

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİPLERDEKİ ALÜMİNYUM ESASLI
METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN
BURKULMA VE YORULMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Çağrı ORUÇ

Mart, 2021
İZMİR

**FARKLI TİPLERDEKİ ALÜMİNYUM ESASLI
METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN
BURKULMA VE YORULMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Yüksek Lisans Programı

Çağrı ORUÇ

Mart, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÇAĞRI ORUÇ, tarafından **DOÇ. DR. OKAN ÖZDEMİR** yönetiminde hazırlanan **“FARKLI TİPLERDEKİ ALÜMİNYUM ESASLI METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMA VE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR

Yönetici

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Uğur KEMİKLİOĞLU

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sırasında her zaman yanımda olan, benden bilgilerini ve deneyimlerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Tez süresince benden yardımlarını esirgemeyen ZF Lemförder çalışma arkadaşlarım, başta Dr. Jochen KRUSE olmak üzere, Duygu ZERKİN, Metin ÇETİN, Batuhan YILMAZ, Buğra Y. ÇETİN ve Ender ERDOĞAN' a teşekkür ederim.

Yüksek lisans boyunca her konuda yanımda olan eşim Yeşim ORUÇ' a ve aileme teşekkür ederim.

Çağrı ORUÇ

FARKLI TİPLERDEKİ ALÜMİNYUM ESASLI METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMA VE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZ

Salıncak kolları, tekerlekler ile şasi arasında bağlantıyı sağlayan ve kuvvet ve hareketi bir bağlantı elemanından diğerine aktarmaya yarayan bir organdır. Genellikle alüminyum ya da çelik malzemeden üretilirler. İdeal bir salıncak kolu sadece bası ve çeki kuvvetlerini karşılamalı ve belirli bir katılığa sahip olmalıdır. Ancak ana sanayi tarafından belirlenen araç paketlerinde kısıtlı bir alan söz konusu olduğunda, salıncak kolu tasarımı düz bir geometriye sahip olmayabilmektedir. Bu durumda salıncak kolları eğilme gerilmesine maruz kaldığından dolayı, bu gerilmeye mekanik olarak karşı koyabilmek için daha kalın bir kesit alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Kısıtlı alan ve ana sanayinin ağırlık hedefleri (elektrikli araç vb.) göz önüne alındığında ise daha kalın kesitli bir parça tasarlanması uygulanabilir olmadığı görülmektedir.

Salıncak kolları, ömürleri boyunca statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu yüklemeler, belirli bir çevrim sayısında (yorulma) veya ani hasarlar (burkulma) meydana getirmektedir ve aracın sürüş güvenliği açısından ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Gün geçtikçe salıncak kollarının maruz kaldığı bu yüklerin artması, yine ana sanayi tarafından beklenen ağırlık azaltma hedefleri ile bağdaşmamaktadır.

Bu çalışmada, partikül silisyum takviyeli alüminyum esaslı metal kompozit malzemeli, spreyl döküm yöntemi ile üretilmiş salıncak kollarının yorulma ve burkulma davranışları incelenip standart alüminyum alaşımlı salıncak kollarının performansları ile karşılaştırılmıştır. Partikül olarak silisyum takviyesinin malzemenin elastisite modülünde %7 artış sağladığı görülmüştür. Bu iyileşmenin yorulma ve burkulma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yorulma, burkulma, salıncak kolu, metal matrisli kompozit malzeme, spreyl döküm

INVESTIGATION OF BUCKLING AND FATIGUE BEHAVIOR OF VARIOUS ALUMINIUM BASED METAL COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

Control Arms are the components which connect chassis to wheel and transmit the loads and movement from one component to the other. They are generally made of aluminium or steel. An ideal control arm should carry only compression and tension loads and have a certain stiffness. However, in some cases control arms can have bended geometries when there is limited space in the vehicle package which is defined by auto makers. In such cases, control arms need thicker sections and high stiffness in order to mechanically resist as they are subjected to bending stresses. When limited space availability and auto makers' low-weight targets are considered, it is visible that designing thicker components is not always feasible.

Control arms are subjected to static and dynamic loads during their lifetime. These loads can deform the control arms at a certain load cycle (fatigue) or deform them suddenly (buckling) which poses a serious threat to driving safety. Recent increases in loads in which control arms are subjected, are not complying with the low-weight design targets expected by auto makers.

In this study, buckling behaviour of control arms which have been produced with Si particle reinforced aluminium based metal composite material have been investigated and compared with the performance of control arms that are produced with standard aluminium alloy. It was observed that Si particle reinforcement increased the modulus of elasticity of the material by 7%. Effects of increased modulus of elasticity on buckling behaviour have also been investigated.

Keywords: Fatigue, buckling, control arm, metal matrix composites, spray casting

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
BÖLÜM İKİ – BİNEK ARAÇLARDA SALINCAK KOLLARI.....	12
2.1 İki-noktalı Salıncak Kolları.....	13
2.1.2 İki-noktalı Salıncak Kollarının Elemanları	14
2.1.2.1 Salıncak Kolu Gövdesi.....	15
2.1.2.2 Mafsal Mili	17
2.1.2.3 Plastik Yatak	19
2.1.2.4 Sızdırmazlık Sistemi	20
2.1.2.5 Burç	21
BÖLÜM ÜÇ – METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	23
3.1 Takviye malzemesinin tipine göre MMK’ler.....	24
3.1.1 Partikül takviyeli MMK’ler	24

3.1.2 Süreksiz fiber takviyeli MMK’ler	25
3.1.3 Sürekli fiber takviyeli MMK’ler	26
3.2 MMK’lerin Üretim Yöntemleri.....	27
3.2.1 Toz Metalürjisi	27
3.2.2 Eriyik metal yöntemleri.....	28
3.2.3 Karıştırmalı Döküm Yöntemi	29
3.2.4 Yarı-katı Döküm Yöntemi	29
3.2.5 Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi	29
3.2.6 Basınsız İnfiltrasyon Yöntemi	30
3.2.7 Sprey Döküm (Sprey biriktirme) Yöntemi	30
3.2.8 XD™ (In-situ) Yöntemi	31
BÖLÜM DÖRT - YORULMA.....	33
4.1 Yorulmanın Tarihçesi.....	33
4.2 Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler	34
4.2.1 Maksimum Çeki Gerilmesi	34
4.2.2 Gerilme Genliği.....	34
4.2.3 Uygulanan Çevrim Sayısı	34
4.2.4 Sıcaklık.....	35
4.2.5 Korozyon.....	35
4.2.6 Metalürjik Faktörler	36
4.2.7 Yüzey Kalitesi.....	37
4.2.8 Çentik Etkisi.....	37
4.2.9 Soğuk Deformasyon (Cold Working)	38
4.3 Yorulma Ömrünün Belirlenmesi.....	38
4.3.1 Gerilme (S) – Ömür (N) Yaklaşımı (Toplam Ömür)	39

4.3.2 Birim Şekil Değişirme (ϵ) – Ömür (N) Yaklaşımı.....	43
4.3.3 Kırılma Mekanığı Yaklaşımı (Yorulma Çatlağı İlerlemesi)	46
BÖLÜM BEŞ - BURKULMA.....	49
5.1 Euler’ın Burkulma Teorisi	49
5.2 Rankine Gordon Denklemi	51
5.3 Enerji Yaklaşımı.....	52
BÖLÜM ALTI - %10 SİLİSYUM PARTİKÜL KATKILI ALÜMİNYUM ESASLI METAL KOMPOZİT MALZEMELİ SALINCAK KOLU	54
6.1 Sprey Döküm (Sprey Biriktirme) ile ham kütüklerin elde edilmesi	54
6.2 Sıcak Ekstrüzyon.....	55
6.2.1 Ekstrüzyon Sonrası Ham Kütüklerin Malzeme Analizi.....	56
6.3 Sıcak Dövme ve Isıl İşlem	57
6.3.1 Isıl İşlem Sonrası Ham Salıncak Kolu Gövdelerinin Malzeme Analizi ...	59
6.3.2 Optimum Isıl İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi	60
6.3.3 Tekrarlanan Isıl İşlem Sonrası Ham Salıncak Kolu Gövdelerinin Malzeme Analizi	62
6.4 Ham Salıncak Kollarının İşlenmesi ve Montajı	65
6.5 Yorulma Testi.....	69
6.6 Burkulma Testi.....	73
BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR.....	76
KAYNAKLAR	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Sprey çökeltme / döküm yöntemi	4
Şekil 1.2 Partikül boyutunun yorulma ömrü üzerindeki etkisi	8
Şekil 1.3 Partikül boyutunun yorulma ömrü üzerindeki etkisi	10
Şekil 2.1 Farklı tiplerde salıncak kolu tasarımları	13
Şekil 2.2 McPherson süspansiyon sistemi ve ona ait tüm komponentler	14
Şekil 2.3 İki-noktalı salıncak kollarının ana elemanları.....	15
Şekil 2.4 Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş iki-noktalı salıncak kolları	16
Şekil 2.5 Mafsal mili.....	17
Şekil 2.6 Küresel yatak sisteminin serbestlik derecesi	18
Şekil 2.7 Mafsal mili-akson şematik montajı.....	19
Şekil 2.8 Bir plastik yatak tasarımı	19
Şekil 2.9 Bir küresel yatak sisteminin tüm elemanları	21
Şekil 2.10 Farklı tiplerdeki kauçuk burçlar	22
Şekil 3.1 Partikül katkılı MMK yapısı	25
Şekil 3.2 Farklı tiplerdeki MMK'ler	27
Şekil 3.3 Toz metalürjisi yöntemiyle MMK üretimi	28
Şekil 3.4 Sprey Döküm Süreci	31
Şekil 4.1 Wöhler tarafından tasarlanan ilk yorulma deneyi düzeneği	33
Şekil 4.2 Farklı ortamlarda elde edilmiş S-N eğrileri	36
Şekil 4.3 Çelik alaşımında yüzey kalitesine göre değişen çekme dayanımı	37
Şekil 4.4 Çentik olması durumunun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi	38
Şekil 4.5 Bir çeliğe ait S-N eğrisi	39
Şekil 4.6 Wöhler Eğrisi	40
Şekil 4.7 Farklı çevrimsel yükleme çeşitleri	40
Şekil 4.8 Basquin tipi S-N eğrisi	41
Şekil 4.9 Farklı ortalama gerilmelerdeki yorulma ömrü	41
Şekil 4.10 Farklı ortalama gerilme durumları için elde edilen sabit ömür diyagramı	42
Şekil 4.11 Goodman doğrusu, Soderberg doğrusu ve Gerber parabolü	43

Şekil 4.12 Birim şekil değiştirme – ömür eğrileri	44
Şekil 4.13 Çatlak ilerleme mekanizması	46
Şekil 5.1 Farklı bağlantı tipleri için eşdeğer burkulma boyları	50
Şekil 6.1 %10 Si partikül katkılı alüminyum esaslı metal kompozit malzemeli salıncak kolunun üretim aşamaları	54
Şekil 6.2 Sprey döküm sonrası elde edilen ham kütük	55
Şekil 6.3 Sıcak Ekstrüzyon işlemi sonrası ham kütükler	56
Şekil 6.4 Sıcak dövme işleminin akış şeması.....	57
Şekil 6.5 Rot başı gövdesinin dövme aşamaları	57
Şekil 6.6 Sıcak dövme sonrası elde edilen ham salıncak kolu gövdesi	58
Şekil 6.7 Al-Cu faz diyagramı	58
Şekil 6.8 Isıl işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi.....	61
Şekil 6.9 Sıcak dövme sonrası salıncak kolu gövdelerine ait numunenin SEM mikro yapısı (X100)	64
Şekil 6.10 Sıcak dövme sonrası salıncak kolu gövdelerine ait numunenin SEM mikro yapısı (X5000)	64
Şekil 6.11 Salıncak kolu gövdesinin küresel yatak tarafının işlenmesi	65
Şekil 6.12 Salıncak kolu gövdesinin burç tarafının işlenmesi	66
Şekil 6.13 Salıncak kolundaki küresel yatağın montaj şeması	67
Şekil 6.14 Sıvama operasyonu sonrası sıvama bölgesinde çatlakları olan ve olmayan salıncak kolları.....	68
Şekil 6.15 Burç Montajı	68
Şekil 6.16 Yorulma test düzeneği	69
Şekil 6.17 Numunelere ait Wöhler eğrileri	71
Şekil 6.18 %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak koluna ait sıvama bölgesindeki yorulma hasarı.....	72
Şekil 6.19 Standart 6110 alaşımlı salıncak koluna ait mafsallık bölgesindeki yorulma hasarı.....	72
Şekil 6.20 Örnek burkulma testi düzeneği	73
Şekil 6.21 Burkulma sonrası MMK malzemeli salıncak kolunda meydana gelen nihai hasar.....	74
Şekil 6.22 Numunelere ait burkulma yükü -yer değiştirme grafikleri	75

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Çekme Testi Sonuçları	7
Tablo 5.1 Farklı malzemeler için ezilme gerilmesi ve Rankine sabiti	52
Tablo 6.1 Ekstrüzyon sonrası malzemenin kimyasal kompozisyonu	56
Tablo 6.2 Ekstrüzyon sonrası malzemenin mekanik özellikleri	56
Tablo 6.3 Isıl işlem sonrası malzemenin mekanik özellikleri.....	59
Tablo 6.4 Numunelere uygulanan ısıl işlemlerin parametreleri.....	60
Tablo 6.5 Numunelere ait çekme testi sonuçları.....	61
Tablo 6.6 Uygulanan ısıl işlem sonrası salıncak kolu gövdesine ait mekanik özellikler	62
Tablo 6.7 Malzemelere ait sertliklerin karşılaştırılması.....	63
Tablo 6.8 Yorulma testi sonuçları.....	70
Tablo 6.9 Burkulma testi sonuçları	74

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Salıncak kolları, süspansiyon sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Salıncak kolları, tekerlekler ile şasi arasında bağlantıyı sağlayan ve kuvvet ve hareketi bir bağlantı elemanından diğerine aktarmaya yarayan bir organdır. Genellikle alüminyum ya da çelik malzemeden üretilirler. İdeal bir salıncak kolu sadece bası ve çeki kuvvetlerini karşılamalıdır.

Salıncak kolları çalışma ömürleri boyunca statik ve dinamik olmak üzere farklı yüklere maruz kalmaktadırlar. Statik yükler parça üzerinde ani hasarlara (burkulma) ve dinamik yükler de yorulma hasarına sebep olmaktadır. Burkulma hasarı alüminyum veya çelikten üretilen salıncak kolu gövdesi üzerinde gerçekleşirken yorulma hasarı yine bu gövde üzerinde veya salıncak kolunun bir diğer elemanı olan mafsallarda meydana gelebilmektedir.

Bilindiği üzere otomotiv ana sanayisinde elektrikli araçlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Firmalar geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarının yanında elektrikli araçlarının üretimlerine başlamıştır. İçten yanmalı motorların ve vites kutularının yerini alacak olan elektrik motorları ve piller aracın toplam ağırlığında bir artışa sebep olacağından diğer tüm komponentlerin ağırlığı oldukça önem kazanmıştır. Elektrikli araçlardaki bu mimari değişiklik sebebiyle salıncak kollarına gelen yükler artmaktayken öte yandan salıncak kollarının çalışması için ayrılmış paket hacim azalmaktadır. Bu sebeple performanstan ödün vermeden kesit küçültme veya başka bir deyişle ağırlık azaltmak ancak ve ancak yeni kompozit alaşımların kullanımı ile sağlanabilir. Salıncak kollarının yorulma ve burkulma gereksinimleri ana sanayi tarafından belirlenmektedir. Öte yandan gereksinimleri sağlayan tasarımın yine ana sanayi tarafından gönderilen üç boyutlu paket modele sığması gerekmektedir.

Performanstan ödün vermeden kesit küçültme veya bir başka deyişle ağırlık azaltmanın yollarından biri kompozit malzeme kullanımıdır. Günümüzde kompozit malzemeler ile ilgili birçok yöntem ve de çalışma bulunmaktadır. Artan yük

gereksinimleri ve maliyetler düşünöldüğünde seçilecek olan kompozit malzemenin ve üretim yönteminin seri üretime uygun rekabetçi olması gerekmektedir.

Bu çalışmada %10 Si partiköl katkılı alüminyum esaslı metal kompozit malzemeler sprej döküm yöntemi ile üretilmiştir. Sprej döküm sonrası elde edilen malzemeler sıcak dövme kalıbına uygun olacak çapa ekstrüzyon yöntemi ile getirilmiştir ve çalışmada kullanılacak salıncak kolu geometrisi sıcak dövme ile sağlanmıştır. Sıcak dövme sonrası gövdenin bazı unsurları diğer salıncak kolu komponentleri ile montajının sağlanması için işlenmiştir. Bu işlemin ardından diğer komponentler ile montajı sağlanmıştır. Salıncak kollarına yorulma ve burkulma testi uygulanarak kompozit malzemenin yorulma ve burkulma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Standart alüminyum alaşım malzemesiyle üretilen salıncak kollarına da aynı testler uygulanarak aradaki farklar incelenmiştir. Bunun yanında yeni kompozit malzemenin mekanik özellikleri farklı ısıt işlemler parametreleri ile üretilmiş numunelere çekme testi uygulanarak elde edilmiş ve en uygun ısıt işlemler parametresi belirlenmiştir.

1.1 Literatür Taraması

Metal matrisli kompozit malzemeler hem mekanik özellikleri açısından hem de üretim yöntemleri açısından birçok avantaja sahiptir. Bu sebeple metal matrisli kompozit malzemeler birçok çalışmaya konu olmuştur.

Uygur ve Saruhan (2004) tarafından yapılan bir çalışmada metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin tanımlanması, sınıflandırılması, üretim teknikleri, mekanik özellikleri ve uygulama alanları irdelenmiştir. MMK'ler takviye tipine göre dört ana gruba ayrılmıştır.

1. Parçacık takviyeli
2. Kedi bıyığı (whisker) takviyeli
3. Kırık lif takviyeli
4. Sürekli lif takviyeli

Bu dört ana gruba ait genel özelliklere değinildikten sonra MMK'lerin üretim yöntemleri ve uygulama sıcaklıklarına göre üç gruba ayrılmıştır.

1. Döküm
2. Toz metalürjisi
3. İki faz (sıvı-katı),

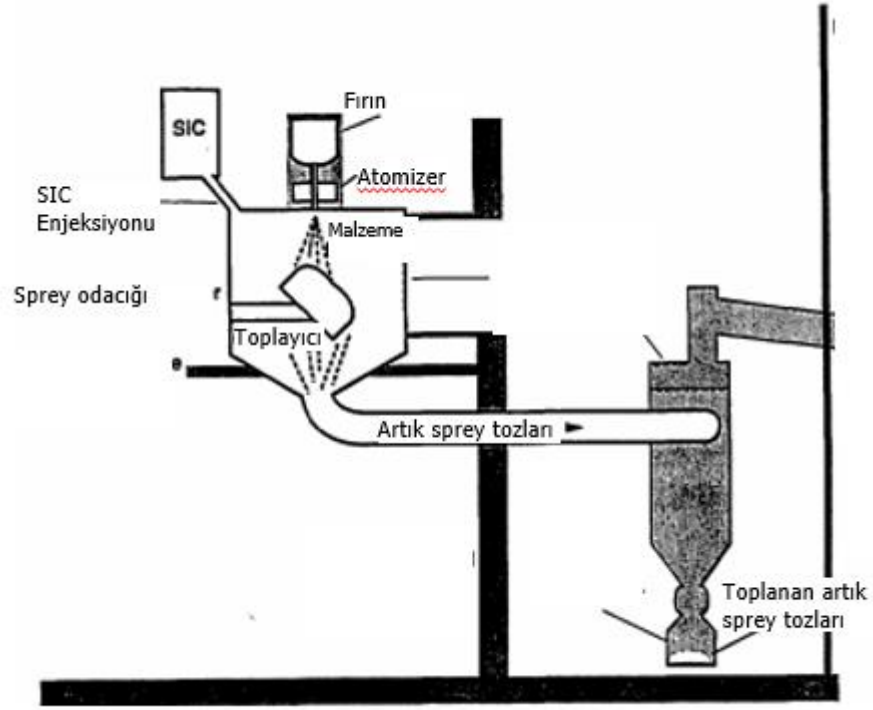
Ardından yazarlar MMK'lerin mekanik özelliklerini irdeleyip, alaşım kompozisyonunun, üretim yönteminin, uygulanan ısıl işlemin ve kullanılan takviye malzemesinin boyutlarının mekanik özellikler üzerindeki önemini vurgulamışlardır. Son olarak ise MMK'lerin kullanım alanlarına değinmişlerdir.

Lloyd (1994) ise parçacık takviyeli MMK'lerin mevcut durumunu gözden geçirip kullanılan farklı takviye tiplerini üretim yöntemleri ile irdelemiştir. Yazar takviye tipinin aşağıdaki faktörlere göre seçilmesi gerektiğine vurgu yapmıştır.

1. Kullanım amacı
2. Kompozit üretim yöntemi
3. Maliyet

Ardından partikül takviyeli MMK'lerin üretim yöntemlerine değinen yazar bu yöntemleri sekiz başlık altında incelemiştir.

- a. Toz metalürjisi (Powder Metallurgy)
- b. Eriyik metal yöntemleri (Molten metal methods)
- c. Karıştırma yöntemleri (Mixing Methods)
- d. Yarı-katı döküm (Semisolid Casting)
- e. Basınçlı süzme (Pressure infiltration)
- f. Basınçsız süzme (Pressureless infiltration)
- g. Sprey ile çökeltme (Sprey deposition / Casting)
- h. XDTM Yöntemi (XDTM Process)



Şekil 1.1 Sprey çökeltme / döküm yöntemi (Lloyd, 1994)

Üretim yöntemlerini avantajları ve dezavantajları ile açıklayan yazar ardından matris ile takviye arasındaki etkileşime ve bunun malzeme karakteristiğine olan etkisine değinmiştir. Malzeme mikro yapısının özellikle takviye dağılımına bağlı olduğuna değinen yazar ayrıca yaşlandırma yöntemlerinin ve parametrelerinin mikro yapı üzerindeki etkisinden bahsetmiştir. Partikül katkılı MMK'lerin mekanik özelliklerine değinen yazar, elastisite modüllerinin standart alaşımlara göre daha yüksek olmasının bu malzemelerin en önemli avantajlarından biri olduğunu savunmuştur. Ayrıca partikül katkılı MMK'lerin elastisite modüllerinin teorik olarak Halpin-Tsai formülü ile hesaplanabileceğine değinmiştir. Literatürdeki farklı partikül katkılı MMK'lerin akma ve kopma mukavemetlerini inceleyen yazar, bu özelliklerde %60'a kadar artış sağlandığını raporlamıştır. Öte yandan yüzde uzamanın partikül katkılı MMK'lerde en büyük engel olduğunu ve partikül katkı oranına bağlı olarak hızlıca düştüğünü vurgulamıştır. Kırılma tokluğunu incelediğimizde ise günümüzde kullanılan modellerin MMK'lerin kırılma tokluklarını açıklama yeterli olmadığı ve geliştirilmesi gerektiği yazar tarafından belirtilmiştir. Partikül katkılı MMK'lerin yorulma davranışları incelendiğinde ise standart alaşımlardan daha iyi olduğu fakat

yüksek gerilme ya da gerilme genliği uygulandığında düşük sünekliğin yorulma davranışını değiştirebileceği vurgulanmıştır. Küçük taneli partiküllerin yüksek oranda takviye edilmesinin ise sürünme dayanımını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilen sprej döküm (biriktirme) yöntemi, geleneksel döküm yöntemlerine ve toz metalürjisine kıyasla birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir. Bu amaçla Salancı (2004), sprej döküm için bir derleme çalışması yapmıştır. Sprej döküm, konvansiyonel döküm ve toz metalürjisinden X2020 alüminyum alaşımlı numunelerin metalürjik ve mekanik özelliklerini karşılaştıran ve tartışan araştırmacı, ayrıca, diğer araştırmacılar tarafından sprej döküm ile üretilen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir.

- Lavernia ve Grant (1988) tarafından sıvı dinamik sıkıştırma (LDC) ve ingot metalürjisi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, LDC yöntemi ile üretilen numunelerin sonuçlarının, ingot numunelere göre anlamlı derecede yüksek olduğu görülmektedir.

- Sanctis (1991) tarafından sprej döküm ve toz metalürjisi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, sprej döküm yöntemi ile üretilen numunelerin sonuçlarının toz metalürjisi ile üretilmiş numunelere göre biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak kopmada uzama karşılaştırıldığında, toz metalürjisi ile üretilmiş numunelerin sonuçları diğerine göre daha düşüktür.

- Faure ve Dubost (1990) tarafından incelenen sprej dökümlü 7xxx serisi alüminyum alaşımının kopma uzaması ve sertlik değerleri, toz metalürjisi ile üretilen aynı alaşımdan daha yüksektir.

- En yüksek mukavemet değerleri, Lengsfeld, Juarez-Islas, Cassada, Lavernia (1995) tarafından üretilen zengin Çinko içerikli sprej döküm (Osprey) 7150-T6 alaşımından elde edilmiştir.

