

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANTRİFÜJ DÖKÜM İLE ÜRETİLMİŞ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMENİN FRETİNG YORULMASI
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ
Arzum ULUKÖY**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon / İmalat

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Eş Danışman: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN**

TEMMUZ 2011

YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ONAY FORMU


Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 051601001 nolu öğrencisi Arzum ULUKÖY tarafından hazırlanan “SANTRİFÜJ DÖKÜM İLE ÜRETİLMİŞ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMENİN FRETİNG YORULMASI DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU (PAÜ) 


Eş Danışman : Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN (AKÜ) 

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU (PAÜ) 

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ (PAÜ) 

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Gürkan ALTAN (PAÜ) 

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/09/2011 tarih ve ..25/17..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza



Öğrenci Adı Soyadı : Arzum ULUKÖY

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması ile santrifüj döküm yöntemiyle aynı karışım oranına sahip ergiyikten, sadece et kalınlığı değiştirilerek farklı partikül dağılımına sahip 5 adet fonksiyonel derecelendirilmiş silindir şeklinde malzeme üretilerek, mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen malzemelere metalografik inceleme, yaşlandırma, çekme, sertlik ölçme, aşınma, yorulma, fretting yorulması ve yorulma çatlak ilerlemesi deneyleri uygulanmıştır. Fonksiyonel derecelendirme işleminin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi, deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkıda bulunan danışman hocalarım Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU ve Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tezin hazırlanması sürecinde tavsiye ve yönlendirmeleriyle katkıları bulunan hocalarım Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ, Doç. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU ve Doç. Dr. Şükrü TAKTAK'a teşekkür ederim.

2009FBE006 numaralı proje ile doktora tezini destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (PAÜBAP) teşekkür ederim.

Özacar Metal Döküm, Binka Alüminyum Döküm, Örnek Kalıp, Birlik Torna ve Hadid Makine'ye malzeme üretimi ve numune hazırlama sürecinde göstermiş oldukları yardımlar için teşekkür ederim.

Deneyler süresince gerek yönlendirmeleri gerekse manevi destekleri için Dr. Gökmen ATLIHAN, Dr. Metin SAYER ve Dr. Engin TAN'a teşekkür ederim. Yine bu süreçte yardımlarını görmüş olduğum Mekanik Ana Bilim Dalı hocalarımızdan Yrd. Doç. Dr. Gürkan ALTAN ve Yrd. Doç. Dr. Emin ERGUN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmam sürecinde manevi desteklerini esirgemeyen Dr. Hakan TUĞRUL ve eşi Özlem TUĞRUL'a, Gülay TUĞRUL'a ve ayrıca Ali Haluk AKBAŞ'a teşekkür ederim. Yine bu zorlu süreçte hep yanımda olan sevgili kardeşlerim İncilay YENİDEDE, Şermin ULUTÜRK ve Sonnur İŞİTAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarına destek olup sabreden ve manevi yardımını esirgemeyen annem başta olmak üzere sevgili aileme teşekkür ederim. Eşim Bilgehan ULUKÖY ve çocuklarım Arhan ile Bilge'ye, göstermiş oldukları sabır için teşekkürü borç bilirim.

Temmuz 2011

Arzum ULUKÖY

Makine Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	6
1.1.1 FDM ile ilgili çalışmalar.....	6
1.1.2 Fretting yorulması ile ilgili literatür çalışmaları.....	14
1.1.3 Kırılma mekaniği ile ilgili literatür çalışmaları.....	16
1.2 Amaç ve Kapsam.....	19
1.2.1 Deneysel çalışmalar.....	19
1.2.2 Sayısal modelleme çalışmaları.....	19
2. MATERYAL VE YÖNTEM	21
2.1 Deneysel çalışmalar.....	21
2.1.1 Deney malzemesi seçimi ve üretimi.....	21
2.1.2 Mikroyapı incelemesi.....	23
2.1.3 Sertlik dağılımı incelemesi.....	23
2.1.4 Çekme deneyi.....	24
2.1.5 Yaşlandırma ısıl işlemleri.....	24
2.1.6 Aşınma deneyi.....	24
2.1.7 Yorulma deneyleri.....	25
2.1.8 Fretting deneyi.....	27
2.1.9 Yorulmalı çatlak ilerleme deneyleri.....	29
2.1.9.1 K_C 'nin belirlenmesi	32
2.1.9.2 Çatlak ilerleme parametrelerinin (c ve m) tespiti	33
2.2 Sayısal Çalışmalar.....	34
2.2.1 Yorulma.....	34
2.2.1.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde yorulma olayı	36
2.2.2 Fretting.....	37
2.2.2.1 Temas mekaniği	39
2.2.2.2 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde fretting olayı	43
2.2.3 Kırılma mekaniği.....	43
2.2.3.1 Gerilme şiddet faktörünün hesabı	46
2.2.3.2 Çatlak ilerleme doğrultusunun analizi	47
2.2.3.3 Yorulmalı çatlak ilerlemesi ve Paris-Erdoğan denklemi	48
2.2.3.4 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde kırılma olayı	49
2.2.4 Kullanılan sonlu eleman yazılımları.....	52
2.2.4.1 ANSYS ile modelleme	53
2.2.4.2 FRANC2D ile modelleme	56

3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
3.1 Deneysel Bulgular.....	58
3.1.1 Mikroyapı incelemeleri.....	58
3.1.2 Sertlik ölçüm sonuçları.....	61
3.1.3 Çekme deneyi sonuçları.....	62
3.1.4 p üstelinin tespiti.....	65
3.1.5 Aşınma deneyi.....	66
3.1.6 Yorulma deneyi.....	68
3.1.7 Fretting deneyi.....	71
3.1.8 Yorulmalı çatlak ilerleme deneyi.....	76
3.2 Nümerik Bulgular.....	82
3.2.1 ANSYS bulguları.....	82
3.2.2 FRANC2D bulguları.....	90
4. SONUÇLAR.....	92
KAYNAKLAR.....	95

KISALTMALAR

FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
GŞF	: Gerilme Şiddet Faktörü

TABLO LİSTESİ

Tablolar

2.1 : Alüminyum 2014 alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	22
2.2 : Zamana bağlı gerilme çeşitleri.....	35
3.1 : 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerin c ve m katsayıları.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

1.1 : Termal gerilmelerin seramik-metal kaplama ve seramik-metal derecelendirilmiş yapı içerisinde göstermiş olduğu değişim.....	1
1.2 : Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde elastisite modülü değişimi.....	2
1.3 : Fretting yorulmasına neden olan etkenler.....	5
2.1 : Silindirlerden numunelerin çıkarılışı.....	23
2.2 : Aşınma deneyi düzeneği.....	25
2.3 : Yorulma ve çatlak ilerlemesi deney numunelerinin silindirlerden çıkarılışı.....	26
2.4 : Fretting deney aparatı.....	28
2.5 : Silindirik fretting pabuç ölçüleri.....	28
2.6 : Düz fretting pabuç ölçüleri.....	29
2.7 : Merkez çatlaklı numune geometri ve ölçüleri.....	30
2.8 : Kenar çatlaklı numune geometri ve ölçüleri.....	30
2.9 : Çatlak ilerleme durumunun tespiti için kullanılan mikroskoplar.....	31
2.10 : P_S ve P_Q değerlerinin yük-deplasman diyagramı üzerinde tespiti.....	32
2.11 : Çatlak ilerleme - tekrar sayısı diyagramı.....	33
2.12 : C ve m katsayılarının hesaplanması.....	33
2.13 : Yorulma çatlak başlangıç ve ilerlemesi safhaları.....	35
2.14 : Normal kuvvet (P) ve teğetsel kuvvet (Q) etkisinde iki cisim arasında meydana gelen çizgi teması.....	39
2.15 : Temas altında kayma gerilmesi dağılımı.....	40
2.16 : Temas halinde kayma ve yapışma durumu.....	41
2.17 : Teğetsel kuvvetin fretting deneyi süresince periyodik değişiminin kayma ve yapışma bölgelerine etkisi.....	42
2.18 : Fretting yorulması şartlarında oluşan kütle gerilmesi.....	43
2.19 : Fretting yorulması şartlarında oluşan kütle kuvvetleri nedeniyle kayma ve yapışma bölgelerinin değişimi.....	43
2.20 : Çatlak açılma modları.....	44
2.21 : Çatlak ucunda meydana gelen gerilmeler.....	45
2.22 : Çatlak ucunda kullanılan özel çeyrek nokta düğümlü üçgen elemanlar.....	47
2.23 : Gerilme şiddet faktörlerine bağlı olarak çatlağın ilerleme doğrultusu.....	47
2.24 : Plane82 elemanının geometrisi.....	53
2.25 : ANSYS programında yazılan makro ile oluşturulan örnek array.....	54
2.26 : ANSYS programında oluşturulan boyutsuzlaştırılmış genişlik boyunca (x/t) elastisite modülü değişimi.....	55
2.27 : Fretting modelinin ANSYS'de oluşturulması.....	56
2.28 : FRANC2D programı kullanılarak merkez çatlaklı bir malzemenin a) Modeli, b) Deforme şekli, c) Çatlak ucunda meydana gelen maksimum kayma gerilmesi.....	57

3.1 : SiC dağılımı (a:Alüminyumca zengin olan bölge, b:SiC'ce zengin olan bölge, büyütme 20x).....	58
3.2 : SiC dağılımı (a: Alüminyumca zengin bölge, b:SiC'ce zengin olan bölge, büyütme 50x).....	59
3.3 : Numunelerde oluşan döküm boşlukları.....	59
3.4 : Döküm FDM'lerde oluşan SiC hattı (a: 7,5x büyütme, b: 50x büyütme).....	60
3.5 : 1,2 ve 3 numaralı FDM'nin dökülmüş halde sertlik dağılımı.....	61
3.6 : 1,2 ve 3 numaralı FDM'nin dökülmüş halde sertlik dağılımı.....	62
3.7 : 1,2 ve 3 numaralı FDMler için I2 yaşlandırma işlemi uygulanmış halde sertlik dağılımı.....	62
3.8 : 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre elastisite modülleri değişimi (dökülmüş halde).....	63
3.9 : 2 numaralı FDM'nin iç kısımdan dış kısma doğru hesaplanan SiC dağılımı.....	63
3.10 : 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre akma sınırı değişimi (dökülmüş halde).....	64
3.11 : 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre çekme dayanımı değişimi (dökülmüş halde).....	64
3.12 : 2 numaralı FDM'nin yaşlandırma işlemleri ile akma sınırı ve çekme dayanımı değişimi.....	64
3.13 : p üstelinin Excel programında elde edilişi.....	65
3.14 : 1 numaralı FDM'nin kuru sürtünme şartları altında aşınma davranışı (a: P=91 N; b: P=140 N).....	66
3.15 : 2 numaralı FDM'nin kuru ve sıvı sürtünme şartları altında dökülmüş ve yaşlandırma işlemi uygulanmış halde aşınma değerleri..	67
3.16 : I1 yaşlandırma işlemi uygulanmış 1 numaralı FDM'nin yorulma grafiği.....	68
3.17 : Dökülmüş halde (a) ve I1 yaşlandırma işlemi uygulanmış halde (b) bazı gerilme değerleri için elde edilmiş olan tekrar sayıları.....	69
3.18 : Yorulma deneyi sonucunda oluşan farklı kırık yüzey şekilleri.....	70
3.19 : SiC'ce zengin bölgeden (üst kısım) alüminyumca zengin bölgeye doğru kırık yüzeyin optik görüntüsü (büyütme 50x).....	71
3.20 : 1 numaralı FDM'nin yorulma ve fretting yorulması sonuçları.....	72
3.21 : Fretting pabuçlarında oluşan aşınma.....	73
3.22 : Silindirik pabuç altında oluşan fretting hasarı.....	74
3.23 : Düz pabuç altında oluşan fretting hasarı.....	75
3.24 : Deney düzeneğinde fretting hasarıyla kırılmış numune.....	76
3.25 : Merkez çatlaklı 4 numaralı FDM'nin içten dışa tabakalar halinde elde edilmiş yük-açılma grafiği.....	77
3.26 : Kenar çatlaklı 5 numaralı FDM'nin yük-açılma grafiği (S_{Al} , alüminyumca zengin taraftan kenar çatlak açılmış; S_{SiC} , SiC'ce zengin taraftan kenar çatlak açılmış numune).....	78
3.27 : Alüminyum alaşımının yük tekrarıyla çatlak ilerlemesi grafiği.....	78
3.28 : 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerin tekrar sayısı ile göstermiş oldukları çatlak ilerleme değerleri.....	79
3.29 : 4 numaralı FDM'den elde edilmiş olan kenar çatlaklı numunelerin tekrar sayısı ile göstermiş oldukları çatlak ilerleme değerleri.....	80
3.30 : 4 ve 5 numaralı FDMlerde alüminyumca zengin tarafa açılmış kenar çatlağın tekrar sayısı ile ilerlemesi durumu.....	80

3.31 : 4 numaralı FDM'den elde edilmiş ve alüminyumca zengin tarafa kenar çatlak açılmış numunenin kırık yüzeyi üzerinde çatlak ilerleyişinin ilerleyişinin tekrar sayısı artımı ile artışı.....	81
3.32 : 4 numaralı FDM'den elde edilmiş ve SiC'ce zengin tarafa kenar çatlak açılmış numunenin kırık yüzeyi üzerinde çatlak ilerleyişinin tekrar sayısı artımı ile artışı.....	81
3.33 : FDM model.....	83
3.34 : FDM'de statik yük altında y yönünde oluşan uzama.....	83
3.35 : FDM'de statik yük altında x yönünde oluşan kısılma.....	84
3.36 : FDM'de statik çekme yükü altında oluşan uzama ve kısılmanın kesit boyunca dağılımı.....	84
3.37 : 1 numaralı FDM'de statik çekme yükü altında meydana gelen a) gerilme dağılımı, b) y yönünde uzama, c) x yönünde kısılma.....	85
3.38 : 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDM'lerde statik çekme yükü altında meydana gelen a) gerilme dağılımı, b) y yönünde uzama, c) x yönünde kısılma.....	86
3.39 : E=64000 MPa değerine sahip alüminyum malzeme için 3 ayrı düğüm noktasındaki kullanma faktörü.....	87
3.40 : Fretting durumunda FDM'de oluşan gerilme dağılımı.....	88
3.41 : Fretting durumunda FDM'nin alüminyumca zengin tarafında meydana gelen gerilme dağılımı.....	88
3.42 : Fretting durumunda FDM'nin SiC'ce zengin tarafında meydana gelen gerilme dağılımı.....	89
3.43 : Fretting durumunda FDM'nin pabuça altındaki kesiti boyunca meydana gelen uzama ve kısılma değerleri.....	89
3.44 : FDM'nin her iki tarafında fretting şartlarında oluşan temas gerilme dağılımları.....	90
3.45 : 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı deney numunelerinin çatlak ilerleyişinin deneysel ve FRANC2D analizi sonuçları.....	90
3.46 : Merkez çatlaklı bir deney numunesi için FRANC2D programında elde edilmiş olan K_I ve K_{II} değerleri.....	91
3.47 : 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi ile gerilme şiddet faktörü değişiminin FRANC2D analiz sonuçları	91

SEMBOL LİSTESİ

a	Çatlak boyu
a_0	Başlangıç çatlak boyu
Δa	Çatlak ilerleme miktarı
B	Numune kalınlığı
R_e	Akma sınırı
R_m	Çekme dayanımı
E	Elastisite modülü
E_{tip}	Çatlak ucundaki elastisite modülü
E^*	Efektif elastisite modülü
$g(x)$	Derecelendirme fonksiyonu
G	Savurma dökümde özellik dağılım sayısı
K_I	Mod I gerilme şiddet faktörü
K_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü
K_{III}	Mod III gerilme şiddet faktörü
K_C	Kritik gerilme şiddet faktörü
ΔK	Gerilme şiddet faktörü genliği
N	Yük tekrar sayısı
R	Gerilme oranı
p	Derecelendirme üsteli
P	Normal kuvvet, yük
R	Kalıp dış yarıçapı
δ	Kronocher delta
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Gerilme
σ_{maks}	En büyük gerilme
σ_{min}	En küçük gerilme
σ_g	Gerilme genliği
σ_{ort}	Ortalama gerilme
ν	Poisson oranı
ω	Açısal hız
θ	Çatlak ilerleme açısı
W	Numune genişliği

ÖZET

SANTRİFÜJ DÖKÜM İLE ÜRETİLMİŞ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMENİN FRETİNG YORULMASI DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler sağladıkları avantajlar açısından, giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi, farklı hasar şekillerine göre analizi, teorisi vb. pek çok çalışmaya literatürde sıkça rastlanır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin ilk kullanım yeri termal bariyer kaplamaları olduğu için, genellikle fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme hakkındaki çoğu çalışma termal ve termomekanik özelliklerinin belirlenmesine yöneliktir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin yorulma davranışları konusunda pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin fretting yorulması ile ilgili çok az sayıda teorik ve deneysel çalışma vardır.

Bu çalışmada, alüminyum 2014 alaşımı ile SiC partikülleri karıştırılarak, savurma döküm yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi yapılmıştır. Elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mikroyapıları incelenmiş ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Fonksiyonel derecelendirmenin malzemenin yorulma, fretting yorulması ve yorulma çatlak ilerlemesi davranışlarına etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme, Savurma Döküm, Yorulma, Fretting Yorulması, Aşınma, Kırılma Mekanikliği, Sonlu Elemanlar Metodu.

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF FRETTING FATIGUE BEHAVIOR OF FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL MANUFACTURED BY CENTRIFUGAL CASTING

Functional graded materials (FGMs) in terms of benefits they provide, use more and more areas. It is widely encountered that in literature, there are lots of studies on FGM production, analysis of different forms of damages and its structural theories, etc. As primordial FGMs studies were about thermal barrier coatings, most researches aimed the determining of the thermal and thermomechanical properties.

Although there are many studies about fatigue behavior of FGMs, few theoretical and experimental studies on FGM's fretting fatigue.

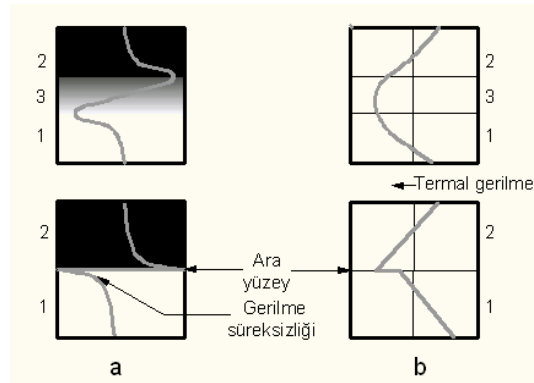
In this study, FGM produced via centrifugal casting mixed with SiC particles with aluminum 2014 alloy. The obtained FGMs' microstructures were analyzed and its mechanical properties were determined. Functionally gradation effect on materials' fatigue, fretting fatigue and fatigue crack propagation behaviors were investigated.

Key words: Functionally Graded Material, Centrifugal Casting, Fatigue, Fretting Fatigue, Wear, Fracture Mechanics, Finite Elements Method.

Canum Aileme

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarının birçoğunda malzemelerden istenen özellikler, seramiklerle metallerin veya seramiklerle seramiklerin birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Seramikler malzemeler düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi sürünme direncine sahip olmakla beraber, kırılma toklukları ve termal şok dirençleri zayıftır. Diğer taraftan, metalik malzemelerin seramik malzemelere oranla yüksek kırılma tokluğu ve termal şok direnci iyi olmakla beraber, yüksek sıcaklıklarda dayanımları düşmektedir. Metal matrisli ve seramik malzeme takviyeli kompozit malzemeler ise, birçok farklı mühendislik uygulamasında malzeme gereksinimini karşılamaktadır. Fakat iki farklı malzemenin birleştirilmesi, beraberinde termal ve artık gerilmelerin oluşumu gibi ciddi problemleri de beraberinde getirmektedir. Termal gerilmeler özellikle keskin ara yüzeylerin çevresinde oluşmakta ve ara yüzeylerde çatlak oluşma ihtimalini yükseltmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için özellik, mikroyapı ve kompozisyon olarak derecelendirilmiş malzemeler üretilmeye başlanmıştır (Çırakoglu, 2001). Böylece, Şekil 1.1'de şematik olarak görüldüğü gibi, derecelendirilmiş seramik-metal ara yüzeyinde termal gerilmeler ve süreksizlikler azalmaktadır (Tilbrook ve diğ., 2005; Cho ve Oden, 2000).



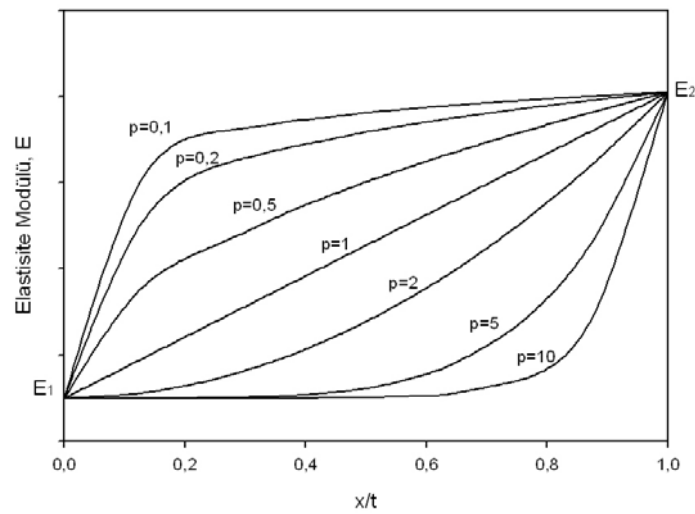
Şekil 1.1: Termal gerilmelerin seramik-metal kaplama ve seramik-metal derecelendirilmiş yapı içerisinde göstermiş olduğu değişim (1: Metal malzeme; 2: Seramik kaplama; 3: FDM ara geçiş bölgesi) (Tilbrook ve diğ., 2005; Cho ve Oden, 2000)

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM), kaplama olarak kullanılabildiği gibi, iki malzeme arasında geçiş bölgesi olarak yani tampon bölge olarak da kullanılabilir. FDM teriminin 1980'lerin ortasında Japonya'da ortaya çıkmasına rağmen, kavram mühendislikte uzun zamandır kullanılmaktadır. Teknik olarak, ayrı bir malzeme grubu olarak değerlendirilmezler. Daha çok, yapı veya malzemenin kimyasal düzeninin mühendislik yaklaşımıyla yeniden düzenlenmesi ile elde edilirler. Bu yaklaşım, değişik ve ilk bakışta birbirine aykırı gereksinimlerin bir arada istendiği, örneğin yüksek sertlik ve yüksek tokluk istenmesi gibi durumlarda, çok faydalı olmaktadır (Koizumi, 1993; Wessel, 2004).

FDM'lerde malzeme kompozisyonu ve mikroyapısı dolayısı ile de mekanik ve termal özellikleri, malzemenin kalınlığı veya genişliği boyunca değişmektedir (Tilbrook ve diğ., 2005; Cho ve Oden, 2000; Wessel, 2004). Bu değişim üssel, lineer ve kuvvet kuralına göre olabilir. Şekil 2.1'de, bu çalışmada kullanılmış olan, üssel fonksiyona bağlı kuvvet kuralı ilkesiyle elde edilebilecek elastisite modülü değişim varyasyonları görülmektedir. Bu varyasyonlar, malzemenin fonksiyonel değişim gösteren kalınlık veya genişliğine (t) ve başlangıç noktasından itibaren mesafeye (x) bağlı olan uzaklık fonksiyonuna (g(x)) ve p üsteline bağlı olarak değişmektedir.

$$g(x) = \left(\frac{x}{t}\right)^p \quad (1.1)$$

$$E(x) = E_1 \cdot (1 - g(x)) + E_2 \cdot g(x) \quad (1.2)$$



Şekil 1.2: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde elastisite modülü değişimi

FDM konsepti kullanılarak farklı özellikteki malzemelerin bütünleştirilmesi, başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalarda, FDMlerin metalce zengin bölgesi düşük sıcaklıkta çalışırken, yüksek sıcaklığa sadece seramikçe zengin olan bölgesi maruz kalmaktadır. Gelişmiş hava taşıtı ve uzay araçları, bilgisayar ve elektronik uygulamaları, medikal implantlar ve optik aygıtlarda, bu üstün özellikleri sayesinde uygulama alanı bulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termal yüklere, yüksek ve periyodik sıcaklık değişimine maruz kalan nükleer reaktör ve yüksek hızlı hava taşıtlarının basınçlı kap ve boru gibi yapısal parçalarında kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda, metal-seramik kompozitleri, tek bir malzemede bulunması muhtemel olmayan optimum özellikleri sağlayabilmesi nedeniyle büyük ölçüde kullanılmaktadır (Çırakoglu, 2001).

Derecelendirilmiş malzemeler için çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur: Toz metalurjisi, termal spreycaplama, kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), yanma sentezi (SHS) ve santrifüj döküm vb.

Santrifüj (savurma) döküm yöntemi, en basit FDM üretim yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemde ergiyik, belirli bir dönme hızına ve silindirik bir şekle sahip olan kalıp içerisine dökülür. Katılaşma ile beraber kalıp durdurulur ve döküm parça kalıp içerisinden çıkarılır. Metal matrisli ve seramik parçacık takviyeli kompozitlerin dökümünde;

- Eğer partikül yoğunluğu ergiyik yoğunluğundan daha fazla ise, partiküller daha çok dış tarafta,
- Eğer partikül yoğunluğu daha az ise, partiküller daha çok iç tarafta yoğunlaşacaktır.

Santrifüj döküm yönteminde derecelendirme kompozisyonu; uygulanan G sayısı, partikül ve ergimiş metal arasındaki yoğunluk farkı, ergiyik viskozitesi, partikül hacimce oranı, üretilen borunun kalınlığı ve katılaşma süresine bağlı olarak ayarlanabilir. G sayısı ise

$$G = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir ve parçanın dış yarıçapı (R ,m), kalıp dönme hızı (ω , s^{-1}) ve yerçekimi ivmesine (g) bağlı olarak değişir (Lee ve diğ., 1997; Kim ve Rogathi,

1998; Watanabe ve diğ., 1998; Biesheuvel ve Verveij, 2000; Qin ve diğ., 2002; Watanabe ve diğ., 2002).

Sonuç olarak;

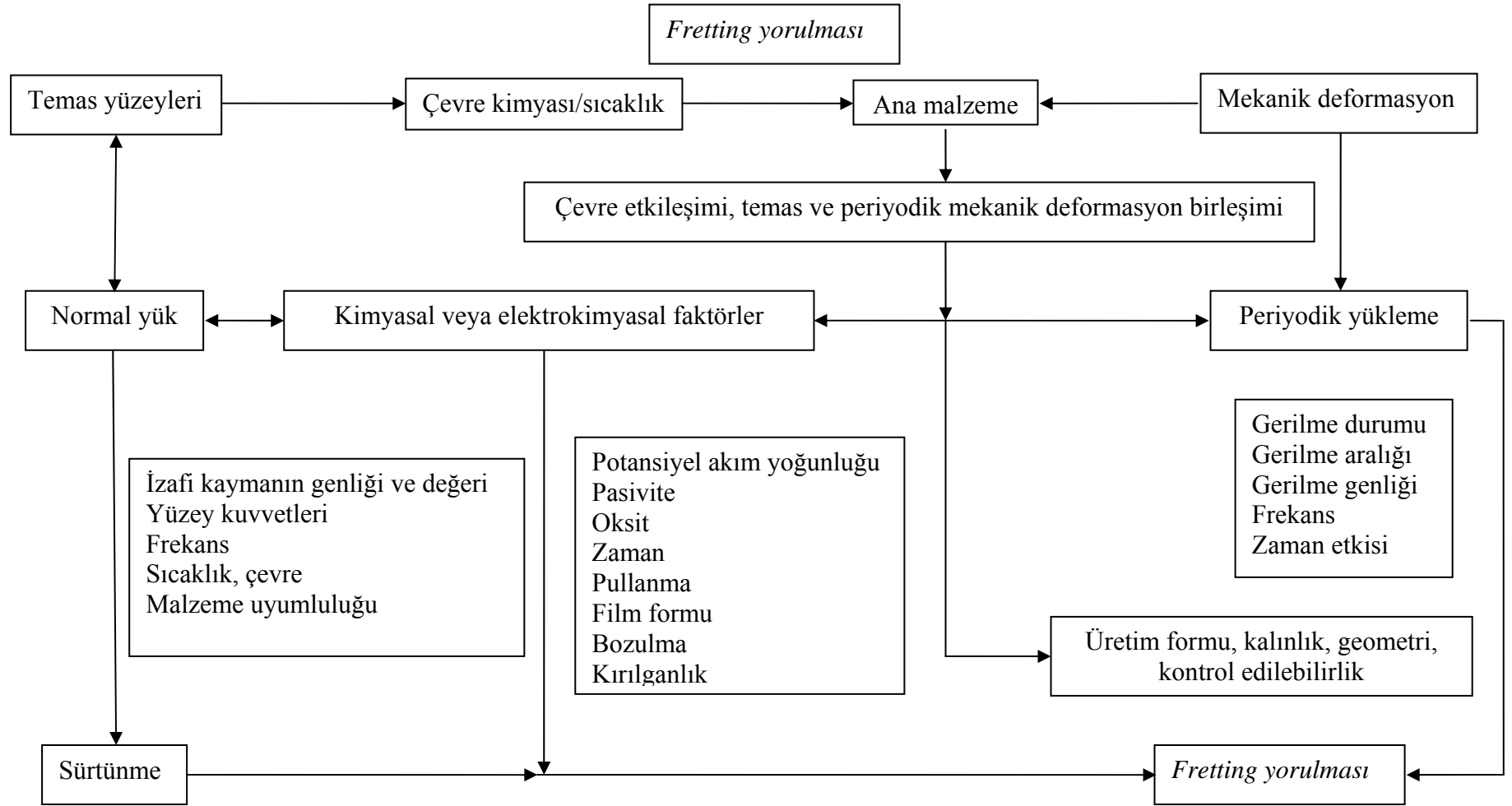
- Sistemin ısı verimliliğini arttırarak çalışma sıcaklığını yükseltmek, korozyon, oksitlenme ve aşınmayı önlemek amacıyla kullanılan kaplamaların, altlık malzeme ile termal ve mekanik özelliklerinin uyumsuzluğunu ortadan kaldırmak amacı ile FDM malzemeler kullanılmaktadır.
- Derecelendirilmiş yapı içerisinde üretimden kaynaklanabilen ısı ve artık gerilmelerin az miktarda da olsa oluşması, bu tür malzemelerin dezavantajlarından. Ayrıca, üretim yöntemine bağlı olarak, derecelendirilmiş kaplama içerisindeki katmanlar arasındaki yüzeyler düzgün oluşmayabilir.
- Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, başta Japonya ve A.B.D. olmak üzere pek çok ülkede, özellikle uzay ve havacılık, iletişim, metal işleme sanayinde gittikçe önem kazanmaktadır. Konu ile ilgili araştırmalar, gün geçtikçe artarak devam etmektedir.

Fretting, genellikle izafi hareketin olmadığı kabul edilen iki katı yüzey arasındaki düşük genlikte meydana gelen titreşim hareketi sonucu, malzemelerin aşınması ile başlayan ve yorulma ömrünü azaltan bir hasar tipi olarak tanımlanabilir. Başlangıç oluşumu genellikle adezyondur. Zamanla, malzemeler yapışma-kopma davranışı göstererek aşınır. Aşınma miktarı arttıkça, yüzeyde çatlak oluşumu ve dökülmeler başlar (Giannakopoulos ve diğ., 2000). Fretting yorulması helikopter, sabit kanatlı uçak, tren, gemi, otomobil, kamyon, otobüs, tarım makineleri parçalarında, motorlarda, çeşitli konstrüksiyon ekipmanlarında, ortopedik implanlarda, tel halatlarda, roket motor kutularında vb. meydana gelebilir (Hoeppner, 1992).

Fretting yorulmasına neden olan etkenler, Şekil 1.3'de şematik olarak görülmektedir.

Frettingi etkileyen faktörler 3 ana grupta incelenebilir (Bill, 1982):

- Temas şartları,
- Çevresel şartlar,
- Malzeme özellikleri.



Şekil 1.3: Fretting yorulmasına neden olan etkenler (Hoepfner, 1992)

Periyodik yük, normal yük, kayma genliği, tekrar sayısı, birlikte çalışan parçaların geometrisi, malzemenin mekanik özellikleri ve sertlik değerleri, mikroyapısı, birlikte çalışan malzeme kombinasyonları, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve çevre şartları fretting oluşumu üzerinde etkili olabilir (Hoeppner, 1992).

Fretting yorulması çatlakları, fretting ömrünün erken safhalarında (%5-%10) başlayabilir (Giannakopoulos ve diğ., 2000). Oluşan bu çatlaklar yorulmaya neden olabilir. Bu erken dönemde, temas köşelerine yakın yerlerde oluşan yüksek temas basıncı nedeniyle fretting yorulması çatlakları çok az ilerler ve kapanmaya meyillidir. Fakat temas yüzeylerindeki aşınma, temas köşelerine yakın yerlerdeki temas basıncını düşürür ve çatlaklar dereceli olarak büyümeye başlar (Hattori ve diğ., 2000).

Malzemenin kompozisyonel değişimi ile elde edilen uygun mekanik özellikler, derecelendirilmiş malzemelerde oluşan çatlakları etkiler (Reiter ve Dvorak, 1998). Derecelendirilmiş malzemelerdeki çatlaklar üzerine yapılmış farklı bir çok değişik teorik çalışma, çatlak ucu gerilmelerinin homojen malzemelerden farklı olduğunu göstermiştir (Erdogan, 1996; Jin ve Batra, 1998; Dao ve diğ., 1997).

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 FDM ile ilgili çalışmalar

FDM konusunda yapılan çalışmalar başlıca 5 grupta yoğunlaşmaktadır: FDM üretimi, termal özelliklerinin belirlenmesi, mekanik özelliklerinin belirlenmesi, FDM özelliklerinin analitik yöntemlerle ve nümerik yöntemlere analizidir. Derecelendirilmiş malzemeler için çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Bunların arasından bazıları sadece küçük ve/veya basit şekilli parçalar uygulanabilirken, bazıları da büyük veya karmaşık şekilli parçalara uygulanabilir. FDM üretimi için temel yöntemler; toz metalurjisi, PVD (fiziksel buhar biriktirme), CVD (kimyasal buhar biriktirme), plazma sprej, termal sprej, tel püskürtme, lazer giydirme, SHS (yanma sentezi), savurma döküm ve polimerizasyon olarak sıralanabilir. Son yıllarda başlangıç yöntemlerinden türetilmiş yeni üretim yöntemleri de kullanılmaya başlanmıştır.

Biesheuvel ve Verweij (2000) tarafından yapılan çalışmada, farklı boyut ve yoğunlukta partiküller içeren malzemenin santrifüj döküm sırasında oluşan döküm profili için bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, deneysel olarak Al_2O_3/ZrO_2 karışımının tek eksenli santrifüj dökümü ile elde edilmiş olan mikroyapısı ile uyum göstermiştir.

Qin ve diğ. (2002) tarafından, sert seramik partiküllerin dağılımının özellikle seramik partiküllerce zengin bir şekilde bulunduğu bölgelerde aşınma, sertlik gibi özelliklerini iyileştirdiği göz önüne alınarak, alüminyum alaşımları içerisinde SiC partiküllerinin dağılımı ile fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin aşınma ve sertlik özelliğini iyileştireceği ifade edilmiştir. Savurma döküm yöntemi ile SiC partiküllerinin homojen olan ve olmayan şekilde ergimiş metal matris içerisinde kontrollü olarak dağıtılabileceği söylenmektedir. Bu şekilde üretilen FDM tüpün mikroyapısı incelendiğinde; yoğunluk, ısı transferi ve santrifüj kuvvetinde olan farklılıktan dolayı, iç ve dış tabakalarında partiküllerce zengin bölgeler oluştuğu görülmüştür.

Zhang ve diğ. (1998), Mg_2Si ile güçlendirilmiş Al matrisli FDM'yi santrifüj döküm yöntemi ile dış kısımları sert, orta kısımları sünek ve iç kısmı sert bir şekilde üretmişlerdir. Üretilen malzemeye mikroyapı analizi, sertlik ölçümü ve çekme deneyi uygulanmıştır. Mg_2Si partiküllerinin kompozit malzemenin sertliğini arttırdığı fakat sünekliğini azalttığı belirlenmiştir.

Sivakumar ve diğ. (2003), mullite ($3Al_2O_3-2SiO_2$) ile Mo malzemenin santrifüj kalıplama tekniği ile ürettikleri silindirik parçayı, $1600\text{ }^{\circ}C$ 'de sinterlemişlerdir. Sonuçta elde edilen FDM üniform bir derecelendirme göstermiştir.

Watanabe ve diğ. (1998), $G=2.1, 12.4$ ve 80.0 şartlarında, hacimce %15 olan 60 ve 320 ağ boyutlarındaki partiküllerle ve 12 dakika katılma süresi uygulayarak plaster/corundum (Al_2O_3) karışımından FDM üretmişlerdir. Deneyler ve yapılan hesaplamalar sonucunda, elde edilen FDM'nin derecelendirmesinin uygulanan G sayısı, partikül ve ergimiş metal arasındaki yoğunluk farkı, ergiyik viskozitesi, partikül hacimce oranı, üretilen borunun kalınlığı ve katılma süresine bağlı olarak ayarlanabileceği sonucuna varılmıştır.

Watanabe ve diğ. (2002), plaster/corundum (Al_2O_3) karışımından FDM üretmişlerdir. Viskozitenin deneyler boyunca sabit olmasını sağlayabilmek için tüm deneyler aynı

nem ve ortam sıcaklığı şartlarında yapılmıştır. $G=15, 28$ ve 45 olarak, hacimce farklı partikül boyutlarındaki Al_2O_3 oranı ise %16 olarak uygulanmıştır. Büyük partiküllerin dışı doğru daha büyük hacim oranlarında toplandığı ve ortalama partikül boyutunun, hacimce partikül oranı kadar FDM'nin dereceli dağılımında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Dereceli partikül boyut dağılımının, G sayısının artmasıyla veya partikül hacim oranının azalmasıyla değiştiği sonucu elde edilmiştir.

Lee ve diğ. (1997), epoksi/karbon fiber FDM'sini üreterek, karbon fiberin dağılımını ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. 1000 d/dak olarak sabit tutulan döndürme hızının yanı sıra, farklı döndürme süreleri ($5, 10$ ve 20 dakika) uygulanarak karbon fiber dağılımına etkilerini incelemişlerdir. 10 dakikalık döndürme süresinde yoğunluk dağılımı neredeyse lineer olarak elde edilmiştir. Derecelendirilmiş yapının döndürme zamanı, ortalama fiber uzunluğu, reçine viskozitesi ve hacimce fiber oranına bağlı olduğu görülmüştür.

Kim ve Rogathi (1998), %7 ve %13 oranlarında grafit içeren bakır alaşımını 800 ve 1900 min^{-1} hızlarda santrifüj döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Soğutma hızının, grafitçe zengin bölgenin kalınlığını ve mikroyapısını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Dökümde kalıp dönme hızının artmasıyla, kalınlık boyunca grafit dağılımı azalmıştır.

Özdin ve Şahin (2006) tarafından yapılmış olan çalışmada, Al-2011 alaşımı ile değişik boyutlarda parçacık içerikli SiC partikülleriyle takviyelendirme işlemi ergimiş metal karıştırma metoduyla yapılmıştır. Al alaşımına % 5 oranında SiC partikülü takviyesi bile, aşınma direncinin çok iyileşmesine neden olmuştur.

