omega \tau \left(r^2 + r dr + \frac{dr^2}{4} \right) dr d\alpha \quad (3.2)$$

Denklem no (3.2)’in parantez içi dr ’ye göre iki defa integrali alındığında diferansiyel denklem aşağıdaki gibi olur:

$$dP = \omega \tau \left(r^2 + \frac{r^2}{2} + \frac{r^2}{8} \right) dr d\alpha \quad (3.3)$$

Burada τ sürtünme yüzeyindeki kesme gerilimini ifade etmektedir. Diferansiyel denkleme önce yarıçap sonra açı için belirli integral uygulandığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^R \omega \tau \left(r^2 + \frac{r^2}{2} + \frac{r^2}{8} \right) dr d\alpha = \frac{13R^3}{24} \omega \tau \int_0^{2\pi} d\alpha = \frac{13}{24} \pi \omega \tau R^3 \quad (3.4)$$

$$\tau = \mu \frac{N}{A_c} \quad (3.5)$$

$$k_A = \frac{A_c}{A} \quad (3.6)$$

Burada τ sürtünme yüzeyindeki kesme gerilimini, k_A omuz profilinin birleştirilecek malzemeye temas eden alanının toplam omuz alanına oranını ifade eder. Bu faktör farklı omuz profili tasarımlarını dikkate almak için tanımlanmıştır. A_c temas alanını ve A ise karıştırıcı ucun omuz alanını ifade eder. Buna göre temas alanı:

$$A_c = k_A A = k_A \pi R^2 \quad (3.7)$$

Denklem (3.5) ve (3.7) denklem (3.4)'e uyguladığında aşağıdaki denklem geliştirilmiş olur:

$$P = \frac{13}{24} \mu \frac{N}{k_A} \omega R \quad (3.8)$$

Burada;

$\mu = 0,5$: Malzemenin akmasına kadar ısıya bağlı sürtünme faktörüdür (Bakavos, Chen, Babout, Prangnell, 2011).

N : Normal (birleştirme alanına dik) baskı kuvveti olup $N = 3696$ Newton seçilmiştir (Klobčar, Tušek, Smolej, Simončič, 2015).

R : Karıştırıcı ucun yarıçapı olup $R = 4$ mm olarak seçilmiştir.

P : Tahrik sisteminden uygulanan mekanik güç [W].

M : Tahrik sisteminden uygulanan mekanik moment [J].

$\omega = 2\pi n$: Dönme hızı; bu çalışma için $n = 2000 \text{ rpm} = 33,3 \text{ Hz}$ ortalama devir sayısı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Omuz profil alanı oranları

Omuz profil tipi:	A	B	C	D	E
k_A	0,586	0,64	0,67	0,588	0,604
Ortalama k_A	0,6				

Çalışmada kullanılan k_A oranları omuz profil tiplerine bağlı olarak Çizelge 3.3'te verilmiştir. Analitik olarak geliştirilen ısı oluşum denklemi (3.7); Schmidt ve Hattel (2004)'nin geliştirdikleri denklem ile de uyumludur. Şu ana kadar elde edilen veriler ve (3.8) nolu denklem ile ısı alan ısı girdisi değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$Q = P = \frac{13}{24} \mu \frac{N}{k_A} \omega R = \frac{13}{24} 0,5 \frac{3696N}{0,6} 2 \pi 33,3Hz 0,004m = 1396 W$$

3.2.4. Isıl alanın nümerik çözümü

Isıl yükler

Tahrik sisteminden gelen kinetik enerji (P), birleştirme karıştırıcı ucun omuz profilinin birleştirilecek malzemenin üzerinde dönerek sürtünmesi sonucu meydana gelen ısı enerjisine (Q) dönüşmektedir (Chiou, Liu ve Lee, 2013; Gerlicch ve diğerleri, 2005; Hirasawa, Badarinarayan, Okamoto, Tomimora ve Kawanami, 2010; Su, Gerlich, North ve Bendzsak, 2006). Denklem (1) bu ifadenin analitik modelini oluşturur. Karıştırıcı uçtan birleştirme bölgesine giren ısı değer (Q), uygulanan basınç kuvveti, karıştırıcı uç devir sayısı, sürtünme faktörü ve karıştırıcı uç çapı ile doğru orantılıdır. Bu ısı analizde ortalama ısı girdi fazla değişkenlik göstermediğinden $Q = 1396 \text{ W}$ hesaba katılmıştır. Karıştırıcı ucun merkezinden dışa doğru lineer bir ısı girdi artışı vardır. Ayrıca omuz profilinin birleştirme yapılacak parçaya değme oranı (k_A) arttıkça ısı girdi ters orantılı olarak azalmaktadır.

Isıl sınır şartları ve malzeme parametreleri

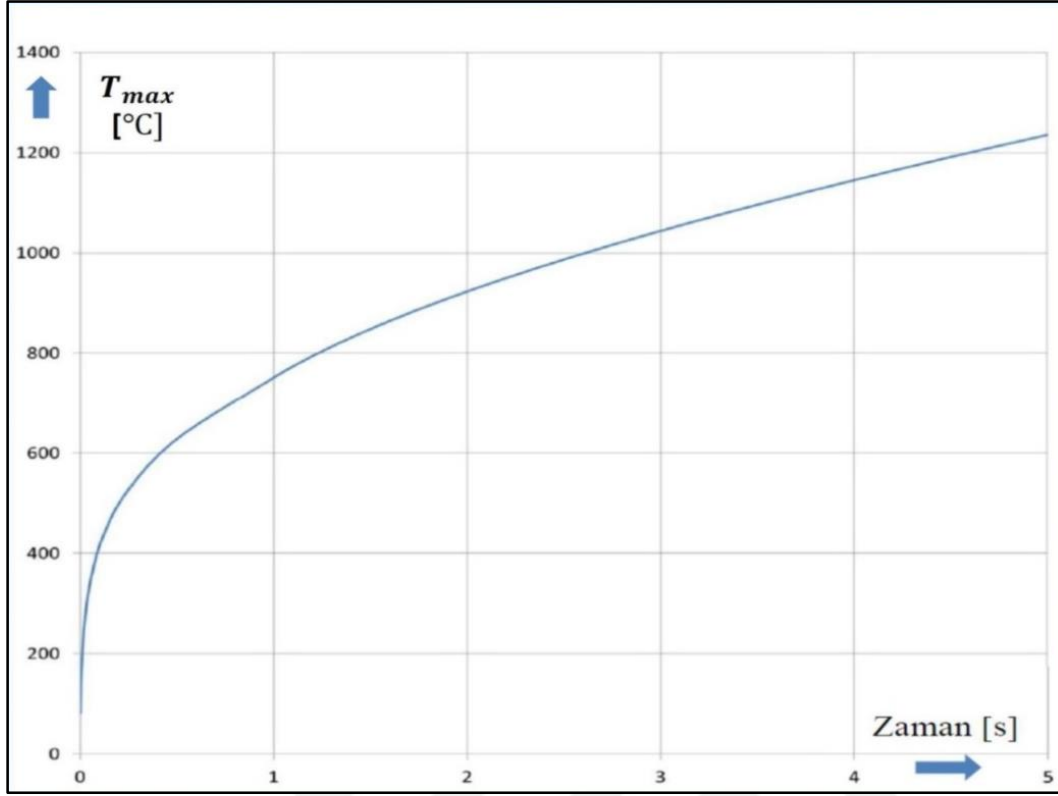
Hızla dönen karıştırıcı uç çevreye ısı yayarak yüzey alanı (A_1)'na bağlı olarak soğumaktadır.

Karıştırıcı ucun yanal yüzeyinde taşıma katsayısı $\alpha_1 = 30 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ olarak alınmıştır (Klobčar

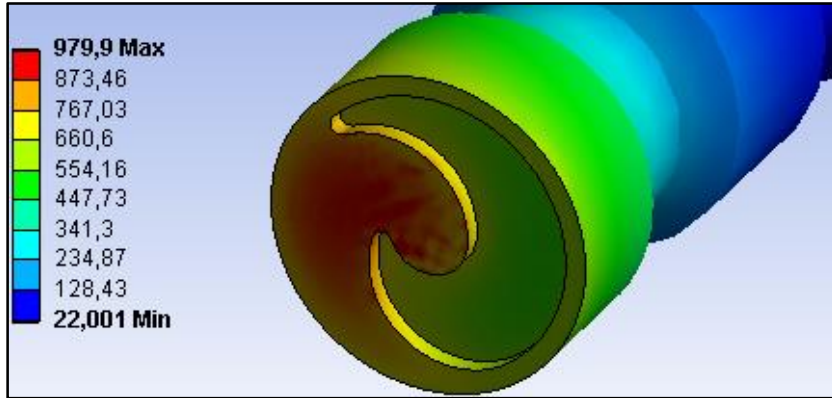
ve diğerleri, 2015). Karıştırıcı uçtan kaybedilen ısı kaybı $Q_1 = \alpha_1 \Delta T_1 A_1$ olarak ifade edilir. Burada ΔT_1 karıştırıcı uç ile çevre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir. Karıştırıcı ucun omuz profili bölgesinin sıcak olması istenirken diğer bölgelerde ısının atılması yani soğutulması istenir. Karıştırıcı ucun yüzey alanını artırmaya yönelik olarak, yüzey düz değil girintili çıkıntılı trapez formunda işlenmiştir. Bir diğer ısı kaybı ise Q_2 levhalardan çevreye olmaktadır. Birleştirme yapılacak levhaların yüzeyi ile temas eden hava akımı için ısı taşıma katsayısı $\alpha_2 = 15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ alınmıştır (Chen ve Kovacevic, 2004). Birleştirme yapılacak levhalardan kaybedilen ısı kaybı ise $Q_2 = \alpha_2 \Delta T_2 A_2$ ile ifade edilir. Burada ΔT_2 birleştirme yapılacak malzeme ile çevre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir. Bu ısı analizde ortalama ısı kapasite faktörleri; çelik için $C_{p1} = 434 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ve magnezyum için $C_{p2} = 1024 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ (sıcaklığa bağlı olarak fazla değişkenlik göstermediğinden) sabit değerleri kullanılmıştır. Çizelge 3.4’de malzemelerin modelde kullanılan ısı özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.4. Modelde kullanılan malzemelerin ısı özellikleri

Malzeme:	Çelik Pim (St)	Magnezyum Levha (Mg)
Konveksiyon faktörü: $\alpha [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$	30	10
Isı kapasitesi: $C_p [J/kg \cdot ^\circ C]$	434	1024



Şekil 3.6. Tip A'da zamana bağlı olarak nümerik çözülen omuz yüzeyindeki maksimum sıcaklık oluşumu



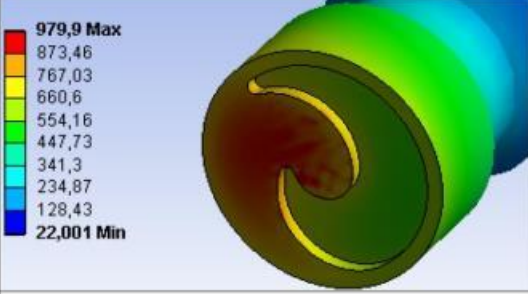
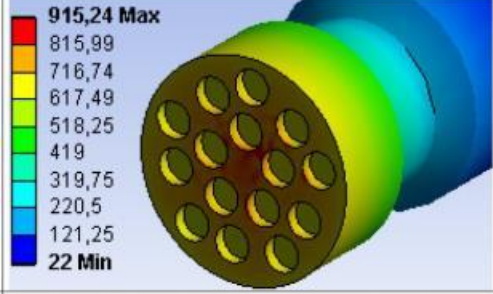
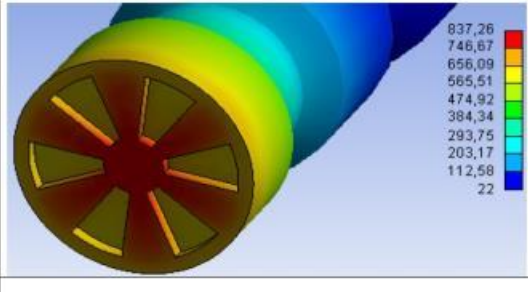
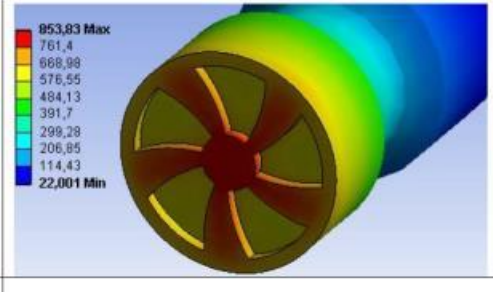
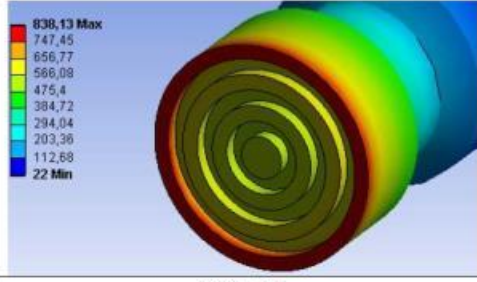
Resim 3.6. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki omuz profil yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

Isıl analiz sonucunda omuz profil tipi A'da Şekil 3.6'de görüldüğü gibi; teoride yaklaşık 2 saniye sonra omuz profil yüzey sıcaklığı 900°C 'ye ulaşmaktadır. Devir sayısının 2000 rpm gibi yüksek olması, pim çapının da 8 mm gibi düşük değerde olması, ısının bölgesel olarak artmasını ve sıcaklığın 2 saniye gibi kısa bir sürede 900°C 'ye çıkmasını sağlamıştır. Bununla birlikte gerçekte karıştırıcı uçta böyle bir sıcaklık oluşmamaktadır. Çünkü başlangıçta katı halde sürtünme faktörü ortalama 0,5 iken, ergime sıcaklığına yaklaştıkça azalacak ve

ergime sıcaklığında ortadan kalkacaktır. Karıştırıcı uç omuzunun çok hızlı hareket etmesi nedeni ile sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklığın ölçülmesi zordur. Sıcaklık arttıkça sürtünme azalacağından, karıştırıcı ucun sıcaklığı magnezyum malzemenin ergime sıcaklığına (650°C) yaklaşacaktır (Resim 3.6).

Karıştırıcı uç malzemesi olan yapı çeliği (St52) için 650°C gibi bir sıcaklık, kısa süreli de olsa yüksektir. Karıştırıcı ucun aktif olarak soğutulmasına yönelik çalışmalar olsa da bunlar pahalı ve ısının olduğu omuz profil yüzeyini de soğutamamaktadır. Bu nedenle seri üretim aşamasında karıştırıcı uçta pasif soğutma (yanal yüzey artırımı) ve yüksek ısıya dayanıklı (fırın çelikleri gibi) malzeme kullanılması önerilir.

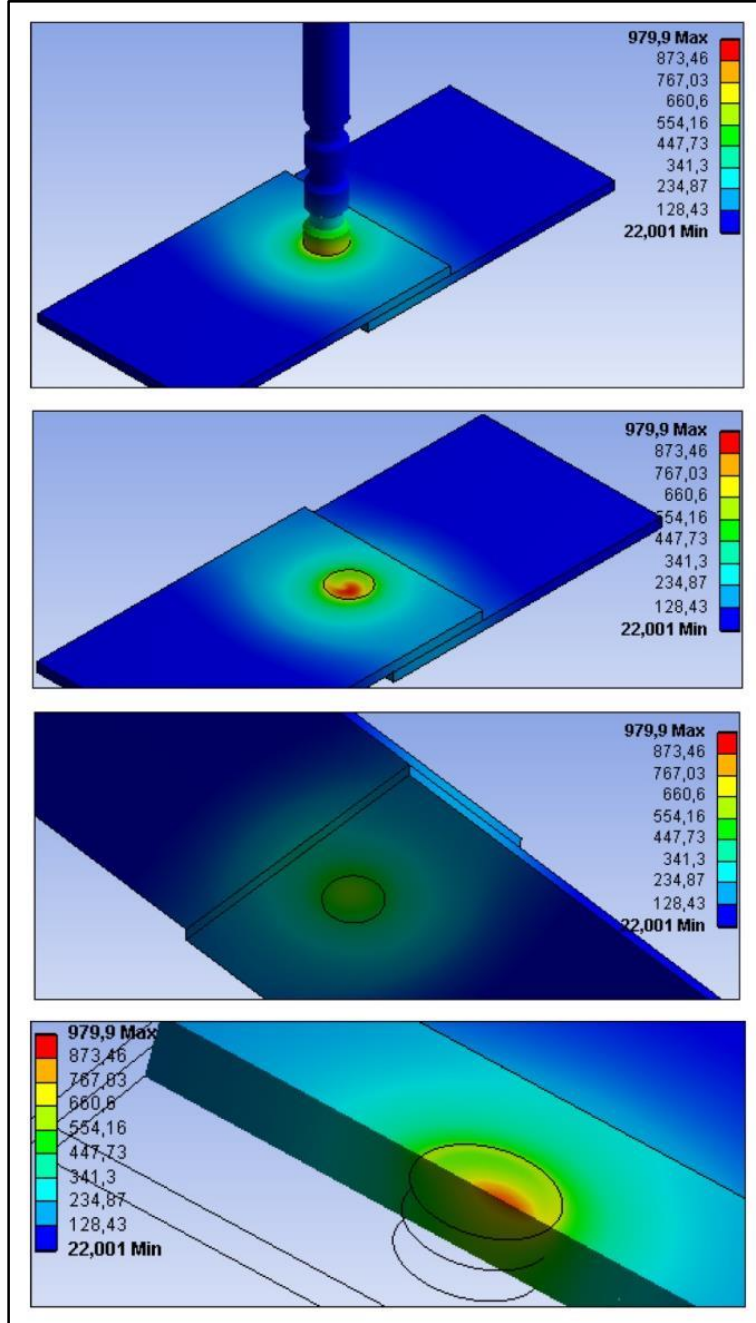
Yine de yapı çeliği için 660°C gibi bir sıcaklık kısa süreli şok sıcaklığı da olsa çok yüksektir. Karıştırıcı ucun aktif olarak soğutulmasına yönelik çalışmalar olsa da bunlar çok pahalıya mal olmakta ve sıcaklığın olduğu omuz profil yüzeyine çok yakın bölgelere ulaşamamakta ve sıcaklığın bu bölgede çok kısa sürede oluşması nedeniyle, sıcaklık girdisinden daha az sürede ve dar bir alanda soğutulamayacağı için önemli derecelerde bir getirisi olmayacaktır. Bu nedenle karıştırıcı ucun pasif soğutulmasının yanında (dış yüzey artırımı), tüm malzemesi veya uç bölgesi bu sıcaklıklara dayanıklı yüksek sıcaklık malzemelerinden üretilmesi önerilmektedir.

Profil-form	A	B
Sıcaklık Dağılımı		
T_{max}	979,9	915,24
Profil-form	C	D
Sıcaklık Dağılımı		
T_{max}	837,26	853,83
	Profilform	E
Sıcaklık Dağılımı		
T_{max}		838,13

Resim 3.7. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki omuz profillerindeki sıcaklık dağılımı

Resim 3.7’de, 2 saniye sonra karıştırıcı uç omuz profillerinde oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. En yüksek sıcaklığın omuz profil tipi A ve B’de olduğu, ancak birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen sıcaklık dağılımının B ve D profillerinde olduğu görülmektedir. Bu durum B ve D tipi omuz profili yüzey tasarımlarının, birleştirmedeki içten dışa doğru ısının homojen dağılmasına paralel gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonra magnezyum levhalarındaki oluşan sıcaklık

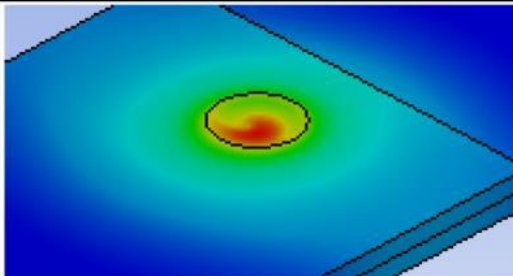
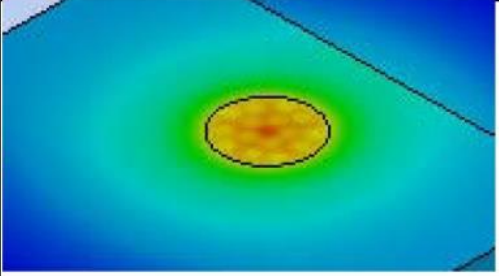
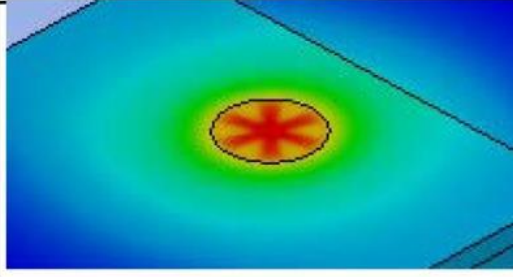
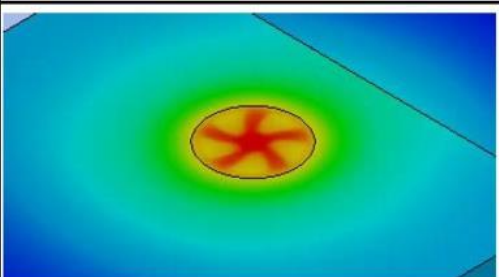
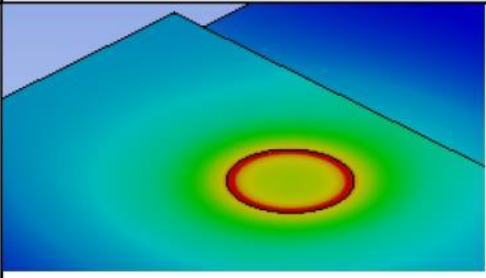
dağılımı incelendiğinde, 2 saniyede ortalama 600°C malzeme sıcaklığına ulaşıldığı görülmektedir. En fazla ısı akış yoğunluğu, beklendiği gibi omuz çevre yarıçapının maksimum değeri olan 4 mm’de ve 2 saniye sonra gerçekleştiği görülmektedir.



Resim 3.8. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki magnezyum levhalarındaki sıcaklık dağılımı

Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki magnezyum levhalarındaki sıcaklık dağılımının (Resim 3.8) 2 saniyede ortalama 600°C malzeme sıcaklığına ulaşıldığı

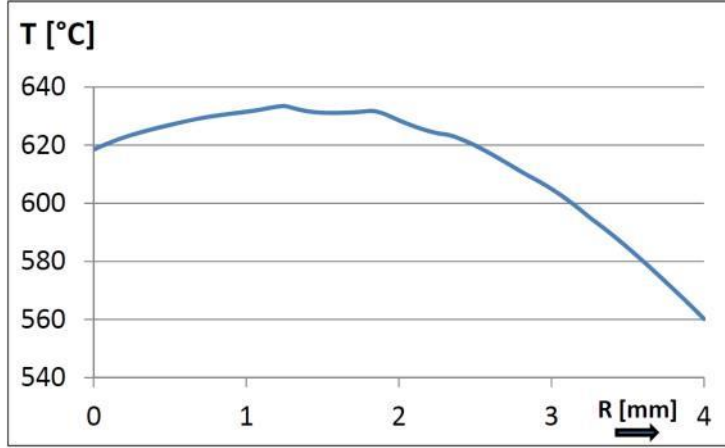
görülmektedir. En fazla ısı akış yoğunluğu beklendiği gibi, radius'un maksimum değeri olan 4mm'de ve 2 saniye sonra 102 W/mm² ile gerçekleştiği görülmüştür.

Profil-form	A	B
Sıcaklık Dağılımı		
T _{max}	979,9	915,24
Profil-form	C	D
Sıcaklık Dağılımı		
T _{max}	837,26	853,83
	Profilform	E
	Sıcaklık Dağılımı	
	T _{max}	838,13

Resim 3.9. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki magnezyum levhalarındaki sıcaklık dağılımı

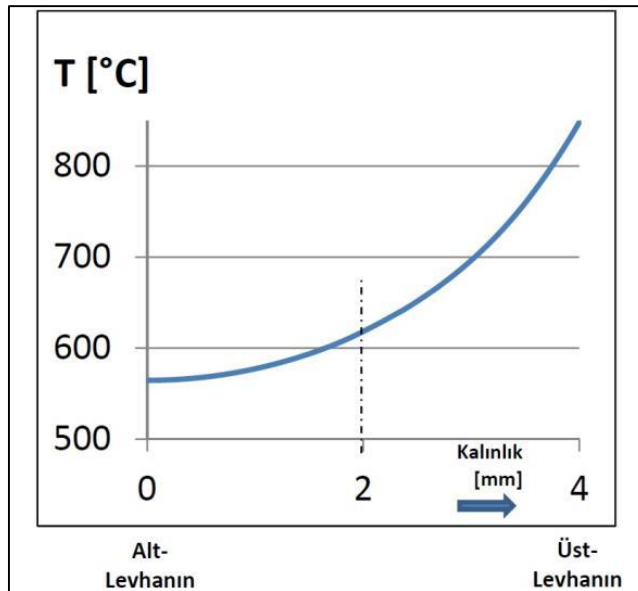
Resim 3.9'da çeşitli omuz profillerine göre, tüm magnezyum levhalarında 2 saniye sonraki oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. En fazla maksimum sıcaklığın omuz profil tipi A

ve B’de olduğu, ancak birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen sıcaklık dağılımının B, C ve D profil tiplerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7. Omuz profil tipi A örneğinde; birleşme düzleminde ve birleştirme merkezinden dışa doğru yarıçap’a bağlı 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.7’de omuz profil tipi A örneğinde görüldüğü gibi; merkezden radius’un %30’una kadar 618°C’den 632°C’ye yükseliş ve daha sonra parabolik olarak radius dışına kadar 560°C’ye inmektedir. Malzeme sıcaklığının radius’un karekökü ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.8. Omuz profil tipi A örneğinde; alt yüzeyden üst yüzeye doğru toplam 4mm kalınlığa bağlı 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımı.

Şekil 3.8 ile omuz profil tipi A örneğinde görüldüğü gibi; alt yüzeyden üst yüzeye doğru kalınlık istikametinde teorik olarak 560°C 'den 850°C 'ye yükseliş olduğu görülmektedir. Malzeme sıcaklığının kalınlığın karesi ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Kalınlığa bağlı yaklaşık 280°C 'lik sıcaklık farkından dolayı bağlantının daha iyi gerçekleşmesi açısından karıştırmanın 2 saniye uzatılması önerilmektedir.

Isıl analiz sonuçları

Yapılan ısı analiz çalışmasında; nümerik analizde kullanılacak ısı enerjisinin değeri hesaplanmış çeşitli parametrelere göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Karıştırıcı uçların omuz profili tasarımlarına (A-E) bağlı olarak sonuçların değiştiği görülmüştür.
- Karıştırıcı uçların omuz profillerinde 2 saniyede oluşan sıcaklık dağılımına göre en yüksek sıcaklık değeri omuz profil tipi A ve B'de olduğu görülmüştür.
- Karıştırıcı uçların omuz profillerinde 2 saniyede oluşan sıcaklık dağılımına göre birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen sıcaklık dağılımının B ve D profil tiplerinde olduğu tespit edilmiştir.
- Omuz profil tiplerinde ortalama 400°C malzeme sıcaklığına 2 saniye sonra ulaşıldığı görülmüştür.

Teorik en yüksek ısı değerinin 2 saniye sonra omuz profilinin dış çeperinde meydana geldiği belirlenmiştir.

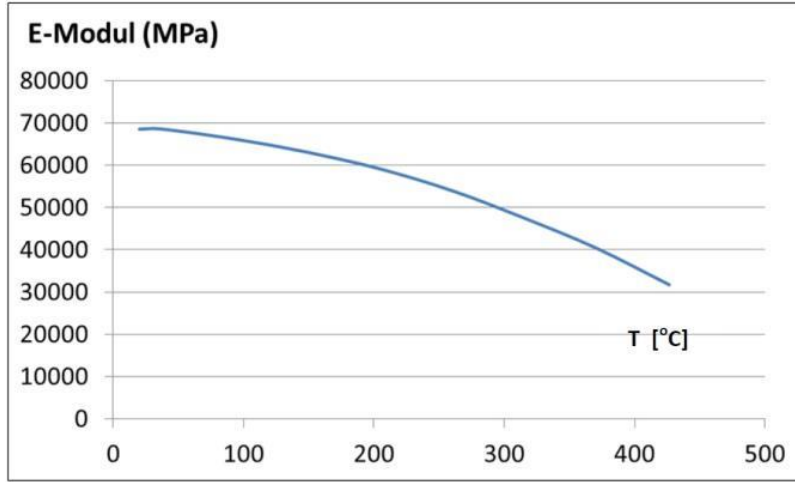
3.2.5. Mekanik alanın nümerik çözümü

Isıl analizler neticesinde yaklaşık 2 saniye gibi kısa bir sürede istenilen birleştirme sıcaklıklarına ulaşılmıştır. Şimdi ise bu 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımı ve uygulanacak baskı kuvveti $N = 3 \text{ kN}$ yükler altında hangi mekanik gerilimler ve deformasyonlar oluştuğu incelenecektir.

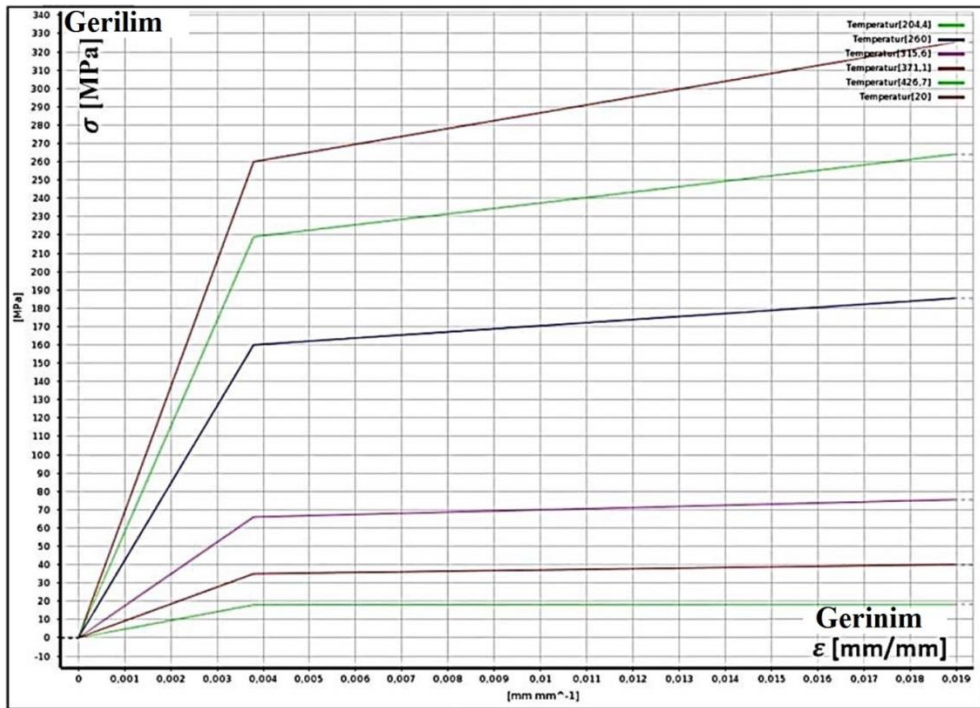
Sonlu Elemanlar Metodu (SEM, FEM) kullanılarak hem yüksek deformasyon ve sürtünme açısından hem de malzeme modeli olarak elastik-plastik seçilebileceğinden; yapılacak çözüm birçok açıdan lineer-olmayan bir yöntem ile çözülmesi gerekmektedir. Magnezyum'a göre karıştırıcı ucun deformasyonu oldukça az olacağından, malzeme değerleri olarak

normal yapı çeliğinin çevre koşullarındaki standart değerleri sabit olarak kullanılmıştır ($E = 200 \text{ GPa}$; $\gamma = 0,3$).

Magnezyum levhaları için Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilen sıcaklığa bağlı değerlerin yanında sabit olarak $\gamma = 0,35$ kullanılmıştır.

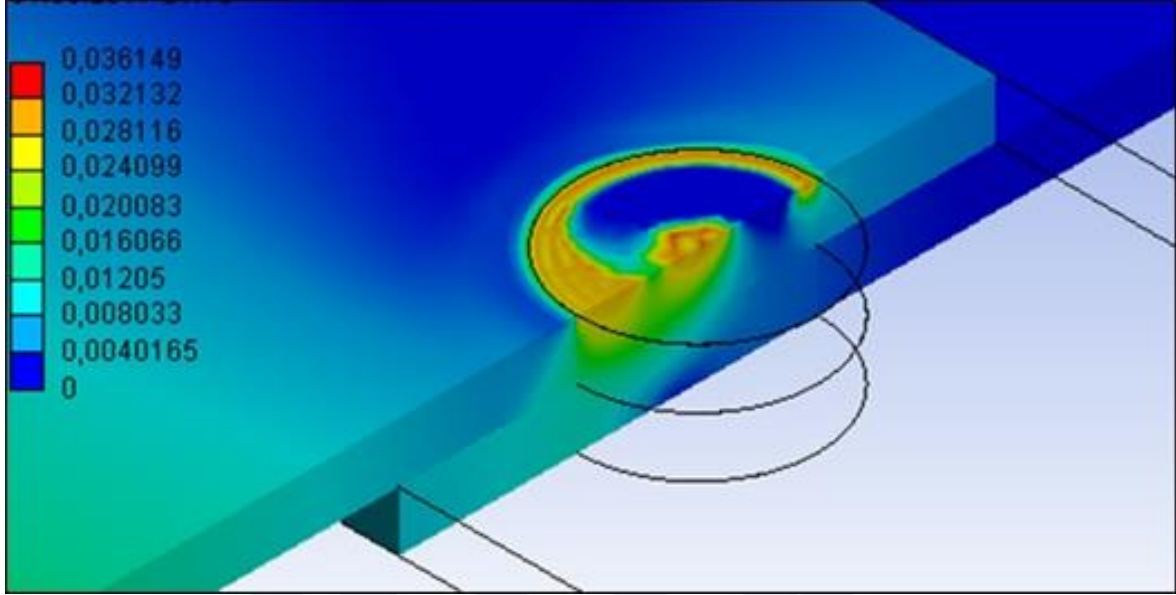


Şekil 3.9. Magnezyum'un sıcaklığa bağlı E-Modül verileri (Alüminyum alaşımının 6061-T6 verileri kullanılmıştır (ASTM, 2010).