- En yüksek kırılma sertliği, Machler ve diğerleri (1991) tarafından üretilen sprej döküm (Osprey) 7xxx alaşımı ile numunelerden elde edilmiştir.

Partikül katkılı MMK’lerde, kompozit üretim yönteminin yanı sıra ikincil işlemin (sıcak ekstrüzyon, sıcak dövme vb.) malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir rolü vardır. Bu amaçla Cöcen ve Önel (2002), SiC partikül katkılı alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini döküm sonrası, sıcak ekstrüzyon sonrası ve de sıcak dövme sonrası inceleyip birbirleriyle kıyaslamıştır. Farklı SiC takviye oranlarıyla dökülen ingot numuneler 10:1 oranı ile 500°C’de sıcak ekstrüzyona uğratılmışlardır. Döküm sonrası ve ekstrüzyon sonrası numunelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin mukavemetinin ve sünekliğinin takviye miktarına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Sonuçlar ayrıca ek olarak sıcak dövmeye uğratılan numuneler ile karşılaştırılıp aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Döküm sonrası mikro yapı incelendiğinde SiC partiküllerinin homojen olarak dağılım gösterdiği fakat bir miktar porozite içerdiği gözlemlenmiştir. Ekstrüzyon sonrası mikro yapı incelendiğinde ise porozite miktarının çok düşük seviyelere düştüğü belirtilmiştir.
2. SiC partikül takviye miktarı %17’e kadar arttırıldığında akma ve kopma mukavemetlerinin arttığı fakat takviye miktarı %17’yi geçtiği numunelerde bu değerlerin düştüğü görülmüştür. Ekstrüzyon uygulanan numunelerde ise takviye miktarı ne olursa olsun akma ve kopma mukavemet değerleri yaklaşık %40 kadar iyileşmiştir.
3. Numunelerin sünekliğinin takviye hacim oranının artmasıyla ters orantılı olarak azaldığı ve ekstrüzyon uygulanan numunelerin sünekliğinde bir miktar iyileşme meydana gözlemlenmiştir. Numunelerin yüzde uzama değerlerinin %10’un üzerinde olduğu belirtilmiştir.
4. Ekstrüze edilmiş yüksek takviye hacim oranına sahip numunelerin süneklik seviyelerinin dövülmüş numunelerden daha iyi olduğu gözlemlenmiş ve bu durum takviye edilen partiküllerin boyutunun düşmesi, partikül ayrılmasının olmaması ve de matris-partikül arası bağın ekstrüzyon ile iyileşmiş olması ile açıklanmıştır.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde ikincil işlemin malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir rolü etkisi olduğu görülmüştür. İkincil işlemler malzemede

porozite miktarını düşürürken akma ve çekme dayanımını arttırmaktadır (Enginsoy, 2020; Kumar, 2019a; Mohanakumara, 2014).

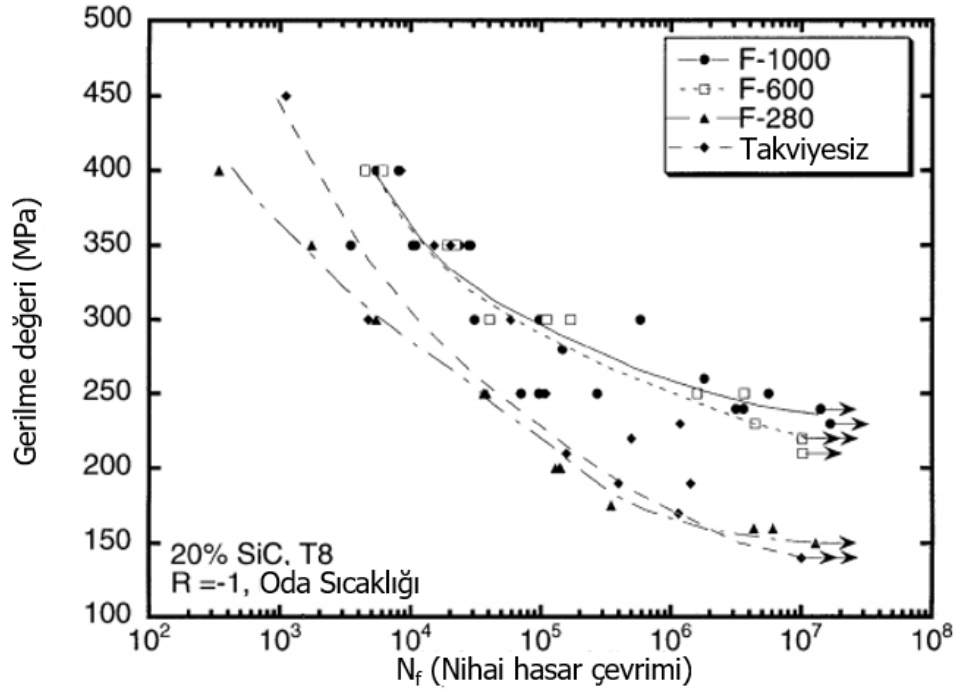
Tablo 1.1 Çekme Testi Sonuçları (Cöcen ve Önel, 2002)

Malzeme	Akma Mukavemeti [MPa]		Kopma Mukavemeti [MPa]		Yüzde Uzama (%)		
	Döküm	Eks.*	Döküm	Eks.*	Döküm	Dövme	Eks.*
Matris	42	45	151	137	3,4	18	23,8
AlSi5/SiC/9p	43	54	142	161	3,4	15	14,3
AlSi5/SiC/13p	49	88	148	215	2	11	9,5
AlSi5/SiC/17p	58	68	112	170	1	4,9	11,7
AlSi5/SiC/22p	-	78	-	172	-	4	11
AlSi5/SiC/26p	44	81	67	192	0,7	-	5,4
*Eks: Ekstrüze edilmiş numuneler							

Partikül katkılı MMK’lerde partikül takviye oranı ve partikül boyutu yorulma performansı açısından oldukça önemlidir. Bu konuda bir çalışma yapan Chawla, Andres, Jones ve Allison (1998), farklı oranlarında ve farklı partikül boyutlarında 2080 Alüminyum alaşımına SiC toz metalürjisi yöntemi ile takviye ederek numuneler üretmiş ve daha sonra sıcak ekstrüzyona uğratmışlardır. Yüzde 10, 20 ve 30 hacimsel takviye oranlarında elde edilen numunelere ek olarak %20 takviye oranında boyutları 23 µm (F-280), 6 µm (F-600) ve 5 µm (F-1000) olmak üzere 3 farklı numune grubu üretilmiştir. Ardından numunelere T8 ısıtma işlemi uygulanmıştır. 493°C’de 2 saat süren çözeltiye alma işleminin ardından su verme ile soğutulan numuneler soğuk haddelenerek 175°C’de 24 saat yapay olarak yaşlandırılmışlardır. Mikro yapıları incelenen numuneler ardından yorulma ve çekme testinde kullanılmak üzere işlenmişlerdir. Testlerin tamamlanmasından sonra aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. SiC partikül takviye oranı arttığında yorulma ömründe artış olduğu görülmüştür.
2. Partikül boyutu küçüldüğünde yine yorulma ömründe bir artış gözlemlenmiştir. En büyük partikül boyutuna sahip numuneler soğuk haddelenirken takviye edilen partiküllerin çatlamasının düşük yorulma performansına sebep olmuştur.

3. SiC partikülleri matris malzemedeki gerilme yığılmalarını azaltmış ve bu sebeple şekil 1.2’de de görüldüğü gibi matris malzemeden daha iyi bir yorulma performansı elde edilmiştir.
4. SiC partikül takviye oranının artması, malzemede bulunan inklüzyonların boyutunda küçülmesine sebep olmuştur. Dolayısıyla yorulma ömründeki artışa katkıda bulunmuştur.
5. SiC partikül takviye oranı arttığında malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış meydana gelmiştir fakat orantısal sınırdan (proportional limit) bir azalma görülmüştür. Bunun sebebi olarak takviye malzemesinin kutuplarındaki gerilme yığılmaları gösterilmiştir.

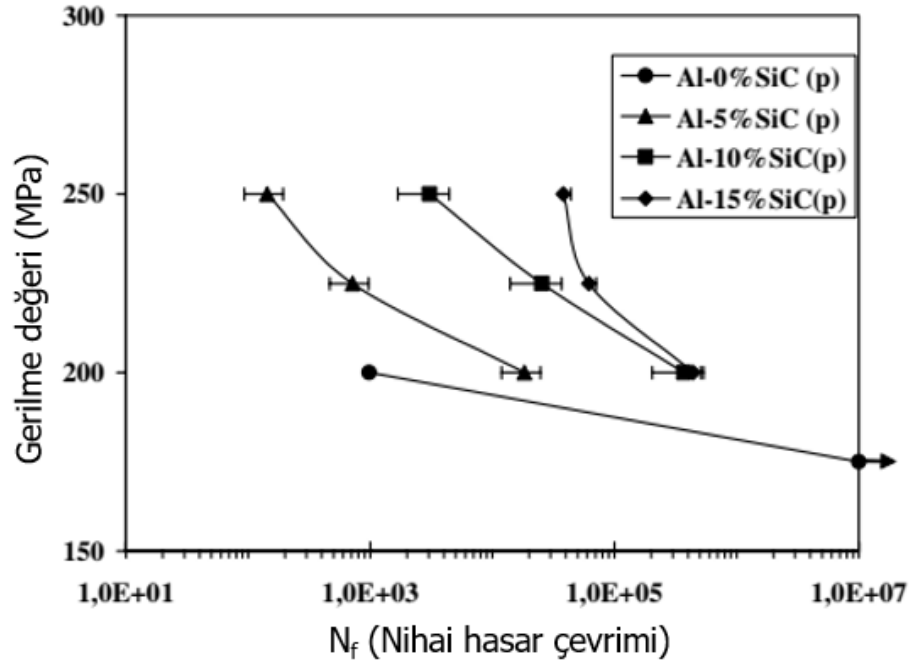


Şekil 1.2 Partikül boyutunun yorulma ömrü üzerindeki etkisi (Chawla, Andres, Jones ve Allison, 1998)

Yapılan bir diğer çalışmada, Kaynak ve Boylu (2005), %12 Si içeren alüminyum alaşımına farklı oranlarda ve farklı partikül boyutlarında SiC takviye edilmiş numunelerin yorulma davranışlarını incelemiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Numuneler, boyutu 40 ile 60 μm arasında değişen SiC partiküllerinin yüzde 5, 10, 15 hacimsel oranlarında takviye edilerek sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilmiştir. Partikül katkısız alüminyum alaşımlı numuneler de yine aynı yöntemle üretilmiştir.

Islanabilirliği arttırmak adına döküm esnasında alüminyum matrise %1,7 Mg takviye edilmiştir. SiC partikülleri Mg eklenmesinin ardında titreşimli enjeksiyon aparatı ile eklenmiştir. Katılaşma sırasında 80 MPa'lık sabit bir basınç uygulanmıştır. Testlerde kullanılacak numuneler bu yöntemle üretilmiş kütüklerden işlenerek elde edilmiştir. Üretilen 4 numune grubu üzerinde 3 nokta eğilme ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. SiC partikül takviye oranı arttığında sertlik ve eğilme dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak partiküllerin olduğu bölgelerdeki pekleşme ve matris-partikül arasındaki termal genleşme farkının yarattığı yüksek dislokasyon yoğunluğu gösterilmiştir. Öte yandan, SiC partikül takviye oranı arttıkça sünekliğin düştüğü görülmüştür.
2. Ergitme sırasında alaşıma eklenen Mg, ıslanabilirliği artırarak matris ve partikül arasında kuvvetli bir bağ oluşmasına yardımcı olmuştur. Öte yandan, yüksek gerilme seviyelerinde bu bağın yeterli olmadığı ve bağın koptuğu noktalarda çatlaklarının başladığı görülmüştür. Diğer bir çatlak başlama mekanizması ise özellikle en kaba SiC partiküllerinin kırılmasıdır.
3. Şekil 1.3'teki S-N eğrisi incelendiğinde SiC partikül takviyesinin düşük çevrimli yorulma bölgesinde yorulma dayanımını artırdığı gözlemlenmiş ve bunun sebebi olarak numunelerin akma dayanımlarının iyileşmesi gösterilmiştir. Öte yandan yüksek çevrimli yorulma bölgesinde SiC partikülleri çatlakların ilerleyişini durduracak şekilde çalışmıştır. Bu sebeple hacimsel partikül takviye oranı arttıkça, numunelerin yorulma ömürleri de artmıştır.



Şekil 1.3 Partikül boyutunun yorulma ömrü üzerindeki etkisi (Kaynak ve Boylu, 2005)

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde hacimsel takviye oranının malzemenin mekanik özelliklerini belirli bir seviyeye kadar iyileştirdiği öte yandan takviye oranı arttıkça sünekliğin azaldığı görülmüştür (Bandil, 2019; Hilary, 2020; Kumar, 2019b; Sharma, 2014; Smirnov, 2018).

Gustke (2018), partikül katkılı alüminyum alaşımlı salıncak kollarının burkulma davranışları üzerinde çalıştı. Bu çalışmada %10 Si partikül katkılı 6110 alüminyum alaşımı sprey döküm yöntemiyle üretildikten sonra 2. işlem olarak ekstrüzyon 400°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Ardından salıncak kolu gövdesi geometrisinin elde edilmesi amacıyla sıcak dövme uygulanmıştır. Sıcak dövme sonrası optimum ısıtıl işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ekstrüzyon sonrası elde edilen kütük malzemeden işlenen numunelere farklı parametrelerde ısıtıl işlem uygulanıp çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen optimum ısıtıl işlem parametresi ile salıncak kolu gövdelerine ısıtıl işlem uygulanmıştır. Salıncak kolu gövdeleri diğer komponentler ile montajının yapılabilmesi için işlenmiş ve ardından montajları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Elastisite modülü %10 arttığı gözlemlenmiştir
2. Çekme dayanımı tüm ısıtım işlem parametrelerinde 340 MPa üzerindedir.
3. Kopma uzaması %10 değerinin altında kalmıştır. Geleneksel T6 ısıtım işlem parametreleriyle bu değer %3,6 iken az-yaşlanmış durumda %8'e kadar yükseltilmiştir.
4. Mikro yapı incelendiğinde diğer partiküllerden daha koyu renkte gözükten bölgeler bulunmuştur. Buna partikül erimesinin veya intermetalik fazların sebep olabileceği belirtilmiştir.
5. Burkulma sırasında partikül katkılı alaşımlı salıncak kollarının kırıldığı gözlemlenmiş ve bu durumun standart AlSiMg alaşımından üretilmiş geleneksel salıncak kolları için olağan olmadığı belirtilmiştir.

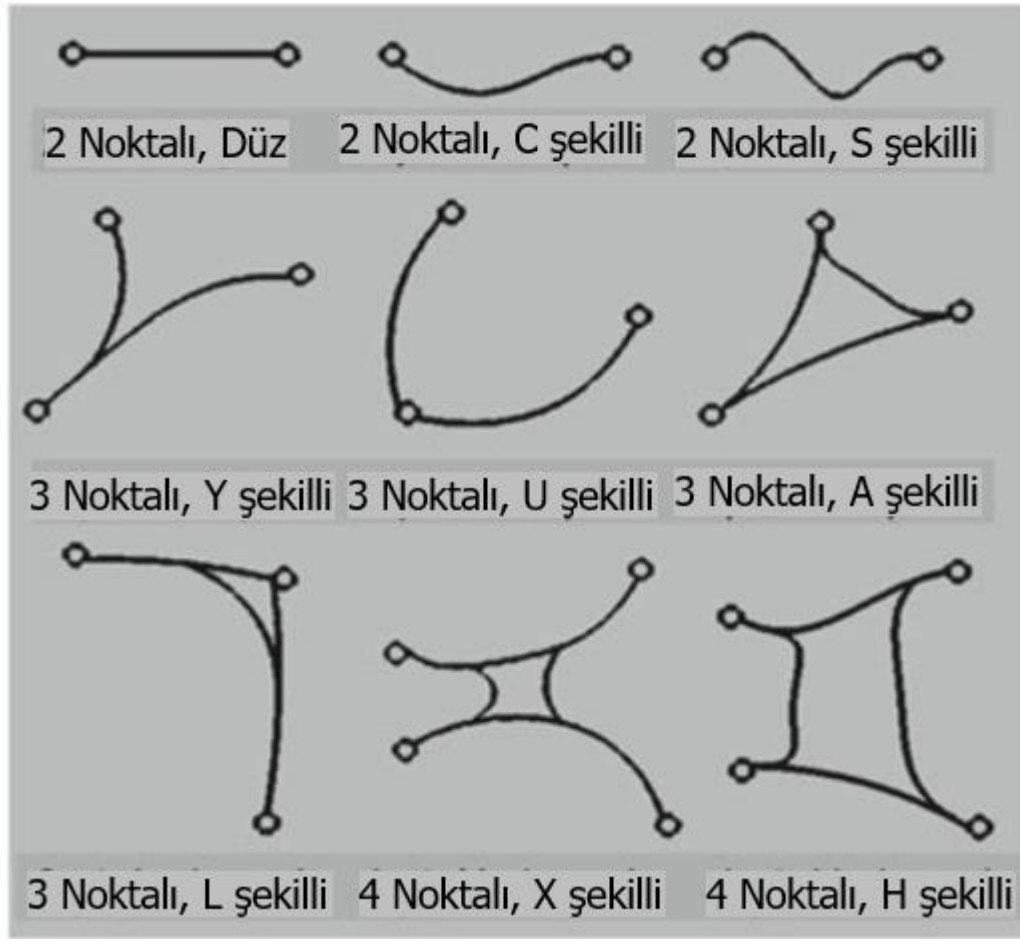
Son olarak gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunan yazar, ekstrüzyon sıcaklığının düşürülmesi durumunda mikro yapıda daha koyu renkte gözlemlenen partikül erimesinden veya intermetalik fazlardan oluşan hataların ortadan kalkabileceği ve bu durumda malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme meydana gelebileceğini belirtmiştir. Yazarın bir diğer önerisi ise elastisite modülü Silisyumdan daha yüksek olan farklı bir takviye partikülünün kullanılmasıdır. Yazarın ilk önerisi bu çalışmanın temelini oluşturmuştur.

BÖLÜM İKİ

BİNEK ARAÇLARDA SALINCAK KOLLARI

Salıncak kolları, süspansiyon sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Temel görevleri, elemanlar arasındaki bağlantıyı sağlamak, kuvvet ve hareketi bir bağlantı elemanından diğerine aktarmaktır. Alüminyum ya da çelik malzemeden farklı üretim yöntemleri ile üretilbilirler. Araç hareket halindeyken, zeminin durumuna göre süspansiyon bağlantı elemanları sürekli hareket ederler.

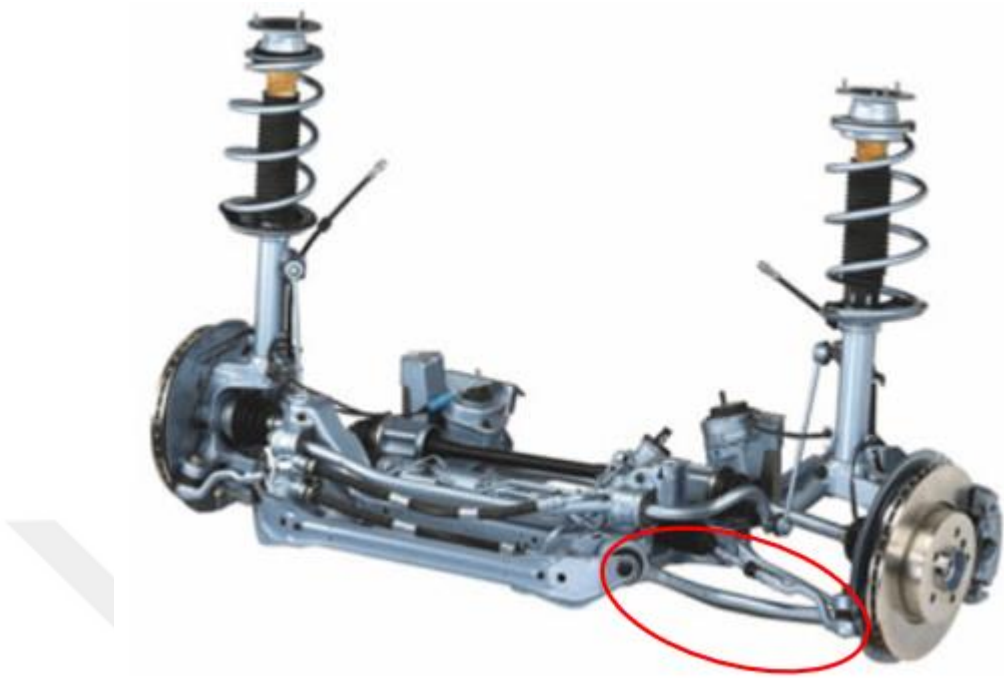
Araçtaki süspansiyon sisteminin tasarımına göre salıncak kolları iki-noktalı, üç-noktalı (üçgen) ve de dört-noktalı (ikiz kenar yamuk) olabilmektedir. Bağlantı noktalarında küresel mafsallı bir yatak olabildiği gibi kauçuk malzemeden üretilmiş belirli bir katılığı olan burçlar da olabilmektedir. Salıncak kolları, bağlantı nokta sayısı gibi şekillerine göre de sınıflandırılabilir. İki-noktalı salıncak kolları düz bir çubuk gibi olabildiği gibi kavisli bir tasarıma da sahip olabilirler. Üç-noktalı salıncak kolları, Y-tipi, U-tipi, A-tipi veya L-tipi şeklinde tasarlanabilir. Dört-noktalı salıncak kolları ise X-tipi veya H-tipi şeklinde tasarlanabilmektedir. Şekil 2.1’de tüm salıncak kolu tipleri görülebilmektedir.



Şekil 2.1 Farklı tiplerde salıncak kolu tasarımları (Heißing ve Ersoy, 2011)

2.1 İki-noktalı Salıncak Kolları

Ön aksta yer alan salıncak kolları hem McPherson hem de Double Wishbone süspansiyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Her iki sistemde de alttaki üç-noktalı salıncak kolu iki adet iki-noktalı salıncak koluna ayrıştırılabilmektedir. Bu sayede boylamasına ve yanlamasına olan katılık değerleri birbirinden bağımsız olarak düzenlenebilir ve iki-noktalı salıncak kolları ayrı ayrı sadece çekme veya basmaya maruz bırakılabilirler. Şekil 2.2’de McPherson süspansiyon sisteminde yer alan iki-noktalı salıncak kolu görülmektedir. Görüldüğü üzere iki-noktalı salıncak kolu aracın şasisi ve tekerlek aksonu arasında yer almaktadır. Aracın şasisine olan bağlantısı bir kauçuk burç aracılığı ile sağlanmışken, aksona olan bağlantı ise küresel bir mafsal mili aracılığı ile sağlanmıştır.



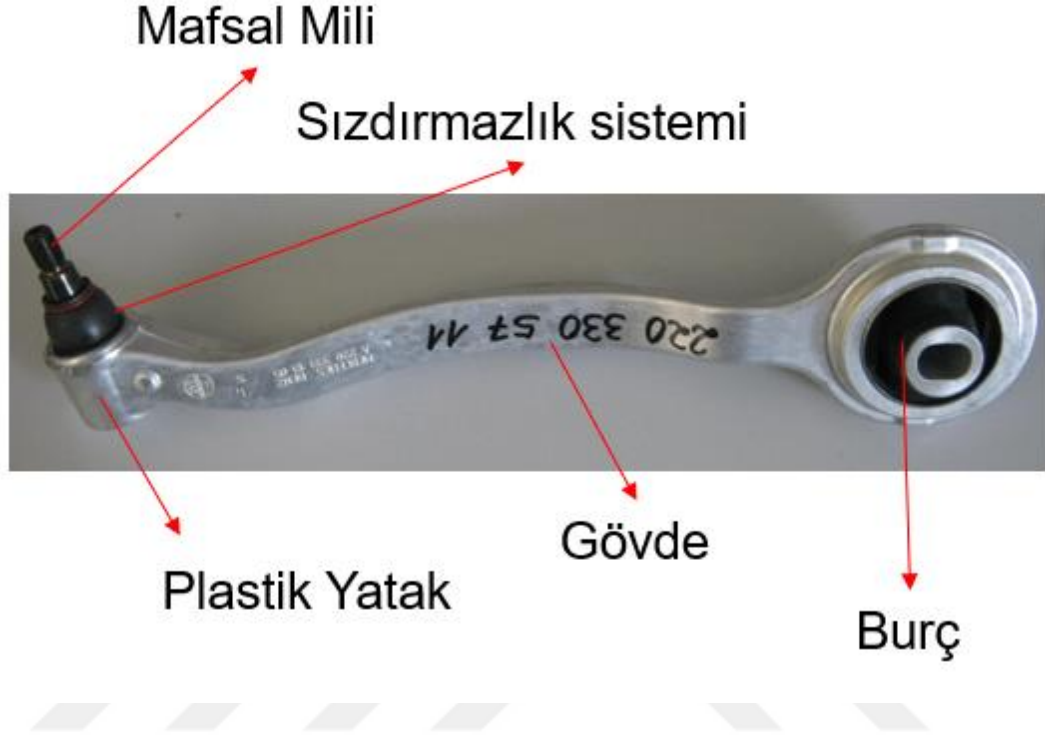
Şekil 2.2 McPherson süspansiyon sistemi ve ona ait tüm komponentler (Heißing ve Ersoy, 2011)

Öte yandan iki ayrı iki-noktalı salıncak kolu birbirinden bağımsız olarak hareket edeceğinden araç hareket halindeyken birbirlerine veya diğer komponentlere temas etme riski ortaya çıkmaktadır. Sadece çekme veya basma kuvvetlerini karşılaması beklenen iki-noktalı salıncak kolları bu sebeple her zaman düz bir geometriye sahip olmayabilmektedir. Bu durumda salıncak kolları eğilme gerilmesine maruz kaldığından dolayı, bu gerilmeye karşı koyabilmek için daha kalın, atalet momenti yüksek bir kesit alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Kısıtlı alan ve ana sanayinin ağırlık azaltma hedefleri (elektrikli araç vb.) göz önüne alındığında ise daha kalın kesitli bir salıncak kolu tasarlanması her zaman mümkün olmamaktadır.