Ahmad ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada, Al+SiC alaşımı stir casting ve modifiye edilmiş stir casting yöntemiyle dökülmüş, çekme deneyi ile mekanik özellikleri belirlenmiştir. Modifiye edilmiş döküm yöntemiyle kompozit içerisindeki porozite azalmış, mekanik özellikler iyileşmiştir.

Kinemuchi ve diğ. (2004), yeni bir üretim yöntemini tartışmışlardır. Bu yöntem, santrifüj kuvvet destekli sıvı fazda sinterleme olarak adlandırılmıştır. Yöntemin avantajları olarak; geleneksel sinterleme yöntemlerine göre ilave santrifüj kuvvetin etkisiyle kalıpla parça arasındaki meydana gelebilecek reaksiyonların önlenebileceği, kristal yönelme sağlanabileceği ve derecelendirilmiş bir mikroyapı elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Gupta (2002) patent aldığı çalışmasında, Al/SiC derecelendirilmiş malzeme üretimi için bulamaç içerisinde parçalama ve biriktirme yöntemi adı verilen bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ile parçanın farklı iki yüzeyinde istenebilecek olan farklı özelliklerin (dayanım / tokluk / iyi tribolojik özellik gibi) elde edilebileceği ifade edilmektedir.

Kieback ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada, FDM üretiminde kullanılan toz metalurjisi işlemleri, metal ergitme ile ilgili ileri üretim yöntemleri ve polimer derecelendirme işlemlerindeki son gelişmeler verilmiştir. Kusursuz parça üretimi için derecelendirme formunun önemi, sinterleme ve kurutma şartları tartışılmıştır.

Groza ve Kodash (2006) yaptıkları çalışmada, özellikle medikal FDM üretimi için son yıllarda kullanılmaya başlanan soğuk toz sprey yöntemine ilave olarak son şekil vermek için soğuk izostatik presleme yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemin metalik ve metalik olmayan birçok malzemeye uygulanabileceğini ifade etmişlerdir.

Burris ve diğ. (2000) patent aldıkları çalışmalarında, altlık olarak kullanılan alaşımli çelik üzerine termal sprey yöntemiyle numunelere ayrı ayrı Ti ve W içeren karbürler fonksiyonel olarak kaplanmıştır. Elde edilen fonksiyonel malzemenin dişli çark, yataklama elemanları, kam mili gibi makine elemanlarında görülen yuvarlanma, kayma, abrazyon ve eğilme temas hasarlarının bir veya birkaçına, kaplamasız malzemeye oranla daha dayanımlı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Cetinel ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada, atmosferik plazma sprey yöntemi ile AISI 304L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine NiCrAl, %75 NiCrAl + %25 MgZrO₃, %50 NiCrAl + %50 MgZrO₃, %25 NiCrAl + %75 MgZrO₃ ve %100 MgZrO₃ şeklinde derecelendirme yapılmıştır. Numunelerin mikroyapıları incelenmiş ve aşınma deneyi yapılmıştır. Tabakaların sürtünme katsayısı değerleri uygulanan yükte birlikte kayma hızına bağlı olmaksızın artmıştır. Yüzeyden içeriye doğru oluşan sertlik profili, kaplamanın aşınma dayanımını etkilemiştir.

Demirkiran ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada, atmosferik plazma sprey yöntemi ile AISI 304L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine NiCrAl, %70 NiCrAl + %30 MgZrO₃, %50 NiCrAl + %50 MgZrO₃, %30 NiCrAl + %70 MgZrO₃ ve %100 MgZrO₃ şeklinde derecelendirme yapılmıştır. Numunelere 800 °C ve 1000 °C'de oksidasyon deneyi yapılmıştır. 1000 °C'deki oksit tabakası ve oksidasyon hızı daha yüksek bulunmuştur.

Oyelayo ve Haselkorn (2002) tarafından yapılan çalışmada, çok tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretilerek, patent alınmıştır. Metalik altlık üzerine ilk olarak bor karbür gibi oksit içermeyen bir bor bileşiği, ikinci olarak oksit içeren ve içermeyen bor bileşikleri karışımı (örneğin bor karbür ve bor oksit) ve üst tabaka olarak oksit içeren bir bor bileşiği olan bor oksit PVD yöntemiyle biriktirilmiştir. Tabaka kalınlıkları çok küçüktür. Buna rağmen, elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin aşınma ve pitting (pullanma) direncinin çok iyi olduğu ifade edilmektedir.

Akhtar ve Guo (2008) yaptıkları çalışmada, değişik ağırlık oranlarında TiC ile güçlendirilmiş paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca fretting aşınması davranışı, farklı fretting aşınma şartlarında incelenmiştir. Mikroyapısal parametrelerin fretting aşınması üzerine etkileri araştırılmıştır.

Miyoshi ve diğ. (1999) paslanmaz çelik üzerine titanyum, titanyum karbür ve elmas benzeri karbon ile derecelendirilmiş bir tabaka meydana getirmişlerdir. Numunelere farklı ortam şartlarında kaymalı sürtünme ve fretting aşınması deneyleri uygulanmıştır. Nemli hava ve kuru azot içeren ortamlarda numunelerde çok az bir miktar aşınma gözlemlenirken, çok yüksek vakum altında şiddetli aşınma görülmüştür. Fonksiyonel derecelendirilmiş olan tabakanın fretting aşınması değeri homojen malzemeye oranla çok daha az olmuştur.

Chen ve diğ. (2001), ZA27 (Zn-ağ.%27 Al- ağ. %5 Si) alaşımını, santrifüj döküm yöntemi ile üreterek, elde edilen mikroyapı ile hem iç hem de dış tabakanın aşınma özellikleri incelemişlerdir.

Odeshi ve diğ. (2007), 6001-T6 Al alaşımını %10 ve %20 oranlarında alümina partikülleri ile güçlendirerek elde ettikleri kompozit malzemeyi, yüksek hızda çarpma deneyine tabi tutmuşlardır. Alümina ile güçlendirilmiş malzemelerde yüksek hızda çarpma sonucu çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca, yüksek şekil değiştirme oranlarında, alümina oranının artmasıyla plastik deformasyona karşı direncin arttığı bildirilmiştir.

Duque ve diğ. (2005) tarafından, AlB_2 partikülleri ile güçlendirilmiş ve santrifüj döküm yöntemiyle üretilmiş olan Al matrisli FDM'nin mikroyapı analizleri yapılmış ve malzemeye korozyon deneyi uygulanmıştır. Sertlik ölçümlerinde içten dışa doğru sertlik değerinin oldukça arttığı, yapılan korozyon deneylerinde ise Al matris

civarının güçlendirilmiş kısma oranla korozyondan daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir.

Gomes ve diğ. (2005), değişik oranlarda SiC partikülleri ile güçlendirilmiş Al matrisli FDM'ye yağlayıcısız ve %3 NaCl'nin yağlayıcı olarak kullanıldığı ortamda aşınma deneyleri uygulamışlardır. En yüksek partikül oranına sahip FDM'de, en az sürtünme ve aşınma değerleri elde edilmiştir. Tuzlu solüsyon, aşınma oranı üzerinde çok fazla etkili olmamıştır.

Watanabe ve diğ. (1999), ağırlıkça %5 Ti içeren Al-Ti alaşımını santrifüj döküm yöntemi ile kalın tüp şeklinde imal etmişlerdir. Elde edilen FDM'nin aşınma direncinin güçlendirilmemiş alüminyuma göre daha iyi olduğu ancak partikül yönlenmesinden dolayı kompozitin anizotropik bir aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

Chang ve Tarn (2007), tabakalı kompozit ve FDM'lerde uzama, burma ve eğilme durumları için formülasyon geliştirmişlerdir. Deformasyon ve gerilme analizi için çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Spencer (1998), elastisite modülü ve poisson oranının kalınlık boyunca değiştiği izotropik lineer elastik levhayı incelemiştir. Çalışmada, gerilme fonksiyonu hesabı için alternatif formülasyon verilmiştir.

Chi ve Chung (2006) tarafından yapılan çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş levhanın kalınlığının ortasından enine yüklenmesi durumu incelenmiştir. Poisson oranları sabit kabul edilmiş fakat elastisite modülünün sürekli bir biçimde kalınlık boyunca hacim oranına bağlı olarak kuvvet kuralı, sigmoid veya üssel olarak değiştiği varsayılmıştır. Klasik levha teorisi ve Fourier serisi açılımları temel alınarak, kuvvet kuralı (P-FDM), sigmoid (S-FDM) ve üssel (E-FDM) fonksiyonlarının seri çözümleri yapılmıştır. Sonuç olarak; eğilme rijitlik matrisi hariç olmak üzere, FDM levhanın çözümünde kullanılan formülasyonun homojen malzeme çözümündekine benzediği vurgulanmaktadır.

Jackson ve diğ. (1999), katı hal serbest form fabrikasyon işlemleri ile lokal kompozisyon kontrolü 100 µm'lik ölçülerde bile yapıldığını göz önüne alarak, bu özelliği genişletmek amacıyla parça geometrisi, topolojisi ve kompozisyon açısından bir modelleme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, katı modeli alt bölgelere

ayırmaya ve her bir bölgedeki kompozisyon fonksiyonları arasında analitik bir ilişkinin olduğu kabulüne dayanmaktadır.

Ke ve Wang (2007) tarafından yapılan çalışmada, kaymalı sürtünme temas analizinde çok tabakadan oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş model kullanılmıştır. FDM, pek çok alt tabakaya bölünmüş, düzlem şekil değiştirme şartlarında Poisson oranı sabit kabul edilirken kayma modülünün lineer fonksiyon şeklinde değiştiği kabul edilmiştir. Temas gerilmeleri ve temas alanı nümerik olarak çözülmüştür.

Sun ve diğ. (2004), FDM'lerin efektif elastik davranışlarını, mikromekanik yöntem kullanarak incelemiştir. Mikroyapıda partiküller rasgele dağılmış ve dereceli geçiş gösterdiği kabul edilmiştir. Modifiye edilmiş Green Fonksiyonu modeli kullanılarak, partiküller arası lokal gerilme ve şekil değiştirme alanları incelenmiştir.

Buryachenko ve Rammerstorfer (1998), FDM'yi eliptik inklüzyonlara sahip ve bu inklüzyonların konsantrasyonlarının koordinatların bir fonksiyonu olarak değiştiğini kabul ettikleri, lineer termoelastik kompozit malzeme olarak tanımlamışlardır. Multiparticle Effective Field (MEFM) yöntemi olarak adlandırdıkları hipotezlerinde, inklüzyonların yakınındaki efektif alanın homojen olduğunu kabul etmişlerdir. FDM'ler için genelleştirdikleri bir diferansiyel denklem tanımlamışlar ve sınır şartlarının etkilerini incelemiştir.

Mishnaevsky (2006), Al/SiC FDM'nin özelliklerini kullanarak, mesomekanik bir model geliştirerek simülasyonunu yapmış, deformasyon ve hasar gelişimi ile mikroyapı-dayanım ilişkisini incelemiştir.

Biesheuvel ve Verweij (2000), santrifüj dökümde elde edilebilecek kompozisyon hesaplamaları üzerinde çalışarak bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu model, santrifüj dökümde partikül dağılımının dönme moduna, kalıp yarıçapına, partikül boyutuna, yoğunluklara bağlı olarak değiştiğini ve uygulanan modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir.

Liu ve diğ. (1996), santrifüj dökümde elde edilebilecek partikül dağılımı üzerine model geliştirmişler ve geliştirdikleri model deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Partikül ve ergiyik arasındaki yoğunluk farkının ($\Delta\rho$) 0'dan büyük veya küçük olması, ergiyik viskozitesi, açılma hızı, katılma oranı gibi faktörlerin partikül dağılımını etkilediği görülmüştür.

Rassbach ve Lehnert (2000), FDM numunelerin sürekli kompozisyon değişimi olacak şekilde üretimini toz metalurjisi ile yapmışlardır. Üretilen FDM numunenin alt tabakalara ayrıldığı kabul edilerek, her bir kompozisyon için üretim yapılarak akma gerilmeleri bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilmiş akma gerilmesi değerleri kullanılarak, sonlu eleman yöntemine göre deformasyon davranışlarının tayini, simülasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır. Üretilen FDM numunelere de deformasyon uygulanmış, simülasyonda elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.

Durodola ve Attia (2000), fiber takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş dönen katı disk ve halkayı incelemiştir. FDM homojen olmayan bir ortotropik malzeme olarak modellenmiştir. Santrifüj kütle kuvveti etkisinde, sonlu elemanlar yöntemi ve direkt integrasyon yöntemiyle, diskteki deformasyon ve gerilme dağılımı nümerik olarak incelenmiştir.

Dao ve diğ. (1997), rastgele ve adımlı mikroyapılı FDM için sayısallaştırılmış bir mikromekanik model kullanmışlardır. Hem termoelastik hem de termoplastik deformasyon göz önüne alınmış ve metal tanelerinin plastik davranışı, kristal plastisite teorisi kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sürekli derecelendirilmiş FDM ile karşılaştırılmıştır. Hem mikromekanik hem de sürekli modelde, makroskobik gerilmeler yaklaşık aynı bulunmuştur. İstatiksel analiz sonucunda, artık gerilme konsantrasyonunun malzeme derecelendirilmesi ve FDM hacim oranına duyarlı olmadığı görülmüştür.

Reiter ve Dvorak (1998), derecelendirilmiş kompozit malzemenin, derecelendirme doğrultusunda üniform sıcaklık değişimi ve kararlı hal ısı iletimini, mikromekanik bir model oluşturarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Mikromekanik modellemenin sınırlamalarının olmasına rağmen, basit geometriye sahip FDM parçalarda ısıl özelliklerin belirlenmesinde çok kullanışlı olabileceği belirtilmiştir.

Buryachenko ve Rammerstorfer (1998) yaptıkları nümerik çalışmada, matris içerisinde istatiksel olarak rasgele yerleştirilmiş elipsoidal inklüzyon içeren bir model kullanmışlardır. İnküzyonlara yakın olan bölgelerde, çok parçalı efektif alan hipotezi kullanılarak, elastisite modülünün değişimi incelenmiştir.

Szymczyk (2005) tarafından, sonlu elemanlar yöntemi ile bir vana ve içten yanmalı motor pistonunun seramik kaplamaları nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada

gerekli mikro skala için, mikromekanik bir model geliştirilmiştir. Kaplama modellenirken, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin özelliklerinin lineer olarak değiştiği kabul edilmiştir.

Abrate (2008), klasik plak teorisinden yola çıkarak FDM'lerin homojen plaklar gibi davrandığını, izotropik ve ortotropik FDM plakaların analizinde (örneğin doğal frekans ve burkulma yüklerinin tespitinde) özel yöntemler ve programlar geliştirmenin gerekli olmadığını ileri sürmüştür.

Gao ve Wang (2000), santrifüj döküm yöntemiyle üretilen Al/SiC FDM için tek yönlü katılma modeli geliştirerek, sonlu hacimler yöntemiyle nümerik olarak modeli çözmüşlerdir.

Grujicic ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada, çok fazlı malzemeler için efektif mekanik, termal ve termomekanik özelliklerin belirlenmesi amacı ile bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Model kobalt-wolfram ikili malzemesinin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deney sonuçları ile uygulanan sonlu elemanlar modelinin, analitik çözümlere nazaran daha iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.

1.1.2 Fretting yorulması ile ilgili literatür çalışmaları

Bill (1982) tarafından yapılan çalışmada, fretting aşınmasını etkileyen faktörler incelenmiştir. Hoepfner (1992) tarafından yapılan çalışmada ise fretting yorulmasının meydana geldiği makine elemanları, fretting yorulmasına etki eden faktörler, fretting yorulma mekanizması, fretting yorulması şartlarında oluşan hasarlar ve fretting yorulması açısından yorulma ömrü incelenmiştir.

Datsyshyn ve diğ. (2004), temas halinde fretting yorulması şartları oluşan nümerik-analitik model oluşturarak, bu modeldeki pitting oluşumunu incelemişlerdir. Oluşturulan pitting oluşum modeli ve elde edilen teorik sonuçlar, türbinlerde kullanılan titanyum alaşımlarının pitting oluşumu ile uyum göstermiştir.

Dudek ve diğ. (2001), çelik altlık üzerine kaplanan TiC/VC tabakasının fretting aşınmasını incelemişlerdir. Fretting aşınması bakımından VC tabakası, TiC tabakasından daha dirençli bulunmuştur. TiC/VC tabakası için fretting aşınması değerinin tespitinde kullanılacak bir bağıntı geliştirilmiştir.

Lee ve diğ. (2004), artık gerilmelerin fretting yorulması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ti-6Al-4V alaşımını bilye bombardımanına tutarak oluşturulan artık gerilmelerin, fretting yorulması ömrünü uzattığı tespit edilmiştir.

Zhu ve diğ. (2001), fretting deneyi için yeni bir aparat tasarlayarak, etkiyen kuvvetin dik olarak değil açılı gelmesini sağlamışlar ve iki temel fretting modunun süperpozisyonunu elde etmişlerdir.

Giannakopoulos ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada, fretting olsun veya olmasın yorulma dayanımını düşüren faktörler incelenmiş ve fretting yorulmasında çatlak büyümesini tanımlamak amacıyla model bazlı kırılma mekaniği modeli geliştirilmiştir.

Hattori ve diğ. (2000) tarafından deneysel ve nümerik olarak yapılan çalışmada, fretting yorulması çatlak başlangıcı, aşınma ve çatlak ilerlemesi dahil olmak üzere, temas köşesindeki gerilme tekillik parametreleri kullanılarak ve kırılma mekaniğinde aşınma ile temas şartlarının değiştiği göz önüne alınarak simüle edilmiştir. Temas köşesi yakınlarında aşınmanın artmasıyla fretting yorulma limitinin azaldığı bulunmuştur.

Mirişa (2008) tarafından yapılan çalışmada, fretting olayının sistemin emniyetini güvenilirlik, kullanılabilirlik ve bakım-onarım bakımından dolayısıyla da kalite ve maliyet açısından etkilediği vurgulanmıştır. Sonlu elemanlar analiz yöntemiyle sistemde meydana gelebilecek hasarları modellemenin mümkün olabileceği, yöntemin özellikle fretting aşınması ve yorulması konularında kullanılabilirliği tartışılmıştır. Mil-göbek bağlantısının farklı ara yüzey geçme şartları ve göbek çaplarında fretting analizi SEM ile yapılmıştır.

Lindley (1997) tarafından yapılan çalışmada, fretting yorulması ile ilgili deneysel yöntemler gözden geçirilerek, seçilen numune ve temas pabuçları geometrileri ile test yöntemleri tanımlanmıştır. Deneysel olarak, çelik- çelik ve alüminyum-çelik numune ve pabuçlar kullanılarak, gerilme-tekrar sayısı diyagramları frettingsiz ve frettingli olarak çıkarılmıştır.

Majzoobi ve Jaleh (2007) tarafından yapılan çalışmada, alüminyum 7075 alaşımına fretting yorulma ömrünü arttırmak amacıyla nitrürleme ve titanyum kaplama yüzey işlemlerin uygulanmıştır. Nitrürlemenin malzemenin fretting yorulma dayanımını düşürdüğü görülmüştür. İki farklı yöntemle yapılan titanyum kaplamaların fretting

ömrünü düşük çalışma gerilmelerinde %77–85 oranında iyileştirdiği, yüksek çalışma gerilmelerinde ise bir etkisi olmadığı veya azalttığı görülmüştür. Sıcaklık kontrollü nitrürleme ve titanyum kaplama işlemlerinin ardı ardına yapıldığı çift yüzey işlemlerinin malzemenin fretting yorulma dayanımının düşük gerilmelerde %185, yüksek gerilmelerde ise %60'a kadar arttığı görülmüştür.

Navarro ve diğ. (2006), fretting yorulması açısından deneysel çalışmalara en yakın davranışa sahip modellemeyi bulmak için yaklaşım geliştirmişlerdir.

1.1.3 Kırılma mekaniği ile ilgili literatür çalışmaları

Oral ve diğ. (2007), statik karışık mod yükleme (Mod I + Mod II) altındaki çatlaklı FDM plaklarda çatlak başlama açılarını ve gerilim şiddet çarpanlarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesaplanmışlardır.

Chen ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada, malzeme homojensizliğinin standart J integrali üzerine etkisi analiz edilmiş, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme için FDM kesitinden bağımsız ve modifiye edilmiş J integrali tanımlanmıştır.

Hvizdoš ve diğ. (2007), $Al_2O_3 + 10\% ZrO_2$, $Al_2O_3 + 30\% ZrO_2$ ve $Al_2O_3 + 10\% ZrO_2$ karışımlarından EPD (elektroforezitik biriktirme) yöntemi ile üretilmiş ve basınç uygulanmadan sinterlenmiş olan numunelerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Numunelerin sertlik ve kırılma tokluğu, Vickers sertlik ölçme yöntemi yardımı ile ölçülmüştür. Termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğundan kaynaklanan ve tabakalara paralel veya dik oluşan çatlakların genişliği arasındaki farklar hesaplanmıştır. Tabakaların, termal şok direnci, çentik açma ile beraber su verme yöntemiyle ölçülmüştür. Elde edilen değerler, aynı imalat yöntemiyle üretilmiş olan tabakalandırılmamış malzeme ile karşılaştırılmıştır. Derecelendirilmiş malzeme, numune ara yüzeylerinde oluşan çatlakların kenarlara ilerlemesinin durması açısından çok iyi özellik göstermiştir.

Milan ve Bowen (2002), Al ve $Al+SiC_p$ malzemelerin yorulma çatlak büyüme direncine partikül boyutu, hacimce partikül oranı ve matris kompozisyonunun etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak; partikül hacimce oranı arttıkça hem artık gerilmelerin hem de elastik-plastik uyumsuzluğun arttığı, partikül boyutunun artması ile artık gerilmelerin ve plastik uyumsuzluğun azaldığı, matris malzemesinin akma

gerilmesinin artması ile artık gerilmelerin arttığı ve plastik uyumsuzluğun azaldığı görülmüştür.

Tokaji (2005) tarafından yapılan çalışmada, %10 SiC+2014 alüminyum alaşımı toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. 20 Hz frekansta, R=-1'de kompozit ve Al alaşımı aynı yorulma dayanımını gösterirken, gerilme oranı arttıkça (R=0 ve R=0,4) Al alaşımı ile kompozitin yorulma dayanımı ile aradaki fark artmıştır. R=0 ve R=0,4'de çatlaklar genellikle ara yüzeylerde ya da partikül kırılmasından dolayı başlamıştır. R=-1'de ise çatlaklar hem partikül ile matris ara yüzeylerinden hem de matris içindeki tekrarlı kayma deformasyonuna bağlı olarak başlamıştır. Ayrıca, SiC partikül boyutu arttıkça yorulma dayanımı düşmüştür.

Xu ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada, alüminyum tozu ile sırasıyla %5,10,15,20 ve 30 oranlarında karıştırılan SiC tozları ayrı ayrı ön şekillendirmeye tabi tutulmuş, ardından bu farklı tabakalar sıcak preslenerek FDM elde edilmiştir. Numunelere 20 Hz frekans, R=0,1, 0,3, 0,5 ve 0,7 şartlarında 3 noktadan eğmeli yorulma deneyi uygulanmıştır. Gerilme oranı arttıkça, yorulma çatlak ilerleme hızı artmıştır. Düşük oranda SiC içeren kısımdan yüksek oranda SiC içeren kısma doğru çatlağın gecikmeli olarak büyüdüğü, yani çatlak büyüme hızının azaldığı görülmüştür.

Kaynak ve Boylu (2006) tarafından yapılan çalışmada, sıkıştırma döküm yöntemiyle %12 Si içeren Al matris içerisine hacimce %15 SiC karıştırılarak alüminyum matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Elde edilen numunelere R=0,1, f=15Hz, maksimum gerilmenin 200, 225 ve 250 MPa olduğu şartlarda, 3 noktadan eğme deneyi uygulanmıştır. Artan SiC oranı ile sertlik, eğilme mukavemeti ve yorulma direnci artmıştır. Çatlaklar, partikül ile matris ara yüzeylerinden ve/veya büyük partiküllerin kırılmasından dolayı başlamıştır. SiC partiküllerinin çatlakların önünde bariyer oluşturarak çatlak ilerleme hızını azalttığı ve bununla birlikte malzemenin yorulma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Erdogan (1996) tarafından yapılan çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kırılma mekaniği ile ilgili temel problemler tanımlanmıştır. Çatlak civarındaki problemlerin çözümü ile ilgili genel yöntemler geliştirilmiş; çatlak problemlerinin çözümü homojen ve kısmi homojen malzemelerin çözümleriyle karşılaştırılmıştır.

Lee ve Erdogan (1998) tarafından yapılan çalışmada, bir ara yüzey çatlağı bulunan derecelendirilmiş kaplamaya sahip homojen malzemede, düzlem şekil değiştirme halinde termal gerilme problemi göz önüne alınmıştır. Altlık homojen malzeme olarak süper alaşım, derecelendirilme ise süper alaşımdan parçalı olarak stabilize edilmiş zirkonya ile (ZrO_2) yapılmıştır. Kaplama yüzeyi yüksek sıcaklık şartlarına, altlık yüzeyi ise cebri soğutma şartlarına maruzdur. Çatlak yüzeylerinin bölgesel olarak yalıtıldığı farz edilmiştir. Termal gerilme problemi, kaplamada çeşitli kompozisyon profilleri için çözülmüştür. Yüzeyde sıcaklık dağılımı, Mode I ve Mode II gerilme şiddet faktörleri ve şekil değiştirme enerjisi oranı hesaplanmıştır.

Weichen (2005) yaptığı çalışmada, sabit çatlak ilerleme hızı şartlarında, efektif kayma modülü ve kütle yoğunluğunu kullanarak dinamik enerji salıverme oranı üzerinde fonksiyonel derecelendirmenin etkisini tartışmıştır.

Yıldırım ve diğ. (2005), FDM kaplamada üç boyutlu yüzey çatlağı problemini incelemişlerdir. Mekanik veya geçişli ısıl yükleme altında Mode I şartında inceleme yapılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi, ısıl ve yapısal problemi çözmek için kullanılmıştır.

Kolednik (2000) yaptığı çalışmada, derecelendirilmiş malzemede akma gerilmesi gradyanının çatlak davranışı üzerine etkisinin açıklanabilmesi için analitik bir model çalışmıştır. Modelleme ile elde edilen sonuçlar, deneysel ve nümerik analiz sonuçlarıyla uyum göstermiştir.

Noda (1999) yaptığı çalışmada, FDMlerde oluşan termal gerilmelerin azaltılması için optimal kompozisyon profili problemini ele almıştır. Seramik ve metal arasındaki kompozisyon değişimi sürekli olursa, FDMlerde oluşan termal gerilmelerin ve bir çatlak civarındaki termal gerilme şiddet faktörünün şiddetli bir şekilde düşebileceği sonucuna varılmıştır.

Jin ve Batra (1998), ani soğumaya maruz bırakılmış olan FDM'de oluşan termal çatlaklar ve termal gerilmeler analiz edilmiştir. Malzemenin kayma modülü, termal şok verilen yüzeyde en büyük değerde olup, hiperbolik olarak azalmaktadır. Isı iletimi katsayısı ise üssel olarak değişmektedir. Isıl gerilme yığılma faktörü, yüzeydeki bir kenar çatlağı için hesaplanmıştır. Isıl gerilme yığılma faktörüne kayma modülünün etkisi olmamakla beraber, ısı iletim katsayısı değişimi ile azaldığı görülmüştür. Isı iletim gradyanı ile en büyük ısıl çekme gerilmesi azalmıştır.

Guler ve Erdogan (2007) tarafından yapılan çalışmada, parabolik ve silindirik numunelerde derecelendirilmiş yüzeyin temas problemleri incelenmiştir. Derecelendirilmiş malzemede yorulma ve kırılmalara neden olan ve ayrıca malzemenin homojen olmaması nedeniyle boyuta bağlı olarak değişkenlik gösteren sürtünme katsayısının etkisi göz önüne alınarak, analitik çözüm geliştirilmiştir.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, alüminyum 2014 alaşımı ile ağırlıkça %20 (hacimce %15) oranında ve ortalama 9 µm tane boyutundaki SiC partikülleri karıştırılarak, savurma döküm yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi yapılmıştır. Elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mikroyapıları incelenmiş ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Fonksiyonel derecelendirmenin malzemenin aşınma, yorulma, fretting yorulması ve yorulma çatlak ilerlemesi davranışlarına etkisi incelenmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında santrifüj dökümle üretilmiş FDMlerin fretting aşınması üzerine çalışmalar olduğu halde, fretting yorulması analizi ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Buradan yola çıkılarak, literatürdeki boşluğun doldurulması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, hem deneysel hem de nümerik çalışmalar yapılmıştır.

1.2.1 Deneysel çalışmalar

İlk olarak santrifüj döküm yöntemi ile FDM üretimi yapılmıştır. FDM silindirlerin et kalınlığı boyunca iç yapısı ve sertlik dağılımı incelenmiştir. Üretilen silindirlere et kalınlığı boyunca lamalar çıkarılmıştır. Bu lamaların dilimlenmesiyle elde edilen numunelere çekme, aşınma, yorulma, fretting yorulması ve yorulma çatlak ilerlemesi deneyleri uygulanmıştır.

1.2.2 Nümerik çalışmalar

Deneysel çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak, FDMlerin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışını modellemeye yönelik çalışmalar ile fretting modellemesi çalışmaları ANSYS 10.0 programında yürütülmüştür. Çatlak ilerleme

deneylerinden elde edilen verilerle, FRANC2D programında yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Deneysel Çalışmalar

2.1.1 Deney malzemesi seçimi ve üretimi

Alüminyum matrisli FDM'ler ile ilgili araştırmalar son zamanlarda oldukça fazladır. Alüminyum alaşımları hafifliği, yüksek dayanım ve tokluğu, iyi korozyon özellikleri, yaşlandırma ile dayanımının artırılabilirliği gibi özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Chawla ve Chawla, 2006; Dikici ve diğ., 2006; Cantor ve diğ., 2004). Ayrıca alüminyum alaşımları, süneklik ve sertlik, geliştirilmiş dayanım ve rijitlik kombinasyonu nedeniyle metal matrisli kompozitler için matris malzemesi olarak tercih edilmektedir (Chawla ve Chawla, 2006; Miracle, 2001).

Güçlendirici seramik malzemeler fiber, kısa fiber, whiskers ve partikül halinde olabilmektedir. Güçlendirici seramik partikül olarak en yaygın kullanılan malzemeler SiC, Al₂O₃, TiC, B₄C, TiB, WC vb. olarak sıralanabilir. SiC partikülleri yüksek sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra ucuzluğundan dolayı en fazla tercih edilen güçlendiricidir (Chawla ve Chawla, 2006; Cantor ve diğ., 2004; Miracle, 2001).

Günümüzde havacılıkta kullanılan motorlarda, 12 µm'den küçük boyuttaki SiC ile güçlendirilmiş 2000 ile 6000 serisi alüminyum matrisli kompozitlerin kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Dayanım, süneklik ve sertlik kombinasyonları açısından ağırlıkça %15-25 oranında SiC takviyeli kompozitlerin en iyi sonuçları verdiği belirtilmektedir (Chawla ve Chawla, 2006).

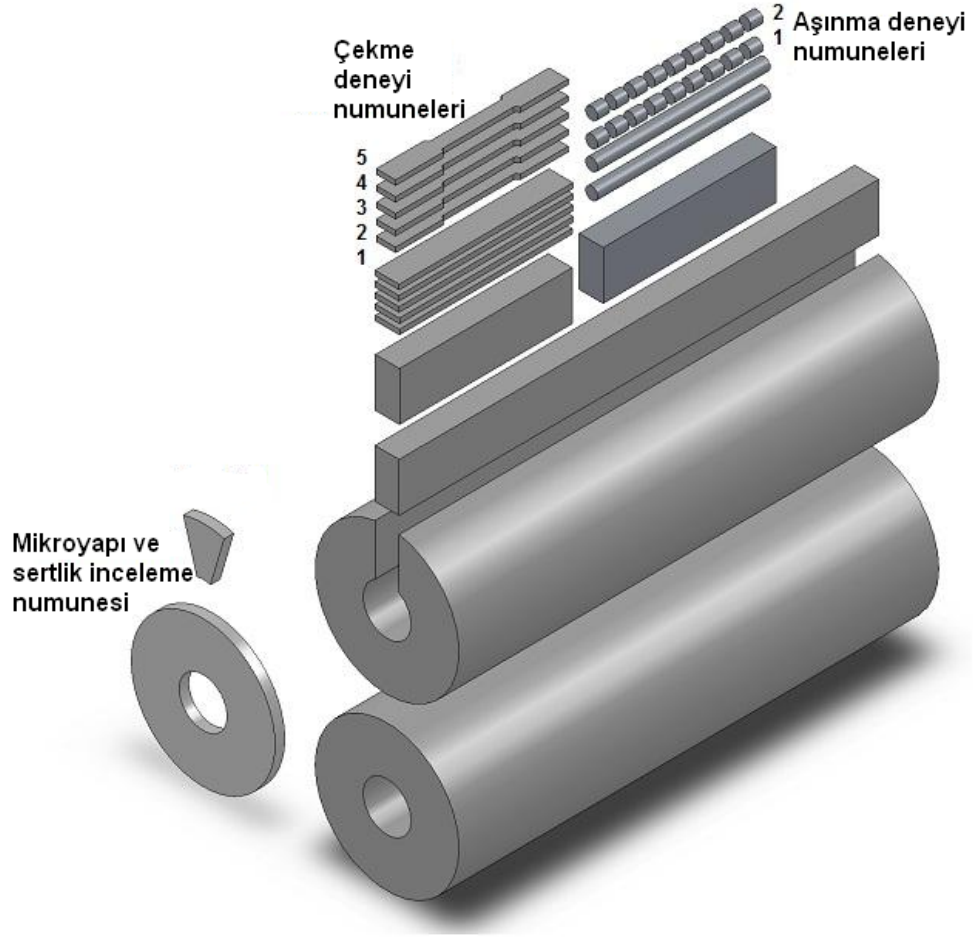
Bu çalışmada, 1939 yılındaki ilk üretiminden günümüze değin yaygın olarak kullanılan (Dasgupta, 2005) 2014 alüminyum alaşımı ile 9 µm boyutundaki SiC tanecikleri karıştırılarak savurma döküm yöntemi ile dökülmüştür. Tablo 2.1'de kimyasal kompozisyonu verilen alüminyum 2014 alaşımı külçeler, İzmir Işıkkent Dökümcüler Sitesi'nde Binka Alüminyum Döküm firmasına ürettirilmiştir. 9 µm boyutundaki SiC temini yine İzmir'de General firmasından yapılmıştır.

Tablo 2.1 : Alüminyum 2014 alaşıminın kimyasal kompozisyonu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1,18	0,48	4,9	1,04	0,57	0,009	0,30	0,03	Kalan

Deney numuneleri için gerekli döküm, İzmir Işıkkent Dökümcüler Sitesinde Özacar Metal'e yaptırılmıştır. Alüminyum külçeler tartılarak ocağa konmuştur. Alüminyum ergidikten sonra (yaklaşık 635 °C), literatürdeki daha önce yapılmış olan çalışmalardaki gibi, sıcaklık 700 °C'ye çıkarılmış ve ağırlıkça %20 (hacimce %15) oranında SiC tozu yavaşça ilave edilerek karıştırılmıştır (Özdin ve Şahin, 2006).

Dökümden önce, kalıp ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Potaya alınan ergiyik, tartıldıktan sonra 2650 d/dak hızla dönen kalıba dökülmüştür. 3 dakika sonra dönme işlemi bitirilmiş ve malzeme kalıpta soğumaya bırakılmıştır. 20 dakika sonra kalıptan çıkarılmıştır. Bu şekilde 5 tanesi FDM, bir tanesi de sadece 2014 alaşımı olmak üzere toplam 6 adet boru üretilmiştir. Silindirlerin 1-5 arası numaralandırılmış olanları FDM, 6 numaralı olanı ise Al 2014 alaşımıdır. Üretilen silindirlerden mikroyapı, sertlik dağılımı, çekme, aşınma, yorulma, fretting yorulması ve çatlak ilerlemesi deneyleri için gerekli olan numuneler talaşlı imalat yolu ile çıkarılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Silindirlerden numunelerin çıkarılışı

2.1.2 Mikroyapı incelemesi

Elde edilen silindirlerden 10 mm kalınlığında parçalar kesilerek mikroyapı incelemesi için numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.1). Numuneler 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 gridlik SiC zımparalar ile zımparalanmış ve önce 9 μm ardında 3 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Keller's solüsyonu (190 ml saf su + 5 ml HNO_3 + 3 ml HCl + 2 ml HF) ile dağlamalar yapılarak mikroyapı optik mikroskopta görüntülenmiştir.

2.1.3 Sertlik dağılımı incelemesi

Sertlik ölçümleri, Vickers sertlik ölçüm cihazında 20 kg yük altında ve 10 s bekleme süresi şartlarında yapılmış, 3 ölçümün ortalaması alınmıştır.

2.1.4 Çekme deneyi

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, dikdörtgen lamalardan ince testere ile 6 mm kalınlığında dilimler çıkarılmış, bunlar daha sonra ince frezeleme ile 5 mm kalınlığa indirilmiştir. Çekme numuneleri frezede işlendikten sonra, numunelerin yüzeyi keçe ile parlatılarak, yüzey pürüzlülükleri hepsi için aynı seviyeye ($R_a \approx 0,5 \mu\text{m}$) getirilmiştir. Numuneler, silindirin iç kısmından dış kısmına doğru 1’den başlayarak numaralandırılmıştır. Çekme deneyi numuneleri hazırlanırken, tabakaların karışmaması için her bir tabakanın alt-üst markalama ve işaretlemesine dikkat edilmiştir.

Çekme deneyi Instron marka çekme-basma cihazında 1mm/dak çekme hızında, video ekstansiyometre kullanılarak yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda, herbir tabakanın akma sınırı (R_e), çekme dayanımı (R_m) ve elastisite modülü (E) değerleri elde edilmiştir.

2.1.5 Yaşlandırma ısı işlemleri

SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden elde edilen numunelere, yapılan literatür çalışması sonucunda 2 farklı çalışmada yer alan ve alüminyum matrisli ve SiC takviyeli malzemelerin sertlik ve çekme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiş olan 2 ayrı yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan bu yaşlandırma işlemleri metin içerisinde I1 ve I2 olarak adlandırılmıştır:

I1- 500 °C’de 3 saat fırında bekletme + suda soğutma + 145 °C’de 10 saat fırında bekletme + suda soğutma, (Quadrini, 1993)

I2- 495 °C’de 8 saat fırında bekletme + suda soğutma + 180 °C’de 3 saat fırında bekletme + suda soğutma, (Dasgupta, 2005).