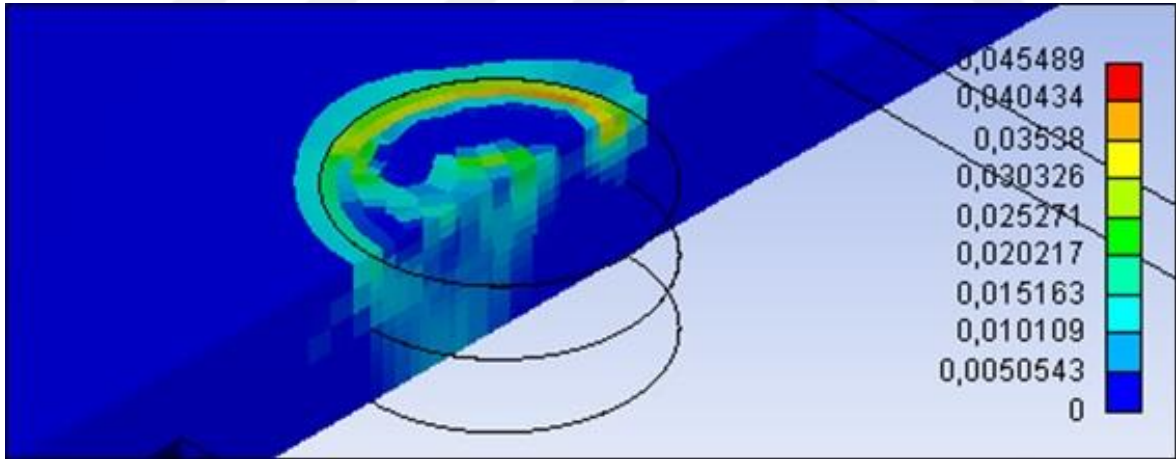


Şekil 3.10. Magnezyum'un sıcaklığa bağlı gerilim σ [MPa] elastik-plastik modeli alüminyum alaşımının 6061-T6 verileri kullanılmıştır (ASTM, 2010)

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'deki veriler ile FEM kullanılarak gerçekleştirilen ısıl-mekanik analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

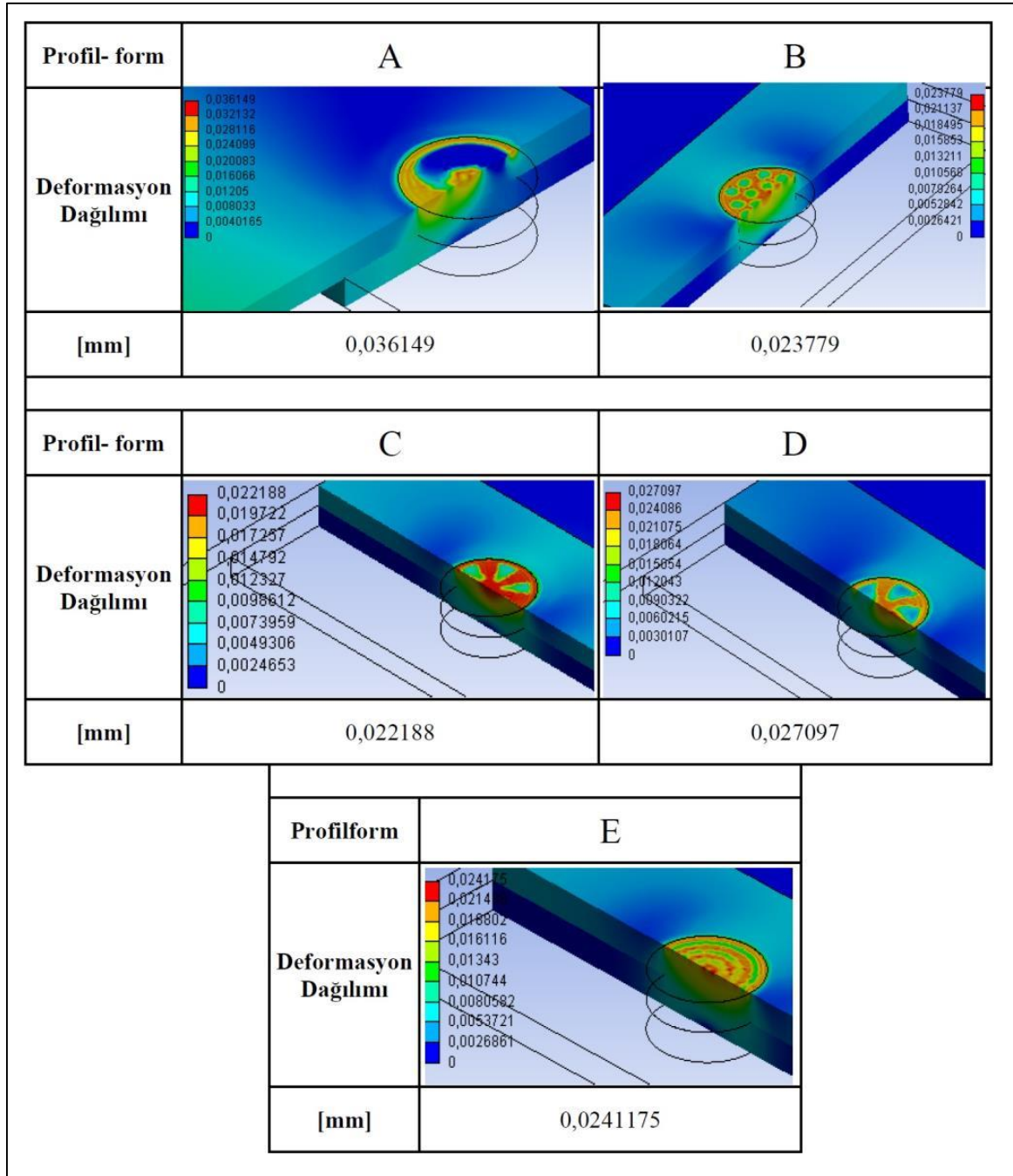


Resim 3.10. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki toplam yer değiştirme dağılımı [mm]



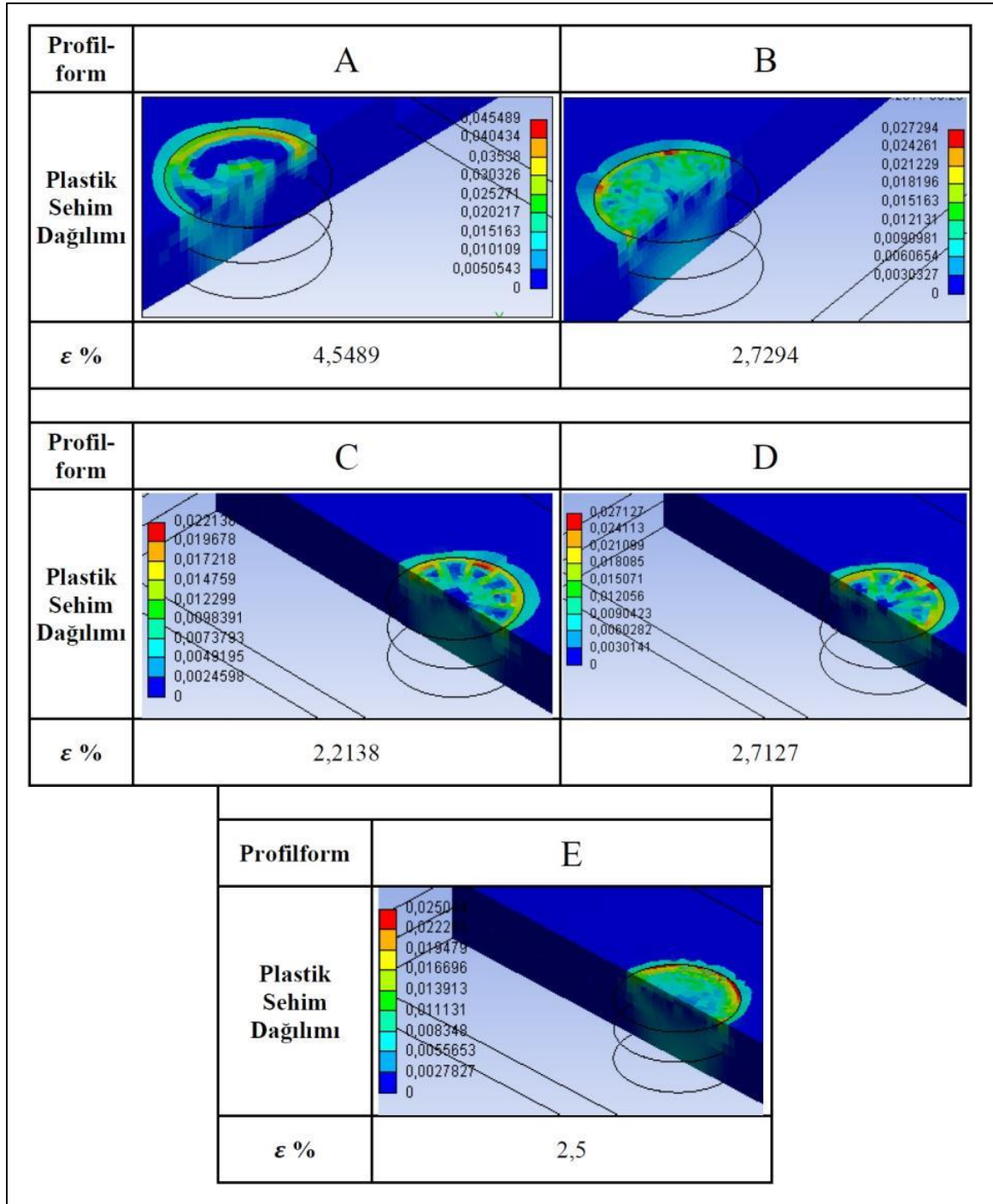
Resim 3.11. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki plastik yer değiştirme [mm] dağılımı

Resim 3.10 ve Resim 3.11'de görüldüğü gibi 2 saniye sonraki sıcaklık ve 3 kN baskı kuvveti altında; alttaki levhaya kadar plastik deformasyonun gerçekleştiği görülmektedir. Karıştırıcı ucun dönme hareketiyle istenilen birleştirme karıştırması gerçekleşmesi beklenmektedir. Karıştırma mekanizması ayrıca bir akışkanlar mekaniği analizi gerektirmekte olup bu çalışmanın sınırlarını aşmaktadır.



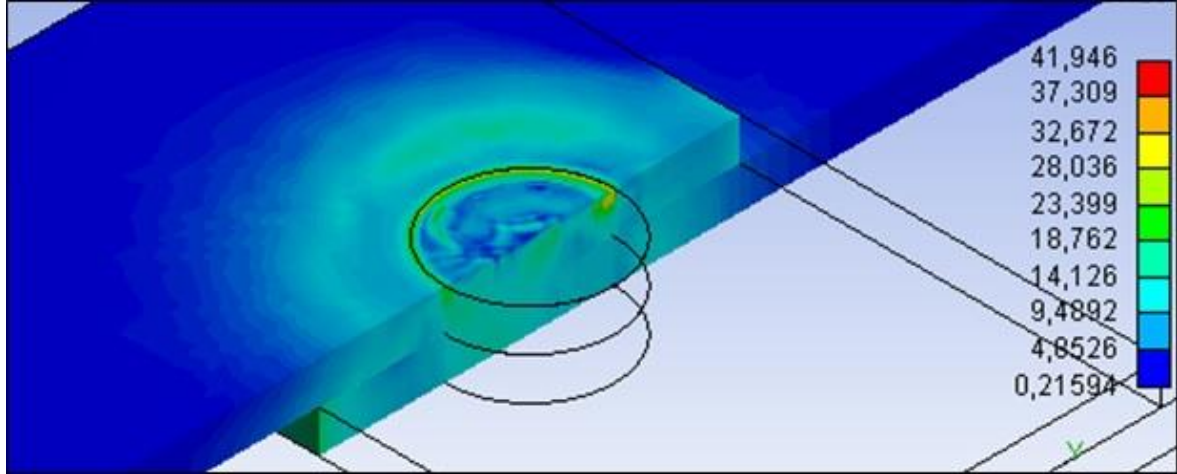
Resim 3.12. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki elastik yer değiştirme [mm] dağılımı (Kesit görünüm)

Resim 3.12 Magnezyum levhalarda oluşan deformasyonu, omuz profillerine göre karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En fazla deformasyon omuz profil tipi A'da olduğu, ancak birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen deformasyon dağılımının B ve E profil tiplerinde olduğu gözlenmektedir.

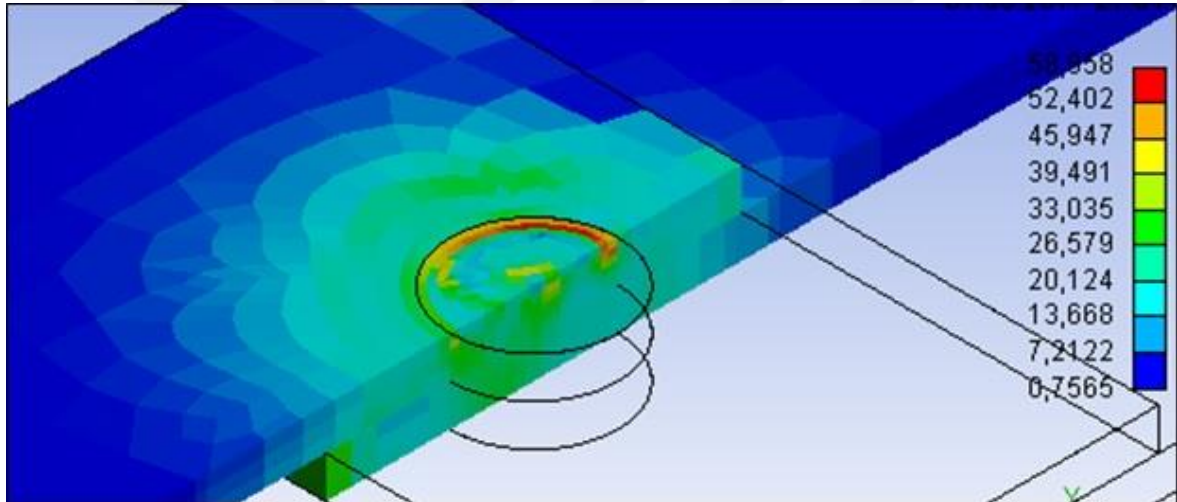


Resim 3.13. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki plastik sehim $\epsilon \%$ dağılımı (Kesit görünüm)

Resim 3.13 Magnezyum levhalarda oluşan plastik deformasyonu, omuz profillerine göre karşılaştırmalı olarak göstermektedir. En fazla plastik deformasyon omuz profil tipi A'da olduğu, ancak birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen plastik deformasyon dağılımının B ve E profil tiplerinde olduğu anlaşılmaktadır.

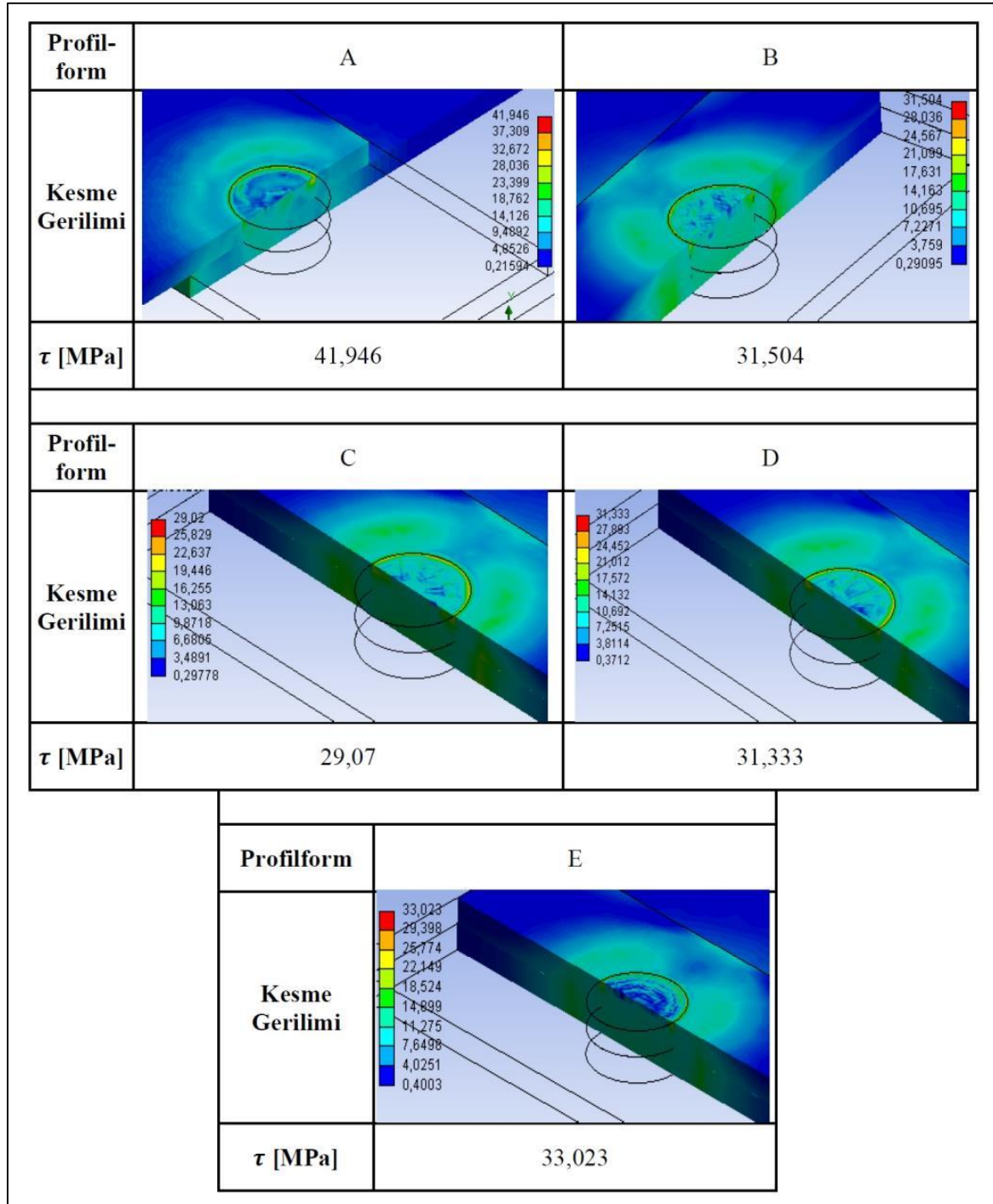


Resim 3.14. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki kesme gerilimi τ [MPa] dağılımı (Kesit görünüm)



Resim 3.15. Omuz profil tipi A örneğinde; 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki eşdeğer gerilimi σ_E [MPa] dağılımı

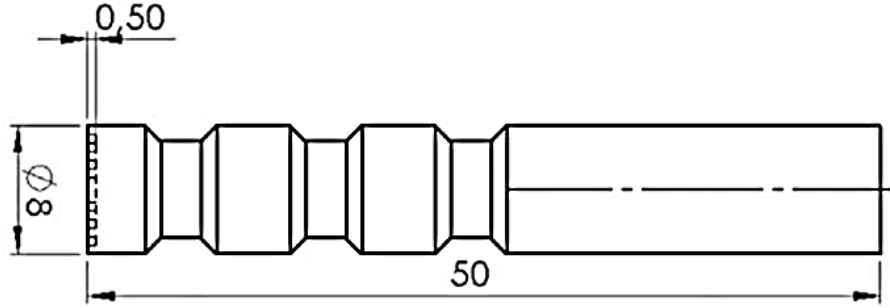
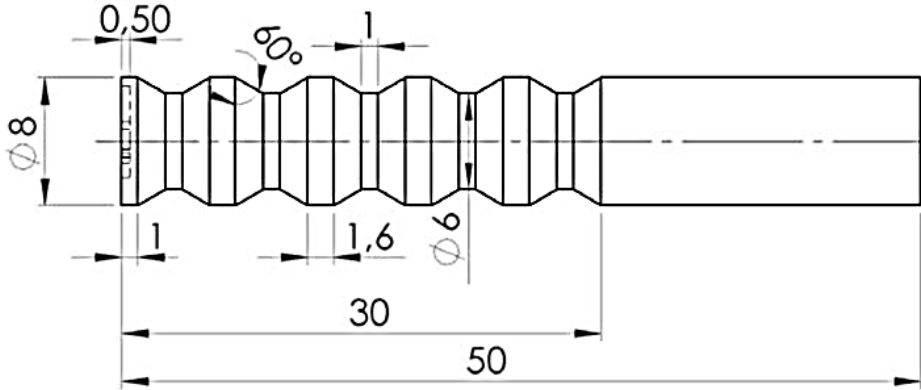
Resim 3.14 ve Resim 3.15’de görüldüğü gibi 2 saniye sonraki sıcaklık ve 3 kN baskı kuvveti altında; hesaplanan gerilimler incelendiğinde dağılımlarının alt levhaya homojen bir şekilde ulaştığı ve birleştirme çekirdeğinin 2 katı kadar uzağına kadar nüfus ettiği görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında birleştirme çekirdeğinde istenen birleştirmenin gerçekleşeceği beklenmektedir.



Resim 3.16. Tüm omuz profil tiplerine göre, 2 saniye sonraki sıcaklıkta uygulanan 3 kN kuvvet altındaki kesme gerilimi τ [MPa] dağılımı (Kesit görünüm)

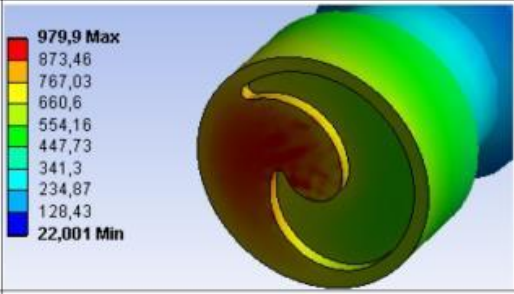
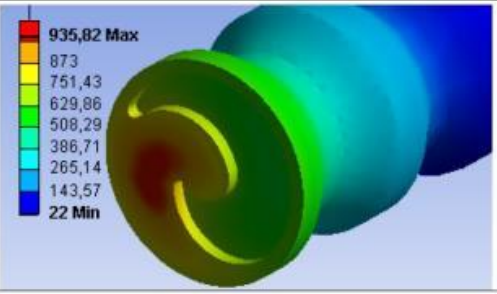
3.2.6. Isıl-mekanik analizlerin sonucunda geliştirilmiş karıştırıcı uç tasarımları

Gerçekleştirilmiş ısıl model analizleri sonucunda karıştırıcı ucun omuz profili bölgesinin ısısının yüksek olması birleştirilen malzemelerin kısa sürede istenen ısıya erişmesine sebep olmaktadır. Bu istenen bir durum olmakla birlikte, karıştırıcı ucun diğer bölgeleri süratle soğutulması dayanımı açısından önem arz etmektedir.

Profil-form	Pim tasarımı
A (ilk)	
A1 (son)	

Şekil 3.11. Karıştırıcı ucun ilk tasarımı (A) ile ısıl-mekanik analizler sonunda son tasarımı

St37 ve St52 gibi yapı çelikleri kısa süreli yaklaşık 350-400 °C sıcaklığa dayanabilmektedirler. Bundan yüksek sıcaklıklarda dayanım için gerekli akma değerleri kalmamaktadır. Bu nedenle pimi hızlıca soğutmaya yönelik omuz profil tipi A olan karıştırıcı ucun dış yüzeyinin tasarımı değiştirilmiştir (Şekil 3.11/Tip:A1).

Profil-form	A	A1
Sıcaklık Dağılımı		
T _{max}	979,9	935,82

Resim 3.18. İlk tasarımla son tasarımın ısıl analiz sonucu sıcaklık dağılımları

Karıştırıcı ucun dış yüzeyi tip A1 ile artırılmış ve Resim 3.18’de görüldüğü gibi maksimum sıcaklığı 980 °C’den 936 °C’ye indirilebilmiştir. Bunun yanında yüksek sıcaklık bölgesi dar alanda sıkıştırılabilmektedir.

Pim malzemesi olarak; hem karbon çeliği olarak AISI 1040 (DIN C40) hem de östenitik çelik grubundan ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) olarak bilinen iki tür malzeme kullanılmıştır. SS 321 yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve ısıl santrallerde, basınçlı kaplarda, fırınlarda vs. kullanımı olan ve cıvata olarak da pazarda bulunan ASME SS 321 pim malzemesi olarak kullanılmıştır. Üretilmesi ø10mm yarı mamul yuvarlak tel talaşlı imalatla ø8mm karıştırıcı uçları üretilmiştir.

Numune malzemesi olarak magnezyum alaşımı AZ31B 1,5m; 1,75 mm ve 2 mm kalınlıklarında seçilmiştir.

3.2.7. Torna tezgâhında ilk birleştirme numuneleri

Sertleştirilemeyen östenitik ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) paslanmaz çeliğinden üretilen pimlerin iki tanesiyle, 1500 devirli torna tezgâhın da yapılan 2 mm alüminyum bindirme kaynağı denemesinde başarı sağlanamamıştır. Alüminyum levhalar eritilemeden pimlerin omuz profilleri deforme olmuş ya da pim yanıl kalıcı deformasyona uğramıştır. Bu durum karşısında pimlerin gereken sertlikte olmadığı düşünüldüğünden ısıl işleminde sertleştirilmeye çalışılmıştır. Ancak ASME SS 321 (X6CrNiTi18-10) paslanmaz östenik tip

çeliğinin sertleştirilmesi ısıtıl işlem kullanarak yapılamamıştır. Diğer yöntemlerinde ekonomik olmamasından bu çalışmada gerçekleştirilmemiştir.

Ayrıca alüminyum levha malzemenin tasarlanan omuz profillerine sıvanarak doldurduğu görülmüştür.

Daha sonra AISI 1040 (DIN C40) karbon çeliğinden pimler üretilmiş ve ısıtıl işlemcide karbon yedirilerek 30 HRC sertliğine ulaşılabilmektedir.

İki eksenli en fazla 3600 dev/dak ile çalışabilen torna-makinasında 3000 dev/dak ve el yükü altında SKNK yöntemi uygulanarak kaynaklar yapılmıştır. Kullanılan pimsiz karıştırıcı uç AISI 1040 (DIN C40) malzemeden ve serleştirilmiştir.

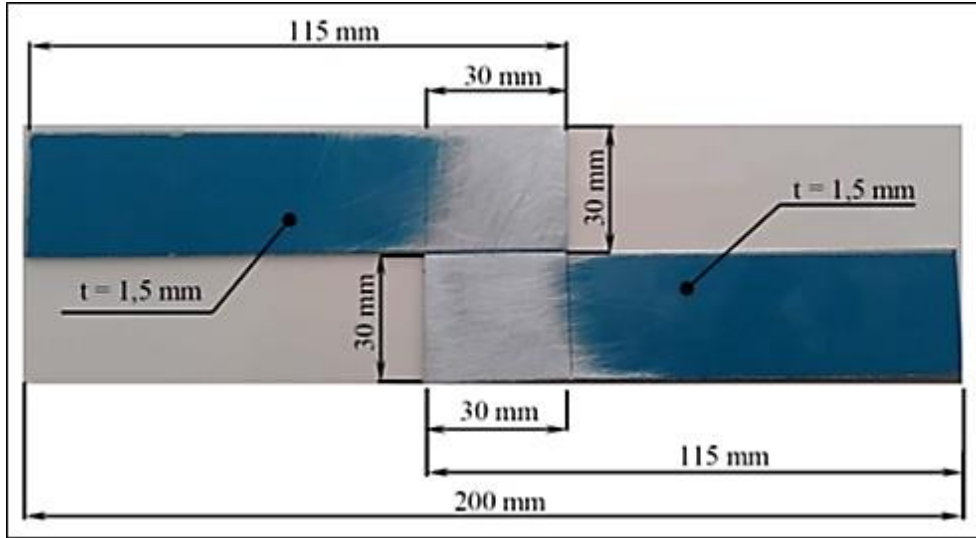


Resim 3.19. Çelik malzeme AISI 1040 (DIN C40)'dan serleştirilmiş (30HRC) karıştırıcı ucu birleştirmeden sonraki (4 tane SKNK) görüntüsü

Resim 3.19'da 4 tane SKNK yapmış olan sertleştirilmiş AISI 1040 (DIN C40) çelik malzemeden üretilmiş karıştırıcı ucu omuz profil şekli görülmektedir. Profilin alüminyum malzemeyle sıvandığı ve karıştırıcı ucu omuz profil şekli belirgin bir şekilde görülmektedir. Ancak pim omuz profilinde bir aşınma ya da kalıcı deformasyon olup olmadığı tam tespit edilmemiştir.

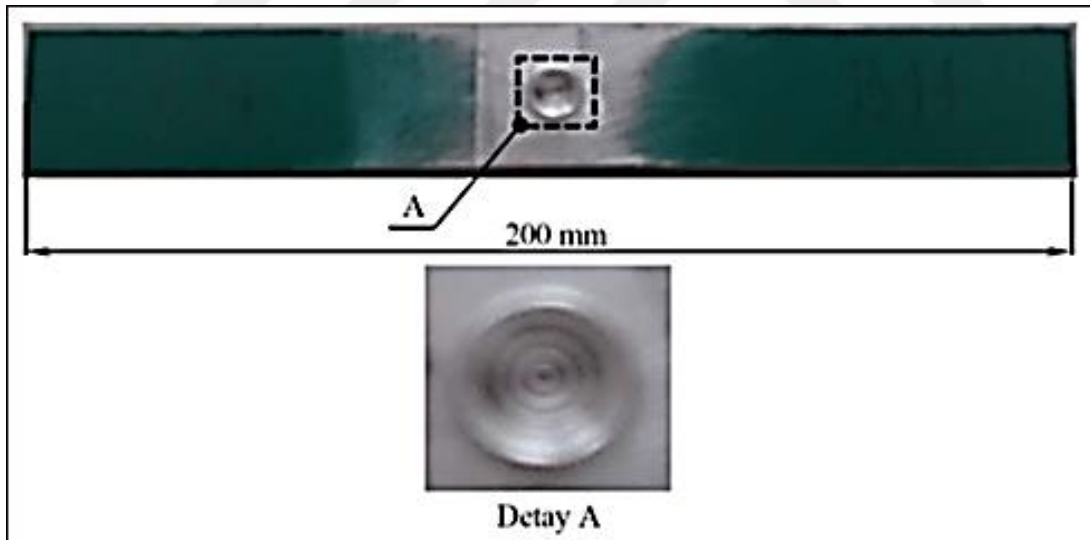
3.2.8. Magnezyum deney numunelerinin hazırlanması ve SKNK birleştirmelerinin yapılması

Magnezyum levhadan deney numuneleri giyotin ile kesilerek hazırlanmıştır. Birleştirilecek yüzeyler birleştirmeye kötü etkisi olmaması için zımparalanmıştır (Resim 3.20).



Resim 3.20. SKNK ile birleştirilen magnezyum levha deney numuneleri ve ölçüleri

Resim 3.21’de gösterildiği gibi; hazırlanan numuneler 1,5 mm kalınlıktaki magnezyum levhadan 30 mm eninde, bindirme uzunluğu 30 mm ve birleştirme sonunda toplam uzunluk 200 mm olarak ölçülendirilmiştir.



Resim 3.21. SKNK yöntemiyle ve E omuz tipi karıştırıcı uç tipi kullanılarak birleştirilen 1,5 mm kalınlığındaki magnezyum levha numune görüntüsü



Resim 3.22. SKNK yöntemiyle birleştirilmiş ve 180 derece bükülüp bırakılan 1,5 mm magnezyum numune

Resim 3.22’de 1,5 mm kalınlıktaki magnezyum numunenin SKNK yöntemiyle ve karıştırma uç tipi E örneğindeki bindirme kaynağı yapılmış hali gösterilmiştir. E omuz profil tipinin şeklinin birleştirmeden sonrada malzemede SKNK için tipik plastik şekli belirgin halde görülmektedir (Resim 3.21/Detay A).

Tasarlanan karıştırıcı uç omuz profillerine göre 1,5 mm kalınlığındaki magnezyum numunelerle 3000 dev/dak dönme sayısı ve el baskısı ile istenilen birleştirmeler yapılmıştır. Resim 3.22’de görüldüğü gibi yapılan birleştirme istenilen düzeyde olduğunu kanıtlamak maksadıyla numune birleştirmeden sonra 180 derece büküldüğünde birleştirme yarıçap sınırından hasara uğratılmıştır.



Resim 3.23. Hatalı birleştirme numunesi (E tipi karıştırıcı uç kullanılmıştır)

Azda olsa hatalı birleştirmeler yapılmıştır. Resim 3.23’de görüldüğü gibi E tipi uç ile çok hızlı daldırma ile üstteki numune delinip geçilmiştir.

Birleştirmeler oda sıcaklığında, 2 eksenli frezede 3000 dev/dak ve el kuvveti ile baskı uygulanarak yapılmıştır. Malzeme tornalama olmadan ve erime noktası altında birleştirilebilmiştir. Dalma miktarı ortalama 0,7 mm’ye kadar olmuştur. Ortalama 15 saniye bekleme süresi kullanılmıştır. Her bir uç ile yaklaşık 20 tane başarılı birleştirme yapılmış ve Resim 3.24’de uçların bu birleştirmelerden sonraki durumu gösterilmiştir. Omuz profilleri hala belirgin bir şekilde görülmektedir, ancak B profil tipinde delikler hemen ilk birleştirmede malzeme tarafından sıvanmış ve kapanmıştır. Hatalı birleştirmeler nispeten az olmuştur. Profil tipi B’de birleştirme esnasında diğerklerine göre apak kaldırma meydana gelmiştir. Bunun profil şeklinin dönmeye paralel olan çemberlerden olduğundan kaynaklandığı düşünölmektedir. Birleştirme esnasında profil tipi A, C ve D ile yapılan birleştirmeler daha düzgün gerçekleştiğı izlenimi oluşmuştur. Uçların ilk 3 kıvrım uzunluğunda ki bölgede 300°C sıcaklık üzerinde olmasından kaynaklanan kararmaların olduğı ve yapılmış termal simölasyonlarda da görüldüğü gibi, sıcaklığın yukarıya kadar ulaşamadığı ve soğutma yüzeyinin etkisi görölmektedir.



Resim 3.24. Omuz profil tiplerine göre AISI 1040 (DIN C40) malzemeden üretilen karıştırmacı uçlarının ortalama 20 birleştirme yapıldıktan sonraki görünümü

3.2.9. Deneylerin planlanması

Başarılı bir şekilde gerçekleştirilen ön birleştirme deneyleri neticesinde sırası ile aşağıdaki parametreler düzenli ve standartlara bağlı deneyler normal çevre şartları altında ve oda sıcaklığında yapılarak etkileri incelenmiştir.

Deneylerde incelenen parametreler:

- Omuz profil tasarımı: A, B, C, D ve E tipi
- Malzeme kalınlığı: $t = 1,5 \text{ mm}; 1,75 \text{ mm}; 2,0 \text{ mm}$.
- Karıştırıcı uç çapı: $d = 8 \text{ mm}$.
- Karıştırıcı ucun malzemeye dalma yüksekliği: $h_w = 0,4 \text{ mm}; 0,6 \text{ mm}; 0,8 \text{ mm}$.
- Birleştirme süresi: $t_w = 20 \text{ san}; 30 \text{ san}; 40 \text{ san}$.
- Karıştırıcı uç dönme sayısı: $n = \frac{1500 \text{ dev}}{\text{dak}}; 2000 \text{ de/dak}; 3000 \text{ dev/dak}$.
- Malzeme: Magnezyum AZ31B.

Farklı parametrelerin birleştirmeye olan etkisinin incelenmesi ve değerlendirilebilmesi için aşağıda sayılan çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir:

- Çekme testi
- Çekme-kesme testi
- Eğme testi
- Sertlik testi
- Metalografik malzeme yapısı incelemesi
- Ultrason malzeme yapısı incelemesi
- Yorulma dayanımı testi

3.2.10. Çekme testi düzeneği



Resim 3.25. INSTRON 3369 Çekme deneyi testi makinası

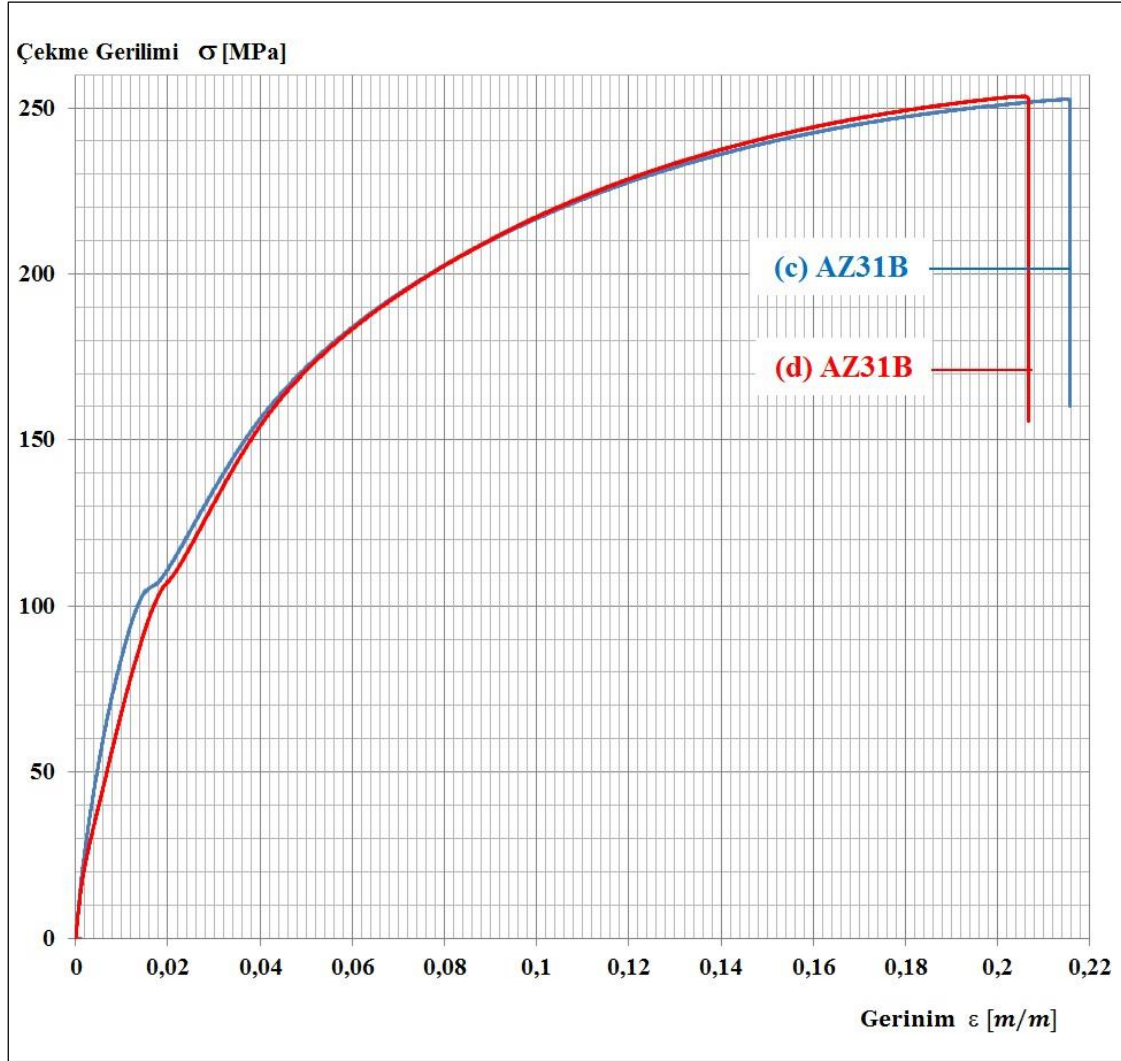
Çekme deneyi Resim 3.25’de gösterilen INSTRON 3369 makinası ile gerçekleştirilmiştir. Ana malzemenin mekanik özellikleri ISO 6892-1’e uygun çekme deneyi ve INSTRON 3369 makinası ile belirlenmiştir.

Deneyde E-Modülü 150000 MPa’dan daha küçük malzemeler incelendiğinden çekme hızı ISO 6892-1/Tab.3’e uygun olarak 18MPa/s’ye tekabül eden 1 mm/dak kullanılmıştır.

3.3. Ana Malzeme Çekme Testleri

Magnezyum alaşımı AZ31B levhanın çekme testi sonuçları

Magnezyum alaşımı levhaların çekme deneyi sonucu Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Teste hazırlanan (a), (b), (c) ve (d) olarak dört numuneden iki tanesinden (c, d) sağlıklı sonuç alınabilmektedir.



Şekil 3.12. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile çekme testi sonuçları

Çizelge 3.5. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile gerçekleşen çekme testine göre mekanik özellikleri

Numune/Malzeme	Çekme Gerilimi σ_u [MPa]	Akma Gerilimi σ_y [MPa]	Akma Oranı A [%]
(c) AZ31B	252,6	156	21,8
(d) AZ31B	253,5	146	21,0
AZ31B (Ortalama)	253	151	21,4

Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1mm/dak hız ile gerçekleşen çekme testine göre ölçülerek belirlenen mekanik özellikleri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir. Akma oranı % 21 ile AZ31B magnezyum alaşımı malzemenin oldukça sünek bir malzemedir. Bu da özellikle malzemenin çentik ve malzeme hatasına karşı ve dolayısı ile yorulma dayanımını pozitif etkiler.