2.1.2 İki-noktalı Salıncak Kollarının Elemanları

İki-noktalı salıncak kolları incelendiğinde birçok farklı tasarımın mevcut olduğu görülmektedir. Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi iki-noktalı salıncak kolu temel olarak bir gövde, küresel mafsallık mil, plastik yatak, sızdırmazlık sistemi ve kauçuk bir burçtan

meydana gelmektedir. Eleman sayısı, tasarıma ve üretici firmaya bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 2.3 İki-noktalı salıncak kollarının ana elemanları (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

2.1.2.1 Salıncak Kolu Gövdesi

İki noktalı salıncak kolları şekil 2.4’te de görüldüğü gibi farklı üretim yöntemleri ile üretilmektedir. Sadece çeki veya basıya maruz kalan, basit ve düz bir salıncak kolu tek parçalı sac metalin şekillendirilmesiyle üretilmektedir. Küresel yatak sistemi ve burç şekillendirilmiş sac metale sıkı geçme ile çakılarak montajı sağlanmaktadır. Boyu daha uzun olan salıncak kolu tasarımlarında burkulma kuvveti kritik olabileceğinden sac metal kalınlığının ayarlanması gerekmektedir. Bu durum ağırlığın artmasına yol açacağı için sac metal yerine dairesel kesitli içi boş profiller tercih edilebilir. Küresel yatak sistemi ve burç ise bu durumda kaynakla birleştirilebilmektedir. Eğer tasarımda offset adı verilen ve kinematik noktalar arasında kaçıklık veya kavisler mevcut ise iki sac metal şekillendirilip birbiri üzerine kaynatılarak istenilen geometri elde edilebilir.

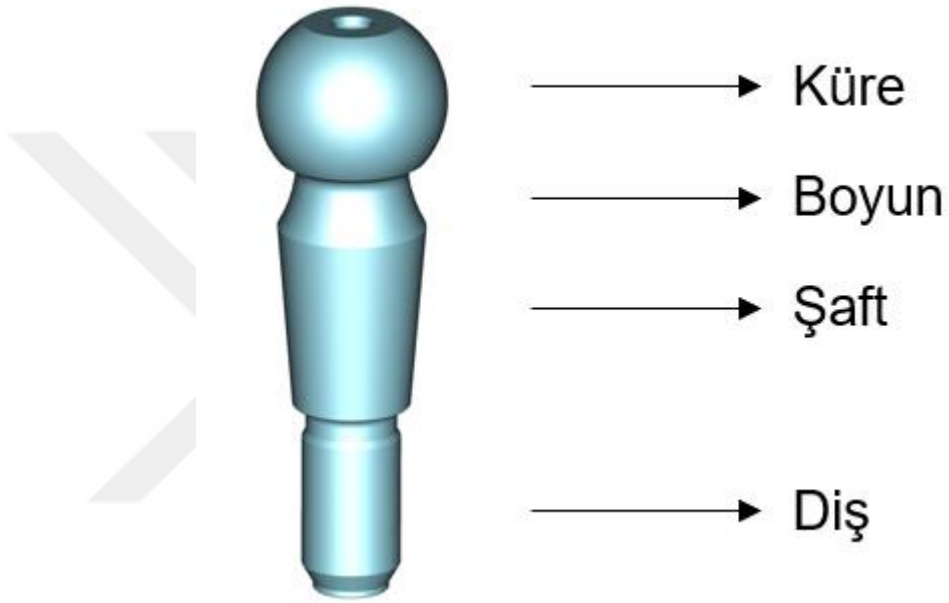
Kavisli bir tasarıma sahip ve yüksek yükler taşıyan iki-noktalı salıncak kolu gövdeleri genellikle çelik veya alüminyum alaşımından sıcak dövülerek üretilirler. Sıcak dövmenin tercih edilmesinin temel sebebi yüksek yükler taşımaları ve bunun için sürekli bir lif akışına ihtiyaç olmasıdır. En sık kullanılan çelik alaşımları 30MnVS6+P, 38MnVS6+P ve C35E'dir. Öte yandan dövülerek üretilen salıncak kollarında en sık kullanılan alüminyum alaşımı AlMgSi1 (6061) olduğu bilinmektedir. Ham alüminyum malzeme dövüldükten sonra farklı ısı işlemleri (T6, T5, T4 vb.) uygulanarak mukavemet değerleri ihtiyaca göre ayarlanmaktadır. (Heişing ve Ersoy, 2011).



Şekil 2.4 Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş iki-noktalı salıncak kolları (Heişing ve Ersoy, 2011)

2.1.2.2 Mafsal Mili

Küresel yatak sisteminin en önemli elemanlarından biri mafsal milidir. Eksenel ve radyal yüklere maruz kalan mafsal milleri genellikle sıcak veya soğuk dövülüp üretilen ham mafsal milinin istenilen geometride işlenmesiyle elde edilirler. Mafsal millerinin, şekil 2.5'te görüldüğü gibi küre, boyun, şaft ve diş olmak üzere dört bölümü bulunmaktadır.



Şekil 2.5 Mafsal mili (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

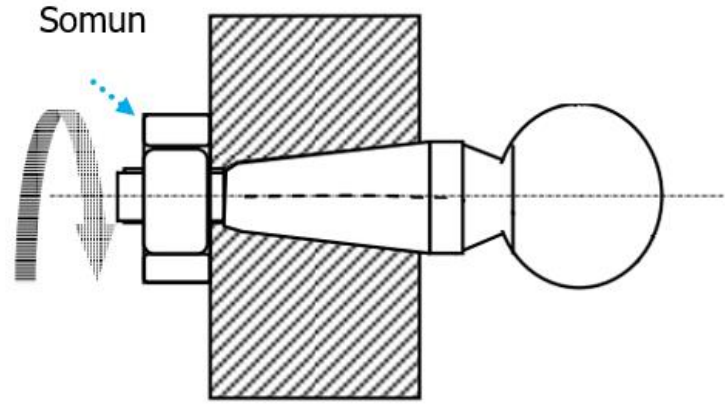
Küre kısmı plastik yatak ve gres ile tribolojik bir sistemde yer alacağından ve yüksek aşınma yüklerine maruz kalacağından yüksek hassasiyetle işlenirler ve ardından parlatılır ve cilalanır. Böylelikle yüzey pürüzlülüğü minimuma indirilir. Yüzey pürüzlülüğü yatak sisteminin taşıdığı dönme ve yatma momentlerini etkilediği için oldukça önemlidir.



Şekil 2.6 Küresel yatak sisteminin serbestlik derecesi (Heißing ve Ersoy, 2011)

Boyun bölgesi ise konik bir şekilde işlenerek küresel yatak sisteminin şekil 2.6’da gösterildiği gibi istenilen açılarda yatması ve dolayısıyla istenilen hareketin salıncak kolundan aksona aktarılması sağlanır. Boyun bölgesinin geometrisi istenilen açıya göre değişmektedir. İşlenen yüzeyin pürüzlülüğü yine küre de olduğu gibi önemlidir. Aracın çalışma ömrü boyunca salıncak kolunun maruz kaldığı dinamik yüklemeler salıncak kolundan aksona mafsalları aracılığı ile aktarıldığından mafsalları millerinin yorulma ömürlerinin yeterince yüksek olmalıdır. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü mafsalları milleri için oldukça önemlidir.

Şaft bölgesi, mafsalları mili ile aksonun montajının sağlandığı bölgedir. Mafsalları mili üzerindeki konik şaft bölgesi akson üzerindeki aynı konik açısına sahip deliğe oturtulur ve şekil 2.7’deki gibi şaftın ucundaki diş üzerine yerleştirilen somun sıkılarak montajı sağlanır.



Şekil 2.7 Mafsal mili-akson şematik montajı (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

Bazı mafsal mili tasarımlarında konik geometri yerine silindirik bir geometri de tercih edilebilmektedir. Böyle bir durumda aksone olan bağlantı için ek unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.2.3 Plastik Yatak

Küresel yatağın performansını belirleyen bir diğer eleman ise plastik yataktır. Gövde ve mafsal mili arasında yer alan plastik yatakların amacı eklenen gres ile birlikte sistemdeki sürtünmeyi azaltıp, aşınma miktarını minimuma indirmektir.



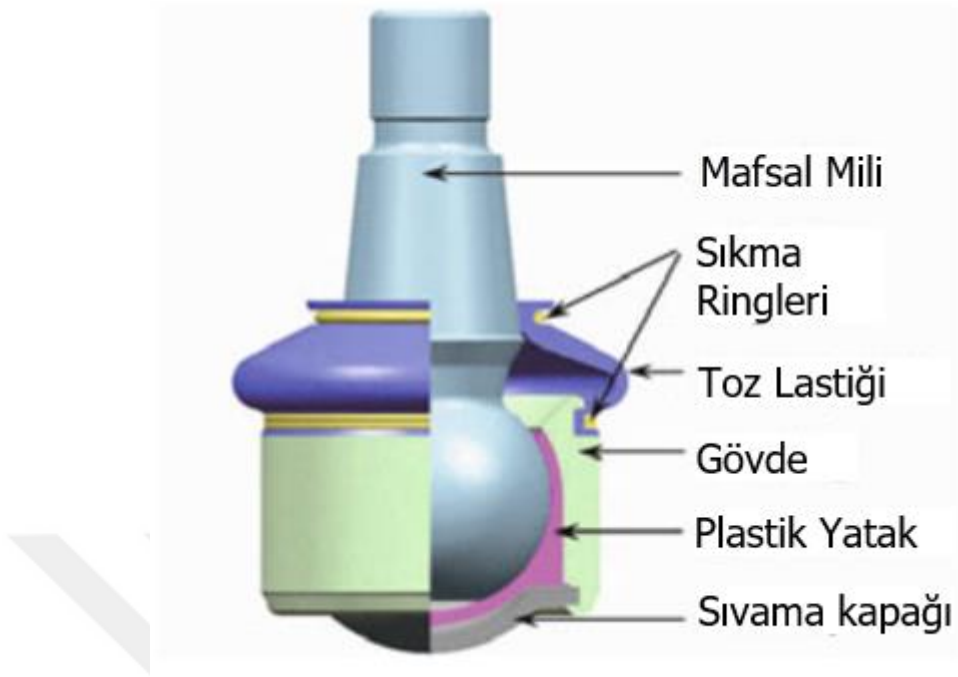
Şekil 2.8 Bir plastik yatak tasarımı (Heißing ve Ersoy, 2011)

Günümüzde plastik yataklar termoplastik polimer malzemelerden üretilmektedir. Genellikle POM, PA, PEEK, PPA ve PEI tercih edilmektedir. Gün geçtikçe ana sanayinin aşınma performansı beklentileri arttığından, cam fiber veya karbon fiber katkılı kompozit plastik yatak tasarımları geliştirilmekte ve tercih edilmektedir. Şekil 2.8’de örnek bir plastik yatak tasarımı görülebilmektedir.

2.1.2.4 Sızdırmazlık Sistemi

Sızdırmazlık sisteminin temel amacı küresel yatak sistemini toz, kir, nem veya sudan korumak ve yatak sisteminin ömrü boyunca bakım gerektirmeden çalışmasını sağlamaktır. Yatak sisteminin çalışması için gerekli olan gresin kirden tozdan ve nemden uzak tutulması gerekmektedir. Böylelikle sürekli dönme veya yatma hareketi yapan yatak sistemi ömrü boyunca ana sanayinin belirlemiş olduğu moment aralıklarında çalışabilmektedir. Öte yandan sisteme girecek kir, toz yatak sisteminin hızlı bir şekilde aşınmasına yol açabilirken, sisteme girecek nem veya su gresin kimyasal yapısını bozabilir ve orta vadede yine aşınmaya yol açabilmektedir.

Salıncak kolu dışında rot başlarında ve rotillerde de kullanılan bu sızdırmazlık sistemleri çok farklı şekilde tasarlanabilmektedir. Üretici firmalara ve ihtiyaç duyulan sızdırmazlık ömrü ile alakalı olarak eleman sayıları değişebilmektedir. Temel olarak kauçuk malzemeden üretilmiş bir toz lastiğine ve toz lastiğinin gövde ve mafsallara temas ettiği noktalardaki sızdırmazlığı sağlamak üzere sıkma ringlerine ihtiyaç vardır. Şekil 2.9’da temel bir sızdırmazlık sistemi görülmektedir. Bazı tasarımlarda bu sıkma ringleri kauçuk malzemeye entegre edilebilmektedir. Böylelikle montajda ve maliyette avantaj sağlanabilmektedir. Öte yandan bazı tasarımlarda bu elemanlara ek olarak bir L-ring eklenerek toz lastiğinin aksonla teması sırasındaki aşınma engellenip sızdırmazlık ömrü artırılabilir. Maliyet sebebiyle sadece ihtiyaç duyulan tasarımlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 Bir küresel yatak sisteminin tüm elemanları (Heißing ve Ersoy, 2011)

2.1.2.5 Burç

Araçlarda, küresel yatak sistemlerinden sonra en sık kullanılan yataklama tipi kauçuk burçlardır. Kauçuk burçların serbestlik dereceleri küresel yatak sistemleri ile aynıdır fakat bazı sınırlamalar mevcuttur. Eksenel dönme hareketi $\pm 20-25^\circ$ ile sınırlıyken, eksenin yatma açısı $\pm 5^\circ$ ile sınırlıdır. Sistemin eksenel ve radyal yöndeki hareketi de $\pm 1-3$ mm arasında değişmektedir. Şekil 2.10'da çeşitli burç tasarımları görülebilmektedir.



Şekil 2.10 Farklı tiplerdeki kauçuk burçlar (Heißing ve Ersoy, 2011)

Kauçuk burçların temel avantajı, kauçuk malzeme sayesinde sönümlenen ses ve titreşimdir. Otomotiv sanayisinde ses ve titreşimlerin büyük önemi vardır. Bu sebeple tüm otomotiv üreticilerinin NVH (noise, vibration, harshness) ile ilgilenen birimleri mevcuttur. Kauçuk burçların araçtaki aks sisteminin NVH davranışını iyileştirmesi beklenmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı en az iki malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzeme denir (Başar, Kahraman ve Önder, 2018). Kompozit malzemelerde temel amaç birleştirilen malzemelerin tek başınayken mevcut olmayan özelliklerinin bir aradayken elde edilmesidir. Kompozit malzemelerin temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

1. Kompozit malzemeler çözen ve çözünen bileşenlerden oluşmazlar.
2. Birleştirilen malzemeler arasında atom alışverişi bulunamamaktadır.
3. Kompozitler “Matris” adı verilen ana malzeme ve mukavemeti bundan daha yüksek olan “Takviye elemanı” adı verilen malzemenin birleştirilmesiyle elde edilirler.
4. Takviye malzemesi kompozit malzemenin yük taşıyan kısmı iken, matris malzeme yükleme altında plastik deformasyona geçiş sırasında çatlakların oluşumunu geciktirmektedir.

Kompozit malzemelerin hafiflik, yüksek mukavemet ve uzun ömürlülük gibi avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Malzemenin kalitesi üretim yöntemine bağlı olduğu için malzeme özellikleri her zaman ideal olmayabilir. Matris ve takviye arasında her zaman uygun ara yüzler oluşturulamayabilir. Bu durum da beklenmeyen hasarlara yol açabilir.

Kompozit malzemeler matris tipine göre üç grupta incelenebilir. Bu bölümde sadece metal matrisli kompozitlerin özelliklerine değinilecektir.

- Metal Matrisli Kompozitler
- Seramik Matrisli Kompozitler
- Polimer Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), otomotiv, uzay, havacılık ve savunma sanayisinin artan beklentileri doğrultusunda son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte maliyet açısından diğer yöntemlerle rekabet edebilecek konuma

gelmiştir. Birçok farklı metal alaşımının mekanik özellikleri, grafit, silikon karbür ve alümina gibi yüksek dayanımlı seramik takviye elemanları (fazlar) ile iyileştirilerek havacılık, uzay vb. teknolojilerde önemli ilerlemelere kaynak teşkil etmiştir. MMK'ler klasik alaşımlara iyi bir alternatif teşkil etmektedir. MMK'leri özellikle iki ana faktör ön plana çıkarmaktadır.

- Yeni üretim teknikleri ile malzemelerin mekanik özelliklerinin daha düşük maliyetlerle iyileştirilmesi
- Seramik katkı oranlarındaki değişim ile metal malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinde istenildiği kadar artırılıp azaltılmasına imkan tanınmasıdır.

Takviye malzemesinin geometrisine veya üretim yöntemlerine göre sınıflandırılabilir. Her yöntemin ve sistemin birbirine göre üstünlükleri ve zayıflıkları söz konusudur (Uygur ve Saruhan, 2004).

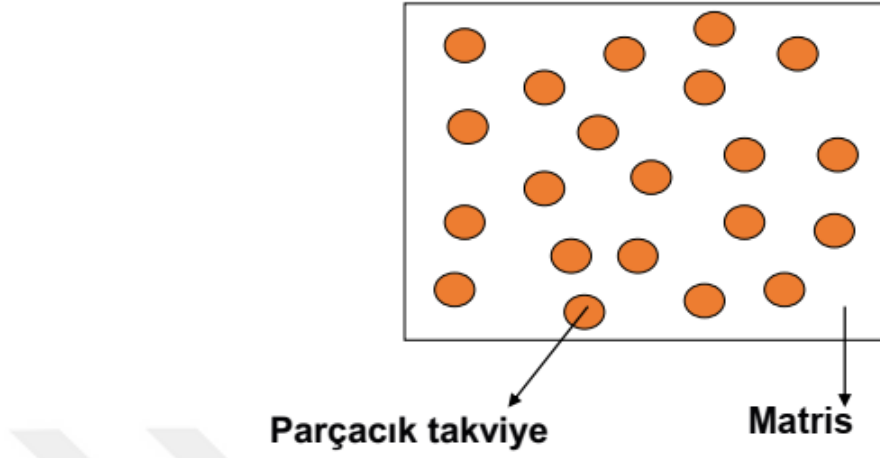
MMK'lerde takviye malzemesi olarak oksitler (Al_2O_3 -Alümina, SiO_2 -Silikondioksit), nitritler (ShN_4 -Silika Nitrit, AlN -Alüminyum Nitrit), karbürler (SiC -Silisyum Karbür, TiC -Titanyum Karbür) ve bunun yanı sıra Si ve C gibi element malzemeler kullanılmaktadır. Öte yandan matris malzemesi olarak alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel, süper alaşımlar (Ni ve Fe esaslı) kullanılmaktadır. Ağırlığın önemli bir faktör olduğu, taşıma, savunma ve uzay sanayisinde alüminyum en çok tercih edilen matris malzeme olmaktadır. MMK üretimi sırasında takviye ve matris malzemesi arasında ara yüz (ara faz) adı verilen bir yapı ortaya çıkmaktadır. Bu ara yüz, MMK'nin mekanik özelliklerinde önemli rol oynar (Uygur ve Saruhan, 2004).

3.1 Takviye malzemesinin tipine göre MMK'ler

3.1.1 Partikül takviyeli MMK'ler

Partikül veya parçacık takviyeli MMK'ler maliyet açısından en uygun MMK tipidir. 3-200 μm arasında değişebilen Al_2O_3 , SiC , Si gibi partiküller farklı hacimsel oranlarda takviye edilebilmektedir. Bu tipteki MMK'ler genellikle döküm ve toz

metalürjisi yöntemleri ile üretilmektedir. Şekil 3.1’de şematik olarak partikül katkılı kompozit yapı görülmektedir.



Şekil 3.1 Partikül katkılı MMK yapısı (Zor, 2018)

Partikül takviyeli MMK’lerin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Başlıca avantajları:

- Diğer takviye malzeme tiplerine göre düşük maliyetlidir
- Hemen hemen izotropik özellikler gösterirler.
- Takviye elemanının; cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, dağılım miktarı ve homojenliği gibi parametreler değiştirilerek mekanik özelliklerde azaltma ya da artma sağlanabilir (Akdoğan, 2018a).

Öte yandan dezavantaj olarak değerlendirilebilecek bazı kısıtlamaları mevcuttur.

- Akdoğan (2018a), “belli bir uygulama alanında kullanılmak üzere en uygun kompoziti elde edebilmek için metal matrisli kompozitin bileşenleri hakkında tam ve ayrıntılı bilgiye sahip olmak gerekmektedir” şeklinde tanımlıyor.
- Faz-matris arası kimyasal uyumluluğun sağlanamaması.
- Mukavemetteki iyileşme görece sınırlıdır.

3.1.2 Süreksiz fiber takviyeli MMK’ler

Bu tip MMK’lerde takviye malzemesinin geometrisi partikül yerine kedi bıyığı denilen (whisker) kısa ve süreksiz fiberlerden oluşmaktadır. Fiberlerin takviye

oryantasyonuna göre MMK'nin mekanik özellikleri değişmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan parçalar için uygun olabilecek bir tiptir. Başlıca avantajlar:

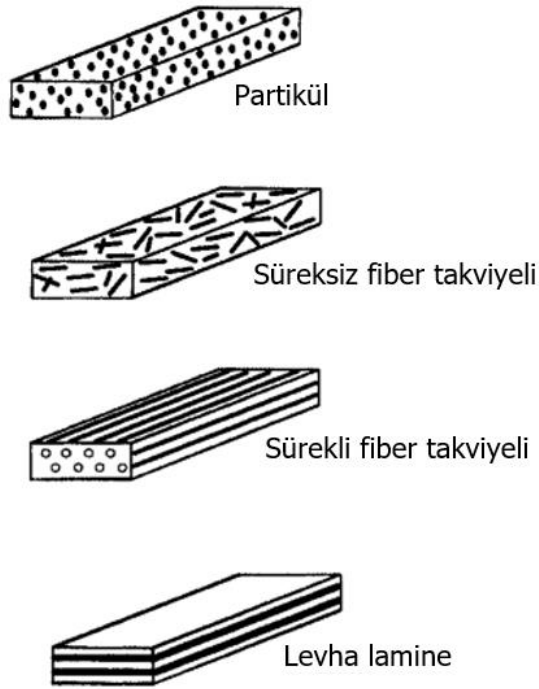
- Yüksek elastisite modülü ve dayanım kazandırır.
- Partikül takviyeli MMK'lere göre daha yüksek yük taşıma kapasiteleri vardır.
- Takviye elemanının; cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, dağılım miktarı ve homojenliği gibi parametreler değiştirilerek mekanik özelliklerde azaltma ya da artma sağlanabilir.

Öte yandan dezavantajları ise aşağıdaki gibidir.

- Anizotropik özellik göstermeleri
- Kırılan takviye malzemesinin MMK'nin mekanik özelliklerini kötü yönde etkilemesi ve yorulma ömrünü düşürmesi.
- Maliyetlerinin göreceli olarak daha fazla olması.
- Matris ve fiberler arasındaki kimyasal uyumun sağlanamaması sonucunda yüklerin fiberler tarafından taşınamaması.
- Homojen dağılım her zaman mümkün olmayabilir.

3.1.3 Sürekli fiber takviyeli MMK'ler

Sürekli fiber takviyeli MMK'ler en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan tiptir ve sürekli fiber takviyesi olarak silikon karbür, grafit, alümina ve tungsten gibi fiberler kullanılabilir. Fiberlerin yer aldığı yöndeki katılık değerleri geleneksel alaşımların ve de partikül katkılı MMK'lerin yaklaşık üç katıdır. Yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımlarının katılıklarının ise yaklaşık iki katıdır (Deve ve McCullough, 1995). Fakat diğer yöndeki mekanik özellikleri daha düşüktür. Bu tip MMK'lerin avantajları ve dezavantajları süreksiz fiber takviyeli MMK'ler ile benzerdir. Bu tip MMK'lerin süreksiz fiber takviyeli MMK'lere göre en büyük avantajı takviye yönündeki mekanik özellikleriyken, en büyük dezavantajı 5 kat daha maliyetli bir şekilde üretilmeleridir (Uygur ve Saruhan, 2004). Şekil 3.2'de farklı takviye tiplerine ait şematik kompozit yapı görülmektedir.