2.1.6 Aşınma deneyi

Fretting olayının başlangıcında, adezyon daha sonra abrazyon aşınma mekanizması etkili olmaktadır. Farklı ısı işlemler ile malzemelerin aşınma dirençleri artabilmektedir. Bölüm 2.1.5’de belirtildiği üzere, alüminyum 2014 alaşımı ile SiC tozlarının karışımından elde edilmiş olan kompozitlere uygulanmış 2 farklı yaşlandırma ısı işlemi saptanmıştır. Ancak mevcut numunelerin yorulma ve fretting

yorulması deneyleri için az sayıda olmasından dolayı, bu iki işlemin hangisinin aşınma direnci üzerinde daha etkili olduğunu görebilmek amacıyla kuru ve ıslak sürtünme şartları altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneyleri ASTM G99-05 (2010) standardına uygun olarak Plint marka pim-disk aşınma deney cihazında, kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır. FDM silindirden $\text{Ø}12,5 \times 12,5$ mm ölçülerinde çıkarılan numuneler pim, $\text{Ø}60 \times 16$ mm ölçüsünde AISI 2080 malzeme ise disk olarak kullanılmıştır. Disk malzemesinin sertliği, ostenitlenip yağda soğutma işlemi sonucu 62HRC olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.2’de aşınma deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.2: Aşınma deneyi düzeneği

Aşınma deneyleri kuru sürtünme şartı altında iki farklı yük (91 N ve 140 N) ve iki farklı kayma mesafesinde (75 m ve 375 m) yapılmıştır. Yağlayıcı olarak su kullanılan aşınma deneyleri ise iki farklı kayma mesafesinde (1205 m ve 2336 m) ve yine iki farklı yük (91 N ve 140 N) altında gerçekleştirilmiştir. Dökülmüş ve yaşlandırma işlemi yapılmış olan numuneler, SiC’ce zengin olmayan iç çapa yakın bölgelerden ve SiC’ce zengin olan dış çapa yakın bölgelerden alınarak sırasıyla 1 ve 2 olarak numaralandırılmıştır (Şekil 2.1).

2.1.7 Yorulma deneyleri

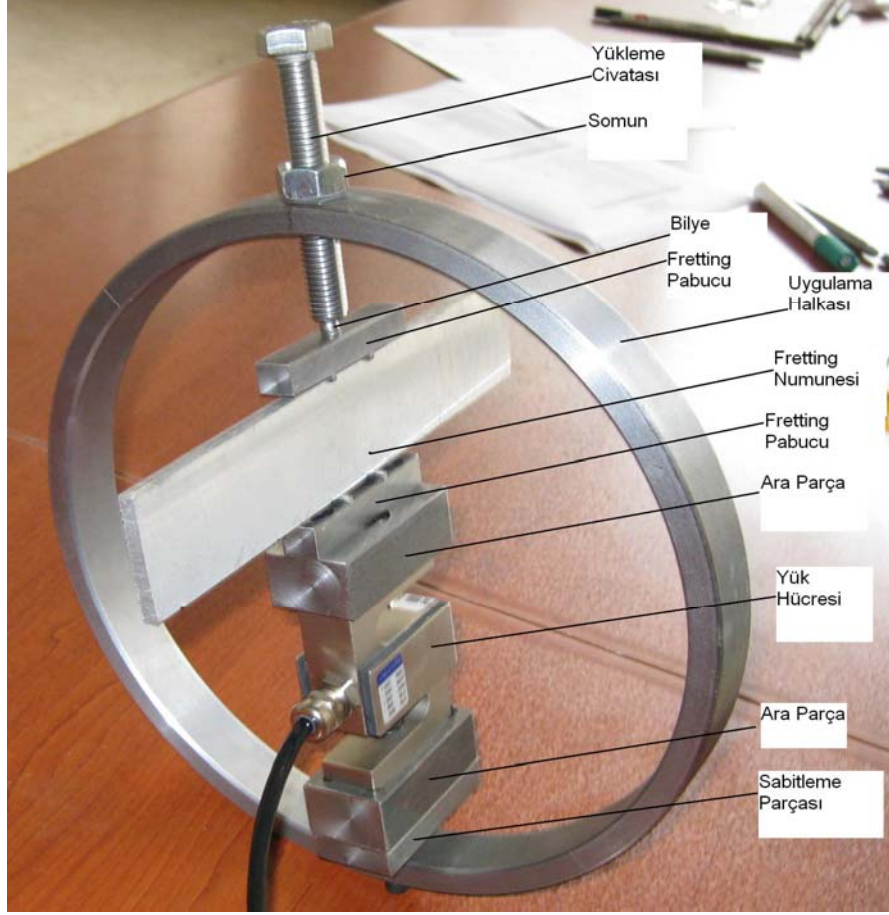
Numunelerin talaşlı imalatla işlenmesinin çok güç olması ve kenarlardan kırılmalar meydana gelmesi nedeniyle deney numuneleri Şekil 2.3’de görüldüğü gibi düz numuneler şeklinde hazırlanmıştır.

2.1.8 Fretting deneyi

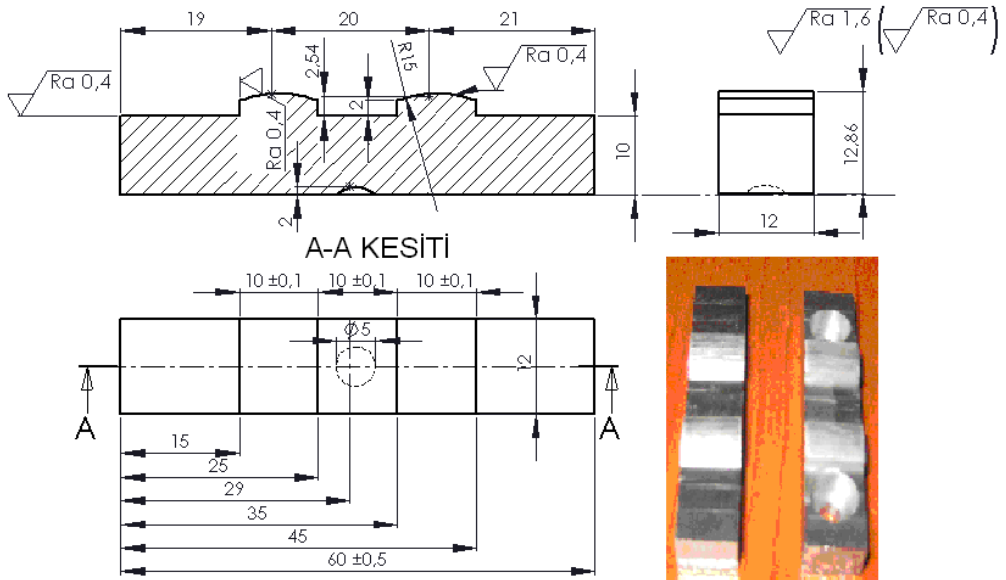
Literatürde, fretting deneyi ile ilgili standart bir uygulama düzeneği bulunmamakla beraber, deney cihaz veya aparatı tasarımında dikkate alınabilecek tavsiye edilen değerler ve ölçüler verilmektedir (Rayaprolu ve Cook, 1992; Tilbrook, 2005). Tavsiye edilen değerler ve ölçüler göz önüne alınarak, Şekil 2.4-2.6'da görülen fretting aparatı tasarlanmış ve imalatı yaptırılmıştır. Fretting pabuçları AISI 2080 takım çeliğinden düz ve silindirik olmak üzere 4'er çift imal edilmiş, 900 °C'de 30 dakika bekletilip yağda soğutulularak sertleştirilmiştir. Isıl işlem sonucunda pabuçlarda elde edilen sertlik değerleri yaklaşık 60–62 HRC'dir. Ara parçalar S235, uygulama halkası ise dökme çelikten işlenmiştir.

Fretting için gerekli olan normal yük, yükleme civatasının sıkılarak sabitlenmesiyle elde edilen ön gerilmeyle elde edilmektedir. Civatanın ucu, bilyenin oturabilmesi için yuvarlatılmıştır. Böylece, ön yükleme kuvveti pabucun üst orta kısmına bilye vasıtasıyla düzgün olarak uygulanmaktadır. Uygulanan kuvvet, yük hücresi ve indikatörü vasıtasıyla görüntülenebilmektedir.

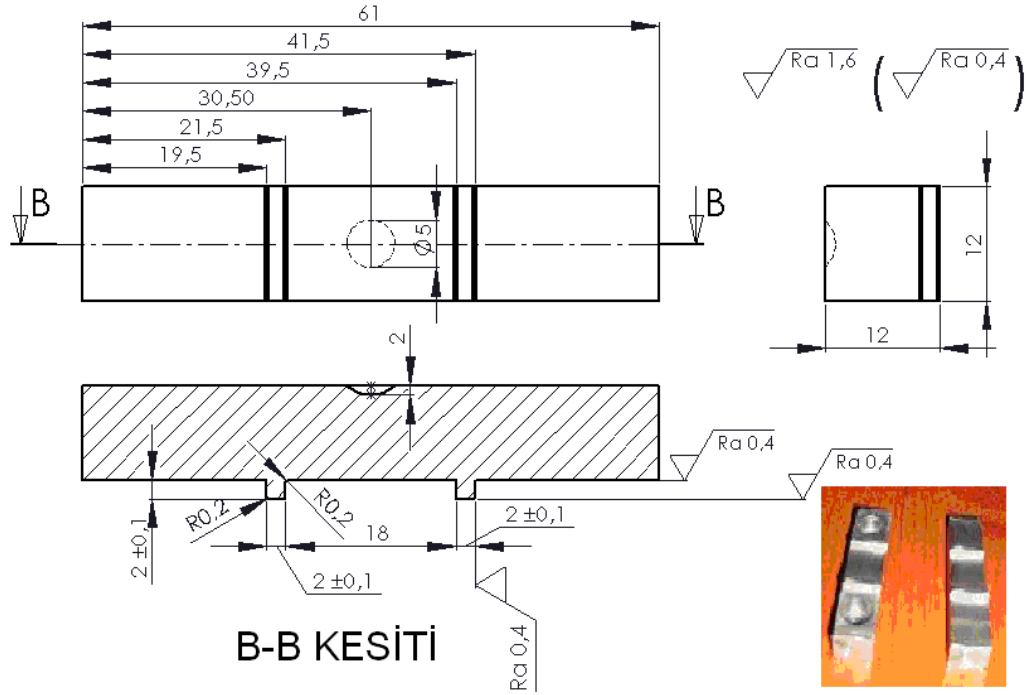
Fretting deneyleri her bir numune için yorulma deneyi ile aynı zorlanma şartlarında, yüzeyden ise düz pabuçlarla 105 kg (± 5 kg) ve silindirik pabuçlarla 42 kg (± 5 kg) yük uygulanarak yapılmıştır. Düz-düz yüzey ve düz-silindirik yüzey temas gerilmeleri hesaplanarak, uygulanan kuvvetin ayarlaması yapılmıştır. Böylece her bir pabuç ayağı altında oluşan gerilme yaklaşık 50 MPa olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.4: Fretting deney aparatı



Şekil 2.5: Silindirik fretting pabuç ölçüleri

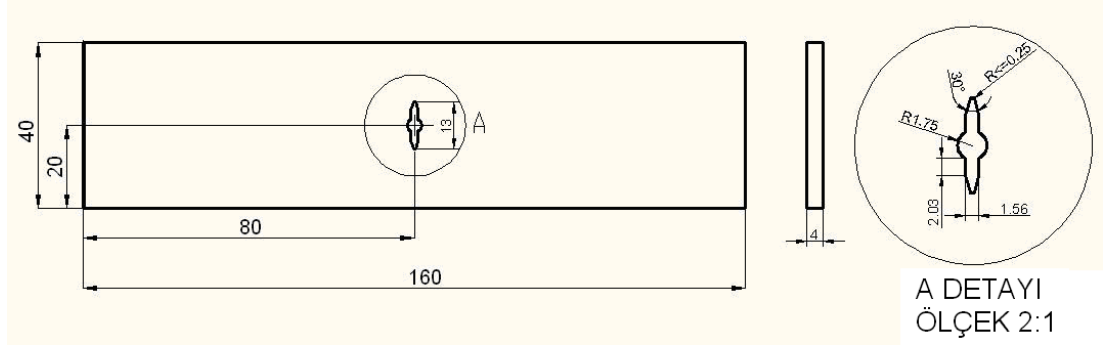


Şekil 2.6: Düz fretting pabuç ölçüleri

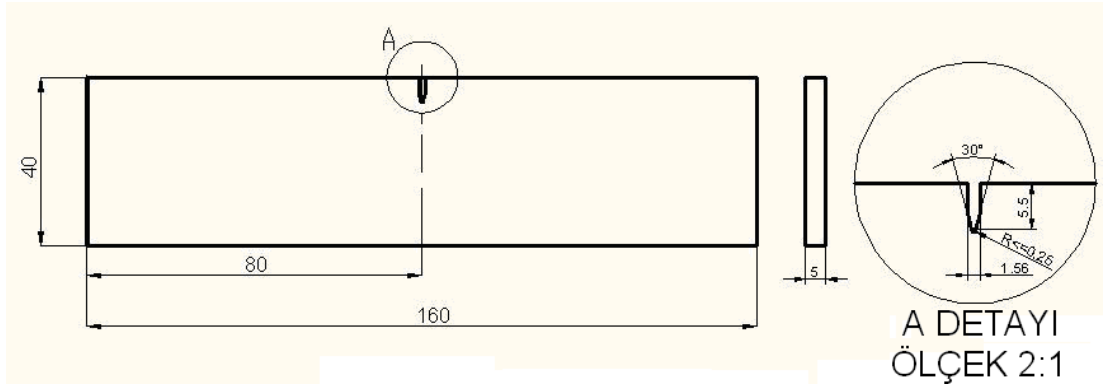
2.1.9 Yorulmalı çatlak ilerleme deneyleri

Çatlak ilerlemesi deneyleri için 3 ayrı grup halinde numune hazırlanmıştır. Numunelerin silindirlere elde edilişi Şekil 2.3'de görülmektedir. 1. grup numuneler, çekme deney numunelerine benzer şekilde silindirlere et kalınlığı boyunca tabakalar halinde elde edilmiştir. Herbir tabakada farklı oranlarda olan SiC dağılımının etkisini et kalınlığı boyunca görebilmek amacı ile 1. grup numunelere merkez çatlak açılmıştır. 2. ve 3. grup numuneler, yorulma deneyi numunelerinden elde edilmiştir. SiC'ce zengin olan ve olmayan taraflar arasında çatlak ilerlemesi parametrelerinin değişimini görebilmek amacıyla 2. gruba SiC'ce zengin 3. gruba ise alüminyumca zengin olan taraftan kenar çatlak açılmıştır.

Merkez çatlaklı (Middle Tension, M(T)) ve tek kenar çatlaklı (Single Edge Tension, SE(T)) numuneler, ASTM E647 (2011)'ye göre hazırlanmıştır. Numuneler, lazer kesim metodu ile İzmir'de faaliyet gösteren Örnek Kalıp firması tarafından işlenmiştir. Şekil 2.7 ve 2.8'de açılan çatlak geometri ve boyutları görülmektedir.



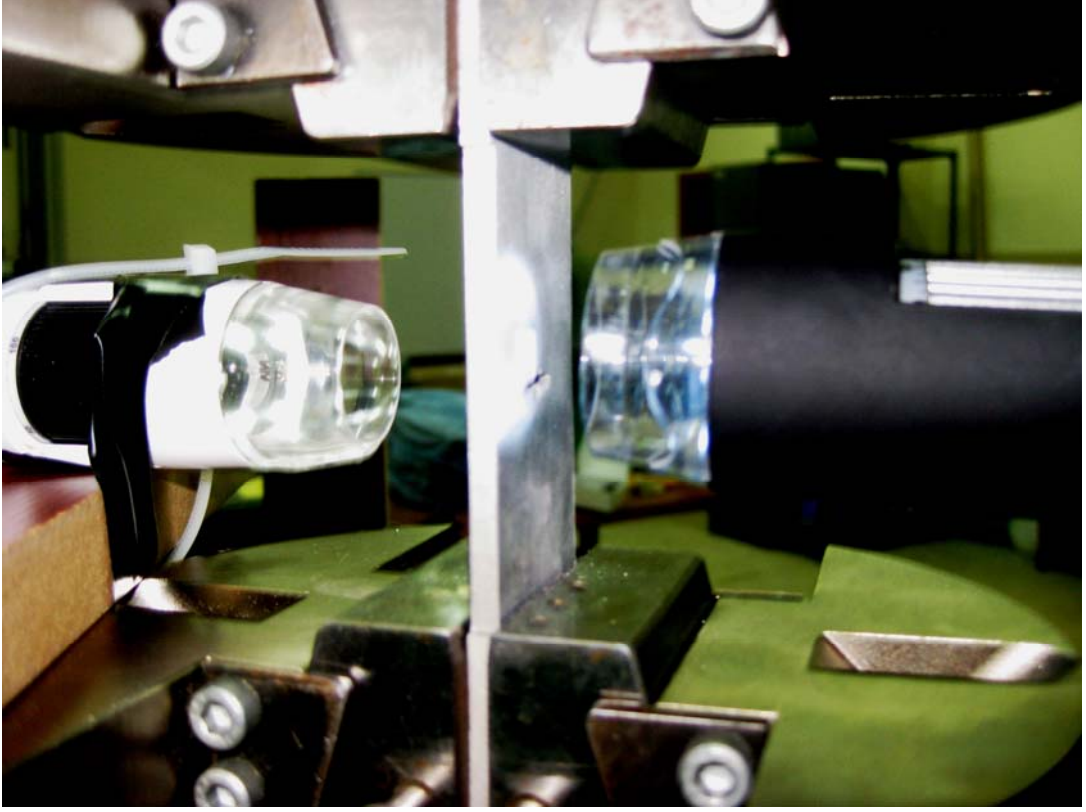
Şekil 2.7: Merkez çatlaklı numune geometri ve ölçüleri



Şekil 2.8: Kenar çatlaklı numune geometri ve ölçüleri

ASTM E647 (2011) standartına göre numunelere açılacak çatlak boyunun en az $0.2W$, numune boyunun ise $L > 0.3W$ olması önerilmektedir. Burada W numuneye ait genişliği ifade etmektedir. Numune genişlikleri merkez çatlaklı numuneler için aynı olmakla beraber, kenar çatlaklı numunelerde silindir et kalınlıklarına göre farklılık göstermektedir.

Merkez çatlaklı numunelere açılan çentik boyu $2a=13$ mm, kenar çatlaklı numunelere açılan çatlak boyu $a=5,5$ mm'dir. Bu gruptaki numunelere hem çekme deneyi hem de yorulmalı çatlak ilerleme deneyi uygulanmıştır. Çentik ucundan başlayacak olan çatlak ve bu çatlağın ilerleyişinin tespiti için Şekil 2.9'da görülen 2 adet dijital portatif mikroskop kullanılmıştır. Böylece hem çatlak başlama hem de ilerleme durumu tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.9: Çatlak ilerleme durumunun tespiti için kullanılan mikroskoplar

Homojen malzemelerde, tekrarlı yüklemeler sonucunda çatlak ucunda meydana gelen gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasında (ΔK) uygulanan maksimum (P_{maks}) ve minimum (P_{min}) yükler göz önünde bulundurulmaktadır (Denklem 2.1) (ASTM E647 (2011));

$$\begin{aligned} R > 0 &\Rightarrow \Delta P = P_{\text{maks}} - P_{\text{min}} \\ R \leq 0 &\Rightarrow \Delta P = P_{\text{maks}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Böylece ΔK ,

$$2a/W < 0.95 \Rightarrow \Delta K = \frac{\Delta P}{B} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \cdot \alpha}{2}} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (ASTM E647 (2011)). $\alpha=2a/W$ 'dir. Numunelere uygulanan maksimum ve minimum yük miktarı oranı, R, hem ΔP hem de ΔK hesaplamalarında önem kazanmaktadır (Denklem 2.3). Yorulmalı çatlak ilerleme deneylerinde $R=0,1$ ve frekans $f=5$ Hz olarak alınmıştır.

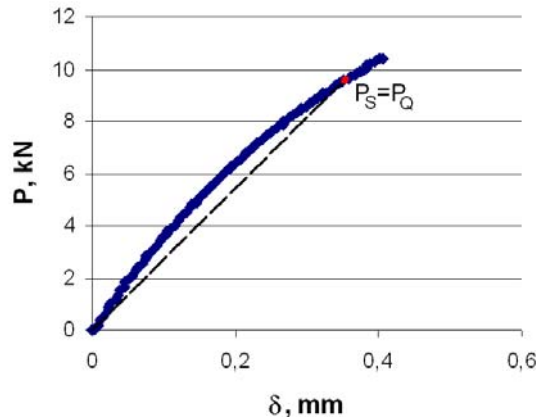
$$R = \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{maks}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{maks}}} = \frac{K_{\text{min}}}{K_{\text{maks}}} \quad (2.3)$$

Uygulanan maksimum yük, silindirik malzemenin kalınlığı boyunca değişen mekanik özellikleri göz önüne alınarak en az akma dayanımına (R_{emin}) göre belirlenmiş ve $\sigma_{maks} = 0,3xR_e$ olarak alınmıştır. $2a/W < 0,95$ durumu için, merkez çatlaklı olarak hazırlanan ve silindirin et kalınlığı boyunca tabakalar halinde çıkarılmış olan numuneler için gerekli olan hesaplamalarda, her bir numune kendi içerisinde homojen kabul edilerek, 2.1 ve 2.2’de verilen denklemler kullanılmıştır. $2a/W \geq 0,95$ olması durumunda çatlağın kararsız hale geldiği kabul edilir ve muhtemelen kopma meydana gelir (Ergun, 2009).

Kenar çatlaklı olarak hazırlanan numunelerde açılan çentikler, malzemenin derecelendirme doğrultusuna paraleldir. Konu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalarda, derecelendirme profilinin gerilme şiddet faktörü üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir. Bu yüzden homojen malzemeler için kullanılan formüller, FDMler için değişiklik göstermektedir.

2.1.9.1 K_C ’nin belirlenmesi

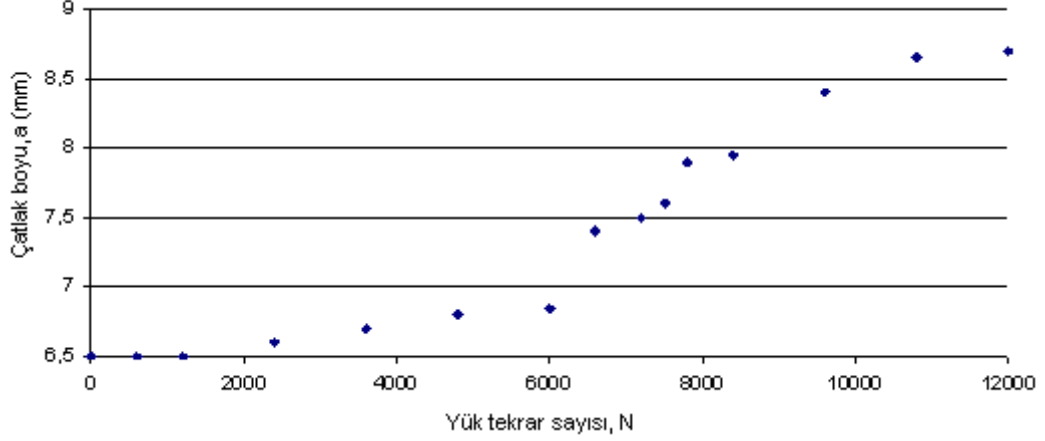
4 ve 5 numaralı FDM’lerde K_C değerinin tespiti için merkez çatlaklı ve kenar çatlaklı numunelere çekme deneyi uygulanmış ve P- δ grafikleri elde edilmiştir. K_C ’ye denk gelen yükü bulmak için Şekil 2.10’deki yük grafiğine %5 daha az eğimli bir doğru orjinden başlayarak çizilmiş ve doğrunun deney eğrisini kestiği yere karşılık gelen yük P_S olarak kaydedilmiştir. Yük-açılma diyagramında P_S ’den önce gelen ve P_S ’den daha büyük bir yük yoksa $P_S = P_Q$ alınmaktadır. P_Q , K_C hesabında kullanılacak olan yük değeridir. Lineer elastik kırılma mekaniği için $P_{maks}/P_Q < 1,1$ koşulunu sağlayan deney sonuçları geçerli sayılmıştır (Uğuz, 1996).



Şekil 2.10: P_S ve P_Q değerlerinin yük-deplasman diyagramı üzerinde tespiti

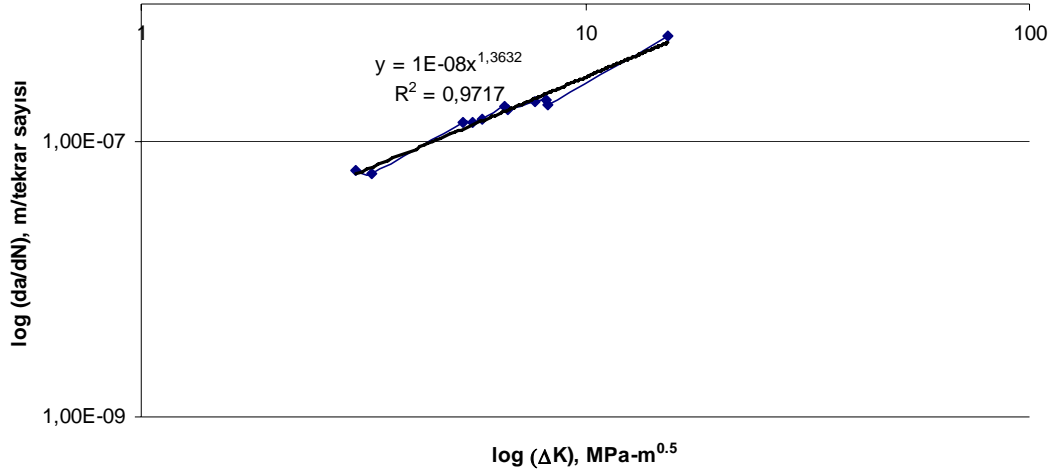
2.1.9.2 Çatlak ilerleme parametrelerinin (c ve m) tespiti

Bu çalışmada c ve m katsayıları bulunurken, yorulma deneyi esnasında her bir çatlak ilerlemesine karşılık gelen tekrar sayısı, deneyler sırasında mikroskop kameraların yaptığı kayıtlardan elde edilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Çatlak ilerleme - tekrar sayısı diyagramı

Elde edilen sonuçlarla, Denklem 2.2 vasıtasıyla gerilme şiddet faktörü (ΔK) hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Excel programında logaritmik olarak çizdirilerek c ve m katsayıları bulunmuştur (Şekil 2.12). Örnek grafikten elde edilen değerler $c=10^{-8}$ ve $m=1,3632$ 'dir (Uğuz, 1996; Ergun, 2009).



Şekil 2.12: c ve m katsayılarının hesaplanması

2.2 Nümerik Çalışmalar

Bu bölümde homojen ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler için yorulma, fretting ve kırılma mekaniği konuları ile sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yazılımları ve bu yazılımlar vasıtası ile yapılmış olan modelleme çalışmaları anlatılmıştır.

2.2.1 Yorulma

Yorulma, malzemelerin zamanla değişen gerilmeler altında, çekme deneyindeki kopma değerinin altındaki bir gerilmeye plastik şekil değiştirmeden gevrek şekilde kırılması olayıdır (Can, 2006). Gerilmeler, zamanla değişimine göre statik gerilme, tam değişken gerilme, dalgalı değişken gerilme ve genel değişken gerilme olarak dörde ayrılabilir. Ortalama gerilme (σ_{ort}) ve gerilme genliği (σ_g) ile ilgili bağıntılar;

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.5)$$

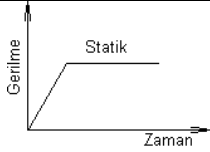
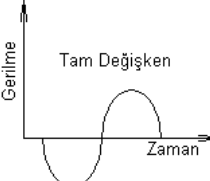
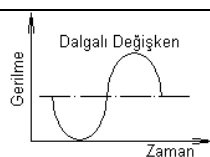
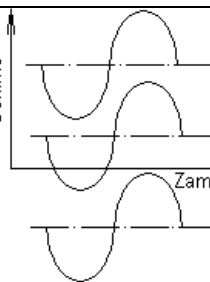
şeklindedir. Tablo 2.2’de zamana bağlı gerilme çeşitleri görülmektedir.

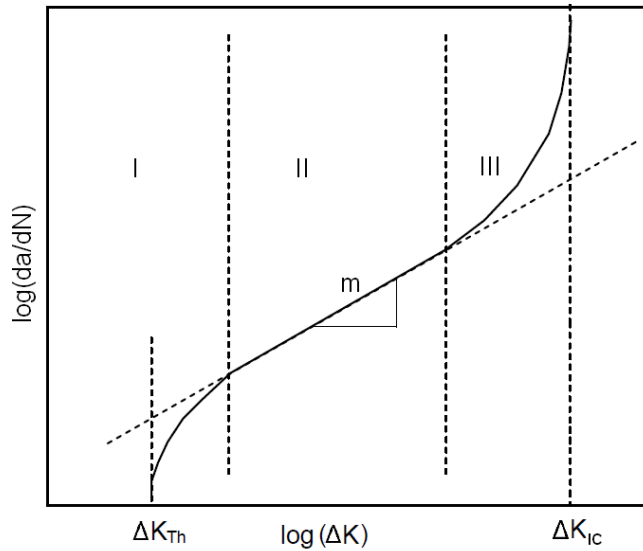
Malzeme üzerindeki çentik etkileri, malzeme yorulmasının sebebidir. Çentik bölgelerinde meydana gelen gerilme yığılmalarından dolayı malzemenin diğer kısımlarında gerilme değeri akma sınırının altında iken, gerilme yığılması bölgelerinde akma sınırının çok üstünde olabilir. Çentik dibinde oluşan bu gerilmeler çatlak oluşumuna ve ilerlemesine sebep olabilir. Malzemenin üzerinde gerilme yığılması oluşturacak geometrik şekiller olmasa dahi, malzeme içerisindeki mikroyapı bileşenleri, mikroçatlaklar veya mikroboşluklar çentik etkisi yaratabilir (Can, 2006).

Metallerde çatlak olmasa bile yorulma meydana gelebilir. Şekil 2.13’de görüldüğü gibi, yorulma olayı üç safhada meydana gelir (Uğuz, 1996):

- Çatlak oluşumu,
- Çatlak ilerlemesi,
- Kırılma.

Tablo 2.2 : Zamana bağlı gerilme çeşitleri

Gerilme-zaman diyagramı	Gerilme oranı	Gerilme genliği
	$R=1$	$\sigma_g = 0$
	$R=-1$	$\sigma_g = \sigma_{maks} = -\sigma_{min}$
	$R=0$	$\sigma_g = \frac{\sigma_{maks}}{2}$
	$-1 < R < 1$	$\sigma_g = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$



Şekil 2.13:Yorulma çatlak başlangıç ve ilerlemesi safhaları

Paris-Erdoğan denkleminde kullanılan ve yorulmayı karakterize eden c ve m katsayıları Şekil 2.13’de görülen II. bölgeden elde edilmektedir.

Malzemenin yorulma dayanımına etki eden faktörler ise şöyle sıralanabilir (Can, 2006):

- Malzemenin boyutu,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Çentiklerden dolayı oluşan gerilme yığılması,
- Sıcaklık,
- Kaynak dikişlerinin etkisi,
- Korozyon,
- Isıl işlemler,
- Soğuk deformasyon,
- Yüzey kaplamaları.

2.2.1.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde yorulma olayı

Gerilme alanlarının modifiyesi ve lokal deformasyon özelliklerinin çeşitliliğinden dolayı, malzeme derecelendirilmesi, periyodik deformasyon ve çatlak başlangıcını etkileyebilir (Kawasaki ve Watanabe 1999). Hofinger ve diğ. (1999) , Zr-Al termal bariyer kaplamalarında, ara yüzey gerilmelerinin azalmasıyla periyodik termal yükleme altında, hasarın azaldığını bulmuşlardır.

Periyodik yükleme boyunca gerilme alanı ve yorulma dayanımının uzaysal değişiminden dolayı, yorulma yüklemesi altındaki çatlak ilerlemesi malzeme derecelendirilmesinden etkilenir. Siber ve diğ. (1999) derecelendirilmiş Al alaşımında, çatlak derecelendirme doğrultusunda ilerlediğinde, yorulma çatlağı ilerleme hızının düştüğünü bulmuşlardır.

Xu ve diğ. (2003a, 2003b, 2004) tarafından yapılan çalışmada yorulma çatlakları derecelendirmeye paralel olarak, SiC'ce zengin bölgeye doğru büyümüştür. Çatlak büyümesinin artmasında, FDMlerin homojen kompozitlere oranla daha iyi performans gösterdikleri bulunmuştur (Kim ve diğ., 1997).

Sonuç olarak, FDMlerdeki çatlak ucu gerilmesi doğası, homojen malzemelerle aynıdır ve kırılma davranışını karakterize eden gerilme şiddet faktörlerinin analitik olarak kullanılmasına izin verir. Malzeme özelliklerinin değişimi gerilme şiddet faktörünü etkiler, genellikle homojen malzemelerdeki çatlaklarla karşılaştırıldığında,

K, artma eğilimindedir. Çatlak pozisyonu, numune geometrisi, yükleme, artık gerilmeler ve çatlak arkası etkileri, çatlak büyümesini etkiler (Tilbrook, 2005).

2.2.2 Fretting

Fretting, izafi olarak aralarında hareketin olmadığı kabul edilen, birbirlerine sabit olarak tespit edilmiş olan makine elemanları arasında, çok küçük bağıl kayma (10^{-6} cm) hareketi sonucu oluşur. Başlangıç oluşumu genellikle adezyondur. Malzemeler arasındaki yapışma-kopma davranışı sonucunda, zamanla aşınma meydana gelir. Aşınma miktarının artmasıyla, yüzeyde çatlak oluşumu ve dökülmeler başlar (Giannakopoulos ve diğ., 2000). Bu olaya *fretting aşınması* adı verilir. Oluşan aşınma miktarı, normal aşınma kavramında olunan aşınma miktarından oldukça azdır. Fretting mekanizmasının oluşmasına neden olan düşük genlikli bağıl kayma hareketi, tekrarlı bir yük altında oluşursa, bu olaya *fretting yorulması* adı verilir. Fretting yorulması, makine elemanlarının yorulma sürelerinde önemli ölçüde azalmaya neden olur (Szolwinski ve Farris, 1996).

Fretting yorulması helikopter, sabit kanatlı uçak, tren, gemi, otomobil, kamyon, otobüs, tarım makineleri parçalarında, motorlarda, çeşitli konstrüksiyon ekipmanlarında, ortopedik implanlarda, tel halatlarda, roket motor kutularında vb. meydana gelebilir (Hoepfner, 1992). Sürtülmeli çalışan makine elemanlarında (pres geçme, sıkı geçme, konik geçme, perçin bağlantıları gibi) yaygın olarak görülür.

Fretting olayı oluşum şekillerine göre 3 ana başlık altında incelenebilir; fretting aşınması, fretting yorulması ve fretting korozyonu.

Fretting aşınması, fretting yorulmasından daha fazla yüzey hasarına neden olan bir mekanizmadır. Temas yüzeylerinde ki aşınmadan kaynaklanan döküntüler zamanla oksitlenerek, yüzeyden daha sert olan oksitli parçacıkların oluşumuna neden olur. Oksitli parçacıklar yüzeyde çizik ve çukurlar oluşturur. Yüzeyler arasındaki bağıl kayma hareketi sonucunda, yüzeydeki oksit tabakası kırılır ve aşınmaya neden olur (Attia, 2006; Varenberg ve diğ., 2002). Fretting aşınması ilk defa Eden, Rose ve Cunnigham'ın laboratuvar çalışması sırasında gözlemlenmiştir. Yorulma numunesi ile numuneyi tutan kelepçe temas yüzeyinde oksit parçacıkları bulmuşlar, birkaç gün süren yorulma deneyleri sonrasında bu oksit parçacıklarının numune ile kelepçenin

ayrılmasını güçleştirdiğini görmüşlerdir. Kırmızı oksit tabakasından dolayı fretting hasarını, korozyon olarak nitelendirmişlerdir (Url-1).

Fretting yorulması, fretting oluşumuna neden olan düşük genlikli kayma hareketinin tekrarlı yükler altında meydana gelmesidir. Fretting yorulması, malzemenin yorulma dayanımını 2 ila 5 kat arasında azaltabilir. Metallerde çatlak başlangıcına kadar geçen süre yorulma ömrünün yaklaşık %90'ı iken, fretting yorulmasında çatlak başlangıcı yorulma ömrünün %5'inde meydana gelebilmektedir (Giannakopoulos ve diğ., 2000).

Fretting korozyonu, fretting mekanizmasının kimyasal reaksiyonlar tarafından başlatılması olayıdır. Bu terim ilk defa Tomlinson tarafından 1927 yılında kullanılmaya başlanmıştır (Url-1).

Fretting ömrünü etkileyen faktörler pek çok bilim adamı tarafından araştırılmıştır. Hoepfner (1992) tarafından yapılmış olan çalışmada, bu faktörler ve fretting ömrüne etkileri incelenmiştir:

Periyodik yük (gerilme): Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için gerekli enerji girdisini sağlar. Bağlantılarda birbiri ile temas halinde olan yüzeyler arasında, genlikle beraber kayma hareketini üretir. Periyodik yükün artması, fretting ömrünü azaltır. Korozyon etkisi altındaki bağlantılarda, daha küçük tekrar sayılarında daha düşük frekanslarda ömrü azaltır.

Normal yük (gerilme): Yorulma numunesinde temas gerilmelerini üretir, pek çok yüzey hasarı mekanizması için gerekli enerjiyi sağlar. Eğer kayma genliğini azaltacak kadar yeterli olursa, normal gerilmenin artmasıyla ömür genellikle azalır.

Kayma genliği: Uygulanan yükün sonucu olarak yüzey hasar mekanizmasında önemli rol oynar. Kayma genliği arttıkça, yorulma ömrü azalır. Ancak bazı durumlarda yüksek kayma genliği, oluşmuş çatlakları zayıflattığından dolayı ömrü uzatabilir.

Tekrar sayısı: Tekrar sayısı arttıkça, yüzey hataları artar. Çatlak başlangıcı için gerekli enerji eşiği, meydana gelen hasarın tipine bağlıdır.

Birlikte çalışan parçaların geometrisi: Parçaların gerilme durumlarının kontrolü, çatlak büyüme eşiği, çatlak büyüme hızına etki eden ve yüzey hasar mekanizmasına

neden olan yüzeyler arasındaki döküntülerin oluşumunu ve kontrolünü, ayrıca sürtünme kuvvetleri ve gerilmelerini etkiler.

Elastisite: Hem gerilme durumunu hem de kayma genliğini etkiler.

Sertlik: Genellikle sert yüzeylerin fretting hasarına direnci iyi olmasına rağmen, aynı zamanda yüksek sertlik yüzey tabakasının tokluğunu azaltır. Bu nedenle net bir şey söylenemez.

Mikroyapı: Yüzey yakınlardaki çatlak büyümesi ve çatlak oluşumunu tane büyüklüğü ile etkileyebilir.

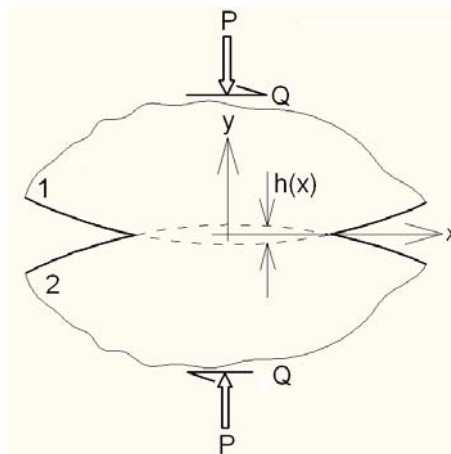
Malzeme kombinasyonları: Benzer malzemelerin birlikte çalışması sırasında, yapışma ve kaynaklanmalar oluşmasını destekler. Bu durum, döküntü oluşumunun artmasına ve yorulma dayanımının azalmasına neden olur.