3.4. Vidasız Karıştırıcı Uç Omuz Profili Tasarımının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

3.4.1. Çekme-kesme testi

Çekme-kesme testi düzeneği

Çekme-kesme deneyi INSTRON 3369 makinası ile gerçekleştirilmiştir. Birleştirmenin mekanik özelliklerinden çekme kuvvetinin uzamaya bağlı ölçümü ISO 14273'e uygun çekme deneyi ve INSTRON 3369 makinası ile belirlenmiştir.

Birleştirme bölgesi birleştirme yapılmadan önce üzerindeki boyası zımparalanarak temizlenmiştir. Nokta kaynağının çekme-kesme deneyi için, çekme hızı olarak 10 mm/dak kullanılmıştır.

Çekme-kesme testi sonuçları

Karıştırıcı ucun omuz profil tasarımlarının birleştirme kalitesini denemek için gerçekleştirilen çekme-kesme deneyi sonucu kopan levhaların, birleşme kesitindeki görüntü örnekleri Resim 3.26'da görülmektedir. Hasar tipleri incelendiğinde; A, B ve D profil tipi ile gerçekleştirilen birleştirmelerin çekme-kesme deneylerindeki hasarı birleşme arayüzünden, E profil tipinde üst-levhada birleşme çapı çevresinden ve en sağlam olduğu anlaşılan C profil tipinde ise üst-levhada çekme yönüne dik kesme gerilimi kaynaklı düğme kopartır gibi kopmuştur.

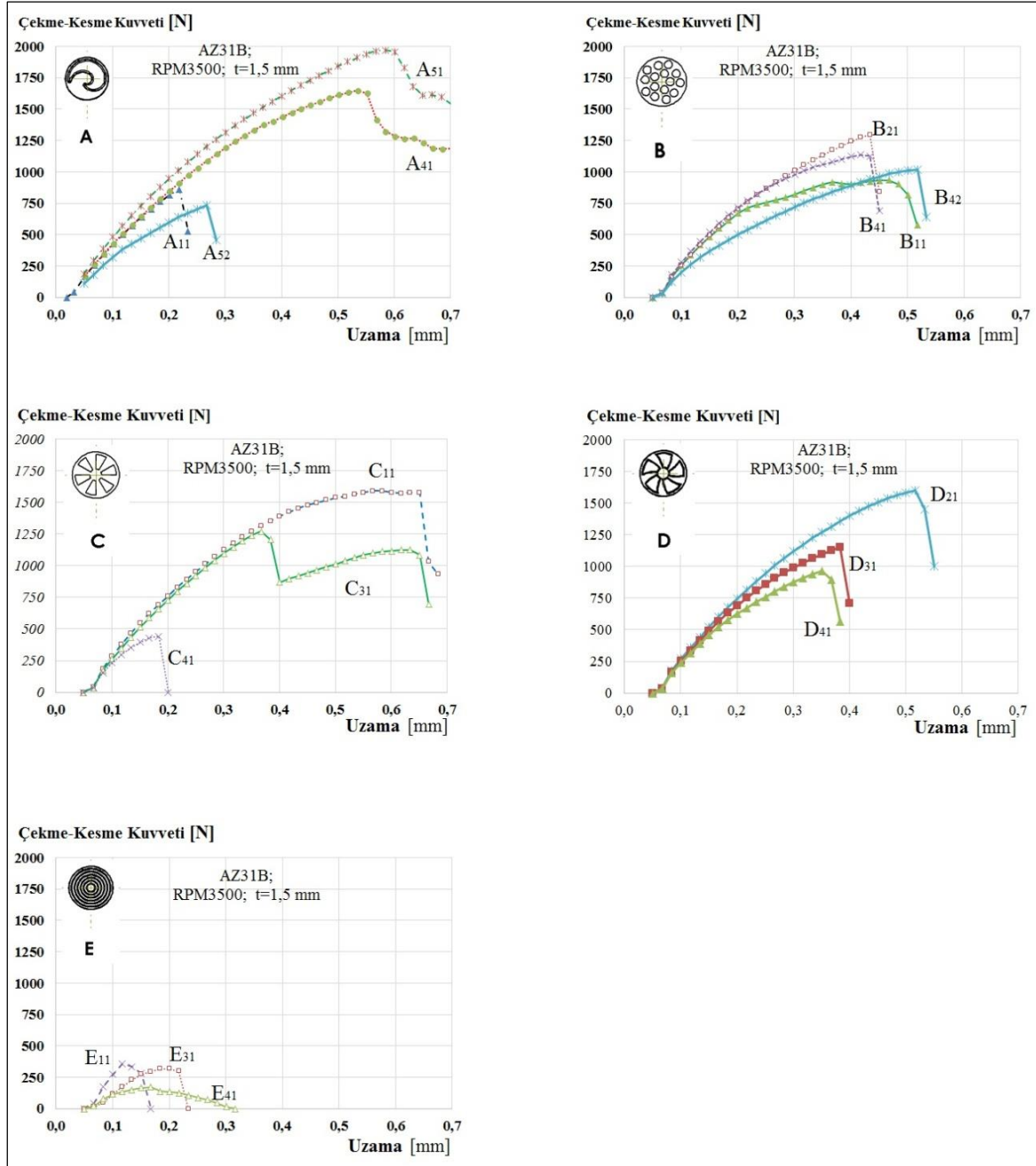


Resim 3.26. AZ31B magnezyum alaşımı levhaların birleştirme parametresi karıştırıcı uç omuz profili A, B, C, D ve E tipleriyle birleştirilmiş ve çekme deneyi sonucunda kopartılmış kesme yüzeyleri örnek görüntüleri

Farklı beş omuz profili tasarımlarıyla birleştirilmiş standart test numuneleri çekme-kesme standart deneyine göre yapılmıştır.

Çekme-kesme testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Çekme-kesme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde en fazla A ve D omuz profili tiplerinde 1500N kopma kuvvetine ulaşılmıştır. Ancak A tipinin yalnız iki numunesinde bu durum söz konusu olup diğer numunelerde 500N'dan küçük değerler elde edilmiştir. B ve D tiplerinde ise tüm bağlantılarda yaklaşık 1000N civarında fazla değişmeyen değerler elde edilmiştir. C tipinde ise hem yüksek hem de genliği az olan (kararlı, tekrarlanabilir) 1300N civarında değerler elde edilmiştir. Daha sonraki en iyi parametreler ile yapılacak birleştirme ve testlerle bu değerden çok daha fazla yaklaşık 1750 N çekme-kesme kuvvetine ulaşılmıştır. Sonuç olarak kesme testi değerlendirildiğinde; en iyi bağlantıların C omuz profili ile yapılan birleştirmelerde gerçekleştiği görülmüştür.

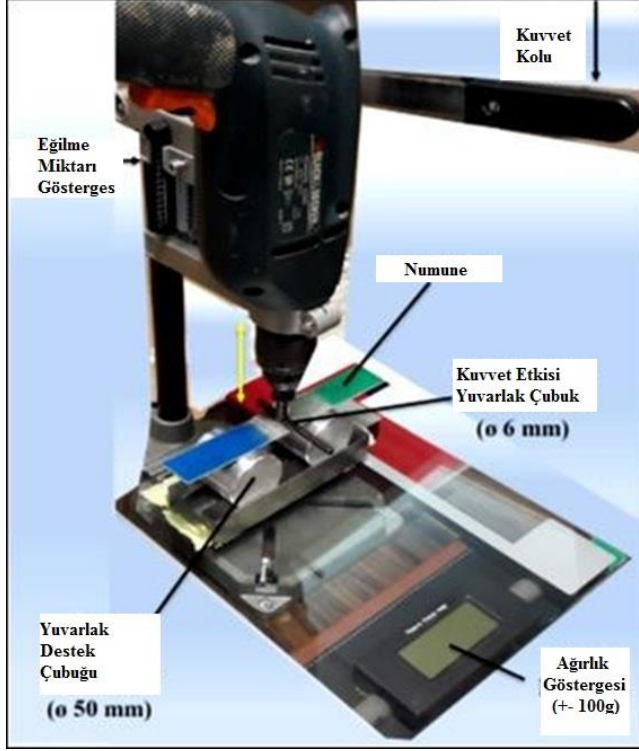


Şekil 3.13. Çekme-kesme testi sonucu kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü.

Test hızı 10 mm/dak ile yapılan testlerin sonuçlarının kuvvet-uzama değerleri grafiksel olarak Şekil 3.13’de görülmektedir.

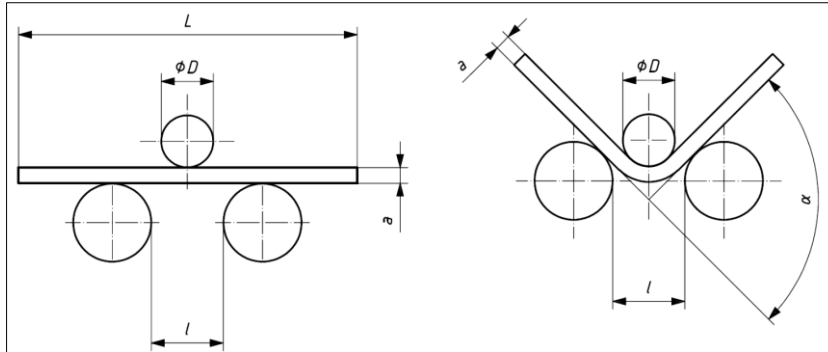
3.4.2. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi düzeneği



Resim 3.27. ISO 7438'e uygun üç nokta eğme deney düzeneği

ISO 7438'e uygun olarak hazırlanan, üç nokta eğme deneyi düzeneği Resim 3.27'de görülmektedir. Burada test edilen birleştirilmiş numune ölçüleri çekme-kesme deneyinde kullanıldığı gibi ve Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3.14. ISO 7438'e göre üç nokta eğme deneyi için kullanılan düzenek ölçüleri [ISO 7438]

ISO 7438'e göre üç nokta eğme deneyi için kullanılan düzenek ölçüleri Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Buna göre; $a = 2 \times 1,5 \text{ mm} = 3 \text{ mm}$; $D = 6 \text{ mm}$; $l = 15,5 + D + 3a \mp \frac{a}{2} = 25 \mp 1,5 \text{ mm}$ ve desteklerin silindir çapları $d = 50 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir. Destek aralığı ölçüsü l 'ye bindirme bölgesinin bükülme esnasında destek silindirlere değmesi ve bu nedenle yanlış ölçmeye sebep olacağından 15,5 mm eklenmiştir.

Üç nokta eğme testi sonuçları

Üç nokta eğme deneyinde magnezyum alaşımı AZ31B 1,5 mm numuneler A, B, C, D ve E karıştırıcı uç omuz profil tiplerine bağlı olarak test edilmiştir.



Resim 3.28. AZ31B magnezyum alaşımı numuneleri omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi sonucu üstten görüntüleri

Deneyin sonuçları Resim 3.28 ve Resim 3.29’da görülmektedir. Deney sonuçlarındaki kuvvet seviyesinin çekme testindekinden çok daha düşük olduğundan anlaşıldığı gibi; Üç nokta eğme testi SKNK birleştirmelerinin testi için daha kritiktir. Çünkü bağlantı düğme-koparma tipi bir yüklenmeye tabi tutulup, malzeme yüzeyine dik kesme kuvveti yaşamaktadır. Normalde bağlantı malzeme yüzeyi doğrultusunda bir yüklenmeye maruz kalması istenir.



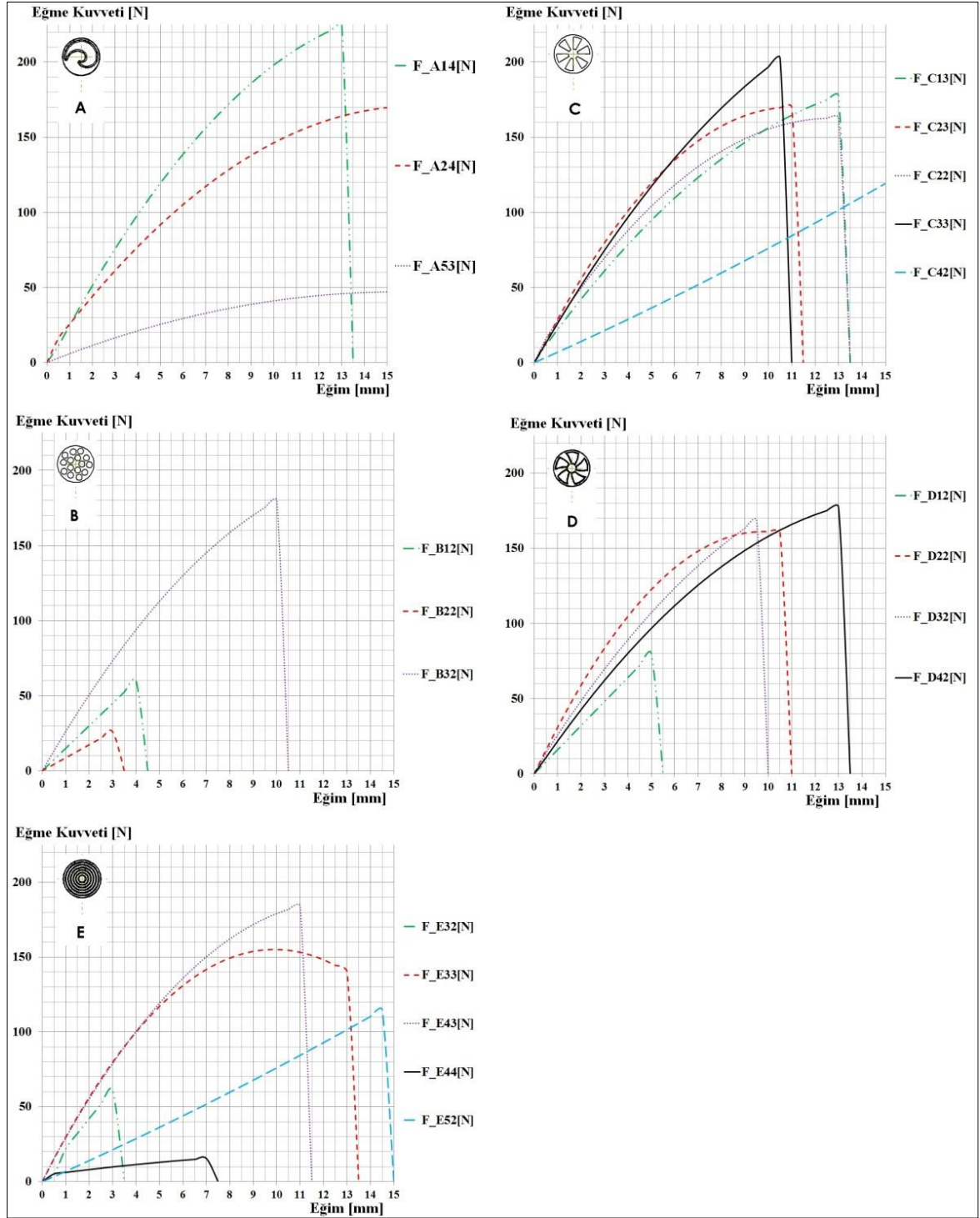
Resim 3.29. AZ31B magnezyum alaşımı numuneleri omuz profil tipi A, B, C, D ve E’ye göre, üç nokta eğme testi sonucu yandan görüntüleri

Çizelge 3.6. AZ31B magnezyum alaşımı numunelerinin omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi ölçüm sonuçları

Omuz profili tipi	A	B	C	D	E
Kopan numune sayısı (kesme hasarı)	3	3	0	2	3
Kopmayan numune sayısı	2	1	5	3	2

AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm levhadan üretilmiş numunelerin, omuz profil tipi A, B, C, D ve E'ye göre, üç nokta eğme testi ölçüm sonuçları Çizelge 3.6 ve Şekil 3.15'de gösterilmiştir.





Şekil 3.15. Magnezyum alaşımı AZ31B 1,5 mm numunelerin 3000 dev/dak ile ve 0,6 mm dalma yüksekliğinde farklı omuz profilleri (A, B, C, D ve E) ile birleştirilerek üç nokta eğme testinde eğme kuvvetinin eğilmesine bağlı grafikleri

Üç nokta eğme testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Test parametresi seçilen omuz profil tiplerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonuçları değerlendirildiğinde en fazla kopmayan numune sayısına C omuz profili tasarımına sahip karıştırıcı uçla yapılan birleştirme numuneleri ile ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ardından sırası ile D ve A tiplerinin geldiği Şekil 3.15’de görülmektedir. Resim 3.29 incelendiğinde eğim açısının 30° ve üzerinde olduğu görülmektedir. B ve A tiplerinde kopan numune sayısı yüksek ve çok küçük yük seviyelerinde hasar meydana geldiği görülmüştür. Sonuç olarak üç nokta eğme testi değerlendirildiğinde; en iyi bağlantıların C omuz profili ile yapılan birleştirmelerde gerçekleştiği görülmüştür.

3.5. Test Sonuçlarına Göre En İyi Karıştırıcı Uç Omuz Profilinin Belirlenmesi

Farklı karıştırıcı uç omuz profili tasarımlarına sahip karıştırıcı uç ile gerçekleştirilen SKNK metoduyla birleştirilen 1,5 mm magnezyum levhaların çekme-kesme ve üç nokta eğme test sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca levhaların ana malzeme çekme testleri gerçekleştirilmesi sonucunda kullanılan malzemenin mekanik özellikleri doğrulanmıştır. Yapılan bu mekanik testler sonucunda belirgin bir şekilde en iyi birleştirmenin karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile gerçekleştiği doğrulanmıştır. Arkasından sırası ile “D”, “A”, “E” ve “B” geldiği tespit edilmiştir.

Ayrıca birleştirmelerin makro ve mikro yapıları incelendiğinde “C” ve “D” omuz profil tipinde daha sıkı mekanik bir birleştirme olduğu değerlendirilmiştir.

Bundan sonra incelenecek birleştirme parametrelerin incelemesinde öncelikle “C” omuz profil tipi kullanılmıştır.

3.6. Karıştırıcı Uç Devir Sayısının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile dönme hızı değiştirilerek AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki sac malzemeler SKNK ile standart ölçülerle birleştirilmiştir. Karıştırıcı uç omuz profilinin malzemeye dalma yüksekliği 0,6 mm, 40 saniye birleştirme zamanı ve 20 saniye bekletme zamanı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Dönme hızı 1000, 1500, 2000 ve 2500 devir/dakika ile test edilmiştir. Ancak 1500 ve 2000 devir/dakika dışındaki

birleştirmeler ya hiç gerçekleşmemiş ya da sağlam olmamiştır. Devir sayısı 1500 ve 2000 devir/dakika ile gerçekleşen birleştirmelerin oldukça iyi olduğu gözlenmiştir.



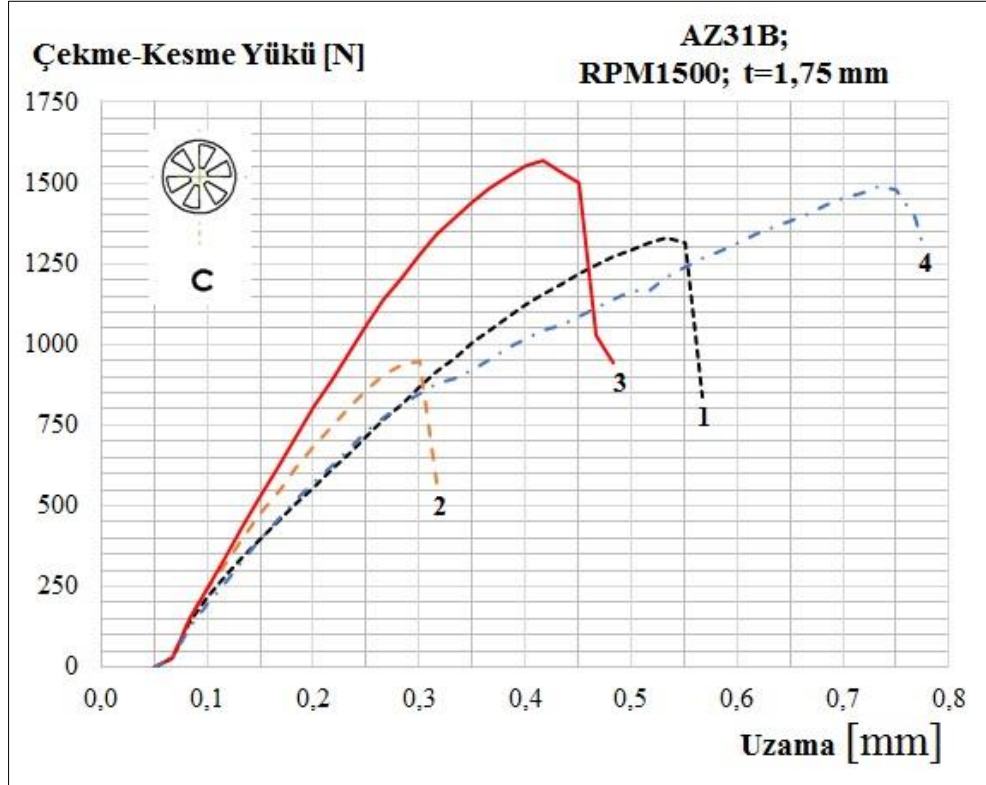
Resim 3.30. Kalınlığı 1,75 mm magnezyum alaşımı AZ31B sa malzemenin 1500 ve 2000 devir/dakika da birleştirilip, çekme kesme deneyi ile kopartılan birleşme ara yüzeyi görüntüleri



Resim 3.31. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 ve 1500 devir/dakikada birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyi sonundaki görünümleri

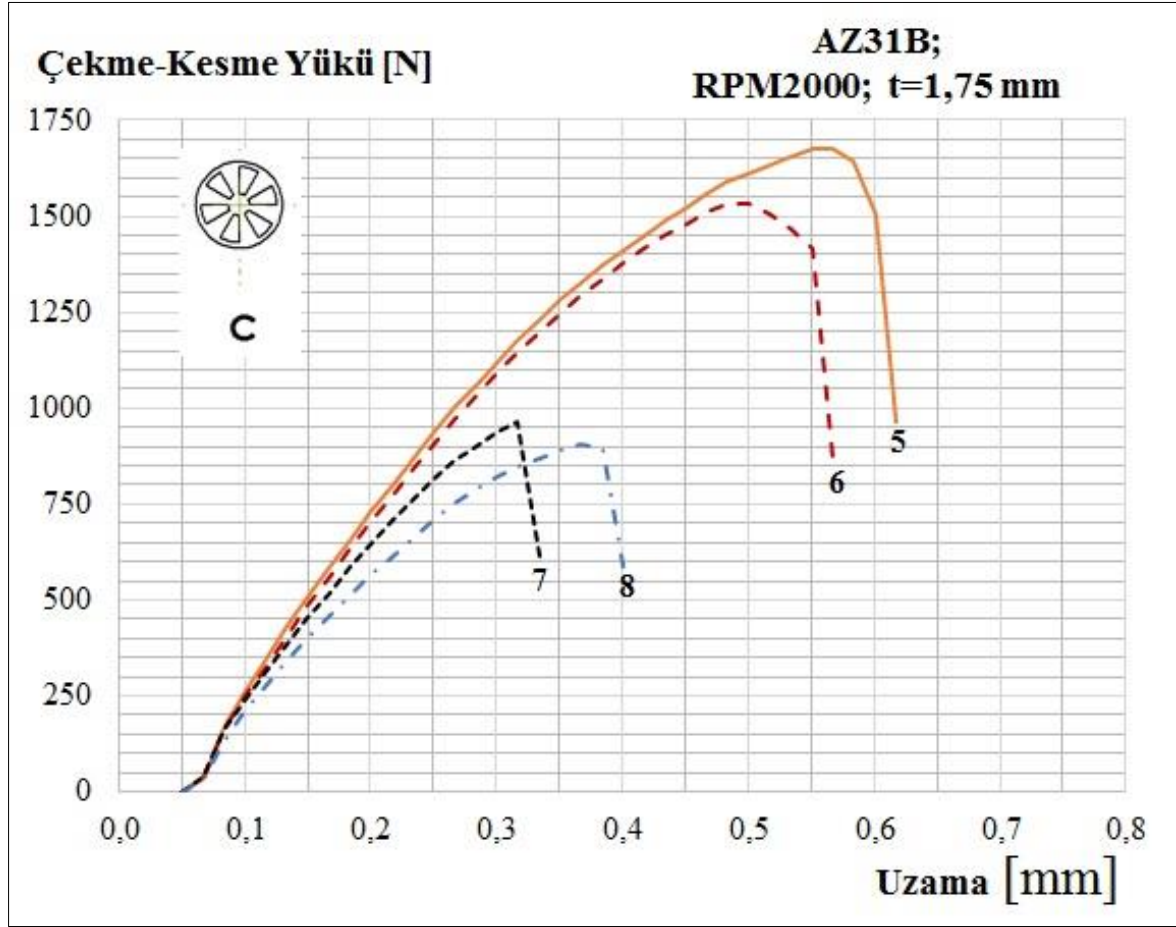
Resim 3.30 bu birleştirmelerin çekme-kesme deney sonundaki birleşme yüzeylerini ve Resim 3.31 üç nokta eğme deneyi sonunda eğilmiş durumlarını göstermektedir.

3.6.1. Çekme-eğme testi



Şekil 3.16. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1500 devir/dakika’da birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekteştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümlü (1, 2, 3 ve 4 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

Farklı 1500 ve 2000 dönme sayılarında gerçekteştirilen SKNK birleştirmelerinin çekme-kesme deney sonuçları Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



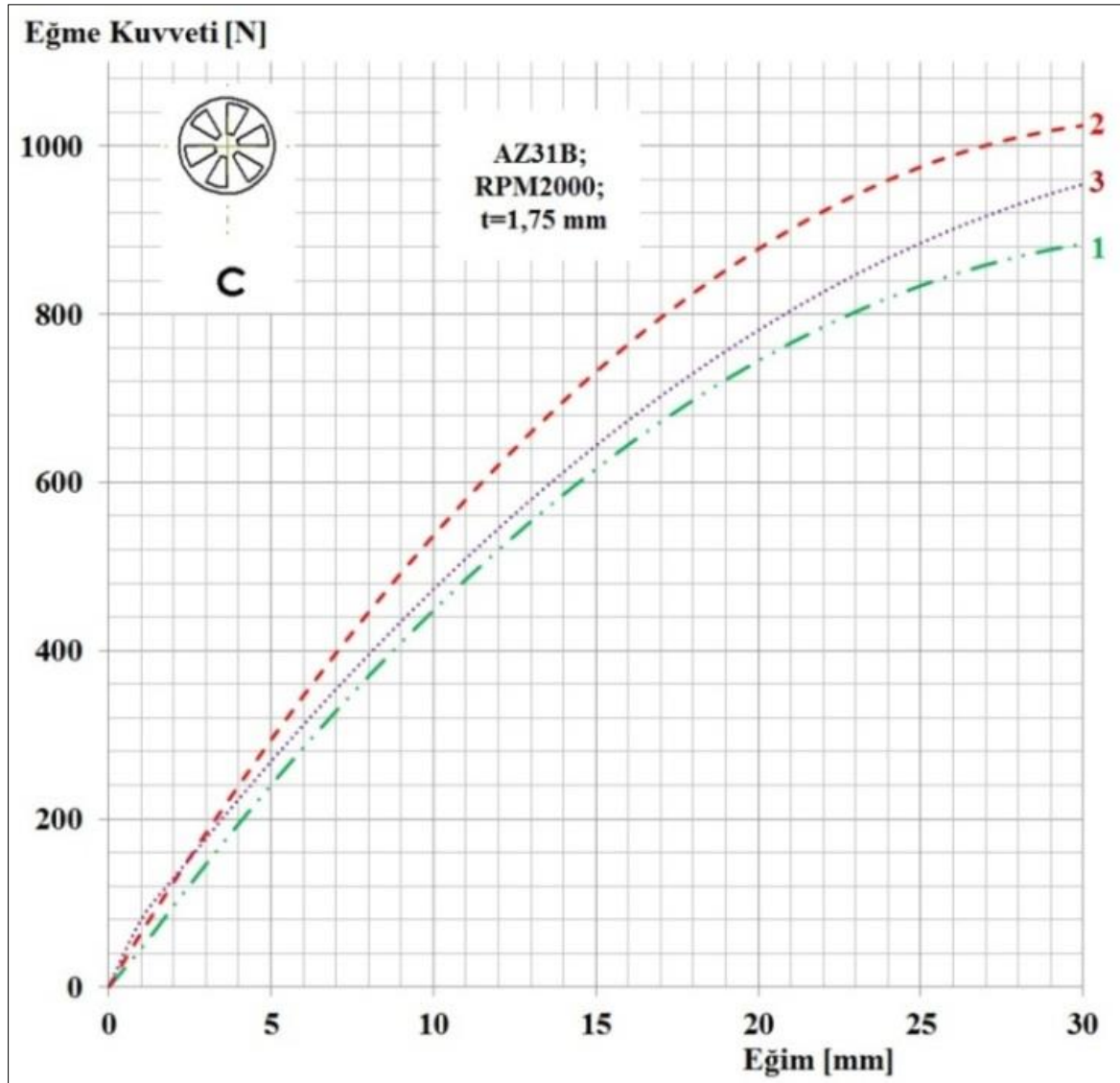
Şekil 3.17. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 devir/dakika’da birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (5, 6, 7 8 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

Çizelge 3.7. Devir sayısı 1500 devir/dak ve 2000 devir/dak ile birleştirilen malzemelerin çekme-kesme maksimum kuvvetleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

Numune No		1	2	3	4	Ortalama
Maksimum Kuvvet F_B [N]	1500 dev/dak	1332	947	1568	1489	1334
Numune No		5	6	7	8	Ortalama
Maksimum Kuvvet F_B [N]	2000 dev/dak	1675	1534	962	908	1270

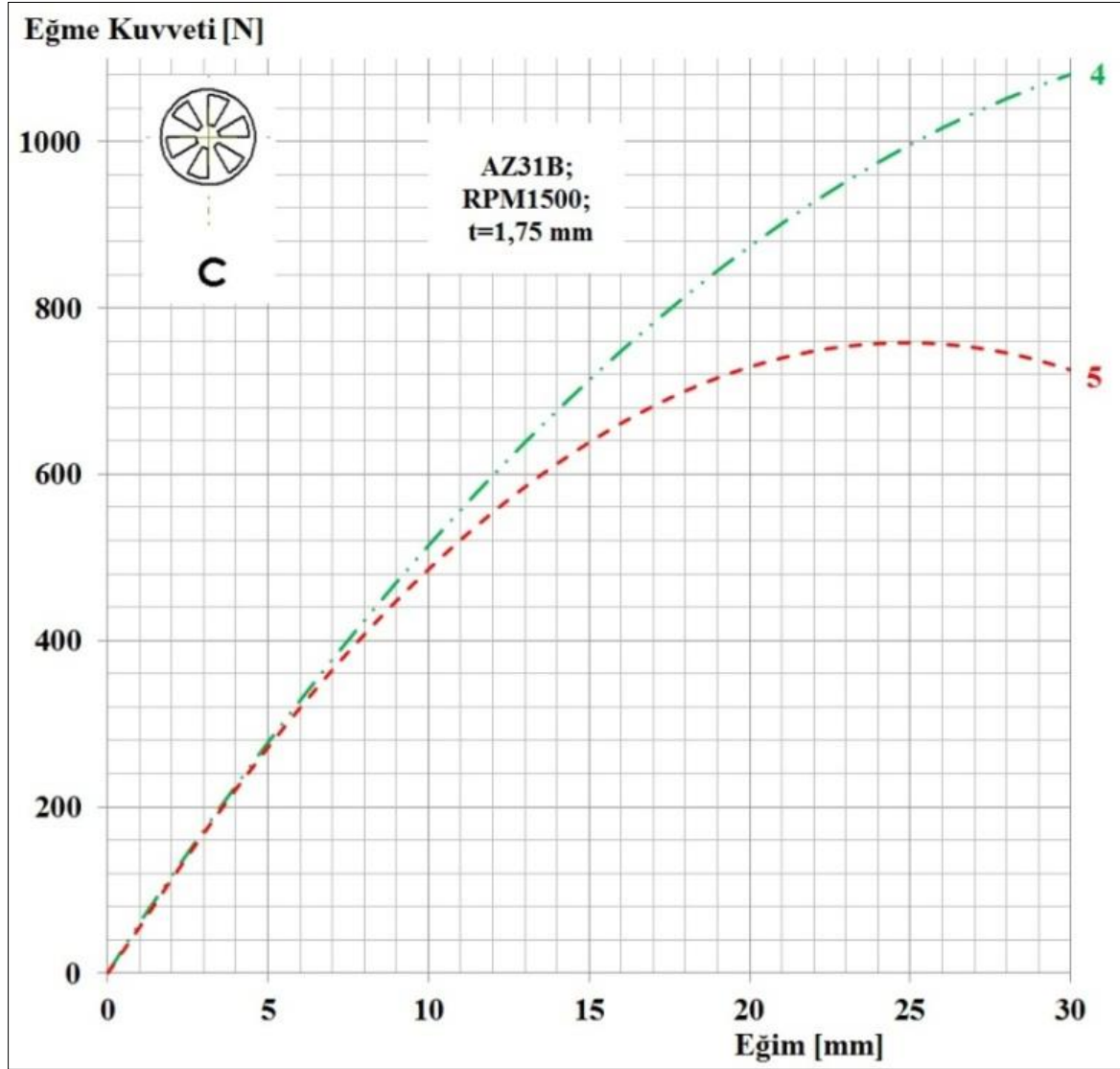
Çekme-kesme deneyinde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri ve ortalamaları Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. İki farklı devir sayısındaki ekme-kesme deneyleri sonucunda ikisi arasında pek belirgin fark görülmemektedir, ancak 2000 dev/dak’da çekme kuvvetleri birbirine daha yakın olmasından tekrarlanabilir ve kararı olarak değerlendirilmiştir.

3.6.2. Üç-nokta eğme testi



Şekil 3.18. AZ31B magnezyum alaşımları 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 devir/dakika’da birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

AZ31B magnezyum alaşımları 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 2000 ve 1500 devir/dakika da birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünüşleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.19. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1500 devir/dakika da birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümü (4 ve 5 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

3.6.3. Mekanik testlerin değerlendirilmesi

Çekme-kesme test sonuçları değerlendirildiğinde 1500 ve 2000 devir/dakika da iyi birleştirmelerin yapıldığı tespit edilmiştir. En iyi ve tekrarlanabilir birleştirmenin 2000 dev/dak’da olduğu gözlemlenmiş (Şekil 3.18 ve Şekil 3.19) ayrıca maksimum kesme kuvvetinin de burada olduğu deney sonuçları ile gösterilmiştir (Çizelge 3.7).

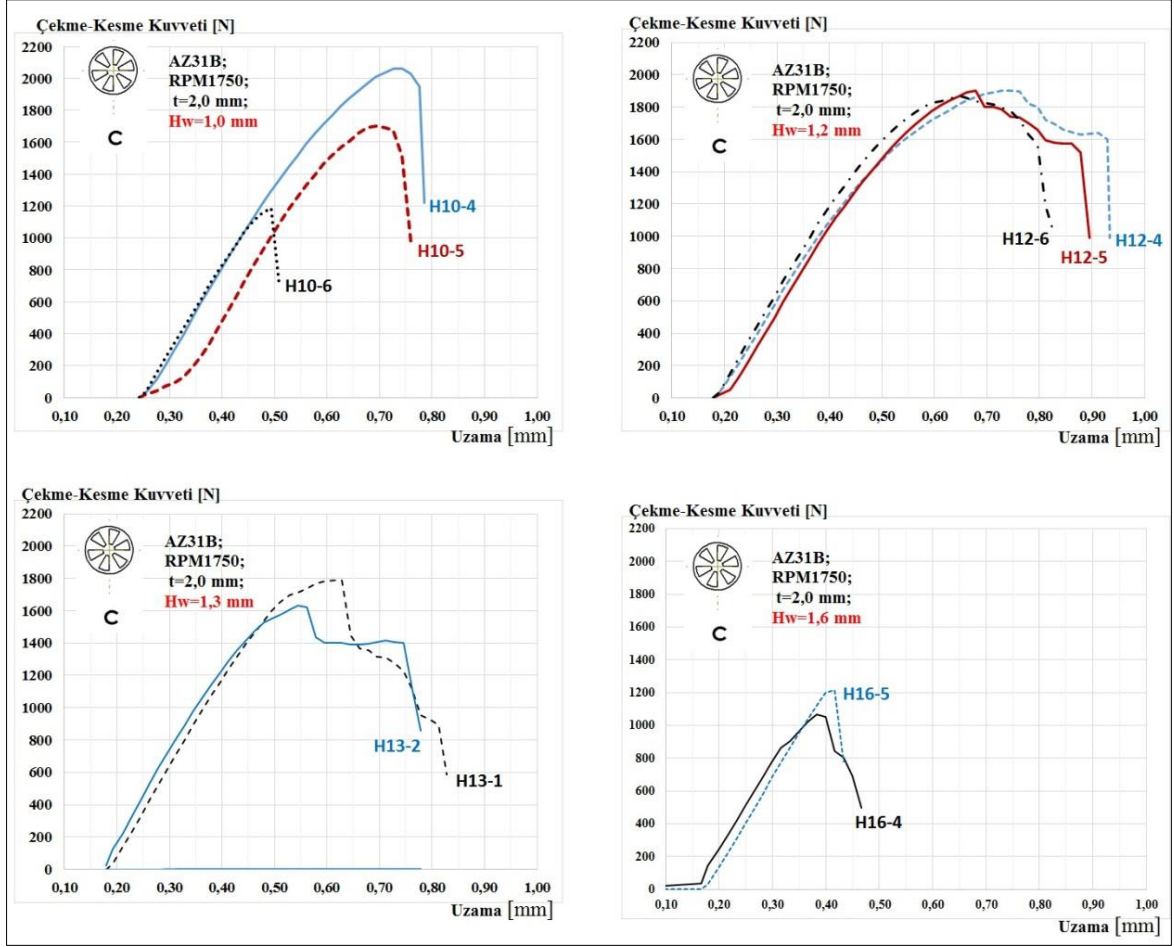
Üç-nokta eğme testlerine göre; 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak ile yapılan birleştirmelerin maksimum eğme kuvvetleri yaklaşık aynı çıkmıştır. Ancak 3000 devir/dakika ile

gerçekleştirilen birleştirmelerin maksimum eğme kuvvetleri çok daha düşük olduğu görülmüştür.