Şekil 3.2 Farklı tiplerdeki MMK'ler (N. Chawla ve K. K. Chawla, 2006)

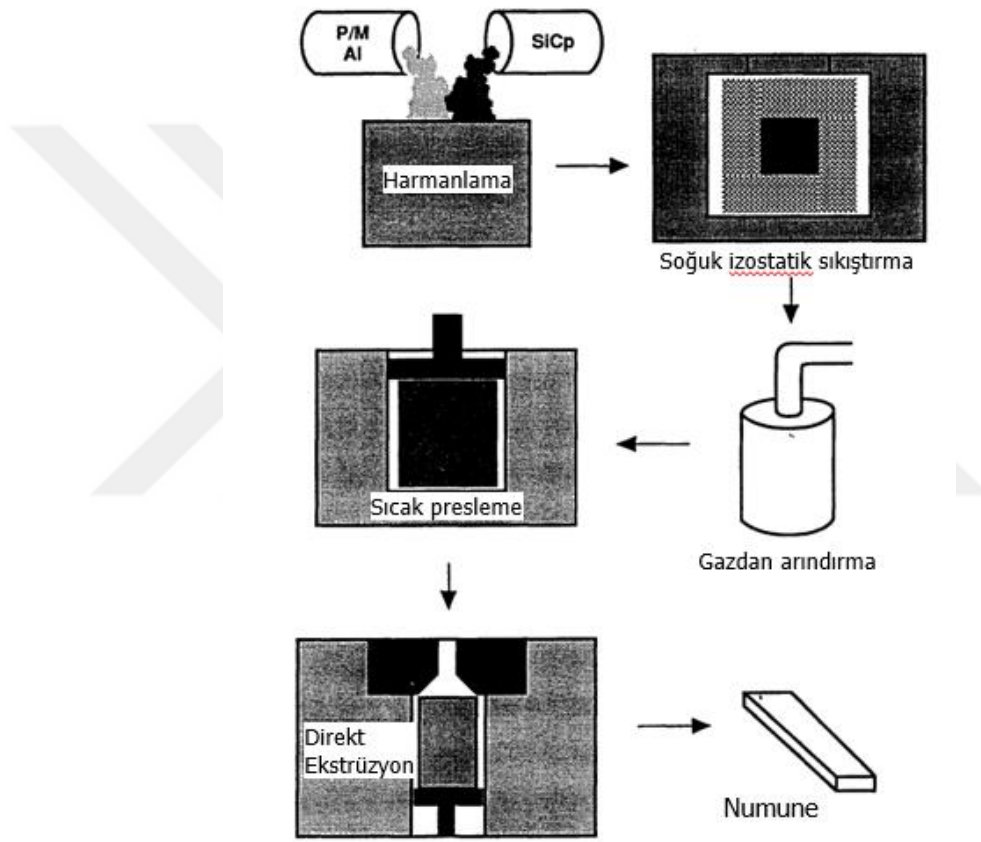
3.2 MMK'lerin Üretim Yöntemleri

Yıllar içerisinde MMK'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek adına yapılan çalışmalar üretim yöntemlerinin de gelişip çeşitlenmesine yol açmıştır. Üretim yöntemlerini matris malzemesinin sıcaklığına göre sınıflandırabiliriz. Dolayısıyla MMK'lerin üretim yöntemlerini 8 ana başlıkta incelemek mümkündür (Lloyd, 1994).

3.2.1 Toz Metalürjisi

Kimyasal etkileşimin en az olduğu katı faz üretim tekniği olan toz metalürjisi MMK'ler için geliştirilen ilk yöntemlerden biridir. Bu yöntemde matris ile takviye malzemesinin homojen bir biçimde karıştırılması gerekmektedir. Şekil 3.3'te de görülebildiği gibi bu yöntemde matris malzemesi ve takviye malzemesine ait boyutları 20-40 μm arasında değişen toz hammadde homojen bir şekilde karıştırılır. Bu karıştırma işlemi oldukça önemlidir. Metal tozları su içeren bir oksit tabakasına sahiptir ve tabakanın gaz porozitesine sebep olmaması için birleştirme adımından önce

yok edilmesi gerekmektedir. Bu işlemin ardından gözenekli yapıyı ortadan kaldırmak için vakum ortamında sıcak presleme yapılır. Sıcak presleme işlemi alaşımın katılaşma sıcaklığının altında veya katı-sıvı fazında yapılabilir. Ürün son şeklini ekstrüzyon işleminin ardından alır. 20:1 ve daha yüksek oranlarda yapılabilen ekstrüzyon işlemi ayrıca takviye malzemesinin daha homojen dağılmasına yardımcı olabilmektedir. Ekstrüzyon oranı ve sıcaklığı dikkatli bir biçimde kontrol edilmelidir. Aksi takdirde takviye malzemesine ait partiküllerde çatlaklar oluşabilmektedir (Lloyd, 1994).



Şekil 3.3 Toz metalürjisi yöntemiyle MMK üretimi (Lloyd, 1994)

3.2.2 Eriyik metal yöntemleri

Seramik partiküllerini eriyik metal içerisine dahil etmek üzere yapılan ilk çalışmalarda bazı zorluklar ortaya çıkmıştır. Çünkü çoğu metal seramik partiküllerini ıslatamıyor ve dolayısıyla partiküller eriyik içerisine nüfus edemiyordu. Buna rağmen eriyik metal yöntemleri ile ıslatılabilirlik geliştirilmeye devam edilmektedir.

3.2.3 Karıştırılmalı Döküm Yöntemi

Bu yöntem de aslında eriyik metal yöntemlerinden biridir. Temel fark, eriyik metal sürekli karıştırılırken takviye malzemesi eklenerek homojen bir dağılma sağlanmasıdır. Karıştırma tamamlandıktan sonra döküm işlemi devam etmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı malzemeye döküm sonrası herhangi bir ikincil şekillendirme yönteminin (ekstrüzyon vb.) uygulanabilmesidir. Bu üretim maliyetlerini de düşürmektedir. Bu yöntemde hacimsel takviye oranı kısıtlıdır. Çünkü eriyik metalin viskozitesi hacimsel takviye oranı artıkça artıyor ve sonuçta eriyik karışım non-newtonian akışkan haline gelmektedir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer noktalar ise:

- Partiküllerin homojen karıştırılması.
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasındaki ıslatılabilirlik.
- Malzemede ortaya çıkabilecek porozite.
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasındaki kimyasal reaksiyonlardır.

3.2.4 Yarı-katı Döküm Yöntemi

1970'lerin başlarında geliştirilen bu yöntemde, kısmen katılaşmış dendritik olmayan yapının yüksek viskozitesi sayesinde seramik partiküllerinin çökmesi veya yüzeyde yüzmesi engellenir. Böylelikle seramik partikülleri sürekli karıştırılan kısmen katı yapının içerisinde dağılır. Bu yöntem aslında magnezyum alaşımları için geliştirilmiştir. Bu işlem uzun donma aralığına sahip alaşımlar için uygun değildir ve eriyik metal yöntemleri ile benzer kısıtlamalara sahiptir.

3.2.5 Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi

Bu yöntemde, eriyik metal, önceden şekillendirilmiş fibere bir basınç uygulanarak infiltre edilir. Uygulanan basınç sayesinde ıslatılabilirlik gibi problemlerin üstesinden gelinmektedir. Dıştan uygulanan basınç sayesinde hızlı bir üretim sağlanabilmekte, meydana gelen kimyasal tepkimeler kontrol altına alınabilmekte ve matris mikro yapısı düzenlenebilmektedir. Bu basıncın bazı uygulamalarda bir gaz ortamında veya

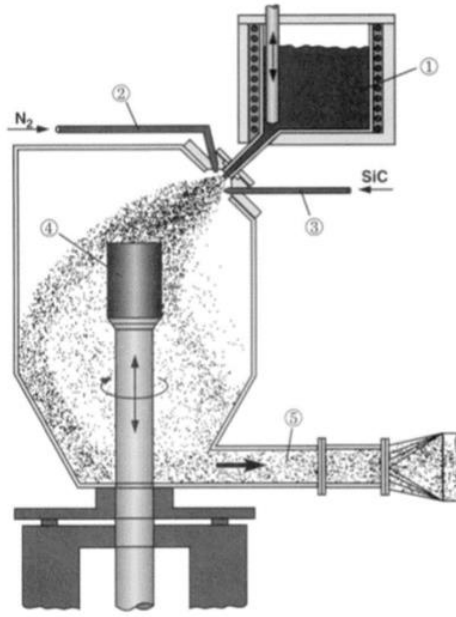
vakum ortamında yapıldığı da bilinmektedir. Bu yöntem ile yüksek hacim takviyeli MMK'ler (%10-70) üretilmektedir. Öte yandan uygulanan basınç sayesinde malzemede görülen porozite oldukça düşüktür.

3.2.6 Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemi

Basıncılı infiltrasyon yönteminden farklı olarak bu yöntemde bir basınç olmaksızın infiltrasyon işlemi nitrojen ortamında yapılmaktadır. Bu yöntem yüksek hacim takviyeli MMK'ler için maliyet açısından oldukça rekabetçidir (Lloyd, 1994).

3.2.7 Sprey Döküm (Sprey biriktirme) Yöntemi

Sprey döküm yöntemi, yüksek soğuma hızları sayesinde özel alaşımların üretiminin mümkün olduğu bir üretim yöntemidir. Sprey döküm, sprej şekil verme veya sprej biriktirme yöntemi isimleriyle de bilinmektedir. Eriyik metal şekil 3.4'te görüldüğü gibi nitrojen ve argon gazları yardımıyla püskürtülerek bir toplayıcı üzerinde toplanmaktadır. (Salamcı, 2004). Toplayıcı üzerinde hızlıca katılaşan kütüğe daha sonrasında ikincil işlemler (ekstrüzyon, hadde vb.) ile şekil verilebilmektedir. Sprey döküm sonrasında %95 civarında yoğunluk elde edilirken, ikincil işlem sonrası %100 yoğunluk elde edilmektedir. Tek operasyonda net ürün elde edilmesi ve de diğer yöntemlere göre daha az işlem basamağı bulunması bu yöntemi oldukça avantajlı hale getirmektedir.



Şekil 3.4 Sprey Döküm Süreci (Eschbach, 1997)

Sprey döküm yönteminin bir diğer avantajı da toz metalürjisi ve eriyik metal yöntemlerinin dezavantajlarını içermemesidir. Toz metalürjisinde atomize edilmiş alüminyum tozlarının yüzeyinde meydana gelen oksit, sprej döküm yönteminde oldukça azdır. Öte yandan bu yöntemde eriyik metal yöntemlerindeki gibi kaba taneler oluşmazken, makro düzeyde bir ayrışma meydana gelmemektedir.

Sprej döküm yöntemi ile standart alaşımlar üretilebildiği gibi MMK malzemeler de üretilebilmektedir. Eriyik matris malzemesi toplayıcı üzerine püskürtülürken takviye malzemesi belirlenmiş yoğunlukta eklenebilmektedir. Sprej ve toplayıcı arasındaki hareket çeşitlendirilerek kütük (bilet), tüp, disk gibi farklı geometriler elde edilebilmektedir. Bu işlem sırasında kullanılan gazların maliyetinin yüksek olması ve atık toz miktarının çok olması yöntemin dezavantajlarıdır (Uslularhadde, 2020).

3.2.8 XD™ (In-situ) Yöntemi

Bu yöntem Martin Marietta Corp., şirketinin patentli bir yöntemidir. In situ, "yerinde" anlamına gelmektedir ve kimyada “reaksiyon karışımı içerisinde” anlamına gelmektedir. Temel olarak eriyik metal ve kullanılan gaz arasında meydana gelen

tepkime kullanılarak takviye partiküllerinin eriyik içerisinde üretimi sağlanmaktadır. Birçok seramik partikül bu yöntemle üretilmektedir fakat bunlardan TiC ve TiB₂ öne çıkmaktadır. Ortaya çıkan partikül genellikle tek kristalli yapıya ve oksitlenmemiş bir ara yüze sahiptir. Bu yöntemle üretilen takviye partiküllerinin boyutunun 0,25 ile 1,5 µm arasında olduğu bilinmektedir. En büyük avantajı takviye malzemesinin matris malzemesi tarafından doğal olarak ıslatılmasıdır. Bu da daha güçlü bir ara yüz anlamına gelmektedir (Lloyd, 1994).



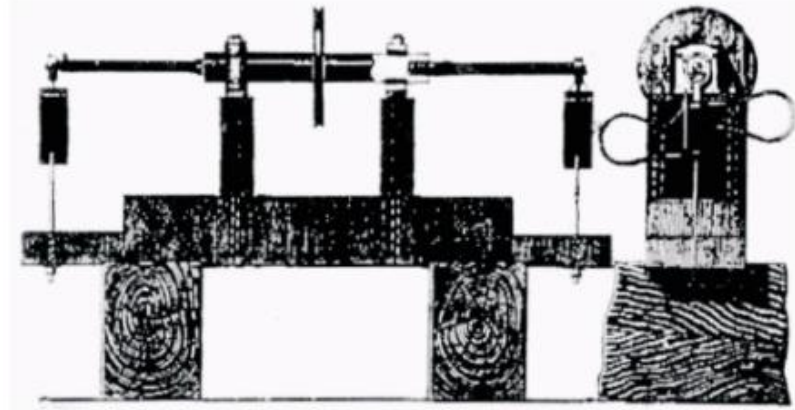
BÖLÜM DÖRT

YORULMA

Ani hasara sebep olmayacak kadar küçük bir yük veya yer değiştirmenin belirli bir çevrim sonunda malzemede hasar meydana getirmesine yorulma denir. Yorulma hasarı incelendiğinde, çatlağın, malzemenin hasara uğradığı yüzeyde kayma düzlemlerinde kesme çatlakları olarak başladığı görülmektedir. Bu kesme çatlakları her çevrim boyunca ilerleyerek nihai hasarın oluşmasına sebep olur.

4.1 Yorulmanın Tarihçesi

Yorulma kavramı, 19. yüzyılda demir yolu bağlantı parçalarında belirli aralıklarla hasar meydana gelmesi sonucunda bu hasarı tanımlamak üzere ortaya çıkmıştır. Daha sonra 1850'lerde, August Wöhler laboratuvar ortamında birçok yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Demiryolu hasarlarıyla ilgili yapılan bu deneyler literatürdeki ilk yorulma araştırması olarak kabul edildi. Şekil 4.1'de Wöhler'in tasarlamış olduğu ilk yorulma hasarı test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.1 Wöhler tarafından tasarlanan ilk yorulma deneyi düzeneği (Halfpenny, 2001)

Wöhler, gerilme ve ömür diyagramlarını kullanarak gerilme genliği ile ömür arasındaki ilişkileri incelemiş ve bazı gerilme genliklerinde numunelerin kırılmadığını ortaya çıkarmıştır. Böylelikle yorulmada maksimum gerilmeye kıyasla gerilme aralığının daha büyük bir rol oynadığı ortaya çıkmış oldu. Wöhler'den sonra Gerber

ve ekibi ortalama gerilmenin yorulmadaki rolünü araştırdılar. Ardından Goodman ortalama gerilmenin yorulma üzerindeki etkisi üzerine bir teori önerdi.

1900'lü yılların başına geldiğimizde, Ewing ve Humpfrey, yorulma mekanizmasını incelemek üzere optik mikroskop kullanıp kayma çizgilerini ve mikro çatlağı oluşturan kayma bantlarını gözlemlemişlerdir. 1910'da ise Basquin, gerilme ve hasarın oluştuğı çevrim sayısı (S-N) arasında bir ilişki olabileceğini ortaya koymuştur. Bu logaritmik ilişkiden malzemenin sonlu ömür bölgesinde söz edilebilirdi. Basquin'in ortaya çıkardığı bu denklemin çeşitli eklemeler yapılmış hali günümüzde kullanılmaktadır. Palmgren ise genliğin yükleme boyunca değiştiğı durumlar için kümülatif hasar modeli geliştirdi.

4.2 Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

4.2.1 Maksimum Çeki Gerilmesi

Uygulanan gerilmenin çeki yönünde ulaştığı maksimum değer artıkça yorulma dayanımının azaldığı bilinmektedir. Yorulma çatlakları çeki gerilmelerinin oluştuğı sürelerde ilerlediğı için bu gerilme değerinin büyüklüğü malzemenin yorulma dayanımını belirleyen temel faktörlerden biridir.

4.2.2 Gerilme Genliği

Uygulanan gerilmenin genliği veya başka bir deyişle değişkenliği yorulma dayanımını etkileyen temel faktörlerden bir diğeridir. Genlik miktarı arttıkça yorulma ömrü logaritmik olarak azalmaktadır. Gerilme genliği plastik deformasyon oluşumunun temel nedeni olup nihai hasar oluşumuna neden olur.

4.2.3 Uygulanan Çevrim Sayısı

Yorulma dayanımını etkileyen bir diğer temel faktör gerilmenin ne kadar süreyle veya başka bir deyişle kaç çevrim boyunca uygulandığıdır. Uygulanan gerilmenin

genliği ve ulaştığı maksimum çeki değeri sabit tutulduğunda ve gerilmenin uygulandığı çevrim sayısı arttırıldığında ilerleyen çatlaklar nihai hasara sebep olabilmektedir. Bu sebeple malzemenin yorulma dayanımı hasarın meydana geldiği çevrim sayısı ile ifade edilir.

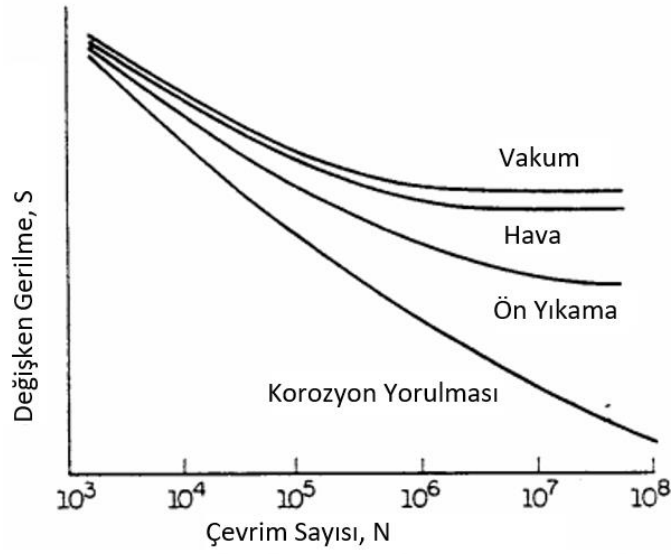
4.2.4 Sıcaklık

Malzemenin akma ve kopma dayanımı sıcaklık ile değişebildiğinden yorulma dayanımı da bu durumdan etkilenmektedir. Sıcaklık değeri oda sıcaklığı değerinin üstüne çıktığında yorulma dayanımının düştüğü bilinmektedir. 200°C'ye kadar olan sıcaklıklarda çeliklerin yorulma ömürlerinde büyük farklar gözükmez. Bazı eliklerde ise bu değerin 400°C olduğu bilinmektedir.

Yüksek sıcaklıklı yorulmada, sıcaklık arttıķa yorulma hasarından sürünme (creep) hasarına geçiş olur. Büyük taneli mikro yapıya sahip malzemeler sürünmeye karşı daha hassastırlar. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda baskın hasar tipi yorulma değil srnmedir. Bazı durumlarda malzemenin tümü değil de sadece bazı bölgeleri sıcaklık değişiminden etkilenebilir. Böyle bir durumda bu bölgelerde çatlak ilerlemesi hızlanıp hasar meydana gelebilmektedir. Bu olaya ısıl (termal) çok denmektedir (Yeni, 2018a).

4.2.5 Korozyon

Korozif ortamda dinamik yüklemeye maruz kalan malzemede meydana gelebilecek hasar tek başına dinamik yüklemenin ve korozyonun meydana getirebileceği hasardan çok daha tehlikelidir. Korozif ortamda kalan malzemelerin yüzey kalitesi bozulur. Korozyon sonucu yüzeyde çukurcuklar oluşur ve bu ukurcuklarda gerilmeler yığılıp çatlakların erken başlamasına sebep olurlar. Çatlaklar eki gerilmesi yönüne dik olarak ilerler. Ayrıca çukurcuklar birden fazla noktada ortaya çıkabileceği için yorulma çatlakları birden fazla noktada ortaya çıkabilir. Farklı ortamlarda yapılan yorulma testlerinde metallerin yorulma dayanımlarının değiştiği şekil 4.2'de görülebilmektedir. Korozif bir ortamda sonsuz mrden bahsedilemez. Bu sebeple kritik parçaların bakımı sırasında korozyon kontrolü oldukça önemlidir.



Şekil 4.2 Farklı ortamlarda elde edilmiş S-N eğrileri (Bannantine, Comer ve Handrock, 1990)

4.2.6 Metalürjik Faktörler

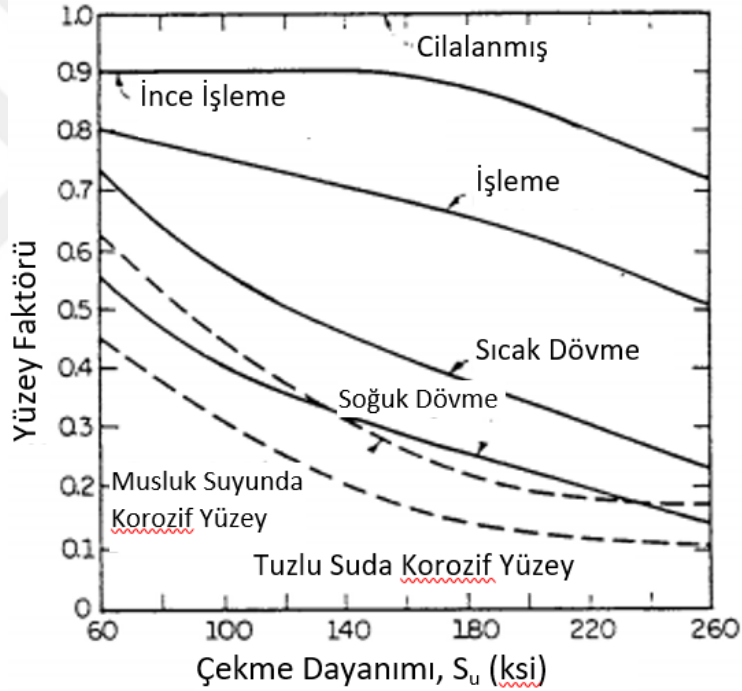
Metallerde tane büyüklüğünün yorulma dayanımına doğrudan etkisi vardır. Çok yüksek olmayan sıcaklıklarda küçük taneli mikro yapılı malzemelerin büyük taneli mikro yapılı malzemelerden daha yüksek yorulma dayanımları vardır. Fakat sıcaklık yükseldikçe hasar tipi sürünmeye geçeceği için tam tersi bir durum ortaya çıkabilmektedir. Döküm malzemelerin yorulma dayanımları dövme malzemelere göre oldukça düşüktür. Bunun temel sebebi dövülmüş malzemedeki mikro yapının çok daha küçük taneli olmasıdır. Yorulma çatlakları tane içerisinde hızlıca ilerlerken tane sınırlarına geldiğinde yavaşlamaktadır. Bu yüzden tane sınırı sayısı arttıkça yorulma dayanımının da artmasından söz edilebilir.

Aynı kimyasal kompozisyona sahip, dövülerek üretilmiş fakat farklı ısıt işlemler uygulanmış iki malzemenin yorulma dayanımlarında da farklar olabilmektedir. Bu sebeple tüm alaşımlar için ısıt işlem ve yaşlandırma parametreleri mikro yapıya etki ettiği için oldukça önemlidir.

Malzeme kusurlarının yorulma dayanımına büyük etkisi vardır. Porozite, inkluzyon veya çökelmiş alaşım elementleri gibi kusurlar yorulma çatlaklarının oluşmasına sebep olabilir.

4.2.7 Yüzey Kalitesi

Yorulma çatlakları yüzeyde başladığı için yüzey kalitesinin yorulma dayanımı üzerinde büyük etkisi vardır. Malzemede var olan gerilme yığılmaları yüzeyin kalitesiyle birlikte artabilmektedir. Bu da yorulma çatlaklarının daha erken başlamasına sebep olabilmektedir. Şekil 4.3'te farklı yüzey kalitelerine ait çekme dayanımları görülmektedir. Yapılan çalışmalarda, sıcak dövme, soğuk dövme, işleme, taşlama ve cilalama sonrası yüzey kalitesinin yorulma dayanımı üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Yüzey işleme yöntemlerinden kaynaklı yüzeyde artık gerilmeler de oluşabilmektedir. Bu artık çeki gerilmeleri yorulma dayanımını negatif şekilde etkilemektedir (Yeni, 2018a).