Yüzey pürüzlülüğü: Pürüzlü yüzeyler döküntü oluşumunu azaltabilir (yorulma ömrü artar) veya oyulma, kazınma ve yorulma ömrünü azaltan döküntü oluşumunu artırabilir.

Çevre: Sıcaklık, nem, korozif atmosfer, oksijensiz vakumlu ortam fretting yorulma ömrünü azaltır.

2.2.2.1 Temas mekaniği

Paralel ve elastik iki silindirik kütlelerin temas durumu, Şekil 2.14’de görülmektedir. Noktalı çizgiler malzemelerin birbirinin içine girmediği durumda kütle sınırlarını göstermektedir. P, normal kuvvet; Q, teğetsel kuvvet; $h(x)$ malzemelerin birbirine girme miktarıdır (Hills ve Nowell, 1994).



Şekil 2.14: Normal kuvvet (P) ve teğetsel kuvvet (Q) etkisinde iki cisim arasında meydana gelen çizgi teması (Hills ve Nowell, 1994)

Hertz kontak teorisi kullanılarak (Johnson, 1985) yarı temas genişliği a ,

$$a = \left(\frac{4R}{\pi E^*} \cdot \frac{P}{l} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

olarak yazılabilir (Denklem 2.6). l , z yönündeki uzunluk; E^* , efektif elastisite modülü (Denklem 2.7); R , efektif yarıçaptır (Denklem 2.8).

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

Hertz basınç dağılımı, p_0 maksimum basınç dağılımı olmak üzere;

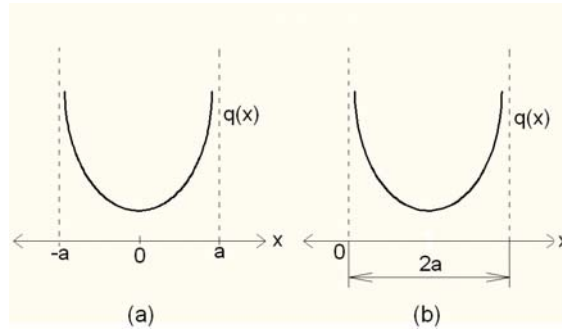
$$p_0 = \frac{2P}{\pi a l} \quad (2.9)$$

$$p(x) = \frac{p_0}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. Teğetsel kuvvet (Q) uygulandığında, arayüzeyde bir kayma sürtünmesi oluşmaktadır. Hills ve Nowell (1994) kaymadan dolayı oluşan gerilme dağılımını;

$$q(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \cdot \frac{Q}{l} \quad (2.11)$$

olarak tanımlamışlardır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15: Temas altında kayma gerilmesi dağılımı (Hills ve Nowell, 1994)

$x=\pm a$ 'da, gerilme dağılımı sonsuza gitmektedir. Bundan dolayı gerilme alanı bu noktalarda tekil olmakta ve genellikle keskin kenar teması olarak adlandırılmaktadır. Kolaylık olması açısından, koordinat sisteminin merkezi Şekil 2.16.b'deki gibi kaydırılmıştır (Hills ve Nowell, 1994).

Yapışma şartlarında kesme gerilmesi dağılımı farklı olmaktadır (Denklem 2.12).

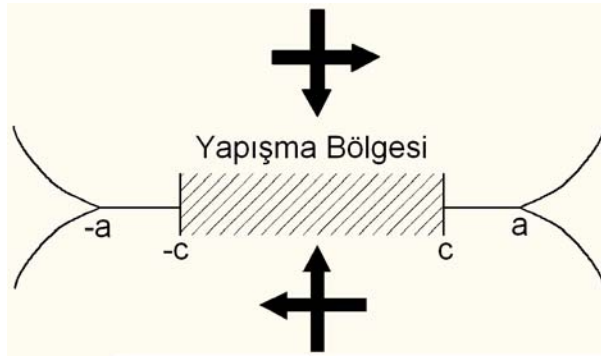
$$q(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{a^2 - (x-a)^2}} \cdot \frac{Q}{1} = \frac{1}{\pi\sqrt{2ax - x^2}} \cdot \frac{Q}{1} \quad (2.12)$$

Çok büyük kayma şartlarında kesme gerilmesi dağılımı μ sürtünme katsayısı olmak üzere,

$$q(x) = \mu p(x) \quad (2.13)$$

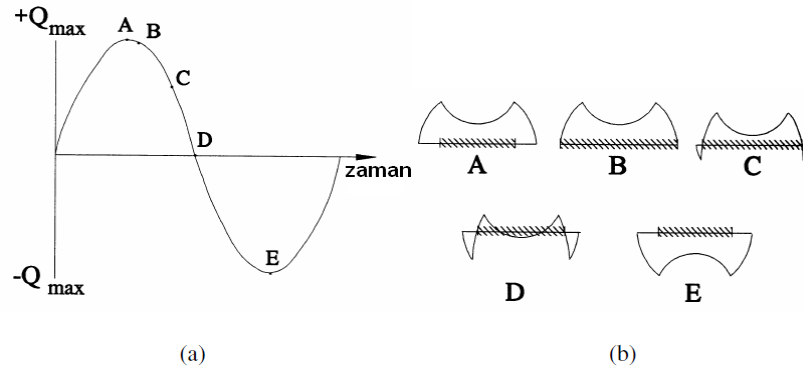
olarak yazılabilir. μ , sürtünme katsayısıdır. $Q < \mu P$ olan bölgelerde, temas arayüzeylerinde parçalı kayma veya parçalı yapışma şartları oluşmaktadır. Teorik olarak yapışma sadece $Q=0$ veya $\mu=\infty$ şartlarında olası olsa da, yapışma çözümüyle ($\mu=\infty$) yapışma şartlarına yakın durumların da açıklanması mümkündür (Şekil 2.16) (Hills ve Nowell, 1994). Parçalı kayma bölgelerine sahip iki kütle arasındaki arayüzeyde aynı anda hem kayma hem de yapışma meydana gelir. Arayüzeydeki gerilme dağılımlarının çözümü Cattaneo-Mindlin'in (Cattaneo (1938); Mindlin (1949) klasik problemiyle verilmektedir. Çözüm elde etmek için, gerilme dağılımının sonsuza gittiği köşe temas bölgesinde bir kayma bölgesi olduğu kabul edilmektedir. Kayma ve yapışma arasındaki sınır $x=\pm c$ olarak tanımlanmaktadır. Temas $-a$ ile a arasında oluşurken, yapışma bölgesi $-c$ ile c arasında oluşmaktadır. $q(x)$ 'in tamamen yapışma ve çok büyük kayma durumlarında aynı formda olduğu kabul edilerek, teğetsel kuvvetin gerilme dağılımı ile denge halinde olduğu sağlaması yapılarak, normalize edilmiş yapışma bölgesi Denklem 2.14'deki gibi yazılabilir (Hills ve Nowell, 1994).

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{Q}{\mu P}} \quad (2.14)$$



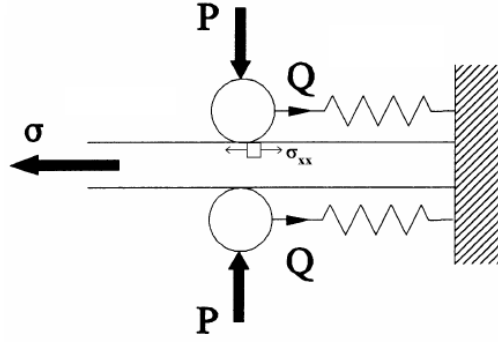
Şekil 2.16: Temas halinde kayma ve yapışma durumu (Hills ve Nowell, 1994)

Fretting yorulma deneyi süresince, teğetsel kuvvet periyodik olarak değişir (Şekil 2.18). Şekil 2.17.b'de görülen taralı bölgeler yapışma alanını göstermektedir. Başlangıçta $Q=0$ 'dan Q_{max} olana kadar kayma artmaktadır (A noktası). B noktasında, yük maksimum değerinden sonsuz küçük bir değerde azalmaktadır. Yüklemenin yönü değişince temas genişliğinde aniden yapışma oluşur. Q, C noktasına doğru azaldıkça, normal gerilme izafi kaymayı önlemekte yetersiz kalmakta, temas köşelerinde kaymayı tersine yönlendirmektedir. D noktasında, teğetsel kuvvet tamamen ortadan kalkmıştır. E noktasında $Q=-Q_{max}$ olarak tersine çevrilmiş yüklendiğinde, gerilme dağılımı da tamamen tersine çevrilmiştir (Hills ve Nowell, 1994).

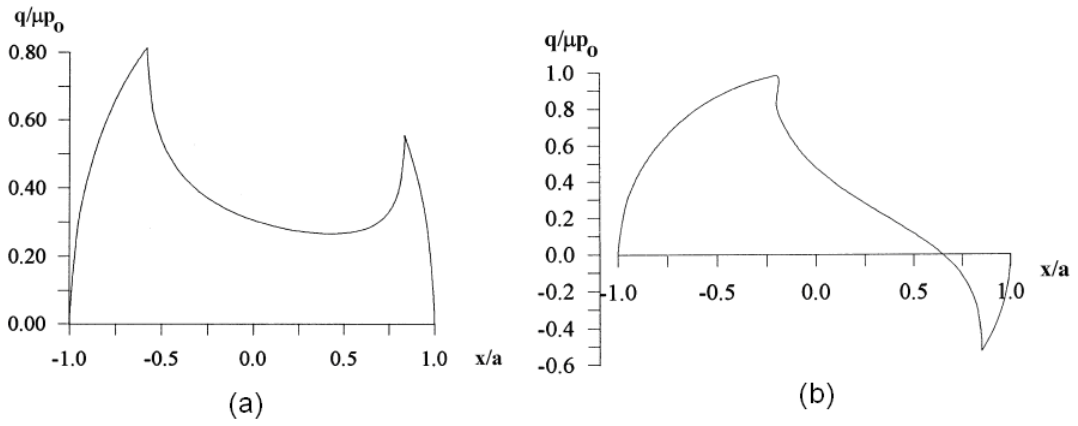


Şekil 2.17: Teğetsel kuvvetin fretting deneyi süresince periyodik değişiminin kayma ve yapışma bölgelerine etkisi (Hills ve Nowell, 1994)

Tipik fretting yorulması şartlarında kütle gerilmesi oluşur (Şekil 2.18). Kütle gerilmeleri yapışma bölgesinin pozisyonunun değişmesine neden olur. Yapışma bölgesinin pozisyonunun kayması düzlemdeki σ_{xx} gerilme bileşeninin temasın sürüklenme (trailing) köşesinde artmasına neden olur (Şekil 2.19.a). Bu, çok büyük kaymanın olduğu köşedir. Eğer daha büyük değerlerde kütle gerilmeleri uygulanırsa, bir temas köşesinde yapışma bölgesi başlayacak ve eğer yük yeterince artarsa, diğer temas köşesinde kayma oluşacaktır (Şekil 2.19.b) (Hills ve Nowell, 1994).



Şekil 2.18: Fretting yorulması şartlarında oluşan kütle gerilmesi (Hills ve Nowell, 1994)



Şekil 2.19: Fretting yorulması şartlarında oluşan kütle kuvvetleri nedeniyle kayma ve yapışma bölgelerinin değişimi (Hills ve Nowell, 1994).

2.2.2.2 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde fretting olayı

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin fretting yorulması konusunda yapılmış olan deneysel çalışma sayısı çok değildir. Analitik ve sayısal çalışmalar çoğunluktadır (Ke ve Wang, 2007a, 2007b). FDM'lerin daha çok temas mekaniği konuları araştırılmıştır (Guler ve Erdogan (2004, 2006, 2007) ; Ke ve Wang (2006,2007b).

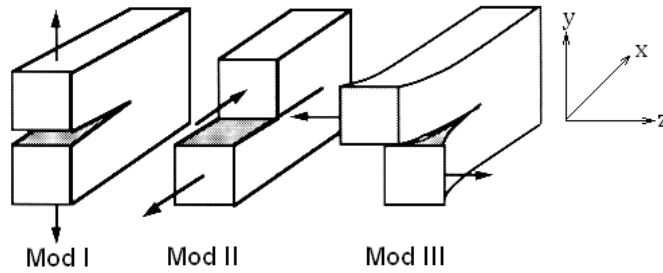
2.2.3 Kırılma mekaniği

Yüksek deformasyon hızı, düşük sıcaklık, çentik etkisi, uygun olmayan malzeme ve ısıl işlem seçimi gibi nedenlerden dolayı, makine elemanlarında gevrek kırılma meydana gelebilir. Fakat yapılan çalışmalar göstermiştir ki; malzeme tokluğu, çatlak boyu ve gerilme seviyesi makine elemanlarının gevrek kırılmaya eğilimini etkilemektedir. Kırılma mekaniğinin temel prensibi, bir makine elemanı içerisinde

var olan keskin çatlağın önündeki gerilme bölgesinin gerilme yığılma faktörü olan K parametresi ile tanımlanmasıdır. K parametresi, nominal gerilme seviyesi (σ) ve çatlak boyu (a) ile doğrudan ilişkilidir (Uğuz, 1996; Ergun, 2009).

Kırılma mekaniği Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) ve Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPFM) olarak iki farklı kategoriye ayrılabilir. Lineer elastik kırılma mekaniğinde; çatlak veya çatlığa benzeyen süreksizlikler civarındaki gerilme durumu ile elemana uygulanan ortalama gerilme, çatlak büyüklüğü, çatlak geometrisi ve malzeme özellikleri arasında analitik bir ilişki kurulur.

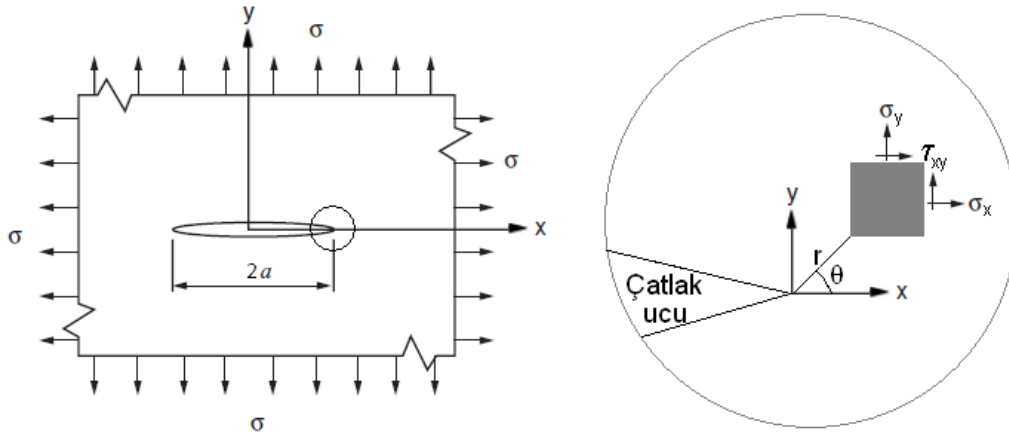
Elastik bir cisim içerisinde var olan çatlak gerilme analizinin yapılabilmesi için üç farklı kırılma modu tanımlanmıştır. Bu kırılma modları, çatlak yüzeylerinin birbirine göre hareketi ile tanımlanır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Çatlak açılma Modları

Mod I deformasyon tipinde, gerilmenin normal bileşeni çatlak yüzeyine dik olarak y eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Deplasmanlar x-y ve x-z düzlemlerine göre simetriktir. Bu durum, çatlak açılma modu olarak tanımlanır. Mod II deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlığa x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Kayma modu olarak adlandırılan bu durumda deplasmanlar, z-y düzlemine göre simetriktir. Mod III deformasyon tipinde gerilmenin kayma bileşeni, çatlığa z eksenine doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir. Bu durum, çatlak yırtılma modu olarak tanımlanır (Uğuz, 1996).

Eleman üzerinde çatlak modları, tek tek veya bu modların kombinasyonları şeklinde bulunurlar (Taşgetiren, 1997). Bir levha içerisinde bulunan çatlak ilerlemesine dair yapılan çalışmalar genellikle Mod I ve Mod II üzerinde yoğunlaşmaktadır. Karma-Mod olarak adlandırılan durumlar, her iki modun etkin olduğu problemlerdir. Sonsuz büyüklükteki bir plakada yer alan bir çatlak ucu bölgesinde meydana gelen gerilme bileşenleri Şekil 2.21’de görülmektedir (Uğuz, 1996).



Şekil 2.21: Çatlak ucunda meydana gelen gerilmeler

Bu gerilme değerleri;

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.15)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.16)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.17)$$

şeklinde dir.

Denklem 2.15-2.17 $r \ll a$ durumunda yani çatlak ucuna çok yakın bir bölge için geçerlidir. Gerilme denklemlerinde, r değeri sıfıra yaklaştıkça, çatlak ucundaki gerilme değerleri sonsuz olmaktadır. Tam gevrek malzemeler için geçerli olan bu durumda, deplasmanlar da K_I ve K_{II} 'ye bağlı olarak elde edilebilir (Denklem 2.18-2.19) (Zahavi, 1996).

$$u = \frac{K_I \sqrt{2\pi r}}{8\pi G} \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II} \sqrt{2\pi r}}{8\pi G} \left[(2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.18)$$

$$v = \frac{K_I \sqrt{2\pi r}}{8\pi G} \left[(2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II} \sqrt{2\pi r}}{8\pi G} \left[(2\kappa - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.19)$$

G , malzemenin kayma modülü ve κ Denklem 2.20'de görüldüğü üzere, problemin düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme durumuna göre değişen bir katsayıdır.

$$\kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{Düzlem şekil değıstirme} \\ (3 - \nu)/(1 + \nu) & \text{Düzlem gerilme} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2.3.1 Gerilme şiddet faktörünün hesabı

Gerilme şiddet faktörü, K , yüklemenin modu ile ilgili olup lineer elastik malzemelerde çatlak ucundaki gerilme ve deplasmanları tanımlamanın en iyi yoludur. Gerilme yığılma faktörü genellikle çatlak uzunluğunun verilmesinin ve geometrinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu manada gerilme şiddeti faktörünün genel ifadesi (Denklem 2.21);

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.21)$$

şeklindedir (Spievak ve diğ., 2000). Burada β geometriye bağlı boyutsuz bir parametredir. a çatlak boyunu ve σ elemana bağlı etkiyen gerilmeyi ifade etmektedir. Çatlak ucunda meydana gelen K_I ve K_{II} gerilme şiddeti faktörlerini hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılmakla beraber, en çok kullanılan ve daha doğru sonuçlar veren metod, düğüm deplasmanları metodudur (Chan ve diğ., 1970). Düğüm deplasmanları metodu, genellikle sonlu elemanlar ve sınır elemanlar metodu gibi nümerik çözüm yöntemlerinde kullanılmaktadır (Phan ve Mukherjee, 2008; Wang ve Gai, 2008; Uzun ve diğ., 2008; Ergun, 2009; Ergun ve diğ., 2006).

Bu metoda göre; çatlaklı makine elemanı için yapılan nümerik çözümler sonucunda, çatlak yüzeyinde bulunan a , b , c ve d (Şekil 2.22) düğümlerinden alınan deplasman değerlerine bağlı olarak K_I ve K_{II} hesaplanabilmektedir. Bu çözümlerlerde, çatlak ucunda özel çeyrek nokta düğümlü üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Çatlak yüzeyindeki deplasman değerleri ile gerilme şiddeti faktörü arasındaki ilişki Denklem 2.22 ve 2.23'de

$$K_I = \frac{G}{\kappa + 1} \sqrt{\frac{2\pi}{L_e}} [4(v_a - v_c) + (v_d - v_b)] \quad (2.22)$$

$$K_{II} = \frac{G}{\kappa + 1} \sqrt{\frac{2\pi}{L_e}} [4(u_a - u_c) + (u_d - u_b)] \quad (2.23)$$

şeklinde verilmektedir (Tan ve Gao, 1990; Ergun, 2009). u_i , v_i , x ve y yönlerindeki düğüm deplasman değerleri, L_e çatlak ucunda kullanılan eleman boyudur.

ilerleyecektir (Spievak ve diğ., 2000) (Şekil 2.24). Mod I ve Mod II için düzlem şekil değiştirme şartlarında

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (2.24)$$

şeklinde verilmektedir (Ergun, 2009).

Tekrarlı yüklemelerde çatlak, sürekli bir doğrultuda büyümeye zorlanmaktadır. Farklı yük konumlarında ve yük artışlarında çatlak ucunda meydana gelen gerilme şiddeti faktörleri değişecektir. Bununla birlikte çatlağın ilerleme doğrultusu da değişecektir. Maksimum asal gerilme teorisine göre K_I ve K_{II} gerilme şiddeti faktörlerinde değişmeye bağlı olarak çatlağın muhtemel ilerleme doğrultusu

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \right] \quad (2.25)$$

şeklinde verilmektedir (Erdoğan ve Sih, 1963).

2.2.3.3 Yorulmalı çatlak ilerlemesi ve Paris-Erdoğan denklemi

Yorulma; tekrar eden yükler altındaki elemanda adım adım hasar oluşumu olarak tanımlanabilir. Bu tekrarlı yükler altında malzemede meydana gelen yorulma çatlakları bir süre sonra makine elemanının tamamen kırılmasına neden olur. Yorulma çatlak modellerinde temel amaç, malzemenin uğrayacağı muhtemel yük tekrarını saptamaktır. Yorulmalı çatlak ilerlemesinde 3 farklı aşama söz konusudur (Şekil 2.14). I. Bölge çatlak oluşumunun yeni başladığı bölgedir. Bu bölgedeki başlangıç gerilme şiddeti faktörü ΔK_{th} 'dir ve yorulmalı çatlak ilerlemesi söz konusu değildir. II. Bölge genellikle Paris-Erdoğan (Paris ve Erdoğan, 1963) rejimi olarak adlandırılır. II. Bölge $\log(da/dN)$ ile ΔK arasında lineer bir ilişki vardır ve karalı bir çatlak ilerlemesi söz konusudur. III. Bölgede çatlak ilerlemesi lineer değildir. Bu bölgede çatlak $K_I=K_{IC}$ olana kadar yorulma yükleriyle büyümeye devam eder ve çatlak ucundaki gerilme şiddeti faktörü malzeme için kritik gerilme şiddeti faktörüne ulaştığında kırılma kaçınılmazdır. Paris-Erdoğan denklemi;

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (2.26)$$

olarak verilmektedir. Burada N yükün tekrar sayısı, c ve m malzeme sabitleridir (Ergun, 2009). Denklem 2.26, Mod I etkisindeki çatlaklı numuneler için geliştirilmiş bir amprik ifadedir. Fakat gerçekte çatlağın ilerlemesinde Mod II'de etkilidir. Bu

noktadan hareketle, Mod I ve Mod II yükleri altında yorulmalı çatlak ilerlemesine dair yapılan bir takım çalışmalar sonucunda eşdeğer gerilme şiddeti faktörü, K_{eff} , ortaya atılmıştır. Önerilen bir çok eşdeğer gerilme şiddeti faktörü arasından (Salehizadeh ve Saka, 1992) metalik malzeme için en doğru yaklaşımı veren ifade;

$$\Delta K_{eff} = (\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4)^{0,25} \quad (2.27)$$

şeklindedir (Tanaka, 1974). Böylece Denklem 2.26'da ΔK yerine Denklem 2.27'de ki ifade yazıldığında,

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{eff})^m \quad (2.28)$$

elde edilir. Böylece Mod I ve Mod II'ye bağlı olarak yorulmalı çatlak ilerleme denklemi elde edilmiş olur. Denklem 2.28'de N yi çekip yeniden düzenlersek;

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{c(\Delta K_{eff})^m} \quad (2.29)$$

olur. N_f , çatlağın hasara uğraması için gereken çevrim sayısı ve a_f ise kırılmanın hemen öncesindeki maksimum çatlak boyudur (Ergun, 2006).

2.2.3.4 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde kırılma olayı

Malzemenin özelliklerinin değişimi, uygulanan gerilme şiddet faktörü üzerinde çatlak geometrisi boyunca çatlak ilerlemesi için kriter olarak dikkate alınmalıdır (Erdogan, 1995). Derecelendirilmiş malzemelerdeki çatlaklar üzerine yapılmış pek çok değişik teorik çalışma, çatlak ucu gerilmelerinin homojen malzemelerden farklı olduğunu göstermiştir (Delale ve Erdogan 1983, Jin ve Noda 1994, Eischen 1987, Konda ve Erdogan 1994). Asimetrik yüklemelerde çatlak, çatlağın yön değiştirmesi sonucuna neden olan derecelendirmeye dik olarak yönlenir (Gu ve Asaro 1997). Oysa ki simetrik yüklemelerde, derecelendirmeye paralel bir yönlenme oluşur ve çatlak bu şekilde ilerlemeye devam eder (Jin ve Batra 1996).

Derecelendirilmiş malzemelerde çatlak ilerlemesi deneyleri, düzenli artan veya azalan (Chung ve diğ., 2001; Moon ve diğ., 2002) veya periyodik mekanik yüklemelerde (Forth ve diğ., 2003; Xu ve diğ., 2003a; Xu ve diğ., 2003b) ve periyodik termal yüklemelerde (Balke ve diğ., 2001; Hofinger ve diğ., 1999), çatlakların derecelendirmeye paralel alınarak odaklanmaya yönelmiştir. Çatlakların derecelendirmeye dik olduğu deneysel çalışmalarda (Rousseau ve Tippur 2000; Hoffman ve diğ. 2001; Chapa-Cabrera ve diğ., 2001; Chapa-Cabrera ve Reimanis,

2002) genellikle hızlı kırılma meydana geldiğinde, çatlak sapması görülmüş olmasına rağmen, derecelendirmenin gerilme şiddet faktörü ve efektif tokluğun değişimi üzerinde etkisi hesaplanamamıştır (Tilbrook, 2005).

Homojen malzemelerle karşılaştırıldığında, sürekli derecelendirilmiş malzeme kompozisyonu ve özellikleri 4 ana yönden kırılma davranışını değiştirir (Tilbrook, 2005):

- Değişken gerilme bölgeleri (alanları): Mekanik özelliklerin derecelendirilmiş değişimi, E ve ν , gerilme bölgesi etrafında ki bir çatlağı homojen malzemelerden farklı yönlendirir. Sonuç olarak, kırılma yükleri ve çatlak yolu malzeme derecelendirilmesi tarafından etkilenir.
- Çatlak ucu tokluğu: Derecelendirilmiş bölgenin kimyasal kompozisyon değişimi ile içsel kırılma tokluğu (K_0), derecelendirmenin pozisyonuna göre değişen bir fonksiyona ($K_0(a)$) dönüşür.
- Çatlak genişleme pekleşmesi: Derecelendirilmiş bölgenin kimyasal kompozisyon ve mikroyapı değişimi sonucu, çatlak büyüme pekleşmesi mekanizması karakteristikleri de değişime uğrar. Homojen malzemelerde olduğu gibi kapanma durumu sadece çatlak ucunun arkasında yer almasıyla değil, aynı zamanda derecelendirilmiş bölgedeki çatlağın pozisyonuna da bağlıdır.
- Artık ve termal gerilmeler: FDM'lerdeki termal artık gerilmeler, çatlak ucu gerilme bölgesi ve kırılma davranışını etkiler (Lin ve Miyamoto, 1999; Freund 1993; Shabana ve Noda, 2001; Chung ve diğ., 2002).

Delale ve Erdogan (1983) ve Eischen'in (1987) yaptığı çalışmalar sonucunda, sürekli ve parçalı diferansiyel malzeme özelliği değişimine sahip derecelendirilmiş malzemenin, $\frac{1}{\sqrt{r}}$ ile ifade edilen çatlak ucu gerilme tekilliği özelliği, homojen malzemelerdekini aynıdır (Denklemler 2.30). Bu, Jin ve Noda (1994) tarafından elastik ve plastik çatlak ucu bölgelerinde açısız dağılım fonksiyonlarının ($f_{ij}(\theta)$) aynı olduğu görülerek doğrulanmıştır (Tilbrook, 2005).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_{\alpha}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(\alpha)}(\theta) + \delta_{li} \delta_{lj} \sigma_T + A_{\alpha} \sqrt{2\pi r} w_{ij}^{(\alpha)}(\theta) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.30)$$

Eischen (1987) ve Jin ve Noda'nın (1994) yapmış olduğu çalışmalar göstermiştir ki, FDM'lerde çatlak ucu gerilmesi (σ_{ij}) ve yer değiştirme (u_i) bölgeleri homojen malzemelerdekiyle aynı formdadır. K_α ($\alpha=I,II,III$) gerilme şiddet faktörlerini, r çatlak ucundan uzaklığı, θ x_1 eksenine göre çatlak ucu arasındaki açıyı, δ Kronecker deltası, σ_T çapraz (transverse) gerilmeyi, $f_{ij}^{(\alpha)}(\theta)$ açısal fonksiyonları vermektedir. Kartezyen koordinatlarda en son açıklama (Denklem 2.31)

$$u_i \approx \frac{K_\alpha (2 + 2\nu_{tip})}{E_{tip}} \sqrt{\frac{8r}{\pi}} g_i^{(\alpha)}(\theta) \quad i=1,2,3 \quad (2.31)$$

şeklinde (Tilbrook, 2005). Burada E_{tip} ve ν_{tip} çatlak ucundaki elastisite modülü ve Poisson oranını, $g_i^{(\alpha)}(\theta)$ ise açısal fonksiyonları göstermektedir (Anderson, 1995). Bu sonuçlar gerilme şiddet faktörünün belirleyici kırılma parametresi olarak aynen geçerli olduğu anlamına gelmektedir. Benzer sonuçlar Parameswaran ve Shukla (1999) tarafından dinamik olarak ilerletilen çatlaklar için de bulunmuştur. İki malzemeli ara yüzelerde çatlak etrafındaki anormal gerilme davranışı, özelliklerin sürekli veya kademeli olarak değişimi ile önlenmektedir (Chen ve Erdogan 1996). İlave olarak, Delale ve Erdogan (1985) tarafından Poisson oranının uzaysal değişiminin gerilme tekilliği üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği bulunmuştur. Derecelendirilmiş bölgede yönelmeye bağımlı kırılma davranışı, iki limit durum göz önüne alınarak tanımlanabilir (Tilbrook, 2005):

- *Çatlak ilerlemesi derecelendirme doğrultusunda:* Çatlak ucu gerilme derecelendirilmiş bölge boyunca genişlediğinde, efektif kırılma tokluğu değişiyor olmasına rağmen çatlağın sapmadığı anlamına gelir.
- *Çatlak ilerlemesi derecelendirme doğrultusuna dik:* Asimetrik çatlak ucu gerilme bölgesi, çatlak ucundaki karışık mod yüklemeyi azaltarak çatlağın sapmasına neden olur. Çatlak asimetrik olarak genişlediğinde, çatlak şekli lokal özelliklerle değişir.

Derecelendirme doğrultusuna paralel olan çatlaklarda, çatlak ucundaki gerilme bölgesi simetrik olacaktır ve çatlağın derecelendirmeye doğru genişlemesi beklenir. İki malzemeden oluşan malzemelerle karşılaştırıldığında FDMlerdeki çatlaklarda, derecelendirilmiş bölgedeki çatlak ucu gerilmeleri önemli ölçüde azdır (Erdogan 1995; Bao ve Wang 1995; Bleek ve diğ., 1998). Homojen malzemelere göre derecelendirilmiş malzemelerde gerilme şiddet faktörü daha büyük olma

eğilimindedir. Malzeme derecelendirme profili ve çatlağın pozisyonu da, gerilme şiddet faktörünü etkiler. Genellikle derecelendirme adımı arttıkça, homojen malzemelere göre değeri artar (Erdogan 1995, Jin ve Batra 1996, Delale ve Erdogan 1985, Wang ve Gross 2000). Derecelendirme biçimi de gerilme şiddet faktörünü etkiler; üssel değer $n > 1$ olduğunda $n < 1$ durumuna göre gerilme şiddet faktörü daha düşük olma eğilimindedir (Bao ve Wang, 1995; Wang ve Gross, 2000; Bleek ve diğ., 1998). Bir FDM kompozitin efektif kırılma tokluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olan uzaysal kompozisyon değişimi, termal artık gerilme dağılımını tüm genişliği boyunca etkileyebilir (Tilbrook, 2005). Büyüyen kırılma tokluğu, kısmen artık gerilmelere bağlıdır (Lin ve Miyamoto, 1999; Chung ve diğ. 2001, 2002; Moon ve diğ. 2001, 2002a, 2002b). Artık gerilmeler kompozisyonla değiştiği için, artan bası gerilmeleri çatlağın büyümeye karşı direncini artırır (Tilbrook, 2005).

2.2.4 Kullanılan sonlu eleman yazılımları

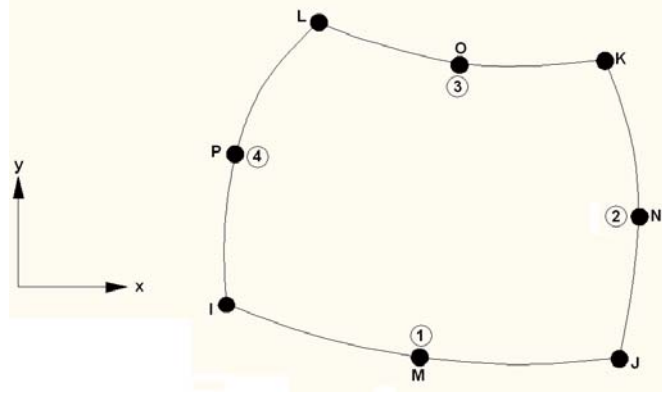
Sonlu elemanlar metodu (SEM), karmaşık olan problemleri bilinen veya kavranması daha kolay olan, basit alt problemlere ayırarak daha anlaşılır hale getirir. Oluşturulan alt problemler çözümlenip birleştirildiğinde, esas problemin çözümü yapılabilir. Metodun üç temel niteliği vardır (Topcu ve Taşgetiren, 1998):

- 1) Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi, sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik basit alt bölgelere ayrılır.
- 2) Her elemandaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.
- 3) Aranacak değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerlerinin elde edilmesi, problemin çözümünde yeterli olmaktadır.

Günümüzde, birçok analiz programı problem çözümlerinde SEM kullanılmaktadır (Ergun, 2009). Bunlardan en bilineni ANSYS programıdır (ANSYS Inc., 2005). Bu çalışmada yorulma ve fretting yorulması analizlerinde kullanılan ANSYS programı, özel problemlerde; geometrik model, malzeme özellikleri, yükleme şartları gibi konularda yazılan makro dosyalarıyla çalışmaya izin vermektedir. Kırılma mekaniği konusunda FRANC2D programı (Url-2) doğruluğu kabul görmüş bir programdır ve çatlak ilerleme deneylerinin analizlerinde kullanılmıştır.

2.2.4.1 ANSYS ile modelleme

ANSYS programında 2 boyutlu yorulma ve fretting yorulması analizleri yapılmıştır. Eleman tipi olarak seçilen 8 düğüm noktalı Plane82 eleman tipinin geometrisi Şekil 2.24'de görülmektedir (ANSYS Inc., 2005).



Şekil 2.24: Plane82 elemanının geometrisi

FDM özelliklerinin ANSYS programında tanımlanabilmesi için APDL (ANSYS Parametric Design Language) kullanılarak bir makro oluşturulmuştur. Oluşturulan makro ile x eksenini boyunca (modelin genişliği) her bir sonlu elemanın x koordinatı bir *array* içerisinde ki bir sütuna yazdırılmıştır.

```
*get,elnomax,elem,,num,max  
*dim,earray,array,elnomax,5  
*VGET,earray,elem, ,cent,X, , ,2
```

Bölüm 1'de Denklem 1.1 ve 1.2 olarak verilen bağıntılarda, x yerine elemanın x koordinat değeri yazdırılarak, her bir elemanın elastisite modülü hesaplatılmıştır.

```
*do,i,1,elnomax,1  
ecx=earray(i,1)  
ecxx=g/linemax  
*if,ecx,le,ecxx/2,then  
*vfill,earray(i,3),data,E2  
*elseif,ecx,ge,g-ecxx,then  
*vfill,earray(i,3),data,E1  
*else  
gx=(ecx/g)**p  
Emod=(gx*E1)+((1-gx)*E2)  
*vfill,earray(i,2),data,gx
```

```

*vfill,earray(i,3),data,Emod
*vfill,earray(i,4),data,densmod
*endif
*enddo

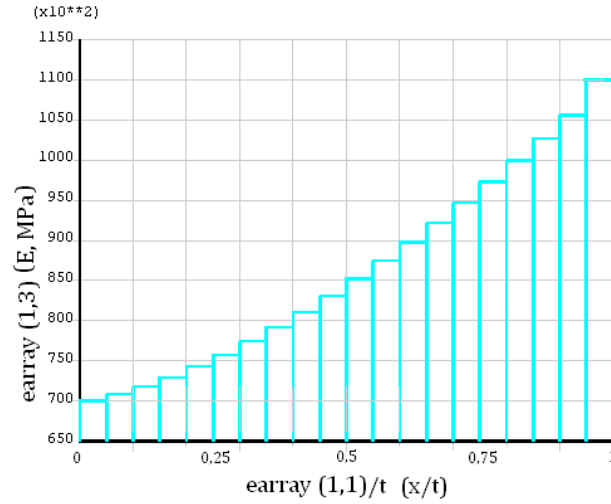
```

Hesaplanan değerler aynı *array* içerisinde başka bir sütuna yazdırılmış ve elemanlara atanmıştır. Böylece, x koordinat değerleri aynı olan elemanların Elastisite Modülleri aynı, x eksenini boyunca değişen koordinatlara göre birbirini takip eden elemanların Elastisite Modülleri farklı olmuştur. Şekil 2.25’de örnek olarak hazırlanmış olan ve $E_1=64000$ MPa, $E_2=130000$, $p=5$ değerleriyle oluşturulmuş olan *array* listelenmiştir.

Eleman No	Eleman x koordinat değeri	1	2	3	4	5
10	19	0.02418065	65595.9231	0.27043525	0	
11	21	0.03988379	66632.3307	0.27071790	0	
12	23	0.06285491	68148.4241	0.27113138	0	
13	25	0.09536743	70294.2504	0.27171661	0	
14	27	0.14012604	73248.3189	0.27252226	0	
15	29	0.20030418	77220.0765	0.27360547	0	
16	31	0.27958155	82452.3824	0.27503246	0	
17	33	0.38218157	89223.9837	0.27687926	0	
18	35	0.51290893	97851.9897	0.27923236	0	
19	37	0.67718708	108694.347	0.28218936	0	

Şekil 2.25: ANSYS programında yazılan makro ile oluşturulan örnek array

Şekil 2.26’de oluşturulan array içindeki hesaplamalar ile kaba ağılı olarak hazırlanmış FDM model için çizdirilmiş elastisite modülü-boyutsuzlaştırılmış genişlik (x/t) diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.26: ANSYS programında oluşturulan boyutsuzlaştırılmış genişlik boyunca (x/t) elastisite modülü değişimi

Programda yapılan yorulma analizleri için takip edilen işlem sırası şöyledir:

Preprocessor

- Model oluşturulması,
- Elemanlara ayırma,
- Malzeme özelliklerinin atanması.

Solution

- Analiz tipinin belirlenmesi,
- Sınır şartlarının girilmesi,
- Çözüm kontrolü için gerekli değerlerin girilmesi,
- Herbir yükleme şartının girilerek (σ_{\max} ve σ_{\min} için ayrı ayrı) dosyalara yazdırılması,
- Girilen yükleme ve sınır şartları için, oluşturulan dosyalardan çözüm yaptırılması.