3.7. SKNK’da Karıştırıcı Uçun Malzemeye Dalma Yüksekliğinin Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile dönme hızı 1750 dev/dak ile AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki sac malzemeler SKNK ile standart ölçülerle birleştirilmiştir. Karıştırıcı uç omuz profilinin malzemeye dalma yüksekliği 0,8 mm; 1,0 mm; 1,2 mm; 1,3 mm; 1,6 mm çeşitli yüksekliklerde daldırılarak; bu dalma yüksekliğinin birleştirmeye etkisi incelenmiştir. Dalma yüksekliğinin 0,8 mm ve daha altında sağlıklı birleştirmeler elde edilememiştir. Dalma 0,1mm/san ile istenilen yüksekliğe erişme zamanı kadarda bekletme süresi uygulanmıştır. Örneğin 1,2 mm için 12 saniye dalma süresi 12 saniye’de bekletme süresi uygulanmıştır. Dalma yüksekliği 1,6 mm ve üzerinde dalmanın fazla olması nedeniyle üst malzeme çok yıprandığı ve bükülmeler olduğu görülmüştür. 1,0mm ile 1,3 mm arasındaki birleştirmelerin iyi olduğu tespit edilmiştir.

3.7.1. Çekme-kesme testi



Şekil 3.20. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (Hw)’nde birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (Hxx-x nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

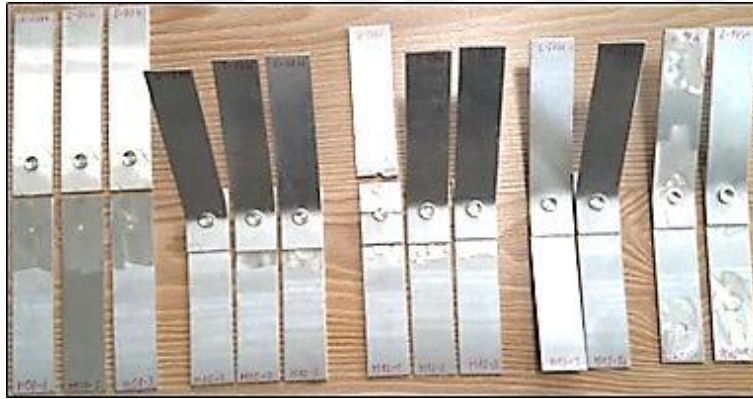
Karıştırıcı ucun numuneye farklı dalma yükseklikleri ile gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin çekme-kesme deney sonuçları Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

Çekme-kesme deneyinde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri ve ortalamaları Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Devir sayısı 1750 dev/dak ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliğinde birleştirilen malzemelerin çekme-kesme maksimum kuvvetleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

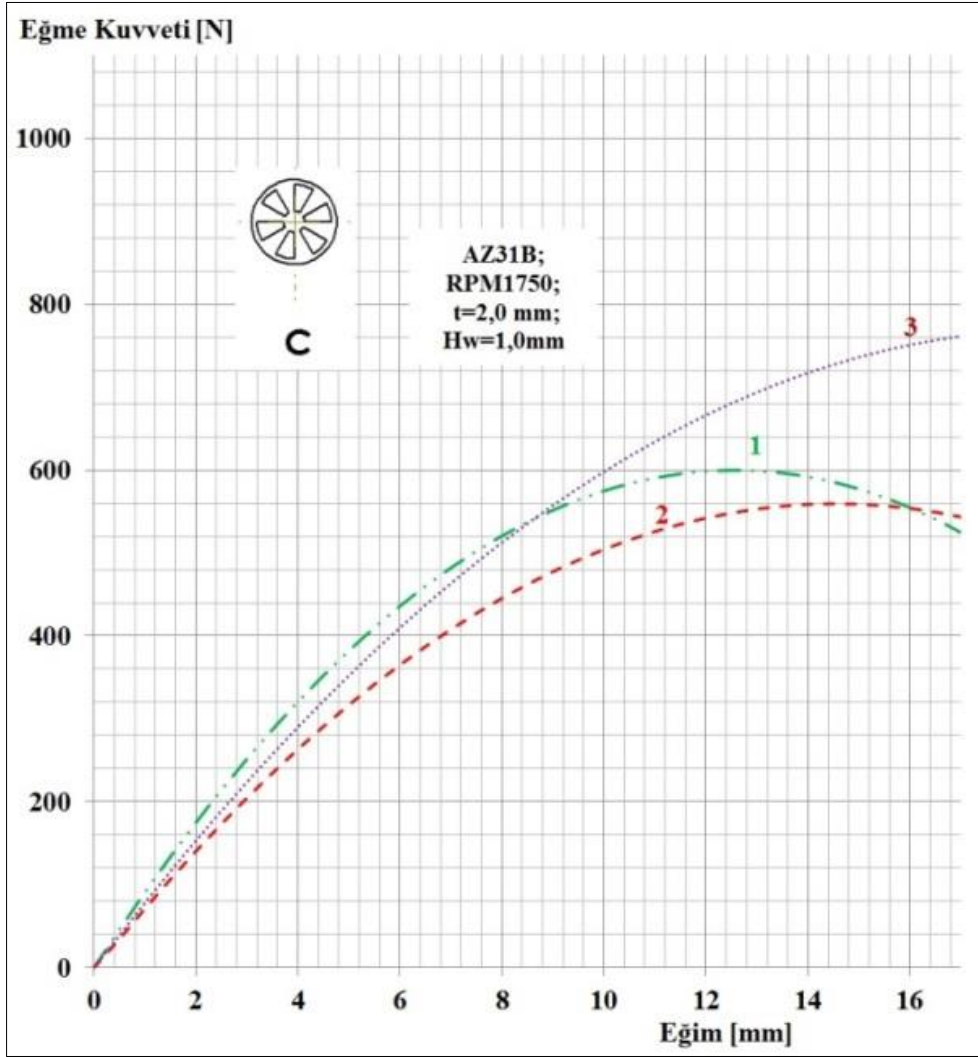
Parametre	Numune:	H10-4	H10-5	H10-6	H12-4	H12-5	H12-6	H13-1	H13-2	H16-5	H16-6
Dönme Sayısı	RPM	1750 dev/dak									
Dalma Yüksekliği	H_w [mm]	1,00			1,20			1,3		1,3	
Numune Kalınlığı	t [mm]	2,00			2,0			2,0		2,0	
Dalma-Kalınlık Oranı	$H_w/(2t)$ [-]	0,25			0,30			0,33		0,33	
Mak. Çekme Kuvveti	F_u [N]	2059	2059	2059	1903	1900	1872	1790	1400	1064	1214
Mak. Çekme Kuvvetinin Ortalaması	$F_{u,m}$ [N]	1649			1892			1595		1390	

3.7.2. Üç-nokta eğme testi



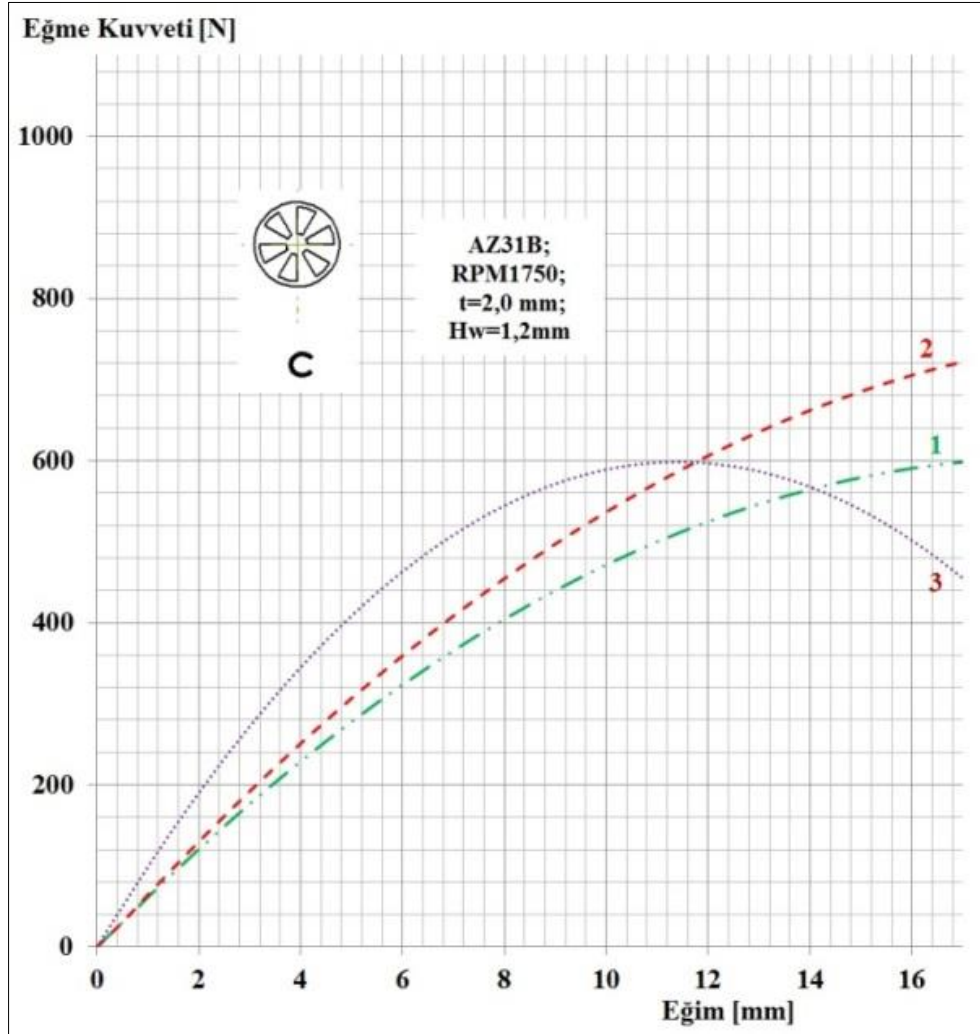
Resim 3.32. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 devir/dakika (RPM) ve 1,0 mm, 1,2 mm, 1,3 mm ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (H_w)’de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinden sonraki görünümleri (Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 dev/dak’da ve farklı dalma yüksekliklerinde ($H_w = 1,0$ mm; 1,2 mm; 1,3 mm ve 1,6 mm) birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen, eğilmiş görünümleri Resim 3.32’de görülmektedir.

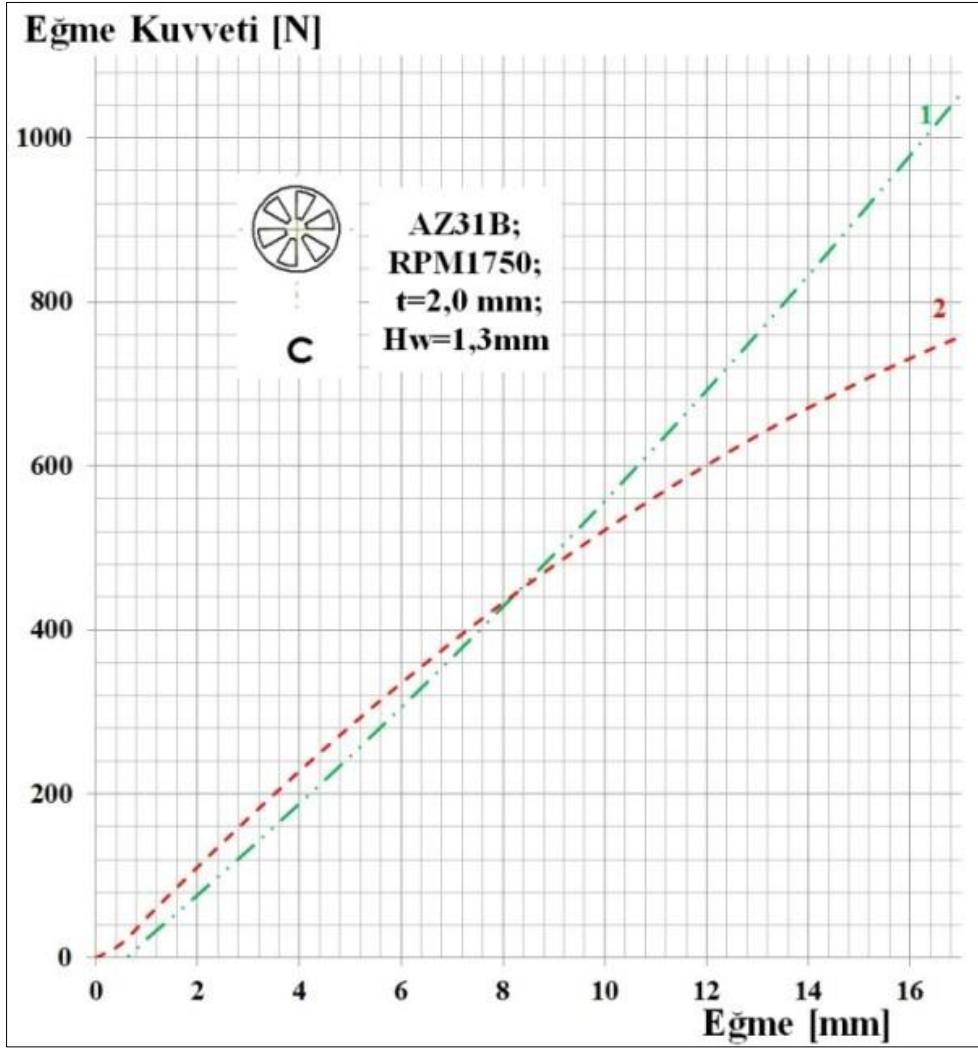


Şekil 3.21. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,0 mm daldırma yüksekliği (H_w)’de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

Eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümleri $H_w = 1,0$ mm için Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

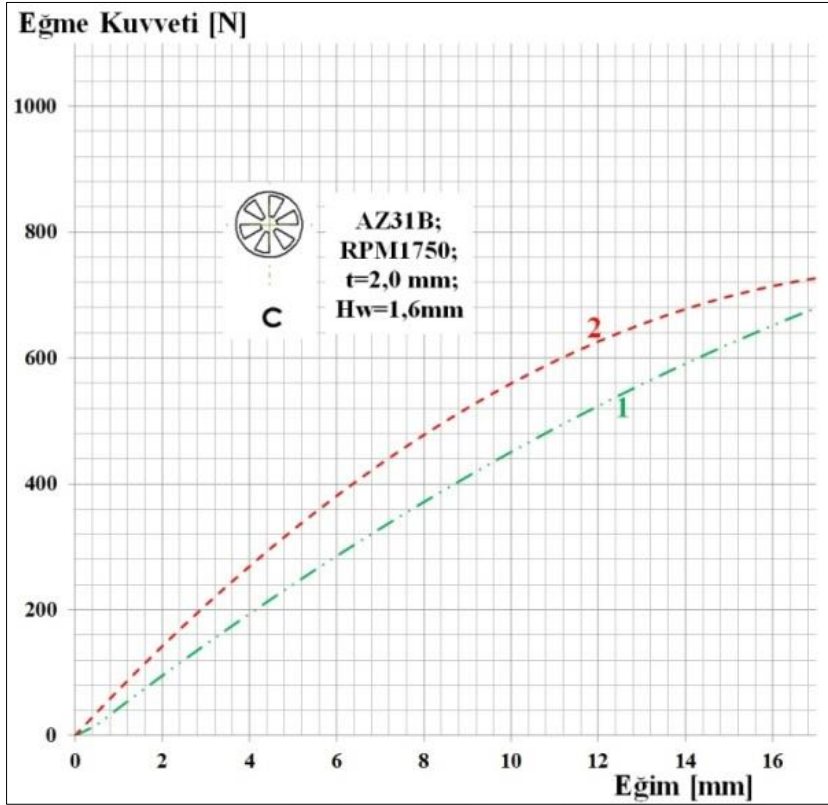


Şekil 3.22. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,2 mm daldırma yüksekliği (H_w)’de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2 ve 3 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)



Şekil 3.23. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,3 mm daldırma yüksekliği (Hw)’de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1 ve 2 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

Eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünümleri $H_w = 1,3$ mm için Şekil 3.23 ve $H_w = 1,6$ mm için Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki (t) saçların SKNK ile 1750 dev/dak (RPM) ve 1,6 mm daldırma yüksekliği (Hw)’de birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen Kuvvet-Eğilme değerlerinin grafiksel görünümü (1 ve 2 nolu numuneler; Karıştırıcı uç omuz profil tipi “C”)

3.7.3. Mekanik testlerin değerlendirilmesi

AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 devir/dakika da ve farklı dalma yüksekliklerinde (Hw = 1,0 mm; 1,2 mm; 1,3 mm ve 1,6 mm) birleştirildikten sonra; çekme kesme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. En iyi birleştirmenin 1,3 mm dalmada gerçekleştiği görülmüştür. Bu en iyi dalma miktarını iki levhanın kalınlığına oranlandığımızda $1,3 \text{ mm} / (2 \times 2 \text{ mm}) = 0,3$ elde edilmiştir.

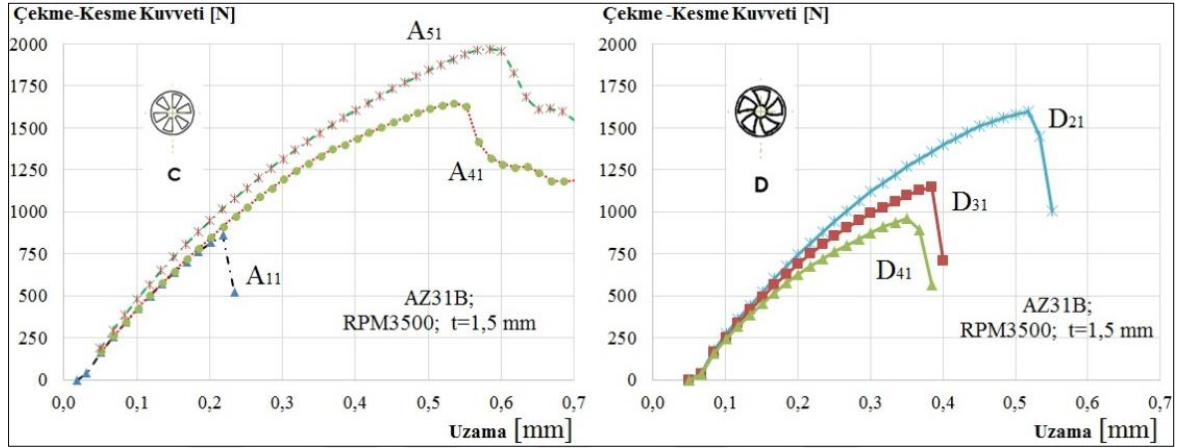
Sonuç olarak birleştirme kalınlığına bağlı dalma oranı yaklaşık % 30 olması gerekmektedir.

3.8. Malzeme Kalınlığının Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Karıştırıcı uç omuz profili tipi “C” ile AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm kalınlığındaki saç malzemeler SKNK ile standart ölçülerle birleştirilmiştir. Bu üç

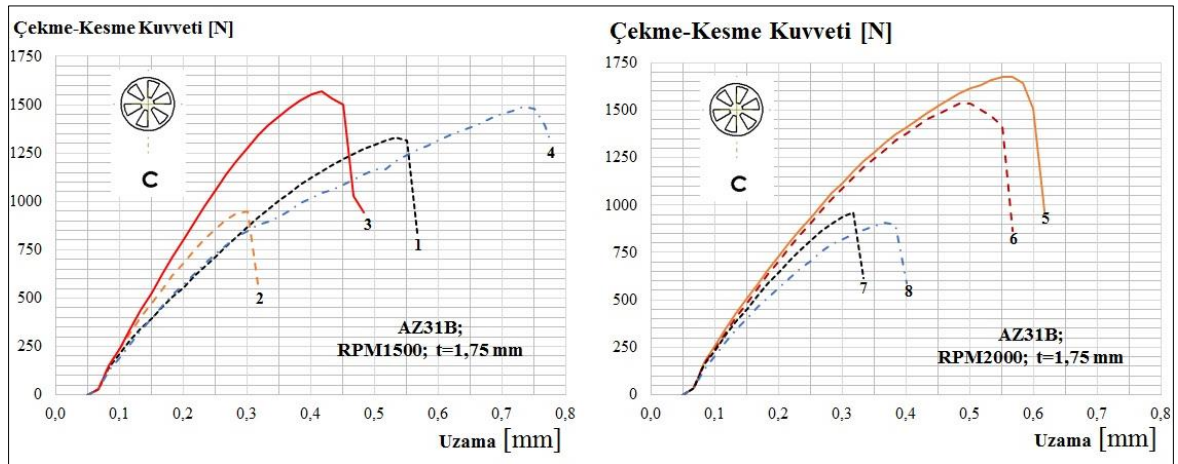
farklı kalınlıklarda seçilen AZ31B numunelerin birleştirmeye etkisi çekme-kesme ve üç nokta eğme testleri yapılarak incelenmiştir.

3.8.1. Çekme-kesme testi



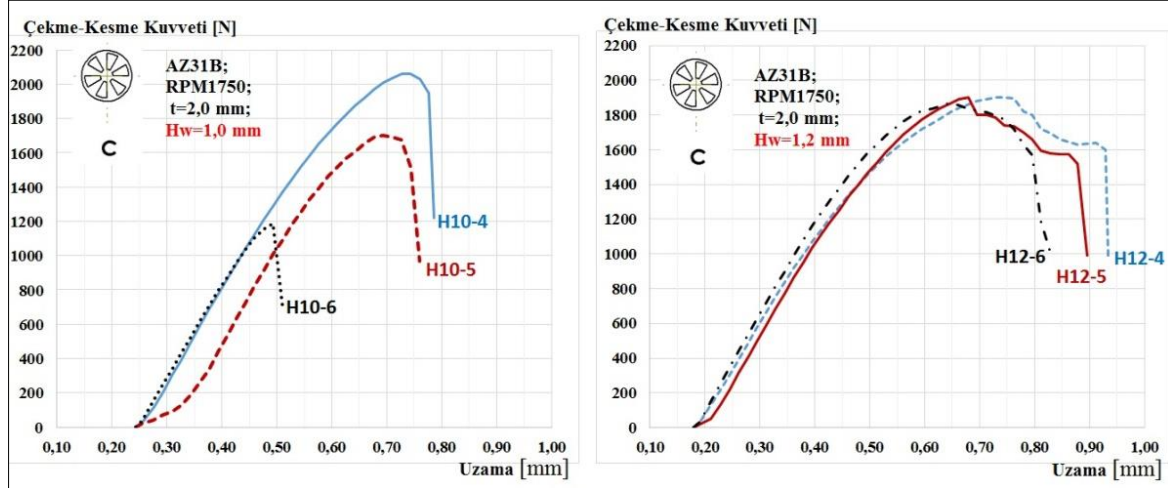
Şekil 3.25. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 3500 dev/dak, 0,6 mm daldırma yüksekliği ve karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ve “D” ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (Axx ve Dxx nolu numuneler)

Farklı levha kalınlıkları (1,5 mm; 1,75mm; 2,0 mm)’de gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin çekme-kesme deney sonuçları 1,5 mm için Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 0,6 mm daldırma yüksekliği, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak’da karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu numuneler)

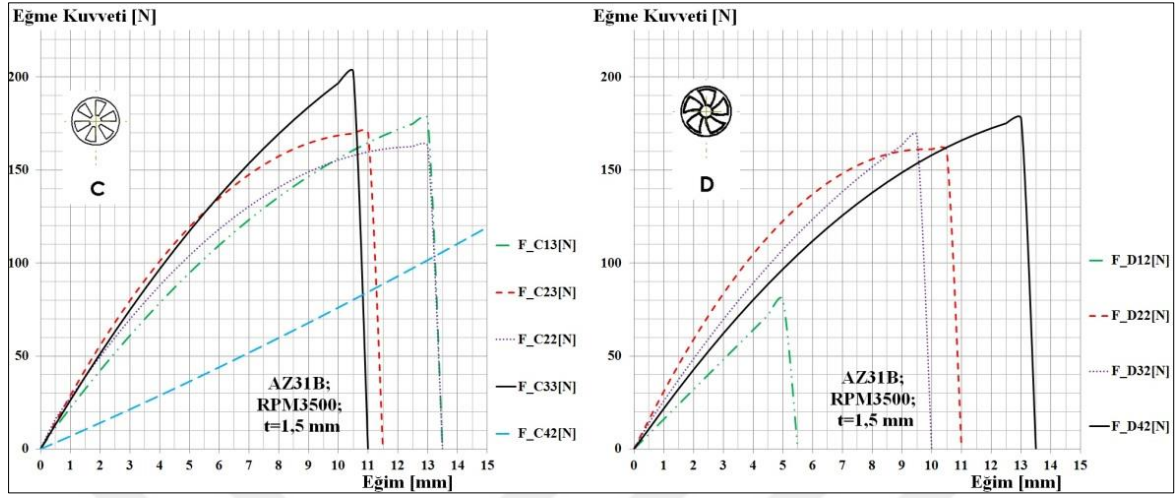
Farklı levha kalınlıkları (1,5 mm; 1,75mm; 2,0 mm)'de gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin çekme-kesme deney sonuçları 1,75 mm için Şekil 3.26 ve 2,0 mm için Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 devir/dakika, 1,0 mm ve 1,2 mm daldırma yüksekliğinin de karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile birleştirildikten sonra çekme-kesme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (H10-x ve H12-y nolu numuneler)

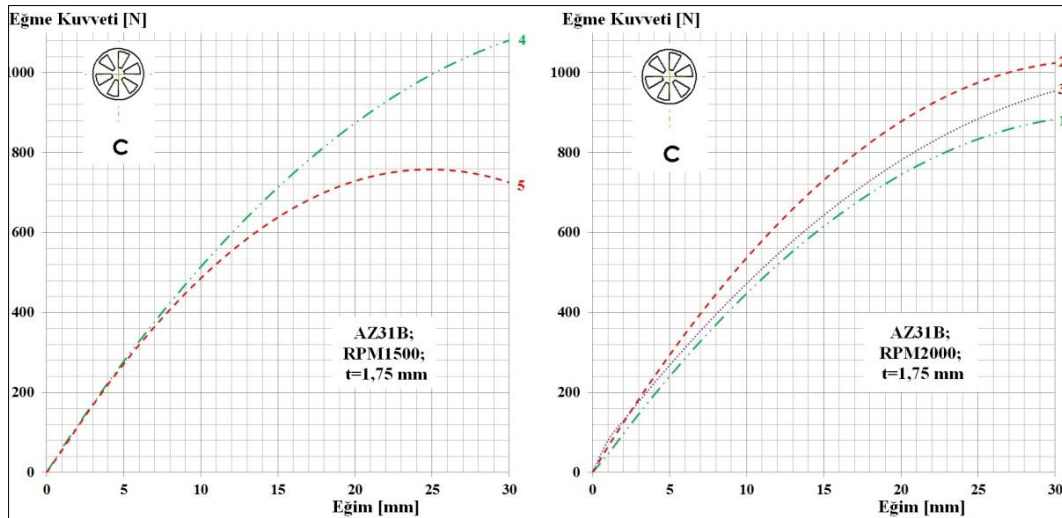
Yukardaki şekillerden görüldüğü gibi en yüksek çekme kuvveti; 2 mm kalınlık için 1,9 kN, 1,75 mm kalınlık için 1,6 kN ve 1,5 mm kalınlık için ise 1,3 kN elde edilmiştir. Buradan çekme kuvvetinin malzeme kalınlığına orantısal olarak ($\sim 1\text{kN/mm}$) lineer bağlıdır.

3.8.2. Üç-nokta eğme testi

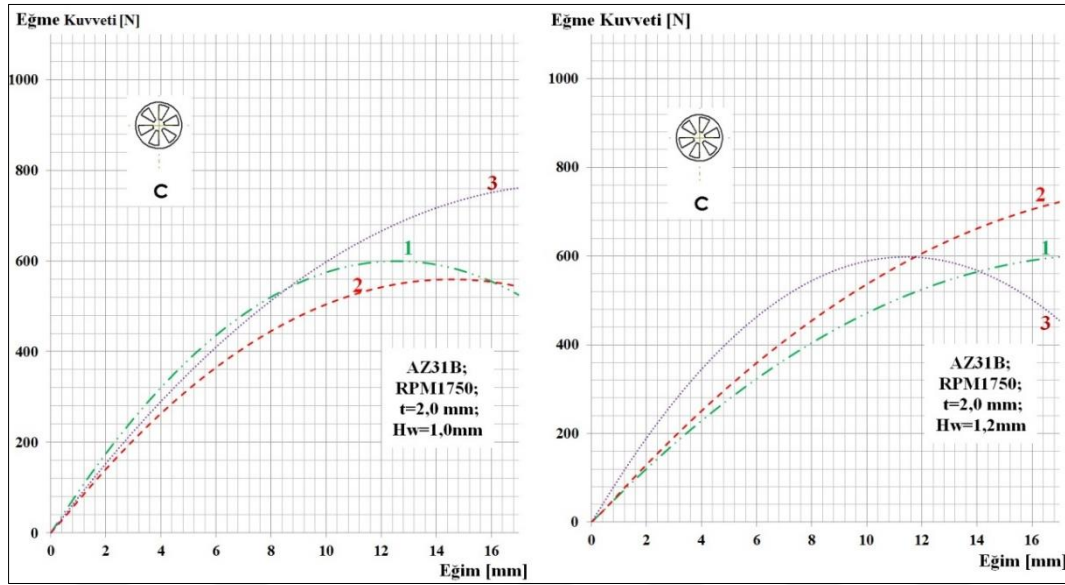


Şekil 3.28. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 3500 devir/dakika, 0,6 mm daldırma yüksekliği ve karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ve "D" ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü

Test parametresi seçilen 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm malzeme kalınlıkları için gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonuçları, eğme kuvvetinin eğime bağlı grafiği 1,5 mm için Şekil 3.28 ve 1,5 mm için Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 0,6 mm daldırma yüksekliği, 1500 devir/dakika ve 2000 devir/dakika da karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü



Şekil 3.30. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 devir/dakika, 1,0 mm ve 1,2 mm daldırma yüksekliğinde karıştırıcı uç omuz profil tipi “C” ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen kuvvet-uzama değerlerinin grafiksel görünümü (1, 2, 3 nolu numuneler)

Test parametresi seçilen 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm malzeme kalınlıkları için gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonuçları, eğme kuvvetinin eğime bağlı grafiği 2,0 mm için Şekil 3.30’da gösterilmiştir.

Yukarıda Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da görüldüğü gibi en yüksek eğme kuvveti; 1,75 mm kalınlık için 1,0 kN, 2,0 mm kalınlık için 0,6 kN ve 1,5 mm kalınlık için ise 0,16 kN elde edilmiştir. Buradan eğme yüküne karşı 1,75 mm kalınlıktaki birleştirme 1,5 mm ve 2,0 mm kalınlığa göre dayanımı daha yüksek çıkmıştır.

3.8.3. Mekanik testlerin değerlendirilmesi

Çekme-kesme deney sonuçları incelendiğinde deneylerde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri pek fazla farklılık göstermediği görülmektedir. Bunun sebebinin numune kalınlığına bağlı olarak dalma yüksekliğinin ayarlanması ve en iyi dönme hızına benzer hızlarda birleştirmelerin yapılmış olmasıdır.

Çizelge 3.9. Numune kalınlığı (t)'na bağlı en iyi birleştirme parametreleri olarak dalma yüksekliği (H_w) ve dönme sayısı (RPM)

	Numune kalınlığına bağlı en iyi dalma yüksekliği ve dönme sayısı		
t [mm]	1,50	1,75	2,00
H _w [mm]	0,87	1,02	1,16
RPM [dev/dak]	1800		

Bu nedenle önemli etki faktörü olarak; Çekme-kesme deneyinde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri ve ortalamalarıyla elde edilen numune kalınlığına bağlı olarak belirlenen en iyi dalma yüksekliği ve dönme sayısı hesaplanarak Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Üç-nokta eğme testlerine göre; en fazla eğme kuvvetlerine 1,75 mm numunede, 1500 dev/dak ve 0,6 mm dalma yüksekliğiyle yapılan birleştirmelerde olduğu gözlemlenmiştir. Kalınlığı 2,0 mm numunede, 1750 devir/dakika ve dalma yüksekliği 1,0-1,2 mm ile yapılan birleştirmelerde de oldukça yüksek eğme kuvvetleri elde edilmiştir. En düşük kuvvetlere ise 3000 devir/dakika ile gerçekleştirilen birleştirmelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak karıştırıcı uç dönme hızının 2000 dev/dak'yı geçmemesi gerektiği değerlendirilebilir.

3.9. Birleştirme Süresinin Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Karıştırıcı ucun malzemeye dalma hızı süresi ve daha sonra ucun bekleme süresinin pimsiz karıştırıcı uç kullanarak SKNK ile birleştirmeye olan etkisini görmek için testler yapılmıştır. Bu testlerde farklı dalma hızları ve bekleme süreleri ile farklı başarılı birleştirmeler elde edilmiştir. Birleştirmelerde yaklaşık 12 saniye dalma süresi (T_w) ve 12 saniye bekletme süresi (T_e) ile en iyi birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Toplam sürenin 20 saniyenin altında olması durumunda birleştirmenin oluşması için yeterli sıcaklığa ulaşılamaması nedeniyle uygun olmadığı tespit edilmiştir. Nümerik simülasyonlarda elde edilen sıcaklıklara 10 saniye toplam sürede ulaşılamamış olup, bunun sürtünme faktörü $\mu = 0,6$ 'nın sabit kalmayıp ergime noktasına doğru sıfıra yaklaşmasından kaynakladığı söylenebilir. Ancak termomekanik olarak en iyi birleştirmelerin dalma ve bekleme süresi eşit olacak şekilde toplamda yaklaşık 24 saniyelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Numune kalınlığına bağlı dalma yüksekliği yanında dalma ve bekleme süresinin birleştirmeye önemli derecede etkili olduğu ve normalde bundan sonraki birleştirmeler için en iyi toplam birleştirme süresi yaklaşık 24 saniye (dalma ve bekleme süresi eşit olacak şekilde) ile gerçekleştirilmiştir.

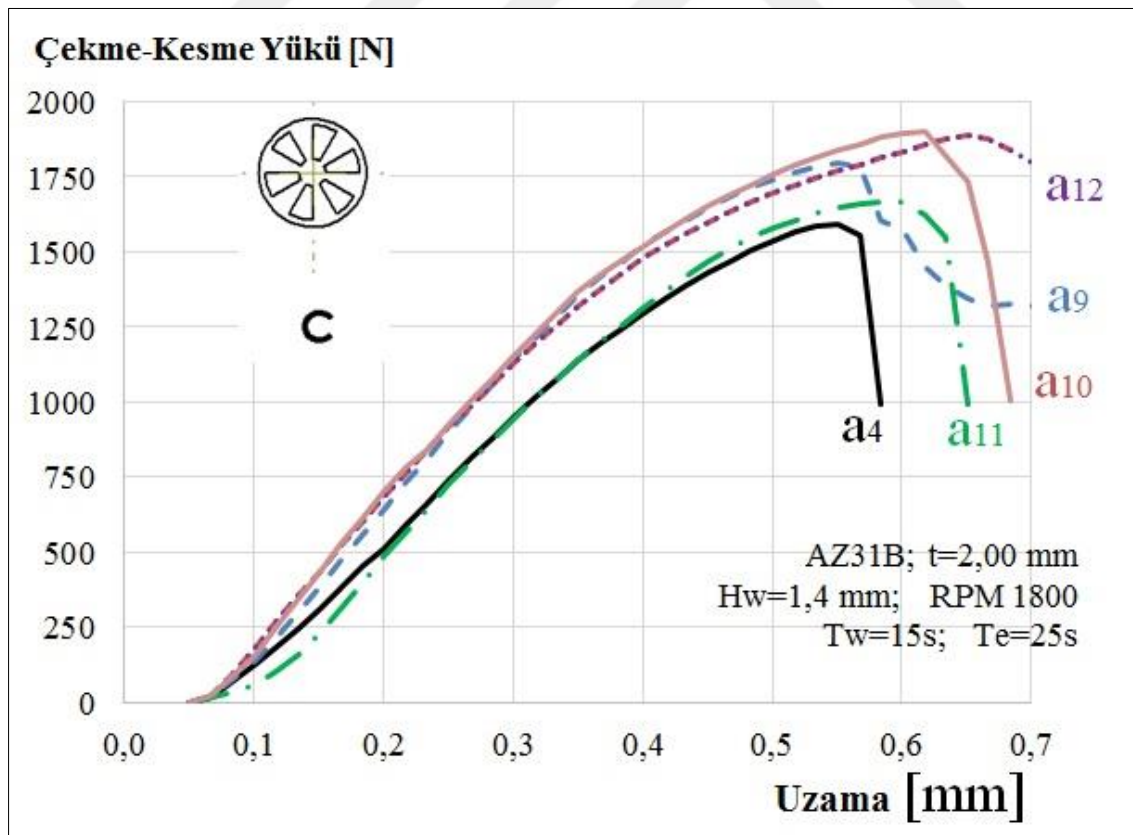
3.10. Çizelge 3.9’da Gösterilen En İyi Parametreler İle Gerçekleştirilen Birleştirmenin Mekanik Özelliklerinin ve Metalografik Yapısının İncelenmesi

3.10.1. Çekme-kesme testi

Magnezyum alaşımı 1,5 mm, 1,75 mm, ve 2,0 mm AZ31B levhaların çekme-kesme test sonuçları

Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm, 1,75 mm ve 1,5 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonraki çekme-kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri 2,0 mm levha için Şekil 3.31, 1,75 mm levha için Şekil 3.32 ve 1,5 mm levha için Şekil 3.33’de verilmiştir. Ayrıca maksimum çekme kesme kuvveti ile ortalaması 2,0 mm levha için

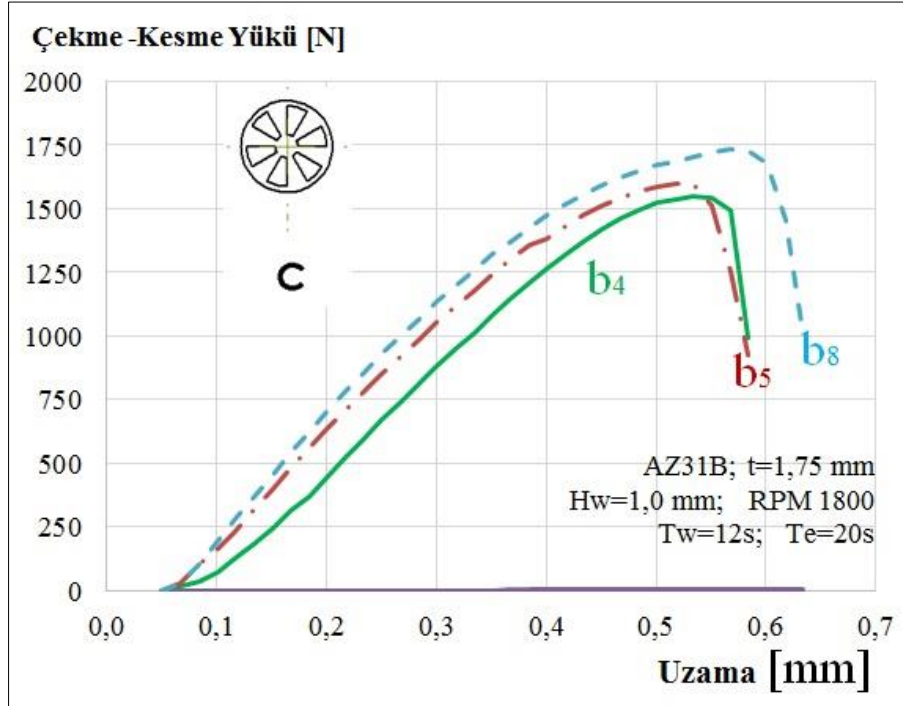
Çizelge 3.10; 2,0 mm levha, Çizelge 3.11; 1,75 mm levha için ve Çizelge 3.12; 1,5 mm levha için gerçekleştirilen test sonuçlarını ve ortalamasını göstermektedir.