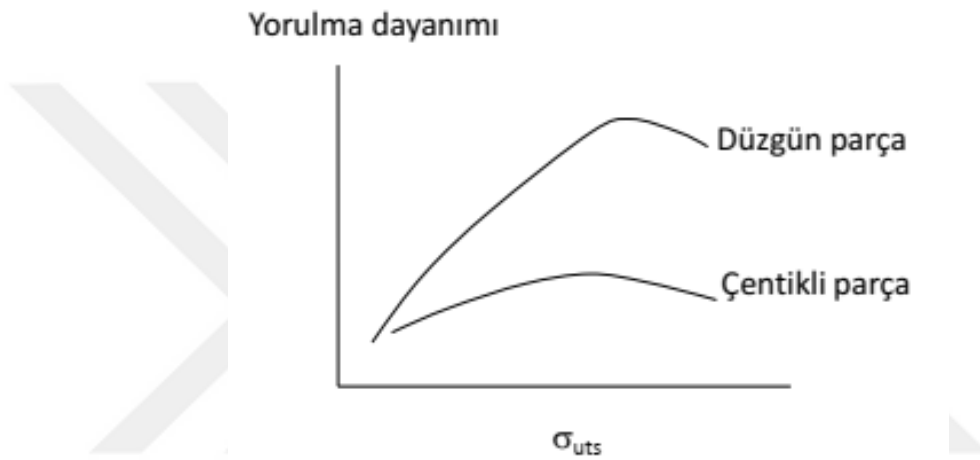
Şekil 4.3 Çelik alaşımında yüzey kalitesine göre değişen çekme dayanımı (Bannantine, Comer ve Handrock, 1990)

4.2.8 Çentik Etkisi

Çentik etkisi yorulma dayanımını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Yapılan çalışmalar sonucunda teorik gerilme yığılması faktörü (K_t), efektif gerilme yığılması faktörü (K_f) ve çentik hassasiyet faktörü (q) denklem 4.1'deki gibi tanımlanmıştır.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (4.1)$$

Eğer malzemede çentik var ise (oyuk, keskin köşe, delik vb.) kesit alandaki ani değişimler, gerilme yığılmalarına sebep olacağı için yorulma dayanımı şekil 4.4'te görülebildiği gibi ani olarak düşebilmektedir. Bu sebeple makine elemanlarının tasarımlarında bu tip faktörlerden kaçınılması gerekmektedir (Yeni, 2018a).



Şekil 4.4 Çentik olması durumunun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi (Yeni, 2018a)

4.2.9 Soğuk Deformasyon (Cold Working)

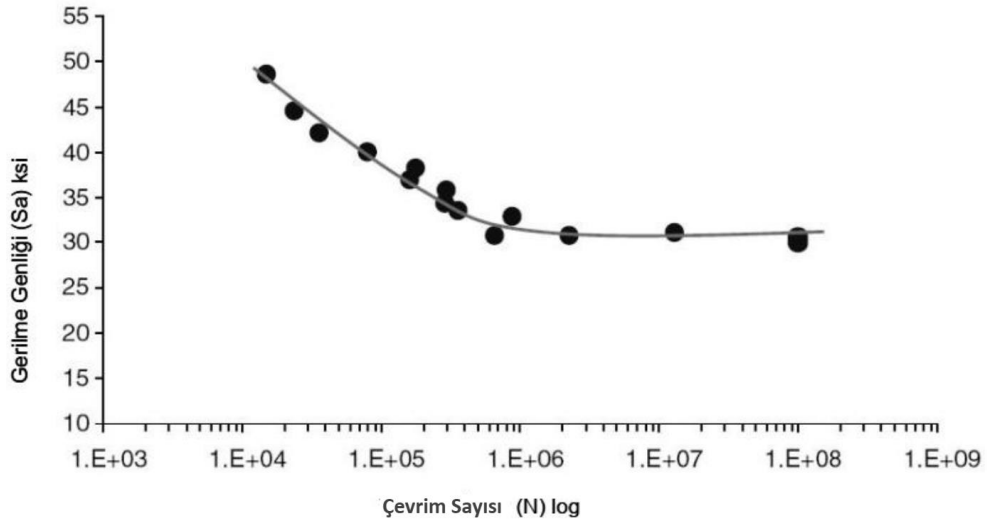
Soğuk deformasyon veya soğuk şekillendirme, malzemelerin yüzeyindeki sertliğin ve dolayısıyla dayanımının artırılması amacıyla oda sıcaklığında uygulanan yöntemlere denmektedir. Bu işlem esnasında yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşmaktadır. Bu durum da malzemenin yorulma dayanımını artırmaktadır.

4.3 Yorulma Ömrünün Belirlenmesi

Yorulma hasarı analizi ve tasarımında üç ana yaklaşım kullanılır.

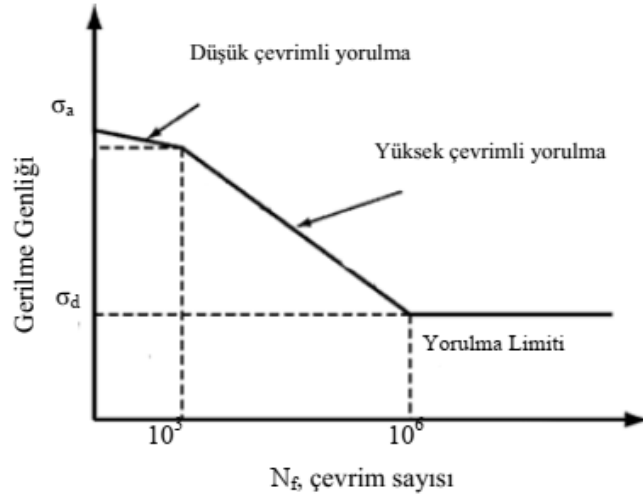
4.3.1 Gerilme (S) – Ömür (N) Yaklaşımı (Toplam Ömür)

Bu yöntemde, belirli bir malzemeye yeterince yüksek bir gerilme nihai hasar veya çatlak meydana gelecek çevrim sayısı kadar uygulanır. Ardından aynı geometrik ve malzeme özelliklerine sahip başka bir numuneye yine aynı koşullarda bir öncekinden daha yüksek bir gerilme genliği uygulanır ve daha düşük bir çevrim sayısında hasar meydana gelir. Öte yandan ilk gerilmeden daha düşük bir gerilme genliği uygulanarak da daha yüksek çevrimde hasar meydana getirilmektedir. Bu farklı gerilme genliklerindeki hasarın meydana geldiği çevrim sayıları bir diyagram üzerinde yorumlanarak ömür tayini yapılabilir. Şekil 4.5'te de görülen bu eğrilere S-N eğrisi veya Wöhler eğrisi denmektedir. Bu yöntem, uzun ömre sahip, sabit genlikle yüklenen malzemelerin ömür tayinleri için uygundur. Ayrıca gerçek hayattaki bazı yük değişimleri her zaman sabit genlikli olmayabilmektedir. Bu sabit olmayan yükler de farklı yöntemlerle sabit genlikli yükler olarak yeniden modellenebilir.



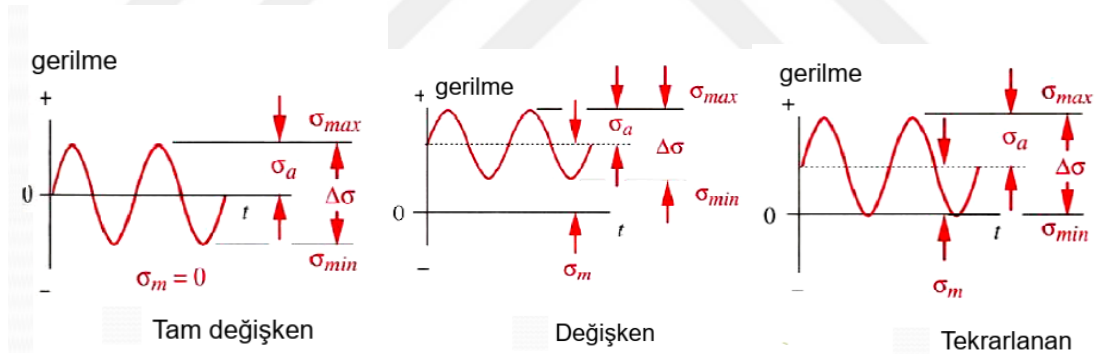
Şekil 4.5 Bir çeliğe ait S-N eğrisi (Akarsu, 2012)

Şekil 4.6'da görülen Wöhler eğrisinde eğimli olan bölgeye sonlu ömür bölgesi ve paralel olan bölgeye ise sonsuz ömür bölgesi denmektedir (Kahya, 2016).



Şekil 4.6 Wöhler Eğrisi (Kahya, 2016)

Şekil 4.7’de farklı yükleme tipleri görülmektedir. Grafikte görülen σ_a , gerilme genliği, σ_m , ortalama gerilme, σ_{max} , maksimum gerilme, σ_{min} , minimum gerilme, A, genlik oranı, R, gerilme oranı ve $\Delta\sigma$ ise gerilme aralığını ifade eder.



Şekil 4.7 Farklı çevrimsel yükleme çeşitleri (Yeni, 2018a)

S-N eğrilerinde en sık kullanılan bağıntı logaritmik olan Basquin bağıntısıdır.

$$\sigma_a = C N_f^b \quad (4.2)$$

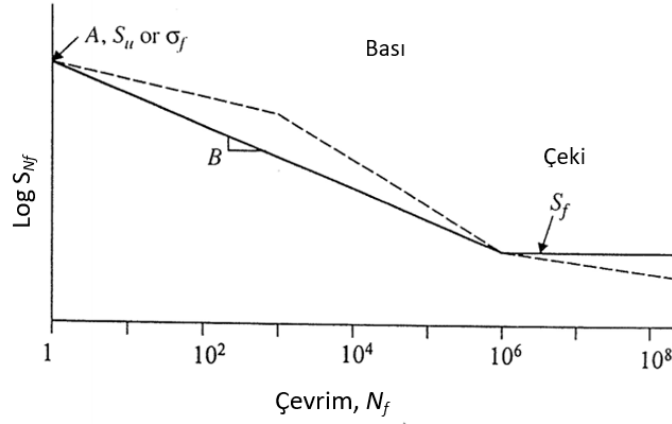
σ_a : gerilme genliği

C: malzeme sabiti

N_f : kırılmaya kadar olan çevrim sayısı

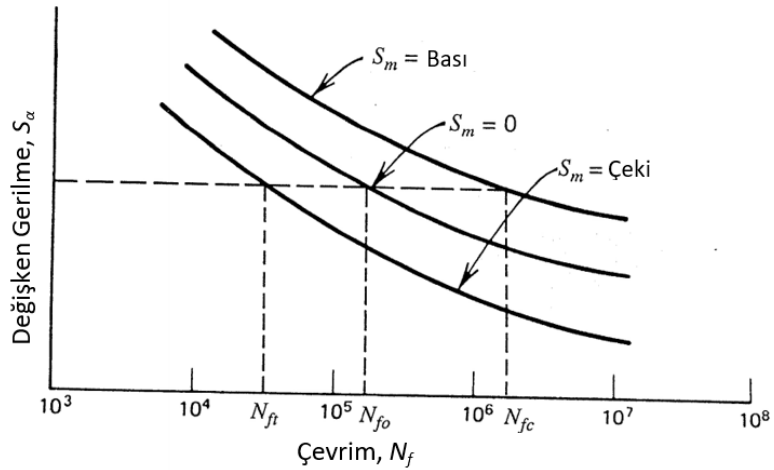
b: Basquin üsteli

Basquin yaklaşımıyla oluşturulan S-N eğrisi Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8 Basquin tipi S-N eğrisi (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

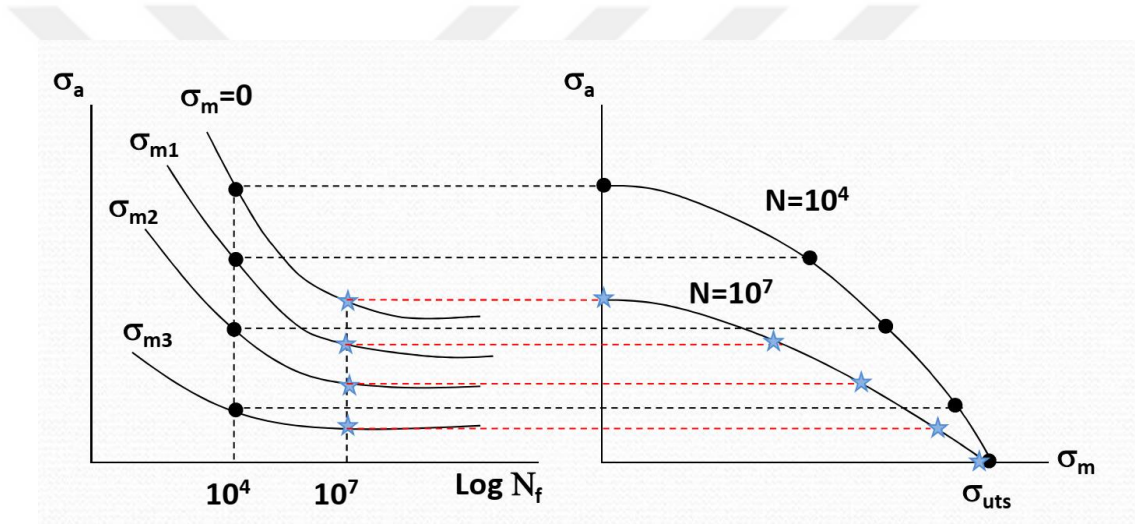
Tam değişken yükleme durumunda ortalama gerilmenin sıfır olduğu kabul edilmektedir. Fakat ortalama gerilme her zaman sıfır olmayabilmektedir ve yorulma ömrü üzerinde önemli bir rolü vardır. Pozitif veya negatif ortalama gerilmeler gerçek yükleme koşullarında oluşabildikleri gibi malzemenin üretimine bağlı olarak artık gerilmeler olarak da ortaya çıkabilmektedirler. Şekil 4.9’da farklı ortalama gerilme durumlarındaki yorulma ömür incelenmiştir.



Şekil 4.9 Farklı ortalama gerilmelerdeki yorulma ömrü (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

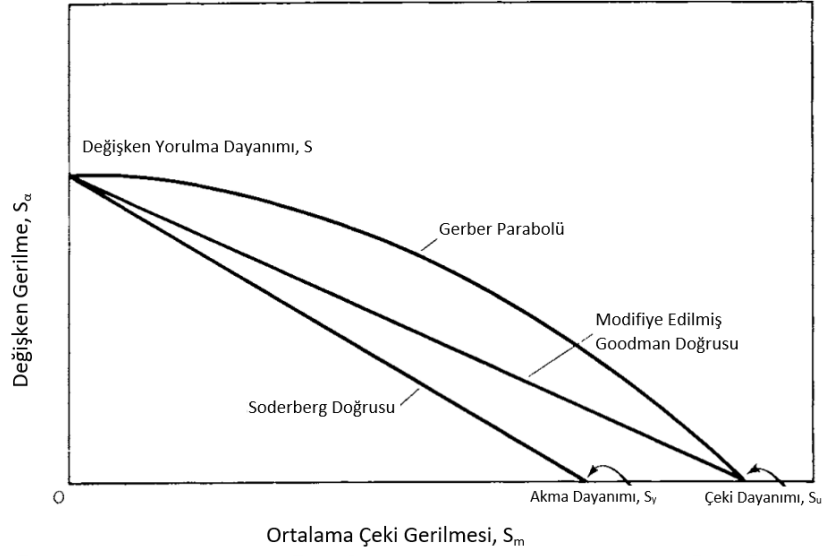
Görüldüğü üzere, bası yönünde ortalama gerilme durumundaki yorulma ömrü, ortalama gerilmenin sıfır ve çeki yönünde olduğu duruma göre daha yüksektir. Çeki yönündeki ortalama gerilme durumu yorulma ömrünü düşürücü yönde etkilemiştir.

Ortalama gerilmenin yorulma ömrü üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla çeşitli ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Bunlara “sabit ömür diyagramları” adı verilir. Şekil 4.10’da görülebilen bu diyagramlarda S – N eğrisinde çeşitli ömür sayılarında noktalar seçilir ve her bir ömür sayısı için ortalama gerilme – gerilme genliği kombinasyonları oluşturulur. Interpolasyon yolu ile çeşitli gerilme değerlerindeki yorulma ömürleri elde edilir (Yeni, 2018a).



Şekil 4.10 Farklı ortalama gerilme durumları için elde edilen sabit ömür diyagramı (Yeni, 2018a)

Şekil 4.11’de değişken ortalama gerilme ve gerilme genliği arasındaki ilişkiye dayanılarak elde edilmiş diyagramlar gösterilmektedir. Değişken gerilme ile kopma dayanımını ilişkilendiren düz çizgi Goodman doğrusu olarak bilinir. Soderberg doğrusu ise değişken yorulma dayanımını akma dayanımı ile doğrusal olarak ilişkilendirir. Gerber parabolünde ise Goodman doğrusunda olduğu gibi değişken yorulma dayanımını kopma dayanımı ile ilişkilidir fakat bu ilişki doğrusal değil paraboliktir. Metal malzemelerin çoğu Gerber parabolü ile Goodman doğrusu arasındaki bölgede yer almaktadır.



Şekil 4.11 Goodman doğrusu, Soderberg doğrusu ve Gerber parabolü (Forrest, 1962)

Goodman bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right) \quad (4.3)$$

Gerber bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 \right) \quad (4.4)$$

Soderberg bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \frac{S_m}{S_y} \right) \quad (4.5)$$

S_a : Gerilme genliği cinsinden yorulma dayanımı ($S_m \neq 0$)

S : Gerilme genliği cinsinden yorulma dayanımı ($S_m = 0$)

S_m : Ortalama gerilme

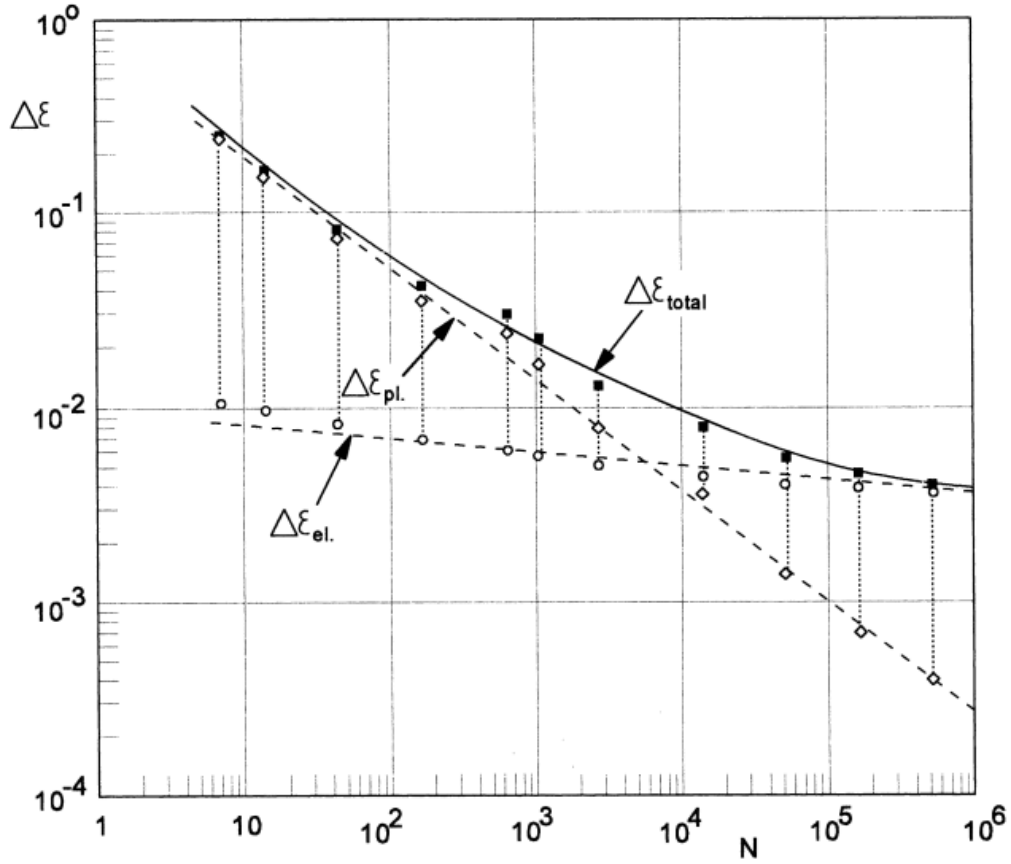
S_u : Kopma dayanımı

S_y : Akma dayanımı

4.3.2 Birim Şekil Değiştirme (ϵ) – Ömür (N) Yaklaşımı

Tekrarlanan yükün plastik deformasyon yaratacak kadar büyük olduğu durumlarda veya başka deyişle düşük çevrim yorulma bölgesinde gerilme-ömür yaklaşımı yerine şekil değiştirme-ömür yaklaşımı kullanmak daha uygundur. Çünkü makro düzeyde

yüksek çevrim yorulma mekanizması elastik bir problem iken, düşük çevrim bölgesinde her çevrimde plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Birim şekil değiştirme-ömür yaklaşımını çalışma ömürleri boyunca az sayıda yük çevrimine maruz kalan malzemeler için kullanmak daha doğru sonuçlar verecektir. Malzemeye veya makine elemanına gelen tüm yükleri akma dayanımının altında tutmak öte yandan oldukça ağır ve pahalı tasarımlara yol açabilmektedir. Örneğin, yüksek sıcaklıklarda çalışan güç jeneratörü elemanları termal gerilmelere maruz kalırlar. Açık veya kapalı olduğu durumlar düşünüldüğünde durumun düşük çevrimli yorulma olarak değerlendirilmesi gerekir. Bu yüzden birim şekil değiştirme-ömür yaklaşımı kullanılmalıdır.



Şekil 4.12 Birim şekil değiştirme – ömür eğrileri (Schijve, 2009)

Şekil 4.12’de birim şekil değiştirme ömür denklemi şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görülen eğri, elastik birim şekil değiştirme çizgisine ve plastik birim şekil değiştirme çizgisine asimptotiktir. İki kesik çizginin kesiştiği noktadaki çevrim

sayısına geçiş yorulma mrü ($2N_t$) denir. Elastik birim Şekil değiştirme denklem 4.2’deki Basquin denkleminin düzenlenmesiyle elde edilir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} E = \sigma'_f (2N)^b \quad (4.6)$$

Basquin denklemi ve Coffin-Manson denklemlerinin birlikte düzenlenmesiyle Denklem 4.7’deki toplam yer değiştirme-ömür bağıntısı elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4.7)$$

$\Delta \varepsilon/2$: Toplam yer değiştirme genliği

ε'_f : Yorulma süneklik katsayısı

c: Yorulma süneklik üsteli

σ'_f : Yorulma dayanım katsayısı

b: Yorulma dayanım üsteli

E: Elastisite modülü

N_f : Hasar evrim sayısı

Geçiş yorulma ömrü ise elastik birim Şekil değiştirme ile plastik birim Şekil değiştirmenin birbirine eşitlenerek hesaplanabilir.

$$\frac{\sigma'_f}{E} (2N_t)^b = \varepsilon'_f (2N_t)^c \quad (4.8)$$

Eğer denklem düzenlerse denklem 4.9 elde edilebilir.

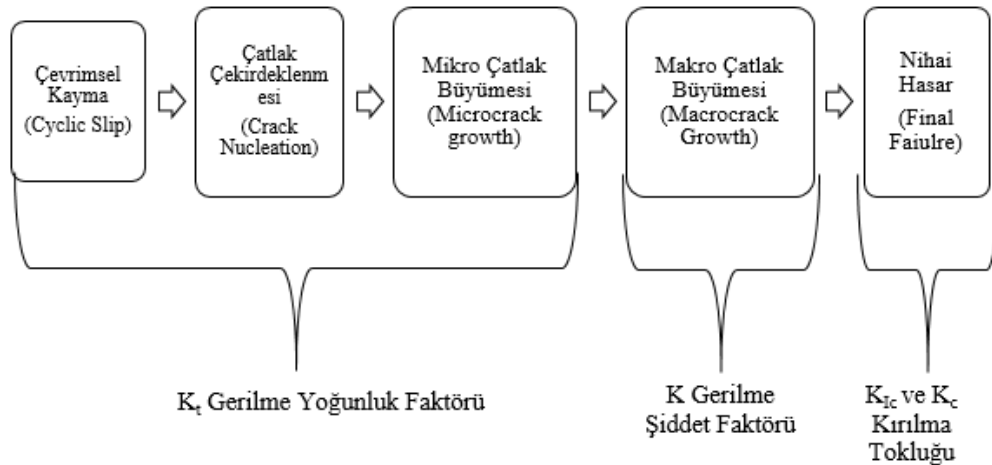
$$2N_t = \left(\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (4.9)$$

Birim şekil değiştirme ömür yaklaşımında 4 ampirik sabitin (b , c , σ'_f , ϵ'_f) belirlenmesi gerekmektedir. Bu sabitlerin elde edilmesi için bazı noktaların göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Yeni, 2018a).

- Bazı malzemeler bu 4 sabit ile temsil edilemeyebilir. (Örneğin yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları)
- Bu 4 sabit az sayıdaki veri ile elde edilmiş olabilir. Yeni veriler eklendiğinde sabitler değişebilmektedir.
- Eğer 4 sabit belirli bir aralık için elde edildiyse, aralığın dışındaki noktalar için ekstrapolasyon yapmak kritik hatalara sebep olabilir.
- Üstel fonksiyonların kullanımı matematiksel bir kolaylıktır fakat fiziksel fenomeni açıklamakta yetersiz kalabilir.