General Postprocess

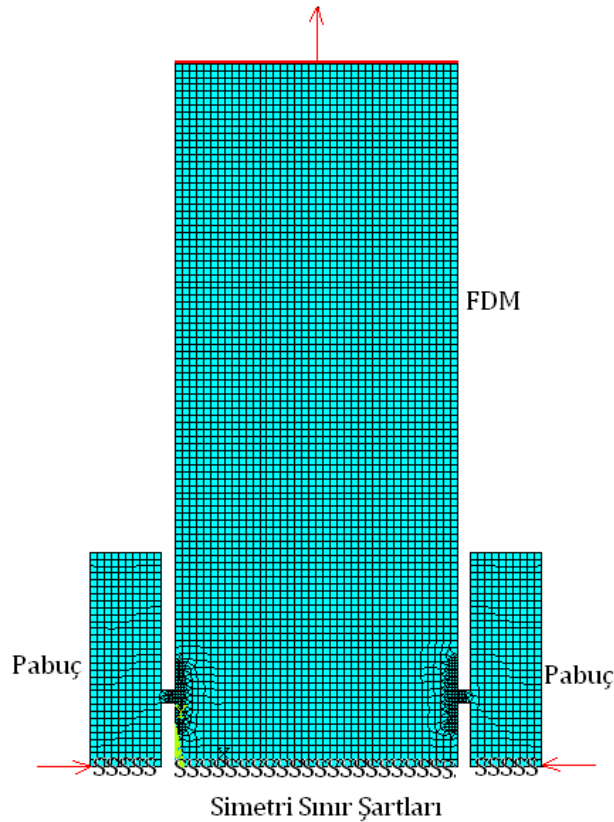
- Malzemeye ait yorulma (S-N) diyagramının girilmesi,
- Yorulma değerlerinin hesaplanarak kaydedilmesi istenen bölgelerin tespiti,
- Seçilen yükleme koşullarında hesaplama yapılabilmesi için istenen yorulma tekrar sayısının girilmesi,
- Çözüm,
- Sonuçların listelenmesi.

ANSYS programı, yorulma hesapları sonucunda Miner Kuralı adı verilen kurala göre bir kullanma faktörü (partial usage factor) hesaplar:

$$f_u = M_T / M_A \quad (2.4)$$

M_A , deneyler sonucu elde edilmiş ve malzemenin verilen gerilme genliği değerinde izin verilebilir en fazla tekrar sayısıdır. Analizlerde bu değer, yorulma tekrar sayısı olarak alınmıştır (Bölüm 3.1.6). M_T ise, çözümde modele uygulanan tekrar sayısıdır (ANSYS Inc., 2005).

Fretting yorulması modellemesinin ANSYS programında yapılabilmesi için, yorulma modeline pabuçlar ilave edilmiştir. Pabuçlar ile FDM arasındaki temas yüzeylerinde kontak elemanlar tanımlanmıştır. Şekil 2.27'de fretting modelinin ANSYS'de oluşturulması görülmektedir.



Şekil 2.27: Fretting modelinin ANSYS'de oluşturulması

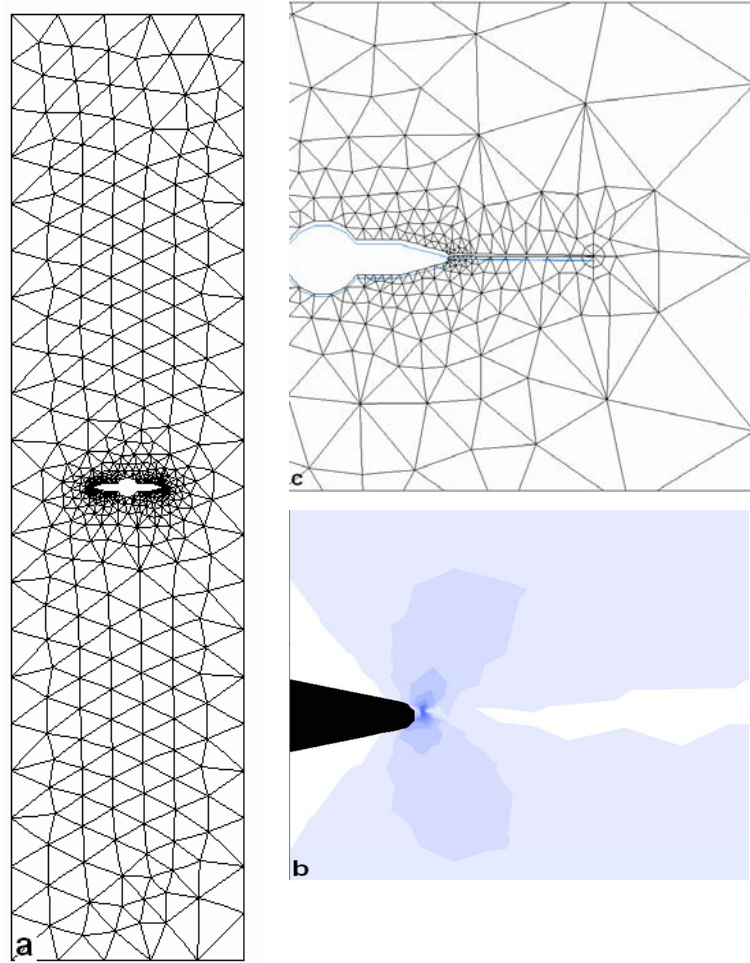
2.2.4.2 FRANC2D ile modelleme

Cornell üniversitesi kırılma grubunca geliştirilmiş olan FRANC2D (Url-2) sonlu elemanlar paket programı, genellikle kırılma mekaniği ve yorulma analizlerinde kullanılan bir programdır. Program mesh oluşturma ve analiz olmak üzere iki farklı uygulama dosyasından oluşmaktadır. Bu çalışmada, 4 ve 5 numaralı FDM'den

elde edilmiş olan tabakalar halindeki merkez çatlaklı numuneler için FRANC2D analizi yapılmıştır.

Mesh oluşturmak için CASCA (Url-2) isimli yazılım kullanılmakta ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı *.inp uzantılı olarak kaydedilmektedir. Daha sonra FRANC2D programı çalıştırılıp *.inp uzantılı dosya ismi girilerek, problemin meshli modeli FRANC2D programına aktarılmaktadır. Malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının tanımlanmasının ardından, başlangıç çatlakları tanımlanır. Program başlangıç çatlaklarını sonlu elemanlar modeline sil-doldur tekniği ile yerleştirir. Çatlak ucu için yeniden mesh oluşturulduktan sonra, ilerleme adımı ve yük tekrar sayısı girilerek çatlak ilerletilir. Herbir ilerleme adımından sonra, çatlak ucu yeniden meshlenir. K_I , K_{II} , θ (çatlak yönelme açısı) ve gerilme hesabı yapılır (Ergun, 2009).

Şekil 2.28'de merkez çatlaklı bir malzemede meydana gelen gerilme ve deformasyon görülmektedir.



Şekil 2.28: FRANC2D programı kullanılarak merkez çatlaklı bir malzemenin a) Modeli, b) Deforme şekli, c) Çatlak ucunda meydana gelen maksimum kayma gerilmesi

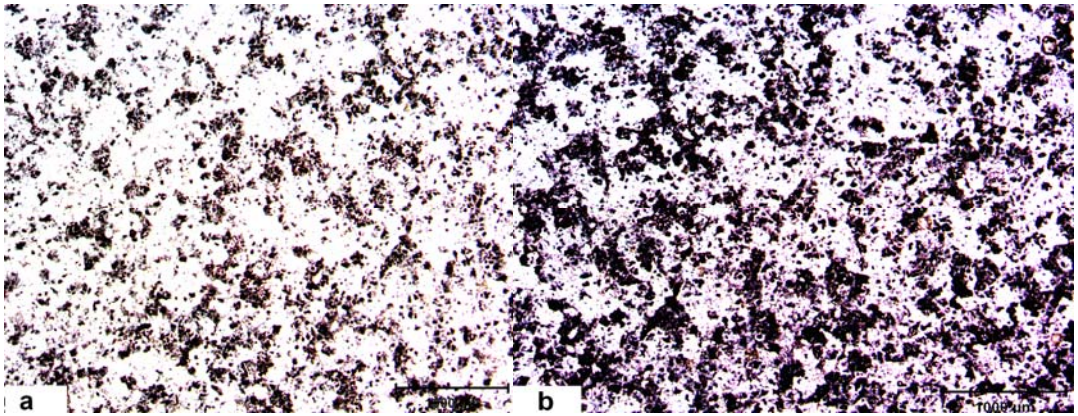
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Deneysel Bulgular

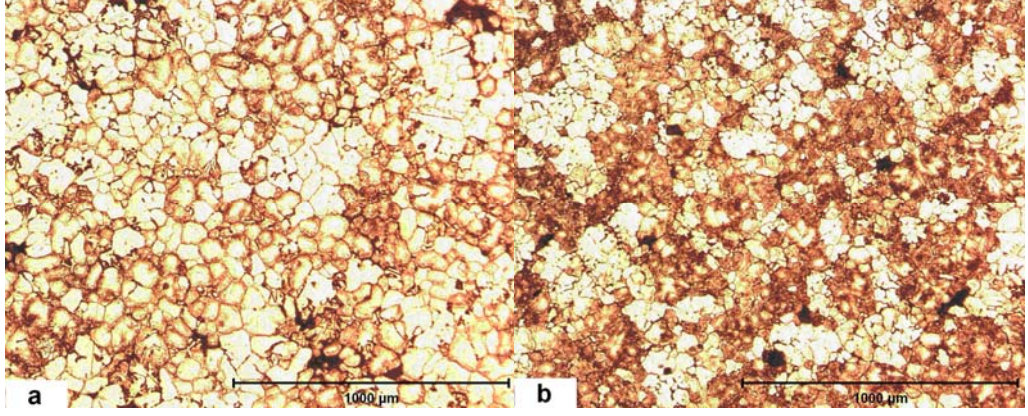
Savurma döküm yöntemi ile et kalınlıkları ve mekanik özellikleri birbirinden farklı 5 adet FDM, 1 adet de 2014 alaşımı dökülmüştür. Elde edilen silindirik malzemelerin her birinin et kalınlığı birbirinden farklı olduğu için, gerek partikül dağılımları gerekse mekanik özellikleri farklılık göstermiştir. Bu bölümde 1,2,3,4, ve 5 numaralı malzemeler FDMleri, 6 numaralı malzeme ise döküm alüminyum 2014 alaşımını ifade etmektedir.

3.1.1 Mikroyapı incelemeleri

Savurma döküm sırasında meydana gelen santrifüj kuvvet etkisiyle ve alüminyum ile SiC arasındaki yoğunluk farkından dolayı, SiC partiküllerinin dışa doğru daha fazla dağılımı öngörülmüştür. Yapılan mikroyapı incelemelerinde bu fark açıkça görülmektedir (Şekil 3.1.a,b ve Şekil 3.2.a,b). Silindirin iç çap ve civarı alüminyumca zengin olmakla beraber, dış çapa doğru et kalınlığı boyunca ilerledikçe SiC partiküllerinin dağılım oranı artmaktadır.

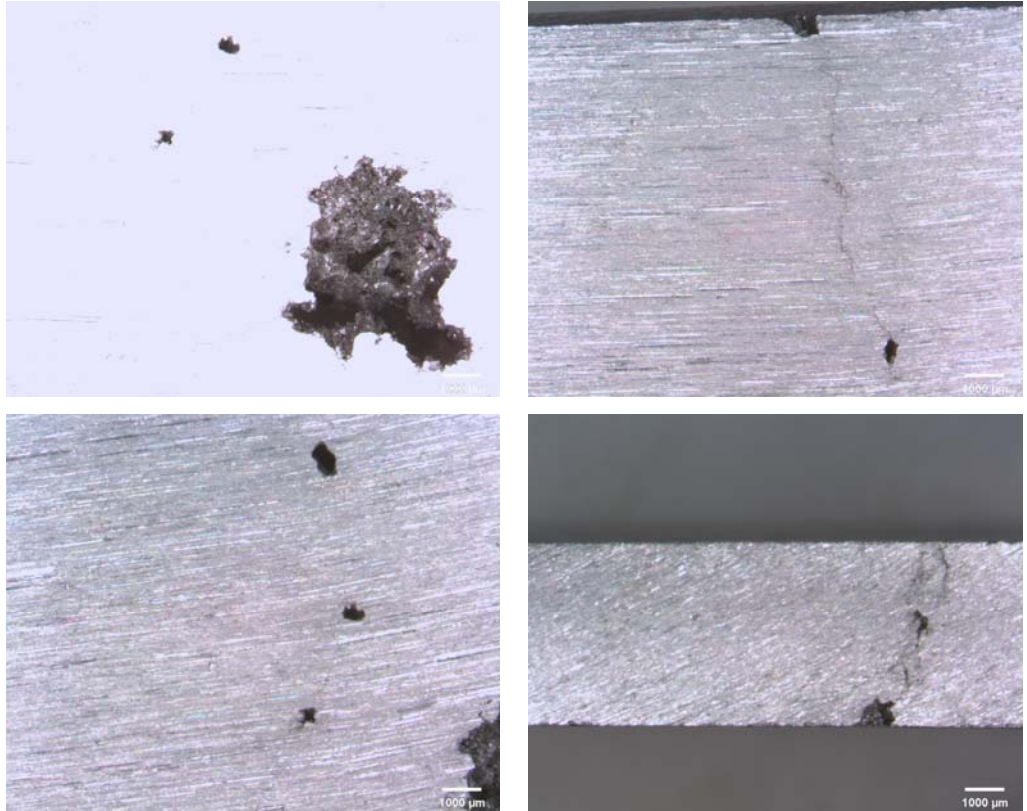


Şekil 3.1: SiC dağılımı (a:Alüminyumca zengin olan bölge, b:SiC'ce zengin olan bölge, büyütme 20x)



Şekil 3.2: SiC dağılımı (a: Alüminyumca zengin bölge, b:SiC'ce zengin olan bölge, büyütme 50x)

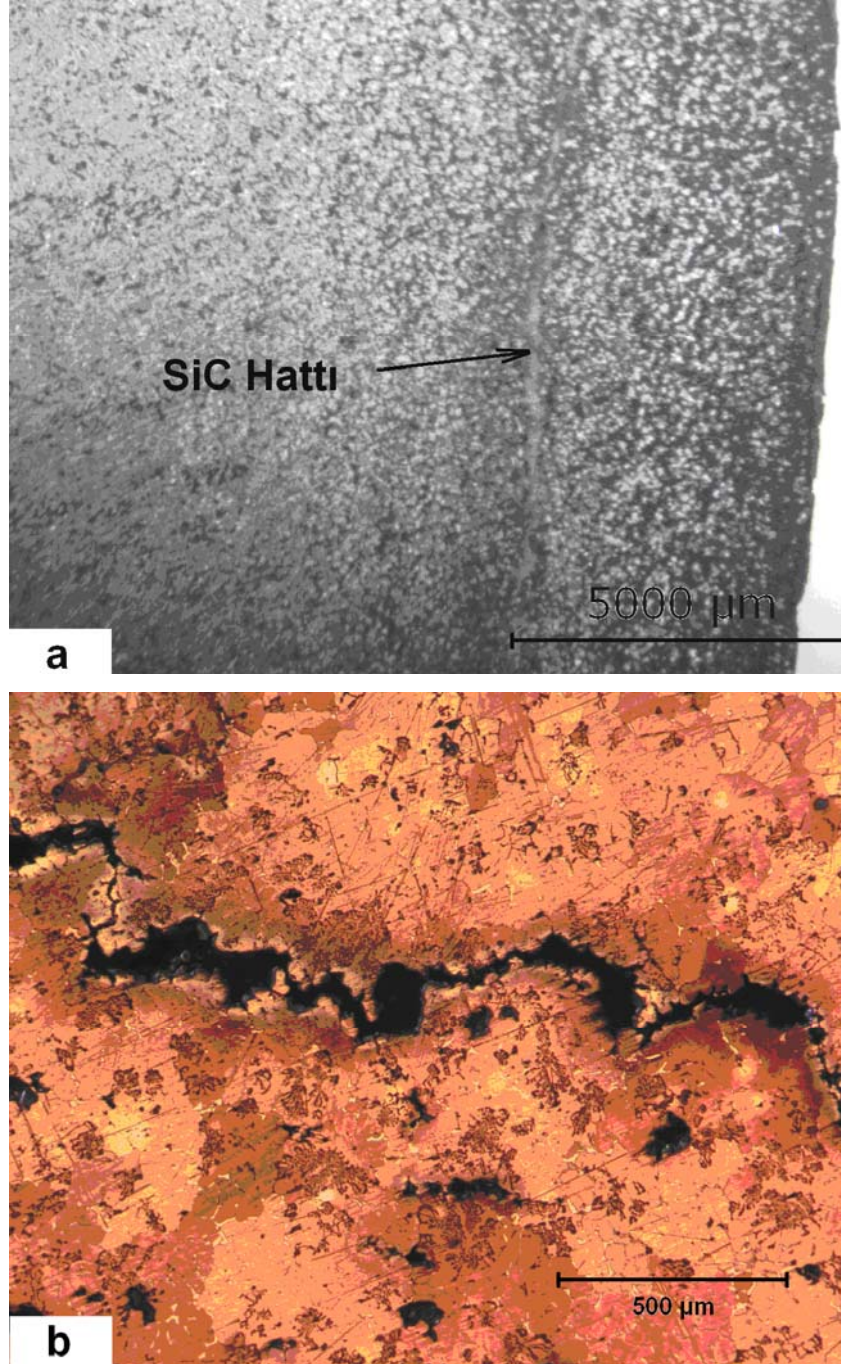
Yapılan incelemelerde, savurma döküm atmosferik şartlarda gerçekleştirildiğinden dolayı, iç çap civarında çok fazla döküm boşluklarının olduğu görülmüştür (Şekil 3.3). Numuneler hazırlanırken, döküm boşluklarının olduğu kısımlar daha fazla işlenmiş, elde edilen numunelerden döküm boşlukları olanlar deneylere tabi tutulmamıştır.



Şekil 3.3: Numunelerde oluşan döküm boşlukları

Mikroyapı incelemelerinde malzeme içerisinde belirgin bir SiC hattı olduğu görülmüştür (Şekil 3.4). Alüminyumun yüksek katılma hızının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Döküm sırasında kalıbın dönme hızının çok yüksek

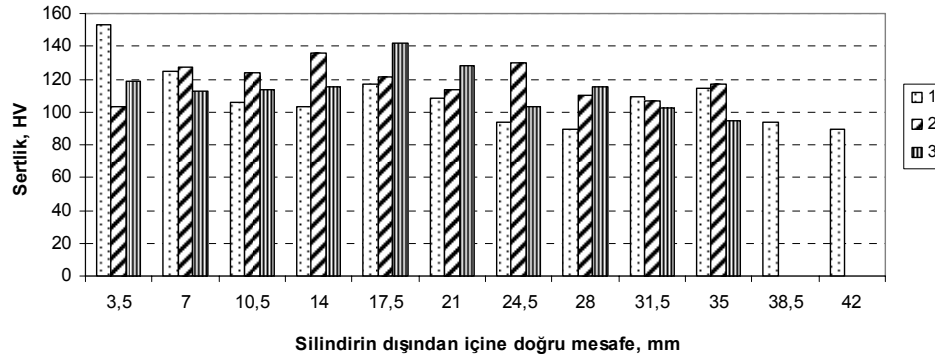
olmasına rağmen, yine de SiC partikülleri silindirin dış kısmına tam olarak dağılamamıştır. Alüminyumun erken katılaşması sonucu belirgin bir şekilde görülebilen bir SiC hattı ve etrafında küçük çatlaklar oluşmuştur. Bu hat, FDM'lerde farklı mesafelerde dış çaptan iç çapa doğru 3 ila 6 mm mesafede kendini göstermiştir. Mekanik deneyler yapılırken, bu hattın malzemenin mekanik özelliklerini etkilediği görülmüştür.



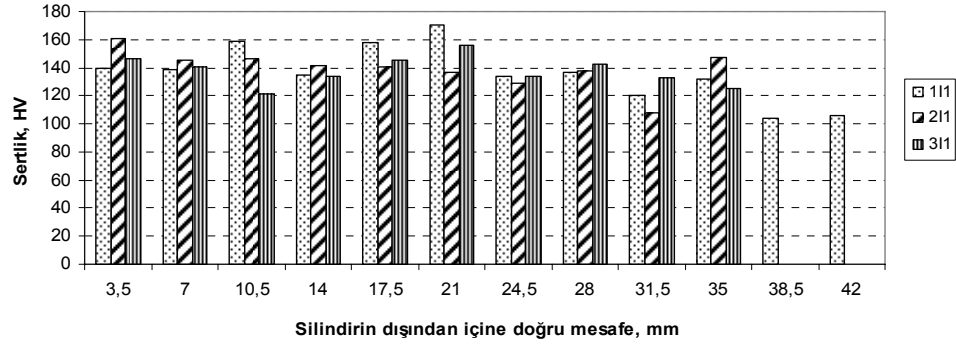
Şekil 3.4: Döküm FDMlerde oluşan SiC hattı (a: 7,5x büyütme, b: 50x büyütme)

3.1.2 Sertlik ölçüm sonuçları

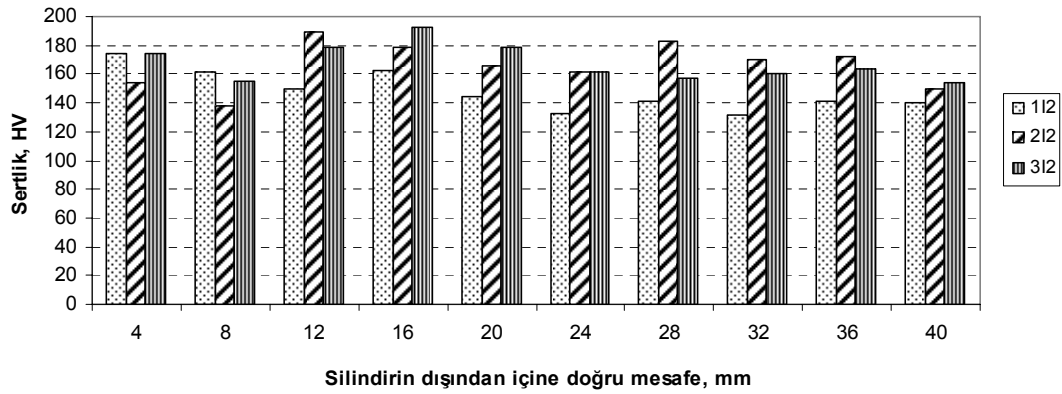
Savurma döküm ile elde edilmiş olan silindirik FDM'lerin et kalınlığı boyunca sertlik dağılımları dökülmüş hal ve yaşlandırılmış haller için çıkarılmıştır. Yapılan Vickers sertlik ölçümleri sonucunda, yaşlandırma işlemi ile FDM'nin sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Gerek dökülmüş halde gerekse yaşlandırma yapılmış halde silindirin SiC'ce zengin olmayan iç kısmı ile SiC'ce zengin olan dış kısmı arasında sertlik değerleri arasında fark oluşmuştur. Şekil 3.5-3.6 'da et kalınlığı boyunca sertlik değişim grafikleri görülmektedir. Dökülmüş haldeki FDM'nin sertlik değerleri, literatürde verilen ve bu çalışmada ısıl işlem parametreleri esas alınmış olan çalışmalarda ki sertlik değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Üretilen FDM'nin iç kısımlarında daha az SiC bulunmasına rağmen, elde edilen en az sertlik değeri 80 HV değerinin üzerindedir. Yaşlandırma işlemleri ile elde edilmiş olan sertlik değeri ise ortalama 140 HV'dir. Quadrini (1993) tarafından yapılan ve II olarak ısıl işlem parametresi alınmış olan çalışmada ağırlıkça %20 SiC whiskers içeren Al 2014 kompozitinin sertlik değerleri ısıl işlem öncesi 74HV, ısıl işlem sonrası 140HV olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.5: 1,2 ve 3 numaralı FDM'nin dökülmüş halde sertlik dağılımı



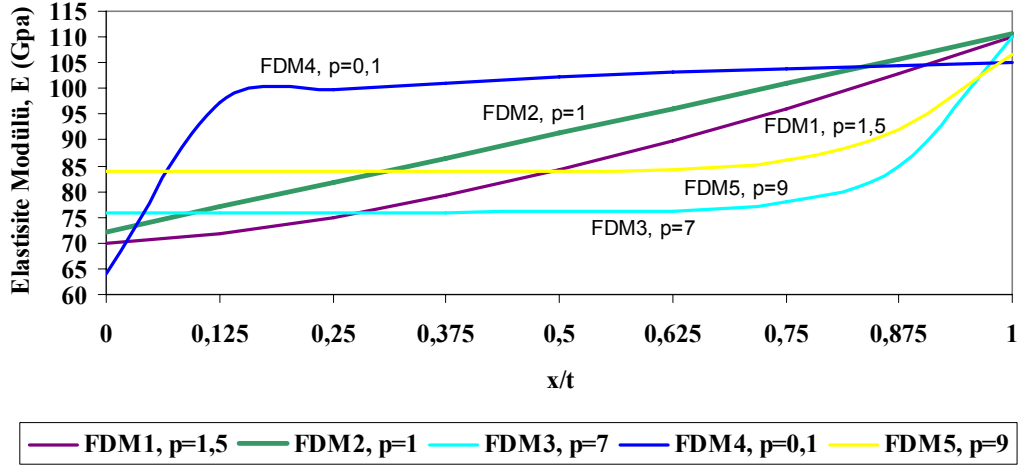
Şekil 3.6: 1,2 ve 3 numaralı FDMler için I1 yaşlandırma işlemi uygulanmış halde sertlik dağılımı



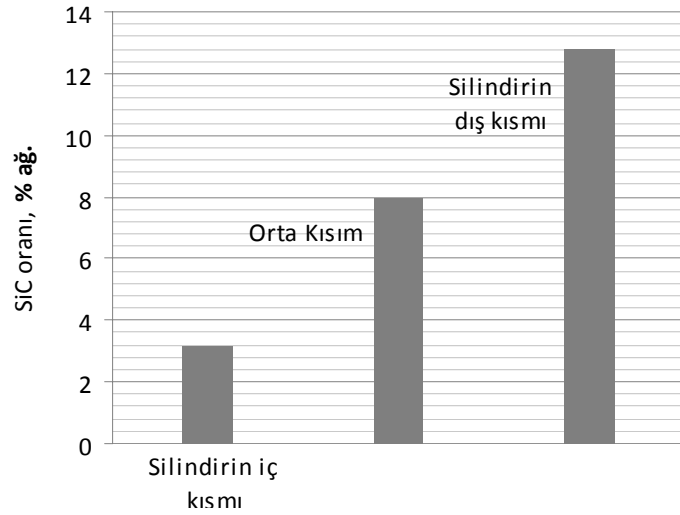
Şekil 3.7: 1,2 ve 3 numaralı FDMler için I2 yaşlandırma işlemi uygulanmış halde sertlik dağılımı

3.1.3 Çekme deneyi sonuçları

SiC ve Al 2014 için ortalama olarak verilen yoğunluk değeri sırasıyla $3,2 \text{ g/cm}^3$ ve $2,8 \text{ g/cm}^3$, elastisite modülü değerleri ise 410 GPa ve 72,4 GPa'dır. SiC partiküllerinin alüminyum alaşımdan daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı, döküm esnasında santrifüj kuvvet etkisiyle, beklenildiği gibi silindirin dış kısmına doğru daha fazla partikül dağılmıştır. Bunun sonucu olarak da elastisite modülü içten dışa doğru et kalınlığı boyunca artış göstermiştir. Şekil 3.8, FDMlerin elastisite modülü değişimlerini göstermektedir. 6 olarak numaralandırılan malzeme 2014 alaşımı döküm olduğu için grafiklerde yer almamıştır. 6 numaralı malzeme için elastisite modülü ortalama 63 GPa'dır. Elde edilen elastisite modülü değerlerinden yola çıkılarak 2 numaralı FDM için hesaplanmış olan SiC dağılımı Şekil 3.9'da görülmektedir.

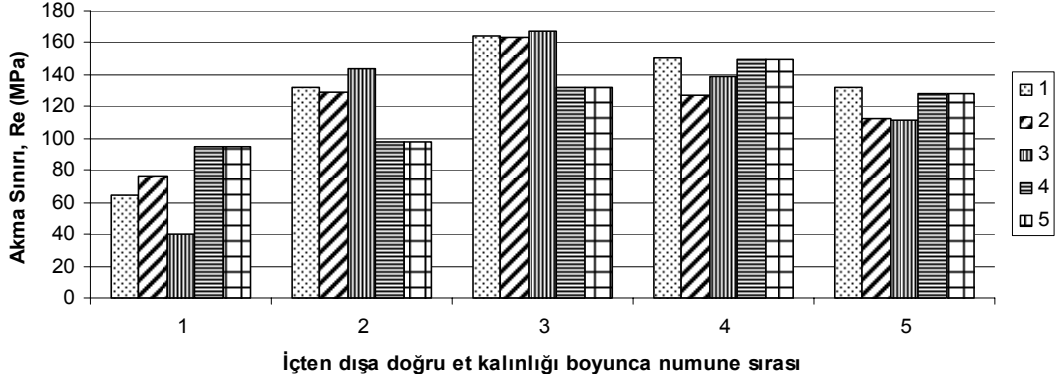


Şekil 3.8: 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre elastisite modülleri değişimi (dökülmüş halde)

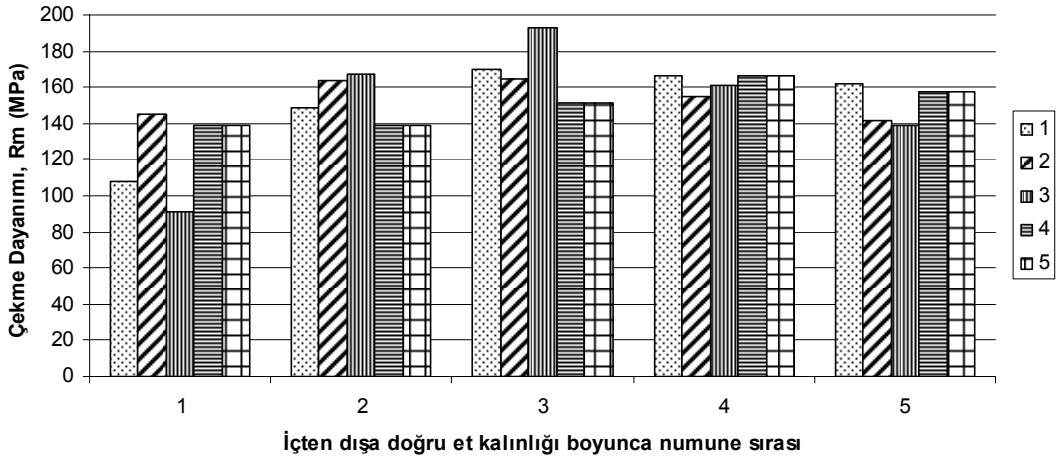


Şekil 3.9: 2 numaralı FDM'nin iç kısımdan dış kısma doğru hesaplanan SiC dağılımı

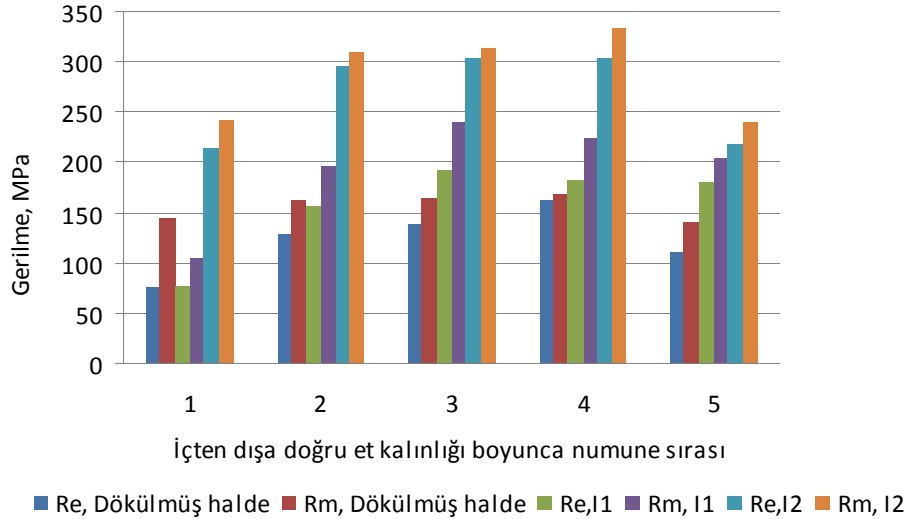
Partikül takviyeli FDM'lerin savurma döküm ile üretiminde, et kalınlığının farklı bölgelerinde, partikül boyutuna ve et kalınlığına bağlı olarak, farklı yoğunlukta partikül birikmesi olabilir (Ogawa ve diğ, 2006). Bu yüzden silindirin et kalınlığı boyunca sertlik, R_e ve R_m değerleri elastisite modülü gibi sürekli artan veya azalan bir değişim göstermemiştir. Şekil 3.10-3.12'deki grafiklerde görülen R_e ve R_m değerleri, FDMler için et kalınlığı boyunca belli bir formülasyon oluşturacak şekilde dağılmamıştır. Her bir değer, yapılan iki deneyin ortalamasıdır. Yaşlandırma işlemleri ile fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin R_e ve R_m değerleri 1,5–2 kat artış göstermiştir.



Şekil 3.10: 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre akma sınırı değişimi (dökülmüş halde)



Şekil 3.11: 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerin içten dışa doğru numune sayılarına göre çekme dayanımı değişimi (dökülmüş halde)

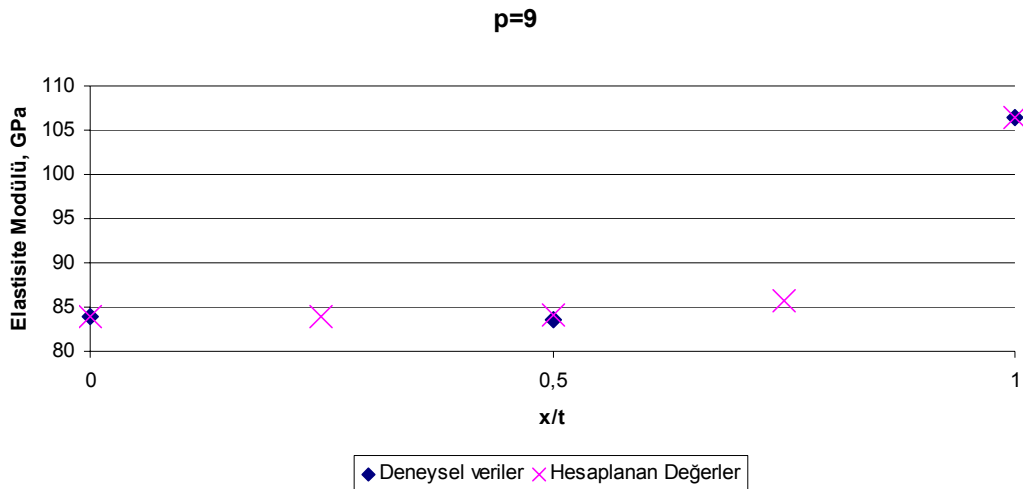


Şekil 3.12: 2 numaralı FDM'nin yaşlandırma işlemleri ile akma sınırı ve çekme dayanımı değişimi

Alüminyum 2014 alaşımının (6 numaralı döküm) elastisite modülü $E=63$ GPa, ortalama akma sınırı $R_e=110$ MPa ve çekme dayanımı $R_m=141$ MPa olarak tespit edilmiştir. Literatürde Alüminyum 2014 dövme alaşımı için ısıtılmış durumda $E=73,9$ GPa, $R_e=90$ MPa ve $R_m=186$ MPa olarak verilmektedir. Yaptığımız savurma döküm atmosferik şartlarda yapıldığı ve çok fazla döküm kusurları olmasına rağmen, elastisite modülü haricindeki değerler literatürle uyumludur. Elastisite modülü'ndeki bu azalmanın, döküm şartlarının iyileştirilmesi ile ortadan kaldırılacağı düşünülmektedir.

3.1.4 p üstelinin tespiti

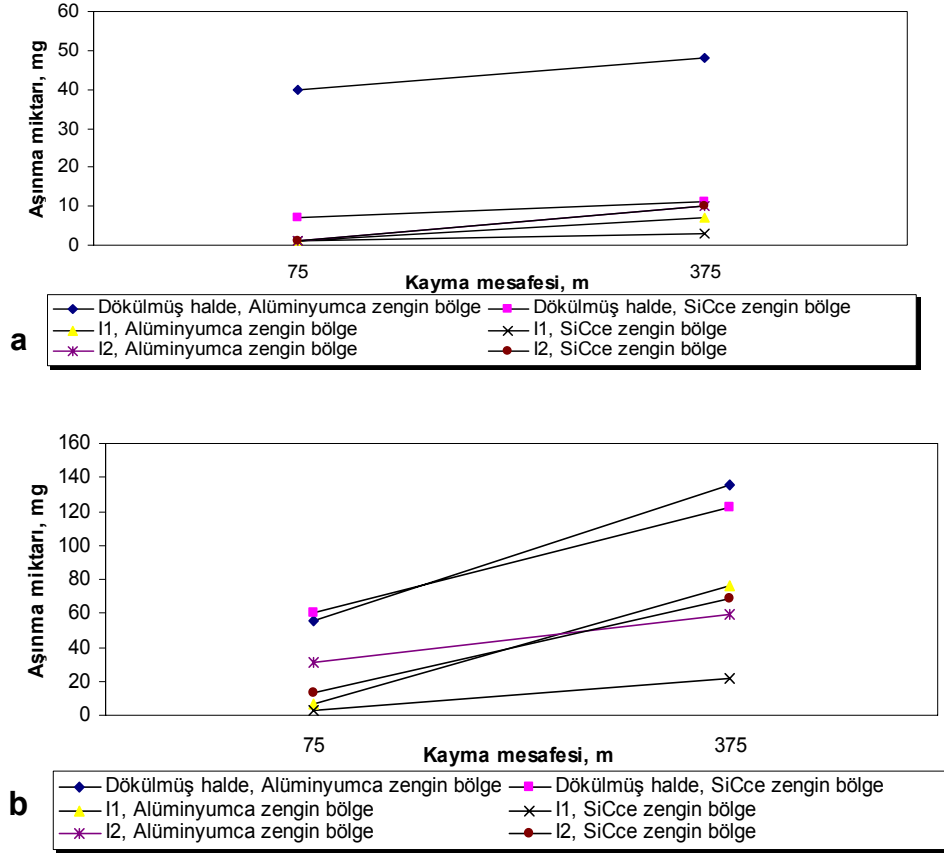
Çekme deneyleri sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri ve Bölüm 1'de verilen 1.1 ve 1.2 bağıntıları kullanılarak, Excel programında her bir FDM için hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen değerlerin en yakın olduğu p değerleri bulunmuştur. Denklem 1.2'de gerekli olan E_1 ve E_2 değerleri çekme deneyinde elde edilen (1 alüminyumca zengin taraf, 5 SiC'ce zengin taraf olmak üzere) 1 ve 5 numaralı numunelerin değerleridir. $E(x)$ ise, 1 ile 5 arasındaki numunelerden elde edilmiş olan elastisite modülüdür. Denklem 1.2'de bu değerler yerine konulduğunda $g(x)$ fonksiyonunun değeri elde edilmektedir. Denklem 1.1'de t , e ve kalınlığını ifade etmektedir. Elastisite modülü değerleri belirli olan numunelerin, başlangıç olarak kabul edilen alüminyumca zengin kısımdan itibaren ($x=0$) x koordinatları belirlidir. Burada p yerine değerler girilerek yaklaşık çözümler bulunmuştur. Deney sonuçları ile en fazla yakınlık elde edilen değerler geçerli sayılmıştır.