Şekil 3.31. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (a_{xx} nolu numuneler)

Çizelge 3.10. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra testlerde elde edilen maksimum çekme kesme kuvveti (F_u) ve ortalaması

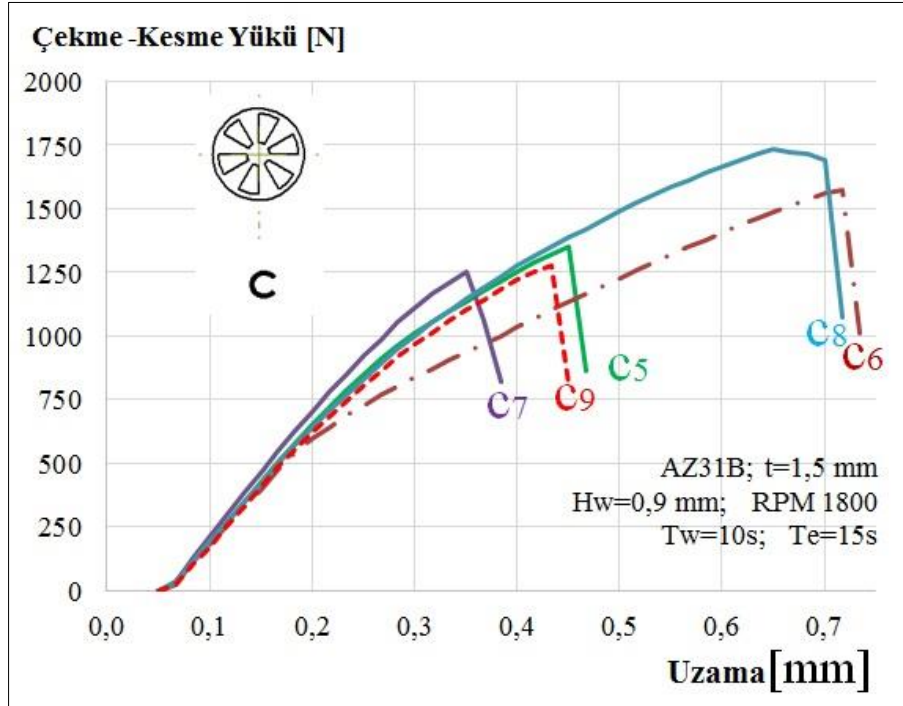
Numune:	a4	a9	a10	a11	a12
F_u [N]	1593	1796	1902	1667	1891
Ortama F_u ,m [N]	1770				



Şekil 3.32. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (b_x nolu numuneler)

Çizelge 3.11. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme maksimum kesme kuvvetleri ve ortalaması

Numune	b4	b5	b8
F_u [N]	1549	1597	1732
Ortama F_u ,m [N]	1626		

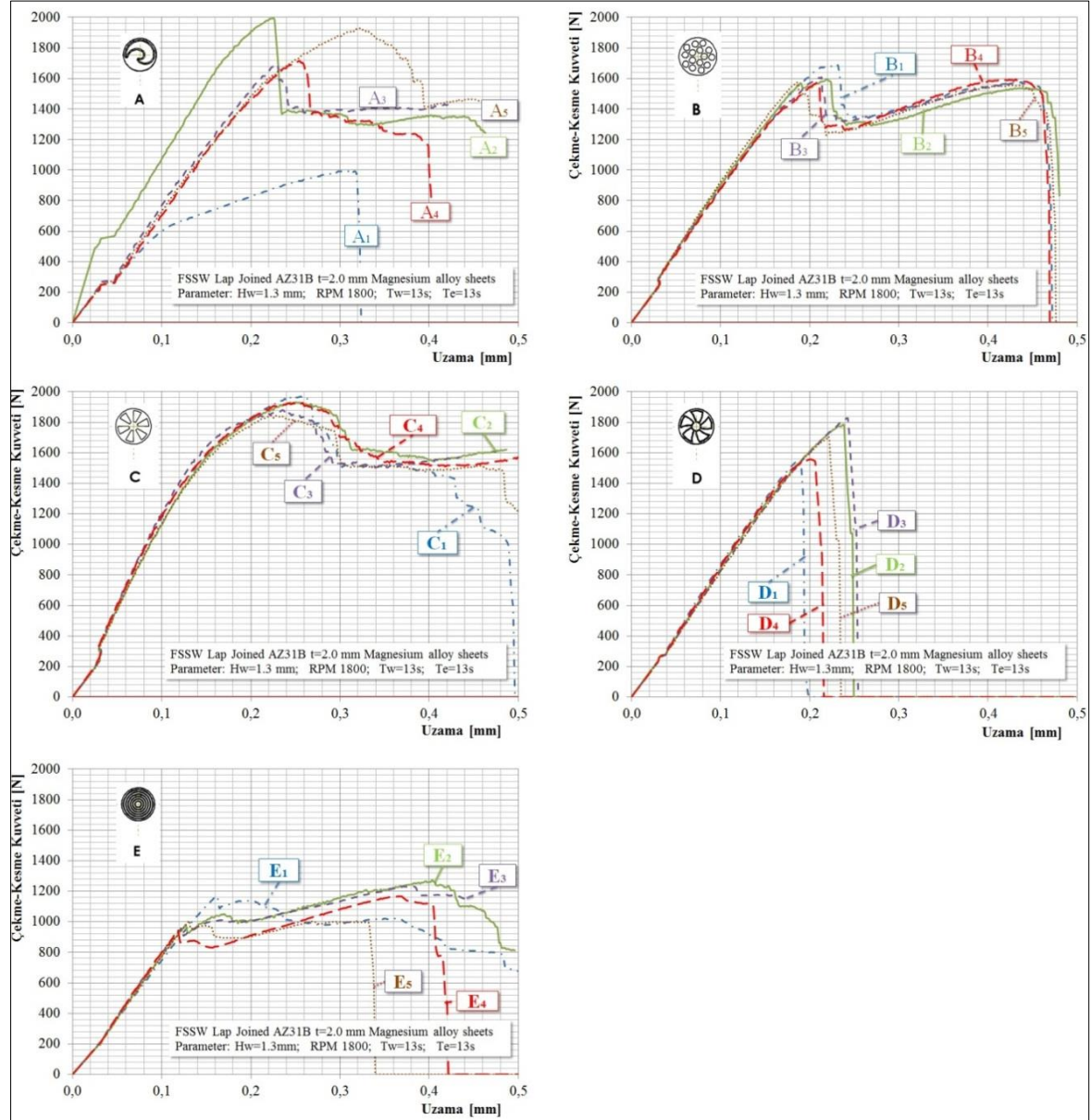


Şekil 3.33. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (C_x nolu numuneler)

Çizelge 3.12. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm levhaların SKNK ile birleştirildikten sonra maksimum çekme kesme kuvvetleri ve ortalaması

Numune	c5	c6	c7	c8	c9
Fu [N]	1351	1575	1253	1730	1277
Ortama Fu,m [N]	1437				

Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 2,0 mm kalın lamaların farklı omuz profillerine göre çekme kesme test sonuçları



Şekil 3.34. Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm levhaların SKNK ile farklı karıştırıcı uç omuz profil tasarımları ile birleştirildikten sonra çekme kesme kuvvetinin uzamaya bağlı grafikleri (A_x, B_x, C_x, D_x ve E_x nolu numuneler)

Şekil 3.35’de 2,0 mm levha kalınlığı sabit tutularak tekrar Çizelge 3.9’da gösterilen en iyi parametreler ile SKNK birleştirilmesi yapılarak, karıştırıcı uç omuz profil tasarımları (A, B, C, D ve E) ile yapılan çekme-kesme testleri sonucunda en yüksek ve genliği az kuvvetlere yine C tipinde erişildiği tespit edilmiştir. A profil tipinde çekme-kesme kuvvetinin genliği çok geniş ve bu neden ile güvenilir bulunmamıştır. C profilinden sonra sırası ile D, A, B ve

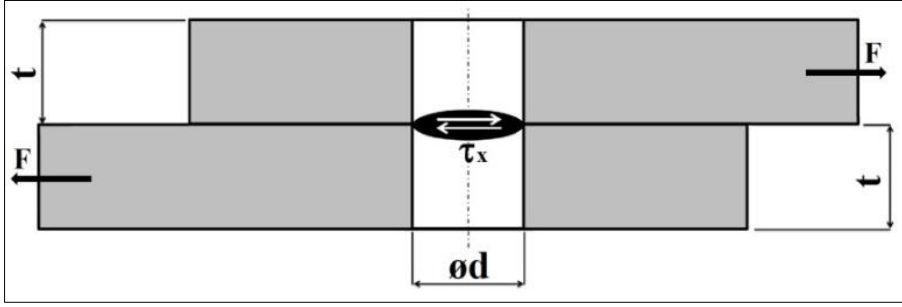
E geldiği görülmektedir. Genlik genişliği küçükten büyüğe sırası ile C, B, D, E ve A olarak sıralanmaktadır. Sonuç olarak C profili tasarımı her yönden bağlantı açısından daha iyi gerçekleşmektedir.

3.10.2. Çekme-kesme testinin analitik ve FEM-analizi ile karşılaştırması

SKNK ile birleştirilen AZ31B magnezyum malzemeden 1.5 mm kalınlığındaki levhalar çekme-kesme deneyi ile dayanımları, hasar yeri ve tipleri belirlenebilmektedir. Ancak birleştirilen malzemelerin farklı ana malzeme çekme testi özellikleri ve farklı elastik-plastik özelliklere sahiptir. Literatürde nokta kaynağı için elastik analiz yöntemleri detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Ancak malzeme AZ31B’de olduğu gibi dar elastik ve geniş plastik bölge özelliğine sahip ise elastik-elastik analiz yöntemleri yeterli değildir. Böyle özelliğe sahip yumuşak metal malzemeler için elastik-plastik analiz yöntemleri geliştirilmesi ve uygulanması gereklidir. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda nokta kaynağı yöntemi ile birleştirmeler için hiçbir elastik-plastik ya da tam-plastik bir analize rastlanamamıştır.

Elastik-elastik ve elastik-plastik analitik gerilim mekanizması araştırılmış ve analitik bir yaklaşımla gerilim ve kuvvet denklemleri oluşturulmuştur. SKNK-çekme-kesme-testi analitik incelemesinden elde edilen denklemler, FEM-Analizi ve çekme-kesme deneyleri ile doğrulanmıştır. Bununla birlikte hasarın nereden gerçekleşeceği gösterilmiştir. Çalışmanın sonunda üretilmiş olan analitik denklemler ile çekme-kesme testleri yapılmadan Denklem 3.16-3.31 ile hesaplanabilir hasar öngörüsü yapılabilecektir.

Direnç nokta kaynağı (DNK) ile yapılan birleştirmelerin gerilim mekanizmalarını inceleyen çok sayıda çalışma vardır (Matek, ve diğerleri, 2000). Normalde en basit ölçülendirme için yaygın olarak kullanılan Şekil 3.35’de gösterilen tasarım prensibi, ortalama kesme gerilimi (τ_x)’ne dayalı denklem (3.9)’da verilen nokta kaynağı tasarımı yapılabilmektedir (Shen, Gerlich, 2018).



Şekil 3.35. Nokta kaynağı tasarımı için yaygın kullanılan kesme gerilimine dayalı gerilim mekanizması

Akma değeri ortalama 500MPa olan AA7075-T6 alüminyum sac kullanmıştır ve amaçlandığı sonuca ulaşılmıştır. 7000-Serisi alüminyum malzeme sert ve yüksek mukavemete sahip kırılgan bir malzeme olmasından plastik deformasyonlara maruz kalmadan kopma hasar tipleri oluşmaktadır (Shen, Gerlich, 2018). Çalışmasında bu hasar tiplerini de göstermiştir. Ancak sünek bir malzemeyi modellemeye yetersizdir.

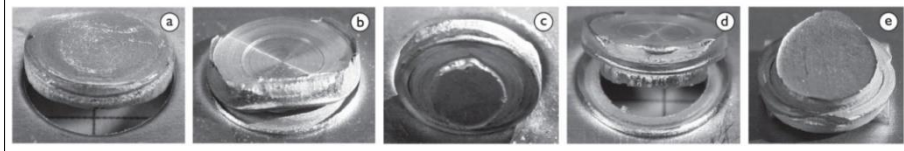
AA2024 alüminyum alaşımı sac malzemenin SKNK ve DNK yöntemleri ile gerçekleştirilen birleştirmelerin yalnızca kopma dayanımı çekme-kesme kuvvetlerini karşılaştırmıştır (Bozkurt ve diğerleri, 2018). AA2024 sünek bir malzemedir ve AZ31B ile karşılaştırıldığında ise, daha az sünek ve daha fazla dayanıma sahiptir. Ancak birleştirme bölgesindeki gerilim mekanizması hakkında bilgi sunmamıştır.

Vidalı bağlantının çeşitli FEM-Model teknikleri ile yapılmasını ve katılık değerlerinin nümerik ampirik belirlenmesine yönelik çalışmıştır (Kim ve diğerleri, 2007). Kullanılan malzemeler çok yüksek dayanımlı malzemeler olup burada yapılan çalışmaya, sadece FEM-Modelleme teknikleri açısından faydalanılmıştır.

Li ve diğerleri, (2007) çalışmalarında; magnezyum alaşımı malzemelerin SKK yöntemiyle birleştirilmesini özetlemiş ve magnezyum için mikro tane çapına ve sertliğe bağlı elastik-plastik lineer olmayan ampirik materyal modeli ortaya koymuştur. Burada çalışmadan elastik-plastik materyal modellemesi hakkında faydalanılmıştır.

Lai ve diğerleri, (2013), ultrasonik nokta kaynağı ile gerçekleştirilen magnezyum ile çelik malzemenin hasar tipleri (failure mods) ve yorulma dayanımlarını incelemişlerdir. Hasar tipleri ile ilgili bölümden faydalanılmıştır.

Parra ve diğerleri, (2011), AA6181-T4 alüminyum alaşımı levhaların SKNK ile birleştirilmesini ve çekme-kesme testindeki hasar tiplerini incelemişlerdir. Burada gösterilen her bir hasar tipine rastlanmakla birlikte, birleştirme iyi gerçekleştiğinde daha çok c)-tipi hasar meydana gelmektedir. Bunun sebebi üst levhanın anahtar deliği sebebi ile daha zayıf ve birleştirmenin bir özelliği olan ikincil moment oluştuğundandır.



Resim 3.33. Çekme-Kesme testinde oluşan hasar tipleri: a) Çevresel olarak kaynaktan hasar, b) 7 hasar (Parra ve diğerleri, 2011)

Çizelge 3.13. Önerilen sac levha kalınlığına (t) bağlı nokta kaynağı çap (ød) ölçüleri (Matek ve diğerleri, 2000)

En küçük sac levha kalınlığı t [mm]	1.5	2	3	4	5
Nokta çapı ød [mm]	5	6	8	10	12

Roloff –Matek makine elemanları kitabında nokta kaynağı çap tasarımı için Çizelge 3.13’de verilen en küçük kalınlığa bağlı çap ölçülerini vermektedir (Matek ve diğerleri, 2000).

Niemann ve Winter; Makine elemanları eğitim kitaplarının 309-315 sayfalarında nokta kaynağındaki Denklem (3.9 ve 3.19)’de verilen gerilimleri vermiştir (Niemann, Winter, ve diğer). Ancak gerilimlerin yüksek dayanımlı malzemeler için geçerli olabilecek elastik-elastik analize dayalı olarak oluşturulduğu ve burada kullanılan malzemeye uymadığı değerlendirilmiştir. Nokta kaynağı çapı (ød) için $8\text{mm} \geq d = \sqrt{25\text{mm} \cdot t_{\min}[\text{mm}]}$ bilinen denklemi vermiştir (Niemann, Winter, ve diğer).

Chao, sınır gerilimi ve hasar mekanizmasını ve ortalama elastik gerilim denklemlerini göstermiştir (Chao, 2003; Radakovic, Tumuluru, 2008). Bu denklemlerden çalışmada yararlanılmıştır. Ancak sünek malzeme için gerekli olan elastik-plastik analize uygun değildir.

Radakovic ve Tumuluru, (2008), çentik mekaniği yöntemi ile yüksek dayanımlı çelikler için çekme-kesme dayanımının öngörülebilirliğini çalışmışlardır. Çalışma çok iyi olmakla

birlikte ayrı bir yöntem izlemesi ve yüksek dayanımlı çelikleri incelediğinden bu çalışmaya katkısı sınırlı kalmıştır.

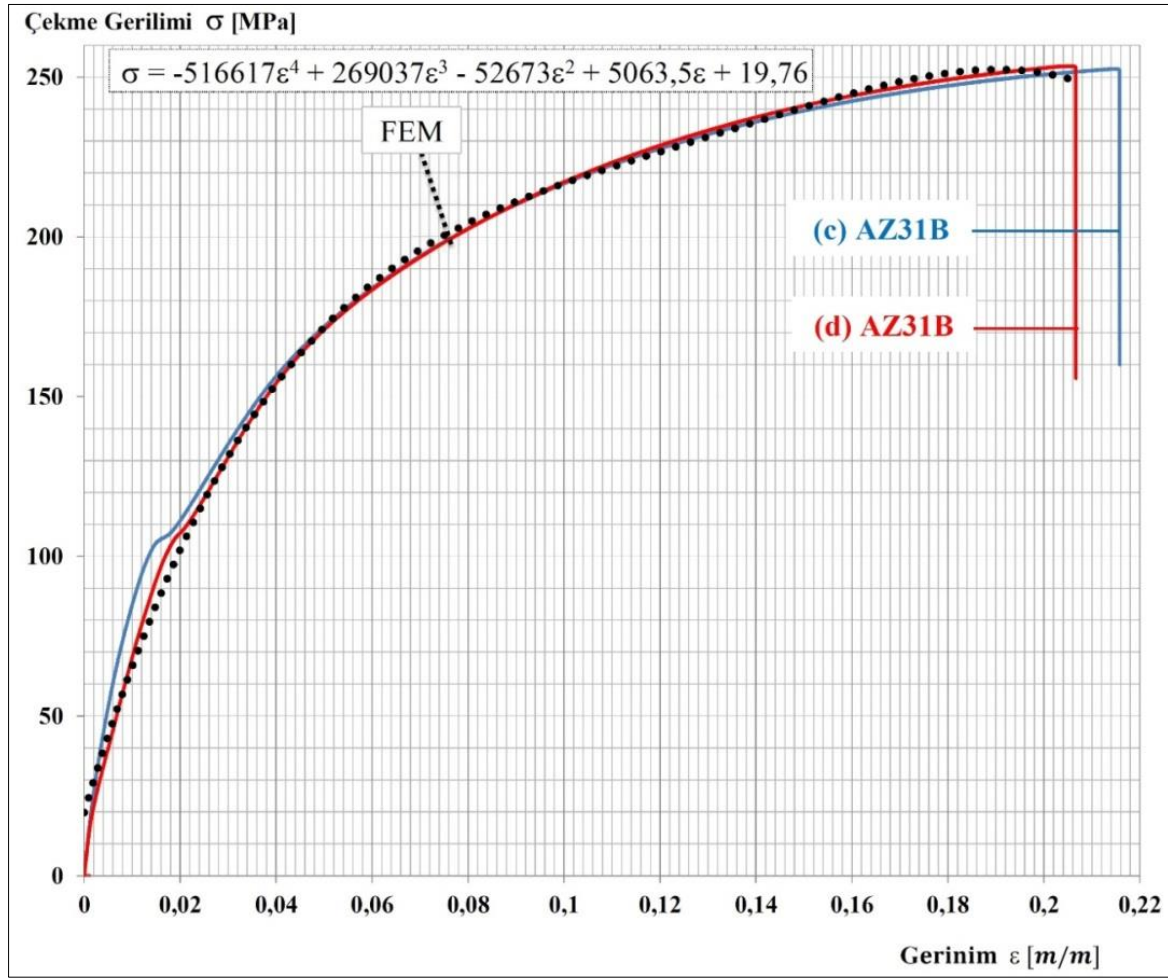
Yapılan literatür araştırmaları sonucunda nokta kaynağı yöntemi ile birleştirmeler için hiçbir elastik-plastik yada tam-plastik bir analize rastlanamamıştır. Tüm incelenen araştırmalar ve geliştirilen denklemler elastik-elastik yaklaşıma dayalıdır.

Sırf kesme gerilimine dayalı tasarım yöntemi elastik-elastik davranış gösteren yüksek çekme mukavemetine sahip malzemeler için uygundur. Bu malzemeler plastik deformasyona uğramadan kesme gerilimine bağlı kopma hasar tipi gösterirler. Ancak bu çalışmada olduğu gibi hafif metal alaşımlarında AZ31B magnezyum alaşımı gibi yumuşak malzemeler %20'ye varan gerinim ile çok dar bir elastik ve çok geniş plastik bölge (Şekil 3.36) gösterdiklerinden, elastik-plastik, hatta tam-plastik gerilim analiz mekanizması oluşturulması zorunludur.

Bu çalışmada ilk olarak AZ31B magnezyum alaşımı malzemenin ana malzeme çekme testi yapılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ardından Finite Element Methode (FEM) modeli için matematiksel malzeme modeli oluşturulmuştur. SKNK çekme-kesme numunesindeki gerinim mekanizmaları elastik-elastik ve elastik-plastik analiz yöntemleri için analitik olarak incelenmiştir. Ayrıca Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz yapılarak analitik yaklaşım doğrulanmıştır. Analitik yaklaşımın doğruluğu ayrıca yapılan çekme-kesme testleri ile de tasdiklenmiştir.

3.10.3. AZ31B ana malzeme çekme test sonuçları ve FEM-malzeme modeli

Magnezyum alaşımı levhaların çekme deneyi sonucu Şekil 3.36'da gösterilmiştir. Teste hazırlanan (a), (b), (c) ve (d) olarak dört numuneden iki tanesi (c) ve (d) numunelerinden sağlıklı sonuç alınabilmektedir. Magnezyum alaşımı 1.5 mm kalınlığındaki standartlara uygun gerçekleştirilen ana malzeme testlerine göre Şekil 3.36'da görülen lineer olmayan Gerilim-Gerinim fonksiyonu verisi FEM modellemesinde ve Şekil 3.36'da verilen dördüncü dereceden polinom interpolasyon denkleminde göre bir tablo şeklinde FEM-Analizinde kullanılmıştır.



Şekil 3.36. Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1 mm/dak hız ile çekme testi sonuçları (c ve d nolu numuneler)

Magnezyum alaşımı AZ31B malzeme ve 1,5 mm kalınlığında levhanın 1mm/dak hız ile gerçekleşen çekme testine göre ölçülerek belirlenen mekanik özellikleri Şekil 3.36’da gösterilmiştir.

Ana malzeme özelliklerinin testlerinin gösterilen standartta (ASTM 2010) belirtilmiş değerleri sağladığı tespit edilmiştir. AZ31B için FEM nümerik modeli için malzeme özellikleri ise:

Elastik Modülü $E = 45\,000\text{ MPa}$ (Farley, 2003)

Poisson Sayısı $\gamma = 0,35$ (Wilson, 2005)

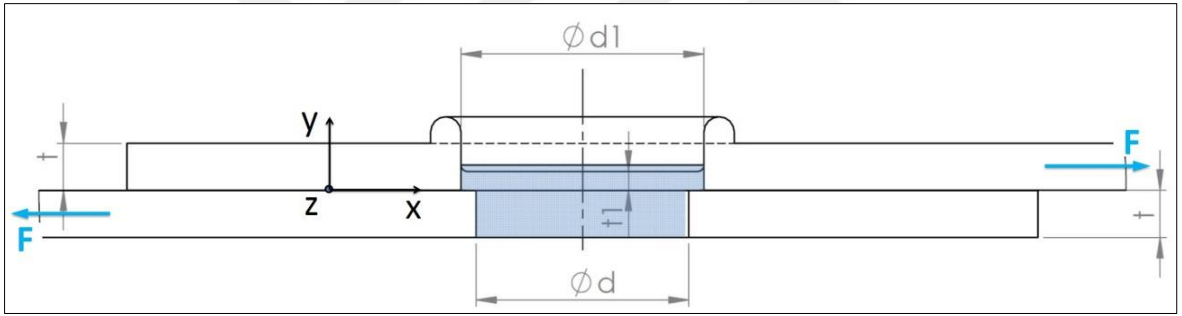
kullanılmıştır.

3.10.4. Elastik-elastik gerilim mekanizmalarının analizi

SKNK ile birleştirilmiş çekme-kesme numunesi (Resim 3.34) sadece lineer elastik yükleme seviyesine kadar gerilimlere maruz bırakıldığında, elastik-elastik analizden bahsedilir. Böyle bir gerilme durumu söz konusu olduğu zaman bağlantı bölgesinde Şekil 3.37’de gösterilen (ϕd ve $\phi d1$) iki tane silindirik gerilim kesitleri oluşur. Nokta kaynağını inceleyen Chao, elastik gerilimlerin denklemlerini oluşturmuştur (Chao, 2003).

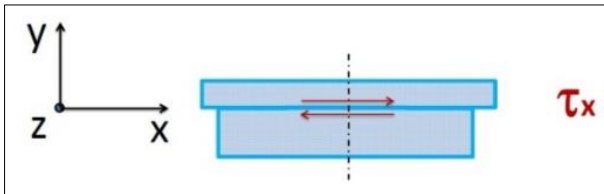


Resim 3.34. SKNK ile birleştirilmiş numunenin üstten görünümü



Şekil 3.37. SKNK ile birleştirilmiş Çekme-Kesme numunesinin geometrik modeli ve parametreleri

Bağlantı ara-yüzünde oluşan x-yönündeki elastik kesme gerilimi Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Bağlantı ara-yüzünde oluşan elastik kesme gerilimi

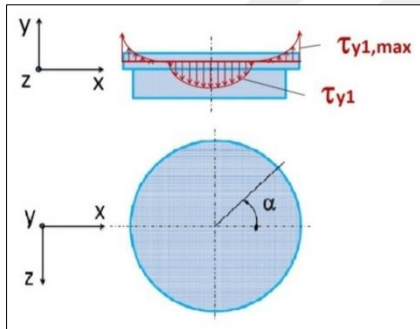
Ara-yüzde oluşan elastik kesme gerilimi denklem (3.9) ile hesaplanır (Matek diğer, 2000; Niemann ve diğer).

$$\tau_x = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \leq \frac{\sigma_{akma}}{\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

Burada F uygulanan kuvveti, d birleşmenin çapını ve σ_{akma} malzemenin akma gerilimini ifade eder.

Denklem (3.9)'dan AZ31B ana malzeme testinden elde edilen akma değeri ($f_{akma} = 151 \text{ MPa}$)'da ki akma kesme kuvveti: $F_{akma, \tau_x} \leq \frac{\sigma_{akma} \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \sqrt{3}} = \frac{151 \cdot \pi \cdot 7^2}{4 \cdot \sqrt{3}} \text{ N} = 3355 \text{ N}$ olarak hesaplanır. Bu akma gerilimindeki kesme kuvveti, çekme-kesme testlerdeki kopma değerinden daha yüksek olduğundan bu tip bir hasar oluşmayacağı anlaşılmaktadır. Sadece bağlantı füzyonu gerçekleşmez ya da çapı 7 mm'den yarıya düşerse, yani bağlantı zayıf gerçekleşirse bu hasar tipine rastlanabilecektir.

Şekil 3.39'da üst levhada oluşan y-yönündeki (çekme yönüne dikey) kesme gerilimi gösterilmiştir (Chao, 2003; Zhang, 2001; Radaj ve Zhang, 1993).



Şekil 3.39. Üst levhada oluşan y-yönündeki kesme gerilimi

Şekil 3.39'da üst levhada (indeks 1 ile ifade edilmiştir) oluşan çekme yönüne dik yöndeki elastik kesme gerilimi denklem (3.10) ile hesaplanır (Chao, 2003). Denklemden görüldüğü gibi y-yönündeki kesme gerilimi açı (α)'ya bağlı olarak çevresel yönde $\cos 2\alpha$ ile değişkenlik gösterir ve maksimum değeri denklem (3.11) ile hesaplanır (Niemann ve diğer).

$$\tau_{y1}(\alpha) = \tau_{y1,max} \cdot \cos 2\alpha \leq \frac{\sigma_{akma}}{\sqrt{3}} \quad (3.10)$$

Burada:

$$\tau_{y1,max} = \frac{F}{t_1 \cdot d_1} \leq \frac{\sigma_{akma}}{\sqrt{3}} \quad (3.11)$$

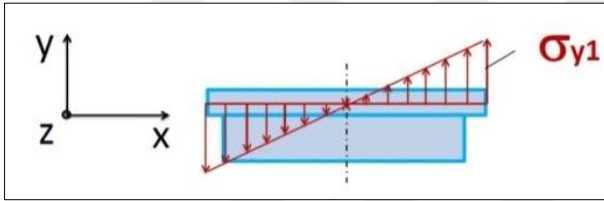
t_1 üst levhanın anahtar deliğindeki kalan kalınlığı ve d_1 karıştırıcı uç çapını ifade eder.

Denklem (3.11)'den AZ31B ana malzeme testinden elde edilen akma değeri ($f_{akma} = 151 \text{ MPa}$)'da ki

Kesme kuvveti: $F_{akma, \tau_{y1, max}} \leq \frac{\sigma_{akma} \cdot t_1 \cdot d_1}{\sqrt{3}} = \frac{151 \cdot 0.6 \cdot 8}{\sqrt{3}} \text{ N} = 558 \text{ N}$ olarak hesaplanabilir.

Hesaplanan bu y-yönündeki kesme kuvveti çekme-kesme testlerinde ölçülen değerlere yakın olduğundan bu hasar tipi oluşabilir.

Şekil 3.40'de üst levhada oluşan y-yönündeki (çekme yönüne dikey) eğme gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Üst levhada oluşan çekme yönüne dik eğme gerilimi

Şekil 3.40'da üst levhada oluşan çekme yönüne dik yöndeki ikincil moment yükünden kaynaklı elastik eğme gerilimi z-yönündeki momentlerin statik denge kanunundan üretilen denklem (3.12) ile hesaplanır. Denklemden görüldüğü gibi y-yönündeki eğme gerilimi alt karıştırıcı uç momentine (I_1) bağlı olarak çap ile değişkenlik gösterir ve maksimum değeri d_1 ile hesaplanır (Matek ve diğerleri, 2000; Nieman ve diğer).

$$\sigma_{y1} = \frac{F \cdot (t_1 + t) \cdot I_1}{d_1} \leq \sigma_{akma} \quad (3.12)$$

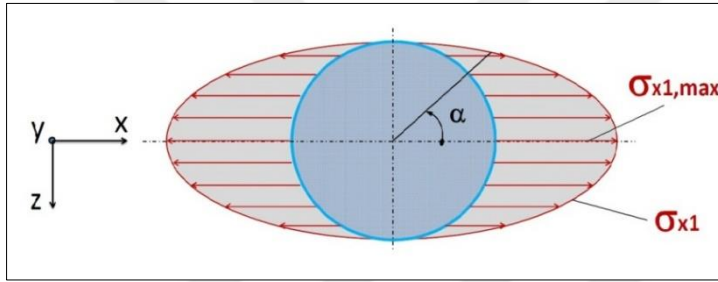
Burada:

$$I_1 = \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} \quad (3.13)$$

t alt levha kalınlığını ifade eder.

Denklem (3.12 ve 3.13)'den AZ31B ana malzeme testinden elde edilen akma değeri ($f_y = 151 \text{ MPa}$)'da ki akma kesme kuvveti: $F_{akma, \sigma_{y1}} \leq \frac{64 \cdot \sigma_{akma}}{(t_1 + t) \cdot \pi \cdot d_1^3} = \frac{64 \cdot 151}{(0.6 + 1.5) \cdot \pi \cdot 8^3} \text{ N} = 2,86 \text{ N}$ olarak hesaplanabilir. Malzemenin akma gerilimine ulaşması için gereken bu çok küçük akma kuvveti göstermektedir ki eğilmeye karşı (ikincil moment yükü) birleştirme çok zayıftır ve hemen bükülür. Bu nedenle elastik-elastik bir hesaplama bağlantının dayanımını doğru olarak belirleyemez. Elastik-plastik veya gerekirse tam-plastik bir hesaplama yöntemine gidilmesi önerilmektedir.

Şekil 3.41'de üst levhada oluşan x-yönündeki (çekme yönü) çekme-basma (yataklama) gerilimi gösterilmiştir (Chao, 2003; Zhang, 2001; Radaj ve Zhang, 1993).



Şekil 3.41. Üst levhada oluşan y-yönündeki kesme gerilimi

Şekil 3.41'de üst levhada oluşan çekme yönündeki elastik kesme gerilimi denklem (14) ile hesaplanır (Chao, 2003). Denklemde görüldüğü gibi x-yönündeki çekme-basma gerilimi açı (α)'ya bağlı olarak çevresel yönde $\cos \alpha$ ile değişkenlik gösterir ve maksimum değeri denklem (3.14) ile hesaplanır (Chao, 2003; Zhang, 2001; Radaj ve Zhang, 1993).

$$\sigma_{x1}(\alpha) = \sigma_{x1,max} \cdot \cos \alpha \leq f_{akma} \quad (3.14)$$

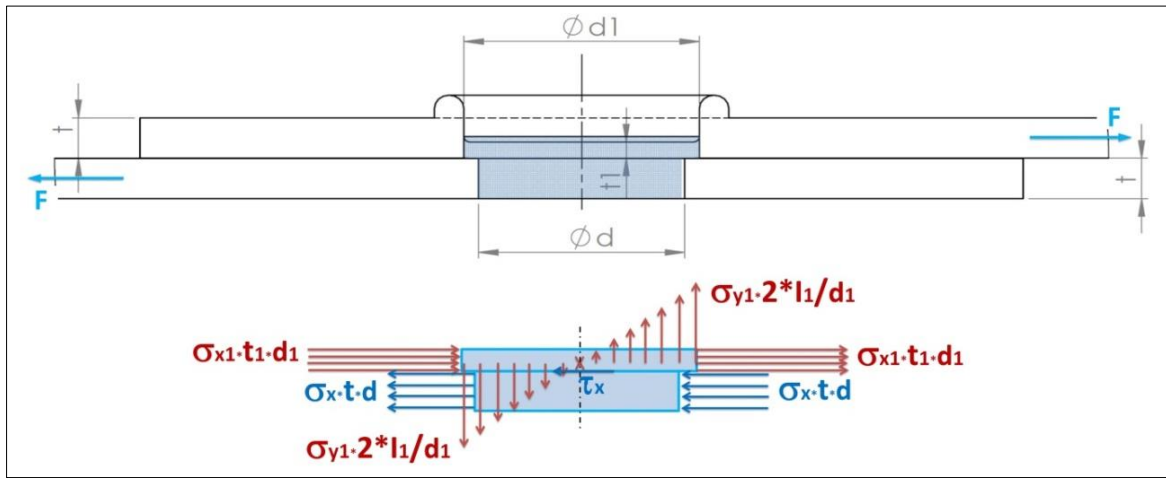
Burada:

$$\sigma_{x1,max} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot t_1 \cdot d_1} \leq \sigma_{akma} \quad (3.15)$$

Denklem (3.13)'den AZ31B ana malzeme testinden elde edilen akma değeri ($f_{akma} = 151 \text{ MPa}$)'da ki akma kesme kuvveti: $F_{akma, \sigma_{x1,max}} \leq \frac{\pi \cdot t_1 \cdot d_1 \cdot \sigma_{akma}}{4} = \frac{\pi \cdot 0.6 \cdot 8 \cdot 151}{4} \text{ N} = 569 \text{ N}$ olarak hesaplanabilir. Hesaplanan bu y-yönündeki kesme kuvveti çekme-kesme testlerinde ölçülen değerlere yakın olduğundan bu hasar tipi oluşabilir.