4.3.3 Kırılma Mekanizması Yaklaşımı (Yorulma Çatlağı İlerlemesi)

Çatlakların var olması malzemenin veya makine elemanının ömrünü ciddi bir biçimde azaltmaktadır. Malzemelerin yorulma ömürlerinin belirlenmesi için çatlak oluşumunun nasıl ilerlediğinin bilinmesi gerekmektedir. Yorulma çatlakları şekil 4.13'teki gibi ilerleyip nihai hasara sebep olmaktadır.



Şekil 4.13 Çatlak ilerleme mekanizması (Yeni, 2018a)

Kırılma mekaniği yaklaşımı ile ömrü hesaplayabilmek için aşağıdaki bilgiler gerekmektedir.

- Gerilme şiddet faktörü (K)
- Kırılma tokluğu (K_c)
- Uygulanabilir yorulma çatlak büyüme hızı ifadesi
- İlk çatlak boyutu (a_i veya a_0)
- Nihai veya kritik çatlak boyutu (a_f veya a_c)

Gerilme şiddet faktörü (K), lineer elastik kırılma mekaniğinin temel parametrelerinden biridir. Bu parametre uygulanan gerilmenin, çatlak uzunluğunun ve geometrisinin bir fonksiyonudur.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\alpha = \sigma\sqrt{\pi a}f\left(\frac{a}{w}\right) = \sigma\sqrt{a}Y \quad (4.10)$$

Kırılma tokluğu (K_c) ise uygulanan yükte veya enerjide bir artış olmamasına rağmen çatlağın dengesiz bir biçimde uzadığı kritik K değeridir ve denklem 4.11'deki gibi ifade edilir.

$$K_c = \sigma_c\sqrt{\pi a_c}f\left(\frac{a_c}{w}\right) \quad (4.11)$$

Burada σ_c çatlağın dengesiz davrandığı durumda uygulanan gerilme değeri ve a_c ise bu dengesizlik durumundaki çatlak boyudur. K_c malzemeye, gerilme hızına, çevresel faktörlere, kalınlığa ve çatlak boyuna bağlıdır. İlk çatlağın boyu, kırılma tokluğuna göre çatlak ilerleme ömründe daha büyük bir role sahiptir. Bu sebeple ilk çatlağın ve süreksizliklerin olabildiğince minimize edilmesi gerekmektedir. Çatlak yorulma ilerlemesini ifade eden ampirik bağıntılar bu yaklaşım ile ömür tayini yapılmasını mümkün kılmıştır. Paris, Forman, Walker ve diğerlerinin geliştirdiği bağıntı denklem 4.12'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n = A(\Delta\sigma)^n(\pi a)^{n/2}a^n \quad (4.12)$$

Kritik tasarımlarda daha hassas ömür tayinlerinin yapılması gerekmektedir. Yukarıda anlatılan yöntemlerin birlikte kullanılması başarı getirebildiği gibi daha fazla soru işaretinin ortaya çıkmasına da sebep olabilmektedir (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001).



BÖLÜM BEŞ

BURKULMA

Uzun yapısal elemanların bası yükleri altında denge durumundan aniden dengesiz oldukları duruma geçmeleri yani çökmeleri çok olasıdır. Bu kritik yüke burkulma kuvveti denmektedir. Bu yüzden yapısal elemanların tasarımında burkulma durumu belirli bir noktaya kadar engellenmelidir. Aksi takdirde yapısal elemanın hasarı ile insan veya diğer canlıların zarar görmeleri mümkün olacaktır. Euler yapısal elemanlar için bir burkulma teorisi geliştirdi. Uzun yapısal elemanlar için düzgün sonuç veren teori kısa yapısal elemanlar için düzgün sonuçlar verememekteydi. Bu sebeple Rankine, kısa yapısal elemanlar için ezilme kuvvetini hesaplayan formülü ve Euler'in uzun yapısal elemanlar için geliştirdiği formülü birleştirmiştir. Rankine'nin geliştirdiği formülde deneylerle elde edilebilen iki adet sabit bulunmaktadır (Yeni, 2018b). Ayrıca kritik burkulma yükünü bulmak için bazı enerji yaklaşımları da mevcuttur. Bu enerji yaklaşımları sınır şartlarının ve diferansiyel denklemlerin çözümünün çok zor olduğu durumlarda kullanılabilir.

5.1 Euler'in Burkulma Teorisi

Euler, yapısal elemanın belirli bir yük altında burkulduğunu kabul ederek yapısal elemanlar için burkulma teorisini geliştirmiştir. Euler, teorisinde aşağıdaki kabulleri göz önüne almıştır (Yeni, 2018b).

- Yapısal elemanın malzemesi homojen ve izotropiktir.
- Bası kuvveti yalnızca yapısal elemanın kendi eksenini boyunca etki eder.
- Yapısal eleman yalnızca burkulma yükünden dolayı hasara uğrar.
- Yapısal elemanın ağırlığı ihmal edilir.
- Yapısal eleman ilk durumda hasarsız ve düzdür. Belirli bir yükte aniden burkulur.
- Ankastre bağlantı tipleri rijit, mafsallı bağlantılar ise sürtünmesizdir.

$$P_e = \frac{\pi^2 x E x I}{L_e^2} \quad (5.1)$$

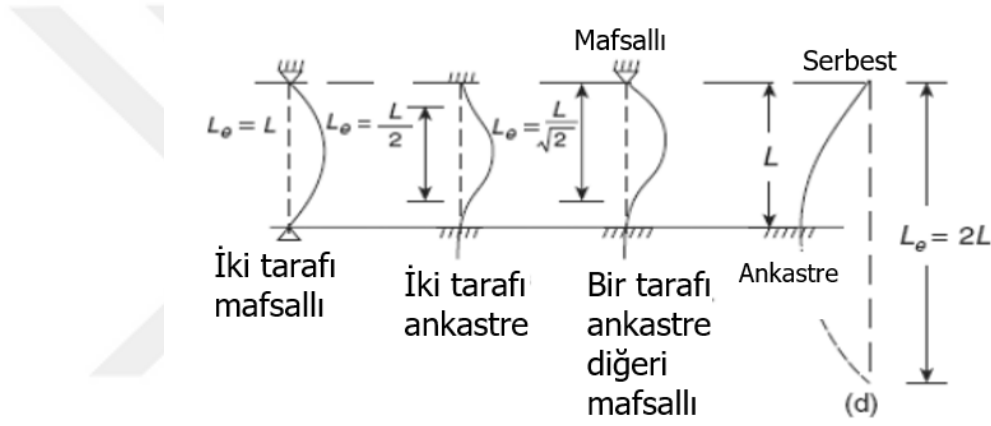
P_e : Kritik burkulma yükü

E : Elastisite Modülü

I : Atalet Momenti

L_e : Eşdeğer Burkulma Boyu

Euler burkulma teorisinde sınır şartları burkulma yükünü doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple denklem 5.1’de eşdeğer burkulma boyu tanımlanmıştır. Eşdeğer burkulma boyu yapısal elemanın sınır şartlarına göre değişmektedir.



Şekil 5.1 Farklı bağlantı tipleri için eşdeğer burkulma boyları (Yeni, 2018b)

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi yapının her iki ucunda da mafsallı bağlantı mevcut ise eşdeğer burkulma boyu yapının kendi boyu ile aynı alınır. Eğer uçların her ikisinde de ankastre bağlantı mevcut ise eşdeğer burkulma boyu yapının boyunun yarısıdır. Bir uçta mafsallı ve diğer uçta ankastre bağlantı olduğu durumda ise eşdeğer boy, yapının boyunun $\sqrt{2}$ ’ye bölünmesiyle elde edilir. Bir ucun serbest, diğer ucun ankastre olduğu durumda ise eşdeğer boy, yapının boyunun iki katı olarak alınır.

Denklem 5.1 aşağıdaki formda da yazılabilmektedir.

$$P_e = \frac{\pi^2 x E x I}{L_e^2} = \frac{\pi^2 x E x (Axk^2)}{L_e^2} = \frac{\pi^2 x E x A}{(L/k)^2} \quad (5.2)$$

k: Kesit alanın jirasyon yarıçapı

L/k: Narinlik oranı

Geometrik L/k oranına narinlik oranı denmektedir. Temel olarak yapının uzunluğunu belirtmektedir. Eğer yapının malzemesinin narinlik oranında bir limit belirtilmiş ise ve yapının narinlik oranı bu limitin altında kalıyor ise Euler denklemi malzemenin ezilme kuvvetinden daha büyük bir burkulma kuvveti hesaplayacaktır. Bu durum imkansız olduğu için Euler'in burkulma teorisi sadece uzun yapısal elemanlar için uygundur.

5.2 Rankine Gordon Denklemi

Euler'in burkulma teorisi orta ve kısa yapısal eleman için doğru sonuç veremediği için Rankine, kritik burkulma yükü ve ezilme yükü denklemlerini birleştirmiştir.

$$\frac{1}{P_R} = \frac{1}{P_C} + \frac{1}{P_e} \quad (5.3)$$

P_R : Rankine kuvveti

P_C : Ezilme Kuvveti ($\sigma_C \times A$)

P_e : Burkulma Kuvveti

Denklem 5.3 düzenlendiğinde Rankine kuvveti denklem 5.4'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$P_R = \frac{\sigma_C A}{1 + a(L_e/k_{\min})^2} \quad (5.4)$$

Burada:

$$a = \sigma_C / \pi^2 E$$

$L_e/k_{\min}$: Narinlik oranı

Denklem 5.4'teki a sabiti deneysel olarak elde edilmektedir. Tablo 5.1'de farklı malzemeler için ezilme gerilmeleri ve Rankine sabitleri verilmiştir.

Tablo 5.1 Farklı malzemeler için ezilme gerilmesi ve Rankine sabiti (Yeni, 2018b)

Malzeme	Dökme Demir	Dövme Demir	Düşük Karbonlu Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Tahta
σ_c [MPa]	560	250	320	500	35
a	1/1.600	1/9.000	1/7.500	1/5.000	1/3.000

5.3 Enerji Yaklaşımı

Yapısal elemanın denge durumundan çıktığı kritik yükün hesaplandığı diferansiyel denklemlerin çözümünün çok zor olduğu durumlarda enerji yaklaşımları kullanılabilmektedir. Temel olarak enerji yaklaşımlarında sistemde saklanan enerji harici yükün yaptığı işe eşittir.

$$K_p = U + V_e \quad (5.5)$$

Burada:

K_p : Sistemin toplam potansiyelini gösteren bir sabit

U : Gerinme enerjisi (iç kuvvetlerin yaptığı iş)

V_e : Harici yüklerin potansiyel enerjisi (Harici yüklerin yaptığı iş)

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5.6)$$

$$V_e = -\frac{P}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 dx \quad (5.7)$$

Dolayısıyla;

$$K_p = U + V_e = - \int_0^L \left[\frac{EI}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 - \frac{P}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right] dx \quad (5.8)$$

Burada y , x 'e bağlı bir şekil fonksiyonudur. K_p 'nin sıfır olduğu durum burkulmanın yaşandığı kritik durumdur. Böylece:

$$\frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{P_{CR}}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 dx \quad (5.9)$$

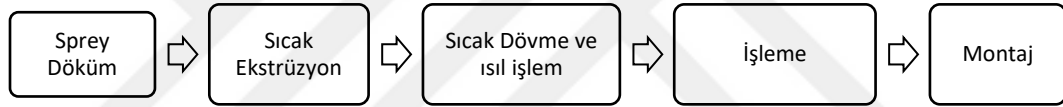
Kritik P yükü denklem 5.9'un çözülmesiyle elde edilebilir.



BÖLÜM ALTI

%10 SİLİSYUM PARTİKÜL KATKILI ALÜMİNYUM ESASLI METAL KOMPOZİT MALZEMELİ SALINCAK KOLU

Bu bölümde %10 Si partikül katkılı alüminyum esaslı metal kompozit malzemeli salıncak kolunun üretim aşamaları incelenmiştir. Üretim aşamaları arasında malzeme analizleri, sertlik ölçümleri ve çekme testleri yapılmıştır. Üretimi biten salıncak kollarına yorulma testi ve burkulma testi yapılmıştır. Burkulma testi sonuçları standart alüminyum alaşımlı salıncak kolunun test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yorulma testinin ardından Wöhler eğrisi elde edilmiştir. Bu Wöhler eğrisi üzerine standart alaşımlı salıncak kolunun yorulma testi sonuçları da işlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmış. %10 Si partikül katkılı alüminyum esaslı metal kompozit malzemeli salıncak kolunun üretim aşamaları şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1 %10 Si partikül katkılı alüminyum esaslı metal kompozit malzemeli salıncak kolunun üretim aşamaları

6.1 Sprey Döküm (Sprey Biriktirme) ile ham kütüklerin elde edilmesi

Bölüm 3.2.7'de sprej döküm veya diğer adıyla sprej biriktirme yöntemi ile MMK üretimi anlatılmıştı. Daha sonra salıncak kolu ham gövdesi olacak ham kütüklerin üretimi alman WKW firmasında yapılmıştır. Standart 6110 alüminyum alaşımının içerisine tane boyutu yaklaşık 5 μm olan Si partikülleri %10 oranında sprej döküm yöntemi ile takviye edilmiştir. Sprej döküm sırasında sprej olarak püskürtülen malzemenin sadece %40'ı kütüğü oluşturmaktadır (Gustke, 2018). Fazladan püskürtülen malzeme eritilerek tekrar kullanılmaktadır. Sprej döküm sırasında kullanılan parametreler tedarikçi firmanın ticari sırrı olduğu için bilinmemektedir. Yaklaşık 300 mm çapında olan kütük sprej döküm sonrası şekil 6.2'de görülebilmektedir.



Şekil 6.2 Sprey döküm sonrası elde edilen ham kütük (Gustke, 2018)

6.2 Sıcak Ekstrüzyon

Sprey döküm sonrası elde edilen ham kütüklere hem mekanik özelliklerini iyileştirmek hem de sıcak dövme işlemi için uygun çapa getirmek için şekil 6.3'te görülebildiği gibi sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Yine WKW firması tarafından yapılan sıcak ekstrüzyon işlemi 300°C'de gerçekleştirilmiştir. Gustke (2018) tarafından yapılan çalışmada ekstrüzyon 400°C sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işlemi öncesinde yaklaşık 300mm çapa sahip olan ham kütüklerin çapı işlem sonrasında 40 mm'ye düşürülmüştür. Bu çap değişimi 1:56 gibi bir ekstrüzyon oranı anlamına gelmektedir.



Şekil 6.3 Sıcak Ekstrüzyon işlemi sonrası ham kütükler (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

6.2.1 Ekstrüzyon Sonrası Ham Kütüklerin Malzeme Analizi

Sıcak ekstrüzyon sonrası ham kütüklerin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Spektral analiz sonuçları tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Ekstrüzyon sonrası malzemenin kimyasal kompozisyonu

Numune	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Mg [%]	Fe [%]	Al [%]
0255-1	10,1	1,3	0,5	1,4	0,1	86,6

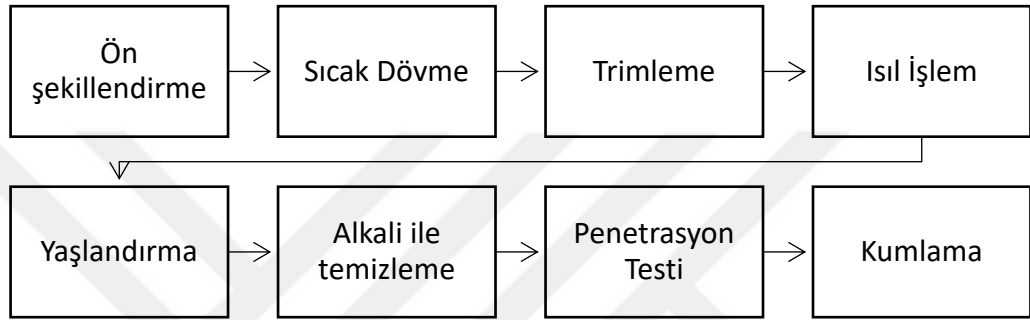
Çekme testi sonuçları ve sertlik ölçümleri ise tablo 6.2’de görülmektedir.

Tablo 6.2 Ekstrüzyon sonrası malzemenin mekanik özellikleri

Numune	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Kopma Uzunluğu [%]	Elastisite Modülü [GPa]	Sertlik [HV30]
0255-1	167	108	14,3	71	58
0255-2	165	106	14,4	72	58

6.3 Sıcak Dövme ve Isıl İşlem

Ekstrüzyon sonrası ham kütükler 40 mm çapa sahipti. Salıncak kolu geometrisi ise sıcak dövme işlemi ile sağlanmıştır. Sıcak dövme işlemi MES Alüminyum firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Firmanın kullandığı parametreler ticari sır kapsamında olduğu için bilinmemektedir fakat temel olarak sıcak dövme işlemi şekil 6.4'te görülen akış şemasında ilerlemektedir.



Şekil 6.4 Sıcak dövme işleminin akış şeması

Sıcak dövme işlemi tek adımda yapılabildiği gibi tasarıma bağlı olarak birkaç adımda da gerçekleştirilebilmektedir. Geometriye ve istenilen malzeme özelliklerine göre sıcak dövme kalıpları ve adım sayısı tasarlanmaktadır. Şekil 6.5'te çelik bir rot başı gövdesinin sıcak dövme sırasında nasıl şekillendirildiği görülmektedir. Benzer şekilde salıncak kolu ham gövdesinin şekli şekil 6.6'da görüldüğü gibi birkaç adımda son halini almaktadır.

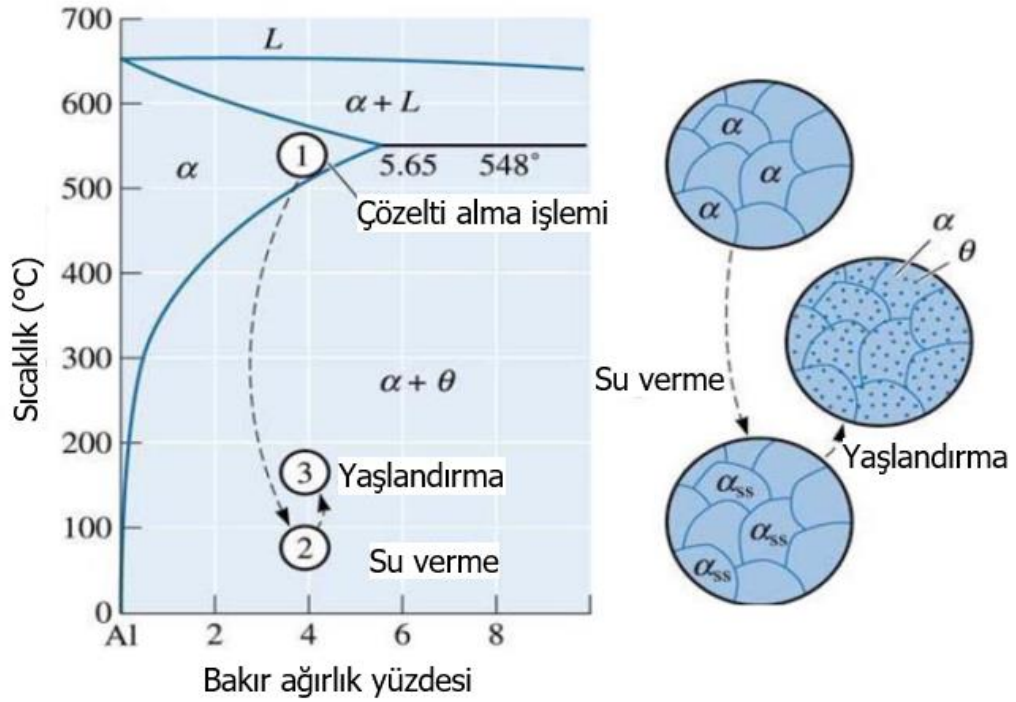


Şekil 6.5 Rot başı gövdesinin dövme aşamaları (HeiBing ve Ersoy, 2011)



Şekil 6.6 Sıcak dövme sonrası elde edilen ham salıncak kolu gövdesi (Kişisel arşiv, 2020)

Sıcak dövme sonrası üst ve alt kalıbın ayırım noktasındaki fazlalık malzeme kesilmektedir. Bu trimleme işlemi sonrasında ham salıncak kolu gövdesi ısıtım işlemi için hazırdır. Isıtım işlemi olarak adlandırılan çökelme sertleştirme işlemi, çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma olmak üzere 3 adımdan oluşmaktadır.



Şekil 6.7 Al-Cu faz diyagramı (Akdoğan, 2008b)

Çözeltiye alma ısıtım işleminde malzemede tek fazlı homojen bir yapı oluşturulmak üzere yüksek sıcaklıklara ısıtılmıştır. Şekil 6.7’de görülen Al-Cu faz diyagramında 1 numara olarak gösterilen işlemdeki gibi malzeme solvus eğrisi üzerine ısıtılmıştır. Tam sıcaklık değeri tedarikçi firma paylaşmadığı için bilinmemektedir. Malzeme, bu

sıcaklıkta belirli bir süre beklemektedir. Bu sürenin en az 1 saat olduğu tahmin edilmektedir. Bu işlemin ardından alaşım elementlerinin aşırı doymuş katı eriyik yapıya geçmeleri için şekil 6.7’de 2 numara olarak gösterilmiş su verme işlemi yapılmaktadır. Su verme işleminin çok hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ani su verme çökeltme sertleştirme özelliğini iyileştirirken, çarpılma ve kalıntı gerilimleri gibi problemlerin oluşmasına neden olabilmektedir. Tedarikçi su verme işlemini ilk 5 dakika içerisinde gerçekleştirmiştir. Su verme işlemi sonrasında çözünen elementler oda sıcaklığında yavaş yavaş çökmeye başlamaktadır. Buna doğal yaşlandırma denmektedir. Öte yandan yaşlandırma işlemi (şekil 6.7’de 3 numaralı işlem) fırınlarda 100-200°C gibi sıcaklıklarda belirli sürelerde tutularak da yapılabilir. Bu işleme ise yapay yaşlandırma denmektedir. Uygulanan yaşlandırma yöntemi alaşım isminin yanına “TX” olarak eklenir. Buradaki “X” yaşlandırma işleminin cinsine göre değişen 1-10 arasında bir rakamdır. Bu çalışmada kullanılan malzemenin yaşlandırma yöntemi T6’dır. T6, Çözeltili alma işlemi yapılmış ve yapay yaşlandırma yapılmış anlamına gelmektedir. Sıcak dövme tedarikçisini uyguladığı yapay yaşlandırma parametreleri ticari kayıtlar sebebiyle bilinmemektedir.

6.3.1 Isıl İşlem Sonrası Ham Salıncak Kolu Gövdelerinin Malzeme Analizi

Isıl işlem parametrelerinin malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple ısıtıl işlem sonrası hazırlanan dört çekme numunesine çekme testi uygulanmıştır.

Tablo 6.3 Isıl işlem sonrası malzemenin mekanik özellikleri

Numune	Çekme dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Elastisite Modülü [GPa]
SOL-1	364	392	1,5	54
SOL-2	348	368	1,3	75
SAĞ-1	367	368	0,2	66
SAĞ-2	365	375	1,8	63

Tablo 6.3'te görüldüğü üzere malzemenin yüzde uzama değerleri oldukça düşüktür yani malzeme gevrek değildir. Standart alüminyum alaşımıyla seri şartlarda üretilen salıncak kolu ham gövdesi için bu ısıtma işlem parametreleri uygun olsa da %10 Si partikül takviyeli MMK için uygun gözükmemektedir. Bu sebeple optimum ısıtma işlem parametrelerini belirlemek için ek bir çalışma yapılmıştır.

6.3.2 Optimum Isıtma İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi

Optimum ısıtma işlem parametrelerini belirlemek amacıyla ekstrüzyon sonrasında elde edilen kütüklerden çekme testi numuneleri işlenmiştir. DIN 50125- B10 X 50 standardına göre hazırlanan numunelere tablo 6.4'te belirtilen parametrelerde ısıtma işlem uygulanmıştır.