Şekil 3.13: p üstelinin Excel programında elde edilişi

3.1.5 Aşınma deneyi

Aşınma deneylerinde, uygulanan yükün ve alınan yolun artması ile birlikte aşınma miktarı artmıştır. SiC'ce zengin olan kısımda aşınma miktarının genel olarak SiC'ce zengin olmayan kısma göre daha az olduğu görülmüştür. Şekil 3.14.a ve b'de 1 numaralı FDM'nin kuru sürtünme şartı altında ki aşınma grafikleri verilmiştir. Kuru sürtünme şartları altında, dökülmüş haldeki numunelerdeki aşınma miktarı, yaşlandırılmış olan numunelere oranla daha fazladır. Numunelere uygulanan yaşlandırma işlemleri ile FDM'nin aşınma direnci artmıştır.

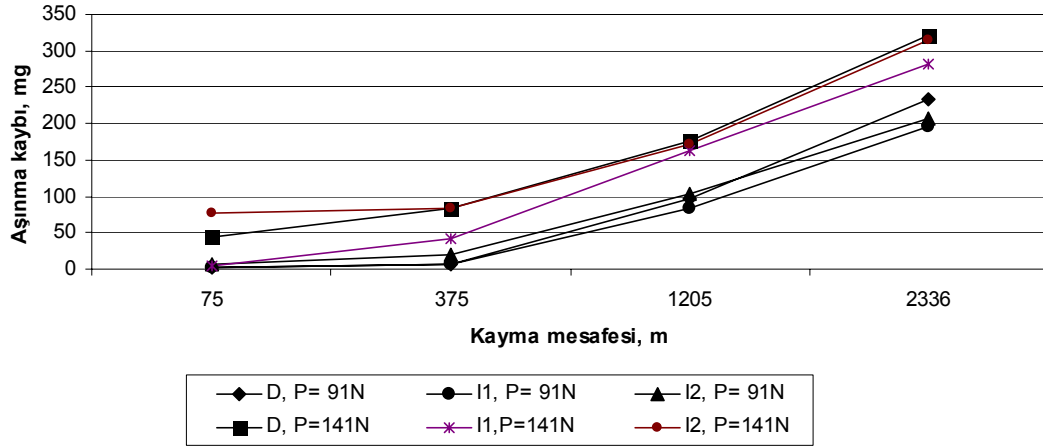


Şekil 3.14: 1 numaralı FDM'nin kuru sürtünme şartları altında aşınma davranışı (a: P=91 N; b: P=140 N)

Aşınma oranı olarak, dökülmüş haldeki FDM'nin aşınma miktarı / I1 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış FDM'nin aşınma miktarı göz önüne alındığında;

- P=91 N yük altında 75 m kayma mesafesi için 30; 375 m kayma mesafesi için 15,
- P=140 N yük altında 75 m kayma mesafesi için 15; 375 m kayma mesafesi için 7 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.15’de, kuru ve sıvı sürtünme şartları altında FDM’nin göstermiş olduğu aşınma miktarları görülmektedir. Sıvı sürtünme şartları altında, uygulanan yük ve alınan yolun artmasıyla birlikte dökülmüş ve yaşlandırılmış numuneler için aşınma miktarı değerleri birbirine yaklaşmıştır.



Şekil 3.15: 2 numaralı FDM’nin kuru ve sıvı sürtünme şartları altında dökülmüş ve yaşlandırma işlemi uygulanmış halde aşınma değerleri (D: Dökülmüş halde; I1: I1 yaşlandırma işlemi uygulanmış; I2: I2 yaşlandırma işlemi uygulanmış. Grafikteki değerler, alüminyum ve SiC’ce zengin taraflardan elde edilmiş numunelerin aşınma değerlerinin ortalamasıdır.)

Kuru sürtünme şartı altında hesaplanan değerler gibi, aşınma oranı olarak, dökülmüş haldeki FDM’nin aşınma miktarı / I1 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış FDM’nin aşınma miktarı göz önüne alındığında;

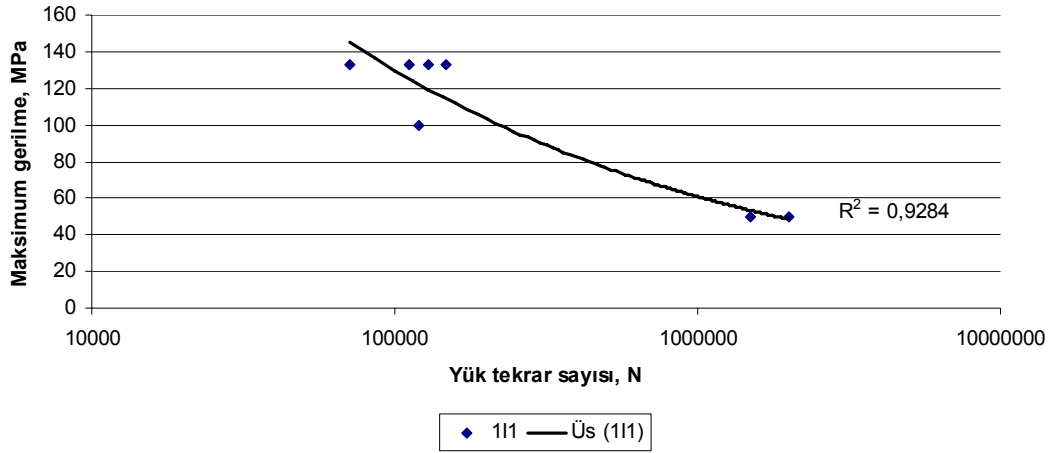
- P=91 N yük altında 1205 m kayma mesafesi için 1,25; 2336 m kayma mesafesi için 1,06,
- P=140 N yük altında 1205 m kayma mesafesi için 1,15; 2336 m kayma mesafesi için 1,01 olarak bulunmuştur.

Kuru ve sıvı sürtünme şartlarında, en az aşınma kaybı değerleri, I1 olarak adlandırılan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda elde edilmiştir. Deneyler sonucunda disk malzemesi olarak kullanılan sertleştirilmiş AISI 2080 çeliğinde deneyleri etkileyecek bir aşınma meydana gelmezken, pim şeklindeki FDM numuneler aşınmıştır. Özellikle kuru sürtünme şartları altındaki aşınma sonuçlarına bakılarak, FDM’nin fretting yorulması için ısıl işlem şartı olarak I1 yaşlandırma ısıl işlemi seçilmiştir.

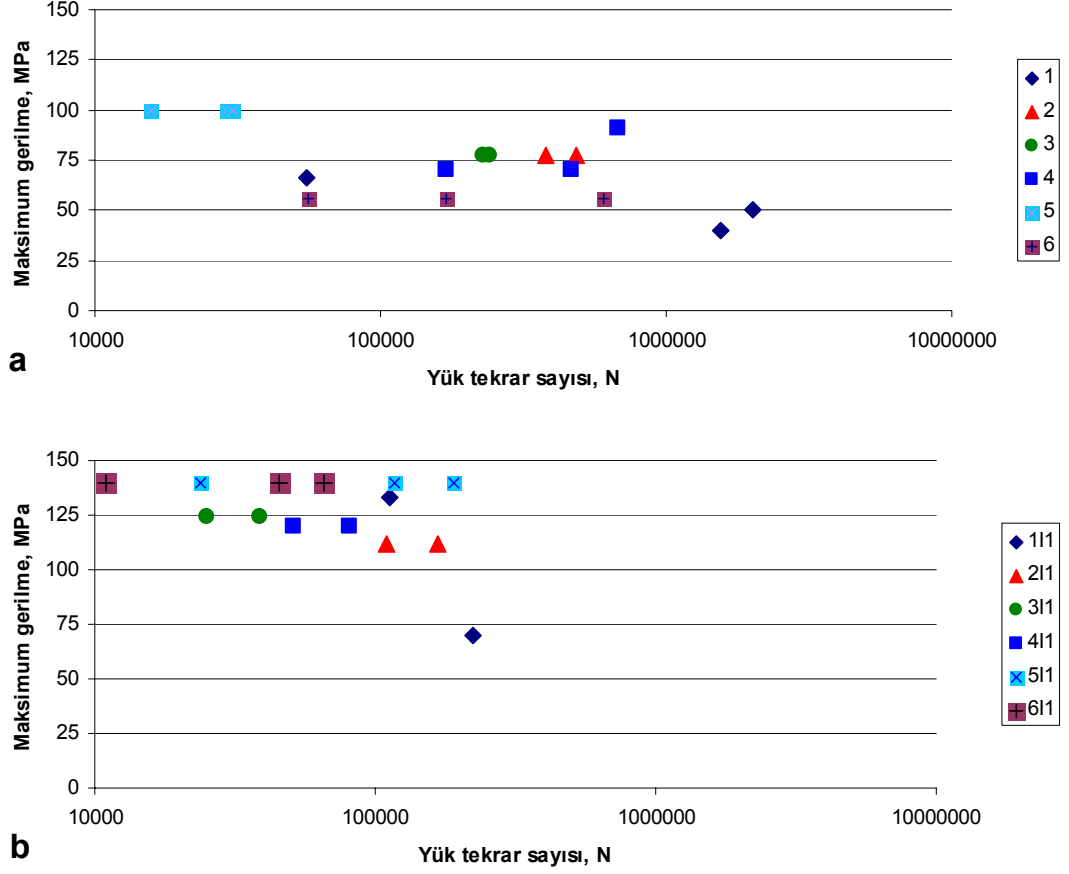
3.1.6 Yorulma Deneyi

Yorulma deneylerinde frekans olarak 20 Hz alınmıştır. Bunun nedeni, daha yüksek frekans değerlerinde malzemelerin hemen kopmasıdır. Yorulma deneylerinde uygulanan maksimum gerilme, FDM'nin en az akma sınırının %70'i olarak alınmıştır.

Yorulma deneyleri sırasında, bazı numuneler çeneye yakın kısımlardan kopmuştur. Bazı numuneler ise imalat ve döküm hatalarından dolayı hemen kopmuştur. Bu deney sonuçları geçersiz sayılmıştır. Bu yüzden mevcut malzemelerin tümü için yorulma grafikleri elde edilememiştir. Şekil 3.16'da 1 numaralı FDM'nin II yaşlandırma şartlarında elde edilmiş olan yorulma grafiği, Şekil 3.17'de ise diğer FDM'ler ve alüminyum alaşımı için elde edilmiş olan yorulma değerlerine örnekler görülmektedir.



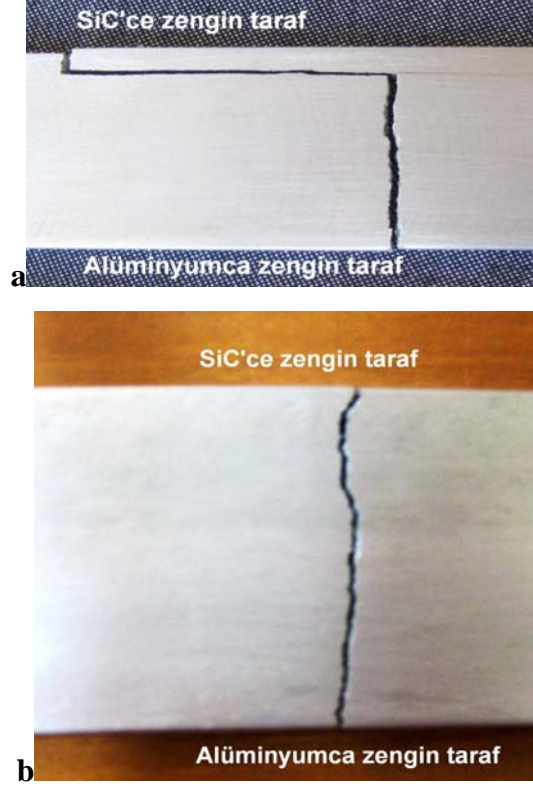
Şekil 3.16: II yaşlandırma işlemi uygulanmış 1 numaralı FDM'nin yorulma grafiği



Şekil 3.17: Dökülmüş halde (a) ve II yaşlandırma işlemi uygulanmış halde (b) bazı gerilme değerleri için elde edilmiş olan tekrar sayıları (1,2,3,4,5 numaralar FDMlere, 6 numara ise Al 2014 alaşımına ait değerleri göstermektedir).

Yaşlandırma işlemi ile FDMlerin yorulma dayanımları yaklaşık %50, alüminyum 2014 alaşımının ise %100 artmıştır.

Yorulma deneyleri sonrasında, numunelerde iki farklı çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir (Şekil 3.18). Yorulma çatlağı SiC'ce zengin olan kısımdan başladığında Şekil 3.18a'daki gibi bir kırılma, çatlak alüminyumca zengin bölgeden başladığında ise Şekil 3.18b'deki gibi bir kırılma meydana gelmiştir.



Şekil 3.18: Yorulma deneyi sonucunda oluşan farklı kırık yüzey şekilleri
SiC'ce zengin olan kısımdan başlayan çatlak, SiC hattını aştıktan sonra daha düz bir çizgi halinde devam etmiştir. Çatlak, alüminyumca zengin taraftan başladığında SiC hattının bir etkisi gözlemlenmemiştir.

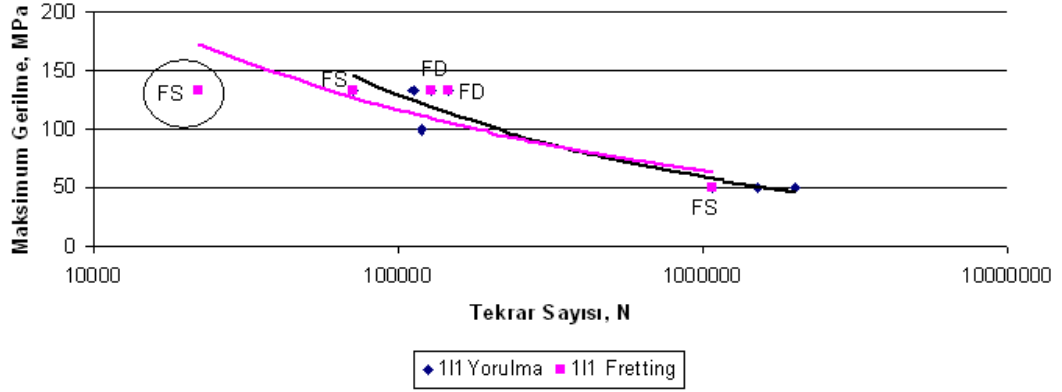
Deneyle sonrasında kırık yüzeyler incelendiğinde, Şekil 3.19'da görüleceği üzere, SiC'ce zengin olan bölgelerde, kırılma yüzeyinin hemen altında yoğun miktarda çatlak tespit edilmiştir. Alüminyumca zengin bölgeye ilerledikçe, bu çatlakların sayısı ve büyüklüğü azalmaktadır.



Şekil 3.19: SiC'ce zengin bölgeden (üst kısım) alüminyumca zengin bölgeye doğru kırık yüzeyin optik görüntüsü (büyütme 50x)

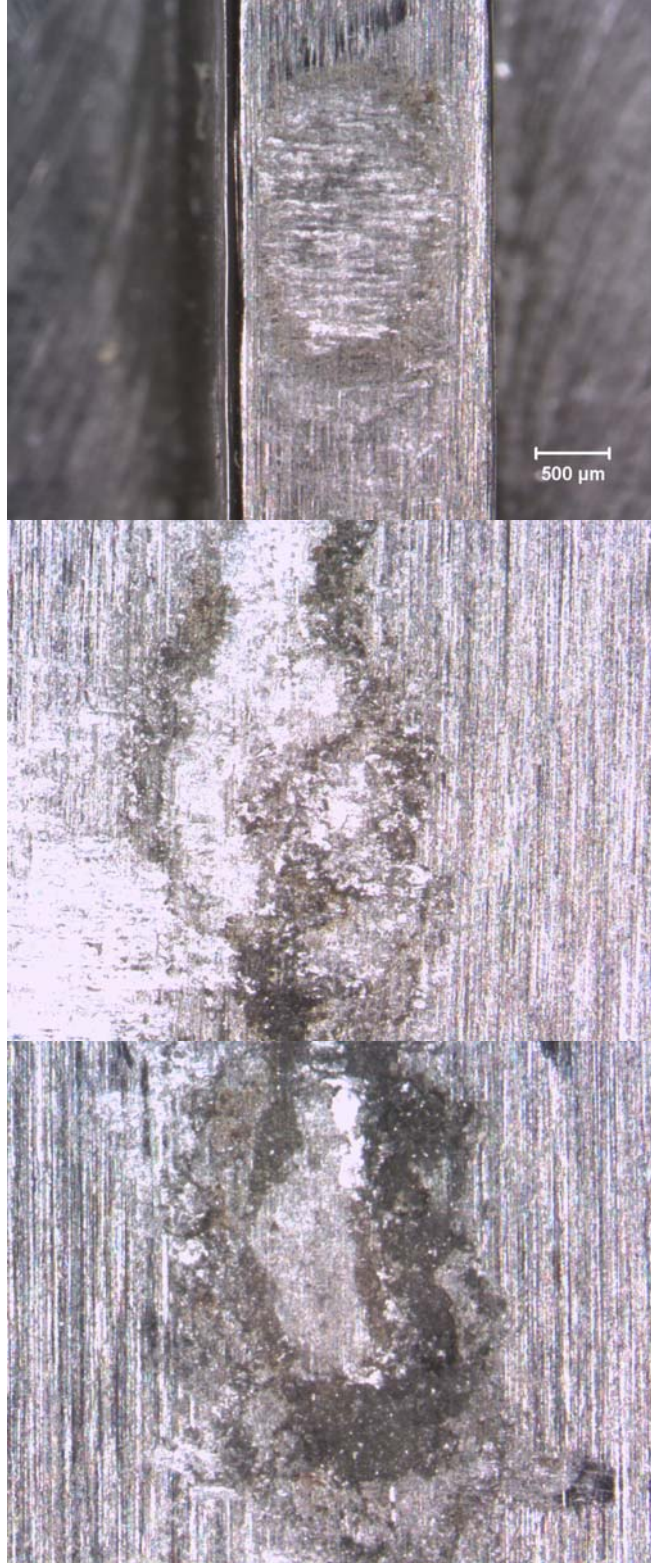
3.1.7 Fretting deneyi

Yapılan fretting deneylerinin %6'sında fretting pabuç altından kopma meydana gelmiştir. Ancak, bu deneylerin %66'sının sonuçları, malzemenin daha önce yapılan yorulma deneyi sonuçlarına yakındır. Yani sadece %2'lik bir deney sonucunda, yorulma dayanımının altında fretting kaynaklı kırılma meydana gelmiştir. Şekil 3.20'de 1 numaralı FDM için yapılan yorulma ve fretting yorulması deney sonuçları görülmektedir. Şekil 3.20'deki grafikte sadece yuvarlak içersisinde görülen deney, fretting yorulması sonucu kırılmayla sonuçlanmıştır. Diğer fretting numuneleri fretting hasarıyla değil, normal yorulma hasarıyla kırılmıştır.



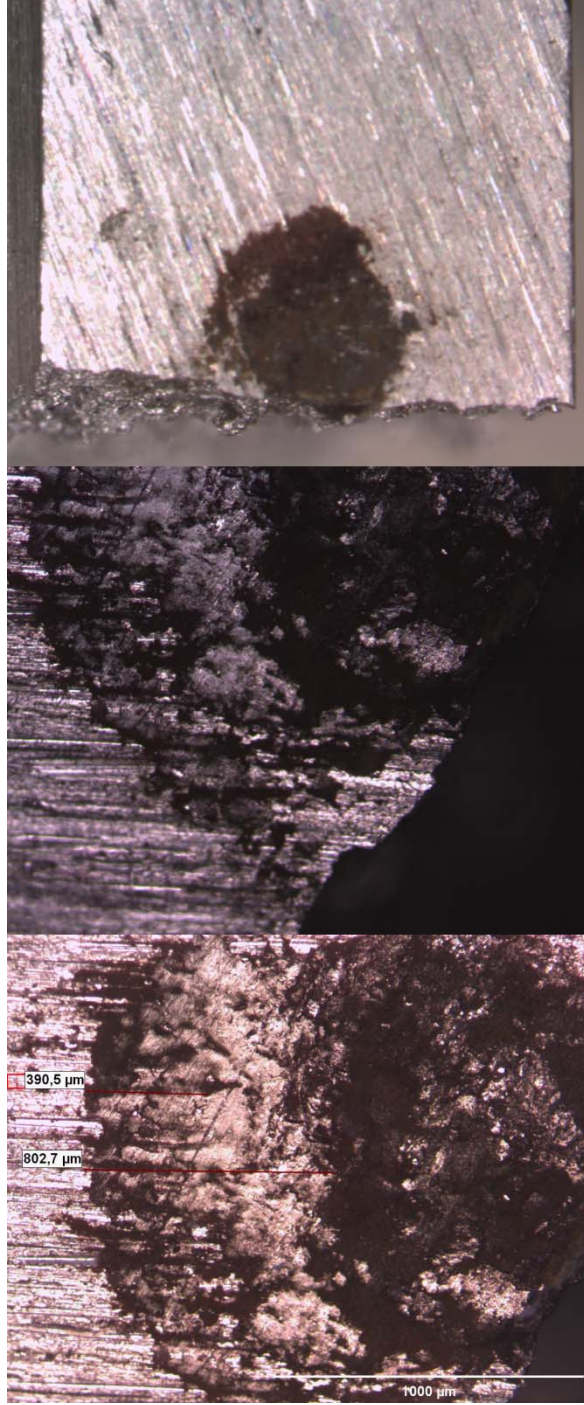
Şekil 3.20: 1 numaralı FDM'nin yorulma ve fretting yorulması sonuçları (Y: Yorulma, FD: Düz pabuç ile fretting yorulması, FS: Silindirik pabuç ile fretting yorulması)

Fretting pabuçlarının kullanımı ile ilgili literatürde, her bir pabuç çiftinin 20 civarı deneyde kullanılabileceği tavsiye edilmektedir. Ancak, kullandığımız FDM içerisindeki SiC'den dolayı, numune yüzeylerinden daha fazla aşınma pabuç yüzeylerinde meydana gelmiştir. Bu yüzden tekrar pabuç üretilerek deneylere devam edilmiştir. Şekil 3.21'de pabuç yüzeylerinde meydana gelen aşınma açıkça görülebilmektedir.

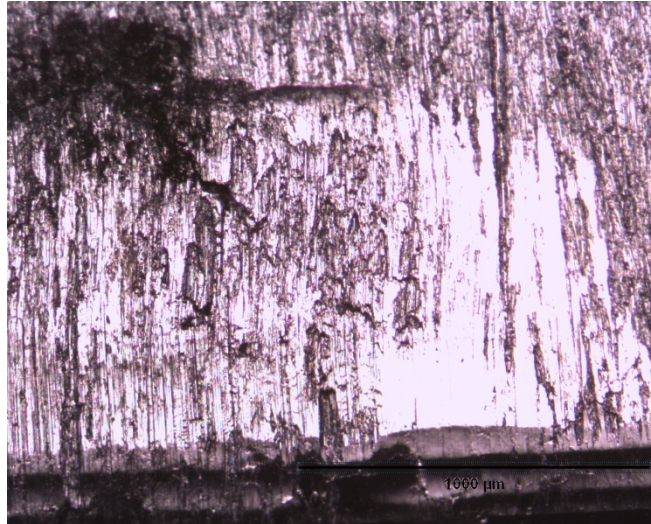
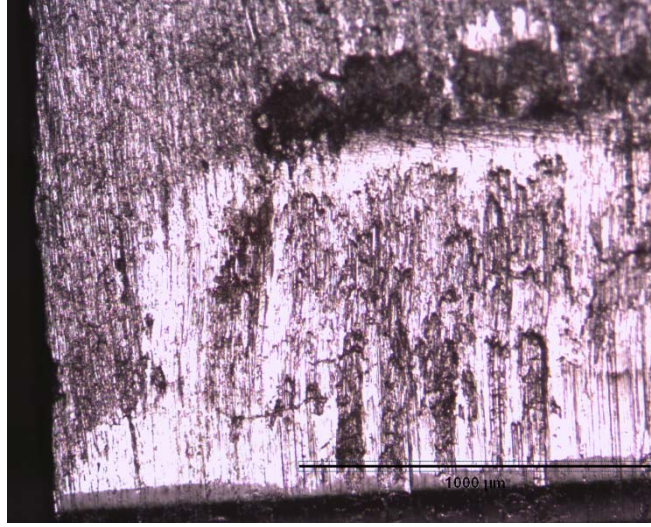
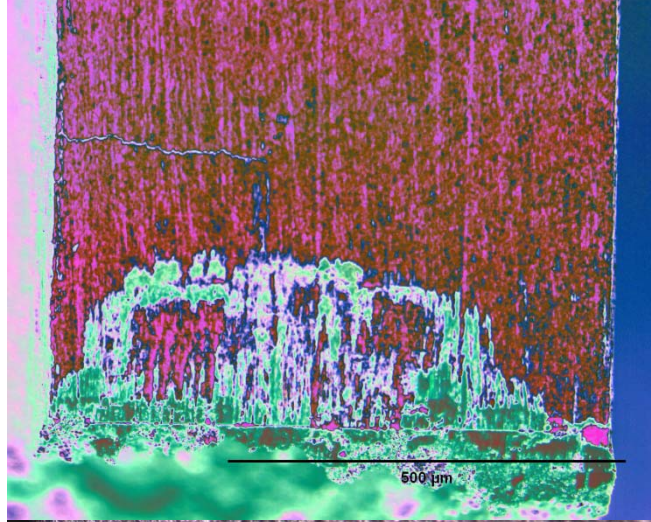


Şekil 3.21: Fretting pabuçlarında oluşan aşınma

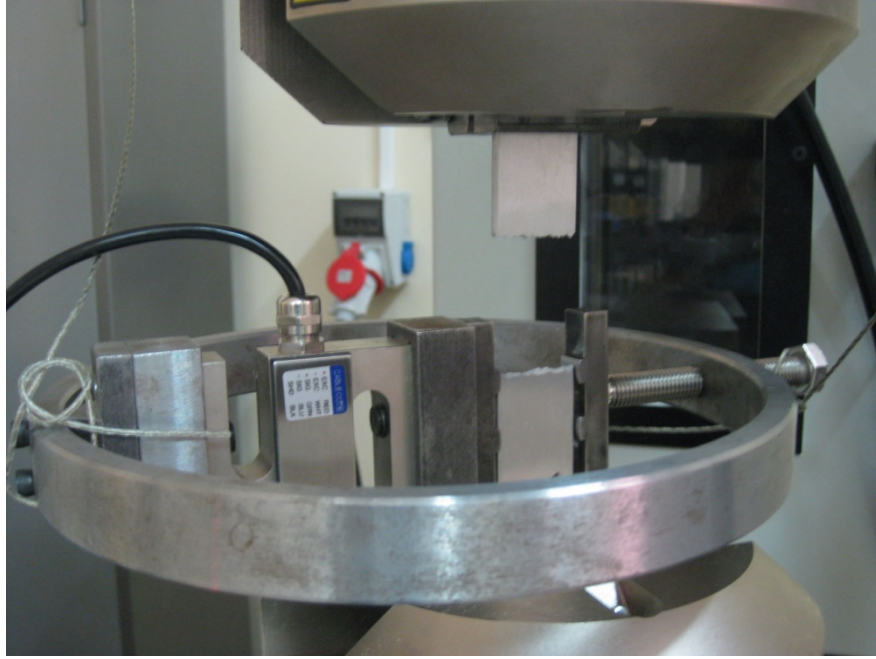
Şekil 3.22-3.23’de fretting hasarından dolayı kırılmış olan FDM’de kırık yüzeyler ve yapışma-kayma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 3.24’de ise fretting hasarından kırılmış numune, yorulma cihazı üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.22: Silindirik pabuç altında oluşan fretting hasarı



Şekil 3.23: Düz pabuç altında oluşan fretting hasarı



Şekil 3.24: Deney düzeneğinde fretting hasarıyla kırılmış numune

Yapılan fretting deneyleri sonucunda, savurma dökümü elde edilmiş olan FDMlerin yorulma davranışı üzerinde, fretting olayının çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Ancak, kesin sonuçlara varabilmek için;

- Farklı yüzey basınçlarında
- Farklı gerilme oranlarında
- Farklı pabuç malzemeleri ile
- Farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş FDMlerle

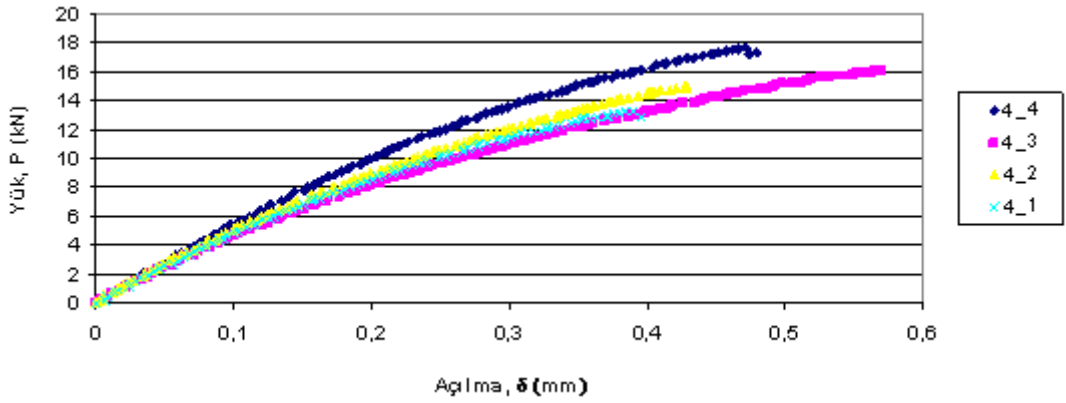
deneyler yapılmalıdır. Malzeme üretiminin vakum altında yapılmasının gerek mekanik özellikler gerekse fretting yorulması dayanımı üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.

3.1.8 Yorulmalı çatlak ilerleme deneyi

Yorulmalı çatlak ilerleme deneylerinden önce, merkez çatlaklı ve kenar çatlaklı numunelere çekme deneyi uygulanmıştır.

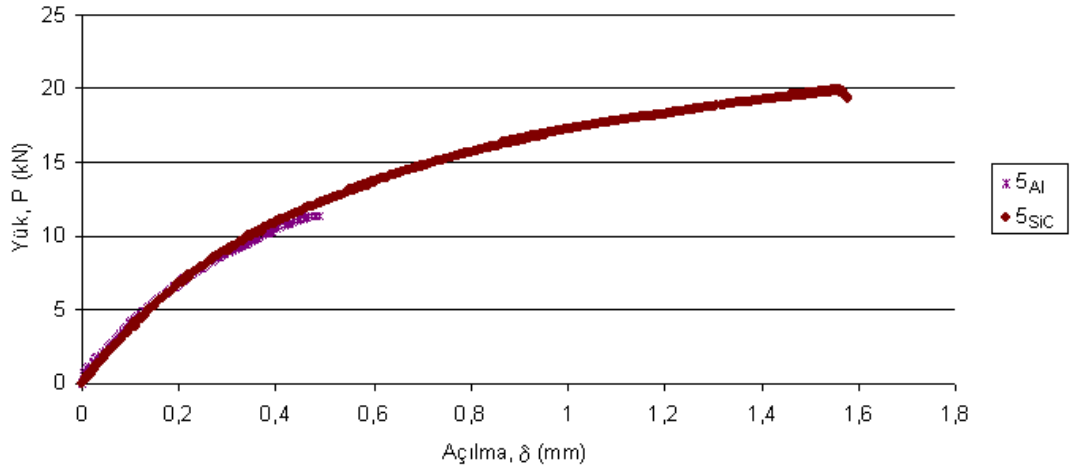
4 numaralı FDM için merkez çatlaklı olarak et kalınlığı boyunca tabakalar halinde çıkarılmış olan numunelerin yük-açılma grafikleri Şekil 3.25’de görülmektedir. Et kalınlığı boyunca değişen SiC dağılımı nedeniyle çekme deneyi sırasında elde edilen grafikler, farklılık göstermiştir. En yüksek SiC oranına sahip olan 4_4 numaralı numune diğer numunelerden daha fazla bir yükte kopmuştur. 4_1 numaralı numune,

en az SiC oranına sahip tabakadan elde edilmiştir ve en düşük kopma yükü bu numuneye aittir. Bununla birlikte, Bölüm 3.1.3’de anlatıldığı üzere, FDM’nin et kalınlığı boyunca partikül boyutuna ve et kalınlığına bağlı olarak yerel değişim gösteren SiC dağılımından dolayı farklılık gösteren R_e ve R_m değerleri, numunelerde aynı yük altında farklı uzama (açılma) değerleri elde edilmesinde etken olmuştur. Örneğin 0,35 mm’lik açılma değeri için elde edilen yük değerleri (SiC’ce zenginden alüminyumca zengine doğru sırası ile) 15 kN, 13 kN, 12 kN ve 12,5 kN’dur. Bu grafikler kullanılarak her bir tabaka için P_Q değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.25: Merkez çatlaklı 4 numaralı FDM’nin içten dışa tabakalar halinde elde edilmiş yük-açılma grafiği (4_1-4_4, silindirin et kalınlığı boyunca içten dışa numune sırasını göstermektedir)

5 numaralı FDM için alüminyumca ve SiC’ce zengin taraflardan kenar çatlak açılmış olan numunelerin yük-açılma grafikleri farklılık göstermiştir (Şekil 3.26). SiC’ce zengin taraftan kenar çatlak açılmış olan numune daha büyük bir yük değerinde kopmuştur. Bu durumda yine SiC hattının etkili olduğu görülmektedir. Bu hat, çatlak ilerlemesini veya açılmasını, belirli bir yük değerine kadar engellemekte ve dolayısı ile malzemede çatlak ilerleyişi bu değere kadar daha yavaş olmaktadır.

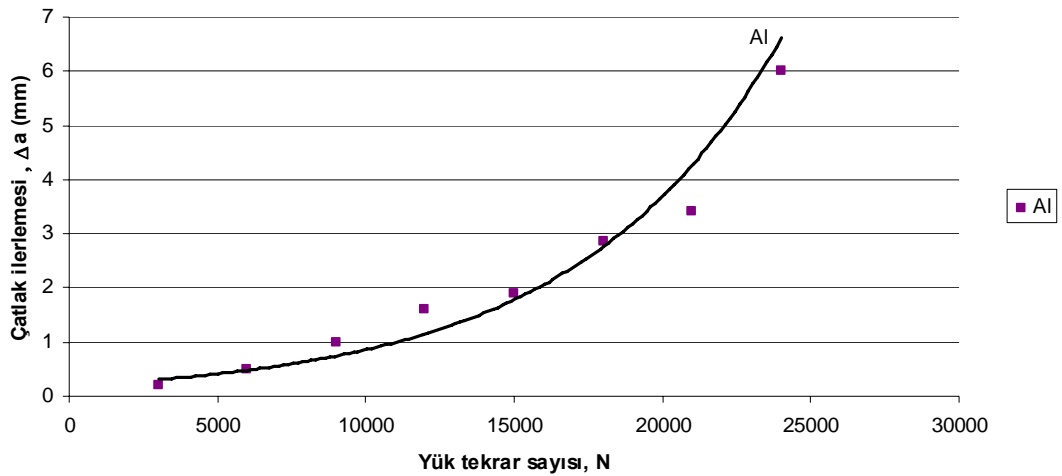


Şekil 3.26: Kenar çatlaklı 5 numaralı FDM'nin yük-açılma grafiği (5_{Al} , alüminyumca zengin taraftan kenar çatlak açılmış; 5_{SiC} , SiC'ce zengin taraftan kenar çatlak açılmış numune)

Bölüm 2.1.9.1'de de değinildiği üzere; Şekil 3.26'daki çekme deneyi grafiklerine kırılma mekaniği hesaplamalarında kullanılacak olan P_Q değerlerinin elde edilmesi yönünden bakılacak olursa iki farklı sonuç çıkarılabilir:

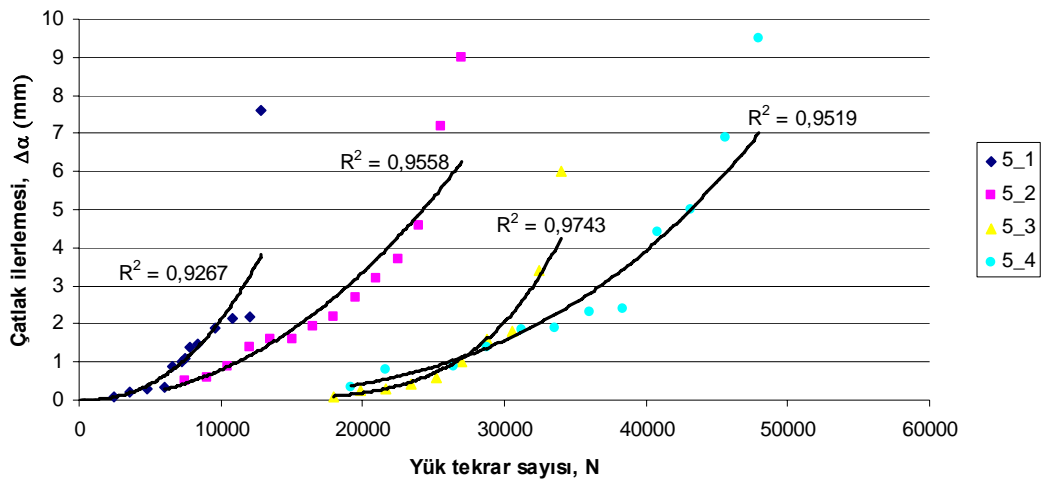
- Alüminyumca zengin taraftan açılmış olan çatlakın yük-açılma durumu $P_{maks}/P_Q < 1,1$ şartını sağladığı için, çatlak ile ilgili hesaplamalarda lineer elastik kırılma mekaniği kullanılabilir.
- SiC'ce zengin taraflardan kenar çatlak açılmış olan numunelerin yük-açılma durumu $P_{maks}/P_Q < 1,1$ şartını sağlamadığı için, çatlak ile ilgili hesaplamalarda lineer elastik-plastik kırılma mekaniği kullanılabilir.

Şekil 3.27'de merkez çatlak açılmış olan alüminyum alaşımının II yaşlandırma işlemi yapılmış halde, çatlak ilerlemesi-tekrar sayısı grafiği görülmektedir.