3.10.5. Elastik-plastik gerilim mekanizmalarının analizi

Bağlantı silindirlerindeki gerilimlerin katılık değerleri (stiffness) ile çarpılarak elde edilen iç kuvvetler Şekil 3.42’de gösterilmiştir. Silindir 1’de (üst-levha) çok küçük çekme kuvvetlerinde hemen yerel plastik deformasyon olduğu elastik-elastik analizde anlaşılmıştır. Bu nedenle x-yönündeki normal gerilim orada olduğu gibi açığa bağlı olarak değil, $t_1 \cdot d_1$ izdüşüm alanında tam-plastik deformasyon olduğu varsayılarak gerçekleşmektedir.



Şekil 3.42. Birleşme silindirlerindeki tam-plastik iç kuvvetlerin statik dengesi

Çekme yönünde kuvvetlerin statik dengesi $F_{x,i} = 0$ ile kurulduğunda aşağıdaki denklem çıkar:

$$2 \cdot \sigma_{x,1} \cdot t_1 \cdot d_1 = 2 \cdot \sigma_x \cdot t \cdot d \quad (3.16)$$

$$\sigma_{x,1} = \sigma_x \cdot \frac{t \cdot d}{t_1 \cdot d_1} \quad (3.17)$$

$$\sigma_{x,1} = \frac{F}{2 \cdot t \cdot d} \cdot \frac{t \cdot d}{t_1 \cdot d_1} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{x,1} = \frac{F}{2 \cdot t_1 \cdot d_1} \geq \sigma_{akma} \quad (3.19)$$

Momentlerin kesme ara yüzünün orta noktasına göre statik dengesi $M_{z,i} = 0$ ile kurulduğunda aşağıdaki denklem çıkar:

$$2 \cdot \sigma_x \cdot t \cdot d \cdot \left(\frac{t}{2} + \frac{t_1}{2} \right) = \sigma_{y1} \cdot 2 \cdot \frac{I_1}{d_1} \quad (3.20)$$

$$\sigma_x \cdot t \cdot d \cdot (t + t_1) = \sigma_{y1} \cdot 2 \cdot \frac{\frac{\pi}{64} d_1^4}{d_1} \quad (3.21)$$

$$\frac{F}{2 \cdot t \cdot d} \cdot t \cdot d \cdot (t + t_1) = \sigma_{y1} \cdot \frac{\pi}{32} d_1^3 \quad (3.22)$$

$$F \cdot (t + t_1) = \sigma_{y1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{32} d_1^3 \quad (3.23)$$

$$\sigma_{y,1} = \frac{16 \cdot F \cdot (t_1 + t)}{\pi \cdot d_1^3} \geq \sigma_{akma} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{E,1} = \sqrt{(\sigma_{x,1})^2 + (\sigma_{y,1})^2} = \sqrt{\left(\frac{F}{2 \cdot t_1 \cdot d_1} \right)^2 + \left(\frac{16 \cdot F \cdot (t_1 + t)}{\pi \cdot d_1^3} \right)^2} \quad (3.25)$$

$$\sigma_{E,1} = F \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot t_1 \cdot d_1} \right)^2 + \left(\frac{16 \cdot (t_1 + t)}{\pi \cdot d_1^3} \right)^2} \geq \sigma_{akma} \quad (3.26)$$

$$F_{kopma,1} = \frac{\sigma_{kopma}}{\sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot t_1 \cdot d_1} \right)^2 + \left(\frac{16 \cdot (t_1 + t)}{\pi \cdot d_1^3} \right)^2}} \quad (3.27)$$

$$F_{kopma,1} = \frac{253}{\sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot 0.6 \cdot 8} \right)^2 + \left(\frac{16 \cdot (0.6 + 1.5)}{\pi \cdot 8^3} \right)^2}} N = 2381 N \quad (3.28)$$

Bağlantı ara yüzünde ($d_1 = d$):

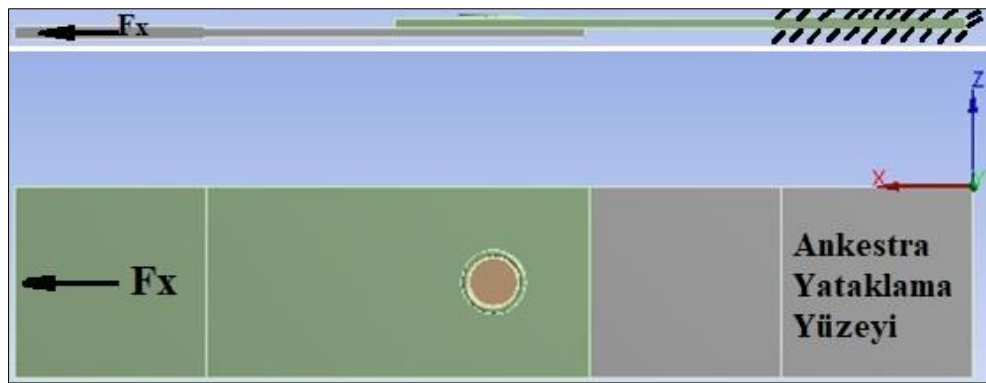
$$\sigma_x = \frac{F}{2 \cdot t_1 \cdot d} \geq \sigma_{akma} \quad (3.29)$$

$$\sigma_y = \frac{16 \cdot F \cdot (t_1 + t)}{\pi \cdot d^3} \geq \sigma_{akma} \quad (3.30)$$

yerinin ise birleşme ara-yüzü çapından ($\phi = 7 \text{ mm}$) ve üst levhadan gerçekleştiği, analitik gerilim mekanizma modeli ve testlerle doğrulanmıştır.

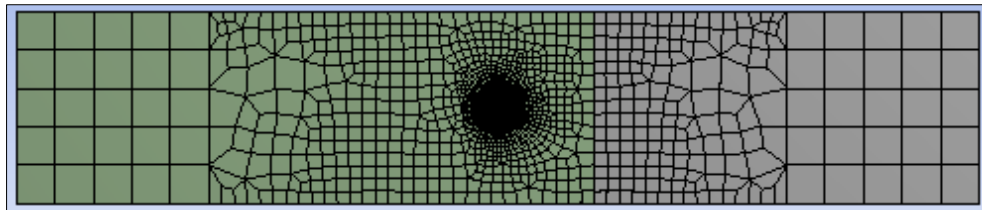
3.10.6. Çekme-kesme testinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile doğrulanması

Çekme-kesme test numunesinin sonlu elemanlar yöntemi için hazırlanan geometrik modeli Şekil 3.44'de görülmektedir. Numune bir ucundan ankastre tutulmuş ve diğer ucundan uzunluk yönünde (x-yönünde) çekme kuvveti uygulanmıştır.



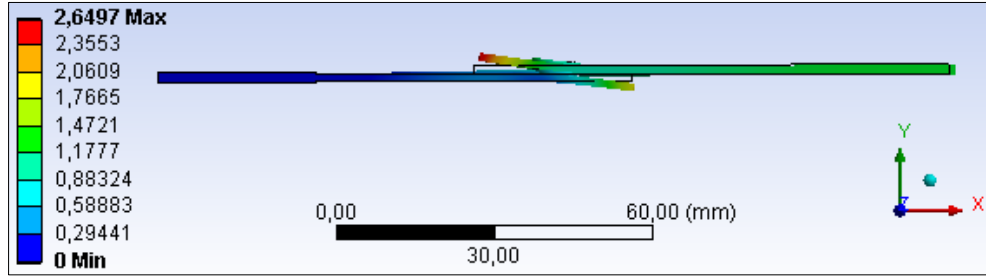
Şekil 3.44. Çekme-kesme test numunesinin statik geometrik modeli

Çekme-kesme test numunesinin sonlu elemanlar yöntemi için hazırlanan FEM-Ağı oluşturulmuş modeli Şekil 3.45'de görülmektedir. Gerilimlerin yoğunlaştığı bağlantı bölgesi ve anahtar deliğinde daha iyi sonuçlar elde edilmesi için ağ geometrisi oldukça sık uygulanmıştır.

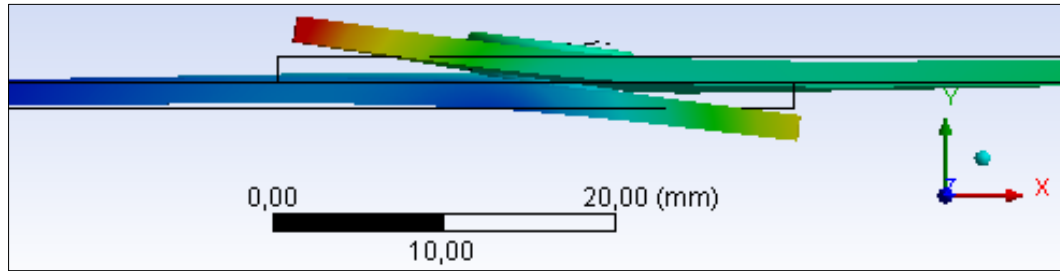


Şekil 3.45. Çekme testi numunesinin sonlu elemanlar model ağı (mesh)

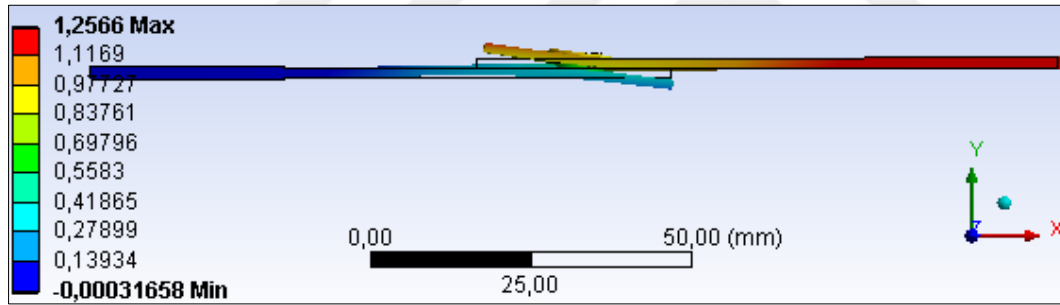
AZ31B malzemeden 1.5mm kalınlığındaki levaların olarak SKNK ile birleştirilen Çekme-Kesme deneyinin lineer olmayan FEM hesabından çıkan global deformasyon sonucu Resim 3.35 ve Resim 3.36'da gösterilmiştir. Resim 3.37'de ise sadece x-yönünde (çekme yönünde) uzama sonucu gösterilmiştir.



Resim 3.35. Global deformasyon [mm]

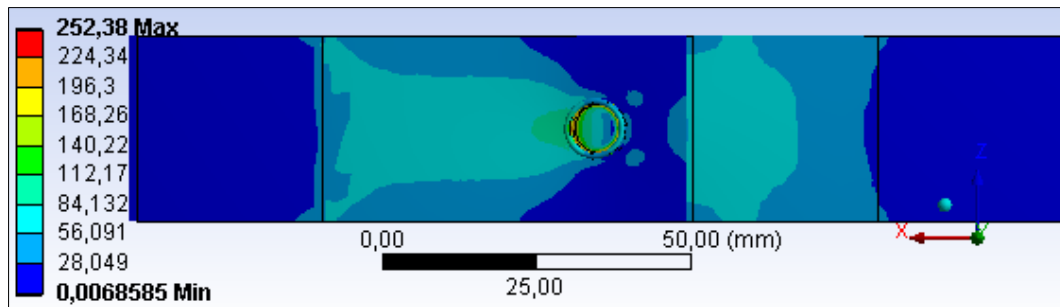


Resim 3.36. Global deformasyonun birleşme bölgesindeki detay görünümü

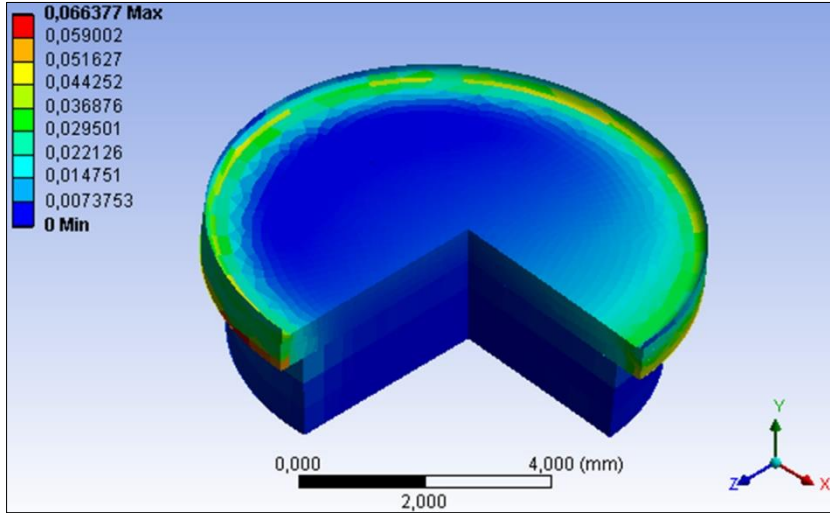


Resim 3.37. Çekme yönündeki (x yönü) uzaması

Resim 3.38'de 2000 N maksimum sınır yükü analizi sonucunda oluşan Von MISES karşılaştırma gerilimi üstten görünüm ile gösterilmiştir.



Resim 3.38. Von MISES karşılaştırma gerilimi [MPa]

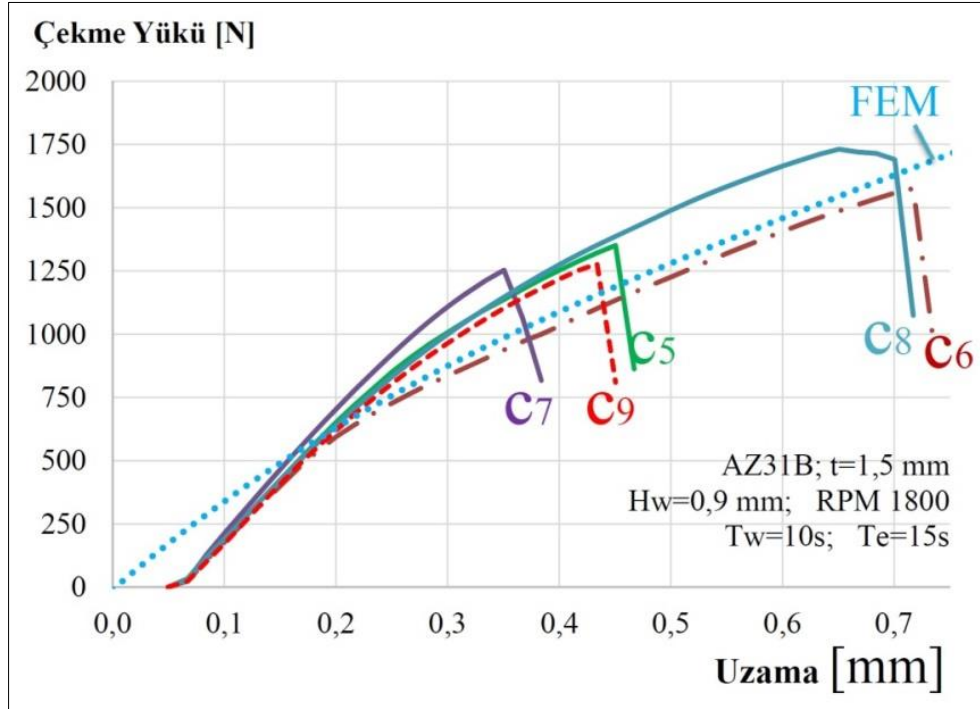


Resim 3.39. Birleştirme bölgesindeki 1766 N çekme kuvveti sonunda elde edilen plastik gerilim görüntüsü

Resim 3.39’da görülen maksimum sınır gerilim analizinden elde edilen plastik gerilim görüntüsü daha önce elastik-plastik analitik yaklaşımda kullanılan denklemlerde kabullenilmiş olan ve Şekil 3.42’de gösterilen gerilim alanının $(d \cdot t)$ ve $(d1 \cdot t1)$ olarak hesapta kullanılabileceğini doğrulamaktadır (Denklem 3.14 ve 3.18).

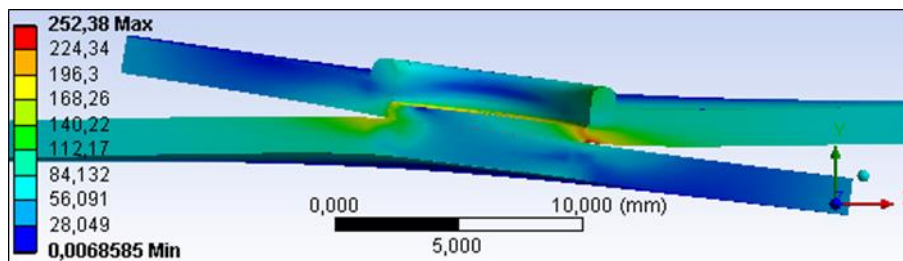
3.10.7. FEM-Analizi sonuçlarının yorumlaması

AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki levhaların SKNK yöntemi ile birleştirmesinden sonra çekme-kesme testleri sonuçlarının (C5-C9 numuneleri için) FEM-Analizi sonucu ile karşılaştırma grafiği Şekil 3.46’da gösterilmiştir.

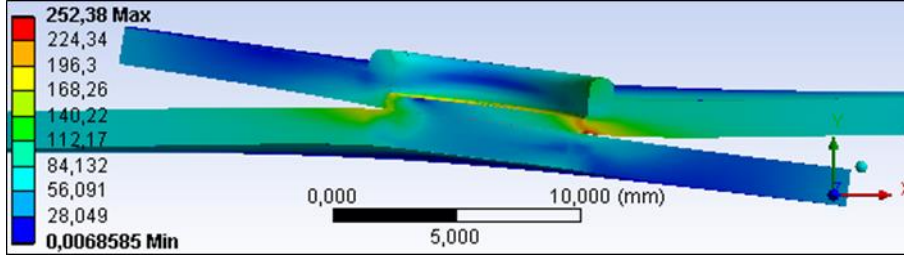


Şekil 3.46. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki levhaların SKNK yöntemi ile birleştirmesinden sonra çekme-kesme testleri sonuçlarının (C5-C9 numuneleri için) FEM-Analizi sonucu ile karşılaştırma grafiği (Burada: t kalınlık, Hw karıştırıcı uç dalma derinliği, RPM karıştırıcı uç devir-dakika olarak dönme hızını, Tw saniye (s) olarak dalma süresini ve Te bekleme süresini ifade eder)

Analiz sonucunda elde edilen lineer olmayan FEM kuvvet-uzama grafiği ile testlerle ölçülen sonuçların grafikleri Şekil 3.46'da görüldüğü gibi karşılaştırıldığında; analiz sonucu ve test sonuçlarının oldukça iyi örtüştükleri görülmektedir. Arasındaki farkın yaklaşık 150N ile maksimum ölçülen yaklaşık değer 1750 N ile karşılaştırıldığında; %10 altında gerçekleşen maksimum rölatif sapma olduğu görülmektedir. Ayrıca FEM-Çizgisinin test sonuçları sapma değerleri (genlik) içerisinde olduğu grafikte görülmektedir.



Resim 3.40. Von MISES Karşılaştırma gerilimi detay görüntüsü [MPa]



Resim 3.40'da gösterilen birleşme bölgesindeki ve maksimum sınır yükü (ultimate) altında ki karşılaştırma gerilimi detay kesit görüntüsü incelendiğinde Şekil 3.36'da gösterilmiş olan ve testlerde elde edilen kopma gerilimi ile tam örtüştüğü ve analitik hesaplanan kopma kuvveti 1931 N ile karşılaştırıldığında %10 altında düşük rölatif hata oranı olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak FEM-Analiz modelinin testlerle ve analitik hesaplar ile doğrulandığı tespit edilmiştir.

3.10.8. Çekme-kesme testi doğrulama çalışması verileri

Çekme-kesme testi doğrulama çalışmaları sonucunda elde edilen temel veriler:

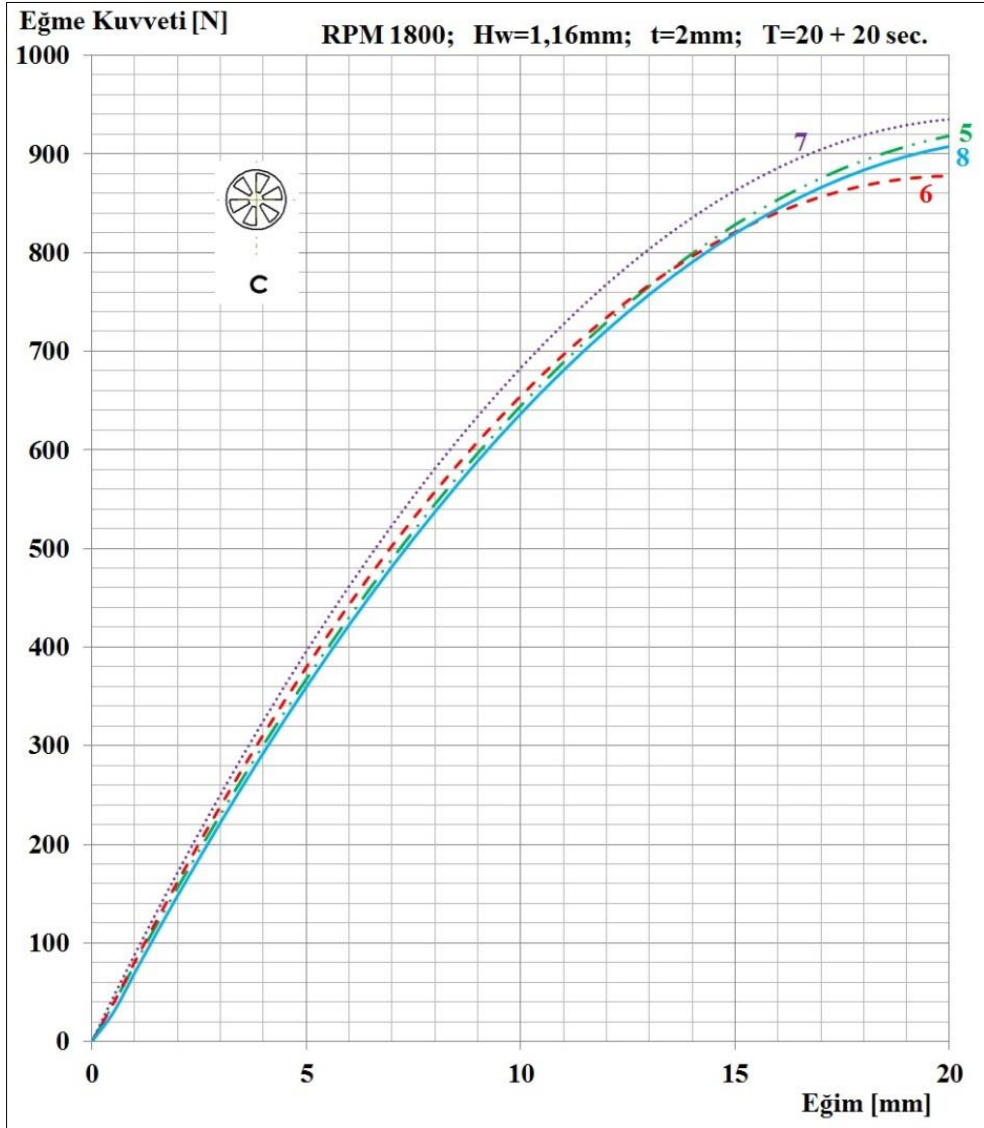
- Analitik gerilim mekanizması incelenerek gerilim ve kuvvet denklemleri oluşturulmuştur.
- Minimum kopma gerilim kuvveti hesaplanmış ve izafi hata oranı %10 altında olup analitik gerilim mekanizması modeli için oldukça iyi bir doğrulama ortaya konmuştur.
- Kopma yerinin ise birleşme ara-yüzü çapından ($\phi=7\text{mm}$) başlayarak üst levhada gerçekleştiği, analitik gerilim mekanizma modeli testlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.
- FEM-Analizi sonucunda elde edilen lineer olmayan FEM kuvvet-uzama grafiği ile testlerle ölçülen sonuçların grafikleri karşılaştırılmış; analiz sonucu ve test sonuçlarının oldukça iyi örtüştükleri görülmüştür. Test ile FEM-analizi arasındaki farkın %10 altında gerçekleşen maksimum izafi sapma olduğu görülmüştür. Ayrıca FEM-çizgisinin test sonuçları sapma değerleri (genlik) içerisinde olduğu grafikte gösterilmiştir.
- FEM-Analizi ile birleşme bölgesindeki ve maksimum sınır yükü (ultimate) altında ki karşılaştırma gerilimi testlerde elde edilen kopma gerilimi ile tam örtüştüğü ve analitik

hesaplanan kopma kuvveti ile karşılaştırıldığında %10 altında düşük rölatif hata oranı olduğu belirlenmiştir.

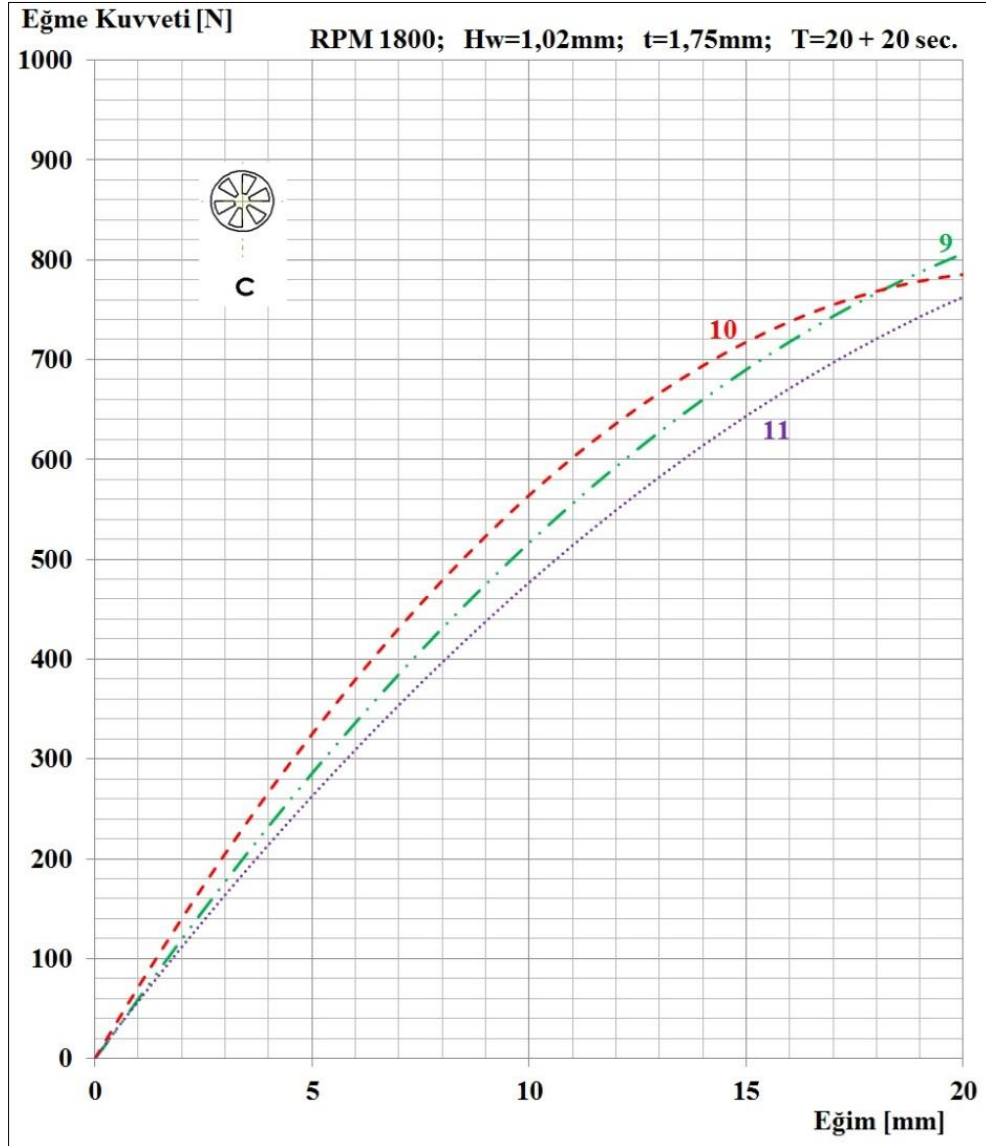
Genel olarak SKNK-Çekme-Kesme-Testi analitik incelemesinden elde edilen denklemler, FEM-Analizi ve testlerle doğrulanmıştır. Bu çalışma sonucunda üretilmiş olan analitik denklemler (Denklem 3.16-Denklem 3.31) ile çekme-kesme testleri yapılmadan hesaplanabilir hasar öngörülleri yapılabilecektir.

3.10.9. Üç-nokta eğme testi

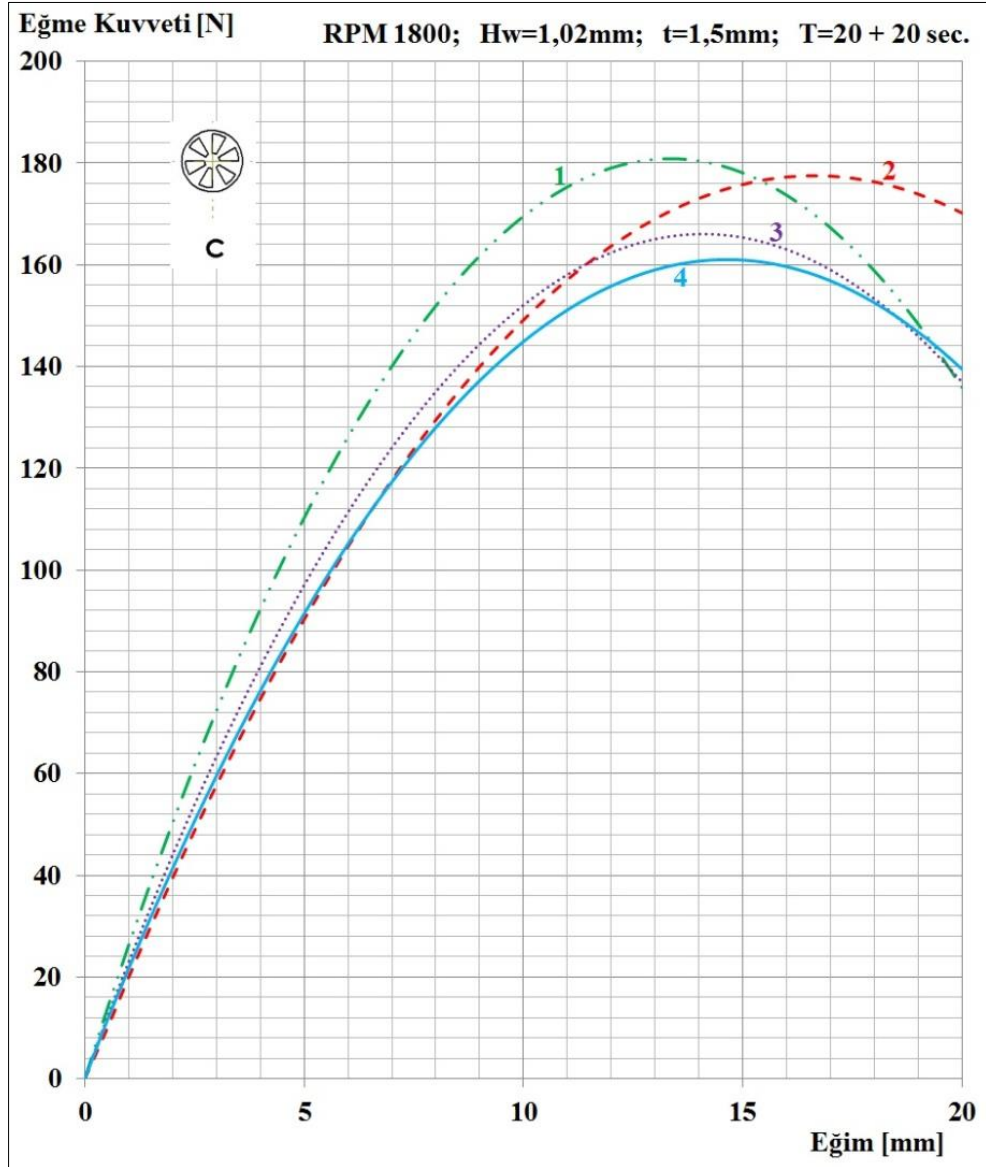
AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 20 saniye dalma zamanı, 20 saniye bekleme zamanı ve yapılan deneyler sonucunda belirlenen Çizelge 3.9'da gösterilen en iyi parametreler ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafiksel görünüşleri Şekil 3.47, Şekil 3.48 ve Şekil 3.49 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.47. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 1,16 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (5, 6, 7 ve 8 nolu numuneler)



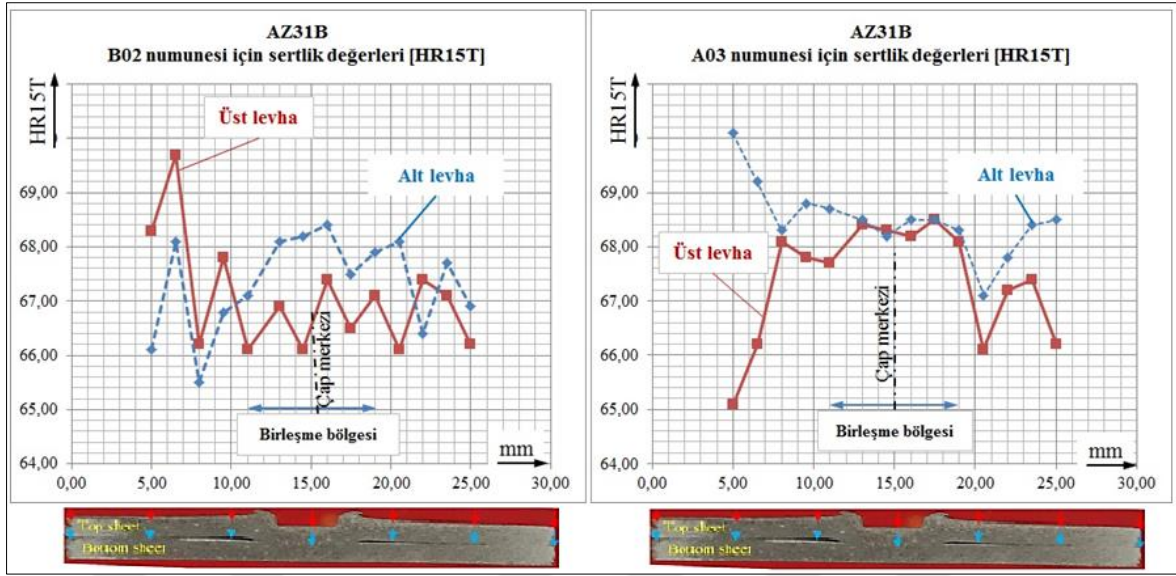
Şekil 3.48. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 1,0 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (9, 10 ve 11 nolu numuneler).



Şekil 3.49. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 dev/dak'da, 0,87 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üç nokta eğme deneyinde gerçekleştirilen eğme kuvvetinin eğilmeye bağlı değerlerinin grafikleri (1, 2, 3 ve 4 nolu numuneler)

3.10.10. Sertlik testi

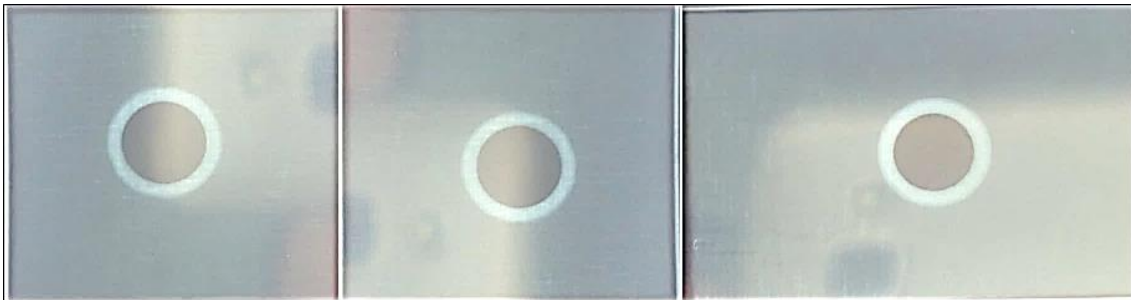
Şekil 3.50'de magnezyum alaşımı AZ31B malzemenin SKNK ile birleştirmesi yapıldıktan sonra iki numunede üst ve alt levhaların yüzeyindeki sertlik ölçümleri gösterilmektedir. Alt levhada sertlik değerleri üst levhaya göre hafif yükselse de, grafikler incelendiğinde 67-68 HR15T sertliği civarında fazla değişim göstermediği dolayısı ile SKNK'nın sertliğe olan etkisi ihmal edilecek seviyede olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.50. AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 devir/dakika da, 0,87 dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra üst ve alt levha yüzeyindeki enine doğru sertlik değerlerinin HR15T grafikleri (Omuz profil tipi “C”)

3.10.11. X-RAY testi

Resim 3.41’de magnezyum alaşımı AZ31B malzemenin SKNK ile birleştirmesi yapıldıktan sonra üç tane numunedeki X-RAY görünümü gösterilmektedir. X-Ray ile yapılan inceleme sonucunda birleştirme bölgesinde herhangi bir çatlak ve gözenekliliğin olmadığı tespit edilmiştir.