Tablo 6.4 Numunelere uygulanan ısıtma işlemlerin parametreleri

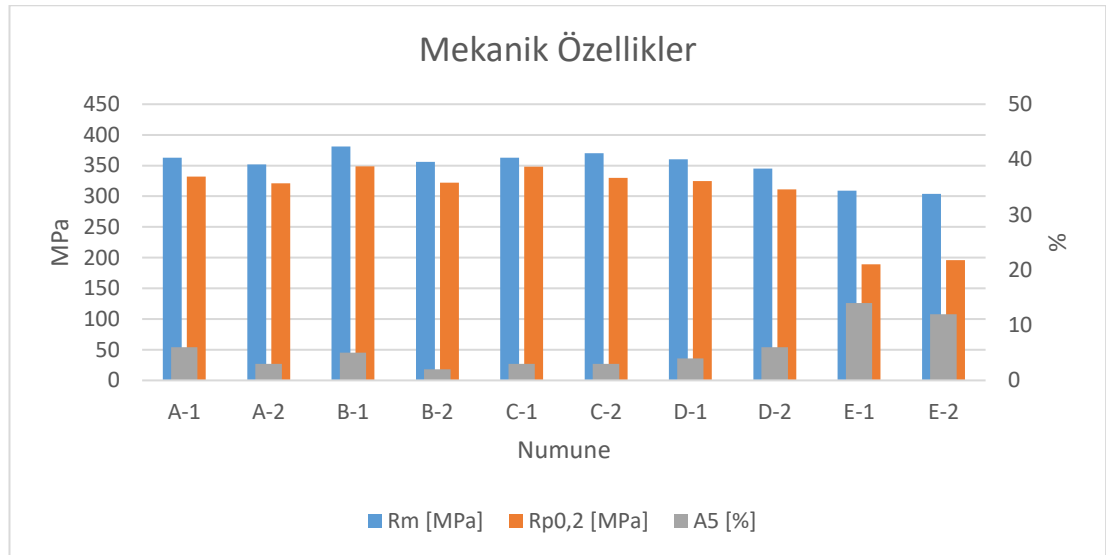
Numune	Isıtma işlem Parametresi
A	1) 525°C'de 1 saat çözeltiye alma 2) Su verme 3) 180°C'de 1 saat yapay yaşlandırma
B	1) 525°C'de 1 saat çözeltiye alma 2) Su verme 3) 180°C'de 2 saat yapay yaşlandırma
C	1) 525°C'de 1 saat çözeltiye alma 2) Su verme 3) 180°C'de 3 saat yapay yaşlandırma
D	1) 525°C'de 1 saat çözeltiye alma 2) Su verme 3) Oda sıcaklığında 4 gün doğal + 180°C'de 1 saat yapay yaşlandırma
E	1) 525°C'de 1 saat çözeltiye alma 2) Su verme 3) Oda sıcaklığında 7 gün doğal yaşlandırma

Gustke (2018) tarafından yapılan çalışmada farklı çözeltiye alma sıcaklıklarının mekanik özelliklere olan etkisi incelenmişti ve en uygun çözeltiye alma sıcaklığı 525°C olarak belirlenmişti. Bu sebeple bu çalışmada da çözeltiye alma sıcaklığı 525°C olarak uygulanmıştır. Yine aynı çalışmada farklı yaşlandırma sıcaklıkları denenmiş ve

optimum yapay yaşlandırma sıcaklığı 180°C olarak belirlenmişti. Gustke (2018) akma ve kopma dayanımlarından çok fazla ödün vermeden en yüksek yüzde uzama değerini yarı-doğal ve yarı-yapay yaşlandırma yöntemi ile elde ettiği için iki adet numuneye (D-1 ve D-2) bu şekilde ısıtıl işlem uygulanmıştır.

Tablo 6.5 Numunelere ait çekme testi sonuçları

Numune	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması [%]
A-1	363	332	6
A-2	352	321	3
B-1	381	349	5
B-2	356	322	2
C-1	363	348	3
C-2	370	330	3
D-1	360	325	4
D-2	345	311	6
E-1	309	189	14
E-2	304	196	12



Şekil 6.8 Isıl işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi

Tablo 6.5 ve şekil 6.8 incelendiğinde, çekme dayanımı A, B ve C numuneleri için neredeyse aynı seviyededir. Buna sebep olarak numune sayısının her grup için sadece 2 adet olması gösterilebilir. Eğer numune sayısı daha fazla olsaydı sonuçları arasında daha etkili bir karşılaştırma yapılabilirdi. A, B ve C grubu numunelerin akma dayanımları karşılaştırıldığında, yapay yaşlandırma süresinin artması çok az da olsa akma dayanımını artmasına sebep olmuştur. Öte yandan bu sürenin artması, kopma uzamalarının düşmesine sebep olmuştur. D grubu numunelerinin akma ve kopma dayanımları A, B ve C grubu numunelere göre hafifçe daha düşüktür fakat kopma uzama değerinde bir iyileşme gözükmemektedir. Sadece E grubu numunelerinin yüzde uzamalarının %10'dan yüksek olduğu görülmektedir. Fakat akma ve kopma dayanımları diğer numunelere göre oldukça düşüktür. Akma, kopma dayanımı ve yüzde uzama açısından optimum sonuç D grubu numunelerinden elde edilmiştir. Yine de yüzde uzama değeri standart alaşımın sağlamış olduğu %10 değerinin altında kalmıştır. Ham salıncak kollarının tekrarlanan ısıtma işlemlerinde D grubu numunelerde uygulanan parametreler kullanılmıştır.

6.3.3 Tekrarlanan Isıl İşlem Sonrası Ham Salıncak Kolu Gövdelerinin Malzeme Analizi

MES Alüminyum firmasında D grubu numunelere uygulanan parametreler ile tekrarlanan ısıtma işlemler sonrasında ham salıncak kolu gövdelerinden tekrar çekme numuneleri elde edilmiş ve bu numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çıkan sonuçlar tablo 6.6'da gösterilmiştir.

Tablo 6.6 Uygulanan ısıtma işlem sonrası salıncak kolu gövdesine ait mekanik özellikler

Numune	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Kopma uzaması [%]	Elastisite Modülü [GPa]
1	319	229	10,33	75,7
2	303	197	9,33	62,8
3	310	210	7,46	74

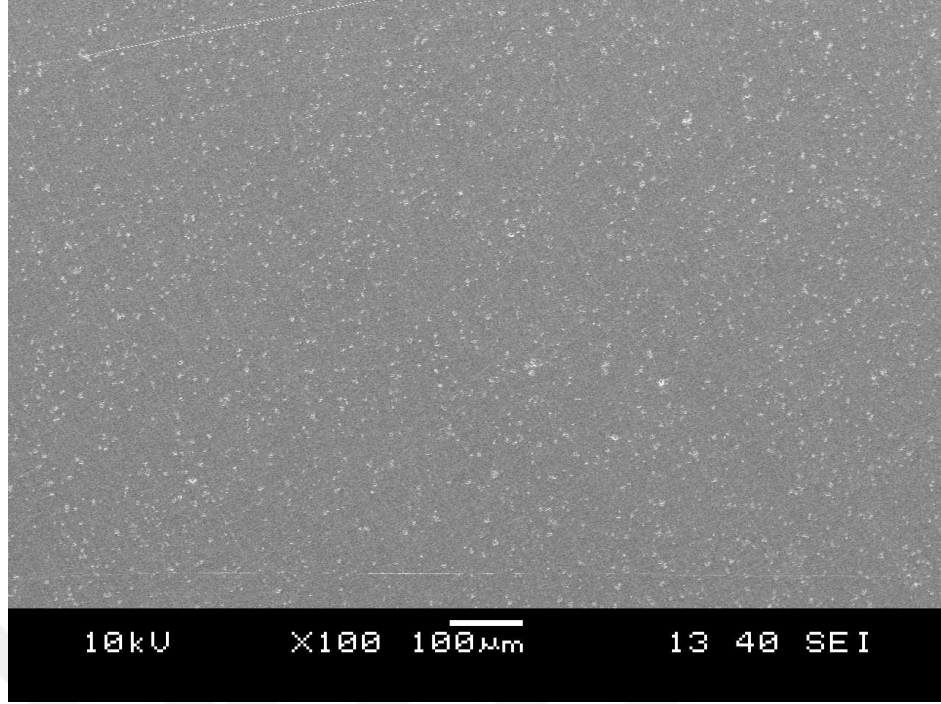
Görüldüğü üzere mekanik özellikler D grubu numunelere göre düşüktür. Bunun bir sebebi laboratuvar ortamında yapılan ısıtma işlemi ile sıcak dövme tedarikçisinde yapılan ısıtma işlemi arasındaki proses farkları olabilir. Diğer bir sebep ise salıncak kolu gövdelerinin mekanik özelliklerinin doğal yaşlanma sebebiyle zamanla değişmesi olabilir. 1. ve 3. Numunelerin elastisite modüllerinin standart alüminyum alaşımlarının elastisite modülünden %7 daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, 2. Numunenin elastisite modülü beklenen değerden düşük gelmiştir. Bunun nedeni, elastisite modülünün çekme testi ile yeterince doğru belirlenememesi olabilir.

%10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kolu gövdeleri ile standart 6110 alüminyum alaşımı ile üretilmiş salıncak kolu gövdelerinin sertlikleri karşılaştırıldığında tablo 6.7’de görülmektedir. %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli numunelerin sertlikleri standart 6110 alaşım malzemeli numunelerden yaklaşık %15 daha azdır. Buna sebep olarak numune gruplarının farklı ısıtma işlem parametreleri veya farklı ekstrüzyon, sıcak dövme prosesleri gösterilebilir.

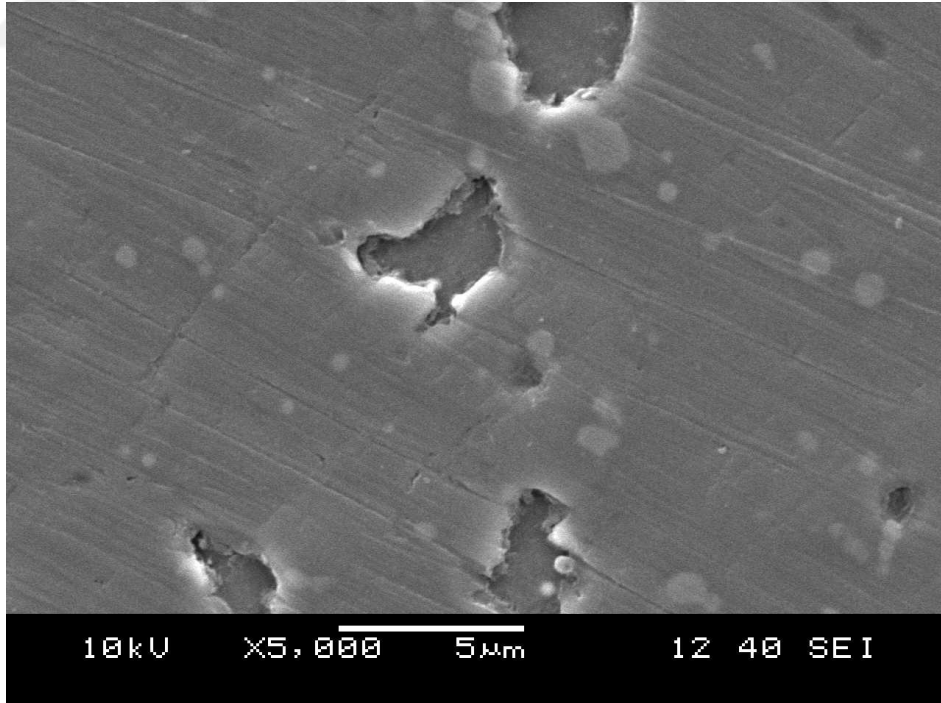
Tablo 6.7 Malzemelere ait sertliklerin karşılaştırılması

Numune	Sertlik [HBW]	
	Standard 6110 alaşımı	10% Si _p MMK
LH -1	127,9	112,1
LH -2	129,8	112,4
RH -1	127,2	118
RH -2	126,6	108,7

%10 Si partikül katkılı MMK malzemeli gövdelerin mikro yapıları şekil 6.9 ve 6.10’da görülmektedir. Görüldüğü üzere Si partikülleri ana faz olarak homojen olarak dağılmıştır. Partiküller ince ve yuvarlak kontura sahiptir. Si partikülleri ve matris arasındaki ara yüzey bağı tatmin edicidir. Bazı bölgelerde Si partiküllerinin parçalanması gözlemlenmiştir. Ek olarak Si partiküllerinin hemen yanında daha koyu ikincil bir faz mevcuttur. Bunun sebebi Gustke (2018) tarafından da açıklandığı gibi ekstrüzyon ya da sıcak dövme sırasında meydana gelen bir erime veya intermetalik bir fazın varlığı olabilir. Aynı koyu faz bu çalışmada da mevcut olduğu bilinmektedir.



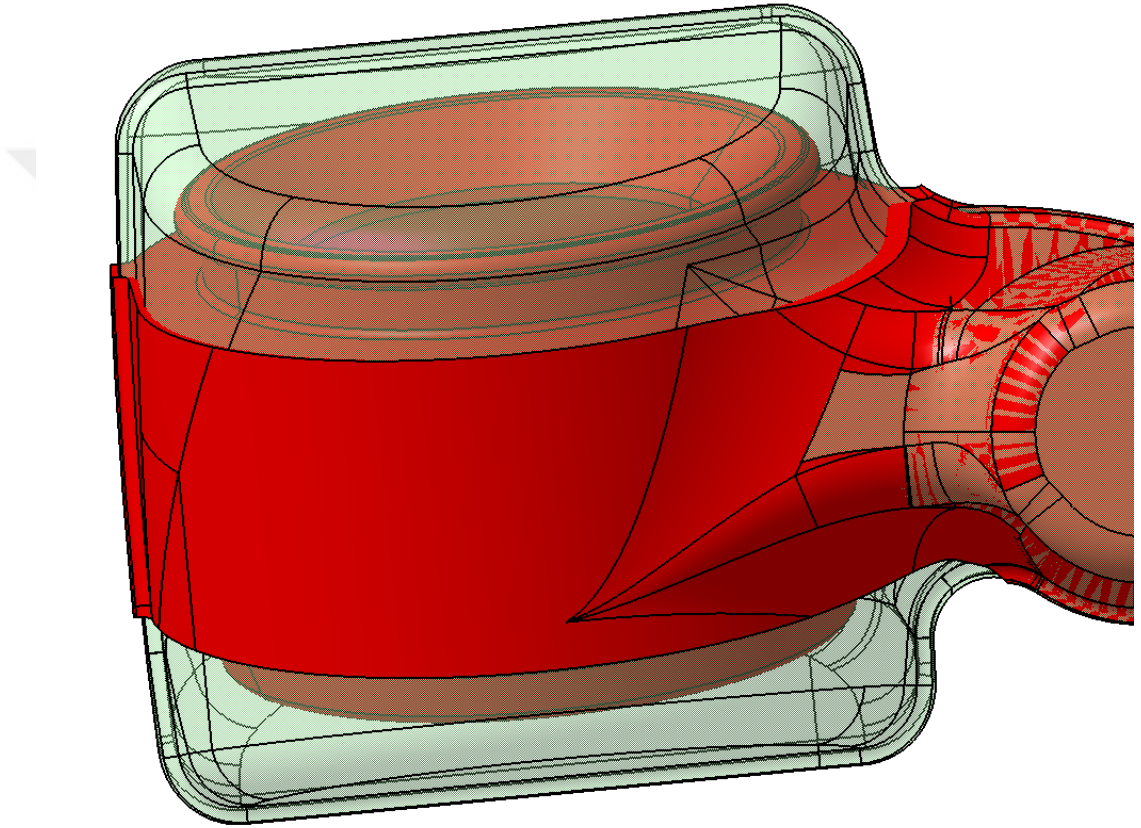
Şekil 6.9 Sıcak dövme sonrası salıncak kolu gövdelerine ait numunenin SEM mikro yapısı (X100) (ZF Friedrichshafen AG, 2020)



Şekil 6.10 Sıcak dövme sonrası salıncak kolu gövdelerine ait numunenin SEM mikro yapısı (X5000) (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

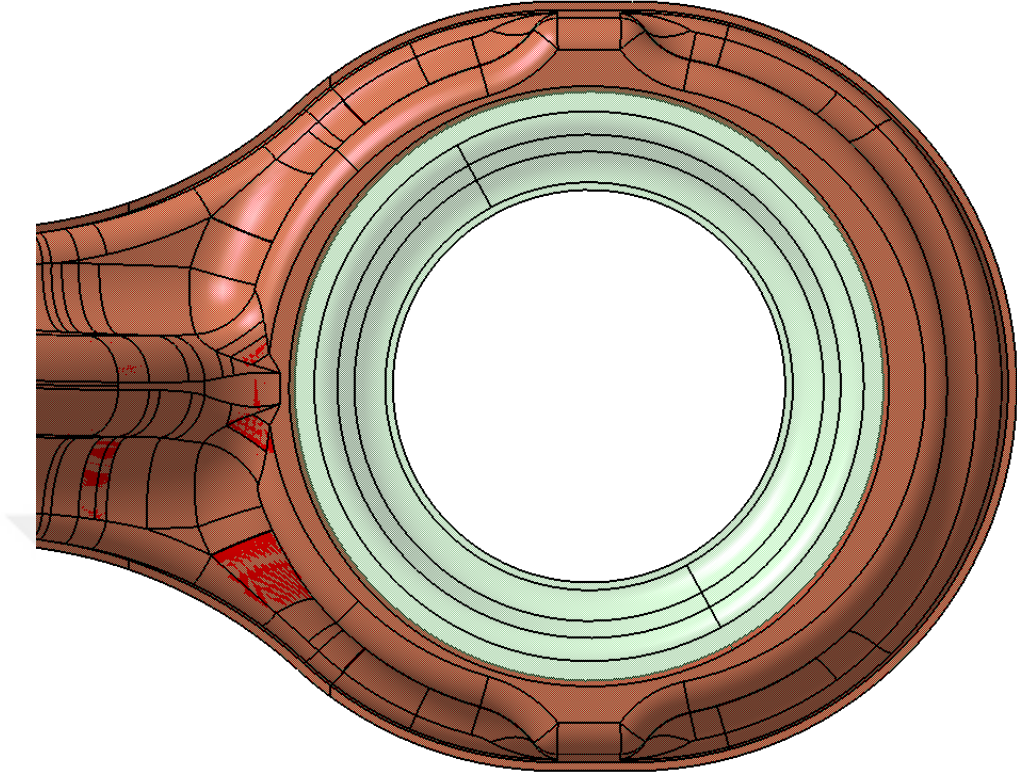
6.4 Ham Salıncak Kollarının İşlenmesi ve Montajı

Ham salıncak kolu gövdelerinin diğer komponentler ile montajlanabilmesi için öncelikle işlenmeleri gerekmektedir. Bu işlemler ZF Lemförder Aks Mod. San. ve Tic. A.Ş. tarafından yapılmıştır. Ham gövde, küresel yatak komponentlerinin montajlanması için şekil 6.11'deki gibi işlenmiştir.



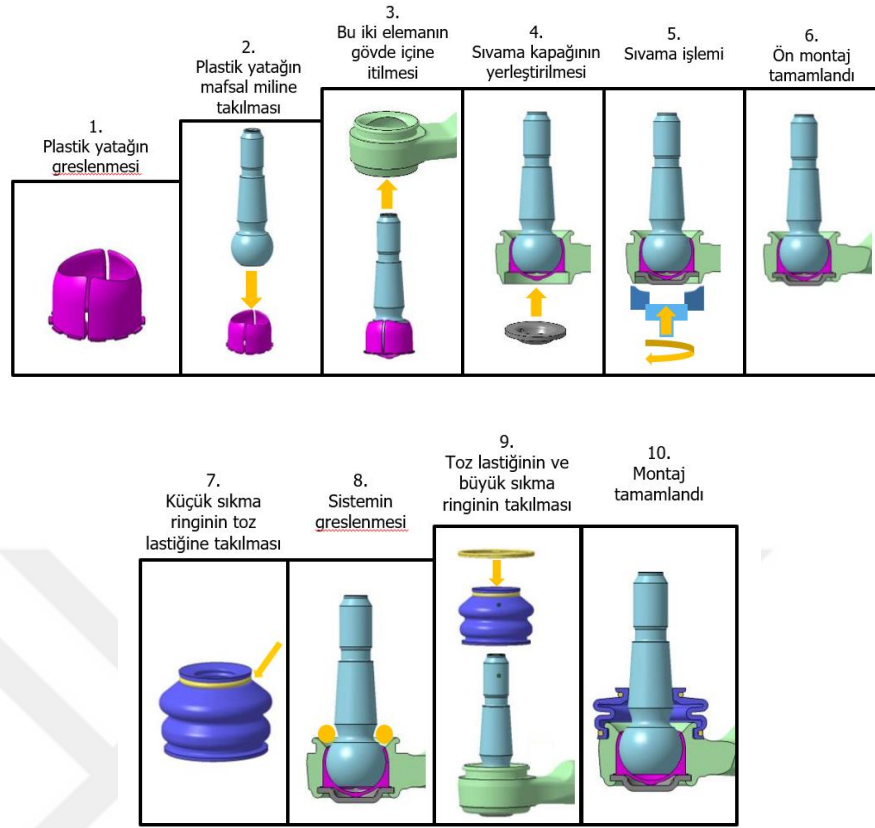
Şekil 6.11 Salıncak kolu gövdesinin küresel yatak tarafının işlenmesi (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

Burç montajının yapılabilmesi için silindirik bölüm, sıkı geçme toleranslarında şekil 6.12'deki gibi işlenmiştir.



Şekil 6.12 Salıncak kolu gövdesinin burç tarafının işlenmesi (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

İşlenen salıncak kolu gövdelerine diğer komponentlerin montajı şekil 6.13'te gösterildiği gibi yapılmıştır.



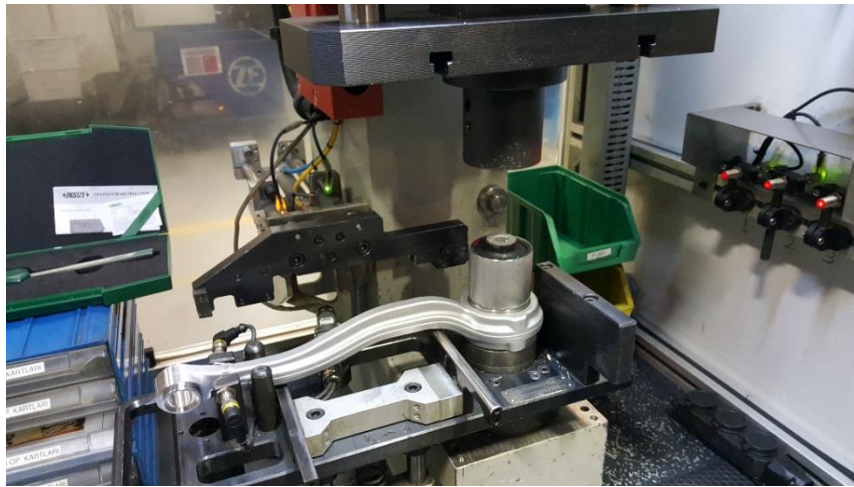
Şekil 6.13 Salıncak kolundaki küresel yatağın montaj şeması (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

Montajın 5. adımı olan sıvama operasyonu sırasında gövdeler üzerinde sıvama bölgesinde şekil 6.14’te görüldüğü gibi çatlaklar oluşmuştur. Standart 6110 alaşımı ile üretilmiş salıncak kollarının sıvama operasyonu sırasında herhangi bir çatlak gözlemlenmemiştir. Bunun sebebinin doğrudan malzemenin mekanik özellikleri ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Sıvama operasyonunun kalitesinin salıncak kolu ömrüne doğrudan etkisi vardır. Bu sebeple çatlak oluşumunu engellemek için sıvama operasyonu parametreleri değiştirilmiştir. Parametre değişikliği sonrası sıvama operasyonu sonrasında sıvama bölgesinde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu parametreler ticari sır olduğu için paylaşılamamaktadır.



Şekil 6.14 Sıvama operasyonu sonrası sıvama bölgesinde çatlakları olan ve olmayan salıncak kolları (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

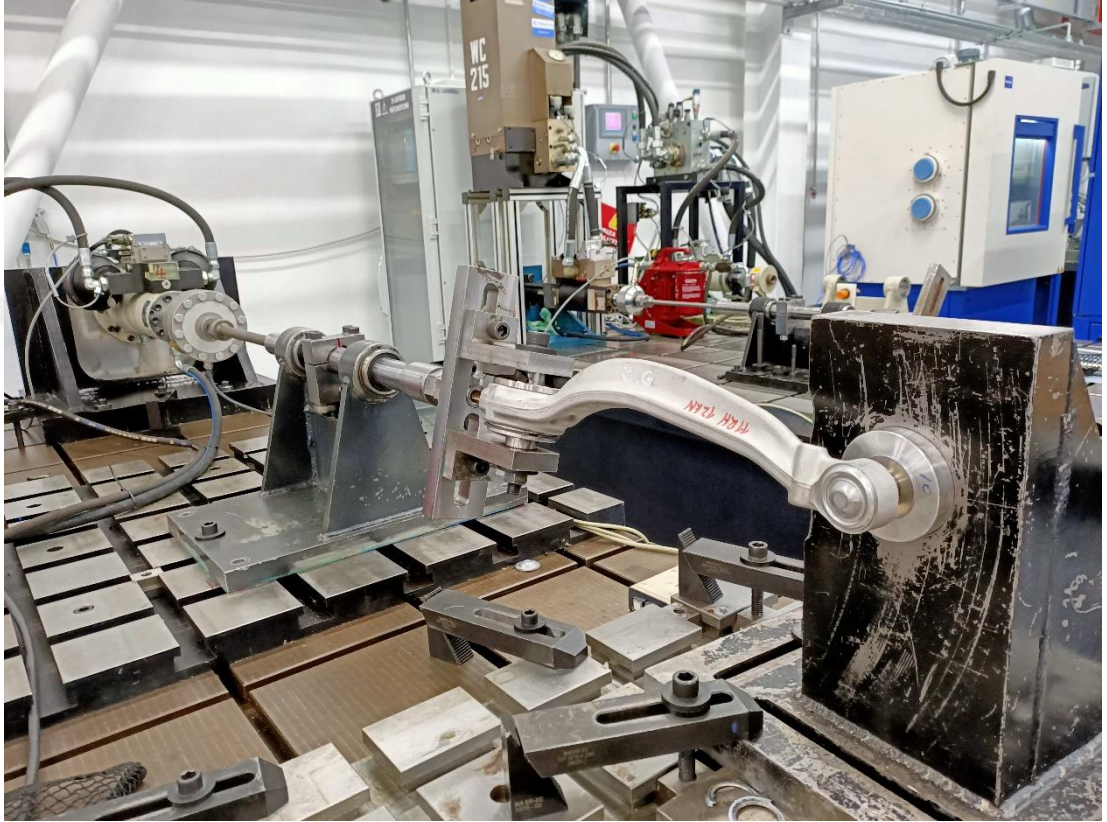
Burç montajı da şekil 6.15’teki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.15 Burç Montajı (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

6.5 Yorulma Testi

Standart alüminyum alaşımlı salıncak kolları ve Si partikül katkılı salıncak kolları araçta bağlandıkları gibi yorulma cihazlarına şekil 6.16'daki gibi bağlanmıştır.