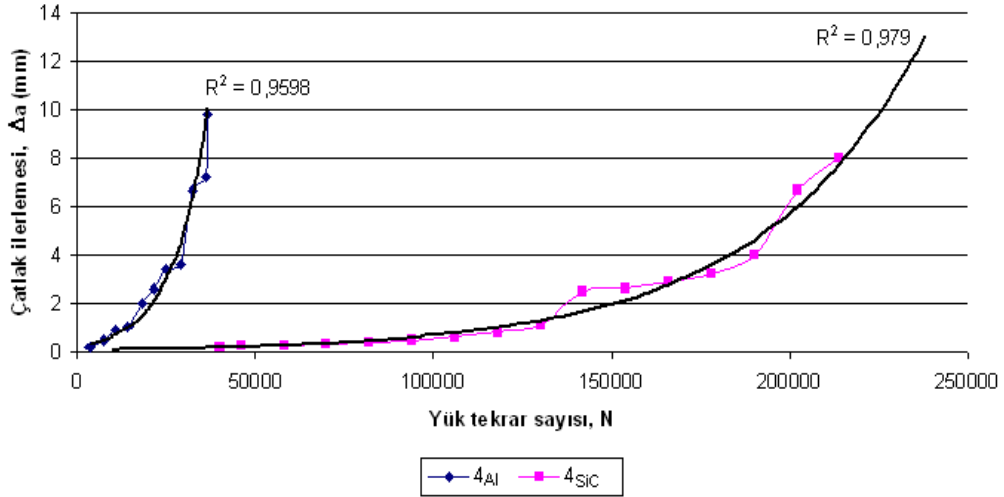
Şekil 3.27: Alüminyum 2014 alaşımının yük tekrarıyla çatlak ilerlemesi grafiği

Yorulmalı çatlak ilerlemesi deneyleri sonucunda, tabakalar halinde silindirin et kalınlığı boyunca çıkarılmış olan merkez çatlaklı numunelerin tekrar sayıları ile çatlak ilerleme değerleri arasında bariz farklar olduğu görülmüştür. Alüminyumca zengin bölgeden elde edilmiş olan numunelerdeki çatlaklar (5_1) çok daha küçük tekrar sayılarında ilerlemeye başlamıştır ve yaklaşık 14000 yük tekrar sayısında kopmuştur (Şekil 3.28). SiC'ce zengin olan 5_4 numaralı numune ise yaklaşık olarak 50000 yük tekrar sayısına kadar dayanmıştır. Uygulanan yorulma gerilmesi değerleri aynı olmasına rağmen, numunelerde SiC oranı arttıkça çatlak hem daha geç başlamakta hem de çatlak ilerleme hızı düşmektedir.



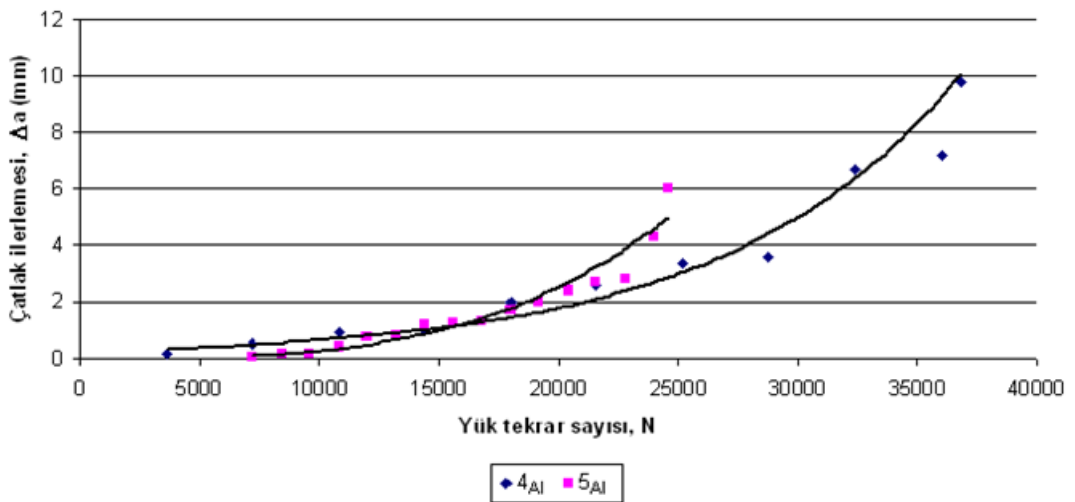
Şekil 3.28: 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerin tekrar sayısı ile göstermiş oldukları çatlak ilerleme değerleri (1-4, silindirin et kalınlığı boyunca içten dışa numune sırası)

Alüminyumca zengin olan ve olmayan taraflardan kenar çatlak açılmış olan numunelerde, aynı yük değerleri için, yorulma çatlak ilerlemesi büyük bir fark göstermiştir. Alüminyumca zengin olan taraftan çatlak açılmış olan numunelerde çatlak ilerlemesi, yorulma ömrünün çok erken safhalarında başlamıştır. Bu tür olan numunelerin kopma tekrar sayılarında, SiC'ce zengin olan taraftan çatlak açılmış olan numunelerde ancak çatlak ilerlemesi başlamaktadır (Şekil 3.29-3.31). SiC'ce zengin tarafa açılmış olan çatlakın daha yavaş ilerleyişinde yine SiC hattının etkili olduğu düşünülmektedir.

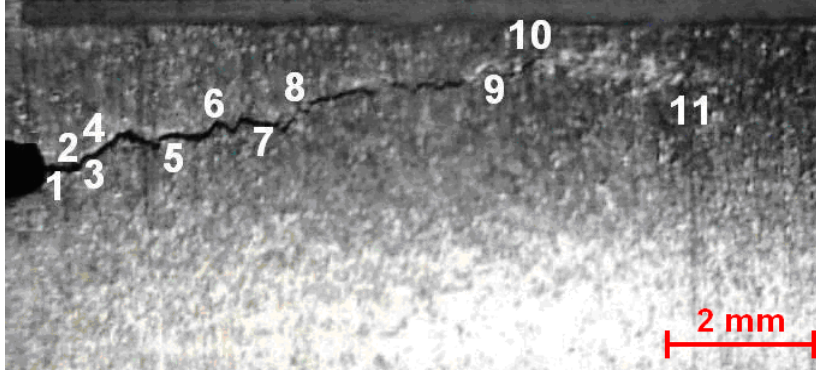


Şekil 3.29: 4 numaralı FDM'den elde edilmiş olan kenar çatlaklı numunelerin tekrar sayısı ile göstermiş oldukları çatlak ilerleme değerleri (4_{Al}, alüminyumca zengin taraftan kenar çatlak açılmış; 4_{SiC}, SiC'ce zengin taraftan kenar çatlak açılmış numune)

4 ve 5 numaralı FDM'lerde alüminyumca zengin tarafa açılmış olan kenar çatlağın ilerlemesi durumu Şekil 3.30'da görülmektedir. SiC dağılımını etkileyen p üstelinin bu durum üzerinde de etkili olduğu söylenebilir. Bölüm 3.1.3'de 4 numaralı FDM için p=0,1 ve 5 numaralı FDM için p=9 değerleri bulunmuştur (Şekil 3.8). Yorulma çatlak ilerleyişi bakımından, elastisite modülü düşük olan tarafa çatlak açılmış FDM için p<1 olması durumu p>1 olması durumundan daha avantajlı görünmektedir ve çatlak ilerleyişi daha yavaş olmaktadır.

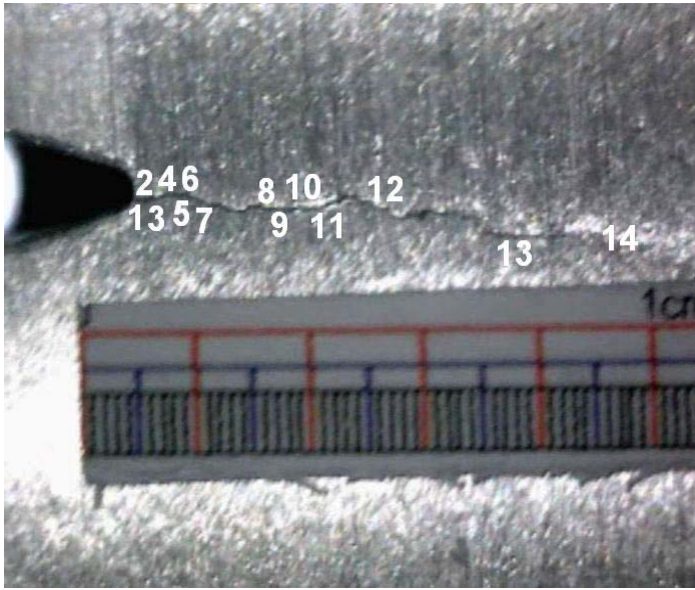


Şekil 3.30: 4 ve 5 numaralı FDMlerde alüminyumca zengin tarafa açılmış kenar çatlağın tekrar sayısı ile ilerlemesi durumu



Sıra	Tekrar sayısı
1	3600
2	7200
3	10800
4	14400
5	18000
6	21600
7	25200
8	28800
9	32400
10	36000
11	36850

Şekil 3.31: 4 numaralı FDM'den elde edilmiş ve alüminyumca zengin tarafa kenar çatlak açılmış numunenin kırık yüzeyi üzerinde çatlak ilerleyişinin tekrar sayısı artımı ile artışı



Sıra	Tekrar sayısı
1	40000
2	46000
3	82000
4	94000
5	106000
6	118000
7	130000
8	142000
9	154000
10	166000
11	178000
12	190000
13	202000
14	214000

Şekil 3.32: 4 numaralı FDM'den elde edilmiş ve SiC'ce zengin tarafa kenar çatlak açılmış numunenin kırık yüzeyi üzerinde çatlak ilerleyişinin tekrar sayısı artımı ile artışı

Yorulmalı çatlak ilerleme deneyleri sonrasında, merkez çatlaklı numunelerin her biri için Paris-Erdoğan bağıntısında (Denklemler 2.26) malzemeye bağlı olan c ve m katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılar, kalınlık boyunca değişen SiC oranı ve yerel değişim gösteren SiC partikül yoğunlaşmaları nedeniyle, malzemenin her bir tabakası için, farklı çatlak ilerlemesi davranışı sonucunda birbirinden farklı değerler olarak elde edilmiştir. Şekil 2.12'de 5 numaralı FDM'nin 1 numaralı numunesine ait $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$ grafiği verilmiştir. Tablo 3.1'de 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numuneler için elde edilmiş olan c ve m katsayıları verilmiştir.

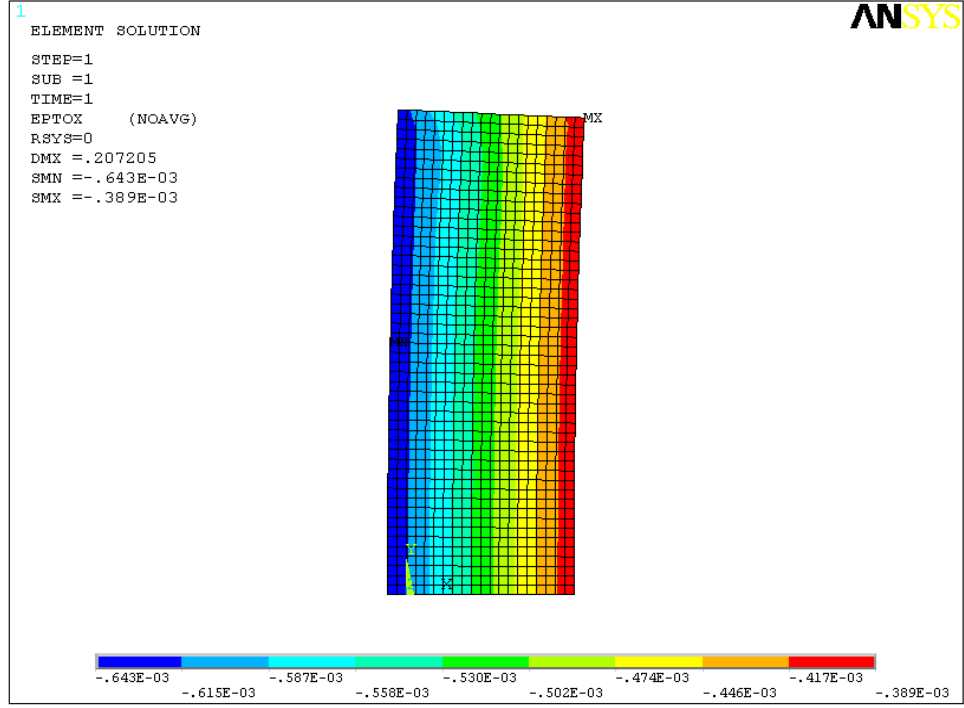
Tablo 3.1: 5 numaralı FDMden elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerin c ve m katsayıları

	1	2	3	4
c	10^{-8}	10^{-8}	2×10^{-9}	6×10^{-9}
m	1,3632	1,0801	1,6678	1,2058

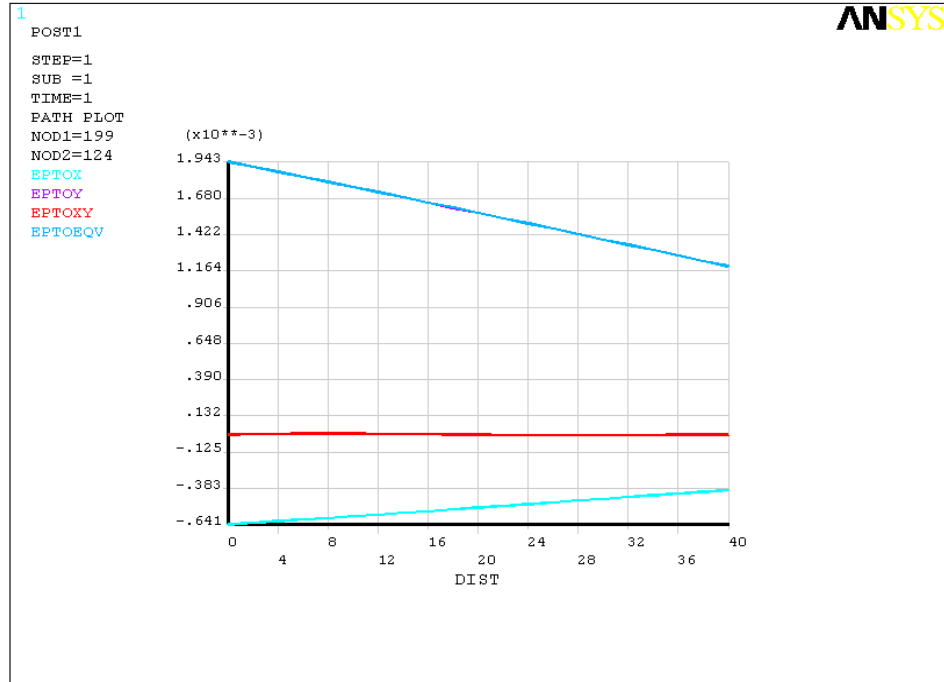
3.2 Nümerik Bulgular

3.2.1 ANSYS bulguları

Şekil 3.33-3.38’de, statik çekme yükü uygulanmış olan örnek FDM modelin uzama ve gerilme durumları görülmektedir. Alüminyumca zengin olan ve elastisite modülü düşük olan sol tarafta y ekseninde daha fazla uzama meydana gelmekte, bu durum da SiC’ce zengin olan sağ tarafta x ekseninde kısalmanın daha fazla olmasına sebep olmaktadır.



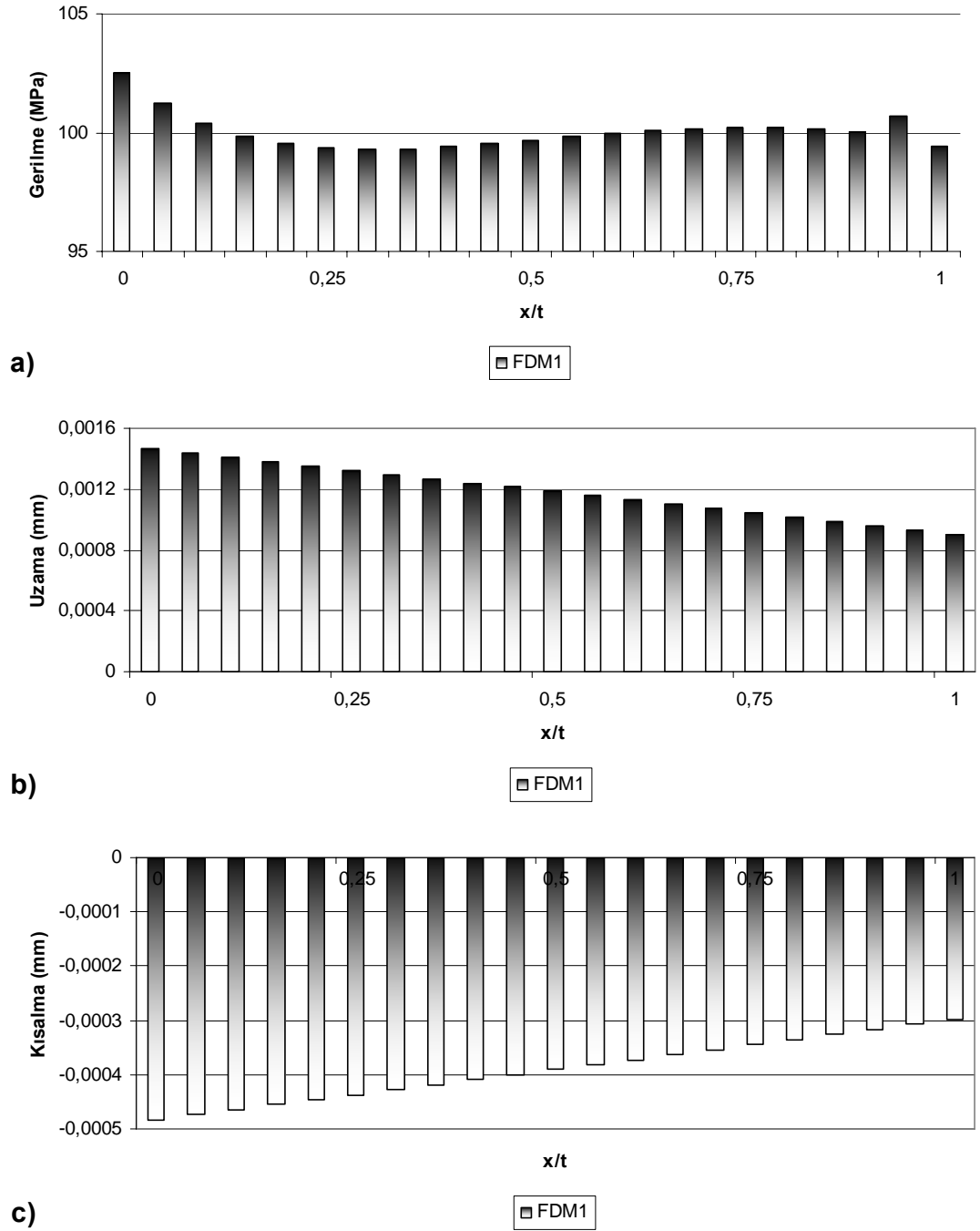
Şekil 3.35: FDM’de statik yük altında x ekseninde oluşan kılalma



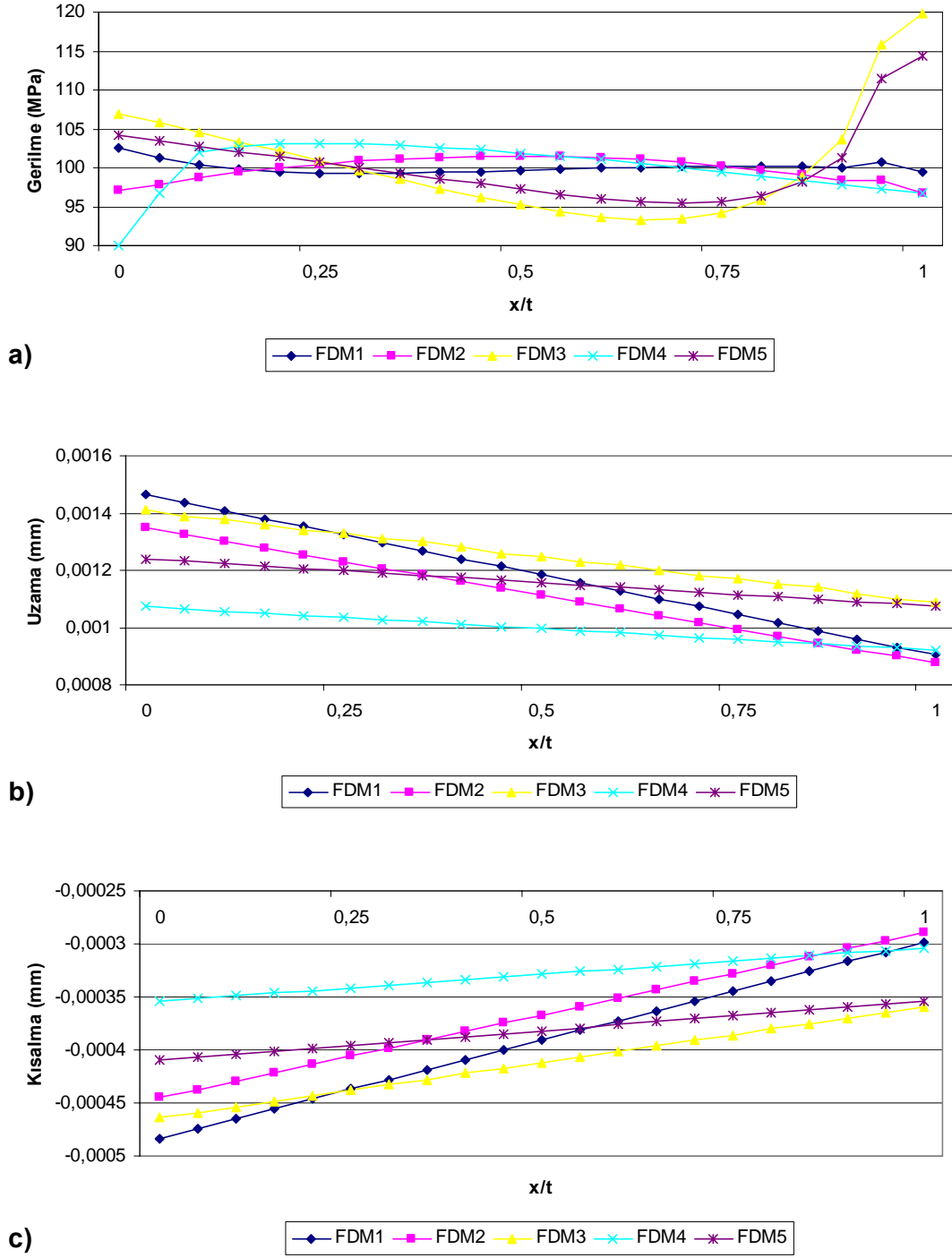
Şekil 3.36: FDM’de statik çekme yükü altında oluşan uzama ve kılalmanın kesit boyunca dağılımı

Şekil 3.37’de 1 numaralı FDM’de statik çekme yükü altında oluşan gerilme (Şekil 3.37.a), y ekseninde uzama (Şekil 3.37.b) ve x ekseninde kılalma (Şekil 3.37.c) durumları görülmektedir. Şekil 3.38’de ise, deney sonuçlarına göre modellenmiş olan

5 FDM’de aynı yükleme şartında oluşan gerilme (Şekil 3.38.a), y yönünde uzama (Şekil 3.38.b) ve x yönünde kısalma (Şekil 3.40.c) durumları görülmektedir.



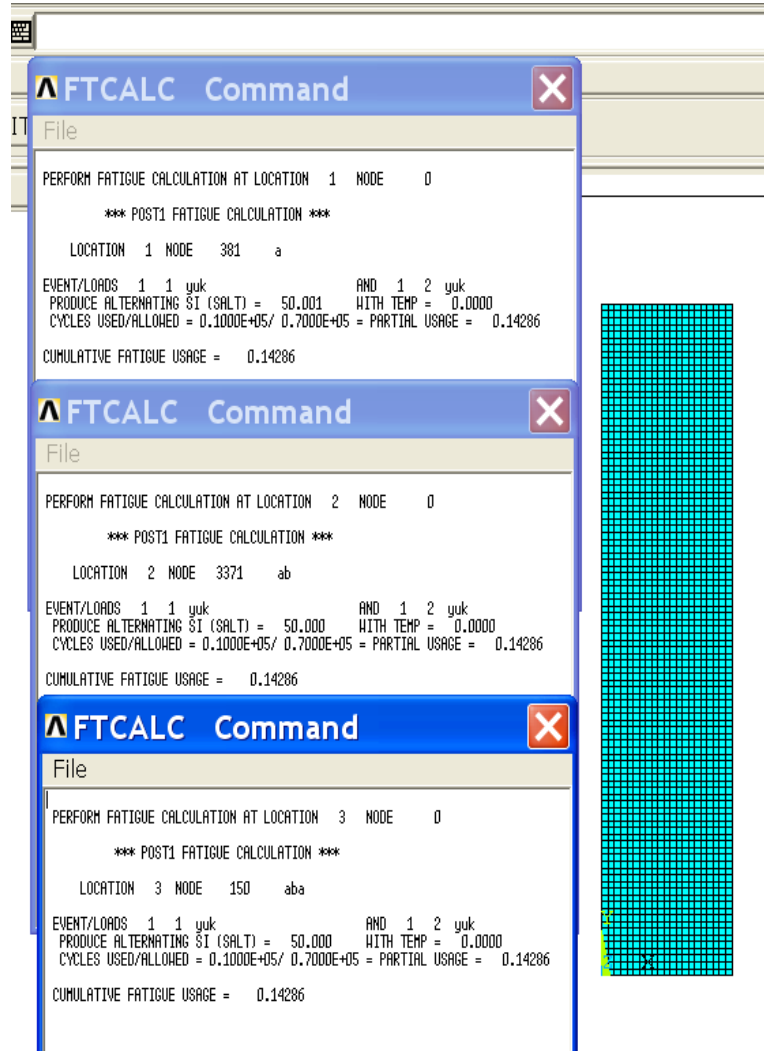
Şekil 3.37: 1 numaralı FDM’de statik çekme yükü altında meydana gelen a) gerilme dağılımı, b) y ekseninde uzama, c) x ekseninde kısalma ($\sigma=100$ MPa).



Şekil 3.38: 1,2,3,4 ve 5 numaralı FDMlerde statik çekme yükü altında meydana gelen a) gerilme dağılımı, b) y ekseninde uzama, c) x ekseninde kısalma ($\sigma=100$ MPa).

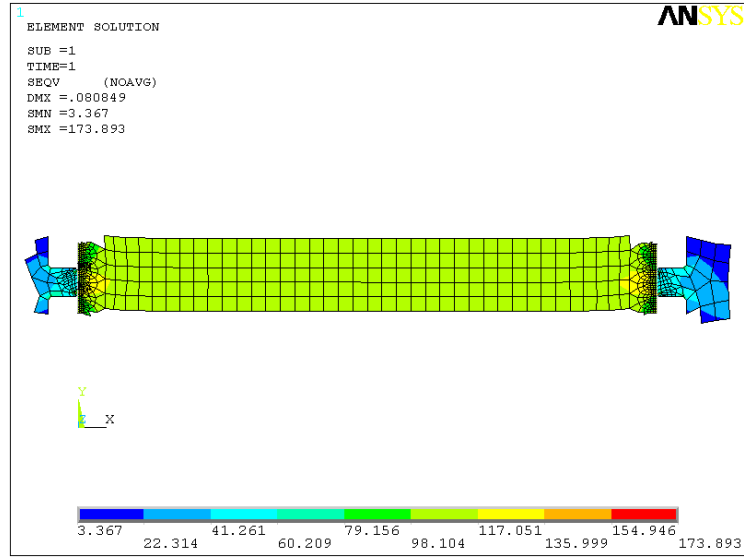
Şekil 3.39'da $E=64000$ MPa değerine sahip alüminyum malzeme için, yorulma analizleri sonucunda farklı elemanlarda hesaplanmış olan kullanma faktörü sonuçları görülmektedir. Yorulma analizi sonucunda elemanların kullanım faktörleri ve uygulanan ortalama gerilme değerleri aynıdır. FDM'ler için yapılmış olan yorulma

analizlerinde ise, FDM'nin genişliği boyunca, değişik elemanlarda farklı kullanma faktörü sonuçları elde edilmiştir. Genişlik boyunca değişim gösteren elastisite modülünün etkisiyle, uygulanan ortalama gerilme 50 MPa olmasına rağmen, farklı elemanlarda, yorulma analizi sonuçlarında uygulanmış olan ortalama gerilme değerleri farklı bulunmuştur. Bu değerler arasında çok bir fark olmamakla birlikte 59,717 MPa, 59,937 MPa, 60,960 MPa gibi değerler elde edilmiştir. Gerek p üsteli gerekse E_1 ve E_2 değerleri yorulma sonuçlarını etkilemektedir. E_1 ve E_2 değerleri arasındaki fark arttıkça, yorulma analizi sonuçlarında, malzemeye uygulandığı kabul edilen ancak elemanlarda farklı oluşan ortalama gerilme değerleri arasındaki fark artmaktadır.

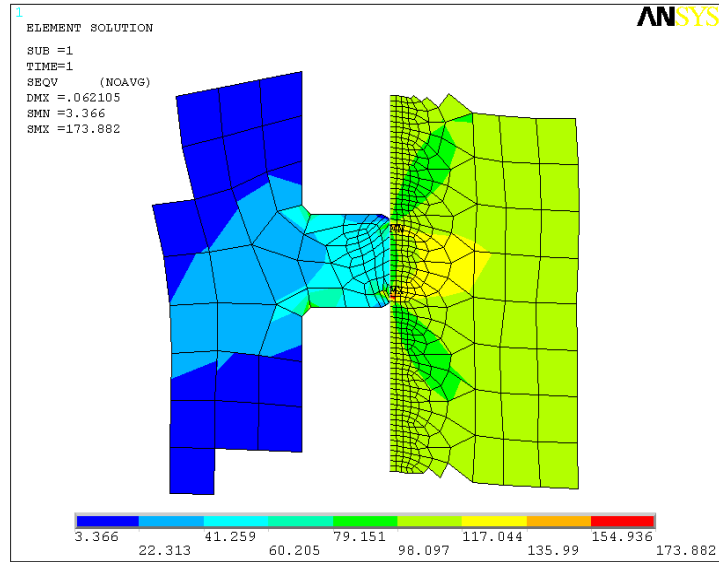


Şekil 3.39: $E=64000$ MPa değerine sahip alüminyum malzeme için 3 ayrı düğüm noktasındaki kullanma faktörü

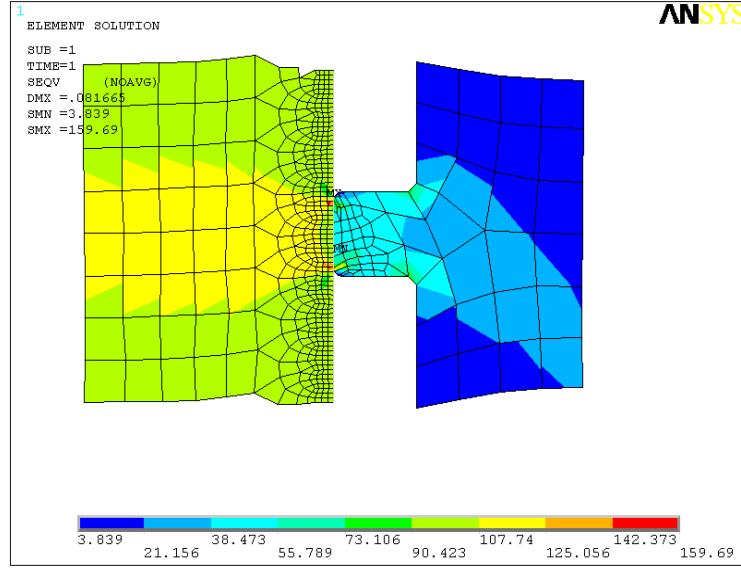
Fretting analizleri sonucunda, en büyük gerilme, pabuç ve FDM'nin temas eden yüzeylerinin kenarlarında oluşmuştur. Şekil 3.40-3.42 arasında gerilme dağılımları görülmektedir. Temas gerilmelerinin dağılımı, FDM'de x ve y ekseninde ki uzama-kısılma değerlerini etkilemiştir (Şekil 3.43).



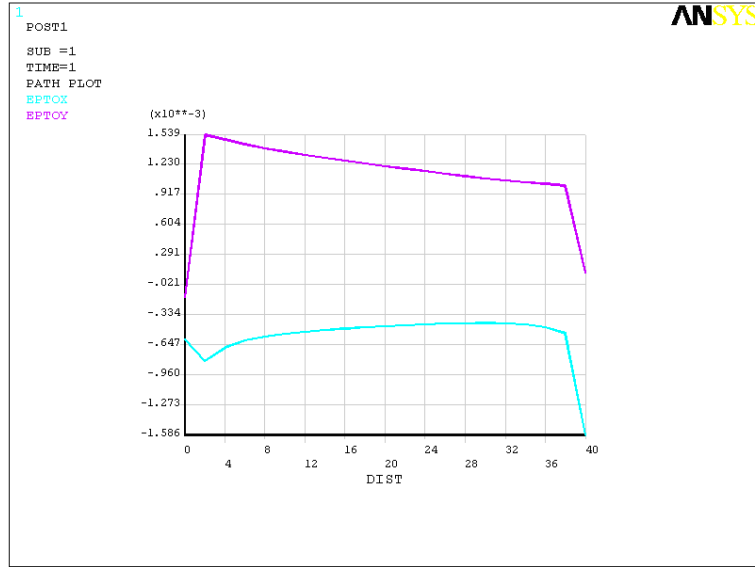
Şekil 3.40: Fretting durumunda FDM'de oluşan gerilme dağılımı



Şekil 3.41: Fretting durumunda FDM'nin alüminyumca zengin tarafında meydana gelen gerilme dağılımı

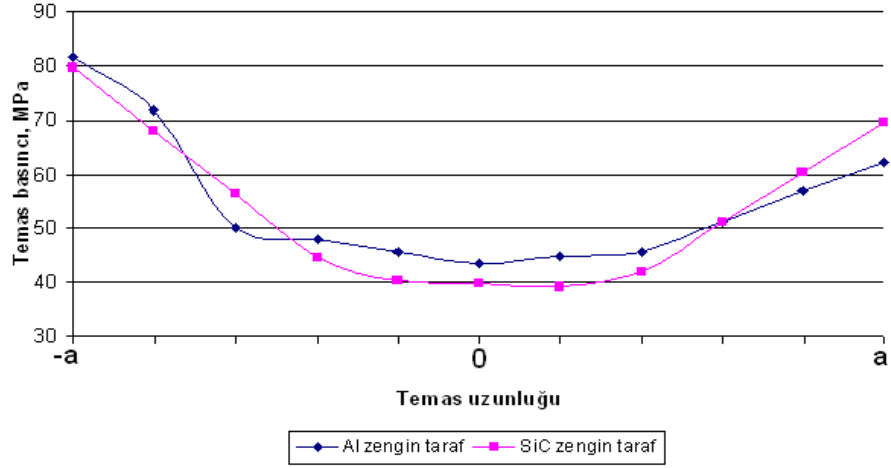


Şekil 3.42: Fretting durumunda FDM'nin SiC'ce zengin tarafında meydana gelen gerilme dağılımı



Şekil 3.43: Fretting durumunda FDM'nin pabuçlarla temas eden uzunluğu boyunca meydana gelen uzama ve kısalma değerleri

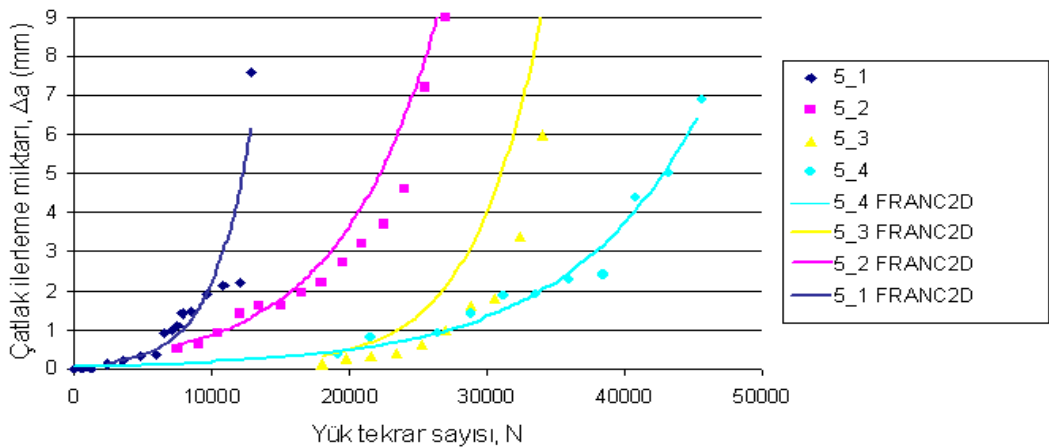
Fretting pabuçları altında oluşan temas gerilmelerinin dağılımı, FDM'nin alüminyumca ve SiC'ce zengin tarafları arasında farklılık göstermiştir. Şekil 3.44'de görüldüğü üzere, SiC'ce zengin tarafta pabuç altındaki temas gerilme dağılımı daha düzgündür ve daha az yapışma meydana gelmektedir.



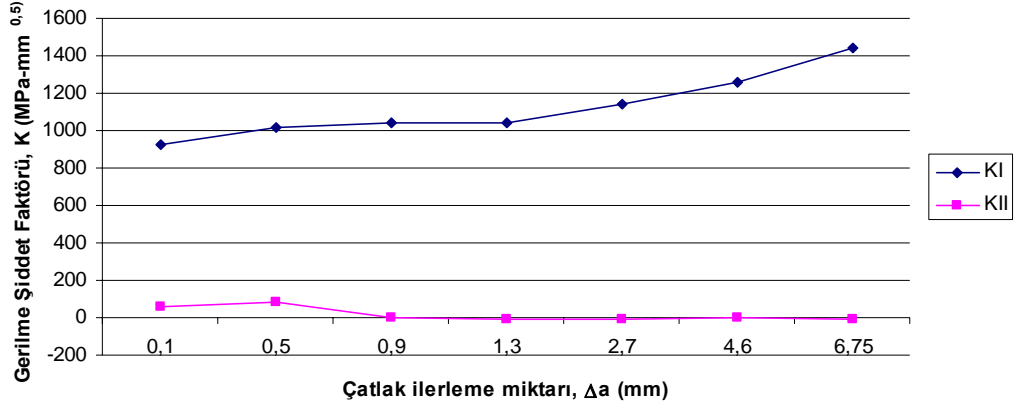
Şekil 3.44: FDM'nin her iki tarafında fretting şartlarında oluşan temas gerilme dağılımları

3.2.2 FRANC2D bulguları

FRANC2D analizleri, FDMlerden tabakalar halinde eldedilmiş ve merkez çatlak açılmış olan numuneler için yapılmıştır. Merkez çatlaklı numuneler, FDM'nin kalınlığı boyunca tabakalar halinde elde edildiği halde, FRANC2D programında modelleme yapılırken, her bir numune kendi içerisinde homojen kabul edilmiştir. Bunun nedeni, FRANC2D programında özel malzeme değerlerinin girilebilmesi için bir ara yüz olmamasıdır. Buna rağmen, deneysel ve nümerik analiz sonuçları yakın çıkmıştır (Şekil 3.45). Şekil 3.46'da FRANC2D analizi sonucunda elde edilmiş olan K_I ve K_{II} değerleri görülmektedir.