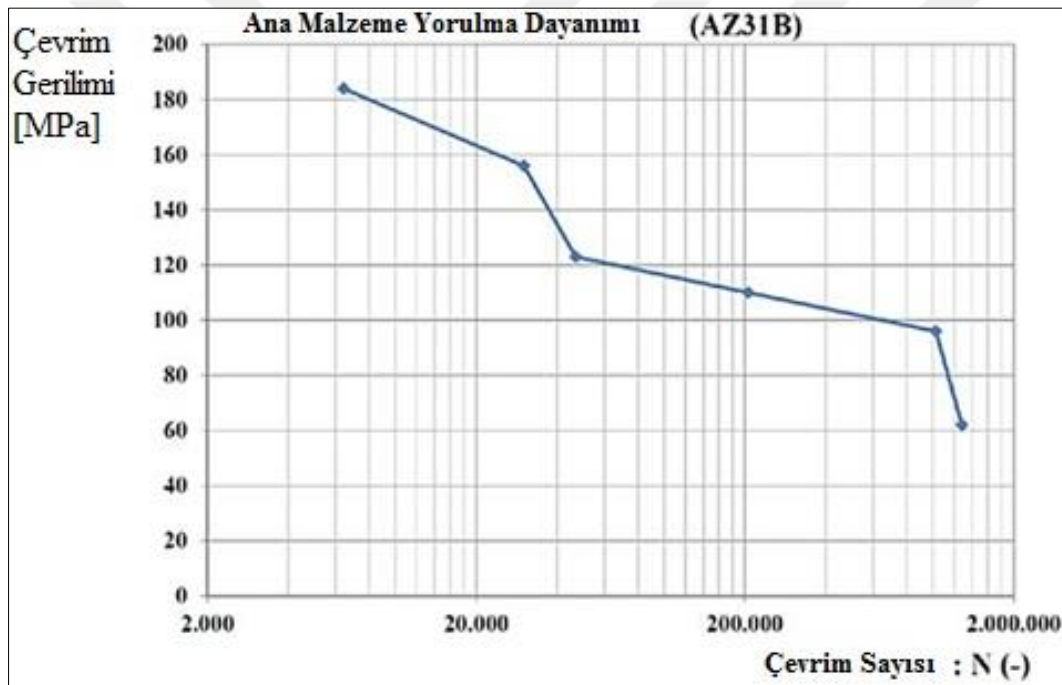
Resim 3.41. AZ31B magnezyum alaşımı 1,5 mm, 1,75 mm ve 2,0 mm kalınlığındaki levhaların SKNK ile 1800 devir/dakika da, Çizelge 3.9’da verilen dalma derinliği, 20 saniye dalma süresi ve 20 saniye bekleme süresi ile birleştirildikten sonra X-RAY ile çekilen görüntüleri

3.10.12. Yorulma dayanımı testi

Birleştirilmiş ve AZ31B magnezyum alaşımı malzemelerin hem statik hem de yorulma testleri ASTM E466 standardına uygun olarak Instron-Dynamic-2620-601 test makinesinde çekme-basma ($R=-1$) şeklinde gerçekleştirilmiştir.

AZ31B magnezyum alaşımı ana malzeme yorulma testi

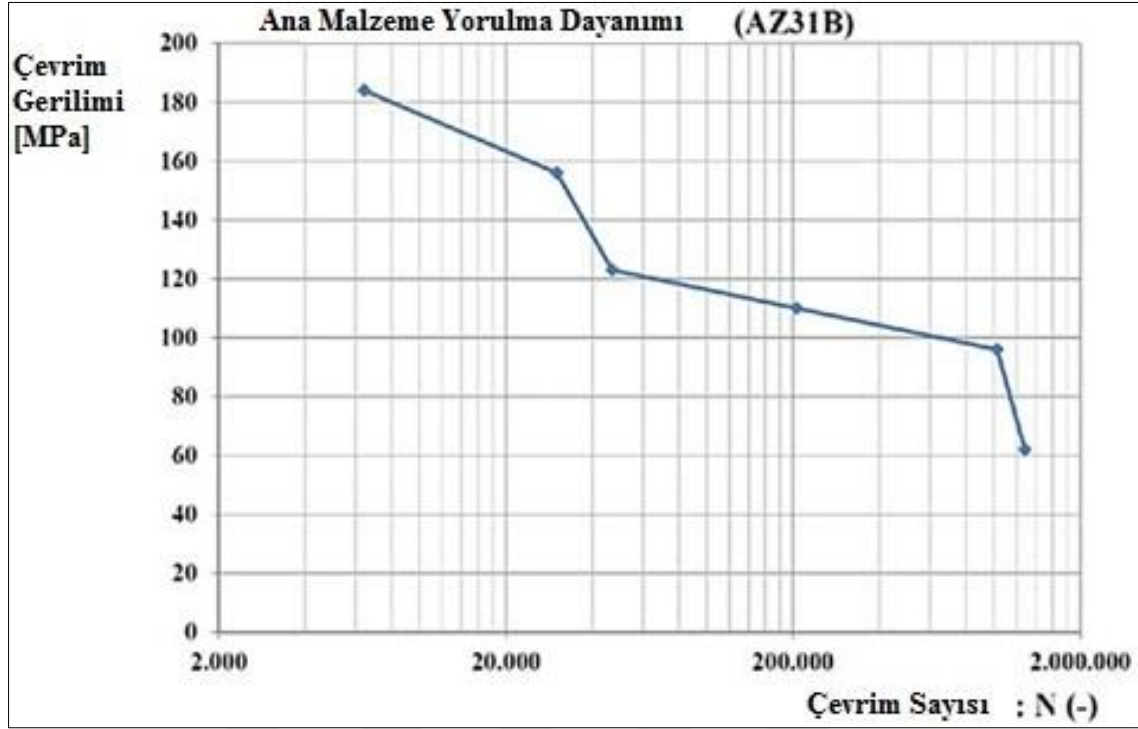
AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları ($R=-1$) Çizelge 3.14'de ve grafiksel görünümü ise Şekil 3.51'de verilmiştir.



Şekil 3.51. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları ($R=-1$) grafiği

Çizelge 3.14. AZ31B magnezyum alaşımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları ($R=-1$); *zaman aşımı

Kalınlık [mm]-	En [mm]	Maksimum Kuvvet [N]	Akma Kuvvetine Oranı [%]	Gerilim [MPa]	Yorulma Ömrü, Çevrim Sayısı
1,75	10,20	3280	89,0	184	6.424
	10,05	2735	74,2	156	30.107
	10,14	2190	59,4	123	46.927
	9,99	1917	52,0	110	206.049
	9,81	1643	44,6	96	*1.026.252
	10,11	1095	29,7	62	*1.284.233



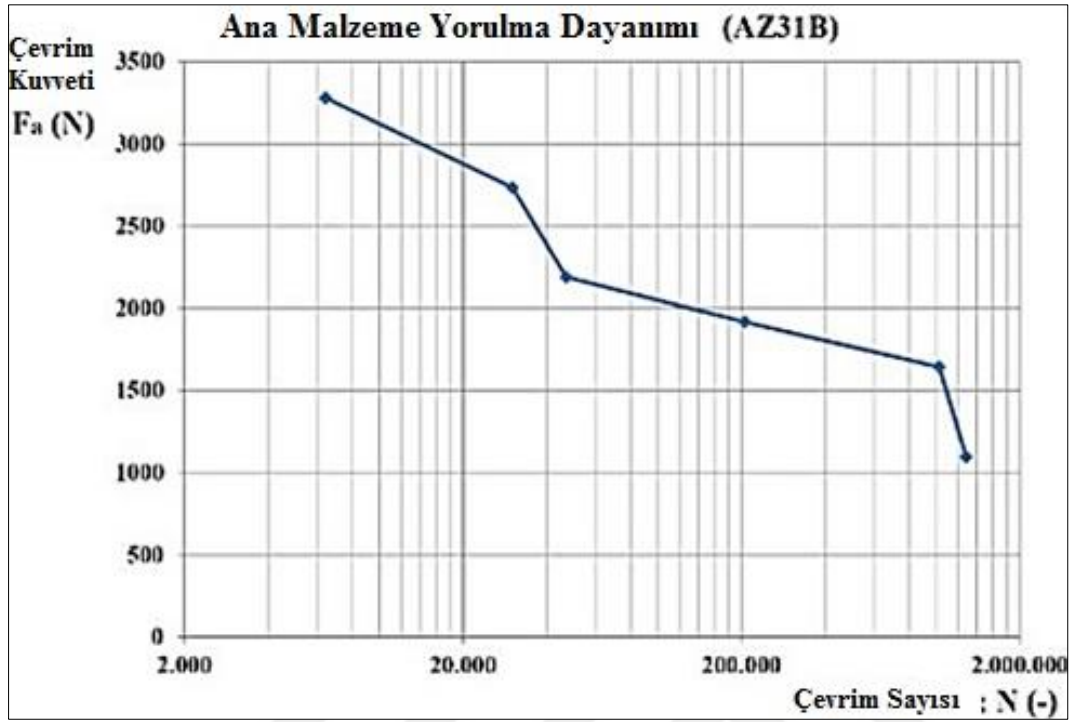
Şekil 3.52. AZ31B magnezyum alışımlı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği

AZ31B magnezyum alaşımlı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1) Çizelge 3.15’de ve grafiksel görünümü ise Şekil 3.52’de verilmiştir.

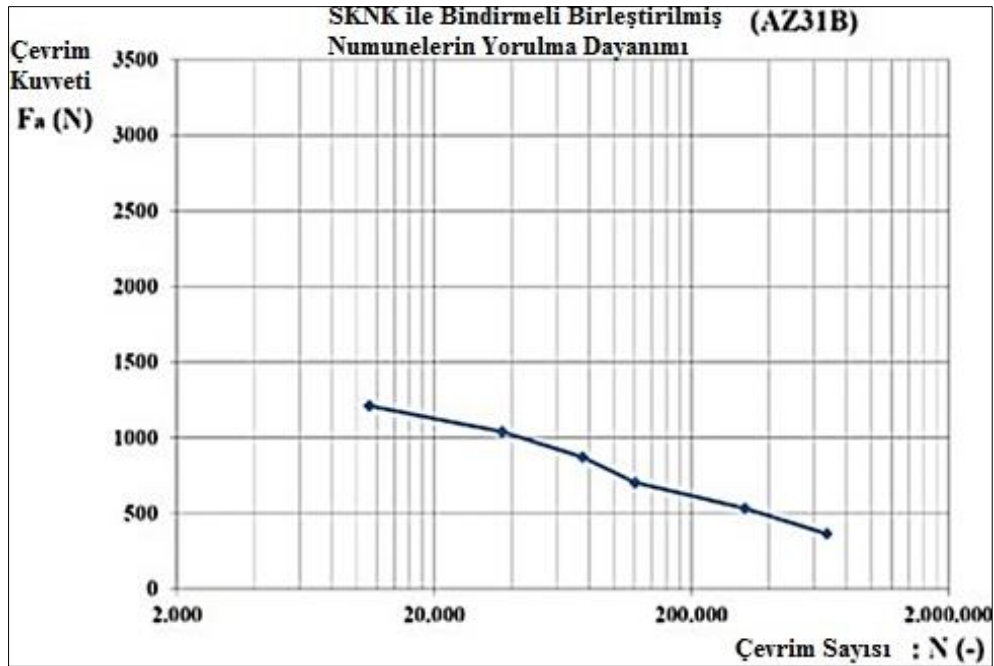
Çizelge 3.15. AZ31B magnezyum alışımlı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1)

Kalınlık [mm]-	En [mm]	Maksimum Kuvvet [N]	Akma Kuvvetine Oranı [%]	Yorulma Ömrü, Çevrim Sayısı
1,75	8,0	1209	75,5	11.217
		1040	65,0	36814
		871	54,4	75.516
		702	43,8	121,023
		533	33,3	322831
		364	22,7	671.567

Ana malzeme ve SKNK uygulanmış birleştirmenin yorulma dayanımı karşılaştırması:



şekil 3.53. AZ31B magnezyum alışımı 1,75 mm ana malzeme yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği



şekil 3.54. AZ31B magnezyum alışımı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları (R=-1) grafiği

Şekil 3.53 ve Şekil 3.54’de karşılaştırmalı olarak gösterilen yorulma test sonuçlarına bakıldığında SKNK yapılan numunelerin yorulma dayanımı ana malzemeninkine göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Testlerde çentik etkisinin açıklanması

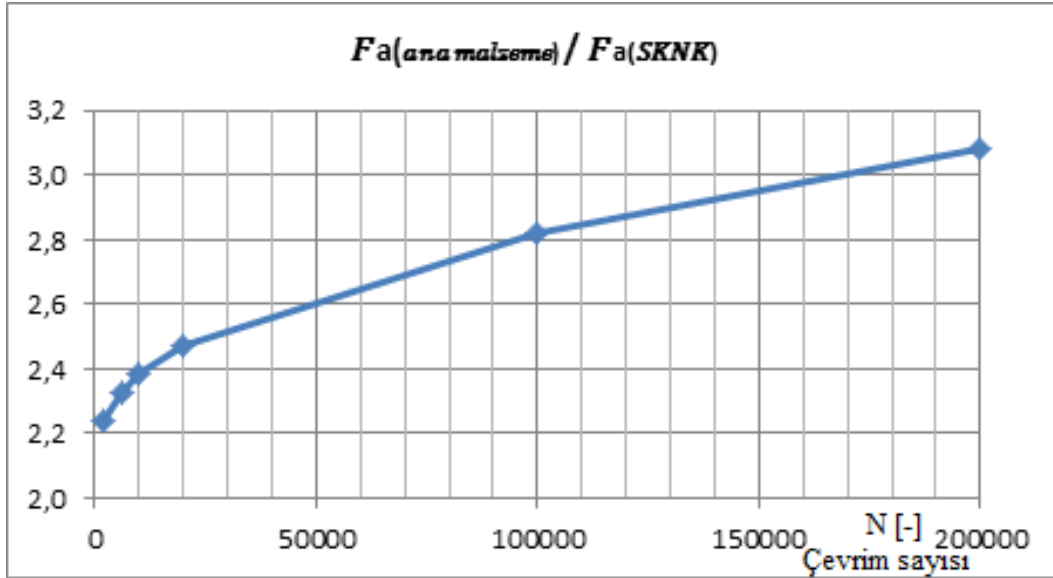
Hem hem de SKNK ile birleştirme yapılmasından oluşan çentik etkisi, malzemenin hem statik mukavemetini hem de yorulma ömrünü azalttığı düşünülmektedir (VandenBossche, 1977; Ewing, Cheresch, Thompson, Kukuchek, 1982). Ancak buradaki birleştirmelerin yetersiz ya da kötü olduğu anlamına gelmez.

Yapılan statik testler karşılaştırıldığında ana malzeme çekme kuvvetinin SKNK yapılmış numuneye oranı $F_{a, \text{Ana Malzeme}} / F_{a, \text{SKNK}} = 3,1$ ’dir.

Ancak çevrimli ($R=-1$) yorulma yükleri uygulandığında (yorulma testi) ise; deliğin düşük çevrim yüklerinde (buda yüksek çevrim sayısına karşılık gelir) statik yüklemdeki çentik faktörü olan 3,1’e yaklaştığı ancak, yüksek çevrim yüklerinde (buda düşük çevrim sayısına karşılık gelir) çentik faktörünün 2,2’ye kadar düştüğü görülmüştür (Çizelge 3.16 ve Şekil 3.55).

Çizelge 3.16. AZ31B magnezyum alışımlı 1,75 mm SKNK uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları ($R=-1$)

Çevrim Sayısı N [-]	$F_{a, \text{Ana Malzeme}}$ [N]	$F_{a, \text{SKNK}}$ [N]	$F_{a, \text{Ana Malzeme}} / F_{a, \text{SKNK}}$ [-]
2000	3605	1612	2,2
6000	3210	1378	2,3
10000	3026	1270	2,4
20000	2777	1122	2,5
100000	2198	779	2,8
200000	1948	632	3,1



Şekil 3.55. Karıştırma ucu çapı 8 mm ile SKNK uygulanmış 1,75 mm ve 30 mm eninde AZ31B magnezyum alaşımı ince levhalarda, malzemede çentik faktörünün yorulmaya etkisi

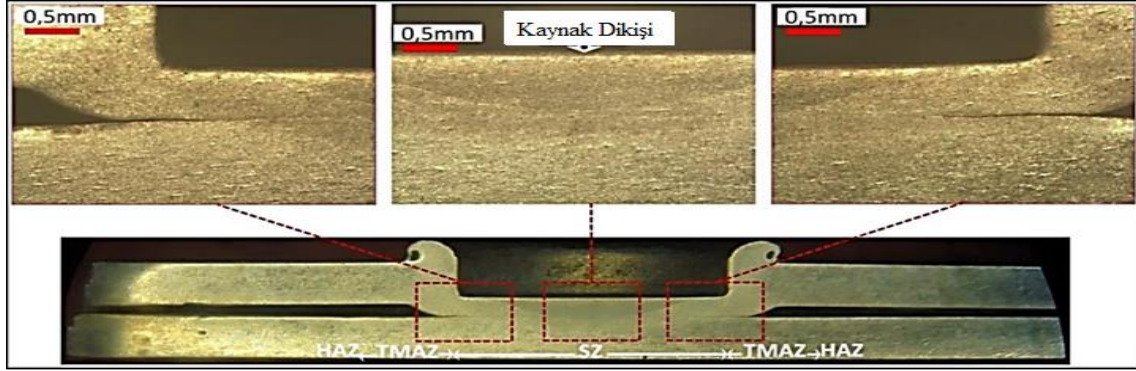
Yorulma testlerinden çıkan sonuçlar

- AZ31B magnezyum alaşımı nın mekanik özellikleri çekme testi ile ve yorulma ömrü ise yorulma testi ile ölçülmüştür.
- AZ31B magnezyum alaşımlı levhaların birleştirmeleri SKNK metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelerin hem statik hem de yorulma dayanımı ölçülmüştür.
- Çentik faktörünün genelde mekanik ve yorulma dayanımını azaltan önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Nokta kaynağı bir gerilim birikimi oluşturmaktadır. Buda birleştirmenin dayanımını düşürmektedir.
- Birleştirmeler başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

3.10.13. Metalografik yapı incelemesi

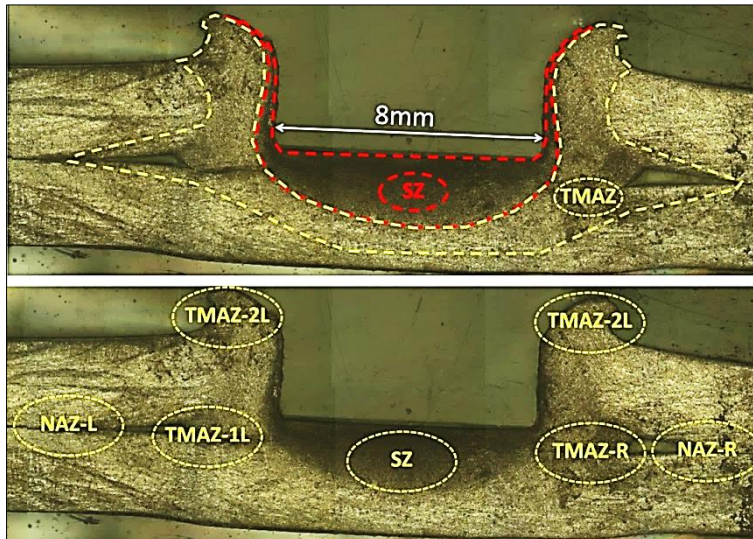
Mikroskobik inceleme için Nikon MA100 mikroskop (10X-1000X) kullanılmıştır. Makro fotoğraflar için 10X büyütme, mikro fotoğraflar için ise 200X ve 500X büyütme kullanılmıştır.

Birleştirmenin makro yapısının incelenmesi



Resim 3.42. Vidasız karıştırıcı uç omuz profili tipi “C” ile geçekleştirilen SKNK birleştirmesinin makro yapı görüntüsü

Mekanik testler sonucunda en fazla çekme kesme dayanımı elde edilen, vidasız karıştırıcı uç omuz profili tipi “C” ile geçekleştirilen SKNK birleştirmesinin makro ve mikro yapı görüntüsü Resim 3.42’de gösterilmiştir. Makro yapıya bakıldığında karıştırma bölgesi (SZ), ısıl-mekanik etkilenen bölge (TMAZ) ve sıcaklık etki bölgesi belirgin bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Ayrıca kaynak dikişi belirgin bir şekilde makro ve mikro yapı görüntüsünde görülebilmektedir. Bu nedenlerle birleştirmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir.



Resim 3.43. Mikro yapı görüntüsü alınan bölgelerin görüntüsü

Resim 3.43’te; aşağıda Resim 3.44, Resim 3.45 ve Resim 3.46’da gösterilen mikro yapı görüntülerin alındığı karakteristik bölgeler işaretlenmiştir. Tüm omuz profil tiplerine göre

bu bölgelerin mikro yapıları 10 mikro metre çözünürlükte alınmış ve Resim 3.44, Resim 3.45 ve Resim 3.46'da gösterilmişlerdir.

Resim 3.43'te görüntü yerleri ve daha sonra mikro yapı görüntülerini gösteren Resim 3.44, Resim 3.45 ve Resim 3.46'daki anlamları:

SZ	Karıştırma dikiş bölgesi
TMAZ	Isıl-mekanik etki bölgesi
NAZ	Isıl-mekanik etkilenmeyen bölgesi

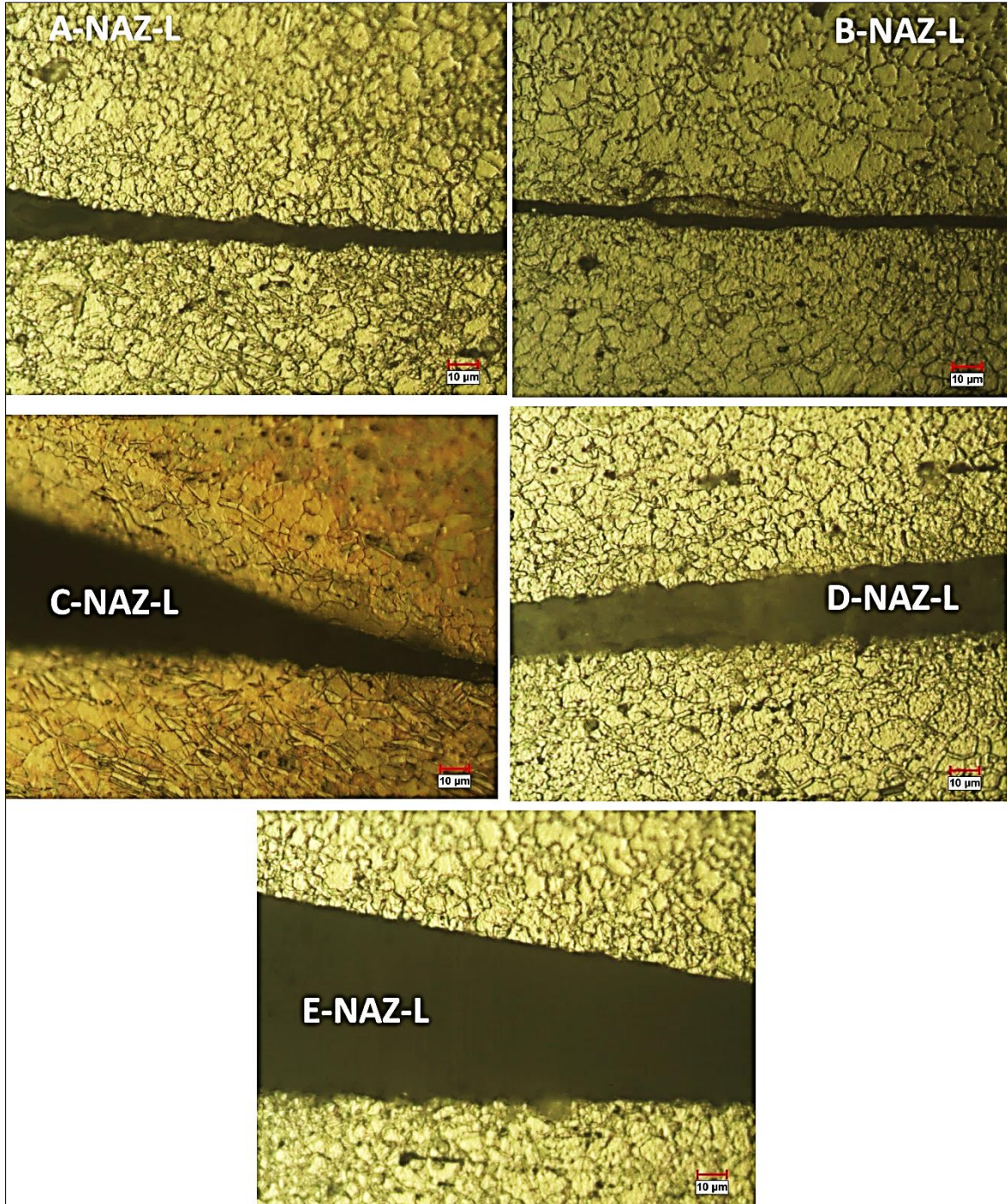
Örnek kısaltma açıklamaları:

A-NAZ-L : “A” omuz profiline sahip karıştırma ucu ile yapılmış birleştirmenin sol (L) tarafındaki ısıl mekanik etkilenmeyen bölgesinin mikro yapı görüntüsü.

C-TMAZ-R : “C” omuz profiline sahip karıştırma ucu ile yapılmış birleştirmenin sağ (R) tarafındaki ısıl mekanik etkilenen bölgesinin mikro yapı görüntüsü.

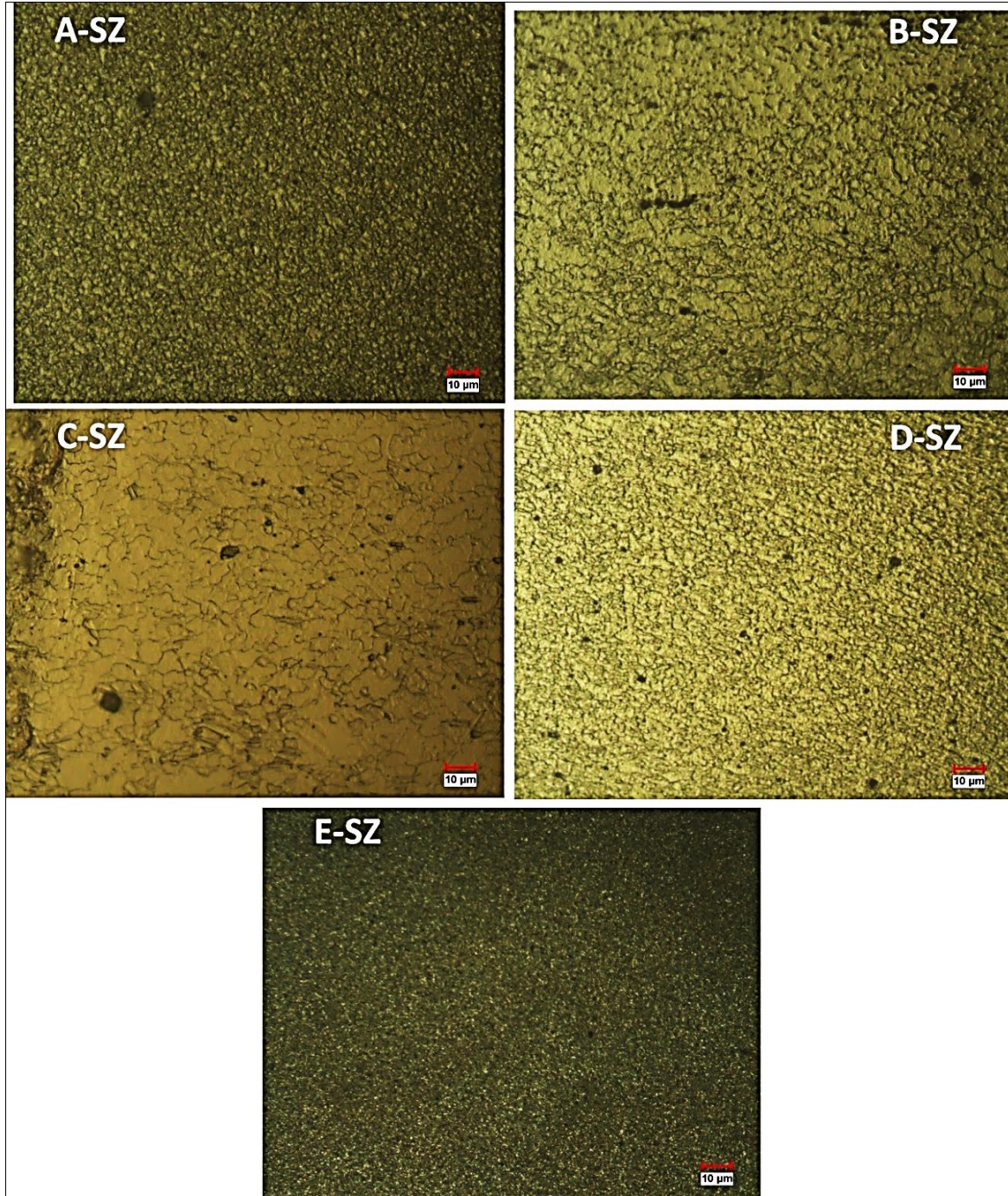
E-SZ-L : “E” omuz profiline sahip karıştırma ucu ile yapılmış birleştirmenin sol (L) tarafındaki dikiş bölgesinin mikro yapı görüntüsü.

Birleştirmerinin mikro yapı görüntülerinin incelenmesi



Resim 3.44. Omuz profil tipleri “A”, “B”, “C”, “D” ve “E” nin birleştirirmeden etkilenmeyen sol (L) veya ağ (R) bölgedeki (NAZ) mikro yapı görüntüleri

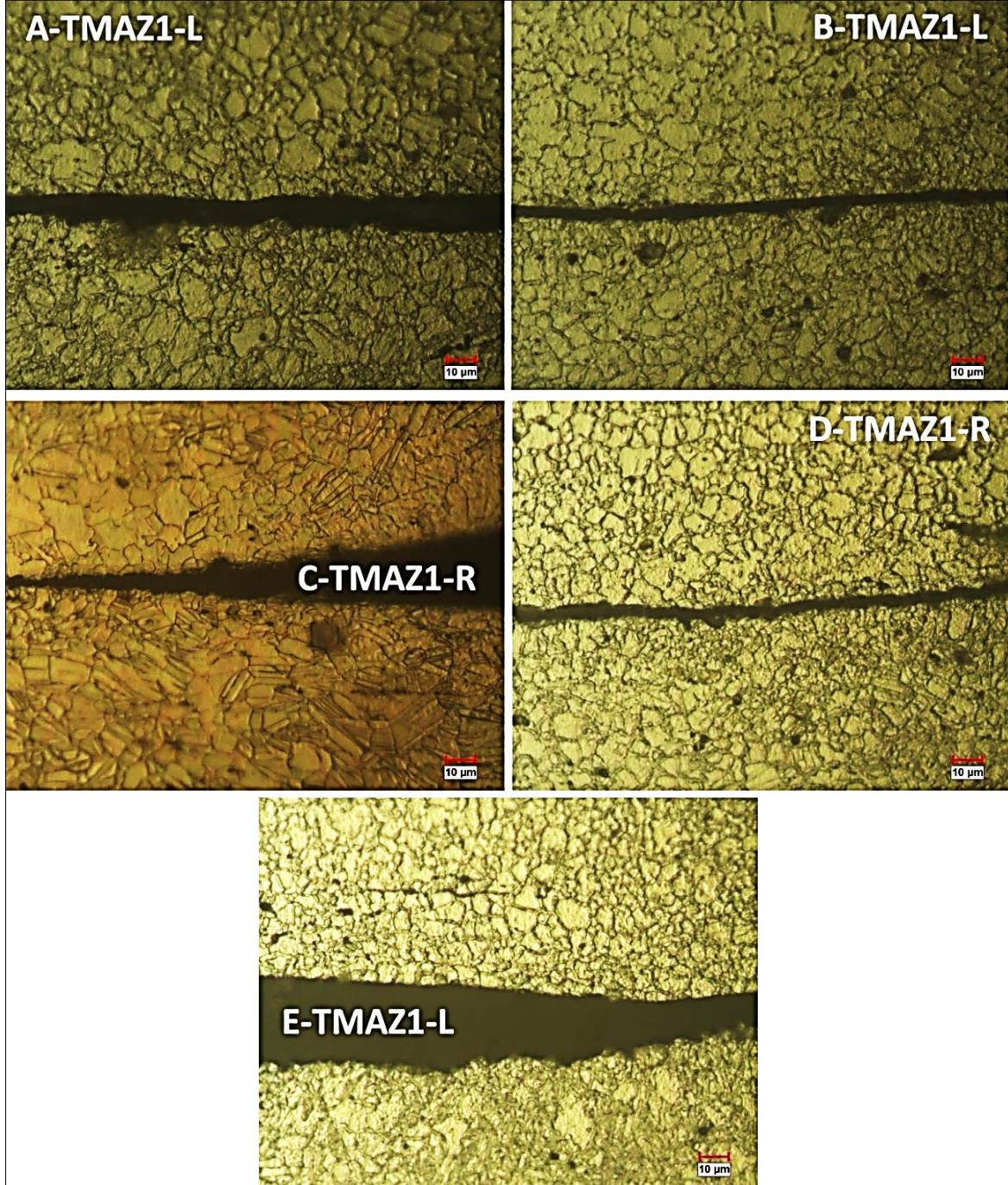
Birleştirirmeden etkilenmeyen bölgenin mikro yapıları Resim 3.44’de incelendiğinde tane büyüklüğünün alt levha ve üst levha arayüzünde biraz daha ince olsada genelde 10 mikro metre civarında olduğu görölmektedir. Omuz profil tiplerine göre bakıldığında önemli bir fark görölmediği söylenebilir.



Resim 3.45. Omuz profil tipleri “A”, “B”, C”, “D” ve “E” nin birleştirmenin gerçekleştiği bölgedeki (SZ) mikro yapı görüntüleri

Birleştirmenin gerçekleştiği sürtünme karıştırma bölgesinin (SZ) mikro yapıları Resim 3.45’de incelendiğinde tane büyüklüğünün daha küçük 3 mikro metre civarında olduğu görülmektedir. SZ bölgelerindeki taneler ve büyüklükleri; E ucu ile yapılan kaynakta daha çok ısı girdisi ve plastik deformasyon olduğu yorumlanabilir (daha fazla yeniden kristallenmiş numune olduğu için). Bu açıdan bir sıralama $E > A > D > B > C$ şeklinde

yapılabilir. Ayrıca SZ bölgesinde tane yapısı daha homojen hale gelmiştir. Omuz profil tipi “C”, “D” ve “B” mikro yapı görüntüsünde taneler biraz daha diğerlerine göre büyük olduğu görülmektedir. Yani “A” ve “E” daha ince yapılıdır.



Resim 3.46. Omuz profil tipleri “A”, “B”, C”, “D” ve “E” nin birleştirmenin gerçekleştiği arayüzde ve sol (L) veya sağ (R) taraftaki ısıl-mekanik etki alanındaki (TMAZ1) mikro yapı görüntüleri

Birleştirmenin gerçekleştiği ısıl-mekanik etkilenen bölgenin (TMAZ) mikro yapıları Resim 3.46'da etkilenen arayüz bölgesinden başlayarak 3 mikro metre civarından giderek etkilenmeyen bölgedeki 10 mikro metre civarına kadar yükseldiği görülmektedir. Mikro yapının bu bölgede de en az etkileneni omuz profil tipi "C" olduğu görülmektedir.

Ancak TMAZ bölgeleri için omuz profil tiplerine bağlı keskin bir ayırım yapmak mümkün görünmemektedir. Bu konuyu da SZ bölgesinde gerçekleşen ısı girdisi ve plastik deformasyonun TMAZ bölgelerinde yeniden kristallenmiş tane oluşturacak kadar ısı girdisi oluşmadığı şeklinde yorumlanabilir.

Makro ve mikro yapının sonuç değerlendirmesi

Birleştirmelerin makro ve mikro yapıları incelendiğinde "C" omuz profil tipinde mikro yapı en düzenli değişime uğratılarak daha güçlü mekanik bir birleştirme olmuştur. Karıştırma bölgesindeki (SZ) taneciklerin diğer bölgelerdekine (10 mikro metre) göre daha küçük 3 mikro metre civarında olduğu tespit edilmiştir. Isıl-mekanik etkilenen bölge (TMAZ) incelendiğinde o bölgede bir ön çentik etkisine sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Bu bölgede tane yapısı arayüz bölgesinde 3 mikrometre iken diğer bölgelere doğru 10 mikrometreye kadar yükseldiği görülmektedir. SZ bölgelerindeki taneler ve büyüklükleri; E ucu ile yapılan kaynakta daha çok ısı girdisi ve plastik deformasyon olduğu yorumlanabilir (daha fazla yeniden kristallenmiş numune olduğu için). Bu açıdan bir sıralama $E > A > D > B > C$ şeklinde yapılabilir. Ayrıca SZ bölgesinde tane yapısı daha homojen hale gelmiştir. Omuz profil tipi "C", "D" ve "B" mikro yapı görüntüsünde taneler biraz daha diğerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Yani "A" ve "E" daha ince yapılıdır. TMAZ bölgeleri için omuz profil tiplerine bağlı keskin bir ayırım yapmak mümkün görünmemektedir.

Ugendera ve diğerleri, (2014) AZ31B malzemede karıştırıcı pimin malzemesinin mikro yapıya olan etkisini incelemiştir. Araştırmadaki ana malzeme mikro yapı tanelerinin büyüklükleri buradaki büyüklüklerle uyumluluk göstermektedir.

Afrin N. ve diğerleri, (2008), SKK uygulanan AZ31B malzemenin uğradığı değişikliği araştırmak için mikro yapısını incelemişlerdir. Araştırmadaki mikro yapı görüntüleri buradaki mikro yapı görüntüleri ile karşılaştırıldığında tam bir benzerlik görülmektedir. Paslanmaz

elikten üretilen uç ile yapılan SKK'larda daha ince taneli yapıya ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Li ve Wang, (2015), Farklı iki magnezyum alaşımı AZ80 ile AZ31B çeşitli geometrilerde SKK uygulanarak birleştirme kalitesini incelemişlerdir. Çalışmadaki mikroyapı görüntülerinin tane yapısı ve büyüklükleri buradaki çalışma ile uyumluluk göstermektedir.