Şekil 6.16 Yorulma test düzeneği (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

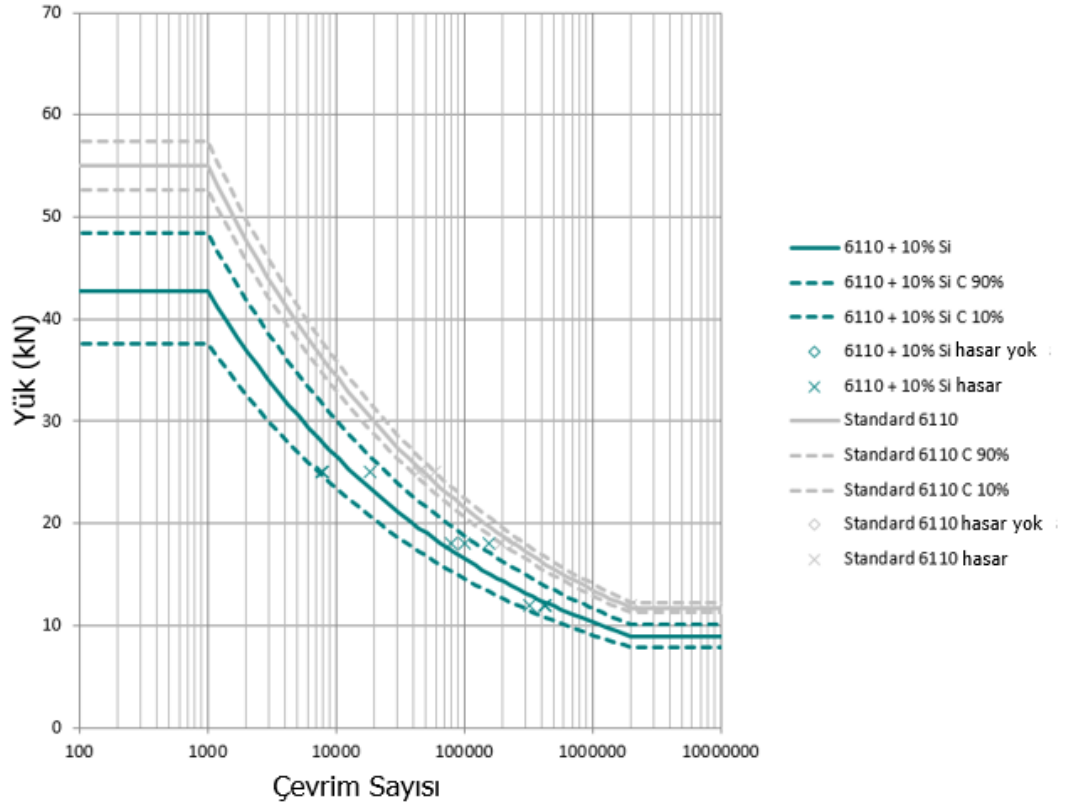
Küresel yatağın olduğu tarafın aparat ile bağlantısında gerçek koşullarda araçtaki karşılık parçasının temel ölçüleri ve malzeme bilgileri ile hazırlanmıştır. Burç tarafında ise burç ile aynı serbestlik derecesine sahip içerisinde bir rulman barındıran aparat kullanılmıştır. Yorulma cihazında yük, belirli basınçlar altında çalışan valfler, aktivatör ve hidrolik silindirler yardımıyla test parçasına aktarılmaktadır. Kullanılan test yazılımında istenilen yük genliği girilip sinyal tipi olarak sinüs eğrisi seçilmiştir. Yük genliklerine daha önce benzer tasarımlara ait yük verileri değerlendirilerek karar verilmiştir. Düşük, orta ve yüksek çevrimli yorulma bölgelerinden yeterli veriye ulaşmak amacıyla 3 adet farklı yük genliği her defasında yeni parçaya nihai hasara uğrayana dek ayrı ayrı uygulanmıştır. Her yük genliği için en az iki adet salıncak kolu

test edilerek hem standart alüminyum alaşımı hem de Si partikül katkılı salıncak kollarına ait Wöhler eğrileri elde edilmiştir. Ardından üst üste eklenen Wöhler eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.8 Yorulma testi sonuçları

Standart EN AW-6110A T6 Alaşımı			%10 Si Partikül Takviyeli MMK Malzemeli		
Salıncak Kolları			Salıncak Kolları		
Yük [kN]	Çevrim Sayısı	Hasar Bölgesi	Yük [kN]	Çevrim Sayısı	Hasar Bölgesi
±12	1.971.818	Mafsal Mili	±12	428.623	Sıvama Bölgesi
±12	2.000.000	Hasar yok	±12	322.388	
			±12	421.083	
±18	250.325	Mafsal Mili	±18	100.576	
±18	193.204	Mafsal Mili	±18	79.104	
			±18	155.661	
±25	44.800	Mafsal Mili	±25	7.879	
±25	58.737	Mafsal Mili	±25	18.494	
			±25	7.666	

Tablo 6.8’de standart alüminyum alaşım malzemeli salıncak kolları ile Si partikül takviyeli MMK malzemeli salıncak kollarının yorulma testi sonuçları görülmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere Si partikül katkılı salıncak kollarının yorulma dayanımı standart alüminyum alaşım salıncak kollarından düşüktür. Bu fark şekil 6.17’de verilen Wöhler eğrileri üzerinde daha kolay bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 6.17 Numunelere ait Wöhler eğrileri (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

Standart alaşımlı ve partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kolları arasındaki yorulma dayanımı farkına ek olarak numunelerin nihai hasar bölgeleri de farklıdır. Standart alaşımlı salıncak kollarının neredeyse tümü şekil 6.19’da görüldüğü gibi mafsal milinden hasara uğrarken, partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kollarının tümü şekil 6.19’da görüldüğü gibi sıvama bölgesinden hasara uğramıştır. Bölüm 6.4’te standart parametreler ile sıvama operasyonu sırasında çatlak oluşumu gözlemlendiği ve sıvama operasyonu parametrelerinde değişikliğe gidildiğinden bahsedilmişti. Farklı parametrelerle gerçekleştirilen sıvama operasyonunun uygunluğu görsel olarak kontrol edilmişti. Fakat bu operasyon sırasında sıvama bölgesinde gözle görülemeyen mikro çatlakların varlığı ve bu mikro çatlakların yorulma testi sırasında ilerlemesi, standart 6110 alaşımlı salıncak kollarına kıyasla daha düşük yorulma ömrünü açıklayabilir.



Şekil 6.18 %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak koluna ait sıvama bölgesindeki yorulma hasarı (ZF Friedrichshafen AG, 2020)



Şekil 6.19 Standart 6110 alaşımlı salıncak koluna ait mafsallı bölgedeki yorulma hasarı (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

6.6 Burkulma Testi

Salıncak kolları şekil 6.20'deki gibi test cihazına bağlanmıştır. Salıncak kolunda 2 adet kinematik nokta bulunmaktadır. Üst taraftaki küresel mafsallın merkezi ile alt taraftaki burcun takıldığı silindirik bölgenin merkezinden geçen eksen, test cihazının uyguladığı yük eksenini ile aynı olacak şekilde hizalama yapılmıştır. Salıncak kolu burçlarının katılıkları, kritik burkulma yükleri ile kıyaslandığında düşüktür. Bu yüzden test esnasında burç yerine serbestlik derecesi aynı olan fakat katılığı daha yüksek olan rulmanlı bir aparat kullanılmıştır. Böylece burkulma testi sırasında burcun düşük katılığı değerlendirilmemiş olunur.



Şekil 6.20 Örnek burkulma testi düzeneği (ZF Friedrichshafen AG, 2020)

Test sırasında salıncak koluna, mafsall tarafından bir yer değiştirme girdisi verilmiştir. Böylece sistemin çıktısı burkulma yükü olacaktır. Bu yer değiştirme girdisi salıncak kolunu hasara uğratacak şekilde seçilmektedir. Cihazın içindeki yük hücresi, tepki kuvvetini kaydetmektedir. Yer değiştirme-tepki kuvveti grafiğindeki tepe noktası burkulma yükü olarak raporlanır.

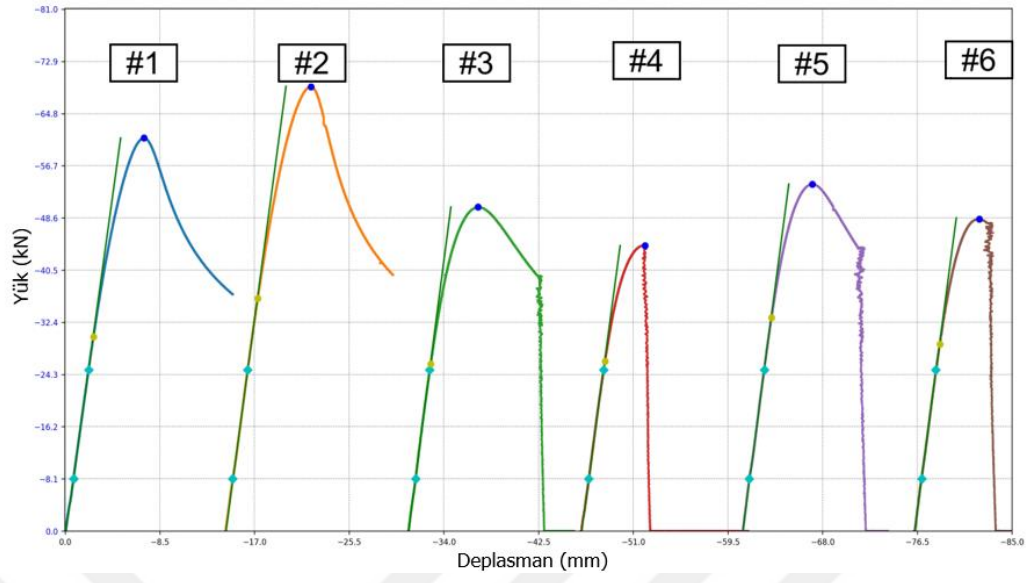
Tablo 6.9 Burkulma testi sonuçları

Standart EN AW-6110A T6 Alaşımli Salıncak Kolları		%10 Si Partikül Takviyeli MMK Malzemeli Salıncak Kolları	
Numune No.	Burkulma Yüğü [kN]	Numune No.	Burkulma Yüğü [kN]
1	61	3	50,3
		4	44,3
2	69	5	53,9
		6	48,4

Tablo 6.9’da görüldüğü gibi %10 Si partikül katkıli MMK malzemeli salıncak kollarının burkulma sonuçları standart 6110 alaşımlı salıncak kollarından daha düşüktür. MMK malzemeli salıncak kolları şekil 6.21’de görüldüğü gibi burkulma sırasında nihai hasara uğrarken, standart alaşımlı salıncak kollarında sadece yüksek plastik deformasyon görülmüştür fakat nihai hasar gerçekleşmemiştir. Burkulma davranışlarındaki bu fark şekil 6.22’de verilen burkulma yükü- yer değiştirme grafiklerinde de görülmektedir. Burkulma davranışları arasındaki fark Gustke (2018) tarafından da vurgulanmıştır.



Şekil 6.21 Burkulma sonrası MMK malzemeli salıncak kolunda meydana gelen nihai hasar (ZF Friedrichshafen AG, 2020)



Şekil 6.22 Numunelere ait burkulma yükü -yer değiştirme grafikleri

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

Bu çalışmada %10 Si partikül katkılı MMK malzeme spreyl döküm yöntemi ile üretilmiş ve ardından malzemeye sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Ekstrüze edilmiş kütüklere sıcak dövme yöntemi ile salıncak kolu şekli verilmiştir. Numunelere farklı ısı işlem parametreleri uygulanarak ve çekme testi sonrası mekanik özellikler karşılaştırılarak optimum ısı işlem parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler ile ısı işleme maruz bırakılan salıncak kolu gövdeleri diğer komponentler ile montajlanabilmesi için işlenmiştir. Montaj işlemi sonrası yorulma ve burkulma testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında elde edilen tüm veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- Yapay yaşlandırma süresinin artırılması akma ve çekme dayanımlarında hafif bir artışa sebep olmuştur.
- Yapay yaşlandırma süresinin artırılması kopma uzamasında hafif bir düşüşe sebep olmuştur.
- Sırasıyla yarı doğal ve yarı yapay yaşlandırma uygulandığında kopma uzamasının arttığı gözlemlenmiştir.
- En yüksek kopma uzaması doğal yaşlandırma yöntemi uygulandığında elde edilmiştir. Fakat bu numunelerin akma ve çekme dayanımları diğer numunelerden oldukça düşüktür.
- Salıncak kolu gövdesinden çıkarılan çekme numunelerine ait mekanik özellikler kütüklerden elde edilen çekme numunelerinden daha düşüktür. Bu durum laboratuvar ortamında yapılan ısı işlem ile sıcak dövme tedarikçisinde yapılan ısı işlem arasındaki proses farkları veya salıncak kolu gövdelerinin mekanik özelliklerinin doğal yaşlanma sebebiyle zamanla değişmesi ile açıklanabilir. Optimum ısı işlem parametreleri kütüklerden elde edilen

numuneler yerine salıncak kolu gövdeleri ile belirlenmiş olsaydı, daha iyi mekanik özellikler elde edilebilirdi. Çalışma sonunda elde edilecek parametreler sıcak dövme tedarikçisinin ticari sırrı olacağı olacağından böyle bir çalışma yapılamamıştır.

- Çekme testi sonuçlarına göre, %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kolu gövdelerinin mekanik özellikleri standart 6110 alaşımlı salıncak kolu gövdelerinden daha düşüktür. Bunun sebebi ekstrüzyon öncesi ham malzemeler arasındaki dayanım farkları, ekstrüzyon parametreleri (oran, sıcaklık vb.) arasındaki farklar veya sıcak dövme sonrası ısıtılma işlem parametrelerindeki farklar olabilir. Ne yazık ki standart 6110 alaşımlı salıncak kolu gövdesine ait yukarıda bahsedilen tüm parametreler ticari sır kapsamında olduğundan bilinmemektedir. Bu sebeple birebir karşılaştırma yapılamamıştır.
- %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kolu gövdelerinin elastisite modüllerinin standart alüminyum alaşımlarından yaklaşık %7 daha yüksek olduğu görülmüştür. Yine de bu değer hedeflenen %10 değerinin altında kalmıştır. Gustke (2018) tarafından yürütülen çalışmada benzer malzeme ile %10 daha yüksek elastisite modülü elde edilmişti. Ayrıca bir numunenin elastisite modülünün diğerlerinden daha düşüktür. Gelecekte yürütülecek çalışmalar için elastisite modülünün belirlenmesinde daha hassas yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir.
- Mikro yapıda nispeten daha koyu olan ikincil bir faz gözlemlenmiştir. Bu faz Gustke (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da bulunmuş ve ekstrüzyon sıcaklığının düşürülmesi ile bu ikincil fazın ortadan kalkabileceği belirtilmişti. Ne yazık ki, ekstrüzyon sıcaklığının düşürülmesi daha koyu ikincil fazı ortadan kaldırmaya yardımcı olmamıştır.
- Yorulma sonuçları incelendiğinde %10 Si partikül katkılı MMK malzemeli salıncak kollarının yorulma dayanımının standart 6110 alüminyum alaşımlı salıncak kollarından daha düşük olduğu görülmüştür. MMK malzemeli

salıncak kolları sıvama bölgesinden nihai hasara uğrarken standart 6110 alaşımlı salıncak kolları mafsallardan nihai hasara uğramıştır. Yorulma dayanımları arasındaki bu fark sıvama operasyonu sırasında olduğu düşünülen mikro çatlakların yorulma testi sırasında ilerlemesi ile açıklanabilir. Isıl işlem parametrelerinin iyileştirilmesi ile mekanik özellikler üzerinde meydana gelecek iyileşme sıvama operasyonu sırasında olduğu düşünülen mikro çatlakların oluşmasını engelleyebilir.

- Burkulma sonuçları incelendiğinde %10 Si partikül katkı MMK malzemeli salıncak kollarının burkulma yüklerinin standart 6110 alüminyum alaşımlı salıncak kollarından yaklaşık %25 daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak çalışmanın başında Si partikül takviyesinin burkulma sonuçlarını iyileştireceği ve sonuç olarak salıncak kolunun daha az ağırlıkla optimize edilmesinin mümkün olacağı beklenmekteydi. Isıl işlem parametrelerinde sıcak dövme tedarikçisinin tesislerinde yapılacak yeni bir iyileştirme ile burkulma sonuçlarında bir artış sağlanabilir ve ardından ağırlık azaltma optimizasyonu mümkün kılınabilir.
- %10 Si partikül katkı MMK malzemeli salıncak kollarının burkulma davranışı standart alüminyum alaşımlı salıncak kollarından farklıdır. %10 Si partikül katkı MMK malzemeli salıncak kolları test sırasında nihai hasara uğramıştır. Genel olarak, alüminyum alaşımlı salıncak kollarının burkulma sırasında nihai hasara uğramaları beklenmemektedir.
- Si partikül takviye oranının değiştirilmesi veya partikül malzemesi olarak Si partikülü yerine elastisite modülü daha yüksek olan SiC, TiC, TiB, AlN veya Al₂O₃ takviye edilmesi ile yorulma veya burkulma performansında iyileştirmeler sağlanabilir. Ancak, partikül katkısı ile artan maliyetlerin optimizasyon ile azaltılan ağırlık sayesinde elde edilebilecek maliyet avantajı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Ayrıca sprey döküm ile partikül katkı alaşımlar üretebilen tedarikçilerin kabul edilebilir kalite seviyelerinde seri üretim için geliştirilmeleri gerekmektedir. Belirtilen tüm unsurlar hesaba

katıldığında ağırlığı azaltılmış partikül katkı MMK malzemelerin salıncak kollarında kullanılmasının günümüz koşullarında büyük avantaj sağlayacağını söylemek oldukça zordur.



KAYNAKLAR

- Akarsu, C. (2012). *Bir ticari kamyon şasisine bağlı parçaların titreşim kaynaklı yorulma analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akdoğan, A. (2008a). *Metal matrisli kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri*. Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akdoğan, A. (2008b). *Al ve alaşımları*. 03 Mart 2010, http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf
- Bandil, K., Vashisth, H., Kumar, S., Verma, L., Jamwal, A., Kumar, D., ve diğer., (2019). Microstructural, mechanical and corrosion behavior of Al-Si alloy reinforced with SiC metal matrix composite. *Journal of Composite Materials*, 53 (28-30), 4215-4223.
- Bannantine, J. A., Corner, J. J. ve Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Başar, G., Kahraman, F. ve Önder, G. T. (2018). Tepki yüzey metodolojisi ve istenilirlik fonksiyon analizi kullanılarak optimum proses parametrelerinin tahmin edilmesi. *1. Uluslararası Akdeniz Sempozyumu*, 1, 351-362.
- Chawla, N., Andres, C., Jones, J. W. ve Allison, J E. (1998). Effect of SiC volume fraction and particle size on the fatigue resistance of a 2080 Al/SiC_p composite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29A, 2843-2854.
- Cöcen, Ü. ve Önel, K. (2001). Ductility and strength of extruded SiC_p/aluminium-alloy composites. *Composites Science and Technology*, 62, 275-282.

- Enginsoy, H. M., Bayraktar, E., Katundi, D., Gatamorta, F. ve Miskioglu, I. (2020). Comprehensive analysis and manufacture of recycled aluminum based hybrid metal matrix composites through the combined method; sintering and sintering + forging. *Composites Part B*, 194 (108040).
- Eschbach, L. (1997). *Entwicklung von sprühkompaktierten AlCuMgAg-legierungen mit hoher warmfestigkeit und zähigkeit*. Published Doctoral Thesis, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.
- Faure, J. F. ve Dubost, B. (1990). Analysis of the spray-deposited process as an approach to develop advanced aluminium alloys. *Proceedings of the International Conference on Advanced Aluminium and Magnesium Alloys*, 1990, 307-315.
- Forrest, P. G. (1962). *Fatigue of metals*. Oxford: Pergamon Press
- Gustke, H. (2018). *Charakterisierung einer aluminiumschmiedelegierung mit erhöhtem e-modul*. Unpublished Master Thesis, Hochschule Osnabrück, Osnabrück, Germany
- Halfpenny, A. (2001). A practical discussion on fatigue. *Environmental Engineering Society of Environmental Engineers*, 14, 21-25.
- Heißing, B., ve Ersoy, M. (2011). *Chassis handbook* (1st ed.). Berlin: MercedesDruck
- Hilary, J. J. M., Ramamoorthi, R., Joseph, J. D. J. ve Samuel, C. S. J. (2020). A study on microstructural effect and mechanical behavior of Al6061-5%SiC-TiB₂ particulates reinforced hybrid metal matrix composites. *Journal of Composite Materials*, 54 (17), 2327-2337.
- Kahya, D. (2016). *Soğuk dövme kalıpları yüzey koşullarının kalıp ömrü/işleme maliyeti etkisi yönünden incelenerek optimize edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

- Kaynak, C. ve Boylu, S. (2005). Effects of SiC particulates on the fatigue behavior of an Al-alloy matrix composites. *Materials and Design*, 27, 776-782.
- Kumar, G. B. V., Panigrahy, P. P., Suresh, N., Pramod, R. ve Rao, C. S. P. (2019b). Assessment of mechanical and tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. *Composites Part B*, 175, 107138.
- Kumar, R. S., Prabu, K., Rajamurugan, G. ve Ponnusamy, P. (2019a). Comparative analysis of particle size on the mechanical and metallurgical characteristic of Al₂O₃-reinforced sintered and extruded AA2014 nano-hybrid composite. *Journal of Composite Material*, 53 (28-30), 4369-4384.
- Lavernia, E.J. ve Grant, N.J. (1988). Spray deposition of metals: A review. *Materials Science and Engineering*, 98, 381-394.
- Lengsfeld, P., Juarez-Islas, J. A., Cassada, W. A. ve Lavernia, E. J. (1995). Microstructure and mechanical behavior of spray deposited Zn modified 7xxx series Al alloys. *International Journal of Rapid Solidification*, 8, 237-265.
- Lloyd, D.J. (1994). Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. *International Materials Reviews*, 39 (1), 1-23.
- Machler, R., Uggowitzer, P. J., Solenthaler, C., Pedrazzoli, R. M. ve Spiedel, M. O. (1991). Sturcture, mechanical properties, and stress corrosion behaviour of high strength spray deposited 7000 series aluminium alloy. *Materials Science and Engineering*, 7, 447-451.
- Mohanakumara, K. C., Rajashekar, H., Ghanaraja, S. ve Ajitprasad, S. L. (2014). Development and mechanical properties of SiC reinforced cast and extruded Al based metal matrix composite. *Procedia Materials Science*, 5, 934-943.

Salamcı, E. (2004). Sprey döküm (Derleme). *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (2), 155-173.

Sanctis, M. D. (1991). Structure and properties of rapidly solidified ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Materials Science and Engineering*, A141, 103-121.

Schijve, J. (2009). *Fatigue of structures and materials* (2nd ed.). Delft: Springer

Sharma, P. K., Warudkar, V. ve Ahmed, S. (2014). Experimental investigation of Al6061/Al₂O₃ composite and analysis of its mechanical properties on onshore wind tower using hybrid technique for Indian condition. *Procedia Materials Science*, 5, 147-153.

Smirnov, A. S., Shveikin, V. P., Smirnova, E. O., Belozarov, G. A., Konovalov, A. V., Vichuzhanin, D. I., ve diğer., (2018). Effect of silicon carbide particles on the mechanical and plastic properties of the AlMg6/10% SiC metal matrix composite. *Journal of Composite Materials*, 52 (24), 3351-3363.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R.ve Fuchs, H. O. (2001). *Metal fatigue in engineering* (2nd ed.). Canada: John Wiley & Sons.

Uslularhadde (2020). 08 Ağustos 2020, <https://uslularhadde.com/metal-matrisli-kompozit-malzemeler>.

Uygur, İ. ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174.

Yeni, E. Ç. (2018a). *Fatigue*. Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Yeni, E. Ç. (2018b). *Advanced strength of materials*. Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Zor, M. (2018). *Kompozit malzeme mekaniği*. Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