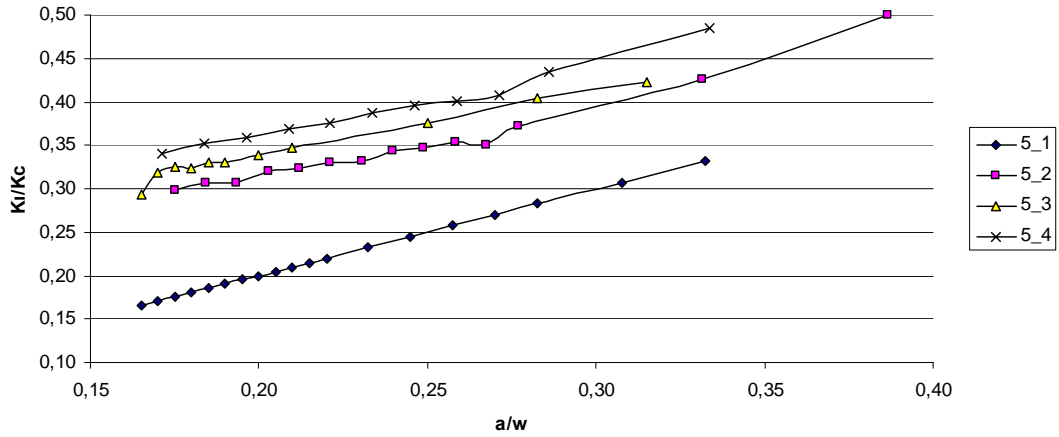


Şekil 3.45: 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı deney numunelerinin çatlak ilerleyişinin deneysel ve FRANC2D analizi sonuçları



Şekil 3.46: Merkez çatlaklı bir deney numunesi için FRANC2D programında elde edilmiş olan K_I ve K_{II} değerleri

Şekil 3.47'de çatlak ilerlemesiyle gerilme şiddet faktörü değişimi boyutsuzlaştırılmıştır. Grafikten görüleceği üzere K_I/K_C oranı 0,5'den küçük olmasına rağmen, çatlak ilerlemeye devam etmiş ve çatlağın belirli bir geometrik boyuta ulaşmasının ardından kırılma meydana gelmiştir.



Şekil 3.47: 5 numaralı FDM'den elde edilmiş olan merkez çatlaklı numunelerde yorulmalı çatlak ilerlemesi ile gerilme şiddet faktörü değişiminin FRANC2D analiz sonuçları

4. SONUÇLAR

Literatürde FDM'lerle ilgili yapılmış olan çalışmalar; öncelikle FDM'lerin termal özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneysel, analitik ve nümerik çalışmalardır. Bu çalışmayla birlikte; FDM üretimi, mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi, aşınma davranışı, yorulma, fretting yorulması ve yorulmalı çatlak ilerlemesi kavramları deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan nümerik çalışmalarla deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- Santrifüj döküm yöntemiyle, kolay bir şekilde FDM üretimi yapılabilir. Elde edilen partikül takviyeli bir karışımdan, döküm parametrelerini ve döküm malzeme ağırlığını değiştirerek birçok farklı FDM üretmek mümkündür.
- SiC partikülleri alüminyum ergiyikten daha yoğun olduğu için, santrifüj kuvvet etkisiyle daha çok silindir şeklindeki kalıbın dış tarafında toplanmıştır. Böylece, silindirin et kalınlığı boyunca sertlik, içyapı ve mekanik özellikleri farklılık göstermiştir.
- Dökülmüş haldeki FDM'nin sertlik değerleri, literatürde verilen ve bu çalışmada ısıl işlem parametreleri esas alınmış olan çalışmalarda ki sertlik değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Üretilen FDM'nin iç kısımlarında daha az SiC bulunmasına rağmen, elde edilen en az sertlik değeri 80 HV değerinin üzerindedir. Yaşlandırma işlemleri ile elde edilmiş olan sertlik değeri ise ortalama 140 HV'dir.
- SiC takviyesi ile birlikte elastisite modülü silindirin iç kısmından dış kısmına doğru artmıştır.
- Silindirin et kalınlığı boyunca sertlik, R_e ve R_m değerleri elastisite modülü gibi sürekli artan veya azalan bir değişim göstermemiştir.
- Yaşlandırma işlemleri ile fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin R_e ve R_m değerleri 1,5–2 kat artış göstermiştir.

- SiC'ce zengin olan kısım, kuru sürtünme şartlarında alüminyumca zengin olan kısma göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Yaşlandırma işlemleri sonucunda FDM'nin aşınma direnci, kuru sürtünme şartlarında 30 kata kadar artış göstermiştir. Sıvı sürtünme şartları altında artan yük ve alınan yolun artmasıyla beraber, yaşlandırma işleminin aşınma direncine kattığı pozitif etki ortadan kalmıştır.
- Aşınma deneyleri sonucunda, aşındırıcı disk olarak kullanılan çelik malzemede kayda değer bir aşınma kaybı söz konusu olmamıştır. Fretting deneylerinde kullanılan malzeme aynı olmasına rağmen, pabuçlarda aşırı derecede aşınma meydana gelmiştir.
- Yaşlandırma işlemleri ile FDMlerin yorulma dayanımları yaklaşık %50, alüminyum alaşımının ise %100 artmıştır.
- Yorulma ve statik çekme deneyleri sonucunda oluşan kırık yüzey şekilleri, çatlağın hangi taraftan başladığına bağlı olarak, iki farklı tipte meydana gelmiştir.
- Malzemenin mekanik özelliklerinin derecelendirme ile değişimi sonucu, elde edilen FDM'lerin fretting yorulma dayanımı, uygulanan deney şartlarında yorulma dayanımına yakın bulunmuştur. Yapılan deneylerde yorulma dayanımının altında fretting hasarı, toplam deney sayısının sadece %2'sidir. Yapılan fretting deneyleri sonucunda, savurma dökümle elde edilmiş olan FDMlerin yorulma davranışı üzerinde, fretting olayının çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Ancak, kesin sonuçlara varabilmek için;
 - Farklı yüzey basınçlarında
 - Farklı gerilme oranlarında
 - Farklı pabuç malzemeleri ile
 - Farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş FDMlerle deneyler yapılmalıdır.
- Malzeme üretiminin vakum altında yapılmasının gerek mekanik özellikler gerekse fretting yorulması dayanımı üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.
- FDM içerisindeki SiC'den dolayı, fretting numune yüzeylerinden daha fazla aşınma pabuç yüzeylerinde meydana gelmiştir.

- SiC'ce zengin ve alüminyumca zengin taraflardan açılmış olan kenar çatlakların aynı yorulma gerilmeleri altındaki ilerleyişleri farklı olmuştur. SiC'ce zengin olan tarafta olan çatlak ucundan ilerleme hem daha geç başlamış, hem de daha uzun bir sürede kırılma olayı gerçekleşmiştir. Dolayısı ile, yorulma ömrü daha uzun bulunmuştur. Bunun nedeni, SiC'ce zengin kısımda oluşmuş olan SiC hattıdır.
- Merkez çatlaklı olarak hazırlanan tabakalar halinde bölünmüş olan FDM'nin herbir tabakasının yorulma çatlak ilerlemesi davranışı farklı olmuştur. Tabaka sayısı, alüminyumca zengin olan kısımdan SiC'ce zengin olan tarafa ilerledikçe, çatlak başlangıcı ve ilerlemesi gecikmiştir. Aynı deney şartlarında numunelerin SiC oranı arttıkça, tekrar sayısı %350'lere varan oranlarda artmıştır.
- Alüminyumca zengin taraftan çatlak açılmış olan iki farklı FDM'nin yorulmalı çatlak ilerleme deneyleri sonrasında, $p < 1$ olması durumu $p > 1$ olması durumundan daha avantajlı görünmektedir.
- ANSYS ile yapılan analizlerde, FDMler için hazırlanmış olan makro çalıştırılmıştır. Gerek statik gerekse yorulma yükleri altında, malzemenin genişliği boyunca değişen elastik özellikleri devreye girerek, farklı noktalarda farklı gerilme ve uzama davranışları göstermesine sebep olmuştur.
- FRANC2D programı ile, tabakalara bölünmüş merkez çatlaklı numuneler için yorulma çatlak ilerlemesi analizleri yapılmıştır. Herbir tabakanın çatlak ilerleme ve yorulma davranışının farklı olduğu nümerik olarak da görülmüştür.

Sonraki çalışmalar için aşağıdaki öneriler göz önüne alınabilir:

- Vakum altında santrifüj döküm tekniği ile döküm kusurları azaltılarak, dayanımı daha yüksek FDM elde edilebilir.
- Farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilecek olan FDM'lerin yorulma, fretting yorulması ve çatlak ilerlemesi deneyleri yapılabilir.
- FDM konseptinin, hem tokluk hem de yüksek yüzey sertliği istenilen makine elemanlarına uygulanabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S.**, 2008: Functionally graded plates behave like homogeneous plates, *Composites: Part B* **39** : 151–158.
- Ahmad, S. N. A. S., Hashim, J., and Ghazali, M. I.**, 2005: Effect of porosity on tensile properties of cast particle reinforced MMC, *Journal of Composite Materials*, **39** (5): 451-466.
- Akhtar, F., and Guo, S. J.**, 2008: Microstructure, mechanical and fretting wear properties of TiC-stainless steel composites, *Materials Characterization*, **59** (1):84-90.
- Anderson, T. L.**, 1995: *Fracture mechanics: fundamentals & applications*, CRC Press, Boca Raton.
- ANSYS Inc.**, 2005: *Element Library, Element Reference of ANSYS Release vol. 10.0*, ANSYS Inc.
- Aslantas, K., and Tasgetiren, S.**, 2003: Edge spalling formation in a plate due to moving compressive load, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **27**:333–338.
- ASTM E647**, 2011: *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*, *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM G99 – 05**, 2010: *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*, *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Attia, M. H.**, 2006: On the fretting wear mechanism of Zr-alloys. *Tribology International* **39**:1320–1326.
- Balke, H., Bahr, H. A., Semenov, A. S., Hofinger, I., Häusler, C., Kirchhoff, G., and Weiss, H. J.**, 2001: Graded thermal barrier coatings: Cracking due to laser irradiation and determining of fracture toughness. *Ceram Trans*, **114**: 205-212.
- Bao, G., and Wang, L.**, 1995: multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. *Int J Sol Struct*, **32** (19): 2853-71.
- Biesheuvel, M. P., and Verweij H.**, 2000: Calculation of the composition profile of a functionally graded material produced by centrifugal casting, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**: 743–749.
- Bill, R. C.**, 1982: Review of factors that influence fretting wear", materials evaluation under fretting conditions, ASTM STP 780, *American Society for Testing and Materials*, pp. 165–182.
- Bleek, O., Munz, D., Schaller, W., and Yang, Y. Y.**, 1998: Effect of a graded interlayer on the stress intensity factor of cracks in a joint under thermal loading. *Engrg Fract Mech*, **60**(5-6): 615-623.

- Burris, K. W., Beardsley, M. B., and Chuzhoy, L.,** 2000: Process for applying a functionally gradient coating to a component for improved performance, *U.S.A. Patent*, Patent number 6048586.
- Buryachenko, V. A., and Rammerstorfer, F. G.,** 1998: Micromechanics and nonlocal effects in graded random structure matrix composites, *IUTAM Symp. on Transformation Problems in Composite and Active Composite and Active Materials*. Eds. Y. A. Bahei-El-Din and G. J. Dvorak. Kluwer Academic Publ., Dordrecht :197-206.
- Can, A. Ç.,** 2006: *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Cantor, B. , Dunne, F., ve Stone I.,** 2004: Metal and ceramic matrix composites, An Oxford–Kobe Materials Text, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, UK, 2004.
- Cattaneo, C.,** 1938: Sul Contato di Due Corpo Elastici, *Atti Accad. Naz. Lincei, Cl. Sci. Fis., Mat. Nat., Rend.*, **27**: 342–348, 434–436, 474–478.
- Cetinel, H., Uyulgan, B., Tekmen, C., Ozdemir, I. ve Celik, E.,** 2003: Wear properties of functionally gradient layers on stainless steel substrates for high temperature applications”, *Surface and Coatings Technology*, **174 – 175**: 1089–1094.
- Chan, S. K., Tuba, I. S., and Wilson, W. K.,** 1970: On the finite element method in linear fracture mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, **2** (1):1-17.
- Chang, H. H., and Tarn, J. Q.,** 2007: A state space approach for exact analysis of composite laminates and functionally graded materials, *International Journal of Solids and Structures*, **44** : 409-1422.
- Chapa-Cabrera, J. G., and Reimanis, I. E.,** 2002: Effects of residual stress and geometry on predicted crack paths in graded composites. *Engrg Fract Mech*, **69**: 1667-78.
- Chapa-Cabrera, J. G., Rozenburg, K., Reimanis, I. E., and Steffler, E. D.,** 2001: Fracture in ductile/brittle graded composites. *Ceram Trans*, **114**: 797-804.
- Chawla, N., and Chawla, K. K.,** 2006: Metal matrix composites, *Springer Science + Buisness Media*, New York, USA, pp. 33–55.
- Chen, J., Wu, L., and Du, S.,** 2000: A modified J integral for functionally graded materials”, *Mechanics Research Communications*, **27** (3) : 301-306.
- Chen, W., Wang, Q., Zai, C., Ma, C., Zhu, Y., and He, W.,** 2001: Functionally graded Zn-Al-Si in-situ composites fabricated by centrifugal casting, *Journal of Materials Science Letters*, **20**: 823–826.
- Chen, Y. F., and Erdogan, F.,** 1996: The interface crack problem for a nonhomogeneous coating bonded to a homogeneous substrate. *J Mech Phys Sol*, **44**: 771-87.
- Chi, S. H., and Chung, Y. L.,** 2006: Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analysis, *International Journal of Solids and Structures*, **43**: 3657–3674.

- Cho, J. R., and Oden, J. T.,** 2000: Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the crank-nicolson-galerkin scheme, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **188**,17-38.
- Chung, T. J., Neubrand, A., Rödel, J., and Fett, T.,** 2001: Fracture toughness and r-curve behaviour of Al₂O₃/Al FGMs. *Ceram Trans*, **114**: 789-96.
- Chung, T. J., Neubrand, A., and Rödel, J.,** 2002: Effect of residual stress on the fracture toughness of Al₂O₃/Al gradient materials. *Key Engrg Mater*, **206** (213): 965-68.
- Cirakoglu, M.,** 2001: Processing and characterization of functionally graded titanium/titanium boride/titanium diboride composites by combustion synthesis/compaction and microwaves, *Ph.D. Thesis*, University of Idaho, USA.
- Dao, M., Gu, P., Maewal, A., and Asaro, R. J.,** 1997: A Micromechanical study of residual stresses in functionally graded materials, *Acta Metallurgica*, **45**(8): 3265-3276, 1997.
- Dasgupta, R.,** 2005: A Comparative assessment of the behavior of al-cu alloy and its composite, *Journal of Composite Materials*, **39**:1561-1575.
- Datsyshyn, O. P., Kalakhan, O. S., Kadyra, V. M., and Shchur, R. B.,** 2004: Pitting formation under the conditions of fretting fatigue, *Materials Science*, **40** (2): 159-172.
- Delale, F., and Erdogan, F.,** 1983: The crack problem for a nonhomogeneous plane. *J Appl Mech*, **50**: 609-14.
- Demirkiran, A. S., Celik, E., Yargan, M., ve Avci, E.,** 2001: Oxidation behaviour of functionally gradient coatings including different composition of cermets, *Surface and Coatings Technology*, **142-144**: 551-556.
- Dikici, B., Gavgali, M., ve Tekmen, C.,** 2006: Corrosion behavior of an artificially aged (T6) Al-Si-Mg based metal matrix composite, *Journal of Composite Materials*, **40** (14): 1259-1269.
- Dudek, M., Fouvry, S., Wendler, B. and Kapsa, F.,** 2001: Kinetics of fretting wear of TiC/VC coatings on M2 HSS steel, *Journal of Wide Bandgap Materials*, **9** (1): 142 – 143.
- Duque, N. B., Melgarejo, Z. H., and Suarez, O. M.,** 2005: Functionally graded aluminum matrix composites produced by centrifugal casting, *Materials Characterization*, **55**: 167-171.
- Durodola, J. F., and Attia, O.,** 2000: Deformation and stresses in functionally graded rotating disks, *Composites Science and Technology*, **60**: 987±995.
- Eischen, J. W.,** 1987: Fracture of nonhomogeneous materials. *Int J Fracture*, **34**: 3-22.
- Erdogan, F.,** 1985: The crack problem for bonded nonhomogeneous materials under antiplane shear loading. *J Appl Mech* **52**: 823-28.
- Erdogan, F.,** 1995: Fracture mechanics of functionally graded materials. *Compos Eng*, **5** (7): 753-70.

- Erdogan, F., and Sih, G. C.**, 1963: On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *J. Basic Eng.* **85**: 519–527.
- Erdogan, F.**, 1996: Fracture mechanics of functionally graded materials, *U.S. Air Force Office of Scientific Research Final Technical Report*, October 1996.
- Ergun, E.**, 2009: Isı ve nem etkisindeki çatlaklı ve çentikli metal levhaların kompozit yama ile tamirinin kırılma ve yorulma analizleri, *Doktora Tezi*, PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Ergun, E., Aslantas, K., Tasgetiren, S., and Topcu, M.**, 2006: Fracture analysis of resistance welded L-shaped and straight sheets, *Materials & Design*, **27** (1):2-9.
- Fatigue, K. T.**, 1974: Crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis. *Engng Fracture Mech.* **10**: 305-322.
- Freund, L. B.**, 1993: Stress distribution and curvature of a general compositionally graded semiconductor layer. *J Crystal Growth*, **132**(1-2): 341-344.
- Forth, S. C., Favrow, L. H., Keat, W. D., and Newman, J. A.**, 2003: Three-dimensional mixedmode fatigue crack growth in a functionally graded titanium alloy. *Engrg Fract Mech*, **70**: 2175-85.
- Gao, J. W., and Wang, C. Y.**, 2000: Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting, *Materials Science & Engineering A*, **292**(2): 208-215.
- Giannakopoulos, A. E., Lindley, T. C. and Suresh, S.**, 2000: Applications of fracture mechanics in fretting fatigue life assessment, *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, D. W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, and C. B. Elliott, Eds., *American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA*.
- Gomes, J. R., Ribeiro, A. R., Vieira, A. C., Miranda, A. S., and Rocha, L. A.**, 2005: Wear mechanisms in functionally graded aluminium matrix composites : Effect of the lubrication by an aqueous solution, *Materials Science and Engineering*, **492-493**: 33-38.
- Groza, J. R., and Kodash, V.**, 2006: Methods for production of FGM net shaped body for various applications, *United States Patent*, Patent number 0172073.
- Grujicic, G. M., Cao, G., and Fadel, M.**, 2001. Effective materials properties: determination and application in mechanical design and optimization” , *Proc Instn Mech Engrs*, **215** (4): 225-234.
- Gu, P., and Asaro, R. J.**, 1997: Cracks in functionally graded materials. *Int J Sol Struct*, **34** (1): 1-17.
- Guler, M. A., and Erdogan, F.**, 2004: Contact mechanics of graded coatings, *Int. J. Solids Struct*, **41**: 3865–3889.
- Guler, M. A., and Erdogan, F.**, 2006: Contact mechanics of two deformable elastic solids with graded coatings. coating and substrate. *Mechanics Mater*, **38**: 633–647.

- Guler, M. A., and Erdogan, F.,** 2007: The frictional sliding formulations upon which subsequent analysis of the contact problems of rigid parabolic and cylindrical tangential loading problem will be performed in stamps on graded coatings, *Int. J. Mech. Sci.*, **49**: 161–182.
- Gupta, M.,** 2002: Functionally gradient materials and the manufacture there of, *U.S.A. Patent*, Patent number 6495212.
- Hattori, T., Nakamura, M., and Watanabe, T.,** 2000: A New approach to the prediction of the fretting fatigue life that considers the shifting of the contact edge by wear, *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, D. W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, and C. B. Elliott, Eds., *American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA*.
- Hills, D. A., and Nowell, D.,** 1994: *Mechanics of fretting fatigue*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Hoepfner, D. W.,** 1992: Mechanisms of fretting fatigue and their impact on test methods development, standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, M. Helmi Attia and R. B. Waterhouse, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 23-31.
- Hoffman, M., Kidson, L., Kelly, D., and Deneke, C.,** 2001: Effect of *crack growth resistance upon fracture of ceramic/polymer graded interfaces*. In: Ravi-Chandar, K., Karihaloo, B. L., Kishi, T., Ritchie, R. O., Yokobori, A. T., Yokobori, T., (eds). *Advances in Fracture Research*, Proc. ICF10, Pergamon CDROM.
- Hofinger, I., Bahr, H. A., Balke, H., Kirchhoff, G., Häusler, C., and Weiß, H. J.,** 1999: Fracture mechanical modelling and damage characterisation of functionally graded thermal barrier coatings by means of laser irradiation. *Mater Sci Forum*, **308** (311): 450-56.
- Hofinger, I., Bahr, H-A., Balke, H., Kirchhoff, G., Häusler, C., and Weiß, H. J.,** 1999: Fracture mechanical modelling and damage characterisation of functionally graded thermal barrier coatings by means of laser irradiation. *Mater Sci Forum* **308** (311): 450-56.
- Hvizdoš, P., Jonsson, Ann´e, G., and Van Der Biest, O.,** 2007: Mechanical properties and thermal shock behaviour of an alumina/zirconia functionally graded material prepared by electrophoretic deposition, *Journal of the European Ceramic Society*, **27** (2-3):1365-1371.
- Jackson, T. R., Liua, H., Patrikalakisa, N. M. U., Sachs, E. M., and Cima, M. J.,** 1999: Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control, *Materials and Design*, **20** : 63-75.
- Jin, Z. H., and Batra, R. C.,** 1996: Some basic fracture mechanics concepts in functionally graded materials. *J Mech Phys So*, **44** (8): 1221-34.
- Jin, Z. H., and Batra, R. C.,** 1998: Thermal fracture and thermal shock resistance of functionally graded materials, *IUTAM Symposium on Transformation*

Problems in Composite and Active Materials, Hingham, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, p 185.

- Jin, Z. H., and Noda, N.**, 1994: Crack-tip singular fields in nonhomogeneous materials. *J App Mech*, **61**: 738-40.
- Johnson, K. L.**, 1985: *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, New York.
- Kawasaki, A., and Watanabe, B.**, 1999: Cyclic thermal fracture behaviour and spallation life of psz/nicraly functionally graded thermal barrier coatings. *Mater Sci Forum* **308** (311): 402-9.
- Kaynak, C., ve Boylu, S.**, 2006: Effects of SiC particulates on the fatigue behaviour of an al-alloy matrix composite, *Materials and Design*, **27** : 776–782.
- Ke, L. L., and Wang, Y. S.**, 2006: Two-dimensional contact mechanics of functionally graded materials with arbitrary spatial variations of material properties, Ministry of Education under Grant 20060004017, *Int. J. Solids Structs*, **43**: 5779–5798.
- Ke, L. L., and Wang, Y. S.**, 2007a: Fretting contact with finite friction of a functionally graded coating with arbitrarily varying elastic modulus. Part 1: normal loading, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **42** (5): 293-304.
- Ke, L. L., and Wang, Y. S.**, 2007b: Two-dimensional sliding frictional contact of functionally graded materials. Innovation Foundation of Beijing Jiaotong University *Eur. J. A/Solids*, **226**: 171–188.
- Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H.**, 2003: Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science and Engineering A*, **362**: 81-106.
- Kim, A. S., Suresh, S., and Shih, C. F.**, 1997: Plasticity effects on fracture normal to interfaces with homogeneous and graded compositions. *Int J Sol Struct* **34**: 3415-32.
- Kim, J. H., and Paulino, G. H.**, 2003: Mixed-mode j-integral formulation and implementation using graded finite elements for fracture analysis of nonhomogeneous orthotropic materials. *Mech Mater* **35** (1-2): 107-28.
- Kim, J. K., and Rohatgi, P. K.**, 1998: Formation of a graphite-rich zone in centrifugally cast copper alloy graphite composites, *Journal of Materials Science*, **33**: 2039-2045.
- Kinemuchi, Y., Wataria, K., and Uchimura, K.**, 2004: Centrifugal sintering of ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, pp.2061-2066.
- Koizumi, M.**, 1993: The concept of FGM, *Ceram. Trans., Funct. Gradient Mater.*, **34**, 3–10.
- Kolednik, O.**, 2000: The yield stress gradient effect in inhomogeneous materials, *International Journal of Solids and Structures*, **37**: 781-808.
- Konda, N., and Erdogan, F.**, 1994: The mixed mode crack problem in a nonhomogeneous elastic medium. *Engrg Fract Mech* **47** (4): 533-45.
- Lee, H., Sathish, S., and Mall, S.**, 2004: Evolution of residual stress under fretting fatigue, *Journal of Materials Science* **39**: 7089-7092.

- Lee, N. J., Jang, J., Park, M., and Choe, C. R.,** 1997: Characterization of functionally gradient epoxy/carbon fibre composite prepared under centrifugal force, *Journal of Materials Science*, **32**: 2013-2020.
- Lee, Y. L., and Erdogan, F.,** 1998: Interface cracking of FGM coatings under steady-state heat flow, *Engineering Fracture Mechanics*, **59** (3) : 361–380.
- Lin, J. S., and Miyamoto, Y.,** 1999: Internal stress and fracture behaviour of symmetric Al₂O₃/TiC/Ni FGMs. *Mater Sci Forum*, **308** (311): 855-860.
- Lindley, T. C.,** 1997: Fretting Fatigue in Engineering Alloys, *Int. J. Fatigue*, **19**: S39–S49, 1997.
- Liu, Q., Jiao, Y., Yang, Y., and Hu, Z.,** 1996: Theoretical analysis of the particle gradient distribution in centrifugal field during solidification, *Metallurgical and Materials Transactions B*, **27B** : 1025-1029.
- Majzoubi, G. H., and Jaleh, M.,** 2007: Duplex surface treatments on AL7075-T6 alloy against fretting fatigue behavior by application of titanium coating plus nitriding, *Materials Science and Engineering A*, **452–453**: 673–681.
- Milan, M. T., and Bowen, P.,** 2002: Effects of particle size, particle volume fraction and matrix composition on the fatigue crack growth resistance of al alloy/al alloy + SiCp bimetals, *Proc Instn Mech Engrs*, **216** Part L: *J Materials: Design and Applications*:245-255.
- Mindlin, R. D.,** 1949: Compliance of Elastic Bodies in Contact, *ASME Trans. J. Appl. Mech.*, **16**: 259–268.
- Miracle, D. B., and Donaldson, S. L.,** 2001: *ASM Handbook, V.21: Composites*, ASM International, pp. 2375-2387.
- Miriță, E.,** 2008: Fretting – A Global Problem”, *The 6th International Conference on Tribology BALKANTRIB’08, Sozopol, Black Sea Coast, Bulgaristan.*
- Mishnaevsky, Jr. L. L.,** 2006: Functionally gradient metal matrix composites: numerical analysis of the microstructure–strength relationships, *Composites Science and Technology* **66** : 1873–1887.
- Miyoshi, K., Pohlchuck, B., Street, K. W., Zabinski, J. S., Sanders, J.H., Voevodin, A. A., and Wu, R. L. C.,** 1999: Sliding wear and fretting wear of diamondlike carbon-based functionally graded nanocomposite coatings, *Wear*, **225–229**: 65–73.
- Moon, R. J., Hoffman, M., Hilden, J., Bowman, K. J., Trumble, K. P., and Rödel, J.,** 2002a: R-Curve behaviour in alumina-zirconia composites with repeating graded layers. *Engrg Fract Mech*, **69**: 1647-1665.
- Moon, R. J., Bowman, K. J., Trumble, K. P., and Rödel, J.,** 2001: Fracture resistance curve behaviour of multilayered Alumina-Zirconia composites produced by centrifugation. *Acta Mat*, **49**: 995-1003.
- Moon, R. J., Hoffman, M., Hilden, J., Bowman, K. J., Trumble, K. P., and Rödel, J.,** 2002b: A weight function analysis on the r-curve behaviour of multilayered alumina- zirconia composites. *J Am Ceram Soc*, **85** (6): 1505-11.

- Navarro, C., Munoz, S., and Dominguez, J.,** 2006: Propagation in fretting fatigue from a surface defect, *Tribology International*, **39** : 1149-1157.
- Nikas, G. K., and Sayles, R. S.,** 2009: Surface coatings and finite-element analysis of layered fretting contacts, *Proc. IMechE , Part J: Journal of Engineering Tribology*, **223** (2): 159-181.
- Noda, N.,** 1999: Thermal stresses in functionally graded materials, *Third International Congress on Thermal Stresses*, Cracow, Poland, June 13-17.
- Nuismer, R. J.,** 1975: An energy release rate criterion for mixed mode fracture, *International Journal of Fracture*, **11** (2):245-250.
- Odeshi, A., G., Owolabi, G. M., and Nabil, Bassim, M.,** 2007: Effects of particulate reinforcement and strainrates on deformation and fracture behavior of aluminum 6061-T6 under high velocity impact, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **38**: 66 – 69.
- Ogawa, T., Watanabe, Y., Sato, H., Kim, I. and Fukui, Y.,** 2006: Theoretical study on fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugal solid-particle method. *Composites: Part A* **37**: 2194–2200.
- Oral, A., Çopur, İ. H., ve Anlaş, G.,** 2007: Özellikleri fonksiyonel olarak değişen malzemelerde karışık mod yükleme altında çatlak başlama açıları ve gerilim şiddet çarpanları, *8. Ulusal Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*, ss:10-19, 7-9 Kasım 2007, İstanbul.
- Oyelayo, A. O., and Haselkorn, M. H.,** 2002: Modified boron containing coating for improved wear and pitting resistance, *U.S.A. Patent*, Patent number 6432480.
- Özdin, K., ve Şahin, Y.,** 2006: SiC Partiküllerle takviyelendirilmiş metal matrisli kompozitin üretimi ve aşınma davranışının incelenmesi, *12. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, 05-08 Eylül 2006, Kuşadası, Türkiye.
- Parameswaran, V., and Shukla, A.,** 1999: Crack-tip stress fields for dynamic fracture in functionally graded materials. *Mech Mater*, **31**:579-96.
- Paris, P. C., and Erdogan, F.,** 1963: A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, **85** (4): 528-534
- Phan, A. V., and Mukherjee, S.,** 2008: Boundary contour method fracture analysis of bimaterial interface cracks, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **24** (12): 685–1697.
- Qin, X. H., Han, W. X., Fan, C. G., Rong, L. J., and Li, Y. Y.,** 2002: Research on distribution of SiC particles in aluminum-alloy matrix functionally graded composite tube manufactured by centrifugal casting, *Journal of Materials Science Letters*, **21**: 665-667.
- Quadrini, E.,** 1993: Microstructural characterization of a silicon carbide whisker reinforced 2014 aluminum metal matrix composite, *Journal De Physique*, IV Colloque C7, *SupplBment au Journal de Physique 111*, **3**: November.
- Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., and Pai, B. C.,** 2008: Functionally graded Al–Al₃Ni in situ intermetallic composites: Fabrication and microstructural

characterization, *Journal of Alloys and Compounds*, **453** (1-2): L4-L7, Available online 2 January 2007.

- Rassbach, S., and Lehnert, W.**, 2000: Investigations of deformation of FGM, *Computational Materials Science*, **19**: 298-303.
- Rayaprolu, D. B., and Cook, R.**, 1992: A critical review of fretting fatigue investigations at the royal aerospace establishment In: M.H. Attia and R.B. Waterhouse, Editors, Standardization of fretting fatigue tests and equipment, *ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 129–152.
- Reiter, T., and Dvorak, G. J.**, 1998: Micromechanical modeling of functionally graded materials, *IUTAM Symposium on Transformation Problems in Composite and Active Materials*, Hingham, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, 173.
- Rousseau, C. E., and Tippur, H. V.**, 2000: Compositionally graded materials with cracks normal to the elastic gradient. *Acta mat*, **48**: 4021-33.
- Sabelkin, V., and Mall, S.**, 2005: Investigation into relative slip during fretting fatigue under partial slip contact condition, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **28** : 809-824.
- Salehizadeh, H., and Saka, N.**, 1992: The mechanics of crack initiation at hard particles in rolling line contacts, *J. Tribol*, **114** (2):341-348.
- Shabana, Y. M., and Noda, N.**, 2001: Thermo-elastic-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration. *Composites: B* **32**: 111-21.
- Siber, B., Rettenmayr, M., Müller, C., and Exner, H. E.**, 1999: Concentration gradients in aluminium alloys generated by directional solidification and their effects on fatigue crack propagation. *Mater Sci Forum* **308** (311): 211-6.
- Sih, G., C.**, 1974: Strain-Energy-Density factor applied to Mixed mode fracture problems, *International Journal of Fracture*, **10**: 305-321.
- Sivakumar, R., Nishikawa, T., Honda, S., Awaji, H., and Gnanam, F. D.**, 2003: Processing of mullite-molybdenum graded hollow cylinders by centrifugal molding technique , *Journal of the European Ceramic Society*, **23**: 765-772.
- Spencer, A. J. M.**, 1998: A stress function formulation for a class of exact solutions for functionally graded elastic plates, *IUTAM Symposium on Transformation Problems in Composite and Active Materials*, Hingham, MA, USA, Kluwer Academic Publishers, p.161.
- Spievak, L. E., Wawrzynek, P. A., Ingraffea, A. R., and Lewicki, D., G.**, 2000: Simulating fatigue crack growth in spiral bevel gears, *NASA Technical Report ARL-CR-451*, USA, 22-23.
- Suarez, O. M.**, 2003: Precipitation hardening of a novel aluminum matrix composite, *Materials Characterization*, **49**: 187– 191.

- Sun, L., Yin, H., Paulino, G. H.,** 2004: Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions, *XXI ICTAM, 15-21 August 2004*, Warsaw, Poland.
- Suresh, S.,** 1997: Modeling and design of multi-layered and graded materials, *Progress in Materials Science*, **42** : 243-251.
- Szolwinski, M. P., and Farris, T. N.,** 1996: Mechanics of fretting fatigue crack formation, *Wear*, **198** : 93-107.
- Szymczyk, W.,** 2005: Numerical simulation of composite surface coating as a functionally graded material, *Materials Science and Engineering A*, **412** : 61-65.
- Tan, L., Crone, W. C., Sridharan, K.,** 2002: Fretting wear study of surface modified ni-ti shape memory alloy, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **13** :501-508.
- Tan, C. L., and Gao, Y. L.,** 1990: Treatment of bimaterial interface crack problems using the boundary element method, *Engineering Fracture Mechanics*, **36** (6):919-932.
- Tanaka, K.,** 1974: Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis, *Engineering Fracture Mechanics*, **36** (6): 919-932.
- Taşgetiren, S.,** 1997: Thermomechanical analysis of bimaterials with an interfacial crack, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tilbrook, M. T.,** 2005: Fatigue crack propagation in functionally graded materials, *Ph.D. thesis*, University of New South Wales.
- Tilbrook, M. T., Moon, R. J., and Hoffman, M.,** 2005: Crack propagation in graded composites, *Composites Science and Technology*, **65**, 201-220.
- Tokaji, K.,** 2005: Effect of stress ratio on fatigue behaviour in SiC particulate-reinforced aluminium alloy composite, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, **28**: 539-545.
- Topcu, M., ve Taşgetiren, S.,** 1998: *Mühendisler için sonlu elemanlar metodu*, PAÜ Mühendislik Fakültesi Matbaası, Ders kitapları Yayın No: 007, ISBN 975-6992-03-4, Denizli.
- Ucun, İ., Aslantas, K., Taşgetiren, S., and Büyüksagis, İ. S.,** 2008: Fracture path prediction of diamond segment in a marble cutting disc, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **31** (7): 517-525.
- Uğuz, A.,** 1996: *Kırılma mekaniğine giriş*, Uludağ Üniversitesi Basımevi.
- Url-1** <<http://www.frettingwear.com>>, alındığı tarih 23.05.2011.
- Url-2** <http://www.cfg.cornell.edu/software/franc2d_casca.htm>, alındığı tarih 23.05.2011.
- Varenberg, M., Halperin, G., and Etsion, I.,** 2002: Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. *Wear*, **252**: 902-910. Retrieved May 23, 2011, from <http://www.frettingwear.com>
- Vleugels, J., Basu, B., Hari, Kumar, K. C., Vitchev, R. G., and Van Der Biest O.,** 2002. Unlubricated fretting wear of TiO_2 -containing composites against

- bearing steel, *Metallurgical and Materials Transactions A* , **33**: 3847–3859.
- Wang, Y. S., and Gross, D.,** 2000: Analysis of a crack in a functionally gradient interface layer under static and dynamic loading. *Key Engrg Mater*, **183** (187): 331-336.
- Watanabe, Y., Kawamoto, A., ve Matsuda, K.,** 2002: Particle size distributions in functionally graded materials fabricated by the centrifugal solid-particle method, *Composites Science and Technology*, **62**: 881-888.
- Watanabe, Y., Yamanaka, N., and Fukui, Y.,** 1998: control of composition gradient in a metal-ceramic functionally graded material manufactured by the centrifugal method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **29**: 595-601.
- Watanabe, Y., Yamanaka, N., and Fukui, Y.,** 1999: Wear behavior of Al-Al₃Ti composite manufactured by a centrifugal method, *Metallurgical and Materials Transactions A* **30** (12): 3253-3261.
- Watanabe, Y., Kawamoto, A., and Matsuda, K.,** 1997: Particle size distributions in functionally graded materials fabricated by the centrifugal solid-particle method, *Composites Science and Technology*, **62** (6): 881-888.
- Waterhouse, R. B.,** 2000: Plastic deformation in fretting processes—a review," *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, D. W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, and C. B. Elliott, Eds., *American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000*.
- Weichen, S.,** 2005: On the dynamic energy release rate in functionally graded materials, *International Journal of Fracture*, **131** (3): L31-L35.
- Wessel, J. K.,** 2004: *Handbook of advanced materials: enabling new designs*, Wiley-Interscience Publication, 465-487.
- Whang, L. Q., and Gai, B. Z.,** 2008: Numerical computation of stress intensity factors for bolt-hole corner crack in mechanical joints, *Chinese Journal of Aeronautics*, **21** (5):411-416.
- Xu, F. M., Zhu, S. J., Zhao, J., Qi, M., Wang, F. G., Li, S. X. and Wang, Z. G.,** 2004: Effect of stress ratio on fatigue crack propagation in a functionally graded metal matrix composite, *Composites Science and Technology*, **64** :1795–1803.
- Xu, F. M., Zhu, S. J., Zhao, J., Qi, M., Wang, F. G., Li, S. X., and Wang, Z. G.,** 2003a: Fatigue crack growth in SiC particulate- reinforced Al matrix graded composite. *Mater Sci Eng A* **360**: 191-196.
- Xu, F. M., Zhu, S. J., Zhao, J., Qi, M., Wang, F. G., Li, S. X., and Wang, Z. G.,** 2003b: Comparison of the fatigue growth behaviour in homogeneous and graded SiC particulate reinforced Al composite. *J Mater Sci Lett* **22**: 899-901.
- Yıldırım, B., Dag, S., and Erdogan, F.,** 2005: Three dimensional fracture analysis of FGM coatings under thermomechanical loading, *International Journal of Fracture*, **132**: 369-395.

- Zahavi, E.**, 1996: *Fatigue design: Life expectancy of machine parts*, Taylor & Francis Inc, Boca Roca, ABD.
- Zhang, J., Wang, Y. Q., Zhou, B. L., and Wu, X. Q.**, 1998: Functionally graded Al/Mg₂Si In-situ composites, prepared by centrifugal casting, *J Mater Sci Lett*, **17** : 1677-1679.
- Zhu, M. H., Zhou, Z. R., Kapsa, P., and Vincent, L.**, 2001: An experimental investigation on composite fretting model, *Tribology International* **34**: 733-738.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Arzum ULUKÖY

Doğum Yeri ve Tarihi: Samsun 1975

Adres: PAÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- **Topçu, M., Taşgetiren, S., Uluköy, A.,** 2010: Alüminyum Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin Aşınma Davranışına Yaşlandırma İşleminin Etkisi, *13. Uluslararası Malzeme Sempozyumu (IMSP'2010)*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- **Ulukoy A., Topçu, M., Taşgetiren, S.,** The Effect of Aging Treatments on Wear Behavior of Aluminum Matrix Functionally Graded Material under Wet and Dry Sliding Conditions, *Materials Science and Engineering Technology*,(accepted, in press)