Fairman ve diğerkleri, (2007), AZ31B malzemenin SKK proses altında mikro yapısının doğrulanması üzerine çalışmışlar ve microsertlik ile mikro yapı tane büyüklüğü arasında bir ilişki olduğunu tespit etmişler. Çalışmadaki AZ31B malzemenin mikroyapı görüntüleri bu alışmadakiler ile tam bir uyumluluk göstermektedir.

Mikro yapı literatür ile karşılaştırıldığında AZ31B malzemesi için gerçekleştirilmiş çalışmalardaki mikro yapı görüntüleri, tane büyüklükleri ve yapılan değerlendirmeler uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Ugendera, Kumar, Somi Reddy, 2014; Afrin, Chena, Caob, Jahazi, 2008; Li, Wang, 2015; Fairman, Afrin, Chen, Cao, Jahazi, 2007; Fairman, Afrin, Chen, Cao, Jahazi, 2007).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Çalışma konusuyla ilgili yapılan literatür taramalarında vidasız uç ile yapılan SKNK üzerine çok az sayıda araştırma olduğu belirlenmiştir.

Omuz profil tasarımının birleştirmeye ve anahtar deliği oluşturulmasına dolayısıyla da çentik faktörüne etkisinin olduğu anlaşılmıştır.

Isıl-mekanik nümerik simülasyon (FEM) sonuçları

Nümerik analizde kullanılacak ısı enerjisinin değeri hesaplanmış farklı parametrelere göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Karıştırıcı uçların omuz profili tasarım parametrelerine bağlı olarak sonuçların değiştiği görülmüştür.
- Karıştırıcı uçların omuz profillerinde 2 saniyede oluşan sıcaklık dağılımına göre en yüksek sıcaklık değeri omuz profil tipi A ve B’de olduğu saptanmıştır.
- Karıştırıcı uçların omuz profillerinde 2 saniyede oluşan sıcaklık dağılımına göre birleştirme kalitesini etkileyecek en homojen sıcaklık dağılımının B ve D profil tiplerinde olduğu tespit edilmiştir.
- Omuz profil tiplerinde ortalama 600°C malzeme sıcaklığına 2 saniye sonra ulaşıldığı belirlenmiştir.

Isıl-mekanik model analizleri sonucunda karıştırıcı ucun omuz profili bölgesinin ısısının yüksek olması birleştirilen malzemelerin kısa sürede istenen ısıya erişmesine sebep olmaktadır. Bu istenen bir durum olmakla birlikte, karıştırıcı ucun diğer bölgeleri süratle soğutulması dayanımı açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle karıştırıcı ucun dış yüzey geometrisinin tasarımı ile soğutma yüzeyi maksimize edilmiştir. Karıştırıcı ucun dış yüzeyinin tasarımı değiştirilmiştir. St37 ve St52 gibi yapı çelikleri kısa süreli yaklaşık 350-400°C sıcaklığa dayanabilmektedirler. Bu yüksek sıcaklıklarda dayanım için gerekli akma değerleri kalmamaktadır. Bunun yanında yüksek sıcaklık bölgesi dar alanda

sıkıştırılabilmektedir. Karıştırıcı uç malzemesi olarak AISI 1040 (DIN C40) malzemeden üretilmiş ve daha sonra ısıtılarak işlenilerek sertleştirilmiştir.

Farklı karıştırıcı uç omuz profili tasarımlarının mekanik testleri ve sonuçları

Beş farklı omuz profil tipi (A, B, C, D ve E)'ne sahip vidasız karıştırıcı uç kullanılarak gerçekleştirilen SKNK uygulayarak birleştirilen 1,5 mm magnezyum levhaların çekme-kesme ve üç nokta eğme testleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan bu mekanik testler sonucunda belirgin bir şekilde en iyi birleştirmenin karıştırıcı uç omuz profil tipi "C" ile gerçekleştiği doğrulanmıştır. Arkasından sırası ile "D", "A", "E" ve "B" geldiği tespit edilmiştir.

Seçilen omuz profili "C" ile en iyi SKNK parametrelerini belirleme sonuçları

- Omuz profili tipi "C" ile farklı dönme sayıları ile birleştirilen numunelerin mekanik testlerinden çekme-kesme test sonuçları değerlendirildiğinde 1500 ve 2000 dev/dak'da iyi birleştirmelerin yapıldığı tespit edilmiştir. En iyi ve tekrarlanabilir birleştirmenin 1800 dev/dak'da olduğu gözlemlenmiş, ayrıca maksimum kesme kuvvetinin de burada olduğu deney sonuçları ile gösterilmiştir (Çizelge 3.9). Üç-nokta eğme testlerine göre ise; 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak ile yapılan birleştirmelerin maksimum eğme kuvvetleri yaklaşık aynı çıkmıştır. Ancak 3000 devir/dakika ile gerçekleştirilen birleştirmelerin maksimum eğme kuvvetleri çok daha düşük olduğu görülmüştür.
- AZ31B magnezyum alaşımı 2,0 mm kalınlığındaki saçların SKNK ile 1750 dev/dak'da ve farklı dalma yüksekliklerinde ($H_w = 1,0 \text{ mm}; 1,2 \text{ mm}; 1,3 \text{ mm}$ ve $1,6 \text{ mm}$) birleştirildikten sonra; çekme kesme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. En iyi birleştirmenin 1,3 mm dalmada gerçekleştiği görülmüştür. Bu en iyi dalma miktarını iki levhanın kalınlığına oranlandığımızda $1,3 \text{ mm} / (2 \times 2 \text{ mm}) = 0,3$ elde edilmiştir. Birleştirme kalınlığına bağlı dalma oranı yaklaşık % 30 olması gerekmektedir.
- Dalma ve bekleme süresinin birleştirmeye önemli derecede etkili olduğu ve normalde bundan sonraki birleştirmeler için en iyi toplam birleştirme süresi yaklaşık 24 saniye (dalma ve bekleme süresi eşit olacak şekilde) olarak belirlenmiştir.
- Farklı levha kalınlığındaki çekme-kesme deney sonuçları incelendiğinde deneylerde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri pek fazla farklılık göstermediği görülmektedir. Bunun sebebinin numune kalınlığına bağlı olarak dalma yüksekliğinin ayarlanması ve en

iyi dönme hızına benzer hızlarda birleştirmelerin yapılmış olmasıdır. Bu nedenle önemli etki faktörü olarak; Çekme-kesme deneyinde elde edilen maksimum kopma kuvvetleri ve ortalamalarıyla elde edilen numune kalınlığına bağlı olarak belirlenen en iyi dalma yüksekliği ve dönme sayısı hesaplanarak Çizelge 3.14’de gösterilmiştir. Farklı kalınlıklara sahip levhaların üç-nokta eğme testlerine göre; en fazla eğme kuvvetlerine 1,75 mm numunede, 1500 dev/dak ve 0,6 mm dalma yüksekliğiyle yapılan birleştirmelerde olduğu gözlemlenmiştir. Kalınlığı 2,0 mm numunede, 1750 dev/dak ve dalma yüksekliği 1,0-1,2 mm ile yapılan birleştirmelerde de oldukça yüksek eğme kuvvetleri elde edilmiştir. En düşük kuvvetlere ise 3000 dev/dak ile gerçekleştirilen birleştirmelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak karıştırıcı uç dönme hızının 2000 dev/dak’yı geçmemesi gerektiği değerlendirilmiştir.

- Çekme-kesme testi doğrulama çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar:
1. Analitik gerilim mekanizması incelenerek çekme-kesme gerinim ve kuvvet denklemleri oluşturulmuştur.
 2. Minimum kopma gerilim kuvveti hesaplanmış ve testler göre izafi hata oranı %10 altında olup analitik gerilim mekanizması modeli için oldukça iyi bir doğrulama ortaya konmuştur.
 3. Kopma yerinin ise birleşme ara-yüzü çapından ($\phi d = 7 \text{ mm}$) başlayarak üst levhada gerçekleştiği, analitik gerilim mekanizma modeli testlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.
 4. FEM-Analizi sonucunda elde edilen lineer olmayan FEM kuvvet-uzama grafiği ile testlerle ölçülen sonuçların grafikleri karşılaştırılmış; analiz sonucu ve test sonuçlarının birbirine yakını oldukları görülmüştür. Arasındaki farkın %10 altında gerçekleşen maksimum izafi sapma olduğu görülmüştür. Ayrıca FEM-Çizgisinin test sonuçları sapma değerleri (genlik) içerisinde olduğu grafikte gösterilmiştir.
 5. FEM-Analizi ile birleşme bölgesindeki ve maksimum sınır yükü (ultimate) altında ki karşılaştırma gerilimi testlerde elde edilen kopma gerilimi ile tam örtüştüğü ve analitik hesaplanan kopma kuvveti ile karşılaştırıldığında %10 altında düşük izafi hata oranı olduğu belirlenmiştir.
 6. Genel olarak SKNK-Çekme-Kesme-Testi analitik incelemesinden elde edilen denklemler, FEM-Analizi ve testlerle doğrulanmıştır. Burada üretilmiş olan analitik denklemler ile çekme-kesme testleri yapılmadan hesaplanabilir hasar öngörülleri yapılabilecektir.

- Çizelge 3.9’da verilen en iyi parametrelerle gerçekleştirilen SKNK birleştirmelerinin mekanik testleri, sertlik ölçümleri, X-RAY görüntüsü ve birleştirmenin makro-mikro yapıları incelenmiştir. Ayrıca statik ve yorulma dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.9’da verilen en iyi parametreler ile gerçekleştirilen birleştirmelerin;
1. Makro ve mikro yapıları incelendiğinde “C” omuz profil tipinde daha sıkı mekanik bir birleştirme olduğu değerlendirilmektedir. Karıştırma bölgesindeki kaynak dikiş bölgesinde taneciklerin diğer bölgelerdekine göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Isıl-mekanik etkilenen bölge incelendiğinde, bir ön çentik etkisine sebebiyet verdiği düşünülmektedir.
 2. Sertlik ölçümleri sonucunda; sertlik değerinin 67,5 HR15T civarında ve ihmal edilebilir bir değişim gösterdiği dolayısı ile SKNK’nın sertliğe olan etkisi ihmal edilecek seviyede olduğu görülmüştür. Bu pozitif etkinin karıştırıcı ucun vidasız olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
 3. X-Ray inceleme sonucuna göre; yapılan birleştirmenin çatlaksız, gözeneksiz ve başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmıştır.
 4. Statik ve yorulma testlerinin sonuçlarına göre SKNK’nın özelliğinden kaynaklanan çentik faktörleri belirlenmiş ve açıklaması yapılmıştır.
 5. Çentik faktörünün genelde mekanik ve yorulma dayanımını azaltan önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Nokta kaynağı bir gerilim birikimi (Stress Intensitets Factor) oluşturmaktadır. Buda birleştirmenin dayanımını düşürmektedir.
 6. Birleştirmeler başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

4.2. Öneriler

1. Pimsiz karıştırıcı uç ve omuz profili tasarımları bu çalışmadaki düz omuz şekli yerine farklı omuz şekillerine de (içbükey, dışbükey) uygulanarak bağlantıların iyileştirilmesi sağlanabilir.
2. Omuz profil tasarımlarının omuz yüzeyinde farklı derinliklerde incelenerek, birleştirme açısından en iyi profil derinliği belirlenebilir.
3. Ayrıca farklı karıştırıcı uç ve farklı iş parçası malzemelerinin karşılaştırması yapılarak en iyi ısı girdisi dolayısı ile en iyi bağlantılar hangi parametrelerde gerçekleştiği belirlenmesi SKNK’nın endüstriyel kullanımını kolaylaştırmak için incelenebilir.

4. Özellikle yorulma dayanımı açısından, SKNK'daki çentik etkisinin derecesi elektro direnç nokta kaynağı ile karşılaştırmak için bir çalışma yapılabilir.





KAYNAKLAR

- Afrin, N., Chena, D.L., Caob, X. and Jahazi, M. (2008). Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 472(1-2), 179–186.
- Anık, S. (1991). Kaynak Tekniği El Kitabı. *Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü*, İstanbul, Gedik Eğitim Vakfı (GEV), 1-250.
- Arbor, A. (2011). *Constructing a prototype man-portable friction stir welding system*. NSRP SP-7 Meeting at Wichita State University, Kansas, USA.
- Arora, A., De, A. and DebRoy, T. (2011). Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. *Scripta Materialia*, 64(1), 9–12.
- ASTM. (2010). *ASTM Standard B 107/B 107M-07:2010 Standard specification for magnesium-alloy extruded bars, rods, profiles, tubes, and wire*. Washington ASTM International.
- Atalay, O. (2006). *Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X. and Okamoto, K. (2009). Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. *International Journal Machine Tools Manufacturing*, 49(11), 814–823.
- Badarinarayan, H., Yang, Q. and Zhua, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal Machine Tools Manufacturing*, 49(2), 142–148.
- Bakavos, D., Chen, Y., Babout, L. and Prangnell, P. (2011). Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet, the minerals metals & materials society and ASM international. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 1266-1282.
- Bilici, M., K., Bakır, B., Bozkurt, Y. and Çalış, İ. (2016). Sürtünme karıştırma nokta kaynak tekniği ile birleştirilen farklı Alüminyum levhaların taguchi analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 17-23.
- Bozkurt, Y. ve Bilici, M. K. (2013). Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloys. *Materials and Design*, 51, 513-521.
- Bozkurt, Y., Türker, A. and Salman, S. (2018, May). *The investigation and comparison of friction stir spot welding an electrical resistance spot welding of AA202 alüminyum alloy joints*. 4th International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), Kiev.
- BS EN. (2007). *BS EN 485-2:2007 Aluminium and aluminium alloys-sheet, strip and plate-part 2: Mechanical properties*. London: British Standard.

- Bufa, G., Fratini, L. and Piacentini, M. (2007). Tool path design in friction stir spot welding of AA6082-T6 aluminum alloys. *Key Engineering Materials*, 344, 767-774.
- Buffa, G., Campanile, G., Fratini, L. and Prisco, A. (2009). Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. *Material Science Engineering. A*, 519, 19–26.
- Centro Ricerche FIAT (2005). *Rheocasting: An innovative & ecological Process for light and cost effective applications in different industrial sectors*. Rheo-Light Project Report, Torino, 1-20.
- Centro Ricerche, F. (2003). *New materials and manufacturing technologies for future lightweight vehicles*. Workshop Report, Orbassano, 1-40.
- Chao, Y. J. (2003). Failure mode of spot welds: Interfacial versus pullout. *Science and Technology of welding and Joining* 2003, 8(2), 133-137.
- Chao, Y. J. (2003). Ultimate strength and failure mechanism of resistance spot weld subjected to tensile, shear or combined tensile/shear loads. *Journal of Engineering Material and Technology*, 125, 125-132.
- Chen, C. and Kovacevic, R. (2004). Thermomechanical modelling and force analysis of friction stir welding by the finite element method. *Journal of Mechanical Engineering Science* 2004, 218-509.
- Chen, T. (2009). Process parameters study on FSW joint of dissimilar metals for aluminum-steel. *Journal of Material Science*, 44(10), 2573–2580.
- Chen, T. P. and Lin, W. B. (2010). Optimal FSW process parameters for interface and welded zone toughness of dissimilar aluminium-steel joint. *Science and Technology Welding & Joining*, 15(4), 279–285.
- Chen, Y. C. and Nakata, K. (2009). Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel. *Materials and Design*, 30(9), 3913–3919.
- Chiou, Y. C., Liu, C. T. and Lee, R. T. (2013). A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1818–1824.
- Choi, D. H., Ahn, B. W., Lee, C. Y., Yeon, Y. M., Song, K. U. and Jung, S. B. (2010). Effect of pin shapes on joint characteristics of friction stir spot welded AA5J32 sheet. *Material Transactions*, 51(5), 1028–1032.
- Chu, Q., Li, W.Y., Yang, X.W., Shen, J.J., Li, Y.B. and Wang, W.B. (2017). Study of process/structure/property relationships in probeless friction stir spot welded AA2198 Al-Li alloy. *Welding in the World* 2017, 1-15
- Çakır, M. C. (1999). *Modern talaşlı imalatın esasları*. Bursa: Rota Ofset.
- Çam, G. (2007). *Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında son gelişmeler*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası. Kaynak Teknolojisi VI. Kongresi, Ankara.

- Çam, G. (2011). Friction stir welded structural materials beyond Al- alloys. *International Materials Reviews*, 56(1), 1–48.
- Çimenoglu, H. (2014). *Kaynak teknolojisi, kaynak metalurjisi ders notları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Dawes, C. J. and Thomas, W. M. (1996). Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding Journal*, 75(3), 41–45.
- DTI. (2004). Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications. Global Watch Mission Report, *First published February 2005 by Pera Innovation Limited*, United Kingdom, 1-84.
- Duygulu, Ö. (2009). *Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Elangovan, K. and Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362–373.
- Erdoğan, M. (2001). *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, demir dışı alaşımlar*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Ewing, K. W., Cheresih, M., Thompson, R. and Kukuchek, P. (1982). *Static and impact strengths of spot-welded HSLA and low carbon steel joints*. Warrendale, USA: SAE.
- Fairman, M., Afrin, N., Chen, D.L., Cao, X. and Jahazi, M. (2007). Microstructural Evaluation of Friction Stir Processed AZ31B-H24 Magnesium Alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 46(4), 425-432.
- Fan, Z. (2005). Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys. *Material Science & Engineering A*, 413, 72-78.
- Feng, Z., Diamond, S., Santella, M.L., Pan, T.Y. and Li, N. (2004). *High strength weight reduction materials-friction stir welding and processing of advanced materials*. Oak Ridge National Laboratory Report DE-AC05-00OR22725, Washington, 101-108.
- Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., Kuo, M. and Bhatnagar, R. S. (2005). *Friction stir spot welding of advanced high-strength steels – a feasibility study*. Washington: SAE.
- Fent, A., (2005). Aluminium/magnesium composite crankcase. BMW Landshut Plant Report, *Germany*, 1-25.
- Fernandez, G. J. and Murr, L. E. (2004). Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359z20% SiC metal-matrix composite. *Material Characterization*, 52(1), 65–75.
- Fujii, H., Cui, L., Maeda, M. and Nogi, K. (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science & Engineering A*, 419, 25–31.
- Gan, W., Li, Z. T. and Khurana, S. (2007). Tool materials selection for friction stir welding of L80 steel. *Science and Technology of Welding & Joining*, 12(7), 610–613.

- Geliş, K. (2014). *Kaynak teknolojisi ders notları*. Ağrı: İbrahim Çeçen Üniversitesi.
- Gerlich, A., Su, P. and North, T. H. (2005). Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys. *Journal of Materials Science*, 40, 6473–6481.
- Gerlich, A., Yamamoto, M. and North, T. H. (2007). Local melting and cracking in Al 7075-T6 and Al 2024-T3 friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 474-475.
- Hattingh, D. G., Blignault, C., van Niekerk, T. I. and James, M. N.(2008). Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1–3), 46–57.
- Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimora, T. and Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of Materials Processing Technology*, V(210), 1455–1463.
- Hsiang, H. and Liang Kuo, J. (2003). An investigation on the hot extrusion process of magnesium alloy sheet. *Journal Of Materials Processing Technology*, 140, 6-12.
- İnternet: Rosendo, T., Mazzaferro, J., Mazzaferro, C., Tier, M., Ramos, F., Reguly, A., Strohaecker, T. and Dos Santos, J. (2013). *Friction Spot Processes - FSSW and FSpW*. http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut_fuer_werkstoffforschung/wmp/posterapresentacao-gkss2.pdf, Son Erişim Tarihi: 28.03.2013.
- Kafalı, H. ve Ay, N. (2014). Havacılıkta kullanılan 6013-T6 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 38-47.
- Kahraman, N. ve Gülenç, B. (2009). *Modern kaynak teknolojisi*. Ankara: EPA-MAT Basım Yayın Ltd. Şti.
- Kalmbach, R. (2005). *Magnesium opportunities in the automotive industry*. The 62nd Annual World Magnesium Conference, Berlin.
- Kaluç, E. ve Taban, E. (2007). *Otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağına alternatif bir yöntem: sürtünen elemanla nokta kaynağı (FSSW)*. Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi ve Sergisi, Ankara, 449.
- Kandemir, K. ve Can, A.Ç. (2003). Otomotiv endüstrisi için Magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1, 37-45.
- Kaya, A. A., Özdoğru, E. F., Abanoz, D., Yiğit, S. ve Yücel, O. (2002). *Otomotivde magnezyum alaşım uygulamaları*. Otekon02 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, 41-46.
- Khan, M. I., Kuntz, M. L., Su, P., Gerlich, A., North, T. and Zhou, Y. (2007). Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study. *Science & Technology of Welding and Joining*, 12(2), 175–182.

- Kim, J., Yoon, J. C. and Kang, B. S. (2007). Finite element analysis and modelling of structure with bolted joints, *Elsevir Applied Mathematical Modelling*, 31, 895-911.
- Kleiner, S., Beffort, O., Wahlen, A. and Uggowitzer, P.J. (2002). Microstructure and mechanical properties of squeeze cast and semi-solid cast Mg-Al alloys. *Journal of Light Metals*, 2, 277-280.
- Klobčar, D., Tušek, J., Smolej, A. and Simončič, S. (2015). Parametric study of FSSW of aluminium alloy 5754 using a pinless tool. *International Institute of Welding, Weld World*, 59, 269–281.
- Konig, W. and Neises, A. (1993). Wear mechanisms of ultrahard, nonmetallic cutting materials. *Wear*, 162, 12–21.
- Krallics, G., Horvath, M. and Fodor, A. (2004). Influence of ecap routes on mechanical properties of a nanocrystalline aluminium alloy. *Periodica Politechnica. Mechanical Engineering*, 48, 145-150.
- Kulekci, M. (2014). Effects of process parameters on tensile shear strength of friction stir spot welded Aluminium alloy (EN AW 5005). *Archives of metalurgy and materials*, 59, 221-224.
- Kulekci, M. ve Er, O. (2012). Determination of optimum welding parameter levels for friction stir spot welded WN AW 5005(AlMg1) aluminium alloy. *Journal of the faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27, 537-545.
- Kulekci, M.K., Esme, U. ve Buldum, B. (2016). Critical analysis of friction stir-based manufacturing processes. *International Journal Advance Manufacturing Technology*, 85(5-8), 1687-1712.
- Kumar, K., Kailas, S. V. and Srivatsan, T. S. (2008). Influence of tool geometry in friction stir welding. *Material Manufacturing Process*, 23(2), 189–195.
- Kurt, A. (2013). *Kaynak metalurjisi ders notları*. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Külekçi, M.K. (2008). Magnesium and its alloy applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 851-865.
- Külekçi, M.K., Şık, A. ve Kaluç, E. (2008). Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(9), 877-882.
- Lai, W. J., Feng, Z., Santella, M. and Pan, T. Y. (2013). Failure mode and fatigue behavior of ultrasonic spot welds with adhesive in lap-shear specimens of magnesium and steel sheets. *SAE International Journal Material Manufacturing*, 6(2), 1-7.
- Lammlein, D. H., DeLapp, D. R., Fleming, P. A., Strauss, A. M. and Cook, G. E. (2009). The application of shoulderless conical tools in friction stir welding: An experimental and theoretical study. *Materials and Design*, 30(10), 4012–4022.
- Lathabai, S., Painter, M.J., Cantin, G.M.D. and Tyagi, V.K. (2006). Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia*, 55(10), 899-902.

- Lee, W. B., Yeon, Y. M. and Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. *Materials Science Technology*, 19(6), 785–790.
- Li, N. (2004). *Automotive magnesium applications and life cycle environmental assessment*. The 3rd International Conference On Sf6 And The Environment, Michigan.
- Li, T. and Wang, Z. (2015), Microstructure evolution and shaping of friction stir lap welded dissimilar magnesium alloy joint. *The Open Materials Science Journal*, 9, 71-76.
- Li, Y. Qin, F., Liu, C. and Wu, Z. (2017). A review: Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys. *Metals* 2017, 7, 1-14.
- Liua, F.C., Hovanskib, Y., Milesb, M.P., Sorensena, C.D. and Nelsona, T.W. (2018). A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties. *Journal of Materials Science & Technology* 34, 39-57.
- Liyanage, T., Kilbourne, J., Gerlich, A.P. and North, T.H. (2013). Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(6), 500-508.
- Matek, W., Muhs, D., Wittel, H., Becker, M. and Jannasch, D. (2000). *Roloff/matek maschinenelemente* (14. Auflage). Germany: Vieweg Verlag.
- MEB. (2012). *Kaynak teknolojisi, elektrik direnç kaynağı 521MMI059*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı (MEB).
- Meilinger, Á. and Imre Török, I. (2013). The importance of friction stir welding tool. *Production Processes and Systems*, 6(1), 25-34.
- Mert, Ş. ve Mert, S. (2013). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde kullanılan makina ve ekipmanların incelenmesi. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 2(3), 121-129.
- Miles, M. P., Feng, Z., Kohkonen, K., Weickum, B., Steel, R. and Lev, L. (2010). Spot joining of AA 5754 and high strength steel sheets by consumable bit. *Science Technology Welding and Joining*, 15(4), 325–330.
- Mishra, R. S. and Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering A*, 50(1–2), 1–78.
- Mishra, R.S. and Mahoney, M.W. (2007). *Friction stir welding and processing*. Şehir: ASM.
- Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chean, J., Feng, Z. and Santella, M.L. (2006). Structure properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welding) 6111 aluminum. *Materials Science and Engineering*, 441, 79-96.
- Nabhani, F. (2001). Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials. *Journal of Materials Processing Technoogy*, 115(3), 402–412.
- Nicholas, E. D. and Thomas, E. D. (1998). A review of friction processes for aerospace applications', *International Journal of Material Production Technology*, 13(1–2), 45–55.

- Niemann, G., Winter, H. and Höhn, B. R. (2005). *Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen (4.Auflage)*. Heidelberg New York: Springer Vieweg Berlin.
- Padmanaban, G. and Balasubramanian, V. (2009). Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – an experimental approach. *Materials Design*, 30(7), 2647–2656.
- Paramsothy, M., Gupta, M., Chan, J. and Kwok, R. (2011). Carbon Nanotube Addition to Simultaneously Enhance Strength and Ductility of Hybrid AZ31/AA5083 Alloy. *Materials Sciences and Applications*, 2(1), 20-29.
- Parra, B., Saccon, V. T., Guedes de Alcantara, N., Rosendo, T. and Fernandes dos Santos, J. (2011). An Investigation on friction spot welding in AA6181-T4 Alloy. *Tecnol Metal Mater Miner*, 8(3), 184-190.
- Poulachon, G., Moisan, A. and Jawahir, I. S. (2001). Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Wear*, 250, 576–586.
- Prado, R. A., Murr L. E., Soto, K. F. and McClure J. C. (2003). Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061/20% Al₂O₃ MMC. *Materials Science & Engineering A*, 349(1–2), 156–165.
- Radaj, D. and Zhang, S. (1993). On the Relations Between Notch Stress and Crack Stress Intensity in Plane Shear and Mixed Mode Loading. *Engineering Fracture Mechanic*, 44(5), 691–704.
- Radakovic, D. J. and Tumuluru, M. (2008). Predicting Resistance Spot Weld Failure Modes in Shear Tension Tests of Advanced High-Strength Automotive Steels. *Welding Journal*, 87, 96-105.
- Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H. and DebRoy, T. (2011). Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(4), 325-342.
- Rajakumar, S., Muralidharan, C. and Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T-6 aluminium alloy joints. *Materials Design*, 32(2), 535–549.
- Rausch, G. and Ziese, A. (2003). *Advanced manufacturing technology for automotive chassis components through extensible and sustainable use of Mg- alloys*. Mg Chassis Project Report, Orbassano.
- Reshad Seighalani, K., Besharati Givi, M. K., Nasiri, A. M. and Bahemmat, P. (2010). Investigations on the effects of the tool material, geometry, and tilt angle on friction stir welding of pure titanium. *Journal Material Engineering Perform*, 19(7), 955–962.
- Rohani Yazdi, S., Beidokhti B. and Haddad-Sabzevar, M. (2019). Pinless tool for FSSW of AA 6061-T6 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, 44–51.
- Rowe, C. E. D. and Thomas, W. M. (2005). Advances in tooling materials for friction stir welding. Technical report, TWI, Cambridge, 1-11.

- Santella, M., Hovanski, Y., Frederick, A., Grant, G. and Dahl, M. (2010). Friction stir spot welding of DP780 carbon steel', *Science Technology Welding & Joining*, 15(4), 271–278.
- Santella, M.L., Grant, G.J., Feng, Z., Carpenter, J.A. and Sklad, P.S. (2005). *Friction stir spot welding of high strength steel*. Oak Ridge National Laboratory & Pacific Northwest National Laboratory Progress Report, DE-AC05-00OR22725 & DE-AC06-76RLO1830, Oak Ridge, 336-339.
- Sato Y. S., Shiota, A., Kokawa, H., Okamoto, K., Yang, Q. and Kim, C. (2010). Effect of interfacial microstructure on lap shear strength of friction stir spot weld of aluminium alloy to magnesium alloy. *Science Technology Welding & Joining*, 15(4), 319–324.
- Schmidt, H., Hattel, J. and Wert, J. (2004). An analytical model for the heat generation in friction stir welding. *Modelling And Simulation In Materials Science and Engineering*, 12, 143-157.
- Scialpi, A., de Filippis, L. A. C. and Cavaliere, P. (2007). Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. *Materials & Design*, 28(4), 1124–1129.
- Shin, H-S. and De Leon, M. (2016). Weldability assessment of friction stir spot welded lightweight alloys using pin and pinless tools. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(2), 99-105.
- Shindo, D. J., Rivera, A. R. and Murr, L. E. (2002). Shape optimization for tool wear in the friction-stir welding of cast Al359-20% SiC MMC'. *Journal of Materials Science*, 37(23), 4999–5005.
- Smith, C. B. and Hinrichs, J. F. (2002). *A comparison of robotic friction stir welding and robotic GMAW*. Sunum, 1-21, <https://www.yumpu.com/en/document/view/32004487/a-comparison-of-robotic-friction-stir-welding-and-friction-stir-link>.
- Sorensen, C. D. and Nielsen, B. (2009). *Exploring geometry effects for convex scrolled shoulder, step spiral probe FSW tools*. Proc. TMS 2009 Annual Meet., San Francisco, 85–92.
- Su, P., Gerlich, A., North, T. H. and Bendzsak, G.J. (2006). Energy utilisation and generation during friction stir spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(2), 163-169.
- Su, P., Gerlich, A., North, T.H. and Bendzsak, G.J. (2005). Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys. *Materials Forum*, 29, 290-294.
- Sun, N., Yin Y. H., Gerlich, A. P. and North, T. H. (2009). Tool design and stir zone grain size in AZ31 friction stir spot welds. *Science & Technology Welding & Joining*, 14(8), 747–752.
- Şık, A. (2002). *Otomobil Saclarının MIG/MAG Kaynağında gaz karışımlarının bağlantının mekanik mekanik özelliklerine etkisi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Şık, A. (2010). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen Magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi. *Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 134-140.
- Şık, A. (2013). Comparison between microstructure characteristics and joint performance of AZ31 magnesium alloy welded by TIG and friction stir welding (FSW) processes. *Kovove Material*, 51, 197–203.
- Şık, A. ve Kayabaş, Ö. (2003). Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan Alüminyum kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11(12), 30-43.
- Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M. (2010). AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 139-147.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, Templesmith P. and Dawes C. J. (1995). *Friction stir butt welding*, US Patent 5460317.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Watts, E. R. and Staines, D. G. (2002). Friction based welding technology for aluminium. *Material Science Forum*, 396, 1543–1548.
- Tozaki, Y., Uematsu, Y. and Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machining Tools Manufacturing*, 47, 2230–2236.
- Tozaki, Y., Uematsu, Y. and Tokaji, K. (2010). A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(6–7), 844–851.
- Türker, M. ve Tosun, M. (2017). Havacılık endüstrisinde kullanılan modern kaynak teknolojileri. *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- Ugendera, S., Kumar, A. and Somi Reddy, A. (2014). Microstructure and mechanical properties of az31b magnesium alloy by friction stir welding. *Procedia Materials Science*, 6, 1600–1609.
- Van den Bossche, D. J. (1977). *Ultimate Strength and Failure Mode of Spot Welds in High Strength Steels*. Washington: SAE paper 770214.
- Vijay, S. J., Murugan, N. (2010). Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al–10 wt.% TiB₂ metal matrix composite. *Materials and Design*, 31(7), 3585–3589.
- Vinarcik, E. J. (1989). *High integrity die casting processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Volvo Car Corporation. (2003). *R&D in forming and materials of Volvo Cars body components*. Turin: Workshop In Turin.
- Webb, D. (2005). *Magnesium supply and demand*. The 62. Annual World Magnesium Conference, Berlin.
- Wilson, J. S. (2005). *Sensor technology handbook*. Burlington: Newnes, 621.

- Xia, K., Wang, J.T., Wu, X., Chen, G. and Gurvan, M. (2004). Equal channel angular pressing of magnesium alloy Az31. *Material Science & Engineering*, V(410–411), 324–327.
- Xiuqing, Z., Lihua, L., Naiheng, M. and Haowei, G. (2006). Mechanical properties and damping capacity of magnesium matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), 2011–2016.
- Yadava, M. K., Mishra R. S., Chen, Y. L., Carlson, B. and Grant, G. J., (2010). Study of friction stir joining of thin aluminium sheets in lap joint configuration. *Science & Technology Welding and Joining*, 15(1), 70–75.
- Yin, Y. H., Sun, N., North, T. H. and Hu, S. S., (2010). Influence of tool design on mechanical properties of AZ31 friction stir spot welds. *Science & Technology Welding and Joining*, 15(1), 81–86.
- Zeytin, H. K. (1999). *Magnezyum alaşımları: Otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği*. Uluslararası Döküm Kongresi, 14-15 Ekim 1999, Marmara Araştırma Merkezi, Gebze.
- Zhang, S. (2001), Approximate stress formulas for a multiaxial spot weld specimen. *Welding Journal (Miami)*, 80(8), 201–203.
- Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S. and Wanjara, P. (2012). Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3), 250–261.
- Zhao, H., Shen, Z., Booth, M., Wen, J., Fu, L. and Gerlich, A. P. (2018). Calculation of welding tool pin with for friction stir welding of thin overlapping sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5-8), 1721–1731.
- Zimmermann, M., Lahres, M., Viens, D. V. and Laube, B. L. (1997). Investigations of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA. *Wear*, 209(1–2), 241–246.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATAK, Ahmet
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.12.1962, Sandıklı
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0531-605 52 18
 e-mail : ahmet.atak@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Endüstri Ürünleri Tasarımı	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Ruhr-Universitaet-Bochum/Almanya	1992
Lisans	Fachhochschule-Giessen/Almanya	1987
Lise	Zeytinburnu İhsan Mermerci Lisesi/İstanbul	1980

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018- Halen	TUSAŞ – Kahramankazan/ANKARA	Yapısal Müdür.
2014-2018	TÜBİTAK-TEYDEB	Komite Sekreteri.
2013	Bozankaya A.Ş. Ankara	Tasarım Geliştirme ve Projeler Müdürü.
2012-2012	ULUSOY Electric ANKARA	Ar-Ge Müdürü.
1989-2012	Farklı firmalar/ALMANYA	Ar-Ge Mühendisi.

Yabancı Dil

Almanca
 İngilizce

Yayınlar

Abay M. M., Atak A., Şahin M., İzgü O., (2019, June), *Design and optimization of innovative cfrp central cylinder for satellite*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, İstanbul.

- Atak A., Şık A., (2015). *Çelik yapı kaynaklı bağlantılarının EC3'e göre Tasarım ve analiz yöntemi*. Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi, Ankara, 277-289.
- Atak A., Şık A., (2018, September). *Investigation of mechanical properties and fatigue of friction stir spot welded light metals*. International Colloquium – Mechanical fatigue of metals, FEUP, Porto, Portugal, 183.
- Atak A., Şık A., (2018, September). *Investigation of mechanical properties of friction stir spot welded light metal alloys*. 5th International Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET'18), Sarejevo, 55.
- Atak A., Şık A., (2019). Investigation of mechanical properties and fatigue of friction stir spot welded light metals. In: Correia J., De Jesus A., Fernandes A., Calçada R. (eds) Mechanical fatigue of metals. Kitap: *Structural Integrity*, Springer, 7, 343-349.
- Atak A., Şık A., (2019). Investigation of mechanical properties of friction stir spot welded light metal alloys. *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 2, 9(2), 56-63.
- Atak A., Şık A., Ertürk İ., (2016, May). *Kaynaklı bağlantıların Eurocode 3 (EC3)'e göre yorulma dayanımının hesaplanması*. 4th International Conference on Welding Technologies and Exhibition, Gaziantep, Proceedings 772-782.
- Atak A., Şık A., Özdemir V. (2018). *Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemiyle otomotiv sektöründe kullanılan Magnezyum alaşımlarının birleştirilmesi*. 9th International Automotive Technologies Congress OTEKON 2018, Bursa, 1225-1234.
- Atak A., Şık A., V., Özdemir, (2018). Thermo-Mechanical modelling of friction stir spot welding and numerical solution with the finite element method. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 5(2), 70-75.
- Bağdat Ü., İzgü O., Çaybaşı H., Aydoğan F., Haktanır O., Atak A. (2019, June), *Satellite level acoustic test response evaluation for optic sensors mounted on anti-earth deck panel*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, İstanbul.
- Şahin M., Atak A., (2018, Eylül). *Uzay araçları ve uydularda titreşim testleri ve test süreçleri*. VII. Ulusal havacılık ve uzay konferansı, UHUK-2018-135, 19 Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Şık A., Atak A., Yavuz C., Özdemir V., (2018). The design of fatigue strength machine being one of the methods for determination the mechanical properties of the materials used in the industry. *Journal of Science Part A: Engineering and innovation*, Gazi University, 5(2), 79-88.

Hobiler

Simülasyon, Hüsni-Hat (kaligrafi) yazım sanatı, Yayla ve dağlarda gezinti, Spor.



GAZİ GELECEKTİR..